



INFOR-Projekt Nr. 24

Verbesserung der Homogenität der Zellstoffmahlung als Grundlage der Eigenschaftsoptimierung grafischer Papiere

SCHLUSSBERICHT

Januar 2003

Fachhochschule München
Studienrichtung Papiererzeugung

PTS Heidenau

Projektleiter:
Prof. Dr. H.-J. Naujock

Dipl.-Ing. G. Bär



**SCHLUSSBERICHT ZUM
INFOR-FORSCHUNGSPROJEKT 24**

**VERBESSERUNG DER HOMOGENITÄT DER
ZELLSTOFFMAHLUNG ALS GRUNDLAGE
DER EIGENSCHAFTSOPTIMIERUNG
GRAFISCHER PAPIERE**

**INSTITUTE: PTS Heidenau, Kompetenzzentrum Faserstofftechnik
Fachhochschule München, Fachbereich 05, Studienrichtung Pa-
piererzeugung**

PROJEKTLEITER
Dipl.-Ing. G. Bär

AUTOREN
Prof. H.-J. Naujock
Dipl.-Ing. G. Bär

Laufzeit
01.01.2001 - 30.06.2002

Heidenau/München, September 2002

Inhaltsverzeichnis

1. THESEN	3
2. WISSENSCHAFTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG	4
3. FORSCHUNGSZIEL	6
4. METHODISCHES VORGEHEN	7
4.1 Grundsätzliches Vorgehen	7
4.2 Rohstoffe	8
4.3 Mahlversuche	8
4.3.1 Versuche an der PTS	8
4.3.2 Versuche an der FHM	11
4.4 Charakterisierung der Faserstoffe	14
4.5 Charakterisierung des Mahlprozesses	14
5 ERGEBNISSE	19
5.1 Charakterisierung der Substrate	19
5.2 Einfluss des Mischungsverhältnisses von Lang- und Kurzfaserzellstoff auf das Mahlergebnis	31
5.3 Getrennt- und Gemischtmahlung von Zellstoffen	38
5.4 Bewertung der Homogenität des Mahlprozesses	47
5.5 Eigenschaftsentwicklung der Zellstoffe in Abhängigkeit von der Mahlgarnitur	49
5.6 Vergleich der Mahlanlagen PTS - FHM	54
6 Dank	55

Anhang

1. Thesen

1. Die **Bewertung der Homogenität** der Zellstoffmahlung erfolgt auf der Basis der Homogenitätskennzahl. Die Homogenitätskennzahl beruht auf einer energetischen Betrachtung und setzt den spezifischen Mahlarbeitsbedarf ins Verhältnis zu der Energiemenge, die der tatsächlich bearbeitete Faserstoffanteil aufgenommen hat. Werden alle Fasern bearbeitet (Idealfall), ist die Homogenitätskennzahl eins oder einhundert Prozent.
2. Aus vorangegangenen Untersuchungen ist bekannt, dass für eine überwiegende Fibrillierung des Faserstoffes eine **Homogenitätskennzahl** von größer 30% notwendig ist. Derartige Kennwerte werden bei der Mahlung mit der 60-Grad-Garnitur erreicht. Bei der Verwendung einer Garnitur mit einem Schnittwinkel von 15 Grad liegt die Homogenitätskennzahl ca. eine Zehnerpotenz niedriger.
3. Eine niedrige Homogenitätskennzahl bedeutet, dass wenige Fasern bei einem Durchgang durch den Refiner bearbeitet werden und eine sehr hohe Energiemenge aufnehmen. Die Folge ist fast unweigerlich eine sehr starke Faserkürzung, wie z.B. am Rückgang des Langfaserstoffes (Rü 30) und am raschen Anstieg des SR-Wertes sichtbar wird.
4. Die **Homogenität** wird am stärksten durch die Auswahl des Schnittwinkels beeinflusst. Hohe Schnittwinkel bedeuten hohe Homogenitätskennzahlen und in der Folge ein hohes Potential bei der Entwicklung statischer und dynamischer Festigkeiten. Des Weiteren korreliert die Homogenitätskennzahl mit der Mahlresistenz der Faserstoffe. Je mahlresistenter diese sind, desto höher ist die Homogenitätskennzahl.
5. Bei der **Getrennt- bzw. Gemischtmahlung** von Zellstoffen zeigt sich, dass die dynamische Festigkeit das höchste Niveau erreicht, wenn getrennt gemahlen und anschließend gemischt wird. Das Optimierungspotential wurde hierbei noch nicht einmal voll ausgeschöpft, da gemäß Festlegung alle Faserstoffe auf 100 kWh/t (15°-Garnitur) bzw. 150 kWh/t (60°-Garnitur) gemahlen und anschließend gemischt wurden. Noch bessere Ergebnisse wären evtl. denkbar, wenn die Langfaser auf das Optimum der dynamischen Festigkeit gemahlen würde anstelle eines eher willkürlich festgelegten Wertes für W_{spez} .
6. Die statische Festigkeit lässt sich auch bei einer **Gemischtmahlung** sehr gut entwickeln. Die Gemischtmahlung hat hier leichte Vorteile bzw. keine wesentlichen Nachteile.
7. Die in den Thesen 5 und 6 getroffenen Feststellungen sind unabhängig von der **Mahlresistenz** der Zellstoffe bzw. der Art der Kombination mahlresistenter und wenig mahlresistenter Zellstoffe gültig. Die mahlresistenten Zellstoffe ergeben bessere Festigkeitseigenschaften und dominieren auch die Eigenschaftskennwertentwicklung der Mischungen, in denen sie enthalten sind.
8. Ist die dynamische Festigkeit eine kritische Größe hinsichtlich der Produktqualität, sollte eine **Getrenntmahlung** erfolgen.
9. Die Verwendung keramisch **beschichteter Scheiben** erfüllte die in sie gesetzten Erwartungen nicht. Die Keramikbeschichtung hatte einen kürzenden Mahlcharakter der Garnitur zur Folge. So lag z.B. die Durchreißfestigkeit 30 bis 50 % niedriger im Vergleich zur konventionellen Scheibe und fiel schlechter aus als beim Steilkegel.
10. Die **Versuchsstände der PTS und der FHM** sind hinsichtlich des Mahlungsergebnisses gut miteinander vergleichbar, da mit gleichen Durchsatzmengen, Drehzahlen, Garniturgeometrien und Messermaterial gearbeitet wurde. Hinsichtlich beider Mahlanlagen gilt, dass die Entwicklung der Eigenschaftskennwerte tendenziell gut mit den Ergebnissen von Praxismahlanlagen übereinstimmt, wobei vergleichbare Festigkeitseigenschaften in der Regel mit einem niedrigeren masse-spezifischen Mahlarbeitsbedarf erzielt werden.

2. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Problemstellung

Die Mahlung von Faserstoffen und insbesondere von Zellstoffen gehört zu den energieintensivsten Prozessen der Papiererzeugung. Sie besitzt sowohl eine hohe technologische als auch wirtschaftliche Bedeutung. Die wirtschaftliche Bedeutung der Zellstoffmahlung resultiert im wesentlichen aus zwei Faktoren: dem Zellstoffpreis und dem erforderlichen Energieaufwand für den Mahlprozess. Bezüglich der Gesamtkosten für die Herstellung von Druckpapieren auf Zellstoffbasis machen die Faserstoffkosten in Abhängigkeit vom aktuellen Zellstoffpreis 40...50 % aus. Eine Reduzierung des Zellstoffeinsatzes sowie eine Minimierung des spezifischen Energieaufwandes mit Hilfe verbesserter Mahlungstechnologien stellt somit eine wesentliche Möglichkeit der Kosteneinsparung dar.

Innerhalb der Stoffaufbereitung stellt der Mahlprozess einen der bedeutendsten Faktoren zur Beeinflussung der Faserstoffqualität dar. Ausmaß sowie Art und Weise der Mahlung definieren die Eigenschaften des Ganzstoffes vor der Papiermaschine. Bei der Herstellung von Feinpapieren sind vor allem gute Bedruckbarkeit, Formation, optische Eigenschaften, Steifigkeit und Glätte in Kombination mit ausreichenden Festigkeitseigenschaften von Bedeutung. Viele dieser Eigenschaften werden durch den Einsatz von Kurzfasermaterial erzielt und deshalb geht der Trend zum verstärkten Einsatz von Laubholzzellstoffen [1]. Damit wächst die Bedeutung der Festigkeitseigenschaften, die durch den verbleibenden Langfaseranteil gewährleistet werden müssen und für die sogenannte *runnability* des Papiers verantwortlich sind. Unter diesem Aspekt kommt der Mahlung eine wichtige Aufgabe in der Stoffaufbereitung zu.

Ein großer Nachteil messergarnierter Mahlmaschinen heutiger Bauart ist die hohe Inhomogenität der Faserbehandlung, die sich vor allem aus der fehlenden Führung des Stoffes durch die Mahlgarnitur ergibt. Bedingt durch den sehr kleinen Mahlpalt und das vergleichsweise große Volumen in den Refinernuten, wird nur ein geringer Anteil der Fasern einer Mahlbehandlung unterzogen, während der Großteil unbehandelt durch die Refinernuten entweicht. Dieser Effekt tritt besonders bei Laubholzzellstoffen auf, die eine hohe Faserwanddicke aufweisen.

Der unkontrollierte Transport der Fasern durch den Refiner führt dazu, dass einige der bis zu 5×10^9 Fasern, die pro Sekunde einen großen Refiner passieren, niemals in die aktive Zone gelangen, während andere Druck- und Scherbeanspruchungen mit einer Frequenz von 5000 Hz erfahren können [2].

Die Vorstellungen über die Homogenität der Mahlbehandlung gingen aus einer Reflexion über die Ansätze von HIETANEN und EBELING [3] hervor.

Zur Charakterisierung der Stoffwandlung infolge Mahlung wird als Vergleichsgröße oftmals die massebezogene Mahlarbeit (W_{spez}) herangezogen. Da p.d. unterstellt wird, dass die aufgewendete Energie gleichmäßig in den gesamten Faserstoff eingetragen wird - was so nie der Fall ist - ist die Art und Weise der Stoffwandlung (z.B. im Vergleich der Extremlagen überwiegend fibrillierend - überwiegend kürzend) mit Hilfe von W_{spez} allein nicht zufriedenstellend beschreibbar.

Aus diesem Grunde erschien es wünschenswert, abschätzen zu können, welcher Faserstoffanteil unter günstigsten Bedingungen überhaupt bearbeitbar ist und wel-

cher Energieanteil auf ihn entfällt. Diese Überlegung führte zur Ableitung der Homogenitätskennzahl, wie in Abbildung 1 gezeigt.

$$H = \frac{W_{spez}}{W_x}$$

Abbildung 1: Ableitung der Homogenitätskennzahl

Der Begriff der Homogenität wird dabei auf die Gleichmäßigkeit des Energieeintrages angewandt. Wenn die gesamte Faserstoffmenge, die der Mahlmaschine zugeführt wird, auch bearbeitet wird, dann entspricht W_x (Energieaufnahme des bearbeiteten Faserstoffanteils) W_{spez} , die Homogenität wäre ideal und die Homogenitätskennzahl erhält den Wert 1 oder 100 %. Dies ist ein Grenzfall, der nur theoretisch erreichbar ist. Außerdem liefert die Homogenitätsbetrachtung noch Informationen über den Mengenanteil des bearbeiteten Faserstoffs, hier jeweils zu Beginn und am Ende der Mahlung. Die Zwischenwerte können in guter Näherung linear interpoliert werden.

Stehen mehrere Faserstoffkomponenten für die Fertigung eines Papiers zur Verfügung, kann man sie entweder vor der Mahlung mischen und gemeinsam auf das gewünschte Niveau in den Refinern behandeln, oder die getrennte Mahlung mit anschließender Mischung in entsprechenden Verhältnissen wählen. Es liegt auf der Hand, dass bei der Mahlung von Zellstoffen, die sich in ihrer Fasermorphologie stark unterscheiden, wie Nadel- und Laubholz, der Getrenntmahlung gewisse Vorzüge zuzuschreiben sind. Die Vor- und Nachteile einer getrennten oder gemischten Mahlung hängen vom Mischungsverhältnis, den zu behandelnden Zellstoffsorten und den geforderten technologischen Größen ab.

Als die beiden Einflussgrößen, welche die Festigkeit des Papierblattes weitgehend bestimmen, werden Faserkürzung und Faserfibrillierung erachtet. Durch die Auswahl geeigneter Mahlwerkzeuge und Mahlbedingungen hat man die Möglichkeit, eine der beiden Faserzustände mehr oder weniger ausgeprägt in Erscheinung treten zu lassen, obwohl man in keinem Fall nur eine der Mahlungsarten konsequent für sich allein durchführen kann. Zur Erreichung guter Festigkeitseigenschaften hat man die Mahlung stärker in Richtung auf die Fibrillierung und Hydratisierung zu lenken, wobei allerdings bei Langfaserzellstoffen Wert auf eine genügende Faserkürzung zu legen ist, um eine befriedigende Blattformation zu erhalten [4].

Durch Faserstoffmischungen werden die Eigenschaften aber auch die Kosten des Papiers beeinflusst. Während die Langfaserkomponente bei der Papierherstellung als Festigkeitsträger wirksam wird, sollte die Kurzfaserkomponente als Träger für die optischen Eigenschaften und als Korrekturglied für die Blattformation eingesetzt werden.

Da die Kürzung der Fasern für die gewünschte Formation nicht immer ausreicht, sondern vielmehr durch die Mischung mit einem Kurzfaserzellstoff erzielt wird, sollte die teurere Langfaserkomponente auf ein möglichst hohes Festigkeitspotenzial gemahlen werden. Dies ermöglicht in der Regel eine weitere Reduzierung des Langfaseranteils. Für die Auswahl der Rohstoffe müssen die jeweiligen relevanten technologischen Größen bekannt sein, ebenso wie das Verhalten der Zellstoffe in der Mischung [5].

Literaturverzeichnis

- [1] N.N.
Optimised refining of short fibres for fine paper
Paper Technology 42, 25 – 28 (2001) Nr. 1
- [2] BAUMGARTEN H.-L.
Theorie und Wirkung der Zellstoffmahlung und anderer Faserumformprozesse
Das Papier 31, V108 - V117 (1977) Nr. 10A
- [3] EBELING K. und S. HIETANEN
Homogeneity in Refining Action, Effects on Fibre and Paper Structure
Unveröffentlichte Arbeit, Helsinki University of Technology, 1984
- [4] GÖTTSCHING L. und L. NORDMAN
Mahlungsuntersuchungen unter Verwendung von ungebleichtem Birken- und Kiefernulfatzellstoff
Das Papier 20, 14 - 22 (1966) Nr. 1
- [5] SEPKE P.W. und H. SELDER
Grundlagenüberlegungen zur Auswahl und Behandlung von Zellstoffen für die Druckpapierherstellung
Wochenblatt für Papierfabrikation 120, 387 - 393 (1992) Nr. 10

3. Forschungsziel

Im Mittelpunkt des Vorhabens stand die Beantwortung der Fragestellung, ob die für grafische Papiere zur Verfügung stehenden Lang- und Kurzfasern Zellstoffe getrennt gemahlen werden müssen, leiten sich doch daraus wirtschaftliche Aspekte zum Material-, Energie- und Investitionsmanagement in der Stoffaufbereitung einer Papierfabrik ab. Ein weiteres Ziel dieses Vorhabens bestand darin, den Anteil an behandelten Fasern bei einem Refinerdurchgang wesentlich zu erhöhen, die eingetragene mechanische Arbeit gleichmäßiger auf das Fasermaterial zu verteilen und dadurch den damit verbundenen spezifischen Energieaufwand um ca. 30 % zu senken.

Im Ergebnis des Vorhabens sollten praktikable Entscheidungskriterien für die industrielle Anwendung von Getrennt- bzw. Gemischtmahlung in Abhängigkeit vom

- Zellstoffeinsatz (Lang-/Kurzfasern),
 - den Mischungsverhältnissen,
 - dem angestrebten Mahlungszustand und
 - den vorhandenen Maschinen (Kegel-/Scheibenrefiner)
- zur Verfügung gestellt werden.

Die Ergebnisse sollten darüber hinaus Entscheidungshilfen für Neu- und Ersatzinvestitionen bieten.

4. Methodisches Vorgehen

4.1 Grundsätzliches Vorgehen

Die Untersuchungen erfolgten an zwei Mahlversuchsständen der beteiligten Forschungseinrichtungen im halbertechnischen Maßstab. Abbildung 2 veranschaulicht das prinzipielle Herangehen, dass im Rahmen eines Kick-off-Meetings mit den Projektbegleitern vereinbart wurde.

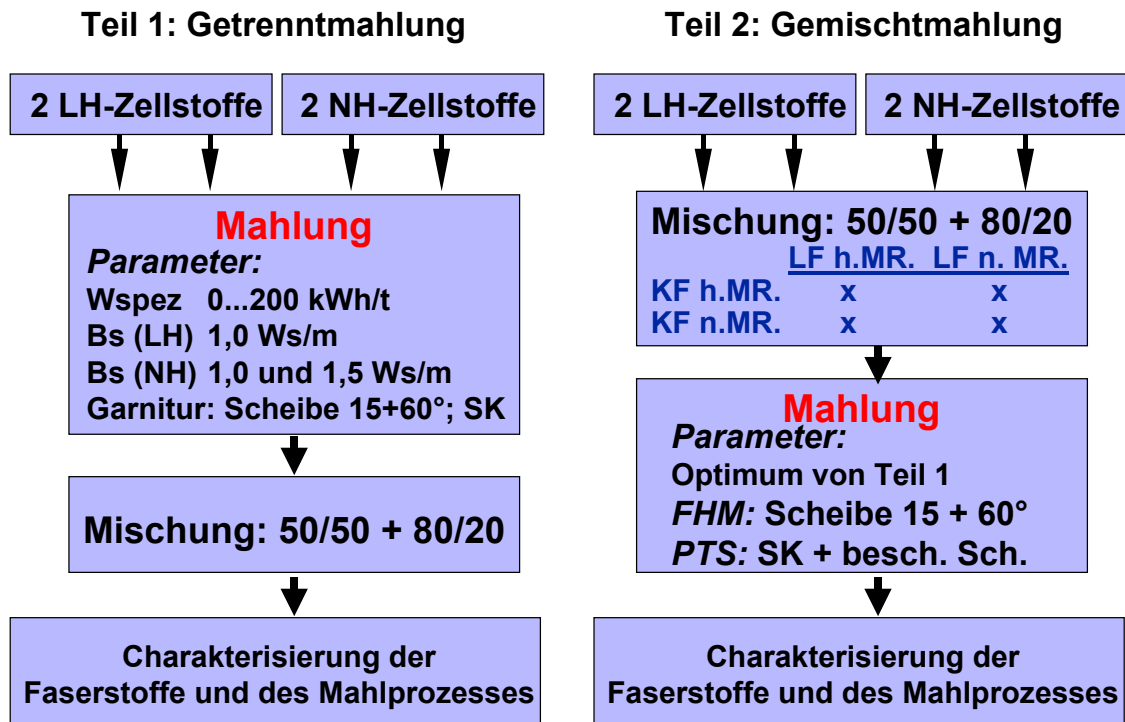


Abbildung 2: Versuchsprogramm

Im ersten Teil wurden jeweils zwei Laub- (LH) und Nadelholz-(NH) Zellstoffe separat gemahlen. Zu diesem Zweck gelangten bei der PTS eine unbeschichtete und eine beschichtete Scheibengarnitur (besch. Sch.), eine Steilkegelgarnitur (SK) sowie an der FHM zwei unbeschichtete Scheibengarnituren mit unterschiedlichem Schnittwinkel zum Einsatz. Die Versuche mit der 60°-Scheibe bei beiden Partnern dienten dem direkten Vergleich der beiden Mahlanlagen.

Nach der Getrenntmahlung erfolgte die Mischung der Komponenten in Anteilen von 50:50 und 20 (NH): 80 (LH). Dabei wurde der Mahlpunkt bei einem spezifischen Energieeintrag von 150 kWh/t für sämtliche Mischungen zugrundegelegt. Das trifft auch für die Mischungen im Teil 2 vor der Mahlung zu. Bei der Gemischtmahlung wurden die aus dem ersten Teil als optimal erkannten Prozessparameter angewandt. Dabei kamen die keramikbeschichtete Scheibe und die Steilkegelgarnitur bei der PTS sowie die mit 15 bzw. 60° Schnittwinkel versehene Scheibengarnitur der FHM zum Einsatz.

4.2 Rohstoffe

Die Auswahl der Zellstoffe erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Projektbegleitern in Abhängigkeit von der Mahlresistenz der Substrate. So wurden jeweils ein Kurz- (KF) bzw. Langfaserzellstoff (LF) mit hoher (h. MR) und niedriger Mahlresistenz (n. MR) in die Untersuchungen einbezogen und in der in Abbildung 2 dargestellten Kombination miteinander gemischt. Es handelt sich um handelsübliche Zellstoffe, die für den Einsatz in grafischen Papieren häufig verwendet werden.

Die ausgewählten Faserstoffe und ihre rohstoffseitige Herkunft gehen aus Tabelle 1 hervor:

Bezeichnung	Bleichsequenz	Holzart
Irving NBHK A 1711	ECF	Birke
CELBI PP	ECF	Eukalyptus
Irving NBSK A 1118	ECF	Fichte/Tanne/Kiefer
SUN ECF	ECF	Fichte/Kiefer

Tabelle 1: Eingesetzte Zellstoffe

Die Halbstoffe lagen als trockene Bögen vor und wurden, jeweils aus der gleichen Lieferung, chargenweise in München (FHM) und Heidenau (PTS) verarbeitet.

4.3 Mahlversuche

4.3.1 Versuche an der PTS

Für die Mahlungsuntersuchungen an der PTS Heidenau wurde der in das Faserstoff-Technikum integrierte Laborrefiner genutzt (Abbildung 3).



Abbildung 3: PTS-Laborrefiner

Die Stoffvorbereitung für die Mahlung erfolgte in der Weise, dass die Zellstoffbögen kleingerissen, in Wasser suspendiert und 10 min in einem Technikumpulper bei 5 % Stoffdichte aufgeschlagen wurden. Unmittelbar danach wurde die Zellstoffsuspension in den Aufgabetrichter des Refiners überführt, auf eine Stoffdichte von 4 % eingestellt, die Steuerung für den Mahlversuch mit den Zielparametern programmiert und in einem sogenannten Nulldurchgang bei einem Mahlspalt von 2 mm die Leerlaufleistung bestimmt. Der Leerlaufleistungsanteil wurde im Programm immer von der Gesamtleistungsaufnahme abgezogen, so dass sich alle folgenden Angaben zur spezifischen Mahlarbeit auf die effektive Mahlleistung des Refiners beziehen. Im Anschluss erfolgte der Start des Mahlprozesses.

Die Probenahme erfolgte automatisch nach Erreichen der im Programm vorgegebenen Energieeinträge. Nach Beendigung des Mahlversuches wurden die Faserstoffproben aus den Probenahmebehältern entnommen und über einen BRK-Blattbildner zu Standard-Prüfblättern verarbeitet.

Bei den Untersuchungen kamen zwei verschiedene Scheiben- und eine Steilkegelgarnitur zum Einsatz:

- Scheibe mit 60° Schnittwinkel aus Cr-Ni-Stahl
- Scheibe mit 60° Schnittwinkel mit Plasmabeschichtung
- Steilkegelgarnitur mit 30° Schnittwinkel

Neben der unbeschichteten Chromstahl-Scheibengarnitur wurde eine gleichartiger Rohling nach einem Plasma-Verfahren durch die Firma ARTE in Gieres (Frankreich) mit einer Keramikbeschichtung versehen.

Die wesentlichen Garniturparameter können der Tabelle 2 entnommen werden.

Bezeichnung	<i>Scheibe 60°</i>		<i>besch. Scheibe</i>		<i>Steilkegel</i>	
	Rotor	Stator	Rotor	Stator	Rotor	Stator
Messeranzahl	45	45	45	45	35	45
Teilung [°]	8,0	8,0	8,0	8,0	10,3	8,0
Nutbreite [mm]	7	7	7	7	7	7
Messerlänge [mm]	55,7	55,7	55,7	55,7	85	70
Messerwinkel [°]	30	30	30	30	30	0
Garniturkonstante k [km]	0,1128		0,1128		0,1339	
Messermaterial	Chromstahl 1.4571		Chromstahl mit Plasmabeschichtung		Chromstahl 1.4571	
Sekundliche Schnittlänge (bei 1500 min ⁻¹) [km/s]	2,82		2,82		3,35	
Mittlerer Durchmesser der wirksamen Mahlfäche [mm]	240		240		203	

Tabelle 2: Daten der eingesetzten Mahlgarnituren

Die verwendeten Garnituren sind in den Abbildungen 4 bis 6 dargestellt.

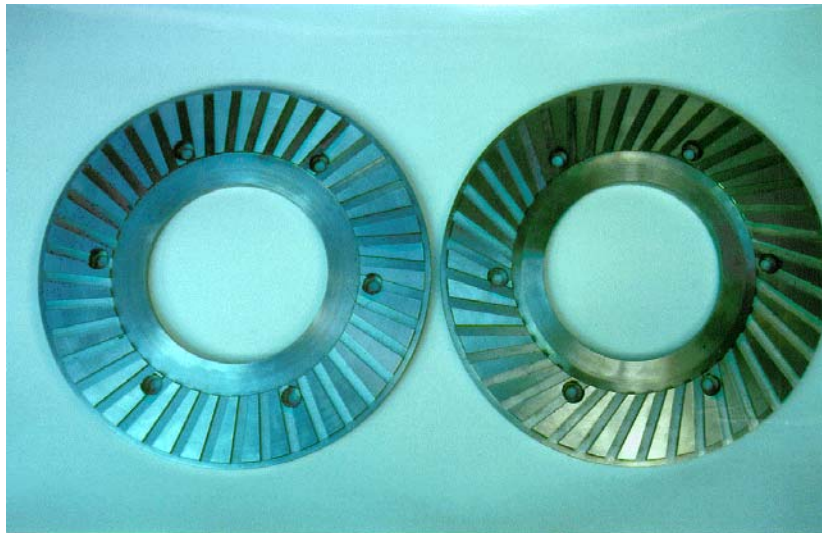


Abbildung 4: Scheibengarnitur (unbeschichtet)

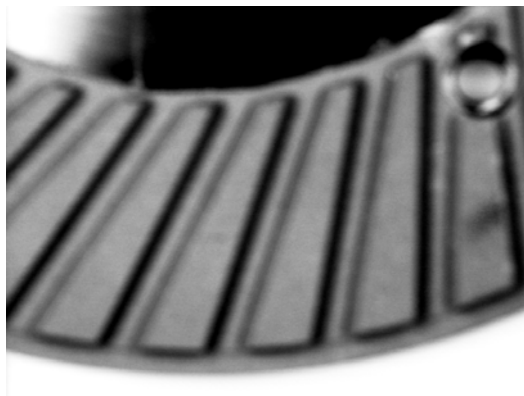


Abbildung 5: Scheibengarnitur (keramikbeschichtet)



Abbildung 6: Steilkegelgarnitur

4.3.2 Versuche an der FHM

Für die Mahlungsversuche an der Fachhochschule München stand ein von der Fa. Andritz gelieferter Versuchsstand zur Verfügung, wie in den nachfolgenden Abbildungen gezeigt.



Abbildung 7: Büttensystem des FHM Versuchsstandes



Abbildung 8: Refiner und Steuereinheit (links) des FHM-Versuchsstandes

Die prinzipielle geometrische Ähnlichkeit der Mahlzone (Durchmesser der Mahlscheiben, Einlaufdurchmesser) ließ die Beschaffung vergleichbarer Mahlscheiben zu, wie in Tabelle 2 angegeben. Im Unterschied zu den Mahlgarnituren der PTS handelt es sich hierbei jedoch um gegossene Garnituren aus CrNi 17.4, die im nachfolgenden Bild gezeigt werden. Die gleichen Scheiben stehen auch in NiHard IV zur Verfügung, kamen in Rahmen des Projektes jedoch nicht zum Einsatz.



Abbildung 9: Mahlgarnituren der FHM

Die Schwachstelle des Versuchsstandes der FHM lag im Antrieb der Stoffpumpe, genauer gesagt im zugehörigen Frequenzumrichter des Antriebs, der einen Start der Pumpe nicht immer reibungslos erfolgen ließ. Aus diesem Grunde haben wir den Versuchsstand erst am 23.04.2002 von der Fa. Andritz übernommen. Dies hatte auch Verzögerungen bei der Projektbearbeitung zur Folge. Auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse hatten die Pumpenprobleme jedoch keinen Einfluss, denn wenn der Start unter gewissen Improvisationen einmal gelungen war, lief sie im Bereich der benötigten Drehzahlen problemlos.

Bei der Versuchsdurchführung versuchten wir die Bedingungen der PTS-Anlage so gut wie möglich nachzustellen, wobei es konstruktionsbedingt einige Besonderheiten gab. Das Dispergieren der Zellstoffe erfolgt im Versuchstand der FHM nicht in einem Pulper, sondern in der Bütte 1 (links im Bild des Versuchsstandes). Dies hatte zur Folge, dass für einen stabilen Lauf des Büttenrührwerks 400 dm³ Füllvolumen oder entsprechend 16 kg otro Faserstoff (vorzerkleinert auf ca. 25 cm mal 25 cm Bogengröße) pro Versuch benötigt wurden. Glücklicherweise sind von den Versuchen der PTS noch Restposten an Zellstoffen übrig geblieben, die uns freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden, so dass trotz unseres hohen Verbrauchs genügend Substrat zur Verfügung stand.

In Vorversuchen ermittelten wir weiterhin, dass eine Dispergierdauer von 10 Minuten zumindest für den Eukalyptuszellstoff nicht ausreichte und zu einer Anzahl ca. 5 cm mal 5 cm großen Stippen führte, die das ohnehin schon labile Anlaufverhalten der Stoffpumpe noch mehr gefährdet hätten. Aus den 20 min Quelldauer der PTS und anschließenden 10 min Dispergierdauer wurden daher 30 min Rühdauer ohne Vorquellung im Versuchstand der FHM. Die Leerlaufleistung wurde in ähnlicher Weise wie im Falle der PTS durch einen fünfminütigen Lauf des Refiners bei 2 mm Spaltweite ermittelt. Dies hatte außerdem noch den Vorteil, dass der Faserstoff in ca. einem Durchlauf entstippt werden konnte, ehe man die Nullprobe entnahm. Weitere wichtige Parameter waren:

- Durchflussmenge: 100 dm³/min (± 2 dm³/min)
- spezifische Mahlkantenbelastung 1,0 Ws/m bzw. 1,5 Ws/m (+0,1 Ws/m; - 0 Ws/m).

Die Ablesegenauigkeit für den Mahlspalt betrug 10 µm wobei wir feststellen konnten, dass der Refiner aufgrund seiner außerordentlich robusten Konstruktion eine sehr gut reproduzierbare Mahlspalteinstellung zuließ.

Wir begannen die Versuche mit einer Stoffdichte von 4,0% und haben festgestellt, dass die Stoffdichte im Laufe der Versuchsdurchführung auf 3,6% bis 3,8% abnahm. Ursachen liegen darin, dass beim Dispergieren durch den Rührer Suspension an den Büttenrand geschleudert wird, die das Rührwerk während des Versuches nicht mehr erfasst, die partiell entwässert und die mit Wasser abgespült werden müsste, was wiederum zur Verdünnung und nicht genau reproduzierbaren Verhältnissen geführt hätte. Weiterhin lässt sich nicht verhindern, dass eine kleine Menge Sperrwasser durch die Refinerstopfbüchse eintritt. Da die Versuchsdauer aufgrund der hohen Füllmenge für bis zu 200 kWh/t bei knapp zwei Stunden lag, ist diese Menge nicht vernachlässigbar.

4.4 Charakterisierung der Faserstoffe

Die Bewertung der Mahlungsergebnisse erfolgte durch Messungen an der Faserstoffsuspension und durch Messungen an standardisierten Prüfblättern, die aus der jeweiligen Suspension hergestellt wurden. Bezugspunkt für die Bewertung ist der ungemahlene Faserstoff.

(1) Suspensionseigenschaften des Faserstoffes

- Entwässerungswiderstand nach DIN/ISO 5267/1
- Fraktionszusammensetzung nach McNett (Siebe Nr. 30, 50, 100, 200)
- Wasserrückhaltevermögen

(2) Gefüge- und optische Eigenschaften von Standard-Prüfblättern aus den gemahlten Stoffen

- Rohdichte
- Bruchkraft, Bruchdehnung, Elastizitätsmodul und Reißlänge
- Durchreißwiderstand nach Elmendorf
- Luftdurchlässigkeit (Gurley)
- Spaltarbeit (Scott-Bond)
- Lichtstreu- und Absorptionskoeffizient (s und k)

4.5 Charakterisierung des Mahlprozesses

Massespezifische Mahlarbeit

Die Charakterisierung des Mahlungsprozesses erfolgte anhand des Energieeintrages über die massebezogene Mahlarbeit, für die gilt:

$$W_{spez} = \frac{P_{eff}}{m_{otro}} \Delta t \quad (1)$$

Die Bestimmung der effektiven Leistung erfolgt über eine elektrische Leistungsmessung des Antriebes (Wirkleistungsmessung). Von dieser Wirkleistung bei der Mahlung des Faserstoffes wird als Konstante für den jeweiligen Versuch die Leerlaufleistung bei Wasserumtrieb abgezogen. Der Prozessrechner integriert (FHM) im Sekundentakt diesen Wert über die Zeit und bringt ihn zur Anzeige.

Spezifische Mahlkantenbelastung

Zum Vergleich der Intensität der Mahlbehandlung verwendeten wir die spezifische Mahlkantenbelastung. Sie geht auf eine Definition von JAGENBERG zurück und wurde in ihrer derzeitigen Form von BRECHT und SIEWERT festgeschrieben. In der Verfahrenstechnik ist es nicht üblich, eine Spezifizierung vorzunehmen, ohne anzugeben, auf welche physikalische Größe Bezug genommen wird. Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, die spezifische Mahlkantenbelastung als eine Intensitätskenngröße zu verstehen, die angibt, welche Energiemenge über eine bestimmte Messerlänge in

die Faserstoffsuspension eingetragen wird. Die Mahlkantenbelastung im Sinne einer wirksamen (und messbaren) Kraft aufzufassen, führt daher auf Irrwege. Als Messeinheit für die spezifische Mahlkantenbelastung sollten daher Ws/m oder J/m vor N - formal ebenfalls richtig - präferiert werden.

Es gilt:

$$B_s = \frac{P_{eff}}{L_s} \quad (2)$$

Dabei ist L_s die sekundliche Kantenlänge. In der Literatur gilt allgemein:

$$L_s = z_R z_{St} l \cdot n \quad (3)$$

mit

z_R Anzahl der Rotormesser
 z_{St} Anzahl der Statormesser
 l überschschnittene Messerlänge
 n Drehzahl

Eine mathematisch bessere Formulierung des Sachverhalts mag lauten:

$$L_s = \sum_{i=1}^k (z_{R,i} z_{St,i} l_i) n \quad (4)$$

mit

$z_{R,i}$ Anzahl der Rotormesser der Messerart i
 $z_{St,i}$ Anzahl der Statormesser der Messerart i
 l_i Länge des Messers der Messerart i .

Homogenitätskennzahl

Der Homogenitätskennzahl liegt die Überlegung zugrunde, dass nicht die gesamte dem Refiner zugeführte Faserstoffmenge tatsächlich auch bearbeitet wird. Die Bewertung über die massebezogene Mahlarbeit unterstellt aber, dass der gesamte Faserstoff die gleiche Energiemenge aufgenommen hat. Wenn es gelingt, den Mengenanteil des Faserstoffes abzuschätzen, der tatsächlich bearbeitet wird und die Energieaufnahme auf diesen bezieht, dann bezieht sich die Homogenität auf die Gleichmäßigkeit des Energieeintrages. Wenn die gesamte Faserstoffmenge, die der Mahlmaschine zugeführt wird, auch bearbeitet wird, dann entspricht W_x (Energieaufnahme des bearbeiteten Faserstoffanteils) W_{spez} , die Homogenität wäre ideal und die Homogenitätskennzahl erhält den Wert 1 oder 100 %. Dies ist ein Grenzfall, der nur theoretisch erreichbar ist. Um jedoch W_x definieren zu können, ist es in einem ersten Schritt notwendig, die unter günstigsten Umständen bearbeitbare Faserstoffmenge berechnen zu können.

Die Menge des Faserstoffes, der bei einem Durchgang durch die Mahlmaschine bearbeitet werden kann, hängt offensichtlich von den geometrischen Bedingungen im

Inneren des Prozessraumes, von den Prozessparametern und den Guteigenschaften ab. Alle drei Faktoren müssen daher angemessen berücksichtigt werden.

Des weiteren kann davon ausgegangen werden, dass in der Zone 1 (innerhalb der Nuten) keinerlei Faserstoffbearbeitung stattfindet. Höher ist dagegen die Wahrscheinlichkeit der Bearbeitung in Zone 3 (auf den Messeroberflächen), wobei wiederum auch Faserstoff erfasst wird, der zuvor die Zone 2 (Begegnung zweier Messerkanten) passiert hat. Im Sinne einer Grenzwertbetrachtung für den günstigsten Fall kann man also annehmen, dass der in Zone 3 befindliche Faserstoff potentiell bearbeitet werden kann. Dabei kommt es in der Zone 3 zu einer Konsistenzerhöhung, die experimentell zwar nachgewiesen, messtechnisch aber bisher nicht bewertet werden konnte.

$$x_m = \frac{A_M d c_3}{A_N (2t + d) c_1} \quad (5)$$

In **Gleichung 5** wird eine Betrachtung der Faserstoffanteile (Masseanteile) im Vergleich der Zonen 3 und 1 vorgenommen. Dabei wird das jeweilige Volumen dieser Zonen mit der in ihnen herrschenden Stoffdichte multipliziert. Es bedeuten:

c_1 Stoffdichte in Zone 1;
 c_3 Stoffdichte in Zone 3;
 x_m bearbeitete Faserstoffmenge.

Da die Stoffdichte in der Zone 3 nicht exakt bekannt ist, wird vorgeschlagen, an dieser Stelle ebenfalls mit einem Grenzwert zu arbeiten. Die maximale Stoffdichte korrespondiert dabei mit der Wassermenge, die mit mechanischen Mitteln nicht mehr aus dem Faserstoff entfernbar ist, ausgedrückt durch das Wasserrückhaltevermögen (WRV):

$$c_3 = \frac{1}{WRV + 1} \quad (6).$$

Da sich im Verlaufe der Mahlung der WRV-Wert ändert, verringert sich die in Zone 3 bearbeitbare Faserstoffmenge in Abhängigkeit vom Zustand des Faserstoffes, was so durchaus der Realität entspricht.

Das Volumen in der Mahlzone ergibt sich aus dem Volumen über den Messern und über den Nuten:

$$V_{ges} = V_N + V_M \quad (7).$$

Dabei bedeuten:

V_{ges} Gesamtvolumen der Mahlzone;
 V_M Volumen über den Messern;
 V_N Volumen über den Nuten.

Daraus ergibt sich die Stoffdichte in der Zone 1 zu:

$$c_1 = \frac{c_A V_{ges} - c_3 V_M}{V_N} \quad (8).$$

Wenn man das Volumen über den Messern ins Verhältnis setzt zum Volumen über den Nuten, dann lässt sich ein Volumenanteil definieren:

$$x_V = \frac{V_M}{V_N} \quad (9).$$

Unter Berücksichtigung der aufgestellten **Gleichungen (5), (8) und (9)** ergibt sich der bearbeitete Masseanteil des Faserstoffes dann zu:

$$x_m = \frac{c_3}{c_A + \frac{c_A}{x_v} - c_3} \quad (10).$$

Berechnung der Energieaufnahme der bearbeiteten Faserstoffmasse (W_x)

Für die Energieaufnahme des bearbeiteten Faserstoffanteils gilt allgemein:

$$W_x = \int_{t_1}^{t_2} \frac{P_{eff}}{m_x(t)} dt \quad (11).$$

Dabei bedeuten:

m_x *bearbeitete Faserstoffmasse;*
 t_1 *Beginn der Mahlung;*
 t_2 *Ende der Mahlung.*

Unter bestimmten Bedingungen kann die **Gleichung (11)** vereinfacht werden. Probleme kann die mathematische Formulierung der Funktion $m_x(t)$ bereiten. Hier ist von Fall zu Fall zu unterscheiden. Letztlich sind aber alle bei der Faserstoffmahlung vorkommenden Möglichkeiten definierbar und lösbar, wenn nicht elementar, dann numerisch. Deshalb soll an dieser Stelle eine partikuläre Lösung vorgestellt werden, die für die Rezirkulationsmahlung mit konstanter spezifischer Mahlkantenbelastung gilt. In diesem Falle ist P_{eff} konstant, so dass gilt:

$$W_x = P_{eff} \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{m_x(t)} \quad (12).$$

Die Funktion $m_x(t)$ kann nur experimentell ermittelt werden, da Mahlspace und WRV sowie ihr zeitlicher Verlauf zu Beginn der Mahlung in der Regel nicht bekannt sind. Eine Vielzahl von Voruntersuchungen hat gezeigt, dass die Abhängigkeit des bearbeiteten Faseranteils vom massebezogenen Mahlarbeitsbedarf (und bei konstantem Bs damit auch die Abhängigkeit von der Zeit) in guter Näherung linear ist. Aus diesem Grunde kann man schreiben:

$$m_x(t) = m_{otro}(x_{m,0} + kt) \quad (13).$$

$x_{m,0}$ und k liefert dabei die lineare Regression von X_m . **Gleichung 12** lässt sich damit auf einfachem Wege lösen:

$$W_x = \frac{P_{eff}}{m_{otro}} \int_t^{t_2} \frac{dt}{(x_{m,0} + kt)} \quad (14)$$

Die Integrationsgrenzen sollten dabei in geeigneter Weise gewählt werden:

$$t_1 = 0 ; t_2 = t_{end} \quad (15).$$

Die Integration der **Gleichung (14)** liefert dann für dieses spezielle Beispiel der Rezirkulationsmahlung mit konstanter Mahlkantenbelastung:

$$W_x = \frac{P_{eff}}{km_{otro}} [\ln(x_{m,0} + kt_{end}) - \ln x_{m,0}] \quad (16).$$

In dieser Form erfolgte im vorliegenden Bericht die Ermittlung der Homogenitätskennzahl.

Schnittwinkel

Der Schnittwinkel ist bei Gleichheit von Rotor und Stator, wie im Falle der verwendeten Scheiben, der doppelte Messerwinkel. Dieser ist konstruktiv vorgegeben und gilt an dem Punkt der halben Messerlänge.

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse aller Mahlversuche sind in Abhängigkeit von den eingesetzten Substraten, Mahl-Garnituren und den unterschiedlichen Prozessparametern im Anhang in Form von Messwertprotokollen enthalten. Wesentliche Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten in zusammengefasster Form dargestellt.

5.1 Charakterisierung der Substrate

Das Mahlverhalten von Faserstoffen wird unter anwendungstechnischen Aspekten vor allem durch ihre Mahlresistenz bestimmt. Darunter ist der Gradient von Eigenschaftsänderungen bezogen auf die spezifische Mahlenenergie zu verstehen. Die unterschiedliche Mahlresistenz von Faserstoffen erfordert eine Anpassung von Mahlungstechnik und Prozessparametern. Im industriellen Maßstab sind Veränderungen der Mahlungstechnik – Mahlmaschinen, Steuer- und Regelungstechnik sowie Garnituren – oft enge Grenzen gesetzt, so dass vorwiegend über die variablen Prozessparameter, wie spezifische Mahlenenergie und Mahlkantenbelastung, dem Mahlverhalten der Faserstoffe Rechnung getragen wird.

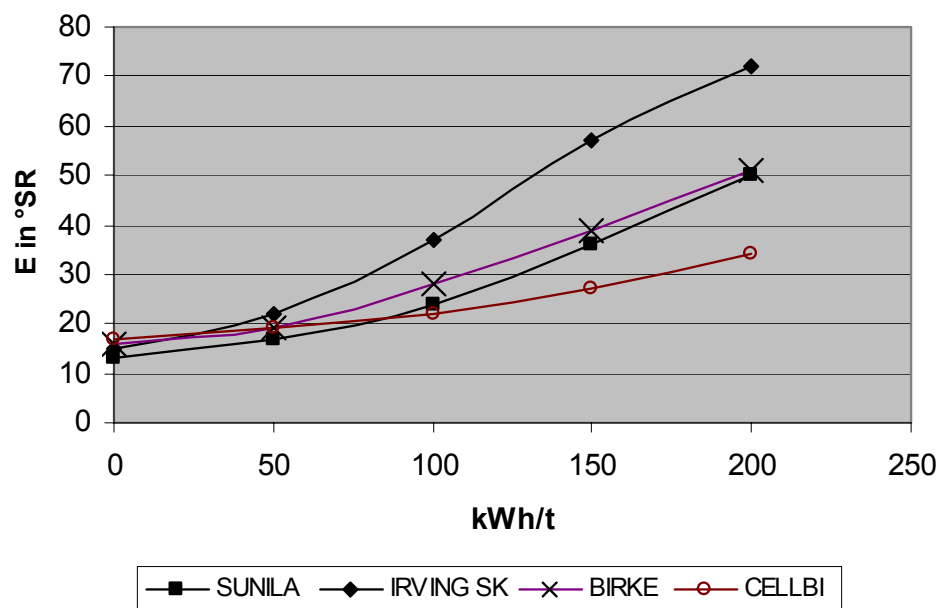


Abbildung 10: Vergleich des Mahlverhaltens der Zellstoffe - Entwässerungswiderstand (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

Abbildung 10 veranschaulicht Unterschiede im Mahlverhalten der für die Mahlversuche eingesetzten Zellstoffe. Die dargestellten Ergebnisse wurden unter Einsatz der konventionellen Chromstahl-Garnitur bei einer spezifischen Mahlkantenbelastung von 1,0 Ws/m erzielt. Die Ausgangsmahlgrade liegen mit 13 und 15 für die Langfaser- bzw. 16 und 17 für die Kurzfasierzellstoffe nach dem Suspendieren im Normalbereich handelsüblicher Zellstoffe.

Auffällig ist das sehr ähnliche Entwässerungsverhalten von Birkenzellstoff und dem langfasrigen SUNILA-Zellstoff.

Für die Bewertung der Mahlresistenz bei Zellstoffen für den Einsatz in Druckpapieren ist vor allem der niedrige SR-Wert-Bereich bis ca. 30° SR von Interesse.

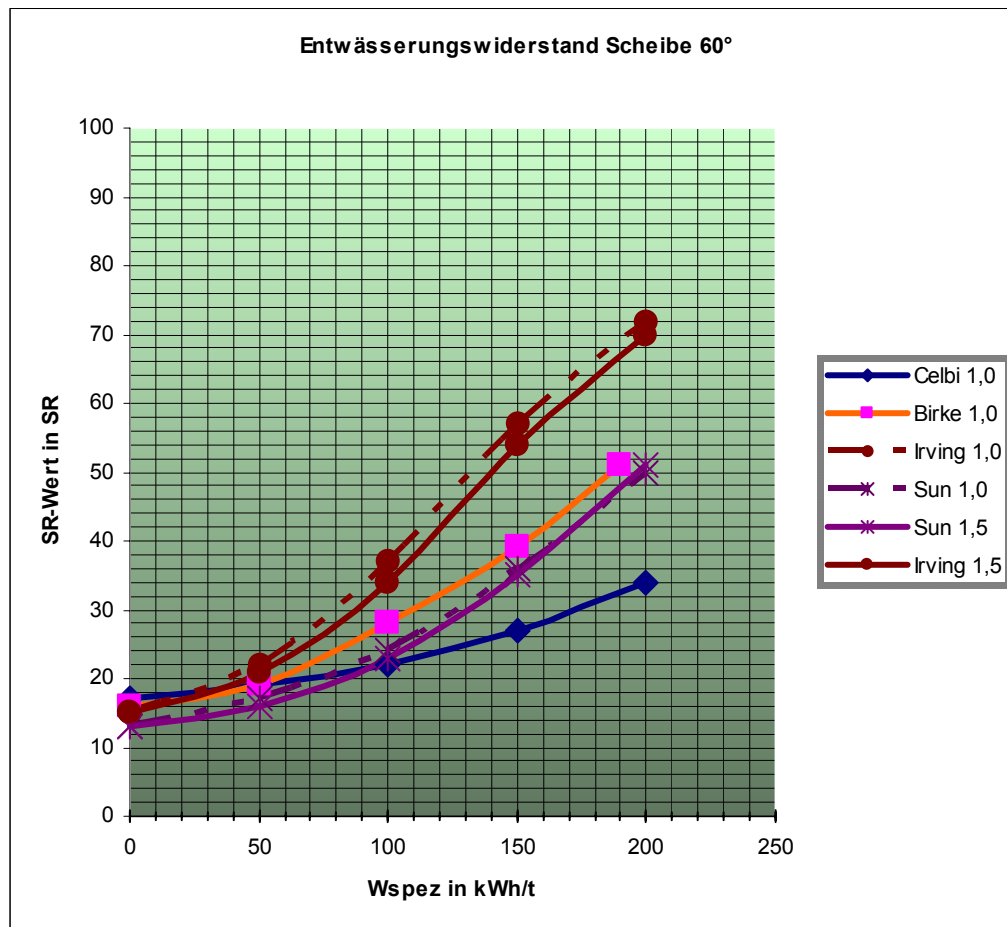


Abbildung 11: FHM-Versuche, 60°-Garnitur

Die Mahlungsergebnisse der FHM bringen hinsichtlich des Entwässerungswiderstandes bei der Mahlung mit der 60° Garnitur ein hinsichtlich Tendenz und Wertebereich ähnliches Verhalten, wie bei der Untersuchung an der PTS. Das nächste Bild zeigt jedoch die Verhältnisse bei der Verwendung einer 15° Garnitur. Für beide Abbildungen gilt der gleiche Maßstab. Die weniger mahlresistenten Zellstoffe Irving (Langfaser) und Birke liegen bei 200 kWh/t bereits bei SR-Werten zwischen 90 und 95 °SR und haben damit bereits das Ende dessen erreicht, was an Veränderung dieses Eigenschaftskennwertes durch Mahlung denkbar ist. Dies zeigt sich auch bei der Auswertung des Mahlspaltes, der gegen Ende der Mahlung instabil wurde, weil er praktisch gegen Null ging bzw. Werte um 10 µm erreichte. Für Birke musste die Mahlung daher schon bei 190 kWh/t abgebrochen werden. Die Entwässerbarkeit der Faserstoffe war bereits so kritisch, dass bei der Bildung der Prüfblätter extrem hohe Entwässerungszeiten erforderlich wurden. Die Blattbildung wurde daher abgebrochen, wenn die erforderliche Absaugdauer am Blattbildner 400 s überschritt. Oberhalb dieses Wertes ist keine befriedigende Blattformation mehr zu erzielen und es wurde lediglich das Blatt mit 40 g/m² hergestellt, das zur Ermittlung des Absorptions- und Streukoeffizienten notwendig ist. Intrapoliert man die Kurven, dann wird der für graphische Papiere interessante Bereich von 30°SR bereits nach 10 kWh/t bis 50 kWh/t für die wenig mahlresistenten Zellstofftypen erreicht. Nur Sunila benötigt

zum Erreichen dieses Wertes ca. 80 kWh/t. Wenn die Mahlantenbelastung von 1,0 Ws/m auf 1,5 Ws/m steigt, ist der Anstieg des SR-Wertes erwartungsgemäß noch etwas steiler, wobei die Unterschiede bei der 60°-Garnitur nicht so groß ausfallen, wie bei der 15°-Garnitur. Sunila und Celbi zeigen in diesen Versuchen die höchste Mahlresistenz.

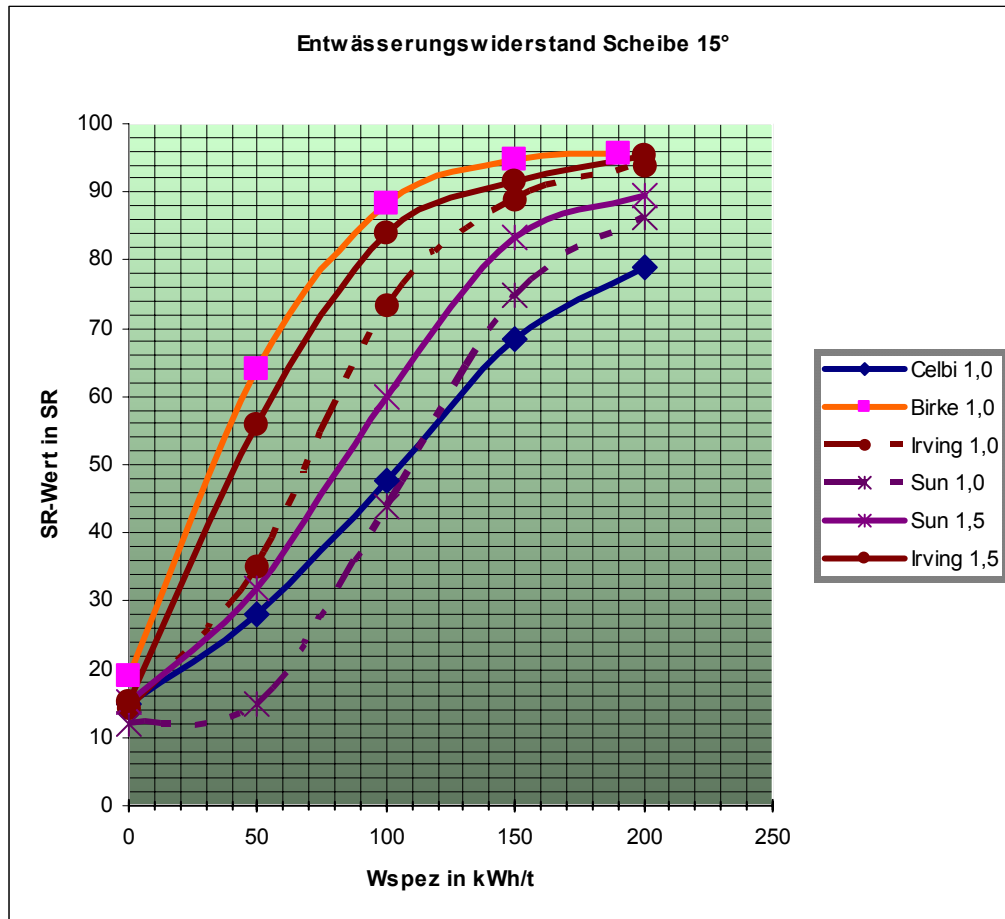


Abbildung 12: FHM-Versuche, 15°-Garnitur

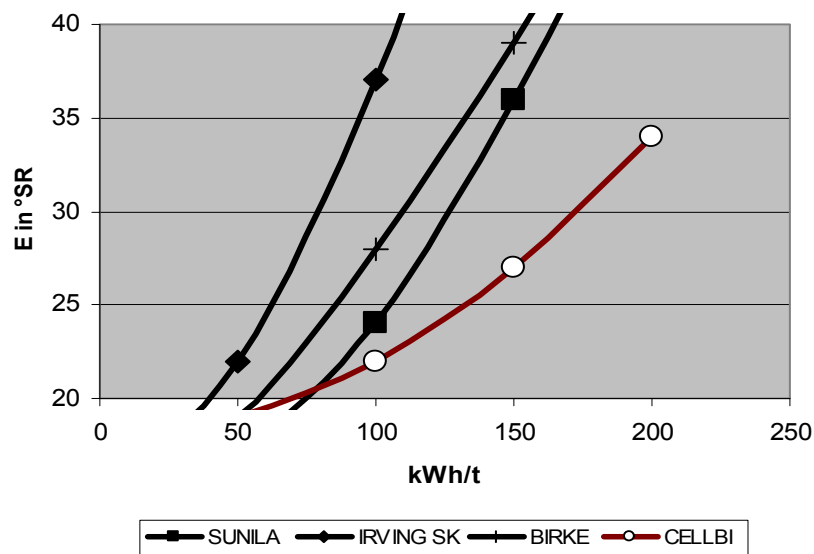


Abbildung 13: Vergleich der Mahlresistenz der Zellstoffe (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

Vergleicht man die Zellstoffe im Bereich zwischen 25 und 30°SR in Abbildung 13 miteinander, steigt die Mahlresistenz in der Reihenfolge Irving SK - Birke - SUNILA - Cellbi. Der Eukalyptuszellstoff Cellbi benötigt zum Erreichen des gleichen Mahlgrades doppelt so viel Mahlenergie wie der Langfaserzellstoff mit der niedrigsten Mahlresistenz Irving SK. Dazwischen bewegen sich der Kurzfasierzellstoff mit geringer Mahlresistenz (Birke) und der Langfaserzellstoff mit hoher Mahlresistenz (SUNILA).

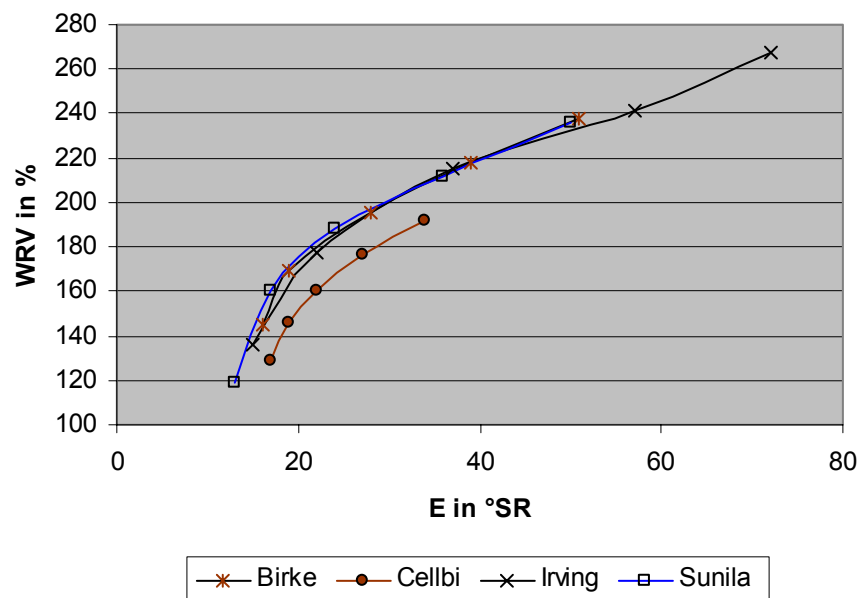


Abbildung 14: Entwicklung des Wasserrückhaltevermögens der Zellstoffe (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

Die folgenden Eigenschaften sind auf Grund der besseren Vergleichbarkeit in Abhängigkeit vom Entwässerungswiderstand E bzw. Mahlgrad dargestellt. Das Wasserrückhaltevermögen charakterisiert den Grad der Hydratisierung und Fibrillierung der Zellstoffe. Aus Abbildung 14 geht hervor, dass der Birkenzellstoff nahezu die gleiche positive Entwicklung aufweist, wie die beiden Langfaserzellstoffe. Der Eukalyptuszellstoff liegt erwartungsgemäß darunter, da er, morphologisch bedingt, nicht so quellfähig ist.

Die Untersuchungen mit der Scheibe 15° zeigen ein etwas abweichendes Verhalten, das aus dem relativ steilen Anstieg des SR-Wertes zwischen 50 kWh/t und 100 kWh/t erklärbar ist. Bei relativ niedrigem Entwässerungswiderstand liegen die Werte der Zellstoffe relativ dicht beieinander. Gegen Ende der Mahlung bricht Celbi stark nach oben aus. Sunila zeigt ein leicht besseres Quellungsverhalten gegen Ende der Mahlung, als der weniger mahlresistente Nadelholzzellstoff Irving. Die Unterschiede, die durch die Mahlkantenbelastung verursacht werden, sind eher vernachlässigbar.

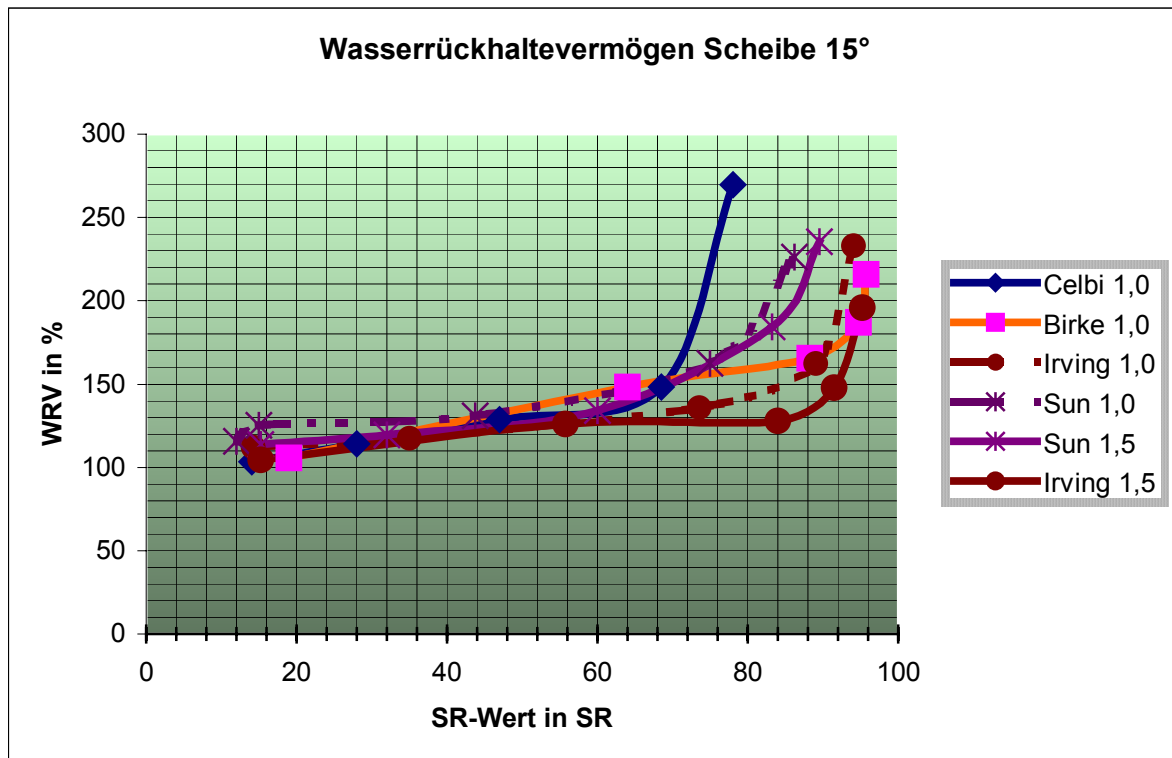


Abbildung 15: Entwicklung des Wasserrückhaltevermögens, Scheibe 15°

Aus Darstellungsgründen wurde das WRV in der nächsten Abbildung gegen die massebezogene Mahlarbeit geplottet. Hierbei zeigt sich, dass sich das Quellvermögen des Birkenzellstoffs zu Beginn der Mahlung recht gut entwickeln lässt, dann aber etwas zurückbleibt.

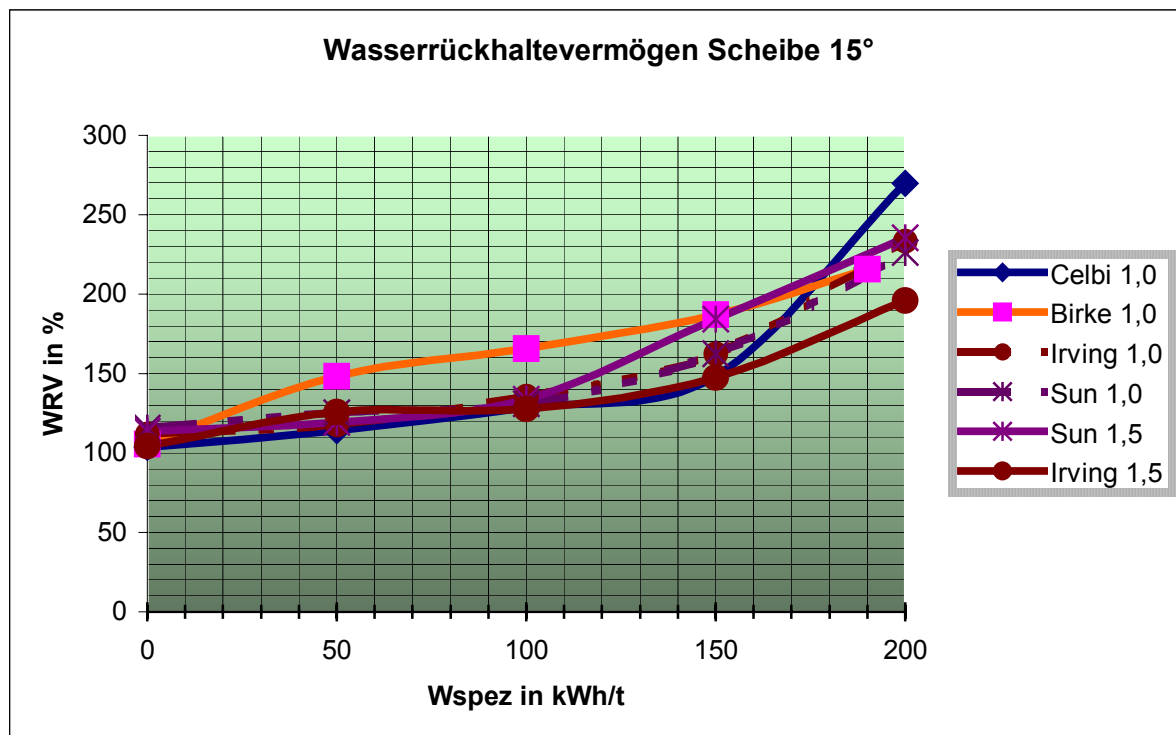


Abbildung 16: Entwicklung des Wasserrückhaltevermögens über der massebezogenen Mahlarbeit, Scheibe 15°

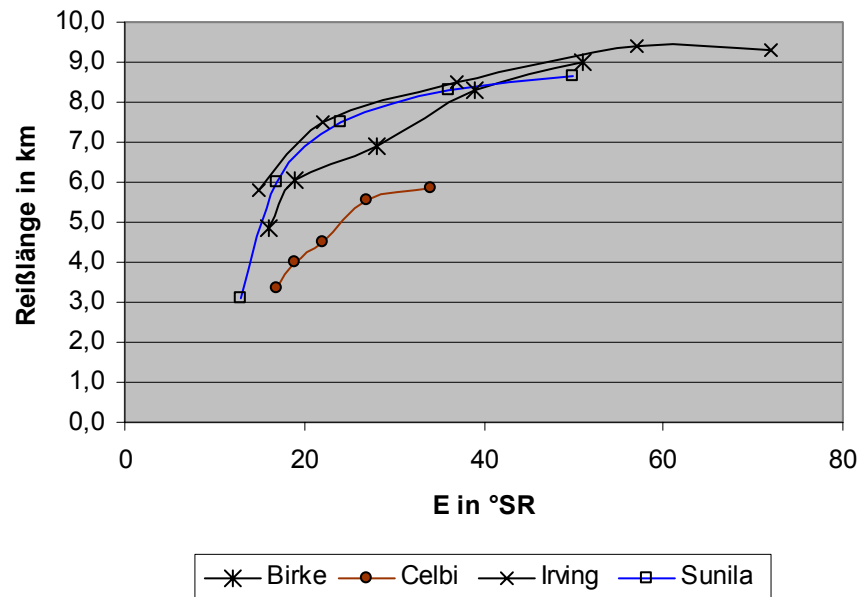


Abbildung 17: Entwicklung der Reißlänge der Zellstoffe (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

Aus dieser Entwicklung resultiert der Reißlängenverlauf in Abbildung 17. Die statischen Festigkeiten entwickeln sich vor allem zu Beginn der Mahlung bis 25°SR sehr rasch. Die beiden Langfaserzellstoffe haben bis dahin knapp 8 km Reißlänge erreicht.

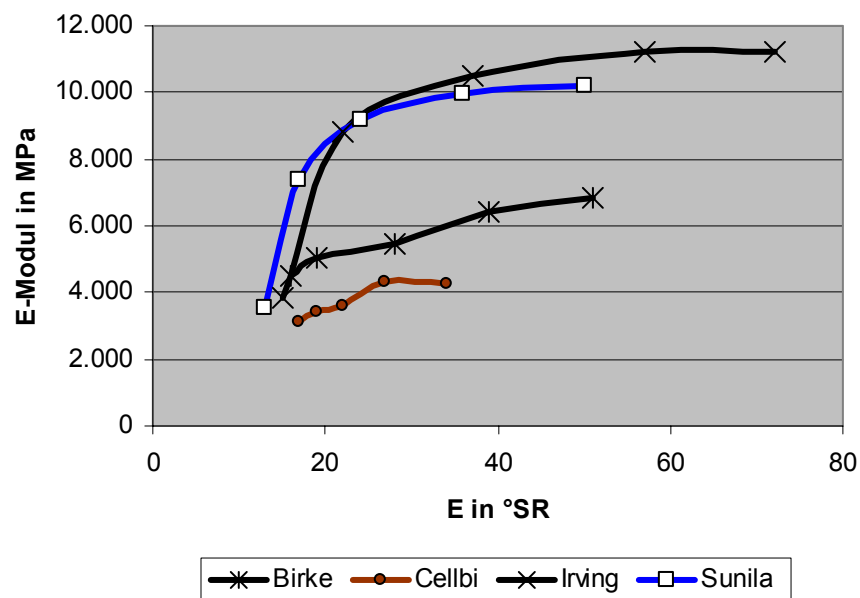


Abbildung 18: Entwicklung des Elastizitätsmoduls der Zellstoffe (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

Diese hervorragenden statischen Eigenschaften ergeben sich vor allem aus der hohen Faserelastizität der Nadelholztracheiden. Charakterisiert wird diese Elastizität durch den E-Modul in Abbildung 18. Hier zeigt sich der deutliche Unterschied zu den Laubholzzellstoffen, die maximal 50 % des E-Moduls der Nadelholzzellstoffe aufweisen.

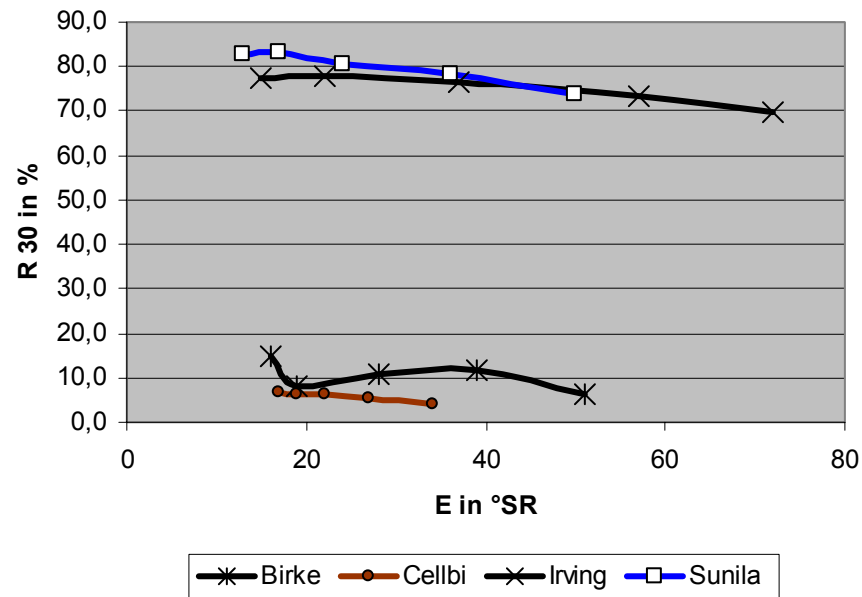


Abbildung 19: Entwicklung des Langfasergehaltes der Zellstoffe (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

In Abbildung 19 wird der Anteil an langen Fasern in der Faserstoffsuspension durch die Fraktion R 30 (McNett) charakterisiert. Erwartungsgemäß nimmt der Langfasergehalt während der Mahlung ab. Die Abnahme beträgt bis zu einem Mahlgrad von 30°SR 3 bis 5 %, je nach Mahlresistenz des Zellstoffs, und zwar bei allen Zellstoffen. An dieser relativ geringen Abnahme zeigt sich der schonende Mahlcharakter unter den gewählten Versuchsbedingungen.

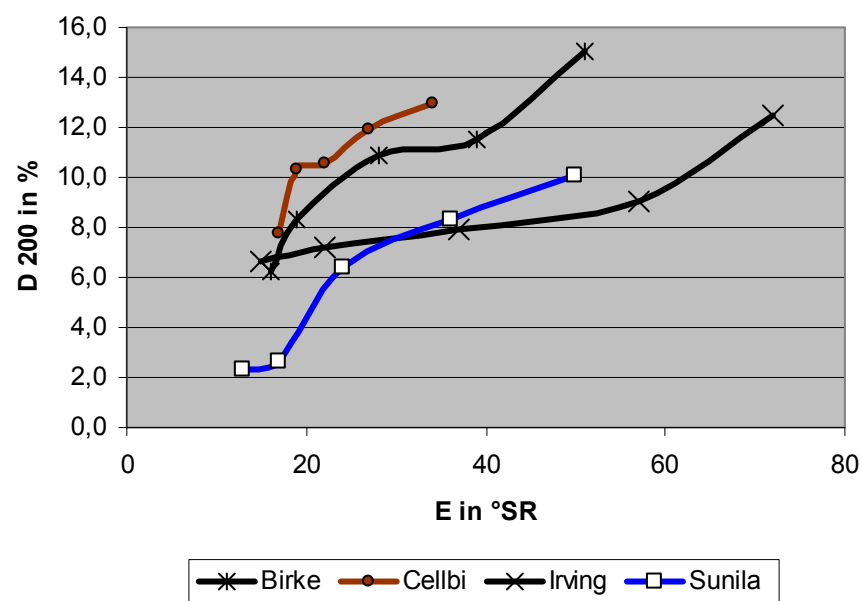


Abbildung 20: Feinstoffentwicklung der Zellstoffe (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

Auf der anderen Seite erhöht sich der Feinstoffanteil (D 200) im Zuge der Mahlbehandlung proportional. Bis auf den Irving SK-Zellstoff setzt schon zu Beginn eine intensive Feinstoffbildung ein (Abbildung 20). Das war zumindest bei den mahlresistenten Sorten nicht zu erwarten.

Die Auswertung der Faserlängenentwicklung für die Mahlung bei einem Schnittwinkel von 15° ist in den nächsten fünf Abbildungen gezeigt.

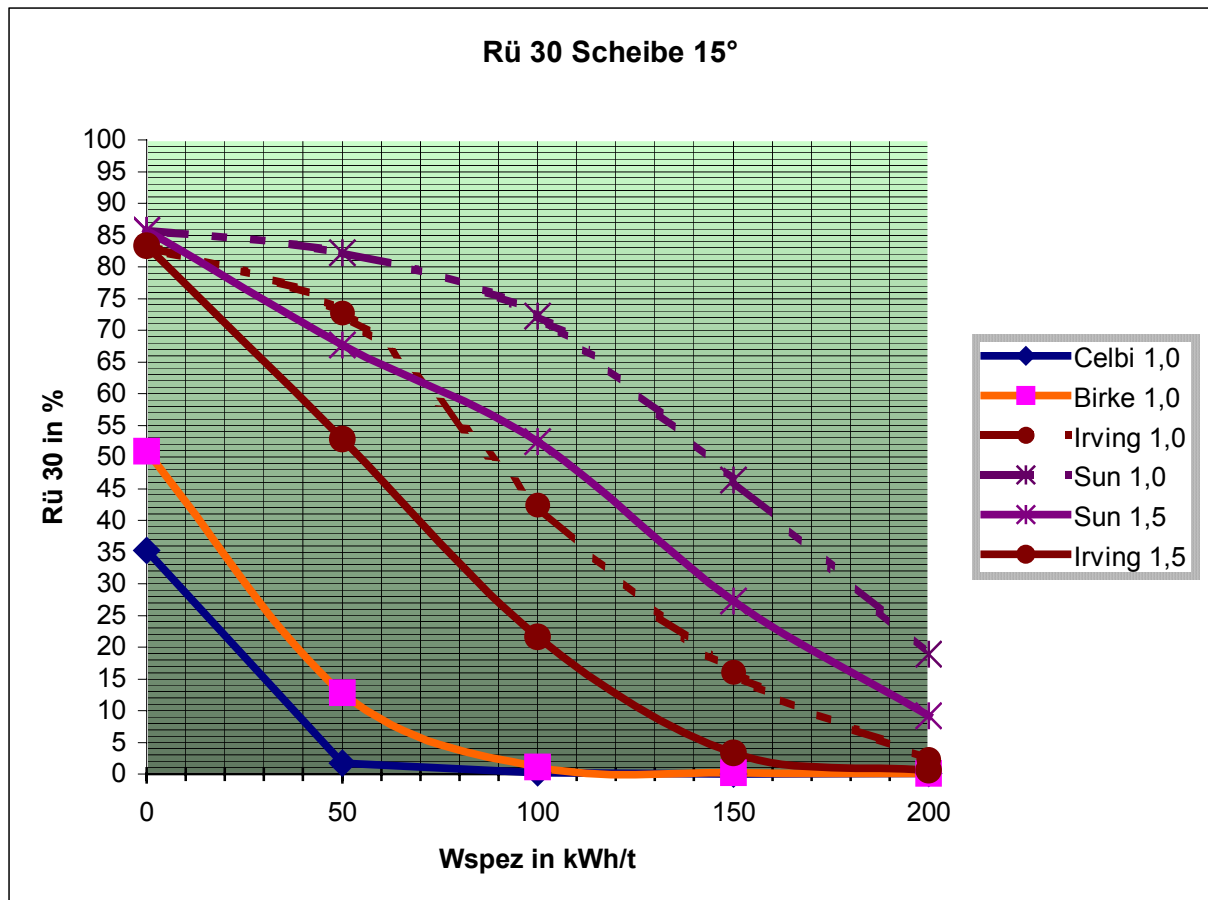


Abbildung 21: Langfasergehalt, Scheibe 15°

Alle fünf Abbildungen stehen in einem engen Zusammenhang, so dass es etwas schwierig ist, sie einzeln zu interpretieren. Der Rückstand auf dem Sieb Nr. 30 charakterisiert den Langfasergehalt. Die Nadelholzzellstoffe zeigen für eine Mahlantenbelastung von $1,0 \text{ Ws/m}$ einen sigmoidalen Kurvenverlauf, das heißt, der Abbau der langen Faser erfolgt etwas verzögert. Steigt die Mahlantenbelastung auf $1,5 \text{ Ws/m}$ an, bleibt der Kurvenverlauf nur bei dem sehr mahlresistenten Sunila noch sigmoidal. Irving „kippt“ sofort ab und verhält sich damit ähnlich, wie die Laubholzzellstoffe, bei denen die lange Faser sofort drastisch gekürzt wird. Diese Tendenz entspricht auch der im SR-Wert auftretenden, wo die Entwicklung dieses Kennwertes für die Nadelholzzellstoffe zunächst verzögert einsetzt (Abbildung 13) und dann relativ steil ansteigt. Zu Beginn der Mahlung werden die langen Fasern durch Kürzung zu Faserstoff (Rü 50) umgeformt, so dass dieser Kennwert zunächst ansteigt. Dies wird besonders bei den Laubholzzellstoffen deutlich. Je höher die Mahlresistenz der Zellstoffe ist, desto mehr verlagert sich dieser Anstieg in das Gebiet höheren Wspez. Das Maximum wird für Laubholz bei ca. 50 kWh/t erreicht, bei den Nadelholzzellstoffen wesentlich später.

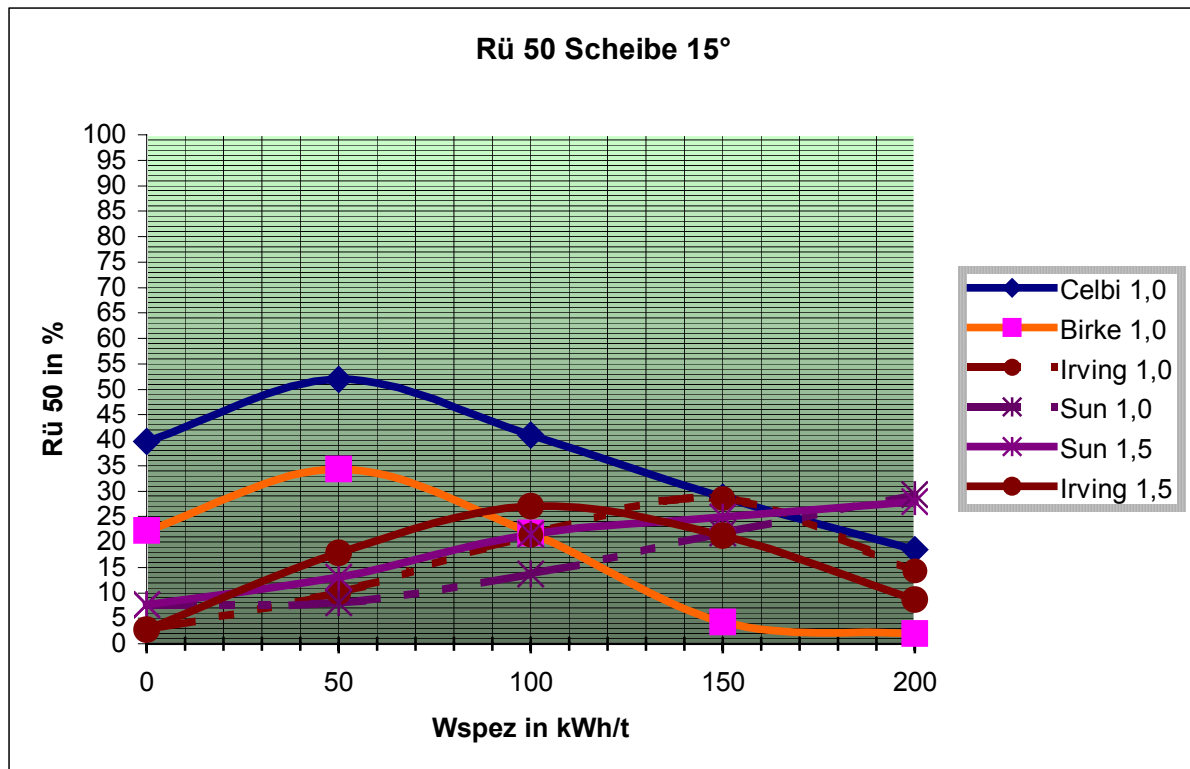


Abbildung 22: Entwicklung des Rü 50, Scheibe 15°

Die Summenbildung von Rü 30 und Rü 50 wäre der Faserstoffgehalt. Es zeigt sich, dass dieser bei den Nadelholzzellstoffen relativ langsam abnimmt, so dass man mit einem entsprechenden Potential zur Entwicklung dynamischer Festigkeit rechnen darf.

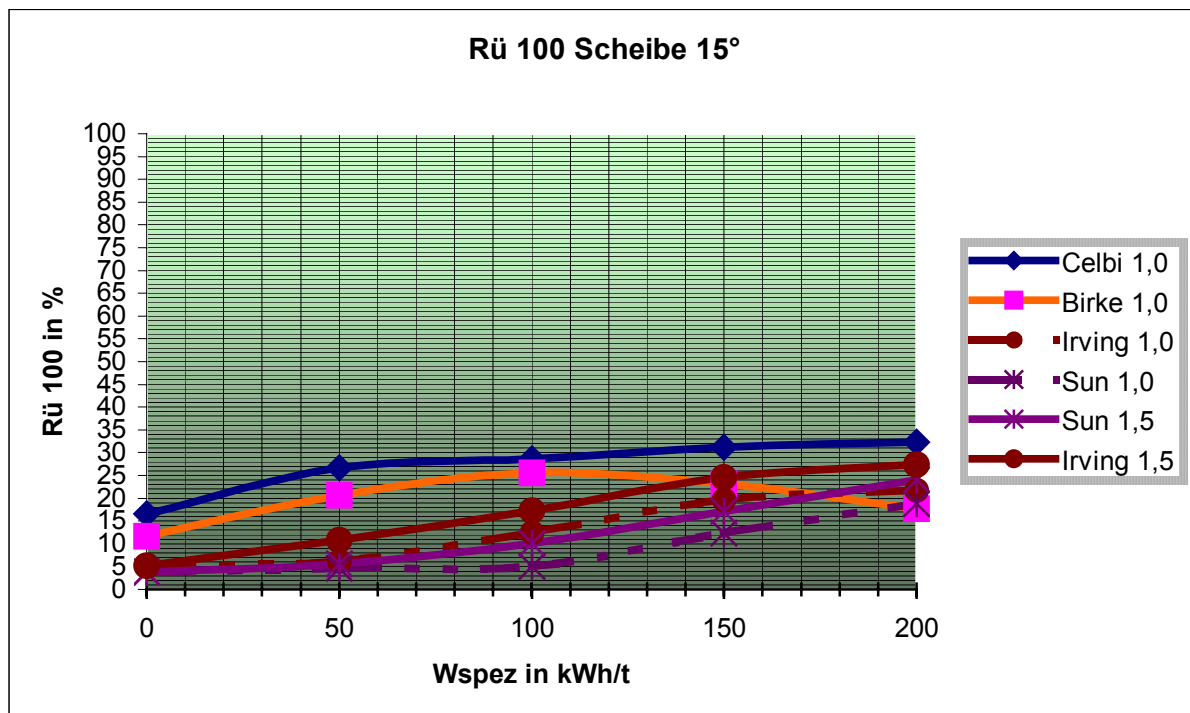


Abbildung 23: Entwicklung des Feinstoffgehaltes, Scheibe 15°

Feinstoff (Rü 100) und Feinststoff (Rü 200) steigen bei den LH-Zellstoffen ebenfalls schon zu Beginn der Mahlung deutlich an. Wenn diese Komponenten bei der Blattbildung retentiert werden, steigt dadurch die statische Festigkeit. Bei Celbi ist die Feinststoffproduktion besonders hoch. Dafür wird weniger Feinststoff und Durchgang durch das Sieb Nr. 200 produziert. Dies erklärt auch, warum die SR-Wertentwicklung im Vergleich zu Irving etwas verzögert ist. Ähnlich, wie in den Versuchen der PTS liefern die wenig mahlresistenten Stoffe Birke und Irving (NH) sehr viel feines Material. Die extrem kürzende Wirkung des niedrigen Schnittwinkels zeigt sich darin, dass die Menge des produzierten feinen Materials fast viermal so hoch ist, wie bei der Mahlung mit der 60°-Garnitur.

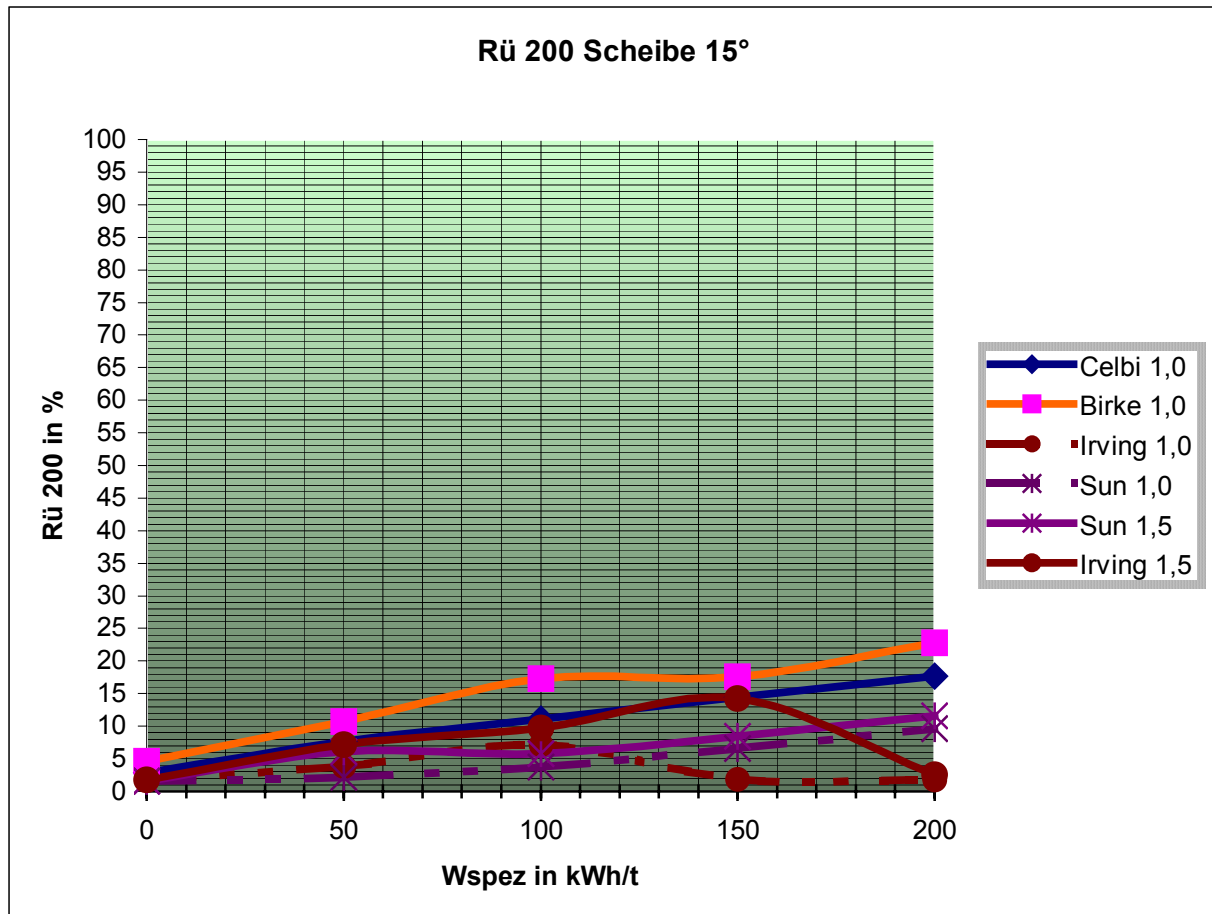


Abbildung 24: Feinststoffentwicklung, Scheibe 15°

Der Durchgang durch das Sieb Nr. 200 charakterisiert sehr feine Partikel, die in der Regel nicht durch Retention bei der Blattbildung im Substrat verbleiben. Die starke Produktion im Falle von Birke zeigt, dass die gewählte Intensität der Mahlbehandlung für diesen Faserstoff zu hoch ist. Erstaunlicherweise produziert auch Irving nahezu ähnlich viel von dieser Komponente. Celbi und Sunila ähneln sich in dieser Hinsicht etwas, so dass die Trends beim SR-Wert verständlicher werden.

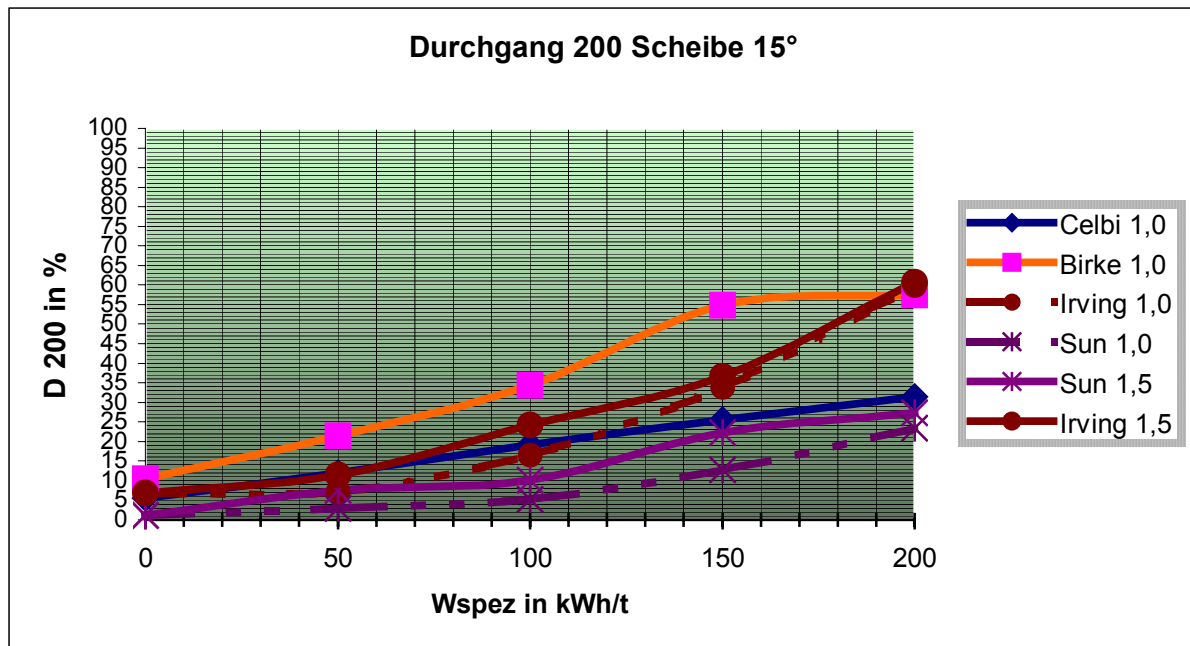


Abbildung 25: Durchgang durch das Sieb Nr. 200, Scheibe 15°

Abschließend lässt sich sagen, dass bei Verwendung eines Schnittwinkels von 15° deutlich stärker kürzend gemahlen wird, als bei Einsatz einer 60°-Garnitur (vgl. Abbildungen 20 und 21). Da die Faserkürzung bei minimalem Energieeinsatz für bestimmte Produktqualitäten ein ebenso anspruchsvolles technologisches Ziel sein kann, wie für andere die überwiegende Fibrillierung, werden hier die gangbaren Wege ersichtlich. Bewertet man die Intensität der Mahlung im Zusammenhang mit der Entwicklung der Fasermorphologie, dann ist die Mahlkantenbelastung von 1,0 Ws/m für Birke und 1,5 Ws/m für Irving im vorliegenden Fall zu hoch gewählt.

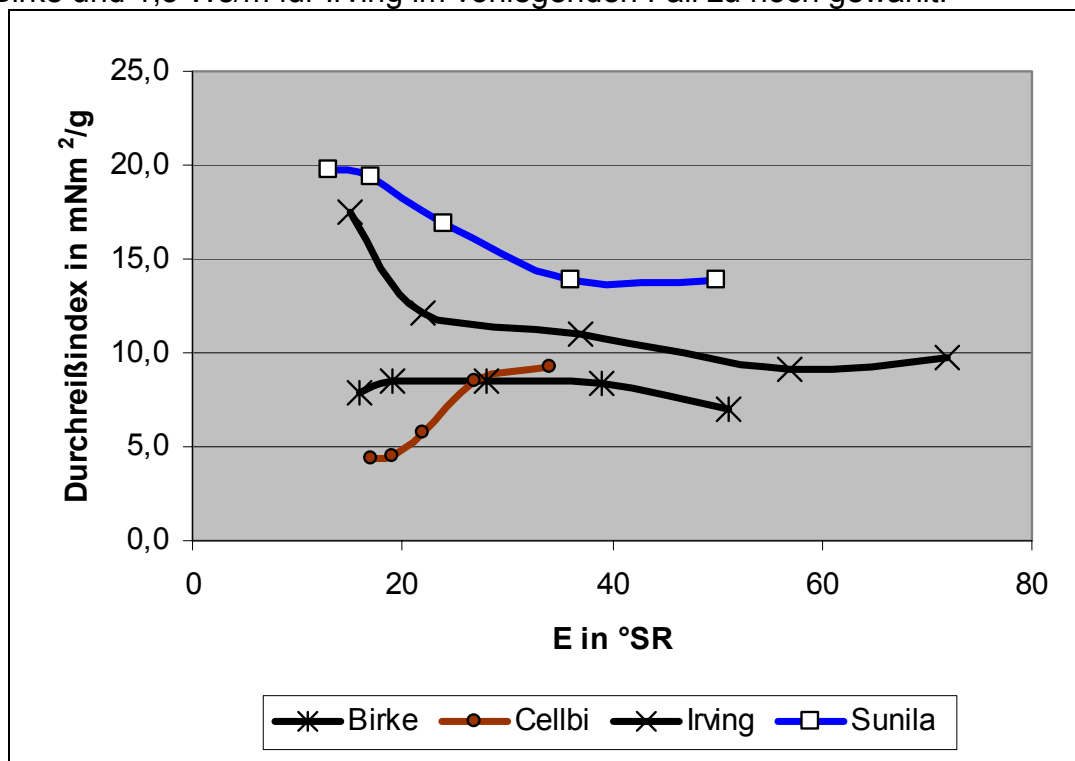


Abbildung 26: Dynamische Festigkeitsentwicklung der Zellstoffe (Scheibengarnitur mit 60° Schnittwinkel, Bs 1,0 Ws/m)

In der Entwicklung der Durchreißfestigkeit spiegeln sich die Mahlresistenz und die Abnahme des Faserlangstoffgehaltes wider. Abbildung 26 zeigt, dass vor allem bei den Langfaserstoffen Einbußen zu Beginn der Mahlung hingenommen werden müssen. Der mahlresistentere Sunila-Zellstoff verliert 25 % seiner ursprünglichen dynamischen Festigkeit bis zum Mahlgrad von 30°SR. Ganz anders verläuft die Entwicklung bei den Kurzfasern: während die Birke ihre Festigkeit über einen breiten Mahlgradbereich auf einem relativ niedrigen Niveau gut behaupten kann, kommt es beim Eukalyptuszellstoff sogar noch zu einem Anstieg auf das Doppelte des Ausgangswertes.

Bei der Mahlung mit der 15°-Garnitur gibt es einige Abweichungen zur vorherigen Darstellung. So hohe Werte für den Tear-Index, wie an der PTS ermittelt, konnten an der FHM generell nicht gefunden werden. Ohne den Aussagen von Kapitel 5.6 vorzugreifen zu wollen, bleibt anzumerken, dass bezüglich dieses Kennwertes die größten Abweichungen in den Ergebnissen beider Institute zu finden sind. Für Sunila ergibt sich eine leichte Steigerung des Kennwertes bei 50 kWh/t und einer Mahlkantenbelastung von 1,0 Ws/m. Generell folgt ansonsten die dynamische Festigkeit der Faserlängenentwicklung und nimmt mit steigender massebezogener Mahlarbeit ab.

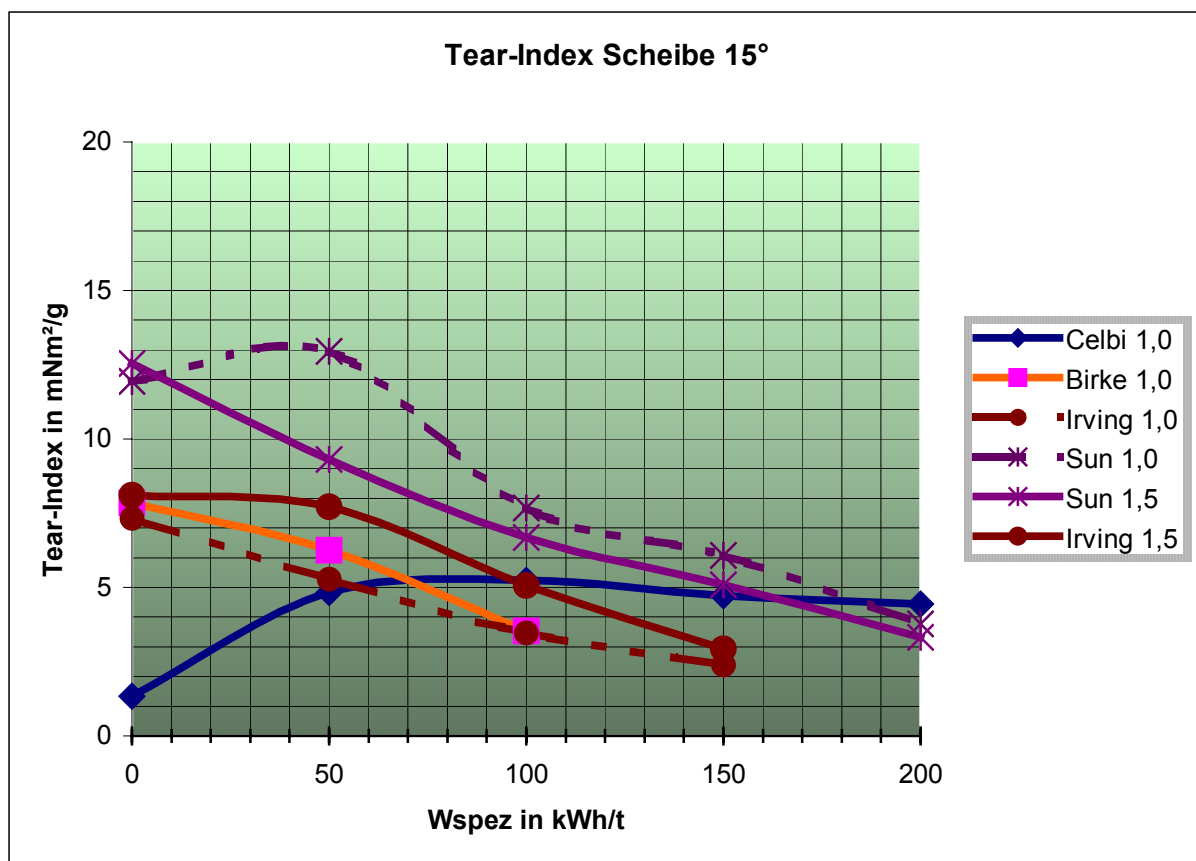


Abbildung 27: Entwicklung des Tear-Index, Scheibe 15°

5.2 Einfluss des Mischungsverhältnisses von Lang- und Kurzfaserzellstoff auf das Mahlergebnis

Als Grundlage für die Auswertung dienen die Mahlergebnisse, die bei der Getrenntmahlung der Zellstoffe mit der Steilkegelgarnitur des PTS-Refiners und anschließender Mischung der Substrate beim Mahlpunkt von 150 kWh/t erzielt wurden. Die in den folgenden Abbildungen dargestellten Versuchsergebnisse sind in Abhängigkeit vom Kurzfaserzellstoffanteil (Eukalyptus bzw. Birke) wiedergegeben.

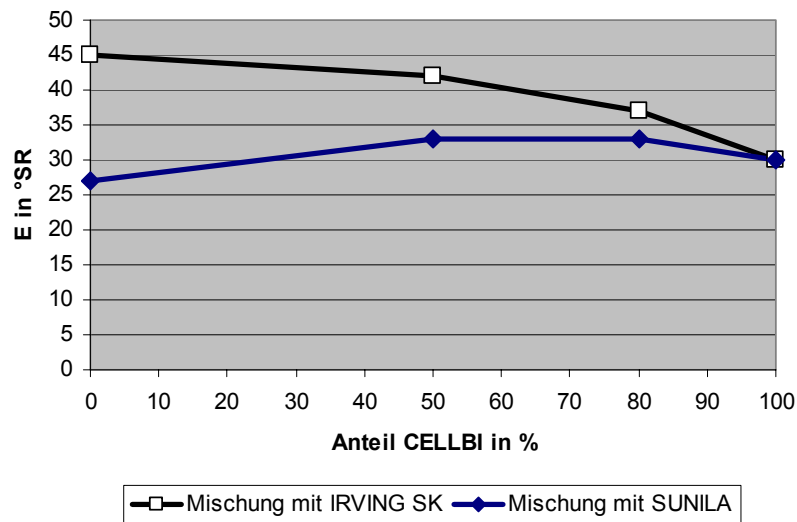


Abbildung 28: Entwässerungswiderstand in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Eukalyptus); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Auf der Ordinate der Abbildung 28 sind die Mahlgrade der in der Mischung verwendeten Langfaserzellstoffe Irving SK und Sunila ablesbar. Zunehmender Anteil an Eukalyptuszellstoff, der am Mahlpunkt bei 150 kWh/t einen SR-Wert von 30 besitzt, führt in der Mischung mit Irving SK zu einem Mahlgradabfall, da dessen Mahlgrad um 15° SR höher liegt. Umgekehrt liegt der Fall in der Mischung mit Sunila. Hier steigt der Mahlgrad mit der Zugabe des Kurzfaserzellstoffs, da der Langfaserzellstoff den geringeren SR-Wert aufweist.

Die Entwicklung des Entwässerungswiderstandes der Mischungen unter der Verwendung der Scheibe mit 15° Schnittwinkel ist über der massespezifischen Mahlarbeit dargestellt (Abbildung 29). Es zeigt sich, dass die Mischungen, die Celbi und Sunila enthalten, einen etwas verzögerten Verlauf in der Entwicklung des Kennwertes aufweisen, während er in den Mischungen Irving (NH) und Birke rascher ansteigt. Eine Ausnahme stellt die Mischung Birke und Sunila (50/50) dar, die sich ganz ähnlich verhält, wie die Mischung Irving (NH) und Birke (50/50) und sich wenig mahlresistent erweist. Gegenüber der Abbildung 12 der separat gemahlenen Zellstoffe steigt der SR-Wert generell in der Mischung schneller an und die Endwerte liegen zum Ende der Mahlung dichter bei 90 SR oder darüber, so dass sich die These zu bestätigen scheint, dass die mahlresistente Komponente einer Stoffmischung selektiv zuerst bearbeitet wird und erst wenn die Teilchengröße in einem bestimmten Ausmaß reduziert ist, auch die weniger mahlresistente Komponente umgeformt wird.

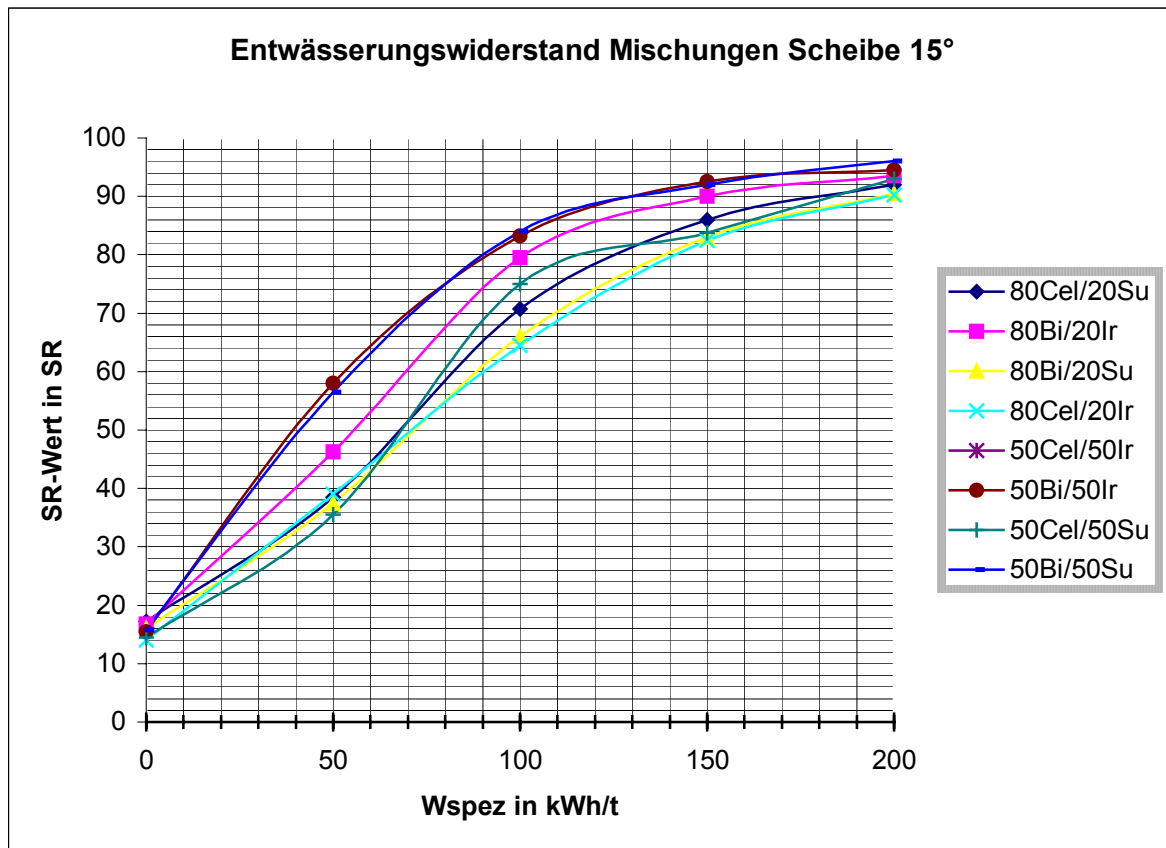


Abbildung 29: Entwicklung des Entwässerungswiderstandes der Mischungen

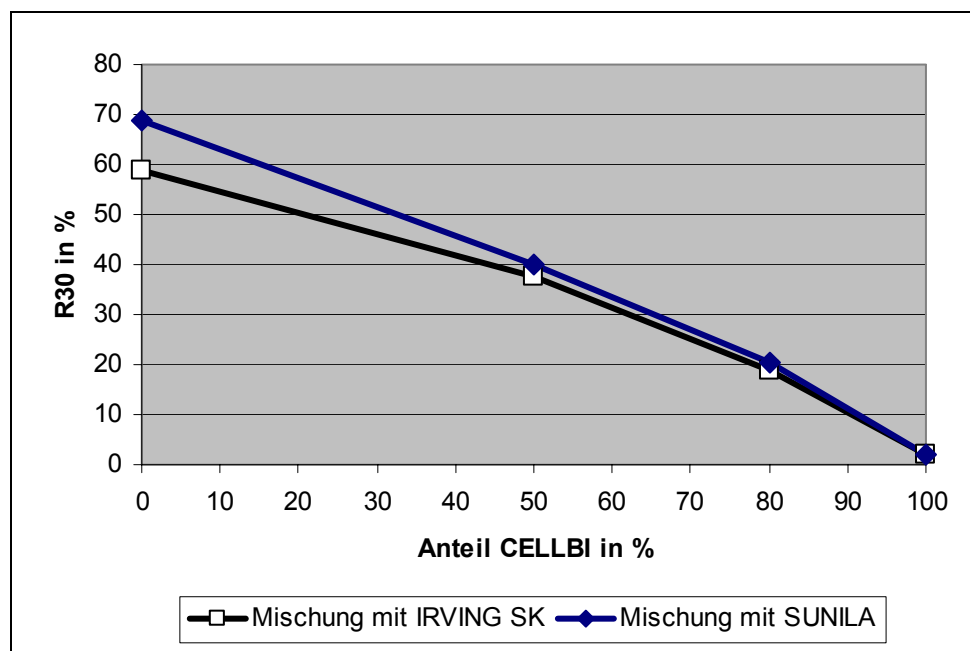


Abbildung 30: Langfasergehalt in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Eukalyptus); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Der Anteil an langen Fasern nimmt logischerweise mit zunehmendem Kurzfaserezellstoffanteil ab. Der Zusammenhang ist nahezu linear, wie aus Abbildung 30 zu erkennen ist.

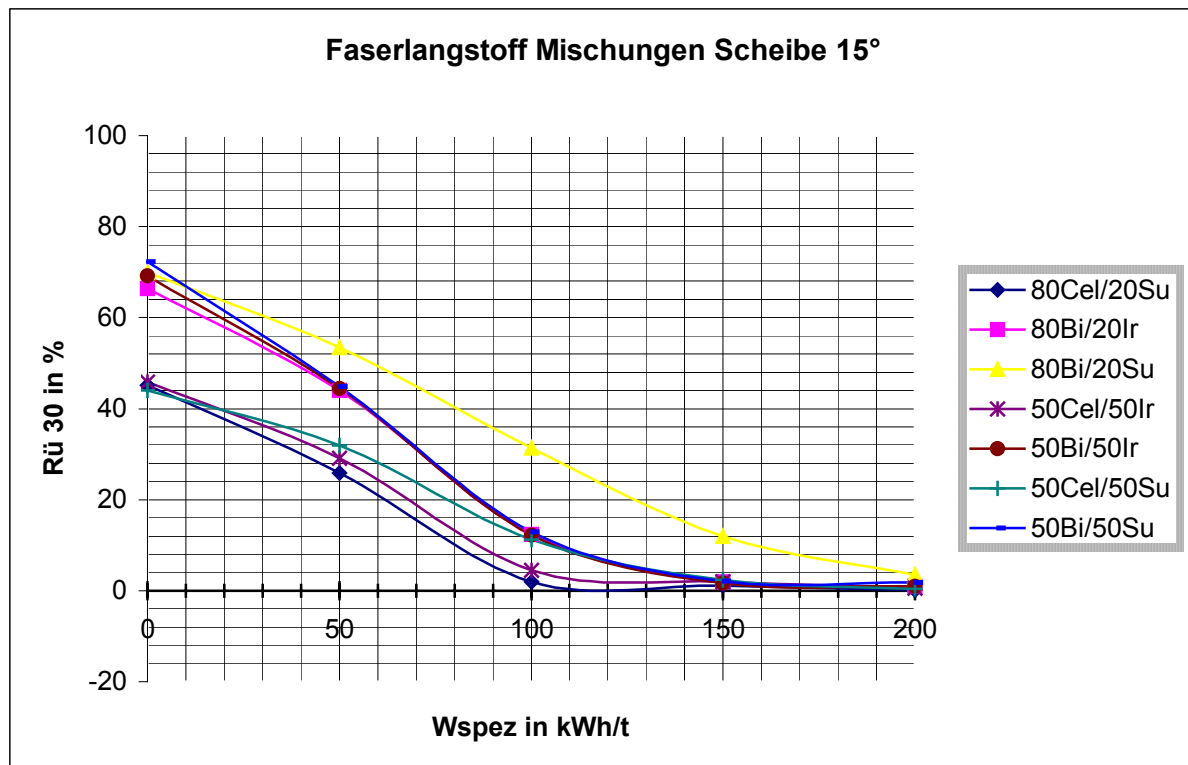


Abbildung 31: Entwicklung des Faserlangstoffgehaltes der Mischungen, Scheibe 15°

Die Mischungen Langfaser/Kurzfaser 20:80 starten etwa bei 70% Langfasergehalt, die Mischungen 50:50 bei etwa 45% (Abbildung 31). Bedingt durch die überwiegend kürzende Mahlweise der 15°-Garnitur fällt der Langfasergehalt sehr rasch. Nach 100 kWh/t ist er bis auf eine Ausnahme bereits unter 20% abgefallen, bei 200 kWh/t sind nur noch marginale Reste von langen Fasern zu finden.

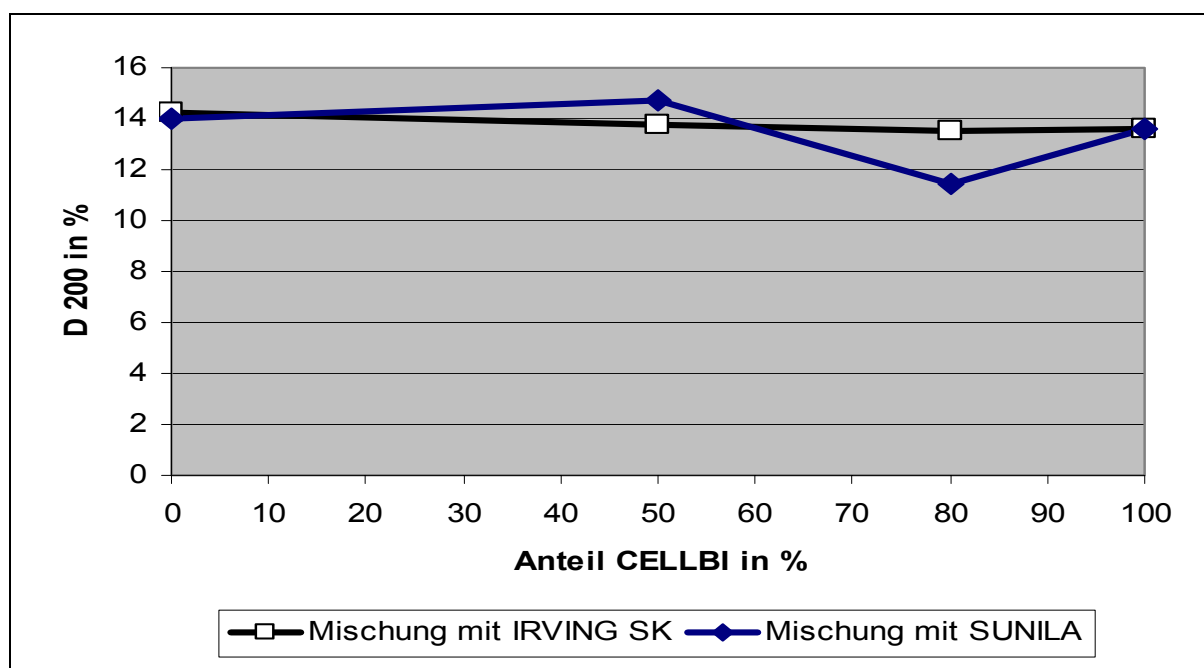


Abbildung 32: Feinstoffgehalt in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Eukalyptus); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Da sich der Feinstoffanteil nach der Mahlung sowohl der Kurz- als auch der Langfaserzellstoffe auf einem einheitlichen Niveau zwischen 13 und 15 % bewegte, hat das Mischungsverhältnis in diesem Fall keinen Einfluss auf dessen Höhe (Abbildung 32).

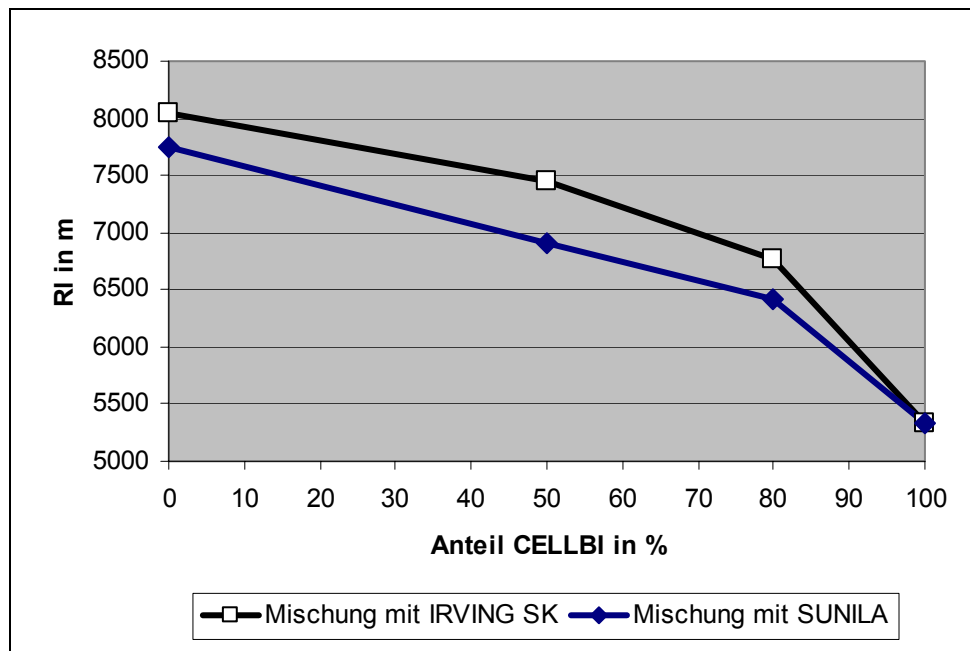


Abbildung 33: Reißlänge in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Eukalyptus); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Die Zugabe von Eukalyptuszellstoff führt in jedem Fall zu einer Minderung der Reißlänge. Wie aus Abbildung 33 hervorgeht, wird die Reißlänge bei Zusatz von 50 % Eukalyptuszellstoff um 500...600 m reduziert, bei Zugabe von 80 % um über 1000 m. Wahrscheinlich wird der Eukalyptuszellstoff durch die Mahlbehandlung kaum fibrilliert und kann deshalb keinen Beitrag zur Ausbildung der Gefügefestigkeit leisten.

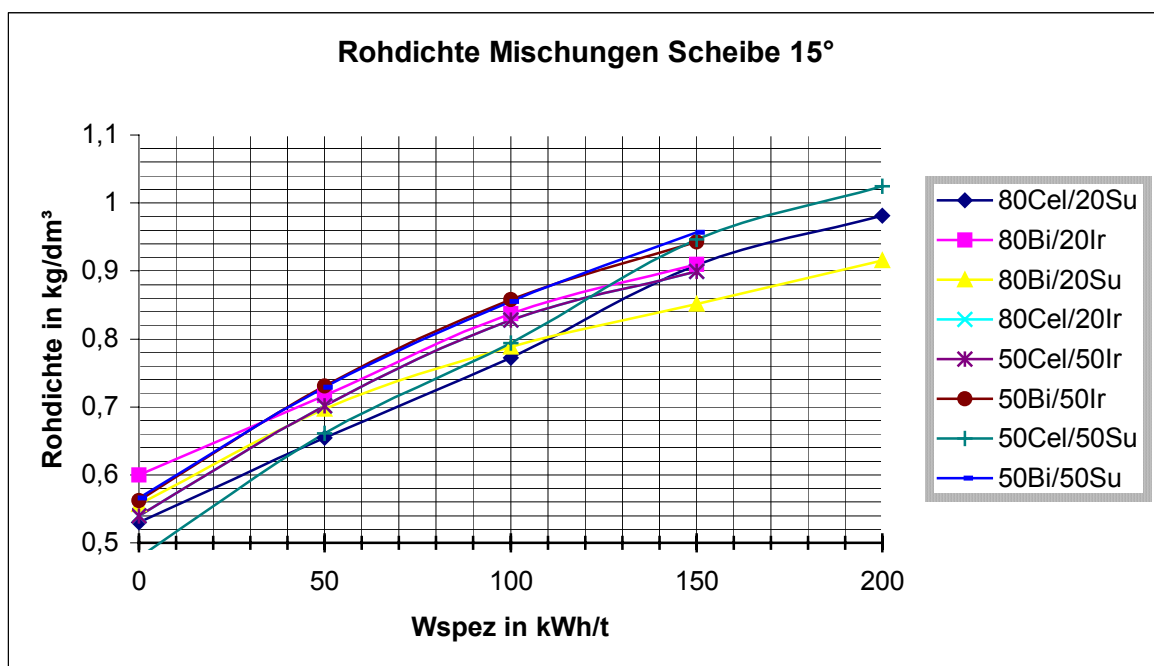


Abbildung 34: Entwicklung der Rohdichte, Mischungen, Scheibe 15°

Entsprechend der sehr ausgeprägten Faserkürzung und des hohen Feinstoffgehaltes steigt die Rohdichte der Laborblätter stark an. Im Extremfall erreicht sie Werte nahe 1 kg/dm^3 . Da die Absaugdauern am Blattbildner sehr hohe Werte erreichten, konnten teilweise für den Mahlpunkt 200 kWh/t keine Prüfblätter mehr gebildet werden, so dass hier die Darstellung nur bis 150 kWh/t reicht. Als Abbruchkriterium für die Herstellung der Laborprüfblätter galt eine Absaugdauer $< 400 \text{ s}$. Wenn auch aus Abbildung 31 schwer erklärbar ist, warum der Langfasergehalt bei der Mischung 80% Birke/20% Sunila relativ hoch ist, zeigt sich doch eine gewisse Kongruenz mit den Aussagen zur Rohdichte. Sie steigt bei dieser Mischung am wenigsten an. Eine Erhöhung der Rohdichte wird in aller Regel auch von einer Steigerung der Gefügefestigkeit begleitet. Die Zugfestigkeit ist in der folgenden Abbildung 35 zu sehen. Die Zugfestigkeit steigt infolge Mahlung etwa auf das 2,5-fache des Ausgangswertes an.

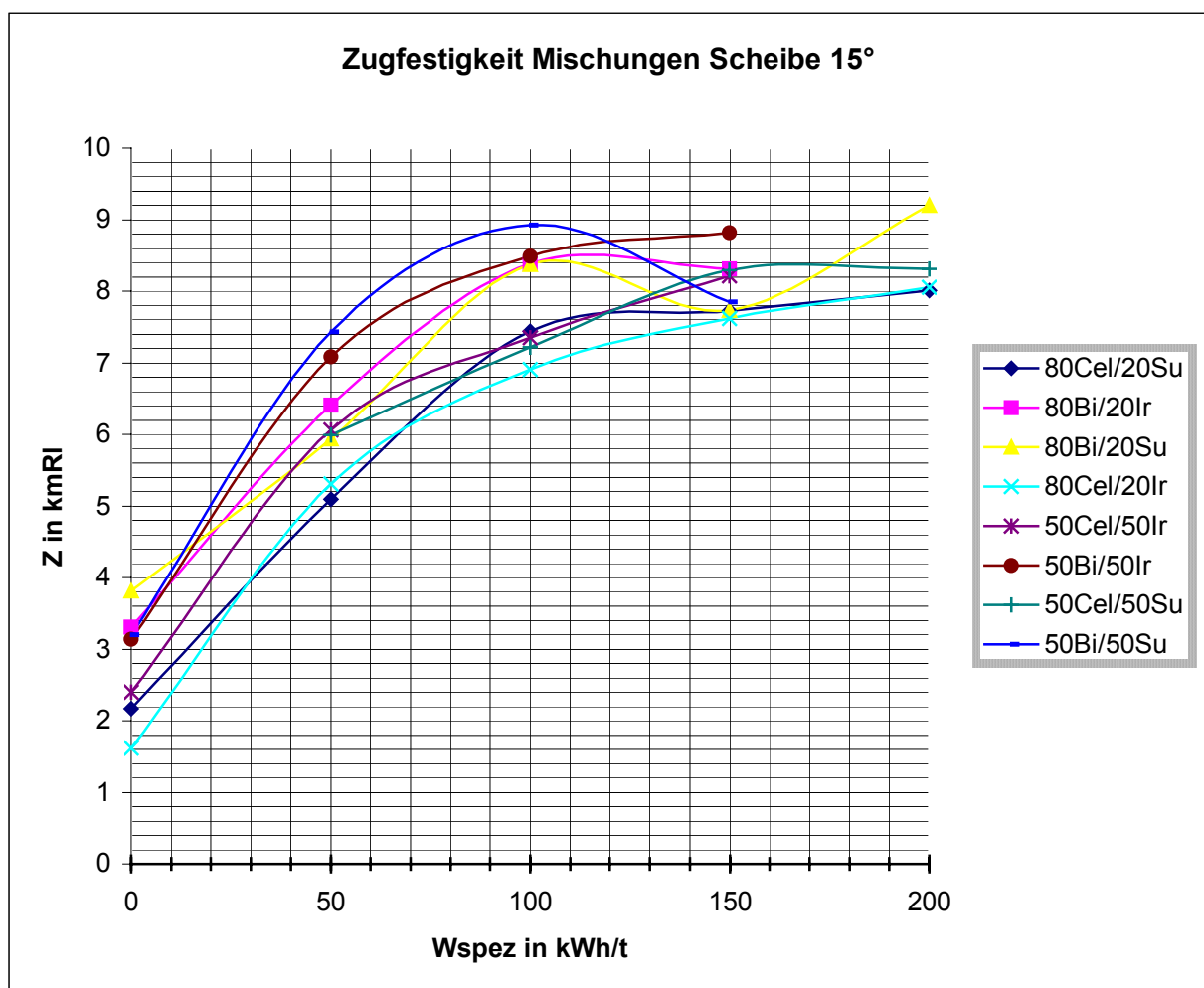


Abbildung 35: Entwicklung der Zugfestigkeit der Mischungen, Scheibe 15°

Bei der Zugfestigkeit zeigt die Mischung aus 50% Birke und 50% Sunila das beste Entwicklungspotential. Insgesamt entwickelt sich Zugfestigkeit in den Mischungen am besten, in denen eine Komponente eine wenig mahlresistente ist (Abbildung 35).

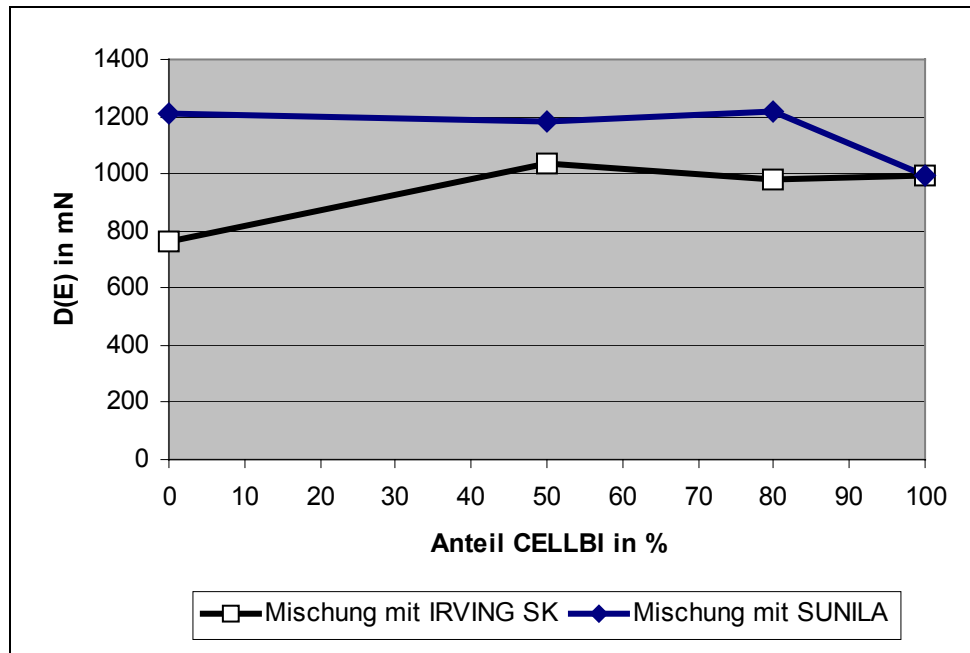


Abbildung 36: Durchreißfestigkeit in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Eukalyptus); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Anders verhält es sich bei der Durchreißfestigkeit. Der niedrige Ausgangswert von knapp 800 mN bei Irving SK kann schon bei Zugabe von 50 % Eukalyptuszellstoff auf dessen Niveau von 1000 mN angehoben werden (Abbildung 36). In der Mischung mit Sunila-Zellstoff hat der Eukalyptuszellstoff dagegen keinen Einfluss auf die dynamische Festigkeit.

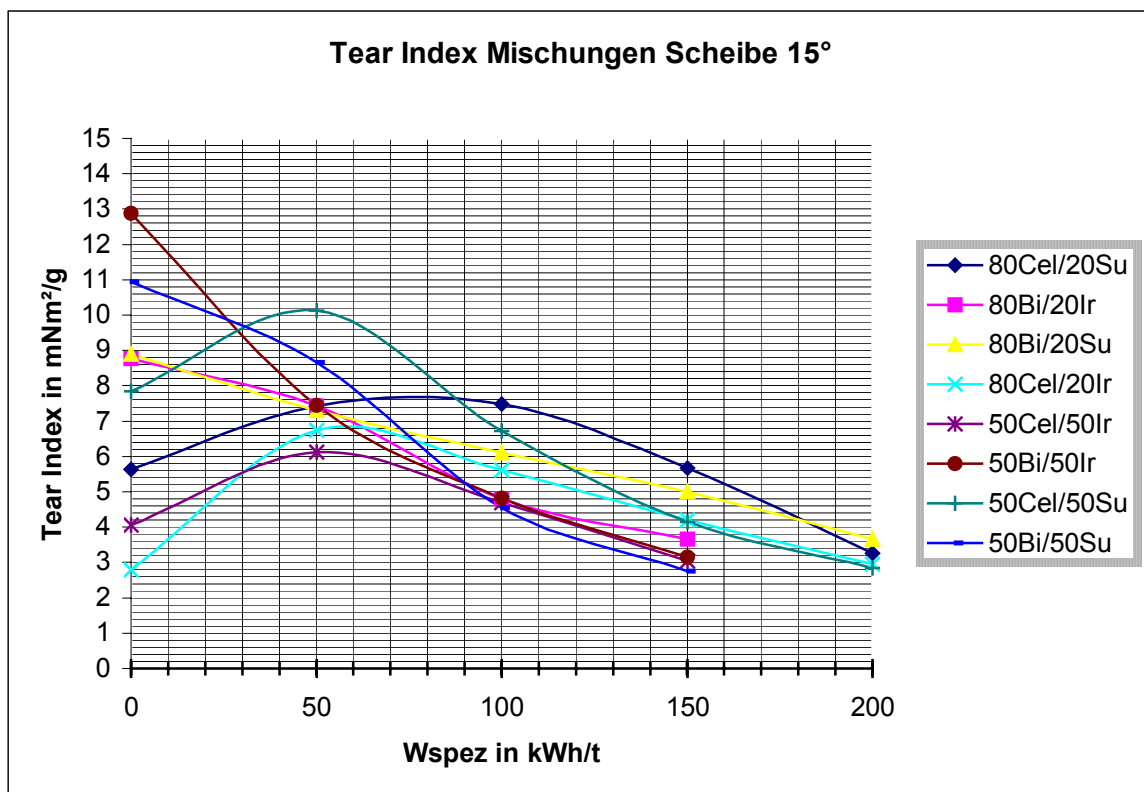


Abbildung 37: Entwicklung der Tear-Indices der Mischungen, Scheibe 15°

Durch die Zumischung der Laubholzkomponente sinken auch bei der Mahlung mit der Scheibe 15° die Ausgangswerte für die dynamische Festigkeit ab (Abbildung 37). Nur die Mischung der mahlresistenten Zellstofftypen zeigt ein gewisses Entwicklungspotential, ausgehend allerdings von einem recht niedrigen Niveau. Erstaunlicherweise lässt sich die dynamische Festigkeit auch unter den dafür ungünstigen kürzenden Mahlbedingungen immer dann noch etwas entwickeln, wenn eine der beiden Komponenten Celbi ist. In allen anderen Fällen sinkt die Durchreißfestigkeit unter das Niveau des Ausgangsstoffes.

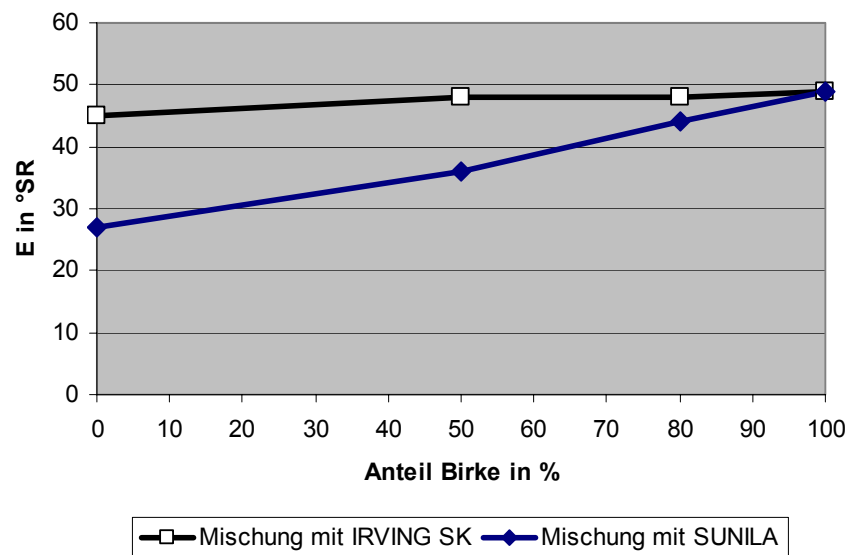


Abbildung 38: Entwässerungswiderstand in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Birke); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

In der Mischung mit Birke ist die Ausgangslage etwas anders. Wie Abbildung 38 zeigt, besitzt der Mahlgrad des Kurzfaserzellstoffs Birke mit 49°SR schon ein relativ hohes Niveau, dass fast 20°SR höher liegt, wie beim Eukalyptuszellstoff und auch höher ist, wie das der Langfaserzellstoffe. Mit der Zugabe von Birkenzellstoff wächst proportional der Entwässerungswiderstand der Zellstoffmischung.

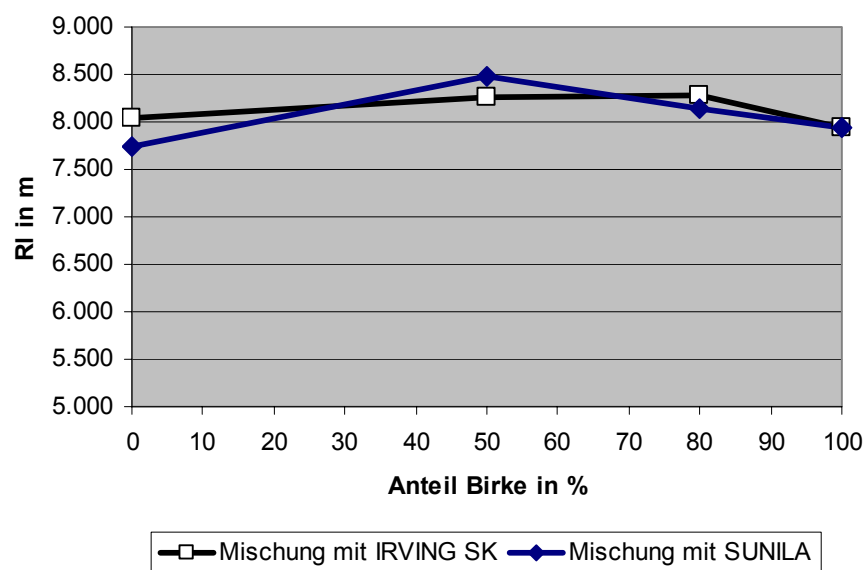


Abbildung 39: Reißlänge in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Birke); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Infolge des höheren Mahlgrades liegt auch das Reißlängenniveau mit ca. 8000 m im Bereich der beiden Langfaserzellstoffe (Abbildung 39). So kommt es, im Gegensatz zum Eukalyptuszellstoff, sogar noch zu einem leichten Anstieg der Reißlänge bei der Zugabe von 50 % Birkenzellstoff.

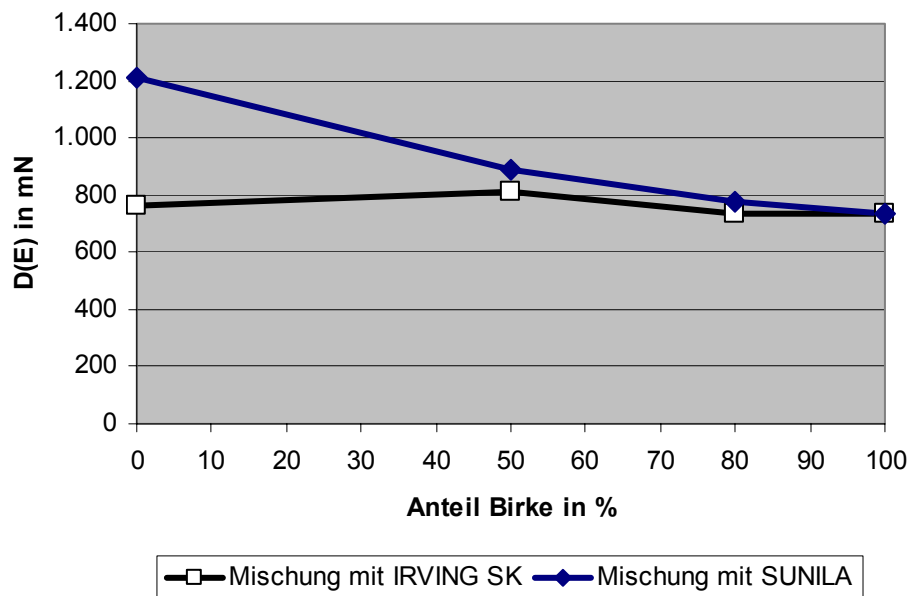


Abbildung 40: Durchreißfestigkeit in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF (Birke); (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Das Niveau der Durchreißfestigkeit des Birkenzellstoffs entspricht dem des Irving SK. Demzufolge kommt es auch zu keiner Veränderung mit wachsendem Kurzfaseran- teil, wie Abbildung 40 zeigt. Bei der Mischung mit Sunila-Zellstoff ergibt sich ein na- hezu linearer Abfall mit zunehmendem Birkenanteil.

Die übrigen Eigenschaften entwickeln sich tendenziell vergleichbar zu den Mischun- gen mit Eukalyptuszellstoff.

5.3 Getrennt- und Gemischtmahlung von Zellstoffen

Grundlage dieses Projektabschnittes bilden Versuche, die mit der Steilkegelgarnitur im PTS-Refiner erzielt worden sind. Alle Zellstoffmischungen wurden sowohl in Mi- schung als auch getrennt bis zu einem Mahlpunkt von 150 kWh/t ausgemahlen. Die folgenden Abbildungen zeigen Säulenpaare, in denen die jeweils linke Säule die Gemischtmahlung der LF-/KF-Zellstoffmischung verkörpert, während die rechte Säule die Getrenntmahlung und anschließende Mischung der Komponenten in den vor- gegebenen Anteilen wiedergibt.

Aus der Mahlgradentwicklung in Abbildung 41 geht hervor, dass die vor der Mahlung gemischten Zellstoffe einen durchgängig höheren Entwässerungswiderstand aufwei- sen wie die getrennt gemahlenen Zellstoffmischungen. Ein Ergebnis, dass auch GÖTTSCHING und NORDMAN [4] bei der Mahlung von Birken- und Kiefernulfat- zellstoff im Valley Beater erhielten. Zur Ermittlung der Ursache dafür ist es hilfreich, sich die Faserfraktionen näher zu betrachten.

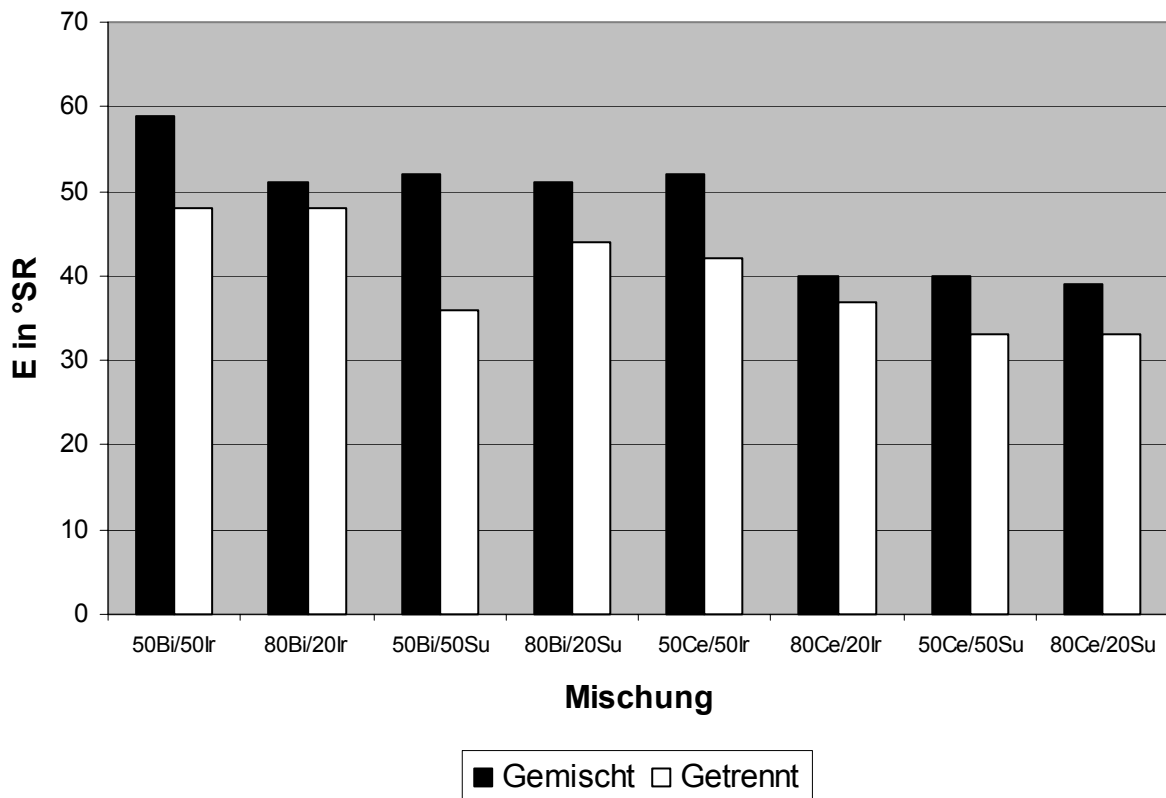


Abbildung 41: Entwässerungswiderstand in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

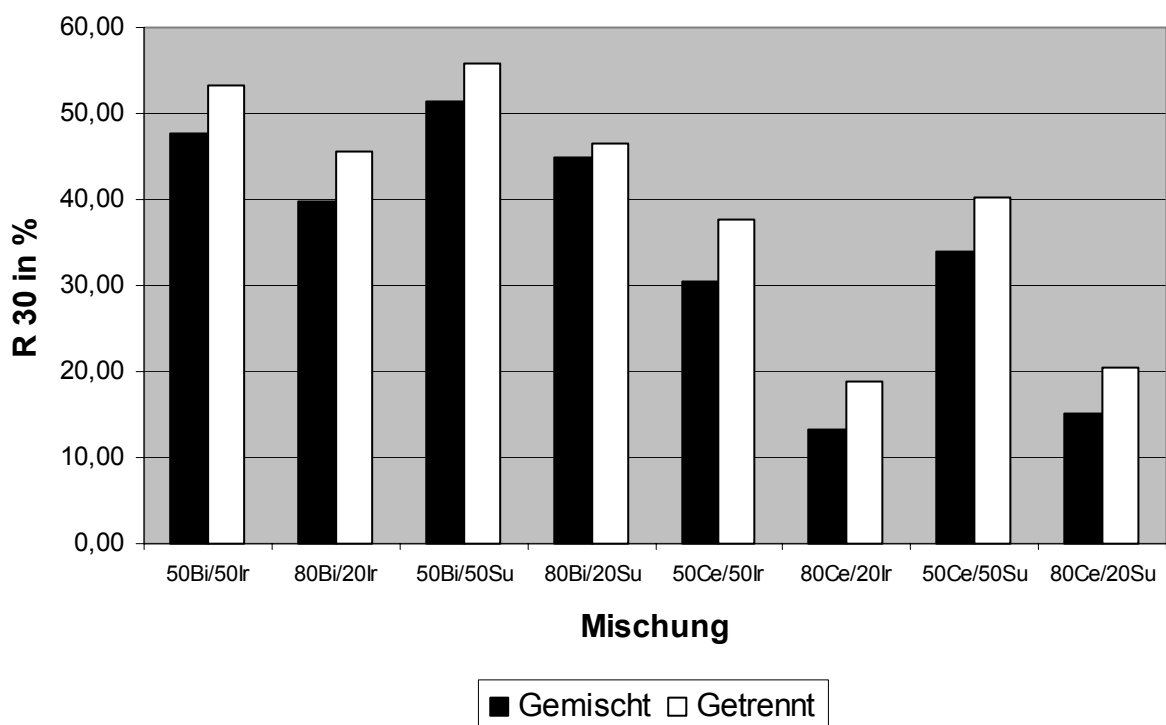


Abbildung 42: Langfasergehalt in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

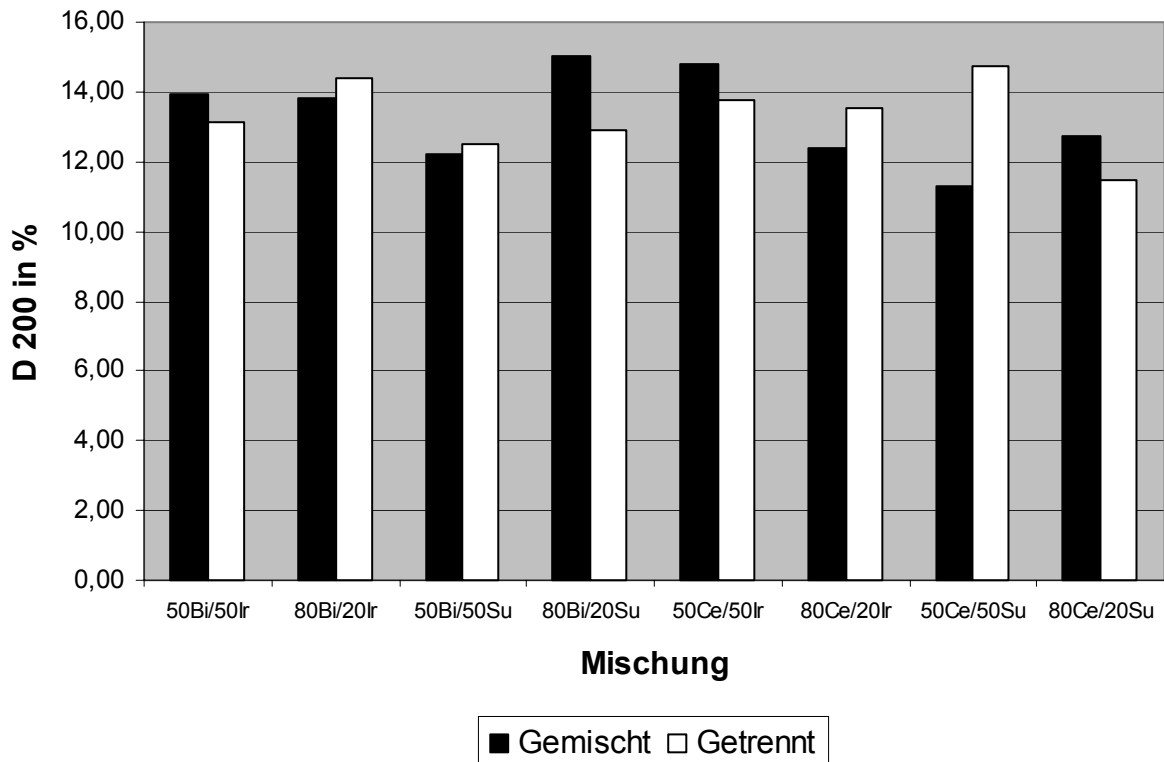


Abbildung 43: Feinstoffgehalt in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Auffällig ist, dass der Anteil an langen Fasern (R 30 in Abbildung 42) bei der Getrenntmahlung um durchschnittlich 5 % höher liegt. Offensichtlich werden die Fasern bei der Gemischtmahlung mehr gekürzt, was sich nicht so sehr in der Zunahme des Feinstoffanteils (Abbildung 43), als vielmehr des Anteiles an kurzen Fasern (Abbildung 44) niederschlägt.

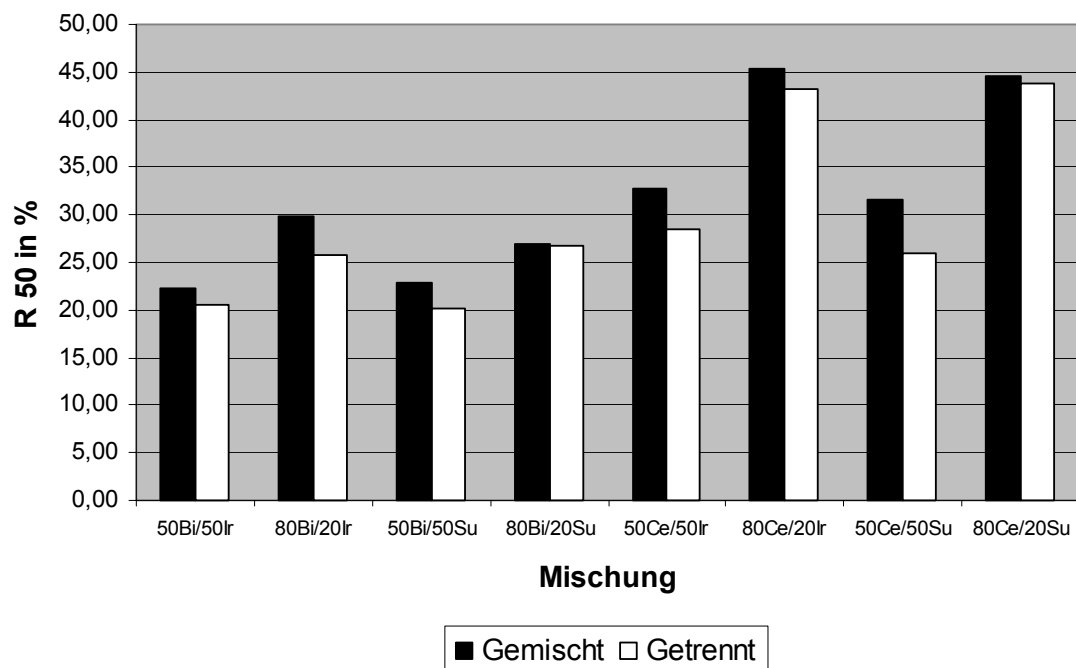


Abbildung 44: Kurzfasergehalt in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Aus dieser Faserstoffzusammensetzung resultieren im wesentlichen die folgenden mechanischen und optischen Eigenschaften. Abbildung 45 zeigt, dass die Reißlänge bei der Getrenntmahlung der Substrate (bis auf wenige Ausnahmen) um bis zu 1000m höher liegt. Mit der weniger mahlresistenten Birke werden dabei in jedem Mischungsverhältnis mit Langfaserzellstoff die höheren Werte erreicht.

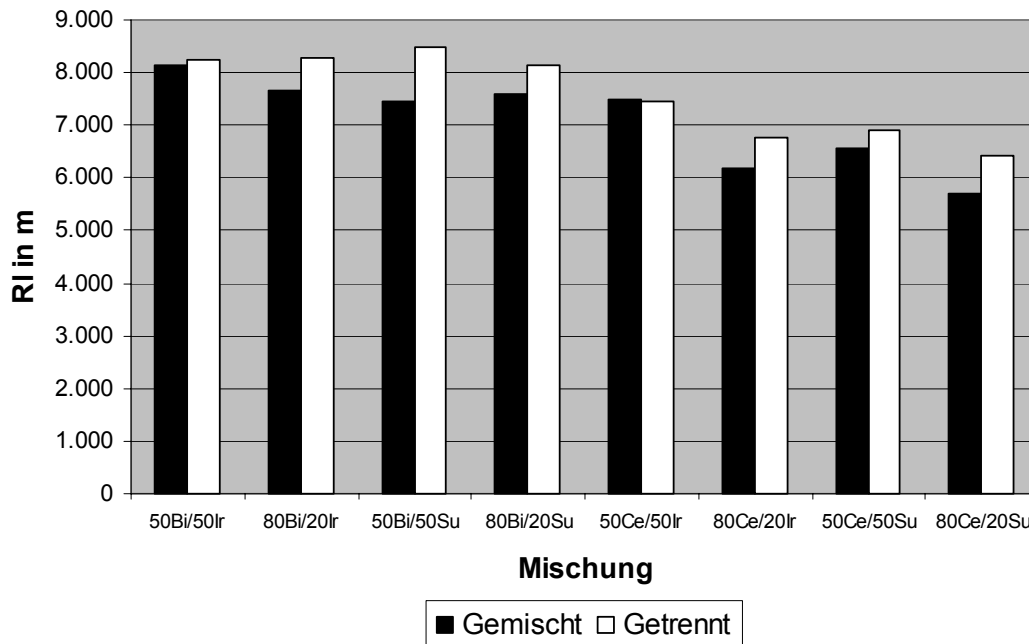


Abbildung 45: Reißlänge in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Erwartungsgemäß spiegeln sich diese Tendenzen auch bei einer anderen statischen Festigkeit, der Spaltfestigkeit, wider (Abbildung 46). Hier führt die Getrenntmahlung zu einer durchschnittlichen Steigerung der Werte von 15 %.

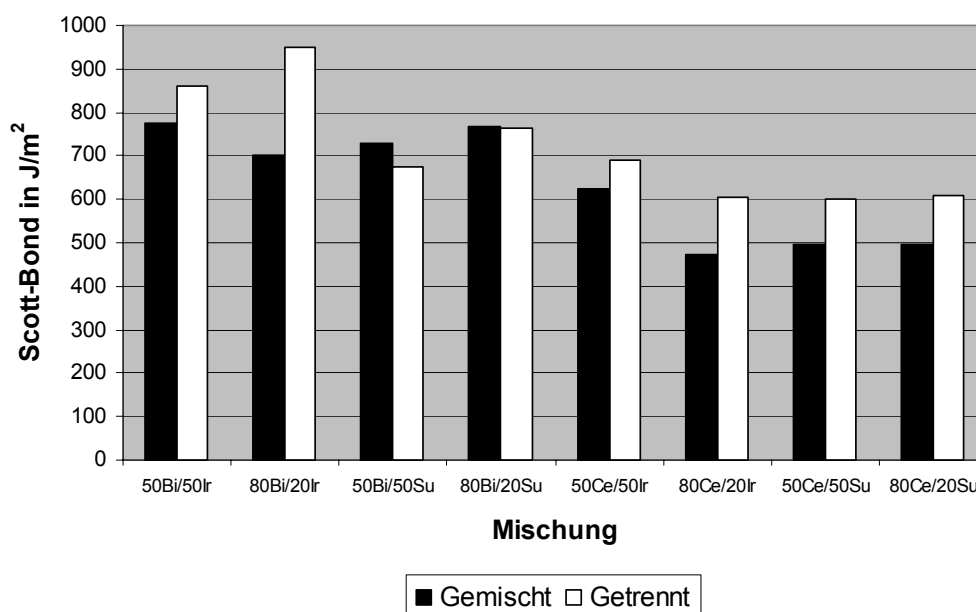


Abbildung 46: Spaltfestigkeit in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

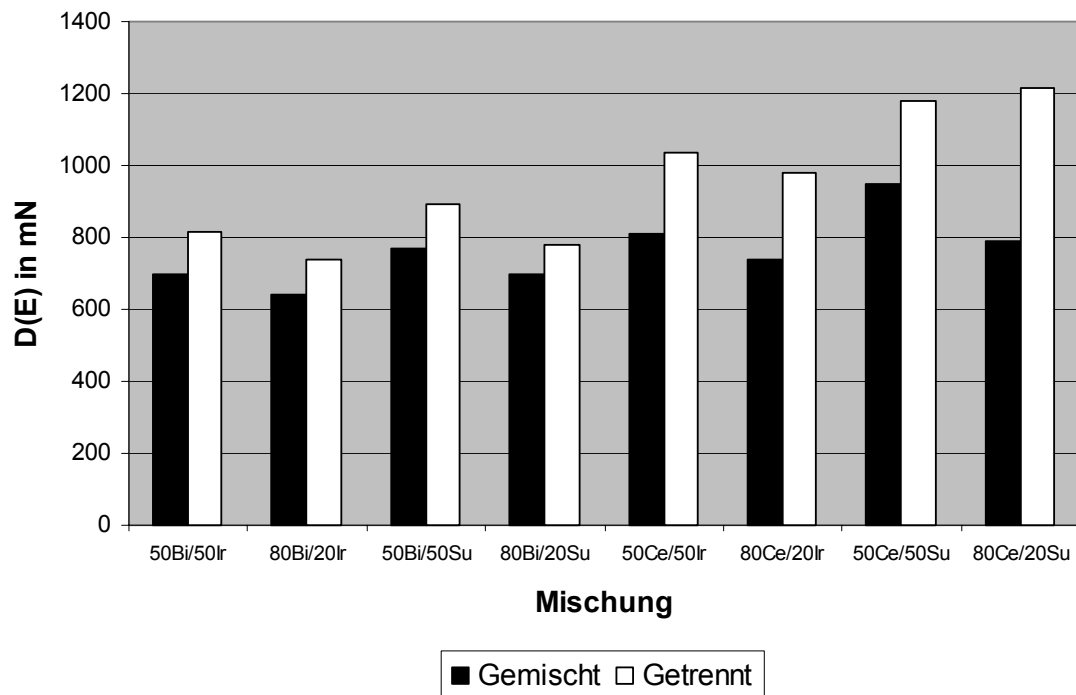


Abbildung 47: Durchreißfestigkeit in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Neben den statischen Festigkeiten wirkt sich die Getrenntmahlung auch auf die Durchreißfestigkeit positiv aus. Wie aus Abbildung 47 hervorgeht, hat der höhere Langfasergehalt einen Zuwachs bis zu 50 % gegenüber der Gemischtmahlung zur Folge.

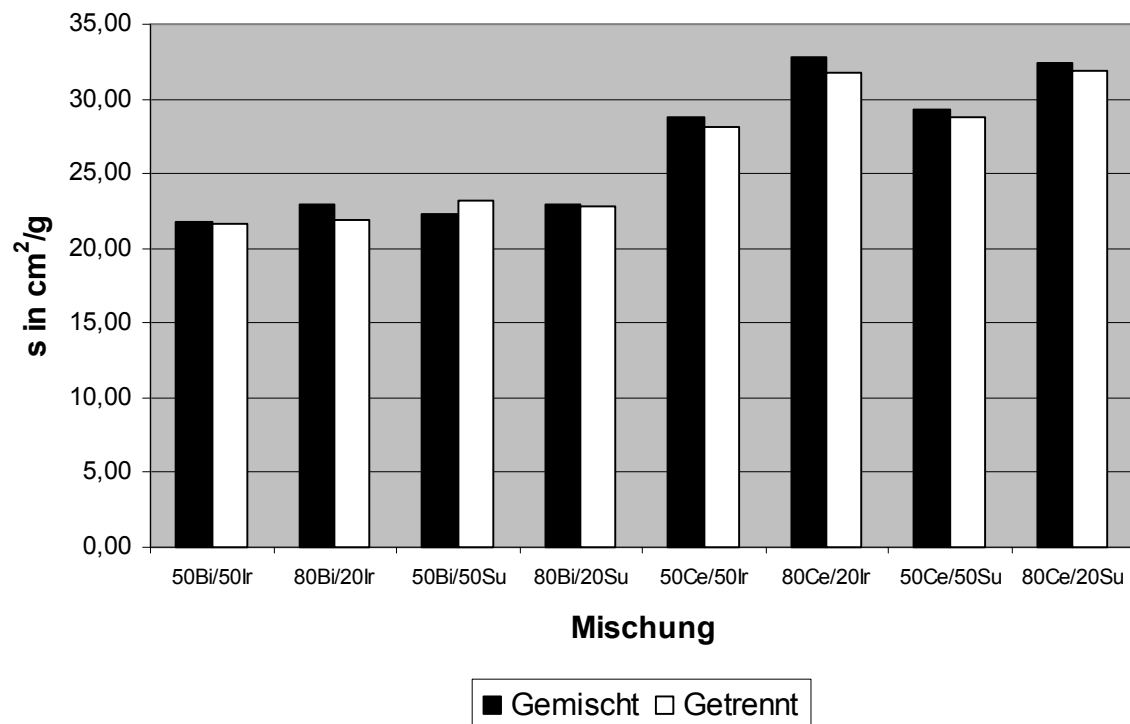


Abbildung 48: Lichtstreuung in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Auf die optischen Eigenschaften wirkt sich die Mahlweise unterschiedlich aus. Aus Abbildung 48 wird deutlich, dass der Lichtstreuungskoeffizient nur wenig beeinflusst wird. Infolge des höheren Anteils an kurzen Fasern liegt er bei den gemischt gemahlenden Proben i. allg. etwas höher.

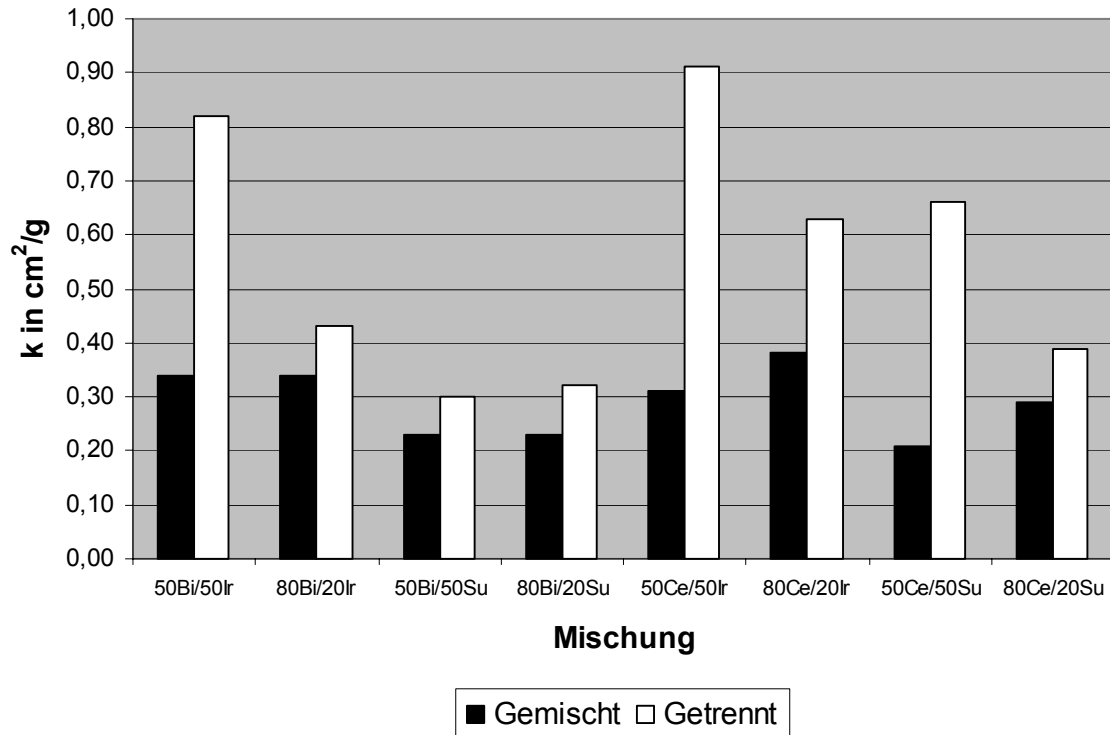


Abbildung 49: Lichtabsorption in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

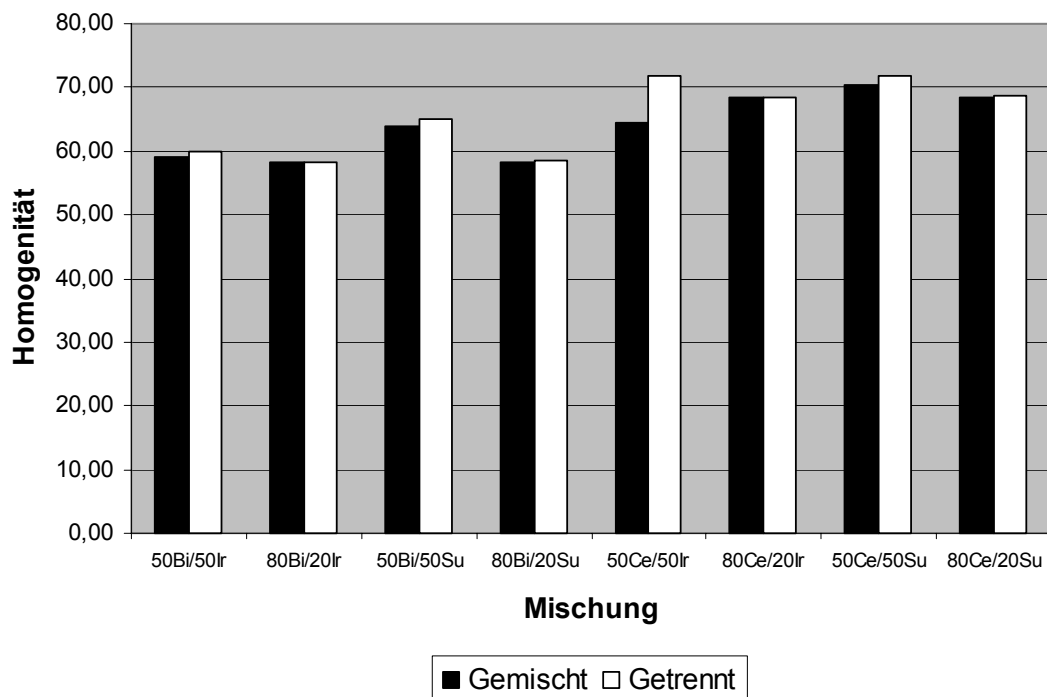


Abbildung 50: Homogenität der Mahlung in Abhängigkeit vom Mischungsverhältnis LF/KF und der Mahlungsart (Steilkegelgarnitur, Bs 1,0 Ws/m)

Grundsätzliche Unterschiede zwischen Gemischt- und Getrenntmahlung zeigen sich beim spezifischen Absorptionskoeffizienten. Die Lichtabsorption liegt bei den getrennt gemahlenden Zellstoffmischungen teilweise mehr als doppelt so hoch, wie aus Abbildung 49 hervorgeht und gerade für den Druckpapierbereich von Interesse sein dürfte.

Auch die Homogenität soll bei diesem Vergleich bewertet werden. Man kann aus Abbildung 50 ableiten, dass der Mahlprozess sowohl bei der Gemischt- als auch der Getrenntmahlung in der Steilkegelgarnitur sehr homogen verläuft. Es existieren nur geringfügige Unterschiede zwischen beiden Mahlweisen. Mit einer Homogenitätskennzahl zwischen 60 und 70 % erfolgt die Faserbehandlung gleichmäßig und effektiv. Dass die Homogenität bei den Eukalyptusmischungen höher ausfällt, kann mit dem geringeren Lang- bzw. höherem Kurzfasergehalt zusammenhängen. Die Mahlsistenz der Zellstoffe scheint keine Rolle zu spielen.

Bei der Mahlung mit der Scheibe 15° lassen sich die vorher getroffenen Aussagen im wesentlichen bestätigen. Aufgrund der sehr hohen SR-Werte, die bei der Mahlung der Zellstoffmischungen erzielt wurden, entschlossen wir uns, die Mischungen bei 100 kWh/t vorzunehmen. In der Abbildung 51 ist die Entwicklung der SR-Werte dargestellt. Auch hier findet sich der Sachverhalt wieder, dass die getrennt gemahlenden und anschließend gemischten Zellstoffe einen niedrigeren Entwässerungswiderstand zeigen, als die gemischt gemahlenden. Eine Ausnahme stellt das rechte Säulenpaar dar, bei dem beide Werte praktisch gleich sind.

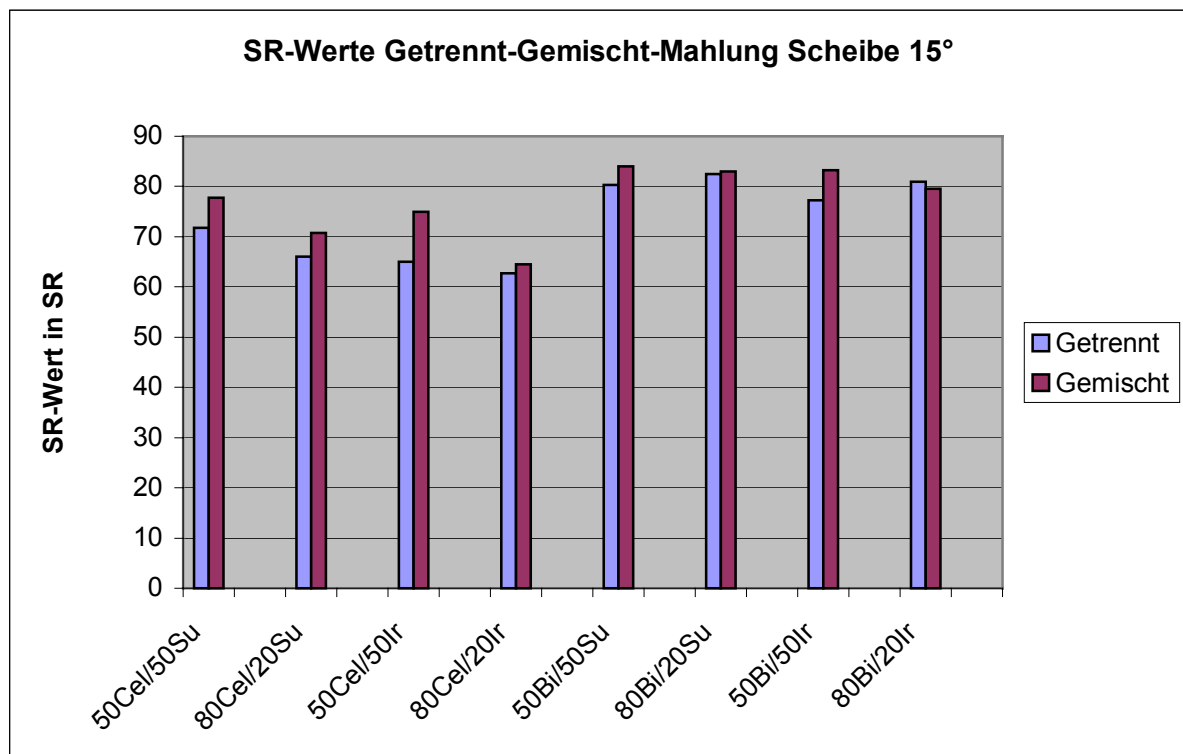


Abbildung 51: Entwässerungswiderstand getrennt und gemischt gemahlener Faserstoffe

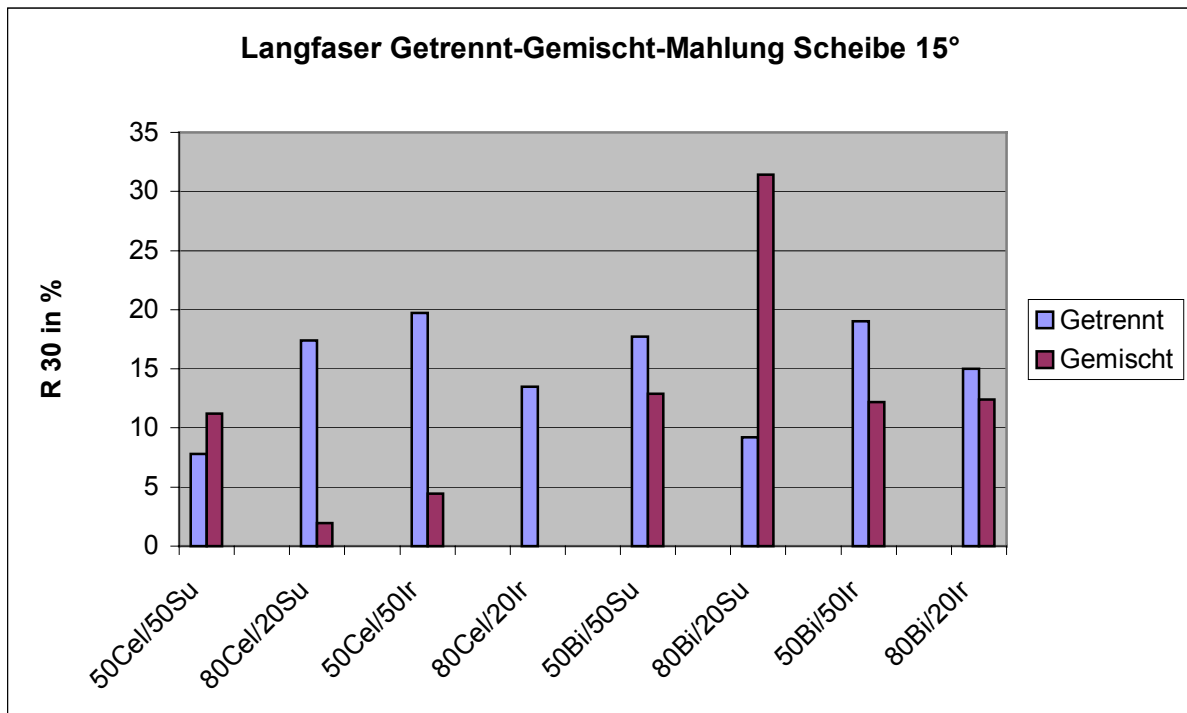


Abbildung 52: Langfasergehalt, Scheibe 15°

Normalerweise wäre in Korrespondenz zum SR-Wert zu erwarten, dass die nachträglich gemischten Stoffe einen höheren Langfasergehalt als die in der Mischung gemahlenen aufweisen. Leider gibt es in der Abbildung 52 zwei Abweichungen, die nicht leicht zu erklären sind. Addiert man die Rückstände 30 und 50, dann stimmt die Aussage wieder, auch wenn dies an dieser Stelle als Erklärung unbefriedigend ist.

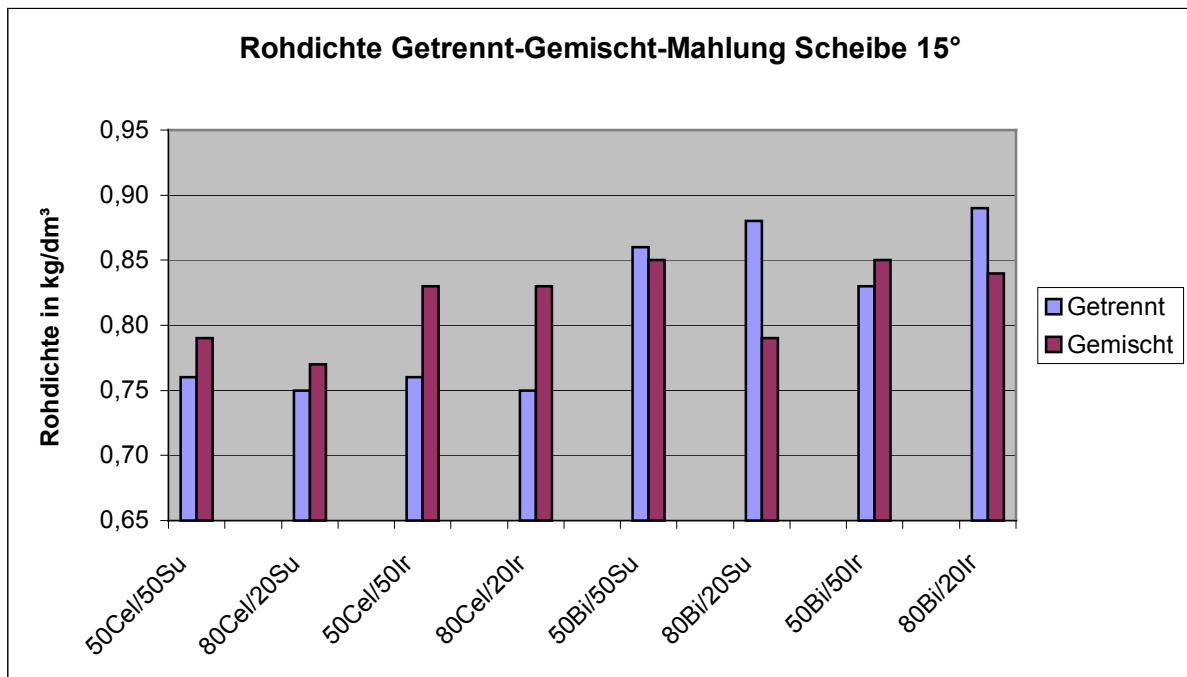


Abbildung 53: Rohdichte der Prüfblätter Getrennt-/Gemischtmahlung, Scheibe 15°

Die Rohdichte der Prüfblätter, die in der Abbildung 53 dargestellt ist, weist die gleiche Grundtendenz und die gleiche Anomalie aus, wie sie schon beim SR-Wert auftritt. Im Allgemeinen ist die Rohdichte bei den nachträglich gemischten Faserstoffen niedriger, da hier weniger Feinstoff produziert worden ist, als bei den in der Mischung gemahlenen Faserstoffen.

Abbildung 54 zeigt die Zugfestigkeit. Die Grundtendenz ist, dass die in der Mischung gemahlenen Zellstoffe eine höhere Zugfestigkeit ausbilden, als die nachträglich gemischten. Dies würde auch mit der Rohdichte im wesentlichen korrelieren.

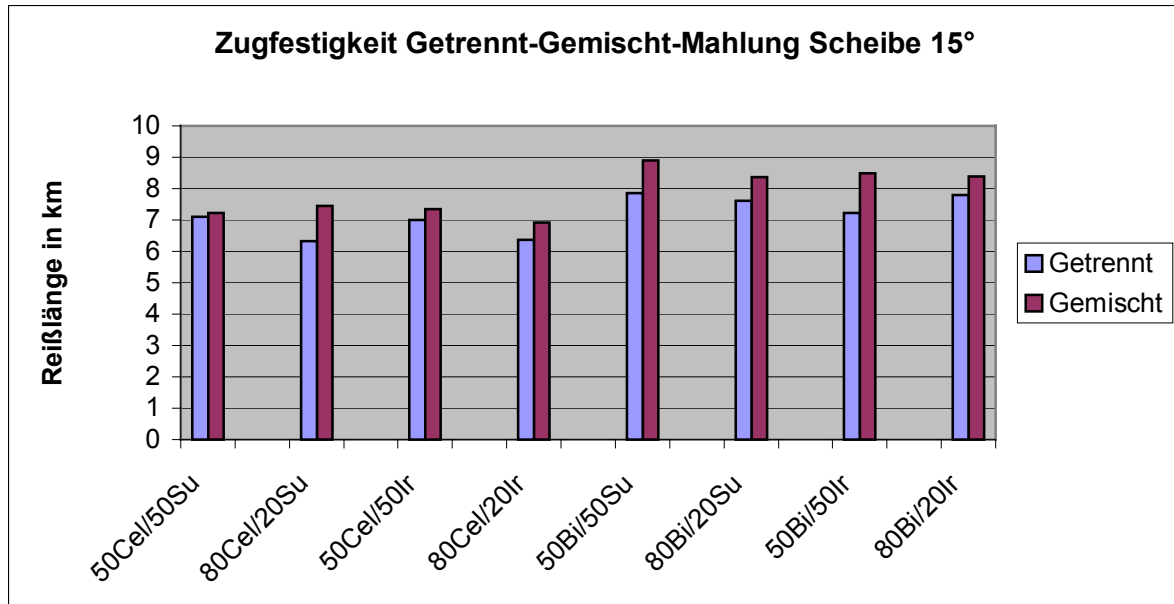


Abbildung 54: Zugfestigkeit, Scheibe 15°

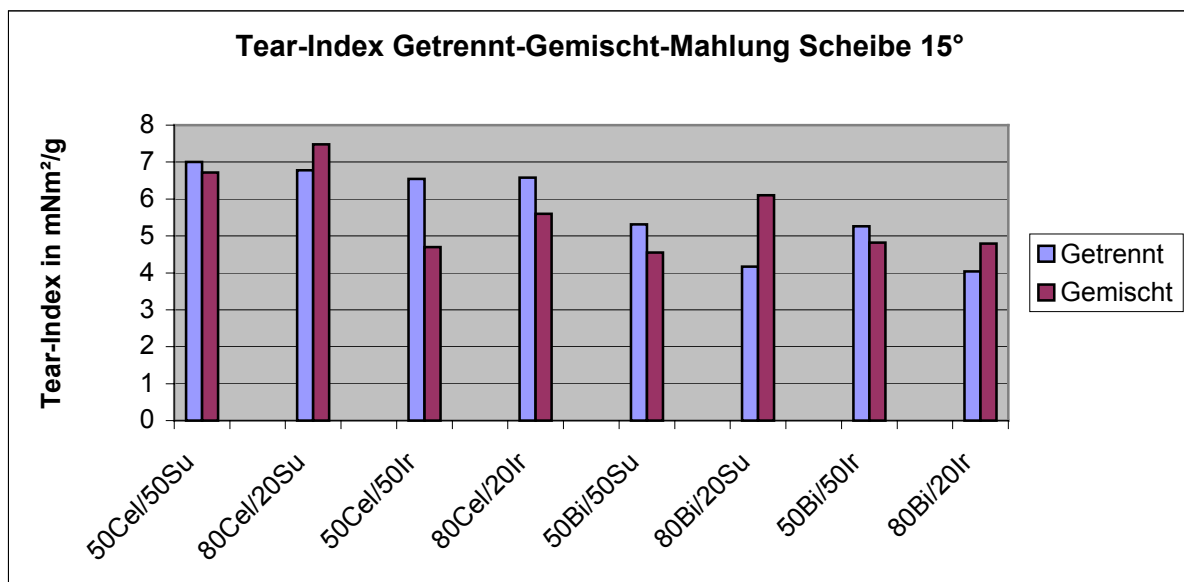


Abbildung 55: Tear-Index, Scheibe 15°

Hinsichtlich der dynamischen Festigkeit (Abbildung 55) sind die nachträglich gemischten Stoffe denen in der Mischung gemahlenen in der Regel überlegen. Insbesondere dann, wenn für die Langfaserkomponente das Optimum der Durchreißfestigkeit überschritten wurde, kann sich diese Tendenz auch umkehren (vgl. hierzu auch Abbildung 37). Durch die sehr starke Faserkürzung werden aber insgesamt nur relativ niedrige Werte erreicht.

5.4 Bewertung der Homogenität des Mahlprozesses

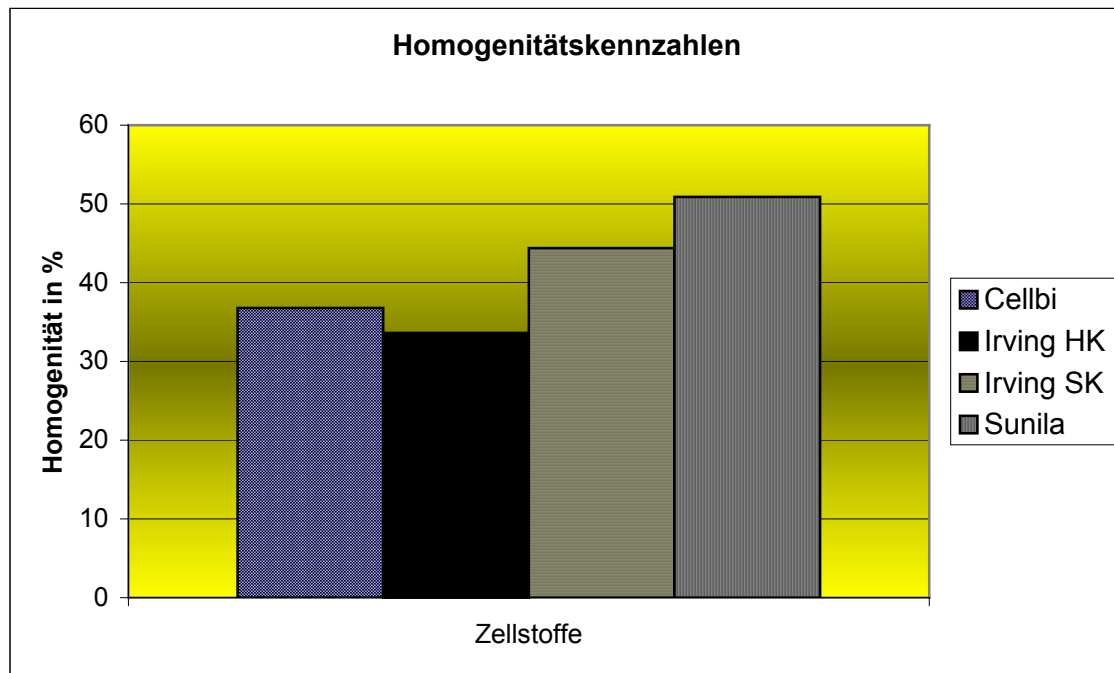


Abbildung 56: Homogenitätskennzahlen bei der Mahlung Scheibe 60°

Die Abbildung 56 zeigt die Homogenitätskennzahlen bei der Mahlung mit hohem Schnittwinkel. Sie werden sehr stark durch die Faserstoffart beeinflusst. Die Nadelholz Zellstoffe zeigen eine höhere Homogenität, als die Laubholz Zellstoffe. Innerhalb der gleichen Faserstoffart ist die Homogenität der Mahlbehandlung insbesondere dort hoch, wo die Mahlresistenz am größten ist. Dies gilt auch für die Mahlung mit niedrigem Schnittwinkel. Es hat sich gezeigt, dass die Homogenitätskennzahl außer mit der verbalen Aussage zur Mahlresistenz, die hier auch mit einem Zahlenwert belegbar wird, Informationen zum Potential der Entwicklung der Durchreißfestigkeit bietet.

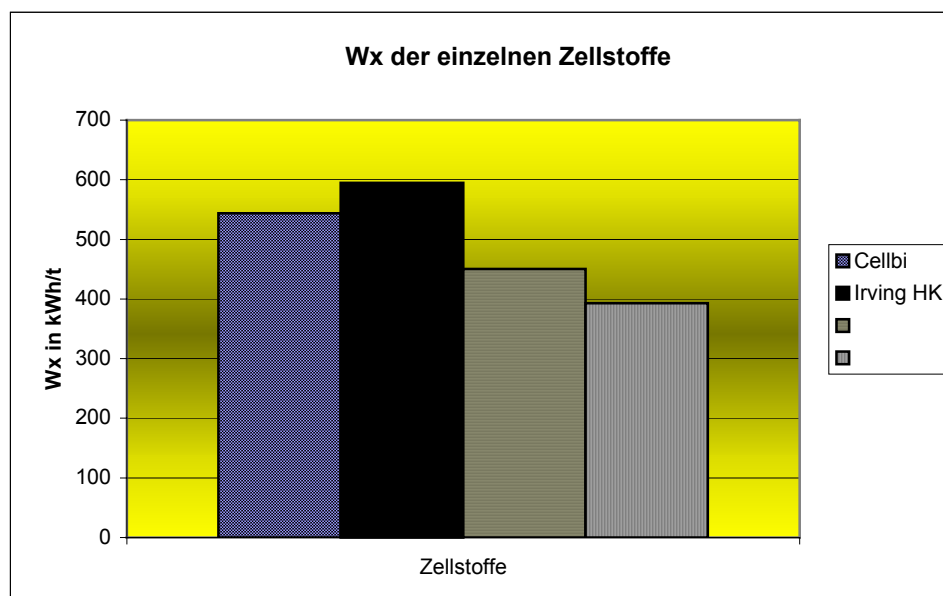


Abbildung 57: Energieaufnahme des bearbeiteten Faseranteils, Scheibe 60°

Abbildung 57 zeigt, dass bei hohem Schnittwinkel sehr viel Faserstoff auf der Messeroberfläche bearbeitet wird und dass der Energieeintrag in das Stoffsystem sehr gleichmäßig erfolgt. Dies lässt eine überwiegende Fibrillierung erwarten, die auch aus der Entwicklung der dynamischen Festigkeit und dem absoluten Niveau der erreichbaren statischen Festigkeit ersichtlich wird. Dies zeigt sich auch darin, dass bei vergleichbarer Intensität (Mahlkantenbelastung) Mahlspalte von 500 μm und größer auftraten. Ein sicheres Indiz dafür, dass der Faserstoff überwiegend auf der Messeroberfläche bearbeitet wird. Bei der Mahlung mit der Scheibe 15° traten zu Beginn der Mahlung selten Mahlspalte von größer als 300 μm auf. Gegen Ende der Mahlung waren es nur einige 10 μm oder im Falle des Birkenzellstoffes konnte die Mahlung bei 1,0 Ws/m nicht bis zu 200 kWh/t durchgeführt werden, da der Mahlspalt gegen Null ging und das System instabil wurde (Clampinggefahr). Dementsprechend fallen die Homogenitätskennzahlen bei der Mahlung mit der Scheibe 15° um rund eine Zehnerpotenz niedriger aus (Abbildung 58). Bei einem Durchgang durch den Refiner wird so nur wenig Faserstoff tatsächlich bearbeitet, dieser nimmt aber sehr viel Energie auf. Im Extremfall geht dies bis zu 15000 kWh/t bei Birke (Abbildung 59). Bei vergleichbarer Mahlantenbelastung gilt, dass bei der Mahlung mit der Scheibe 15° die Homogenität der Mahlung dann umso höher ist, je höher die Mahlresistenz des Zellstoffes/der Mischung ist. Wird die Mahlantenbelastung auf 1,5 Ws/m erhöht, sinkt die Homogenitätskennzahl weiter ab, da sich der Mahlspalt noch weiter verringert und noch weniger Faserstoff in Zone 3 bearbeitet werden kann. Am wenigsten homogen verläuft die Mahlung in den Fällen, in denen Birke allein oder in der Mischung auftritt. Die Homogenitätskennzahl von Celbi liegt überraschenderweise in einer ähnlichen Größenordnung, wie bei den Nadelholzzellstoffen. Dies äußert sich auch darin, dass Celbi trotz der bei 15° sehr ungünstigen Bedingungen für die Fibrillierung noch zu einer Entwicklung des Tear-Index in der Lage ist (vgl. Abbildung 27). Wenn wenig Faserstoff sehr hohe Energiemengen konsumiert, kann dies nur einhergehen mit einer weitgehenden Strukturzerstörung der Einzelfasern, wie die Entwicklung des Fein- und Feinststoffgehaltes auch eindrucksvoll beweist. Die Homogenitätskennzahl stellt daher ein subtiles Mittel zur Beschreibung der Vorgänge bei der Mahlung dar, das seine Aussagefähigkeit auch im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen unter Beweis gestellt hat, und in seinen Interpretationsmöglichkeiten noch nicht voll ausgeschöpft ist.

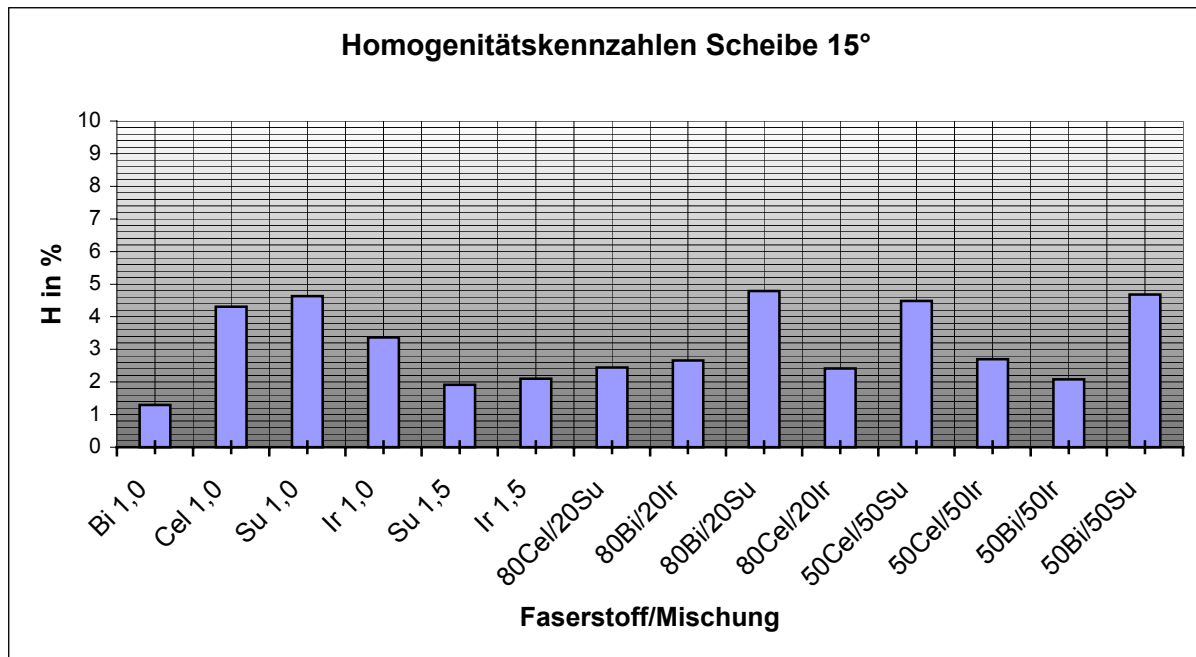


Abbildung 58: Homogenitätskennzahlen bei der Mahlung mit der Scheibe 15°

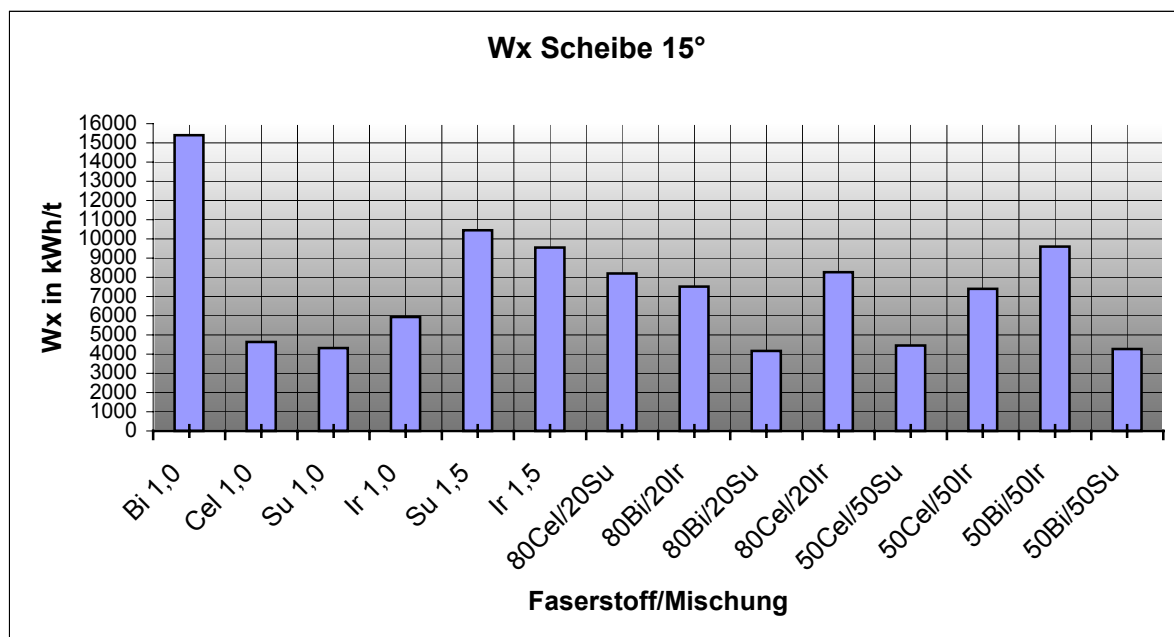


Abbildung 59: Energieaufnahme des bearbeiteten Faseranteils, Scheibe 15°

5.5 Eigenschaftsentwicklung der Zellstoffe in Abhängigkeit von der Mahlgarnitur

Der folgende Vergleich umfasst die beiden Scheibengarnituren mit einem Schnittwinkel von 60° und die Steilkegelgarnitur, die bei den Untersuchungen an der PTS eingesetzt wurden. Diese Gegenüberstellung soll vorrangig den Vergleich zwischen einer konventionellen unbeschichteten und einer keramikbeschichteten Scheibengarnitur ermöglichen.

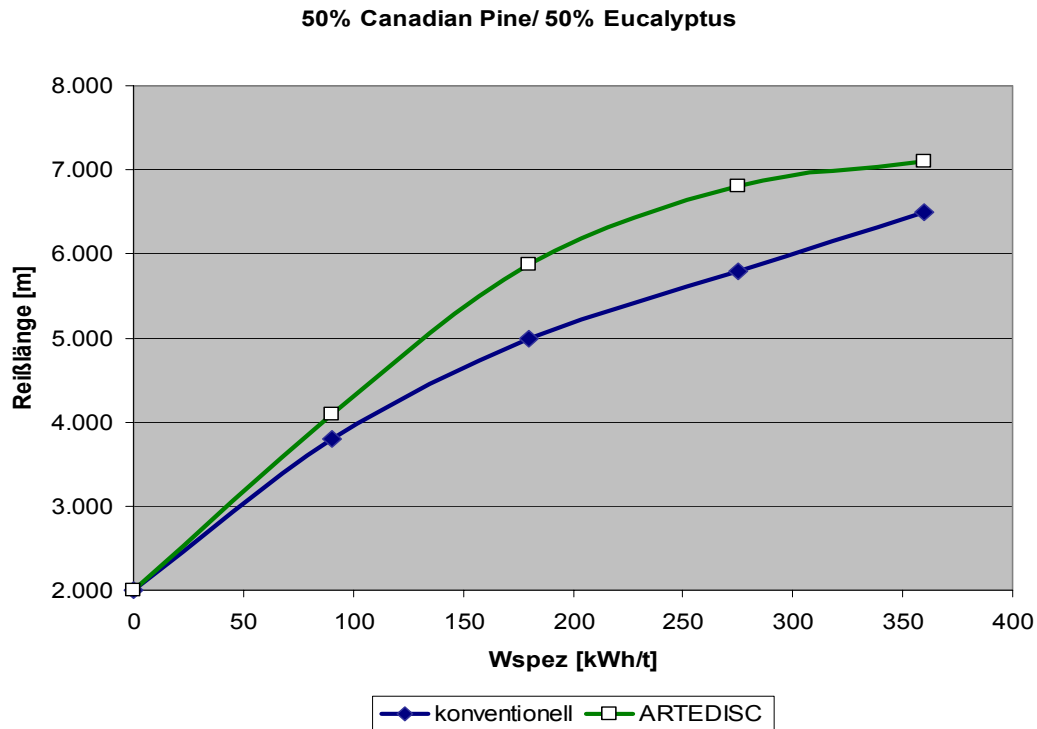


Abbildung 60: Vergleich der Reißlängenentwicklung zwischen konventioneller Scheibengarnitur und keramikbeschichteter Scheibe (nach Informationen der Fa. ARTE)

Wie im Abschnitt 4.3.1 bereits erwähnt, wurden der Fa. ARTE Rohlinge einer Chromstahlscheibengarnitur für die Beschichtung zur Verfügung gestellt. An die anschließende Erprobung dieser Garnitur im PTS-Refiner knüpfte sich die Erwartung, die von ARTE publizierten Ergebnisse, die sich auszugsweise in der Abbildung 60 und 61 wiederfinden, nachvollziehen zu können.

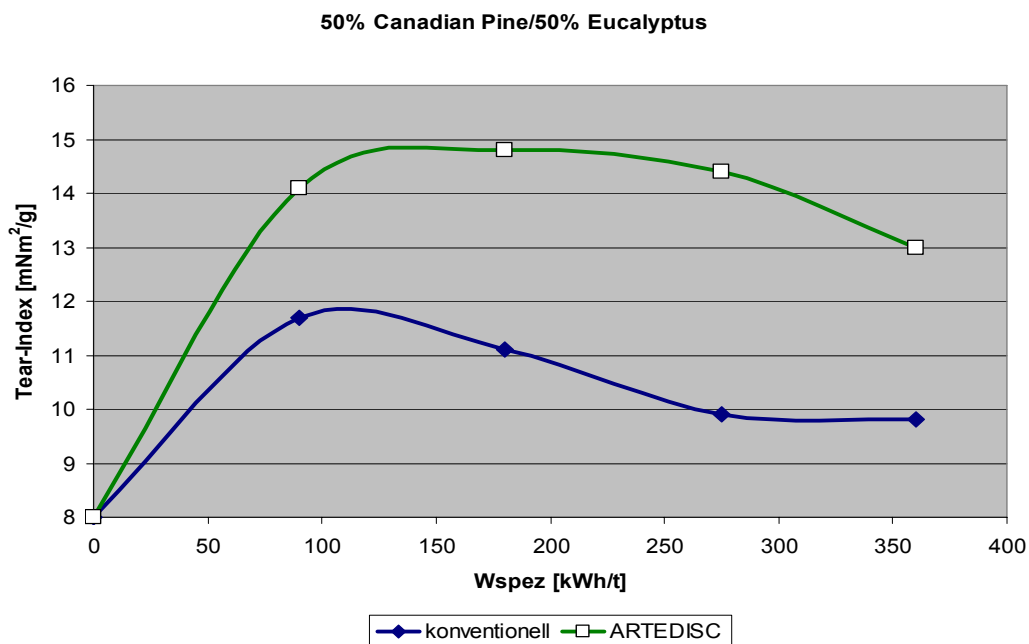


Abbildung 61: Vergleich der Durchreißfestigkeit zwischen konventioneller Scheibengarnitur und keramikbeschichteter Scheibe (nach Informationen der Fa. ARTE)

Demnach müsste man bei vergleichbarem spezifischen Energieeintrag bei Einsatz einer ARTEDISC-Garnitur sowohl mit höheren statischen als auch dynamischen Festigkeiten rechnen können.

Der Vergleich wird beispielhaft mit ECF-gebleichtem Zellstoff der Sorte Sunila durchgeführt, da für die Zellstoffmischungen keine Mahlkurven vorliegen. Für die restlichen gemahlene reinen Zellstoffe gelten im übrigen die gleichen Tendenzen.

Zellstoff: SUNILA; Bs 1,0 Ws/m

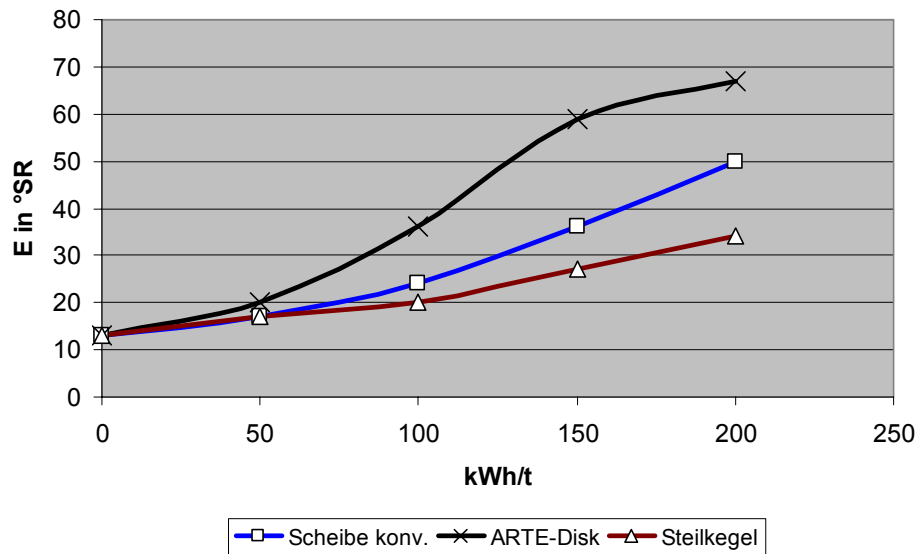


Abbildung 62: Entwässerungswiderstand in Abhängigkeit von der Mahlgarnitur

Bezogen auf gleichen spezifischen Energieeinsatz steigt der Entwässerungswiderstand bei der keramikbeschichteten Garnitur (ARTE-Disk) am raschesten an. Sehr verhalten entwickelt sich im Gegensatz dazu der Mahlgrad bei Einsatz der Steilkegelgarnitur (Abbildung 62).

Zellstoff: SUNILA; Bs 1,0 Ws/m

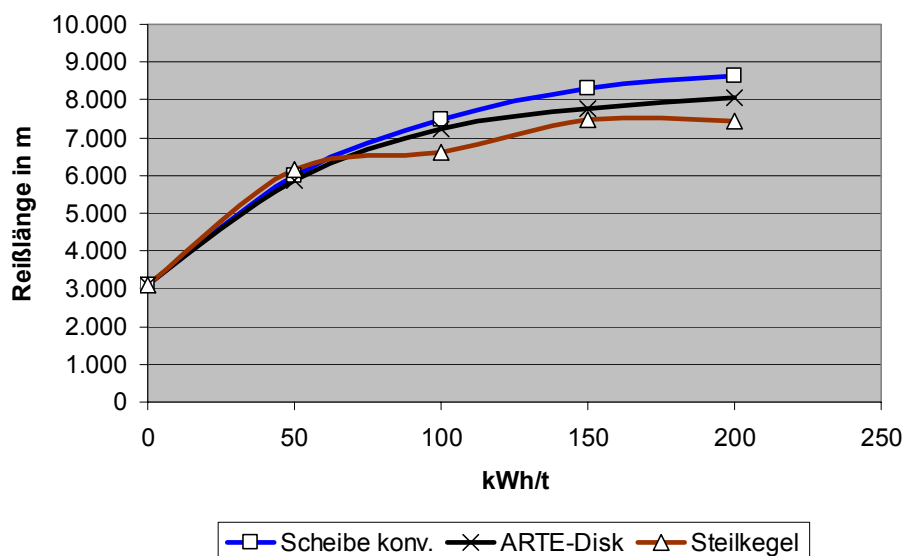


Abbildung 63: Reißlängenentwicklung in Abhängigkeit von der Mahlgarnitur

Diese Differenzierung verändert sich etwas in der Reißlängenentwicklung. Oberhalb eines spez. Energieeinsatzes von 50 kWh/t liefert die konventionelle Scheibe den größten Reißlängenzuwachs, gefolgt von der beschichteten Scheibe. Konform zur SR-Wert-Entwicklung verläuft der Gewinn an Reißlänge bei der Steilkegelgarnitur (Abbildung 63).

Zellstoff: SUNILA; Bs 1,0 Ws/m

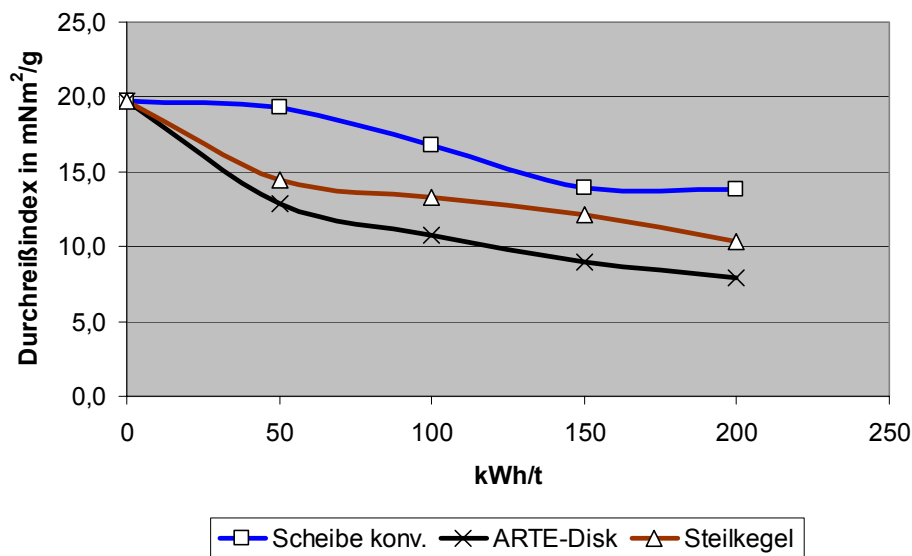


Abbildung 64: Durchreißfestigkeit in Abhängigkeit von der Mahlgarnitur

Die größten Unterschiede zwischen beschichteter und unbeschichteter Scheibengarnitur zeigen sich bei der Durchreißfestigkeit (Abbildung 64). Auch hier schneidet die Arte-Disk schlechter ab, als erwartet. Die dynamische Festigkeit liegt 30 bis 50 % niedriger im Vergleich zur konventionellen Scheibe und fällt schlechter aus als beim Steilkegel.

Zellstoff: SUNILA; Bs 1,0 Ws/m

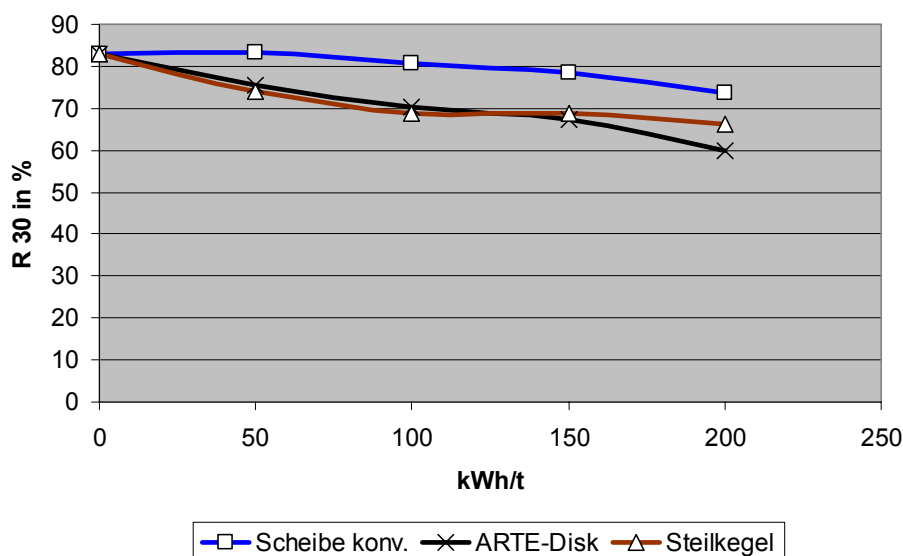


Abbildung 65: Langfaserfraktion in Abhängigkeit von der Mahlgarnitur

Obwohl die Beschichtung feinporig und auch nicht scharfkantig ausfällt, besitzt die keramisch beschichtete Garnitur einen bevorzugt kürzenden Mahleffekt. Das zeigt ein Blick auf die Entwicklung der Langfaserfraktion (Abbildung 65) und des Feinstoffgehaltes (Abbildung 66). Die Arte-Disk hat im Mahlungsverlauf einen um 10 % niedrigeren Langfaseranteil zur Folge, der sich proportional in einer Zunahme des Feinstoffgehaltes niederschlägt. Dabei ähneln sich die Kurvenverläufe von beschichteter Scheibe und Steilkegel sehr.

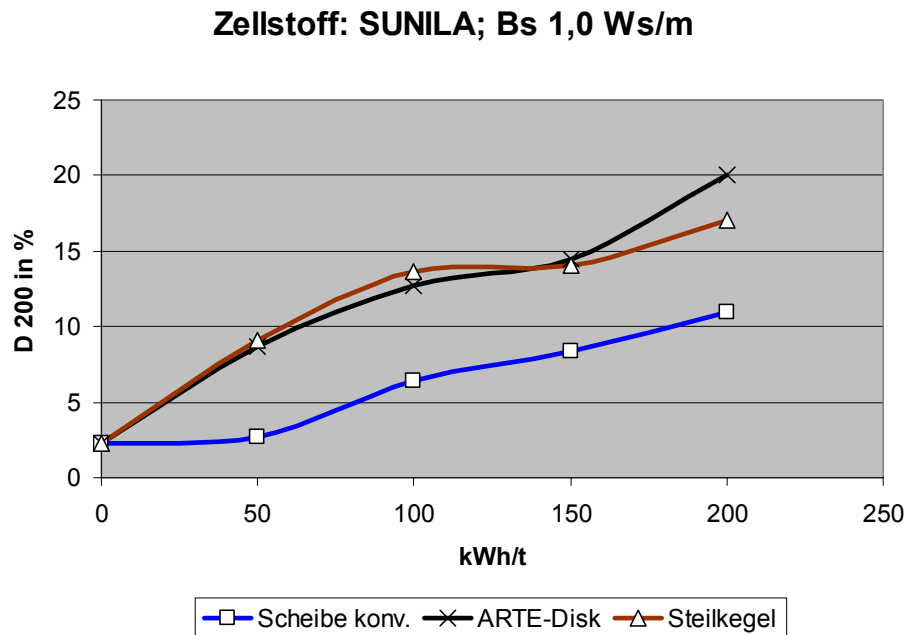


Abbildung 66: Feinstofffraktion in Abhängigkeit von der Mahlgarnitur

5.6 Vergleich der Mahlanlagen PTS - FHM

Der Vergleich der Mahlanlagen der PTS und der FHM kann anhand der Ergebnisse der Mahlung mit der Scheibe 60° erfolgen. Da die Geometrie der Mahlgarnituren nahezu identisch ist, die Drehzahl der Refiner vergleichbar und die Durchsatzmenge ebenfalls auf das gleiche Niveau einstellbar, sollten hier keine großen Überraschungen auftauchen.

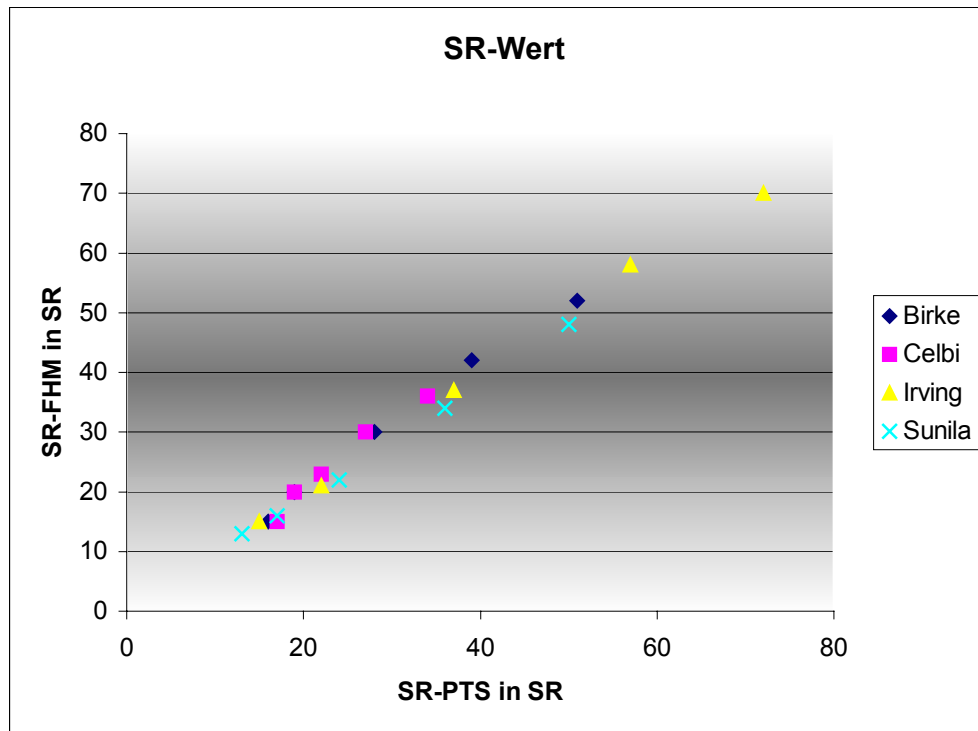


Abbildung 67: Mahlanlagenvergleich: Entwässerungswiderstand

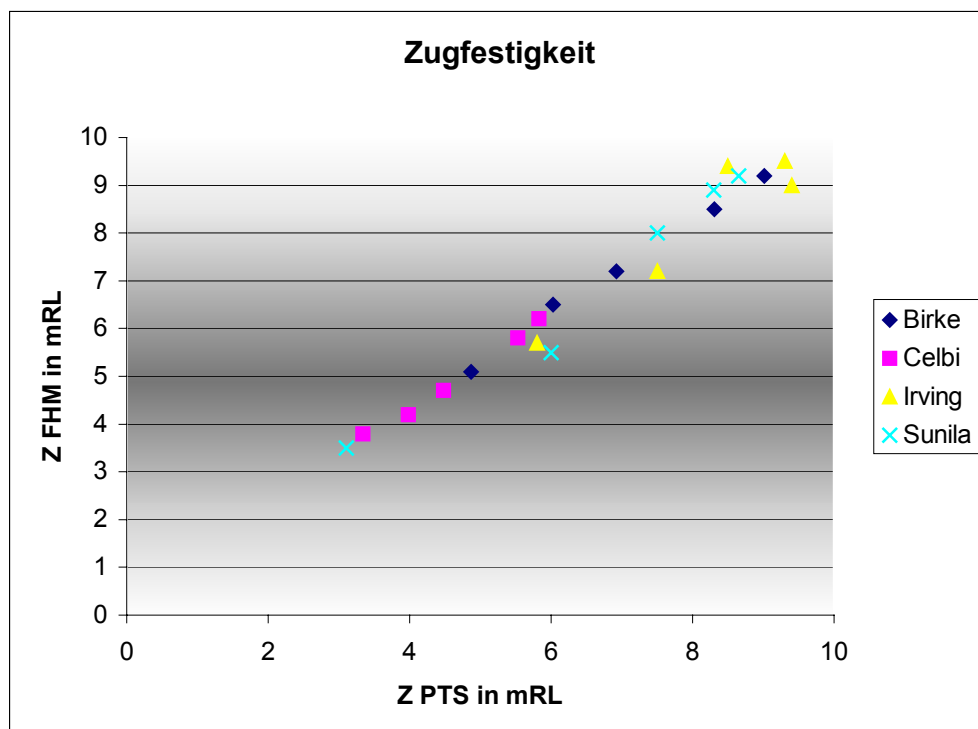


Abbildung 68: Mahlanlagenvergleich: Zugfestigkeit

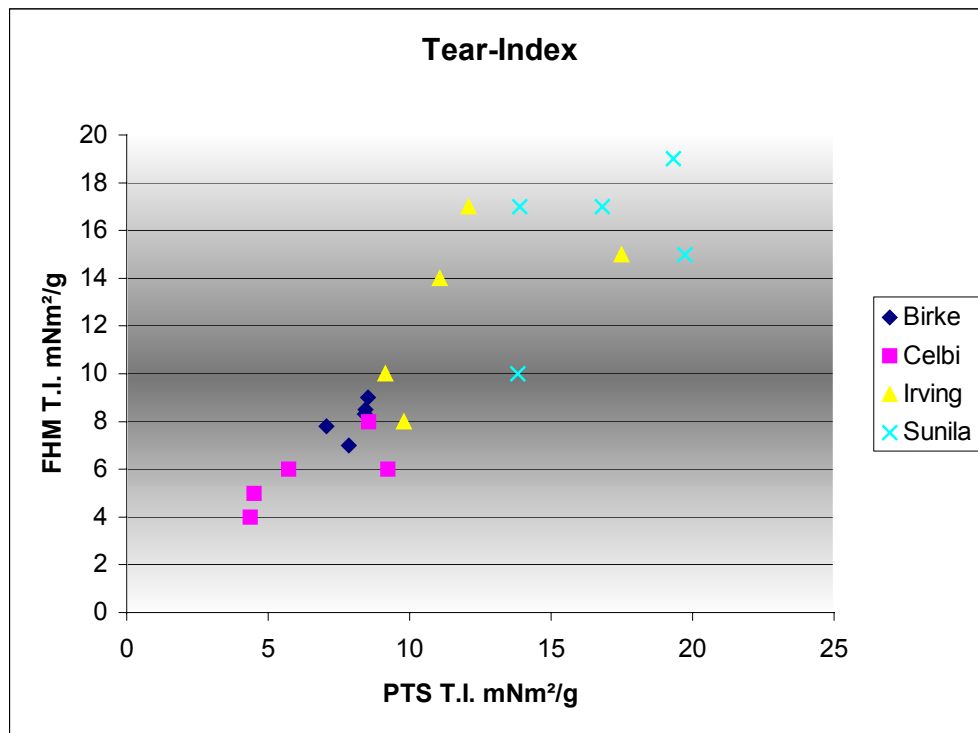


Abbildung 69: Mahlanlagenvergleich: Durchreißfestigkeit

Dies lässt sich auch sehr gut an der exemplarischen Gegenüberstellung einiger Eigenschaftskennwerte zeigen. Für die vergleichbaren Substrate wurden gute Übereinstimmungen hinsichtlich des SR-Wertes und der Zugfestigkeit erreicht. Lediglich bei der dynamischen Festigkeit gab es größere Differenzen, auf die bereits im Abschnitt 5.1 eingegangen wurde. Mögliche Ursachen für die höheren Werte an der PTS können zum einen in der unterschiedlichen Mahlweise (PTS: Zyklermahlung - FHM: Wechselbüttenmahlung) und zum anderen in der Stoffdichteverringerung durch zufließendes Sperrwasser bei der Mahlung an der FHM begründet sein.

6. Dank

Unser Dank gilt dem INFOR-Forschungsrat im Kuratorium für Forschung und Technik des VDP, Bonn, für die Beauftragung dieses Projektes sowie den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Anhang Ergebnisse Getrenntmahlung Scheibe 60° SW

Zellstoff	Bezeichnung	Bs Ws/m	Kennwert	Mahlpunkte kWh/t				
				OP	50	100	150	200
LHN	Birke	1,0	SR-Wert	16	19	28	39	51
LHH	Celbi	1,0	[°SR]	17	19	22	27	34
NHN	Irving	1,0		15	22	37	57	72
NHH	Sunila	1,0		13	17	24	36	50
NHN	Irving	1,5		15	21	34	54	70
NHH	Sunila	1,5		13	16	23	35	51
LHN	Birke	1,0	WRV	145,3	169,4	195,7	217,8	237,9
LHH	Celbi	1,0	[%]	128,7	146,1	160,5	176,2	191,8
NHN	Irving	1,0		136,0	177,7	214,8	241,1	267,2
NHH	Sunila	1,0		118,9	160,2	188,3	212,0	235,5
NHN	Irving	1,5		136,0	179,8	214,6	244,7	277,9
NHH	Sunila	1,5		118,9	162,8	196,7	221,6	243,9
LHN	Birke	1,0	R 30	15,01	8,32	10,90	11,53	6,26
LHH	Celbi	1,0	[%]	6,62	6,15	6,33	5,27	4,16
NHN	Irving	1,0		77,29	77,80	76,30	73,46	69,81
NHH	Sunila	1,0		82,97	83,29	80,65	78,32	73,72
NHN	Irving	1,5		77,29	77,53	72,04	68,50	67,05
NHH	Sunila	1,5		82,97	80,41	79,26	77,11	73,58
LHN	Birke	1,0	R 50	31,78	27,90	27,65	27,76	27,55
LHH	Celbi	1,0	[%]	58,07	58,28	58,06	57,90	58,46
NHN	Irving	1,0		8,90	8,02	8,29	8,87	9,10
NHH	Sunila	1,0		9,40	8,47	7,60	7,53	7,86
NHN	Irving	1,5		8,90	7,51	8,08	8,58	9,45
NHH	Sunila	1,5		9,40	7,34	7,27	7,28	7,63
LHN	Birke	1,0	D 200	6,26	8,32	10,90	11,53	15,01
LHH	Celbi	1,0	[%]	7,77	10,34	10,53	11,95	12,96
NHN	Irving	1,0		6,61	7,18	7,96	9,05	12,50
NHH	Sunila	1,0		2,29	2,68	6,41	8,36	10,10
NHN	Irving	1,5		6,61	8,16	12,87	14,36	14,08
NHH	Sunila	1,5		2,29	7,48	8,19	9,84	12,39
LHN	Birke	1,0	Bruchkraft	57	71	82	97	107
LHH	Celbi	1,0	[N]	39	47	54	65	70
NHN	Irving	1,0		70	87	110	112	109
NHH	Sunila	1,0		37	58	89	98	103
NHN	Irving	1,5		70	88	105	112	111
NHH	Sunila	1,5		37	72	85	93	110
LHN	Birke	1,0	Reißlänge	4,87	6,03	6,92	8,31	9,01
LHH	Celbi	1,0	[km]	3,34	3,98	4,48	5,53	5,83
NHN	Irving	1,0		5,80	7,50	8,50	9,40	9,30
NHH	Sunila	1,0		3,10	6,00	7,50	8,30	8,65
NHN	Irving	1,5		5,80	7,55	9,00	9,50	9,50
NHH	Sunila	1,5		3,10	6,25	7,20	7,70	8,20
LHN	Birke	1,0	Dehnung	2,2	2,6	2,8	3,3	3,5
LHH	Celbi	1,0	[%]	1,7	2,2	2,7	3,0	3,5
NHN	Irving	1,0		3,4	3,5	3,6	3,6	3,7
NHH	Sunila	1,0		2,5	3,5	3,6	3,7	3,8
NHN	Irving	1,5		3,4	2,8	3,3	3,1	3,0
NHH	Sunila	1,5		2,5	3,3	3,7	3,5	4,0
LHN	Birke	1,0	E-Modul	4491	5052	5485	6409	6851
LHH	Celbi	1,0	[MPa]	3139	3396	3584	4293	4285
NHN	Irving	1,0		3870	8841	10497	11218	11191
NHH	Sunila	1,0		4950	7364	9192	9958	10212
NHN	Irving	1,5		3870	9126	10550	11057	11090
NHH	Sunila	1,5		4950	7292	8631	9804	10321
LHN	Birke	1,0	D(E)	7,84	8,44	8,52	8,41	7,05
LHH	Celbi	1,0	[mNm ² /g]	4,37	4,51	5,72	8,55	9,22
NHN	Irving	1,0		17,48	12,08	11,06	9,15	9,79
NHH	Sunila	1,0		19,73	19,32	16,82	13,9	13,83
NHN	Irving	1,5		17,48	13,06	10,47	9,5	7,94
NHH	Sunila	1,5		19,73	20,45	17,67	13,93	11,72
LHN	Birke	1,0	Ld (Gurley)	3	7	20	64	179
LHH	Celbi	1,0	[s/100cm ³]	1	2	4	7	11
NHN	Irving	1,0		7	25	168	3813	2828
NHH	Sunila	1,0		2	6	23	97	368
NHN	Irving	1,5		7	21	116	496	2842
NHH	Sunila	1,5		2	8	27	109	435

Zellstoff	Bezeichnung	Bs Ws/m	Kennwert	Mahlpunkte kWh/t				
				OP	50	100	150	200
LHN	Birke	1,0	Spaltfest.	308	410	614	738	848
LHH	Celbi	1,0	[J/m ²]	192	250	279	394	526
NHN	Irving	1,0		238		kein Spalten!		
NHH	Sunila	1,0		144	437	469	615	kein Spalten!
NHN	Irving	1,5		238	548	kein Spalten!		
NHH	Sunila	1,5		144	344	525	642	kein Spalten!
LHN	Birke	1,0	Streukoeff.	29,88	27,35	25,99	23,67	21,85
LHH	Celbi	1,0	[cm ² /g]	38,65	37,58	36,40	34,76	34,45
NHN	Irving	1,0		28,40	26,33	23,65	20,56	18,28
NHH	Sunila	1,0		31,60	28,38	25,49	22,94	21,88
NHN	Irving	1,5		28,41	27,10	24,69	20,96	18,77
NHH	Sunila	1,5		31,58	27,88	25,44	23,38	20,60
LHN	Birke	1,0	Absorption	0,10	0,22	0,34	0,47	0,74
LHH	Celbi	1,0	[cm ² /g]	0,17	0,40	0,57	0,70	1,12
NHN	Irving	1,0		0,12	0,12	0,14	0,19	0,23
NHH	Sunila	1,0		0,10	0,19	0,19	0,22	0,23
NHN	Irving	1,5		0,12	0,19	0,20	0,18	0,22
NHH	Sunila	1,5		0,10	0,13	0,13	0,19	0,25

Ergebnisse Getrenntmahlung Steilkegel

Zellstoff	Bezeichnung	Bs Ws/m	Kennwert	Mahlpunkte kWh/t				
				OP	50	100	150	200
LHN	Birke	1,0	SR-Wert	16	25	35	49	62
LHH	Celbi	1,0	[°SR]	17	22	25	30	35
NHN	Irving	1,0		15	21	31	45	63
NHH	Sunila	1,0		13	17	20	27	34
NHN	Irving	1,5		15	21	30	46	65
NHH	Sunila	1,5		13	17	20	27	37
LHN	Birke	1,0	WRV	145,3	168,9	185,9	209,3	226,2
LHH	Celbi	1,0	[%]	128,7	136,8	148,2	166,1	175,8
NHN	Irving	1,0		136,0	160,7	178,3	196,3	218,4
NHH	Sunila	1,0		118,9	146,9	165,7	178,9	190,4
NHN	Irving	1,5		136,0	159,4	181,8	200,3	220,4
NHH	Sunila	1,5		118,9	153,8	170,7	185,4	201,2
LHN	Birke	1,0	R 30	6,26	6,08	5,79	5,04	4,39
LHH	Celbi	1,0	[%]	6,62	2,23	2,84	2,14	1,98
NHN	Irving	1,0		77,29	70,59	69,87	58,80	59,02
NHH	Sunila	1,0		82,97	74,16	68,95	68,69	66,15
NHN	Irving	1,5		77,29	67,43	68,35	61,65	56,80
NHH	Sunila	1,5		82,97	70,14	71,81	64,52	64,00
LHN	Birke	1,0	R 50	31,78	36,57	35,52	37,50	38,46
LHH	Celbi	1,0	[%]	58,07	58,46	59,10	56,87	56,08
NHN	Irving	1,0		8,90	9,13	11,22	12,17	14,16
NHH	Sunila	1,0		9,40	10,78	10,67	11,05	11,42
NHN	Irving	1,5		8,90	10,25	12,12	15,00	17,43
NHH	Sunila	1,5		9,40	10,61	11,00	11,02	11,76
LHN	Birke	1,0	D 200	6,26	11,44	13,76	13,35	14,79
LHH	Celbi	1,0	[%]	7,77	10,50	11,13	13,59	15,29
NHN	Irving	1,0		6,61	9,47	12,03	14,25	18,40
NHH	Sunila	1,0		2,29	9,08	13,59	14,04	17,02
NHN	Irving	1,5		6,61	7,05	9,18	10,02	10,60
NHH	Sunila	1,5		2,29	10,30	13,26	17,59	18,24
LHN	Birke	1,0	Bruchkraft	57	71	86	94	95
LHH	Celbi	1,0	[N]	39	50	59	64	74
NHN	Irving	1,0		70	86	95	91	99
NHH	Sunila	1,0		37	72,42	77,05	88,89	87,51
NHN	Irving	1,5		70	75	91	100	98
NHH	Sunila	1,5		37	67,78	82,14	86,79	98,88
LHN	Birke	1,0	Reißlänge	4870	6060	7300	7950	7950
LHH	Celbi	1,0	[m]	3340	4120	5050	5330	6070
NHN	Irving	1,0		5800	7300	7900	8050	8450
NHH	Sunila	1,0		3100	6160	6630	7750	7440
NHN	Irving	1,5		5800	6750	7650	8500	8350
NHH	Sunila	1,5		3100	5870	6980	7470	8400
LHN	Birke	1,0	Dehnung	2,2	2,6	2,7	2,9	2,6
LHH	Celbi	1,0	[%]	1,7	2,6	2,9	3,3	3,7
NHN	Irving	1,0		3,4	3,5	3,3	3,0	2,9
NHH	Sunila	1,0		2,5	3,6	3,6	3,5	3,5
NHN	Irving	1,5		3,4	3,5	3,4	3,1	2,8
NHH	Sunila	1,5		2,5	3,4	3,3	3,4	3,5
LHN	Birke	1,0	E-Modul	4491	5129	5967	6361	7559
LHH	Celbi	1,0	[MPa]	3139	3335	3884	3933	4424
NHN	Irving	1,0		3870	5080	5833	6120	7003
NHH	Sunila	1,0		3550	3983	4551	5388	5335
NHN	Irving	1,5		3870	4628	5675	6766	7094
NHH	Sunila	1,5		3550	4025	4893	5184	6011
LHN	Birke	1,0	D(E)	784	842	765	736	733
LHH	Celbi	1,0	[mN]	437	692	918	993	963
NHN	Irving	1,0		1748	940	800	760	660
NHH	Sunila	1,0		1973	1444	1332	1213	1037
NHN	Irving	1,5		1748	1010	910	730	700
NHH	Sunila	1,5		1973	1476	1239	1154	923
LHN	Birke	1,0	Ld (Gurley)	3	18	60	195	573
LHH	Celbi	1,0	[s/100cm ³]	1	3	6	11	19
NHN	Irving	1,0		7	24	102	272	1146
NHH	Sunila	1,0		2	7	16	52	124
NHN	Irving	1,5		7	16	62	317	1669
NHH	Sunila	1,5		2	7	21	65	135

Zellstoff	Bezeichnung	Bs Ws/m	Kennwert	Mahlpunkte kWh/t				
				OP	50	100	150	200
LHN	Birke	1,0	Spaltfest.	308	513	747	897	982
LHH	Celbi	1,0	[J/m ²]	192	303	438	548	640
NHN	Irving	1,0		238	454	595	626	807
NHH	Sunila	1,0		144	277	467	579	700
NHN	Irving	1,5		238	504	662	682	910
NHH	Sunila	1,5		144	392	504	660	644
LHN	Birke	1,0	Streukoeff.	29,88	25,31	24,28	22,17	20,18
LHH	Celbi	1,0	[cm ² /g]	38,65	36,96	35,50	35,23	35,66
NHN	Irving	1,0		28,40	26,80	24,08	21,36	20,64
NHH	Sunila	1,0		31,60	26,37	26,03	24,20	23,07
NHN	Irving	1,5		28,41	27,72	25,11	22,77	20,32
NHH	Sunila	1,5		31,58	28,07	25,93	24,37	22,75
LHN	Birke	1,0	Absorption	0,10	0,24	0,34	0,45	0,54
LHH	Celbi	1,0	[cm ² /g]	0,17	0,32	0,37	0,43	0,57
NHN	Irving	1,0		0,12	0,19	0,23	0,32	0,45
NHH	Sunila	1,0		0,10	0,17	0,16	0,22	0,23
NHN	Irving	1,5		0,12	0,15	0,19	0,29	0,35
NHH	Sunila	1,5		0,10	0,20	0,19	0,25	0,32

Ergebnisse Getrenntmahlung ARTE- Disc

Zellstoff	Bezeichnung	Bs Ws/m	Kennwert	Mahlpunkte kWh/t				
				OP	50	100	150	200
LHN	Birke	1,0	SR-Wert	16	25	34	44	50
LHH	Celbi	1,0	[°SR]	17	22	24	28	32
NHN	Irving	1,0		15	29	50	69	80
NHH	Sunila	1,0		13	20	36	59	67
NHN	Irving	1,5		15	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		13	25	39	63	68
LHN	Birke	1,0	WRV	136,5	159,9	171,9	187,5	197,0
LHH	Celbi	1,0	[%]	123,9	131,4	138,4	144,9	151,3
NHN	Irving	1,0		129,2	170,1	193,0	225,3	259,4
NHH	Sunila	1,0		113,9	155,6	183,1	212,3	242,5
NHN	Irving	1,5		136,0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		113,9	160,6	186,5	219,8	235,6
LHN	Birke	1,0	R 30	45,50	41,15	39,93	36,39	36,42
LHH	Celbi	1,0	[%]	6,62	1,58	1,28	1,40	1,04
NHN	Irving	1,0		77,29	73,55	66,33	63,23	55,15
NHH	Sunila	1,0		82,97	75,46	70,34	67,26	59,98
NHN	Irving	1,5		77,29	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		82,97	72,66	69,02	63,24	59,73
LHN	Birke	1,0	R 50	31,78	33,14	33,41	33,26	33,59
LHH	Celbi	1,0	[%]	58,07	51,74	50,69	53,82	53,06
NHN	Irving	1,0		8,90	9,84	10,24	11,60	13,37
NHH	Sunila	1,0		9,40	9,75	9,98	11,24	12,07
NHN	Irving	1,5		8,90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		9,40	10,88	11,63	12,71	13,53
LHN	Birke	1,0	D 200	6,26	10,99	11,33	14,45	13,15
LHH	Celbi	1,0	[%]	7,77	12,91	13,81	13,84	12,50
NHN	Irving	1,0		6,61	7,85	13,85	< 16,94	< 22,13
NHH	Sunila	1,0		2,29	8,66	12,71	< 14,96	< 20,77
NHN	Irving	1,5		6,61	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		2,29	9,15	10,75	< 16,61	< 18,55
LHN	Birke	1,0	Bruchkraft	57	78	85	86	95
LHH	Celbi	1,0	[N]	39	47	53	55	59
NHN	Irving	1,0		70	87	101	105	101
NHH	Sunila	1,0		37	69	84	91	94
NHN	Irving	1,5		70	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		37	67	85	98	96
LHN	Birke	1,0	Reißlänge	4870	6670	7120	7290	8030
LHH	Celbi	1,0	[m]	3340	4000	4550	4650	5000
NHN	Irving	1,0		5800	7370	8600	8920	8590
NHH	Sunila	1,0		3100	5850	7250	7660	8040
NHN	Irving	1,5		5800	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		3100	5710	7220	8420	8150
LHN	Birke	1,0	Dehnung	2,2	2,8	3,0	3,2	3,3
LHH	Celbi	1,0	[%]	1,7	2,1	2,6	2,6	3,0
NHN	Irving	1,0		3,4	3,9	3,9	3,7	3,7
NHH	Sunila	1,0		2,5	3,8	4,1	4,0	4,0
NHN	Irving	1,5		3,4	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		2,5	4,0	4,2	4,5	4,2
LHN	Birke	1,0	E-Modul	4491	5163	5460	5532	6004
LHH	Celbi	1,0	[MPa]	3139	3492	3736	3890	3971
NHN	Irving	1,0		3870	4980	6010	6665	6686
NHH	Sunila	1,0		3550	3843	4606	5255	5902
NHN	Irving	1,5		3870	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		3550	3639	4590	5437	5687
LHN	Birke	1,0	D(E)	784	850	849	701	773
LHH	Celbi	1,0	[mN]	437	390	470	500	550
NHN	Irving	1,0		1748	892	769	628	589
NHH	Sunila	1,0		1973	1283	1076	899	794
NHN	Irving	1,5		1748	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		1973	1375	1023	936	828
LHN	Birke	1,0	WRA		1028	1132	1142	1160
LHH	Celbi	1,0	[mNm/m]		550	570	690	780
NHN	Irving	1,0			1802	1673	1513	1389
NHH	Sunila	1,0			2242	2294	1964	1890
NHN	Irving	1,5			n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5			2345	2056	1754	1839
LHN	Birke	1,0	Ld (Gurley)	3	11	22	47	72
LHH	Celbi	1,0	[s/100cm ³]	1	3	4	6	8
NHN	Irving	1,0		7	50	253	1400	>8000
NHH	Sunila	1,0		2	13	96	494	1549
NHN	Irving	1,5		7	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		2	19	86	376	854

Zellstoff	Bezeichnung	Bs Ws/m	Kennwert	Mahlpunkte kWh/t				
				OP	50	100	150	200
LHN	Birke	1,0	Spaltfest.	308	405	565	601	746
LHH	Celbi	1,0	[J/m ²]	192	224	268	326	437
NHN	Irving	1,0		238	638	829	949	1013
NHH	Sunila	1,0		144	456	578	813	819
NHN	Irving	1,5		238	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		144	447	569	738	808
LHN	Birke	1,0	Streukoeff.	29,88	28,57	26,58	25,49	24,61
LHH	Celbi	1,0	[cm ² /g]	38,65	40,88	40,67	39,53	40,04
NHN	Irving	1,0		28,40	27,22	24,38	21,40	17,76
NHH	Sunila	1,0		31,60	28,31	25,90	22,81	21,31
NHN	Irving	1,5		28,41	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		31,58	30,96	28,34	24,36	22,70
LHN	Birke	1,0	Absorption	0,10	0,21	0,20	0,18	0,17
LHH	Celbi	1,0	[cm ² /g]	0,17	0,08	0,10	0,09	0,12
NHN	Irving	1,0		0,12	0,29	0,32	0,35	0,28
NHH	Sunila	1,0		0,10	0,19	0,18	0,21	0,15
NHN	Irving	1,5		0,12	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
NHH	Sunila	1,5		0,10	0,12	0,12	0,15	0,20

Ergebnisse Getrennmahlung Steilkegel - Mischungen

Kennwert	ME	Mischungen							
		50Bi/50Ir	80Bi/20Ir	50Bi/50Su	80Bi/20Su	50Ce/50Ir	80Ce/20Ir	50Ce/50Su	80Ce/20Su
SR-Wert	[°SR]	48	48	36	44	42	37	33	33
WRV	[%]	197,3	196,7	184,6	192,5	119,4	166,6	162,9	163,7
R 30	[%]	53,34	45,69	55,85	46,55	37,76	18,86	40,16	20,46
R 50	[%]	20,48	25,69	20,15	26,65	28,47	43,28	25,98	43,82
D 200	[%]	13,12	14,40	12,50	12,93	13,74	13,53	14,72	11,48
Bruchkraft	[N]	97	98	100	96	90	80	81	75
Reißlänge	[m]	8260	8290	8490	8150	7450	6760	6910	6410
Dehnung	[%]	3,1	3,1	3,3	3,2	3,7	3,6	3,6	3,6
E-Modul	[MPa]	6488	6578	6087	7388	5324	4847	4736	4563
D(E)	[mN]	814	737	892	780	1036	979	1182	1216
Ld (Gurley)	[s/100cm ³]	250	183	95	123	67	29	27	18
Spaltfest.	[J/m ²]	861	950	675	762	689	605	600	610
Streukoeff.	[cm ² /g]	21,69	21,86	23,17	22,82	28,16	31,77	28,74	31,94
Absorption	[cm ² /g]	0,82	0,43	0,30	0,32	0,91	0,63	0,66	0,39

Bs 1,0 Ws/m; 150 kWh/t

Ergebnisse Getrenntmahlung ARTE-Disc

Kennwert	ME	Mischungen							
		50Bi/50Ir	80Bi/20Ir	50Bi/50Su	80Bi/20Su	50Ce/50Ir	80Ce/20Ir	50Ce/50Su	80Ce/20Su
SR-Wert	[°SR]	56	49	47	44	48	36	40	32
WRV	[%]	192,9	180,3	181,9	176,7	175,3	158,2	172,4	155,2
R 30	[%]	47,70	40,68	49,54	41,90	30,97	15,32	35,88	15,59
R 50	[%]	23,88	29,75	23,68	29,52	29,55	41,74	26,39	40,56
D 200	[%]	< 16,29	13,25	12,98	< 14,97	15,10	11,93	13,04	14,42
Bruchkraft	[N]	95	92	92	86	86	67	71	64
Reißlänge	[m]	8200	8000	7850	7350	7300	5750	6000	5550
Dehnung	[%]	3,7	3,4	3,8	3,3	3,9	3,2	4,0	3,4
E-Modul	[MPa]	5837	5900	5718	5704	5216	4461	4729	4322
D(E)	[mN]	712	660	880	750	780	740	990	710
Ld (Gurley)	[s/100cm ³]	223	74	101	56	66	16	39	11
Spaltfest.	[J/m ²]	741	691	700	674	644	497	513	414
Streukoeff.	[cm ² /g]	25,96	27,10	26,89	27,51	33,32	37,19	34,21	37,62
Absorption	[cm ² /g]	0,12	0,13	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10

Bs 1,0 Ws/m; 150 kWh/t

Ergebnisse Gemischtmahlung Steilkegel

Kennwert	ME	Mischungen							
		50Bi/50Ir	80Bi/20Ir	50Bi/50Su	80Bi/20Su	50Ce/50Ir	80Ce/20Ir	50Ce/50Su	80Ce/20Su
SR-Wert	[°SR]	59	51	52	51	52	40	40	39
WRV	[%]	207,6	196,7	200,0	197,1	190,2	168,4	177,2	167,9
R 30	[%]	47,56	39,81	51,50	44,80	30,56	13,19	33,92	15,19
R 50	[%]	22,26	29,82	22,84	27,01	32,77	45,29	31,68	44,56
D 200	[%]	13,93	13,81	12,21	<15,46	14,80	12,41	11,31	12,74
Bruchkraft	[N]	99	91	88	91	88	73	79	68
Reißlänge	[m]	8150	7650	7450	7600	7500	6200	6550	5700
Dehnung	[%]	3,1	2,9	3,1	3,2	3,5	3,3	3,3	3,3
E-Modul	[MPa]	6616	6594	5392	5936	5685	4666	5117	4392
D(E)	[mN]	700	640	770	700	810	740	950	790
Ld (Gurley)	[s/100cm ³]	532	149	251	182	124	26	43	25
Spaltfest.	[J/m ²]	777	702	728	768	623	473	498	496
Streukoeff.	[cm ² /g]	21,77	23,00	22,28	22,97	28,79	32,74	29,27	32,47
Absorption	[cm ² /g]	0,34	0,34	0,23	0,23	0,31	0,38	0,21	0,29

Bs 1,0 Ws/m; 150 kWh/t

Ergebnisse Gemischtmahlung ARTE-Disc

Kennwert	ME	Mischungen							
		50Bi/50Ir	80Bi/20Ir	50Bi/50Su	80Bi/20Su	50Ce/50Ir	80Ce/20Ir	50Ce/50Su	80Ce/20Su
SR-Wert	[°SR]	58	57	54	49	55	39	55	39
WRV	[%]	201,6	192,6	195,7	189,1	183,1	161,5	184,8	159,7
R 30	[%]	48,17	39,35	50,23	38,91	28,54	11,9	30,06	11,82
R 50	[%]	22,73	29,71	21,90	30,03	30,00	43,92	30,16	40,19
D 200	[%]	14,52	14,47	< 16,91	15,25	15,51	13,17	13,53	13,28
Bruchkraft	[N]	96	95	92	87	83	68	78	68
Reißlänge	[m]	7980	8220	7850	7340	6970	5780	6620	5760
Dehnung	[%]	3,4	3,4	3,8	3,4	4,0	3,6	3,9	3,5
E-Modul	[MPa]	6223	6317	5828	5686	4958	4289	4798	4296
D(E)	[mN]	701	620	836	719	830	892	868	749
Ld (Gurley)	[s/100cm ³]	318	142	237	103	94	18	95	16
Spaltfest.	[J/m ²]	839	806	688	652	714	463	698	482
Streukoeff.	[cm ² /g]	23,60	24,64	25,00	25,08	30,24	34,18	30,22	34,34
Absorption	[cm ² /g]	0,23	0,19	0,18	0,16	0,23	0,17	0,21	0,2

Bs 1,0 Ws/m; 150 kWh/t