

Bild: S. Heinemann

Gekürzte Kiefersulfatfasern

# Einfluss der Messerbreite auf Messerkräfte und Faserkürzung bei der Zellstoffmahlung

## Neue Erkenntnisse zur Rolle der Messerbreite in Niederkonsistenzrefinern

**Dieser Beitrag beschäftigt sich mit Kräften in Niederkonsistenzrefinern und deren Einfluss auf Faserkürzung. Wir zeigen, dass die Kraft pro Messerlänge, welche sich durch eine einfache Rechnung aus der Spezifischen Kantenbelastung (SEL) ableiten lässt, ein hilfreicher Parameter ist, um den Schwellenwert der Kraft zu beschreiben unterhalb dessen Faserkürzung vermieden werden kann. Unsere Analyse wird durch Ergebnisse von drei Untersuchungen mit unterschiedlichen Refinern, davon direkte Kraftmessung in einem Fall, sowie Daten aus der Literatur belegt. Im Besonderen zeigen wir, dass geringe Messerbreiten zu hohen Kräften führen und infolgedessen die Spezifische Kantenbelastung reduziert werden muss, um Faserkürzung zu vermeiden. Wir stellen auch Überlegungen bezüglich Untergrenzen für die Messerbreite an.**

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des PTS Faserstoffsymposiums im November 2017 präsentiert und der Artikel in voller Länge im Nordic Pulp and Paper Research Journal, (33)2: 220-225 (2018) veröffentlicht.

### Einleitung

Zunächst wollen wir das Gesamtbild von Energie und Intensität bei der Niederkonsistenzmahlung beschreiben. Der geläufigste Parameter zur Erfassung des Mahlvorganges ist die spezifische Mahlergie  $E$ . Aufgrund der Tatsache, dass die Mahlung ein periodischer, sich wiederholender Prozess ist, besteht die Mahlergie aus zwei Komponenten, nämlich der Anzahl  $N$  der Belastungen auf den Zellstoff und die Intensität  $I$  einer jeden Belastung. Das Produkt dieser beiden Größen entspricht der Energie

$$(1) E = N \cdot I$$

Wie in Abbildung 1 verdeutlicht wird erzeugen verschiedene Kombinationen von  $N$  und  $I$  bei einer gegebenen Energie  $E$  unterschiedliche Wirkungen auf den Zellstoff. Jeweils zwei der Variablen in Gleichung 1 bestimmen den Wert der dritten. Es ist üblich nur Energie und Intensität zu verwenden.

Die meist verbreitete Messgröße für die Intensität der Mahlung ist die Spezifische Kantenbelastung  $SEL$ . Sie wurde in Deutschland (Brecht

Autoren: Richard Kerekes, University of British Columbia, 2385 E Mall, Vancouver, BC., Canada, V6T1Z4, Email: richard.kerekes@ubc.ca; Frank P. Meltzer, Mercer Pulp Products, Charlottenstraße 59, 10117 Berlin, Germany, Email: frank.meltzer@mercerint.com

und Siewert<sup>2</sup> 1966) entwickelt und basiert auf einer logischen Betrachtungsweise der Leistungsverteilung über die Messerkreuzungspunkte bei der Mahlung. Später wurden zusätzliche Variablen durch eine Modifizierte Kantenbelastung (Meltzer und Rautenbach<sup>3</sup> 1994) berücksichtigt. Obwohl empirisch hergeleitet, kann die SEL von Grundprinzipien abgeleitet und ihre exakte wissenschaftliche Bedeutung als die Energie, die je Messerkreuzungspunkt und Messerlänge übertragen wird, dargestellt werden. Diese von Kerekes und Senger<sup>4</sup> (2006) vorgestellte Herleitung ist im Anhang wiedergegeben.

Angesichts dieser Definition kann die SEL als Produkt von zwei Variablen dargestellt werden, welche die Energieübertragung durch einen bewegten Körper beschreiben. Das ist die Kraft  $F$  multipliziert mit der Distanz  $s$ , über die die Kraft wirkt. Daraus ergibt sich  $SEL = F \cdot s$ . Im Wesentlichen ist diese Faktorzerlegung analog der zuvor für die Energie beschriebenen und wird in Abbildung 2 dargestellt.

Wir betrachten nun den Effekt dieser Variablen auf Fasereigenschaften. Die interne Fibrillierung ist einer der Hauptmahleffekte und wird durch das Aufbrechen molekularer Bindungen erzeugt. Dieses Aufbrechen entsteht durch die Beaufschlagung der Fasern mit Spannungen, deren Ursache Kräfte sind. Erhöhte Spannungen durch erhöhte Kräfte führen zur Faserkürzung, einem weiteren Hauptmahleffekt. Der dritte Hauptmahleffekt, die externe Fibrillierung, entsteht jedoch durch Abrasion und ist das Ergebnis der Energieübertragung bei der Relativbewegung von zwei Körpern. Zusammengefasst, die Schlüsselgröße für zwei der drei Haupteffekte der Mahlung ist Kraft, nicht Energie. In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die Faserkürzung.

### Analyse

Wie zuvor beschrieben können wir die Messerkraft wie folgt ausdrücken

$$(2) \quad F = \frac{SEL}{s}$$

Wir stellen fest, dass  $F$  identisch der von Lumiainen<sup>6</sup> (1990) entwickelten Spezifischen Flächenbelastung  $SSL$  ist, wenn  $s$  der Messerbreite entspricht. Die  $SSL$  wurde als empirische Abwandlung der  $SEL$  entwickelt, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass die Leistung über die Breite eines Messers anstatt nur an der Messerkante, wie von der  $SEL$  impliziert, übertragen wird. Unsere Herleitung zeigt, dass die  $SEL$  tatsächlich einer Energie pro Messerlänge entspricht und somit  $F$  eine Kraft pro Messerlänge in Richtung der Messerbewegung ist. Unter Annahme eines effektiven Reibungskoeffizienten  $\mu$  können wir den Druck, der auf die Messeroberfläche wirkt, abschätzen:

$$(3) \quad P = \frac{SEL}{\mu s^2}$$

Weitere Aspekte dieser Herleitung können bei Kerekes<sup>7</sup> (2011) nachgelesen werden.

Eine entscheidende Frage ist die Größe von  $s$ . Für den Fall, dass die Messerbreite  $W$  größer als eine Faserlänge  $l$  (d.h.  $W > l$ ) ist, wird der Großteil des Druckes über eine Zone von der Dimension ungefähr einer Faserlänge ausgeübt (Goncharov<sup>8</sup> 1971). Folglich gilt  $s = l$ . Demgegenüber bestimmt die Messerbreite die Druckzone, wenn die Messerbreite kleiner als die Faserlänge, d.h.  $W < l$ , ist. In diesem Fall gilt  $s = W$ . Im Rahmen dieser Studie verwenden wir den längengewichteten mittleren Wert für die Faserlänge  $l$ .

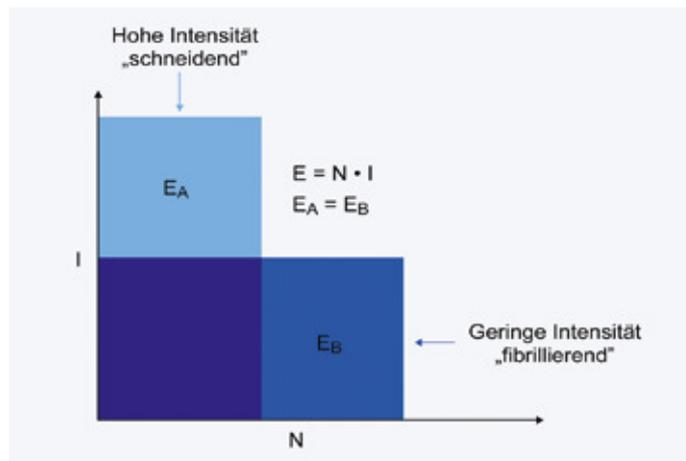


Abbildung 1: Darstellung der spezifischen Mahlenergie als Produkt der Anzahl und Intensität der Belastungen (Kerekes<sup>1</sup> 1990).

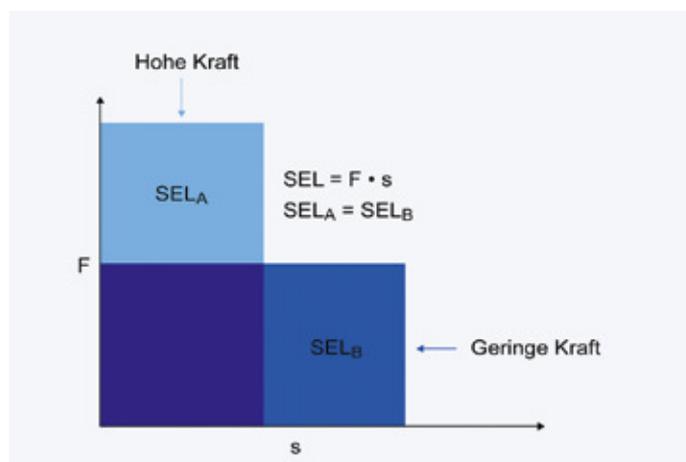


Abbildung 2: Darstellung der Spezifischen Kantenbelastung SEL als Produkt der Messerkraft  $F$  und der Distanz  $s$ , über die die Kraft wirkt (Kerekes<sup>5</sup> 2015).

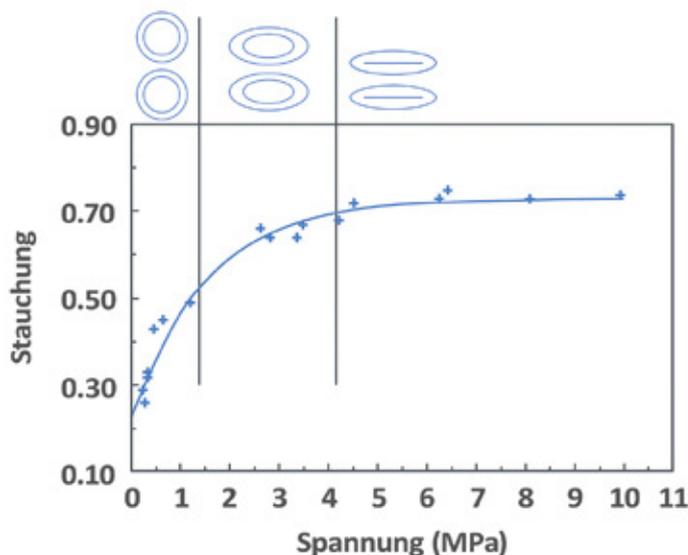


Abbildung 3: Komprimierung eines Faservlieses (Amiri und Hoffmann<sup>11</sup> 2003)

Obwohl stark vereinfacht erscheint diese Analyse im Lichte des aktuellen Wissenstandes als sinnvoll. Baker<sup>9</sup> (1995), zum Beispiel, empfahl eine SEL von 2.0 J/m für Langfaser- und 0.2 J/m für Kurzfaserzellestoffe. Unter Annahme eines Reibungskoeffizienten  $\mu$  von 0.1, einer Messerbreite, die größer als die Faserlänge ist sowie Faserlängen von 2.5 mm und 0.8 mm für Lang- bzw. Kurzfaser ergibt Gleichung (3) Drücke von 3.2 MPa für die Langfaser und 3.1 MPa für die Kurzfaser. Dieser Druckbereich ist vergleichbar mit Erkenntnissen von Nordman et al<sup>10</sup> (1981), der in Kompressionsversuchen herausfand, dass Drücke von 2 bis 4 MPa erforderlich waren, um Effekte ähnlich derer bei der Mahlung beobachtet zu erzielen. Bei der Mahlung von Sulfitzellstoff maß Goncharov<sup>8</sup> (1971) Druckspitzen von 3 bis 4 MPa bei einer SEL von 1.5 J/m und einem Reibungskoeffizienten  $\mu$  von 0.11. Der wahrscheinliche Grund für erstrebenswerte Drücke von ungefähr 3 MPa ist, dass Fasern unter Druck gestaucht werden. Diese Stauchung bricht Wasserstoffbrückenbindungen auf und erzeugt somit interne Fibrillierung. Bei Erhöhung der Spannung über ein bestimmtes Niveau hinaus findet keine weitere Stauchung und somit interne Fibrillierung statt. Abbildung 3 zeigt Ergebnisse einer Studie von Amiri und Hoffmann<sup>11</sup> (2003) zur dynamischen Kompression von Faservliesen.

**Faserkürzung**

Die Verwendung von Druck als Intensitätsmaß ist im Zusammenhang mit interner Fibrillierung und um Vergleiche zu anderen Veröffentlichungen anzustellen praktisch, stellt jedoch nicht den Schlüsselfaktor für Faserkürzung dar. Page<sup>12</sup> (1989) fand heraus, dass Fasern in der Mahlung aufgrund von Zugspannungsbrüchen, und nicht durch scherenartiges Schneiden oder Kompression, gekürzt werden. Scherkraft, die von Messern resultiert und Zugspannungen entlang der Faser erzeugt, ist die entscheidende Größe für Faserkürzung. Abschätzungen solcher Kräfte an einzelnen Fasern in Mahlspalten wurden von Kerekes und Senger<sup>4</sup> (2006) gemacht. Später konnten Berg et al<sup>13</sup> (2015) die Faserkürzung in einem Niederkonsistenzrefiner erfolgreich vorhersagen. Allerdings bedarf dies auf der Faserebene die Ermittlung des Mahlspaltes, eine schwierige und selten durchgeführte Messung. Dementsprechend ist das Ziel dieser Studie eine Kraft zu verwenden, die diese Messung nicht erfordert. Daher fokussieren wir uns auf die Messerkraft  $F$ .

Batchelor et al<sup>14</sup> (1997) zeigten, dass die Messerkraft sich aus zwei Komponenten, nämlich einer Kantenkraft  $F_c$  und einer Oberflächenreibungskraft  $F_s$ , zusammensetzt.

$$(4) \quad F = F_c + F_s$$

Sie zeigten weiterhin, dass der Zusammenhang dieser beiden Kräfte zur Normalkraft, welche auf die Messeroberfläche wirkt, wie folgt ist:

$$(5) \quad F = \mu_c N^{5/3} + \mu_r N$$

Der Term  $\mu_r$  entspricht dem zuvor erwähnten Reibungskoeffizienten. Der Term  $\mu_c$  ist ein sehr komplexer Parameter und wird von vielen Variablen wie Stoffdichte, Faserlänge und -durchmesser, E-Modul und Poisson-Zahl der Faser und einigen empirischen Faktoren beeinflusst. Der Schlüsselparameter und vielleicht dominante ist der Krümmungsradius  $r$  der Messerkante, also die Messerschärfe. Diese Abhängigkeit wurde von Batchelor et al<sup>14</sup> (1997) wie folgt dargestellt

$$(6) \quad \mu_c \propto \frac{1}{r^{0.33}}$$

Wenn  $r$  kleiner wird, gleichbedeutend mit schärfer werdenden Messern, wird  $\mu_c$  sehr groß und dominiert die Kraft  $F$ . Koskenhely<sup>15</sup> (2007) zeigte, dass der bevorzugte Bereich für  $r$  zwischen 80 und 150  $\mu$ m lag, wohingegen starke Faserkürzung zwischen 30 und 50  $\mu$ m begann. Angesichts der Komplexität dieser Faktoren und unseres beschränkten Wissens sind wir nicht in der Lage die Kantenkraft im Detail zu modellieren. Nichtsdestoweniger müssen wir die pflügende Wirkung der Schubkraft an der Messerkante in unsere Überlegungen einbeziehen. Das tun wir indem wir berücksichtigen, dass die Schubkraft schon einsetzt bevor sich die mit Fasern besetzten Messerkanten tatsächlich kreuzen. Das führt zu einer Verlängerung der Wirkzone  $s$ . Entsprechend betrachten wir die gesamte Wirkzone als Summe der Länge an der Messerkante  $s_c$  und der Messeroberfläche  $s_s$  und somit  $s = s_c + s_s$ . Wir schätzen nun die Größe von  $s_c$  ab, indem wir davon ausgehen, dass Fasern, die auf Messerkanten gestapelt sind aus einem Nutbereich der Größe  $l$ , wobei  $l$  der Faserlänge entspricht, mit der Stoffdichte  $C$  eingezogen werden. Wir schätzen, dass diese Zellstoffmasse im Spalteinlauf auf ungefähr 20 % komprimiert wird. Dies entspricht der Stoffdichte, die einen Druck von 3 MPa aufnehmen kann, wie Kerekes und Senger<sup>4</sup> (2006) gezeigt haben. Daraus ergibt sich die Massenbilanz  $0.2 s_c l = Cl^2$  bzw.  $s_c = 5Cl$ . Beispielhaft nehmen wir eine Faserlänge von 2.5 mm und eine Stoffdichte von 4 % an. Daraus ergibt sich ein Wert für  $s_c$  von 0.5 mm, also 20 % der Faserlänge. Mit abnehmender Messerbreite spielt der Kantenfaktor eine immer größere Rolle bei Bestimmung der Messerkraft. Diese Annahme ist nur überschlägig, aber sie scheint angemessen zu sein. Nun definieren wir die Wirkzone  $s_s$  an der Messeroberfläche. Wenn die Messerbreite größer als die Faserlänge ist, gilt  $s_s = l$  und wenn sie geringer als die Faserlänge ist  $s_s = W$ .

Zusammengefasst ergeben die obigen Überlegungen

$$(7) \quad F = \frac{SEL}{s}$$

$$(8) \quad s = l + 5Cl \text{ für } W > l$$

$$(9) \quad s = W + 5Cl \text{ für } W < l$$

Man beachte auch die Auswirkungen dieses Ansatzes für die untere Grenze der Messerbreite. In diesem Fall nähert sich die Messerbreite dem Wert Null an, d.h.  $W=0$ , und die Messer werden scharfe Klinsen. Entsprechend ist  $s_s = 0$  und entsprechend  $s = 5Cl$ . Kurzum, selbst wenn es keine Messerbreite zur Übertragung von Scherkräften gibt, werden Fasern durch die scharfen Kanten in den Spalt eingezogen und bilden eine kurze Zone, die Scherkräfte aufnehmen kann. Die Wirkzone  $s$  wird nur dann auf Null reduziert und somit steigen die Kräfte ins Unendliche, wenn keine Fasern aus der Nut erfasst werden. Dieser Fall tritt nur ein, wenn  $W=0$  und gleichzeitig entweder  $C = 0$  oder  $l = 0$  ist.

**Materialien und Methoden**

Das experimentelle Programm bestand aus zwei gezielt für diesen theoretischen Ansatz durchgeführten Laborstudien mit NBSK Marktzellstoffen, einer weiteren kürzlich veröffentlichten Studie über gemessene Kräfte und Ergebnisse einer früheren Promotion.

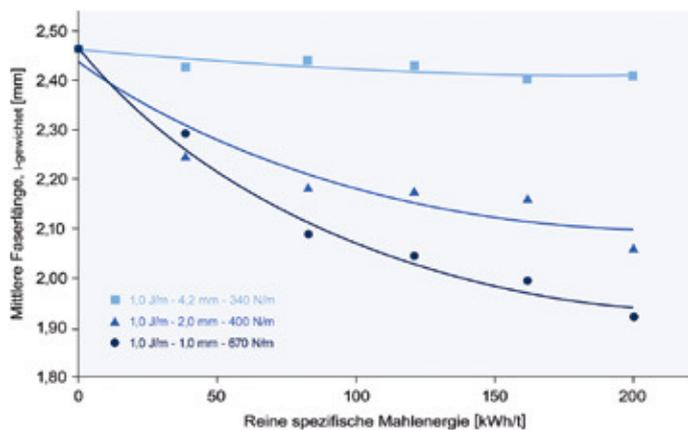


Abbildung 4: Bei einer Kantenbelastung von 1.0 J/m führen Messerkräfte größer 300 N/m zu einer starken Faserkürzung

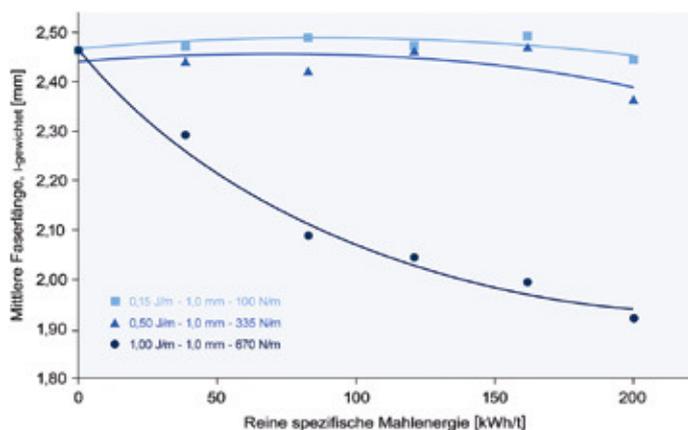


Abbildung 5: Bei einer Messerbreite von 1 mm beginnt starke Faserkürzung zwischen 335 und 670 N/m

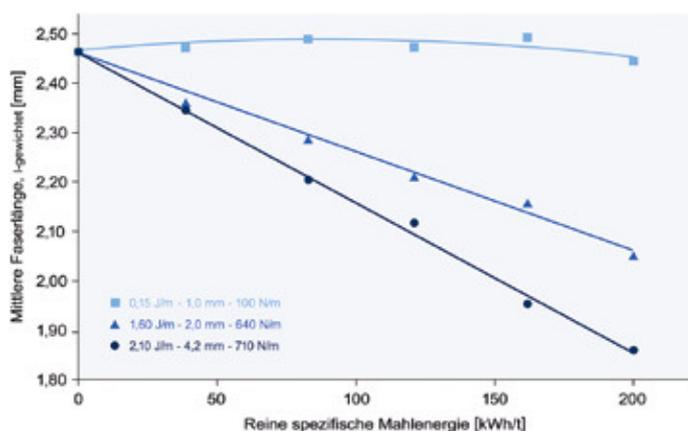


Abbildung 6: Starke Faserkürzung findet bei Messerbreiten von 4.2, 2.0, 1.0 mm und Spezifischen Kantenbelastungen von 2.1, 1.6, 0.3 J/m für Messerkräfte im Bereich von 100 bis 640 N/m statt.

Studie A wurde bei der PTS (Papiertechnische Stiftung) mit einem 12 Zoll Einscheiben-Laborrefiner durchgeführt. Die drei verwendeten Garnituren wurden speziell für diese Studie hergestellt. Während die Messerbreite (4.2, 2.0 und 1.0 mm) variierte, wurden Nutbreite (ca. 6 mm), Nuttiefe (4 mm) und Messerwinkel (39°) konstant gehalten. Der Zellstoff wurde im Kreislauf gefahren. Die Faserlänge des ungemahlten Zellstoffes betrug 2.47 mm. Die Bestimmung der fasermorphologischen Eigenschaften erfolgte mit einem Valmet FS5 Faser Analysator.

Für Studie B wurde ein 20 Zoll Voith TwinFlo Refiner verwendet. Messer- und Nutbreite betragen 1.5 bzw. 3.8 mm und die Nuttiefe 5.0mm. Der Messerwinkel (gemessen als mittlerer Winkel der Messer eines Segmentes zum Radius) entsprach 30°. Die Versuche wurden im Wechselbüttenbetrieb durchgeführt. Die Faserlänge des ungemahlten Zellstoffes betrug 2.55 mm und wurde mit einem Valmet FS300 Faser Analysator gemessen. Studie C verwendet kürzlich publizierte Ergebnisse von Kraftmessungen (Harirforoush et al.<sup>16</sup> 2017). Die Messungen erfolgten mit einem Sensor, der in einem 16 Zoll Aikawa Einscheibenrefiner der University von British Columbia einen 5 mm langen Teil eines Messers ersetzte. Messer- und Nutbreite sowie Nuttiefe betragen 1.6, 3.2 und 4.8 mm, der Messerwinkel 15°. Der verwendete Faserstoff war ein high free-ness TMP (378 CSF) aus der nördlichen Region British Columbias mit einer mittlerer Faserlänge von 1.85 mm.

## Ergebnisse und Diskussion

### Studie A

Zunächst betrachten wir bei einer Spezifischen Kantenbelastung von 1.0 J/m die Wirkung der Intensität auf die Faserkürzung. Die Messerkräfte sind in Abbildung 4 ebenfalls aufgeführt.

Es ist offensichtlich, dass schmalere Messer zu größeren Kräften und stärkerer Faserkürzung führen. Betrachten wir den untersuchten Kräftebereich von 340 bis 670 N/m, findet eine starke Faserkürzung zwischen 340 und 400 N/m statt.

Als nächstes untersuchen wir bei konstanter Messerbreite von 1.0 mm die Auswirkungen einer abnehmenden Spezifischen Kantenbelastung beginnend bei 1.0 J/m über 0.5 J/m bis zu einem sehr geringen Niveau von 0.15 J/m. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die entsprechenden Messerkräfte ergeben sich zu 670, 335 und 100 N/m. Für Spezifische Kantenbelastungen geringer als 0.5 J/m, entsprechend Messerkräften gleich oder kleiner 335 N/m, fällt der Faserlängenverlust sehr gering aus.

Bisher haben wir nur Fälle für die schmale Messerbreite von 1 mm betrachtet. Als nächstes untersuchen wir Messer mit bis zu 4.2 mm Breite und Spezifische Kantenbelastungen von bis zu 2.1 J/m. Wie Abbildung 6 zeigt, stellt sich eine deutliche Faserlängenreduzierung bei Messerkräften im Bereich zwischen 100 und 640 N/m ein.

Die Werte in den Abbildungen 4,5 und 6 zeigen zudem eine deutliche Abhängigkeit sowohl von Energie als auch Intensität. Das entspricht den Erwartungen, weil bei einer gegebenen Intensität die Energie die Anzahl der Messerkreuzungen, die der Faserstoff ausgesetzt ist, widerspiegelt. Die Mahlung ist ein Wahrscheinlichkeitsprozess und aus diesem Grund hängt Faserlängenreduzierung sowohl von der Anzahl als auch der Intensität der Belastungen ab. In den meisten der zuvor betrachteten Versuche besteht fast über den gesamten Bereich eine lineare Abhängigkeit von Faserlängenreduzierung und Energie. Besonders interessant ist, dass für Messerkräfte von 300 N/m oder geringer selbst bei hohen spezifischen Energien von 200 kWh/t fast keine Faserkürzung eintritt.

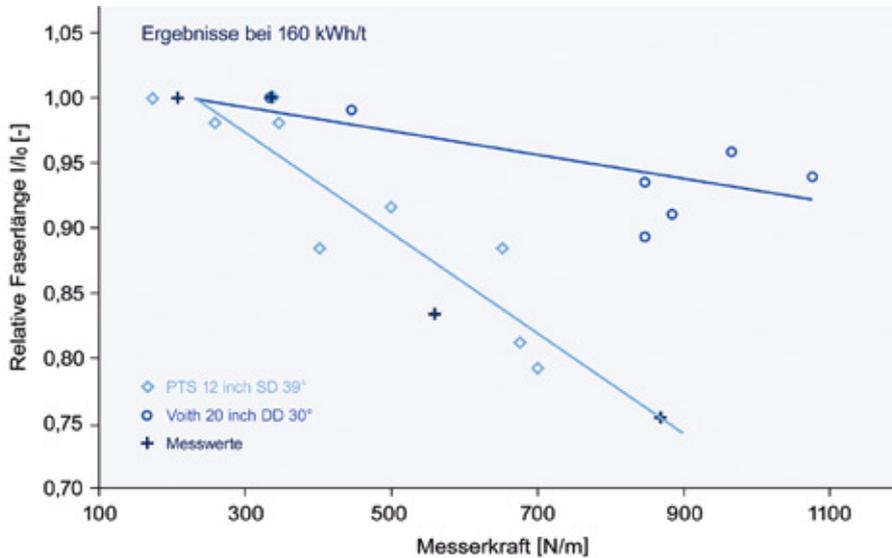


Abbildung 7: Die Ergebnisse der Studien A und B bilden ein Arbeitsfenster für Faserkürzung und Messerkräfte. Die mit einem Kraftsensor gemessenen Werte liegen im Bereich der Studie A.

**Vergleich mit Ergebnissen der Studien B und C**

Im nächsten Schritt verglichen wir die bisherigen Erkenntnisse mit Ergebnissen der Studien B und C. Da die drei Studien verschiedene Zellstoffe mit unterschiedlichen Faserlängen verwendeten, haben wir die Faserlängen jeweils zu der Länge des ungemahlten Faserstoffes normiert. Die Resultate bei einer spezifischen Energie von 160 kWh/t sind in Abbildung 7 gegenübergestellt.

Die Daten in Abbildung 7 lassen einen deutlichen Unterschied zwischen Studie A und B erkennen. Weitere unserer Ergebnisse, die hier nicht aufgeführt sind, fallen im Allgemeinen in den Bereich zwischen Studie A und B. Eine solche Streuung ist aufgrund der unterschiedlichen Datenquellen sowie der vielen zuvor beschriebenen Faktoren wie z.B. Messerschärfe, die nicht berücksichtigt werden konnten, nicht überraschend. Daher können Ergebnisse der Studien A und B als Hüllkurve der Messerkraft bei 160 kWh/t betrachtet werden. In Anbetracht der Tatsache, dass die experimentell ermittelten Kräfte der Studie in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Studie A sind, können wir diese als untere Grenze der Kraft für eine gegebene Faserlängenreduzierung bei dem gewählten Energieeintrag betrachten, oder anders ausgedrückt, die maximale zulässige Kraft, um eine angestrebte Faserlängenreduzierung nicht zu überschreiten.

Wir betrachten nun einige Anwendungsbeispiele. Um sicherzustellen, dass die Faserlänge um nicht mehr als 10% reduziert wird, sollte die Messerkraft 500 N/m nicht übersteigen. Zur Vermeidung von Faserkürzung deutet der Schnittpunkt der Grafen darauf hin, ein Kraftniveau von 200 N/m nicht zu übersteigen. Studie B indiziert, dass diese Vorgaben auch bei höheren Kräften erfüllt würden. Allerdings haben wir noch nicht genug Erkenntnisse unter welchen Umständen dies passieren könnte. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Kraft unterhalb der unteren Grenze der Hüllkurve sicherstellt, dass die Zielgröße (Faserlänge) eingehalten wird. Es kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass höhere Kräfte diese Vorgabe nicht auch erfüllen würden.

Eine weitere praktische Anwendung, die sich aus den Untersuchungen ergibt, ist die Festlegung der Spezifischen Kantenbelastung. Für eine NBSK Faser mit einer Länge von 2.5 mm und einer Messerbreite größer 2.5 mm sollte die Mahlintensität 1.5 J/m nicht überschreiten, um die Faserkürzung auf unter 10 % zu begrenzen. Bei Verwendung

einer Garnitur mit einer Messerbreite von nur 1 mm muss die Spezifische Kantenbelastung zur Einhaltung dieser Vorgabe auf 0.75 J/m reduziert werden.

Wir nehmen zur Kenntnis, dass beide Beispiele für eine spezifische Energie von 160 kWh/t gelten. Wie in den Abbildungen 4 bis 6 gezeigt wurde, führen geringere Energien bei allen Spezifischen Kantenbelastungen bzw. Messerkräften auch zu weniger Faserkürzung. Andererseits wird auch bei Energieeinträgen von 200 kWh/t und mehr für Messerkräfte kleiner als 300 N/m keine nennenswerte Faserlängenreduzierung eintreten.

**Schlussfolgerungen**

Die wesentlichen Schlussfolgerungen dieser Studie sind:

- Die Spezifische Kantenbelastung allein für sich ist zur Beschreibung der Mahlintensität nicht ausreichend, wenn die Messerbreite geringer als die Faserlänge ist.
- Die Messerkraft, die in einfacher Weise auf Basis der Spezifischen Kantenbelastung berechnet werden kann, ist ein hilfreicher Parameter zur Festsetzung von Intensitätsgrenzen, um Faserkürzung bei einem gegebenen Energieeintrag zu begrenzen.
- Die Einfachheit der Kraftberechnung auf der einen Seite und die Komplexität der vielen Faktoren, die die Faserkürzung beeinflussen, auf der anderen Seite lassen keine weiteren Aussagen über die in diesem Beitrag gemachten zu. Der Ansatz birgt jedoch ausreichend Perspektive, weitere Untersuchungen zu rechtfertigen, um zusätzliche Schlüsselparameter einfließen zu lassen.

**Dank**

Wir danken Canfor Pulp Ltd. für die finanzielle Unterstützung zur Durchführung der Studien A und B sowie Frau Dr.-Ing. Sabine Heinemann, TU Dresden, für die Bereitstellung der mikroskopischen Aufnahme auf der Titelseite.

**Anhang**

Herleitung der Spezifischen Kantenbelastung (wiedergegeben von Kerekes und Senger<sup>4</sup> 2006)

Die Spezifische Kantenbelastung *SEL* eines Refiners ist per Definition der Quotient von reiner Mahlleistung und dem Produkt aus Messerkantenlänge *BEL* und Umfangsgeschwindigkeit  $\omega$ .

$$(A1) \quad SEL = \frac{P}{BEL \cdot \omega}$$

Die Messerkantenlänge wird empirisch ermittelt, indem der Radius der Mahlscheibe in kleine Abschnitte aufgeteilt wird, die Messer für jeden Abschnitt bestimmt werden, die Anzahl der Rotor- und Statormesser des jeweiligen Abschnittes miteinander multipliziert und dann über den gesamten Radius aufsummiert werden. Im Folgenden leiten wir die *SEL* rechnerisch für einen Scheibenrefiner her.

Wir betrachten einen Kreis der Mahlscheibe mit dem Radius  $r$  und bezeichnen die Messer auf dem Rotor mit  $n_R$  und auf dem Stator mit  $n_S$ . Daraus ergibt sich die Gesamtzahl der Messerkreuzungen nach einer ganzen Umdrehung mit  $n_R \cdot n_S$ . Unter Annahme eines identischen Designs von Rotor und Stator, d.h.  $n_R = n_S$ , und der Einführung der Messerdichte  $n$ , welche als Messeranzahl pro Bogenlänge definiert sei erhalten wir  $n_R = n_S = 2\pi n$ . Somit ergibt sich nach einer ganzen Umdrehung  $n_R \cdot n_S = 4\pi^2 n^2$ . Die Frequenz der Messerkreuzungen ist

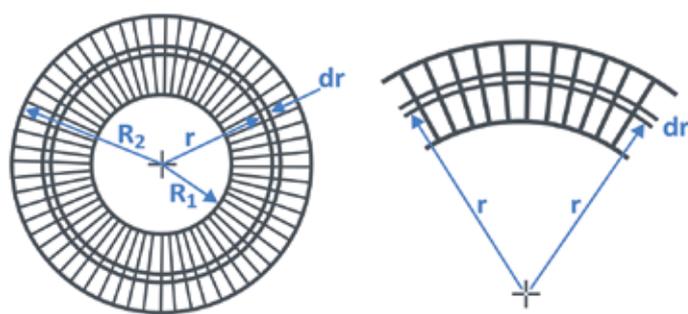


Abbildung 1A: Schematische Darstellung einer Mahlscheibe

somit  $4\pi^2 n^2 \omega$ . Wir multiplizieren diese Messerkreuzungen mit dem radialen Abschnitt, in diesem Fall  $dr$ , und summieren diese vom inneren Radius  $R_1$  zum äußeren  $R_2$  und erhalten *BEL*.

$$(A2) \quad BEL = \int_{R_1}^{R_2} 4\pi^2 n^2 dr = 4\pi^2 n^2 \frac{R_2^2 - R_1^2}{2}$$

Wir betrachten nun die Leistungsaufnahme. Wir beginnen mit der Energie  $E_b$ , die pro Messerlänge und Messerkreuzungspunkt übertragen wird. Daraus berechnet sich die Energie über das radiale Abschnitt  $E_b dr$ . In Polarkoordinaten entspricht diese Energie dem Drehmoment  $T$  multipliziert mit dem Winkel  $\Phi$ , über den die Bewegung ausgeübt wird, d.h.  $E_b = T \Phi$ . Wir können nun das Moment als Produkt von Kraft  $F$  und Radius  $r$  und den Winkel  $\Phi$  als Bogenlänge  $a$  für die Rotation über ein Messer ausdrücken,  $\Phi = \frac{a}{r}$  ausdrücken. Daraus resultiert  $E_b = F \cdot a$ . Weil die Messer im Allgemeinen sehr schmal sind können wir  $a$  der Einfachheit halber als lineare Distanz über die Messerbreite annehmen, was wir Wirklänge  $s$  nennen. Es sei angemerkt, dass,  $T$  und  $F$  alle auf die radiale Länge bezogen sind. Aus den obigen Ableitungen und Umformungen ergibt sich für die Energie, die pro Messerkreuzungspunkt übertragen wird

$$(A3) \quad E_b dr = F \cdot dr \cdot s$$

Betrachten wir die übertragene Energie  $dE$  für die Summe aller Messerkreuzungen im Ring  $dr$  nach einer Refinerumdrehung ergibt sich

$$(A4) \quad dE = E_b 4\pi^2 n^2 r^2 dr$$

Die Geschwindigkeit dieser Energieübertragung, die Leistung  $dP$ , entspricht

$$(A5) \quad dP = E_b 4\pi^2 n^2 r^2 \omega dr$$

Nach Integration von  $dP$  vom inneren zum äußeren Radius erhalten wir

$$(A6) \quad E_b = \frac{P}{BEL \cdot \omega}$$

Aus Gleichungen (A1) bis (A6) ergibt sich  $E_b = SEL$  und mit Gleichung (2)  $F = \frac{SEL}{s}$

Wir weisen auf eine wesentliche Annahme, nämlich dass  $E_b$  über den Radius des Refiners als konstant angenommen wird, in dieser Ableitung hin. Sie stellt somit, ebenso wie die *SEL*, einen Mittelwert dar.

Literaturhinweise

- 1 Kerekes, R.J. (1990): Characterization of Pulp Refiners by a C-Factor, Nord. Pulp Pap Res. J. 5(1): 3-8
- 2 Brecht, W. and Siewert, W. (1966): Zur theoretisch-technischen Beurteilung des Mahlprozesses moderner Mahlmaschinen, Papier 20 (1):4-14.
- 3 Meltzer, F.P., Rautenbach, R. (1994): Neue Möglichkeiten zur Vorherbestimmung des Technologischen Mahlergebnisse", Das Papier 48:578-583
- 4 Kerekes, R.J. and Senger, J. J. (2006): Characterizing Refining Action in Low Consistency Refiners by Forces on Fibres, J. Pulp Paper Sci. 32(1): 1-8.
- 5 Kerekes, R.J. (2015): Perspectives on High and Low Consistency Refining in Mechanical Pulping, BioResources, 10(4): 8795-8811
- 6 Lumiainen, J. (1990): A New Approach to the Critical factors Affecting Refining Intensity and Refining Result in Low-Consistency Refining, Proc. Tappi Papermakers Conf. pp 269-273
- 7 Kerekes, R. J. (2011): Force-Based Characterization of Refining Intensity, Nord. Pulp Pap. Res. J. 26(1):14-20
- 8 Goncharov, V.N. (1971): Force Factors in a Disk Refiner and their Effect on the Beating Process, Bumazh. Promst., English Trans. 12(5): 12-14.
- 9 Baker, C. F. (1995): Good Practices for Refining the Types of Fibre Found in Modern Paper Furnishes, Tappi J. 78(2): 147-153
- 10 Nordman, L., Levlin, J-E., Makkonen, T., Jokisalo, H. (1981): Conditions in an LC-Refiner as Observed by Physical Measurements, Pap. Puu 4: 169-180
- 11 Amiri, R. and Hoffman, R. (2003): Dynamic Compression of Papermaking Pulps, Pap. Puu 85(2): 100-106
- 12 Page, D.H. (1989): The Beating of Chemical Pulps-The Action and the Effects, Trans. 9th Fund. Res. Symp., Cambridge, UK. pp1-37
- 13 Berg, J-E., Sandberg, C., Engberg, B.A., Engstrand, P. (2015): Low Consistency Refining of Mechanical Pup in the Light of Forces on Fibres, Nord. Pulp Pap. Res. J. 30(2): 225-229
- 14 Batchelor, W.J., Martinez, D.M., Kerekes, R.J., Ouellet, D. (1997): Forces on Fibres in Low-Consistency Refining: Shear Force, J. Pulp Paper Sci. 23(1): 40-45
- 15 Koskenhely, K., Nieminen, K., Paulapuro, H. (2007): Edge Form Profile of Refiner Filling Bars and its Impact on Softwood Fibre Shortening, Pap. Puu 89(4): 1-6
- 16 Harirforoush, R., Olson, J., Wild, P. (2017): In-process Detection of Fiber Cutting in Low Consistency Refining based on Measurement of Forces on Refiner Bars, Tappi J. 16(4): 189-199