



» NEUE WERKSTOFFE / » VERPACKUNGEN / » PRINTPRODUKTE / » RESSOURCENEFFIZIENZ

PTS-FORSCHUNGSBERICHT IGF 16817  
HYDRODYNAMISCHE FASERMODIFIKATION

## Hydrodynamische Fasermodifikation

T. Arndt

### Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<b>3</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Ergebnisse zur Bewertung der Kavitationsintensität</b>	<b>9</b>
5.1	Bewertung der Kavitationsintensität mittels chemischer Abbaureaktionen	9
5.2	Bewertung der Kavitationsintensität über einen pizeo-elektrischen Sensor	11
5.3	Einfluss von Faserstoff auf das Kavitationsverhalten	15
5.4	Fazit	16
<b>6</b>	<b>Ergebnisse zu Faser-, Suspensions- und Papiereigenschaften im Labormaßstab</b>	<b>17</b>
6.1	Einfluss hydrodynamischer Kavitation auf Faser und Suspensionseigenschaften	17
6.2	Optimierung der hydrodynamischen Kavitation für AP-Faserstoffe im Labormaßstab	20
<b>7</b>	<b>Übertragung in den Pilotmaßstab</b>	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b>	<b>25</b>
8.1	Allgemeine Effizienzbetrachtung	25
8.2	Deinking von graphischen Papieren	27

## 1 Zusammenfassung

---

<b>Thema</b>	Ablösung des mechanischen Mahlprozesses in der Stoffaufbereitung durch hydrodynamische Modifikation von Zellstofffasern.
<b>Ziel des Projektes</b>	Ziel des Forschungsvorhabens war es, einen Beitrag zur Ablösung des mechanischen Mahlprozesses mittels hydrodynamischer Kavitation zu leisten und Energiekosten in der Stoffaufbereitung einzusparen.
<b>Ergebnisse</b>	<p>Zieht man die Ergebnisse der Festigkeitssteigerung und die industrielle Umsetzung mittels entsprechenden Pumpen und Düsen heran, ist eine Festigkeitssteigerung von 15-20% für altpapierhaltige Verpackungspapier möglich, wobei hierfür Pumpleistung genutzt werden kann, die zum Stofftransport bereitgestellt werden muss.</p> <p>Anhand der Untersuchungen lässt sich erkennen, dass das größte Einsatzpotenzial der hydrodynamischen Kavitation in der Druckfarbenabtrennung liegt. Das Einsparpotenzial des Kavitationsdeinkings ergibt sich durch Einsparung von Energiekosten in der Dispergierung und/oder Flotation 2 sowie durch Reduzierung von Rejekten.</p>
<b>Schlussfolgerung</b>	<p>Der wirtschaftliche Nutzen für kmU konnte unverkennbar nachgewiesen werden. Mit den Erkenntnissen wurde im Vergleich zum damaligen Stand der Technik ein erheblicher Fortschritt in der Aufbereitung von Faserstoffen für die Papierherstellung erreicht. Die zweite Dispergierung, Bleiche und Flotation kann unter Nutzung der Ergebnisse weitestgehend zurückgefahren werden.</p> <p>Die Ergebnisse geben außerdem Anlass weitere Forschungsaktivitäten zum Thema der Einsparung von chemischen Hilfsmitteln und Verbesserung der Runnability zu planen.</p>

---

---

**Danksagung**

Das Forschungsvorhaben IGF 16817 BR der AiF-Forschungsvereinigung PTS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

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

---

## 2 Einleitung

**Faserstoffe und Stoffaufbereitung** Die Stoffaufbereitung einer Papierfabrik kann allgemein anhand des Rohstoffeintrags unterschieden werden.

Zellstoffe werden in Ballen angeliefert, in einem Pulper mit Wasser aufgelöst, gereinigt und je nach Anforderungen an die Papiereigenschaften in einem Refiner gemahlen. Mechanisch aufgeschlossene Faserstoffe werden integriert durch die (thermo)-mechanische Auflösung des Holzverbands in Einzelfasern mittels Refinern entsprechend auf Volumen oder Festigkeit hergestellt und direkt eingesetzt. Die Mahlung ist der wichtigste Verfahrensschritt bei Primärfaserstoffen zur Einstellung der Festigkeitseigenschaften, Dichte, Formation und Opazität. Grundprinzip ist, dass Fasern oder Faserbündel vom Mahlpalt aufgenommen werden und durch das Übergleiten von Rotor zu Stator Druck und Reibung auf die Fasern ausgeübt wird. Der spezifische Energieverbrauch beträgt etwa 50-200 kWh/t. Wobei der Gesamtenergieverbrauch durch die Leerlaufleistung deutlich höher liegen kann.

Altpapierfaserstoffe werden ebenso mit Wasser in einem Pulper dispergiert. Bei Verpackungspapieren erfolgt eine intensive Reinigung von Fremdbestandteilen über Hydrozyklone, Cleaner und Drucksortierer. Aufgrund des geringen Festigkeitspotenzials und des Energieverbrauchs wird auf eine Mahlung verzichtet. Bei Altpapieren für grafische Papiere ist es notwendig, die Druckfarben von den Fasern in der Auflösung abzutrennen und anschließend in einer durch Chemikalien unterstützten Flotation die Druckfarben auszutragen. Die Flotation ist häufig zweistufig, wobei eine zusätzliche Eindickung, Dispergierung und Bleiche zur weiteren Verbesserung der optischen Eigenschaften eingesetzt wird.

### **Energiebedarf AP-Aufbereitung**

Wie in der unteren Tabelle zu erkennen ist, wird ein großer Teil der Energie in Form von Dampf und elektrischer Energie für die mechanische Zerkleinerung der Störstoffe und Druckfarben im Disperger aufgewandt.

Tab. 1: Energiebedarf von Prozessen bei der Altpapieraufbereitung [1].

Prozess	Thermische Energie [kWh/t]	Elektrische Energie [kWh/t]	Bemerkung
Auflösen		15-50	inkl. Entstipper
Sortieren		20-50	
Cleanern		30-50	
Eindicken		5-20	
Flotation		20-50	
Dispergieren	100-300	100-200	
Bleichen	0-100	30-50	

### Ultraschall und Kavitation zur Faserbehandlung

Bei der Anwendung von Ultraschall arbeitet eine im Ultraschallbereich angeregte Sonotrode in einem Reaktorbehälter durch den Faserstoff gepumpt wird. Als Hauptwirkung gelten Schwingen, die Druckschwankungen auslösen. In Bereichen von Unterdruck entstehen dabei partiell Dampf(Kavitations)blasen, welche in Bereichen höheren Drucks in Form eines Microjets implodieren und auf das umgebende Medium wirken. Daneben können freie Radikale gebildet werden, die die Reaktivität der Cellulose erhöhen. Erste Arbeiten dazu wurden schon in den 1950er Jahren von JAYME et al. [2] durchgeführt. Die physikalischen Grundlagen leiten sich dabei aus der Bernoulli-Gleichung ab.

Kavitation kann aber auch in einer Düse erzeugt werden. Folgende Abb. 1 zeigt den Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in einer Venturidüse, wobei die Verengung zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit und Absenkung des Drucks und damit auch zu Kavitation (hydrodynamische Kavitation) führt [3].

Aus dem Bereich der Papiertechnik sind patentierte Arbeiten zur Anwendung der hydrodynamischen Kavitation bekannt, die in den Bereich der Abwasserbehandlung (Zerstörung der Schlammflocke und die nachfolgende Freisetzung der zellulären Bestandteile) [4, 5] und Druckfarbenabtrennung fallen [6, 7]. Die genutzten Düsen in [6, 7] zur Druckfarbenabtrennung haben einen Durchmesser von 0,7-2 mm, die in einen Druckbehälter die Suspension abgeben.

Zur Anwendung von Ultraschall insbesondere zur Druckfarbenabtrennung und Festigkeitssteigerung wurden weitreichende Arbeiten an der TU Dresden durchgeführt [8, 9, 10], bei denen gezeigt wurde, dass sowohl Festigkeiten und die Druckfarbenabtrennung verbessert werden, aber der Energieeintrag für eine wirtschaftliche Umsetzung zu hoch ist.

Abb. 1

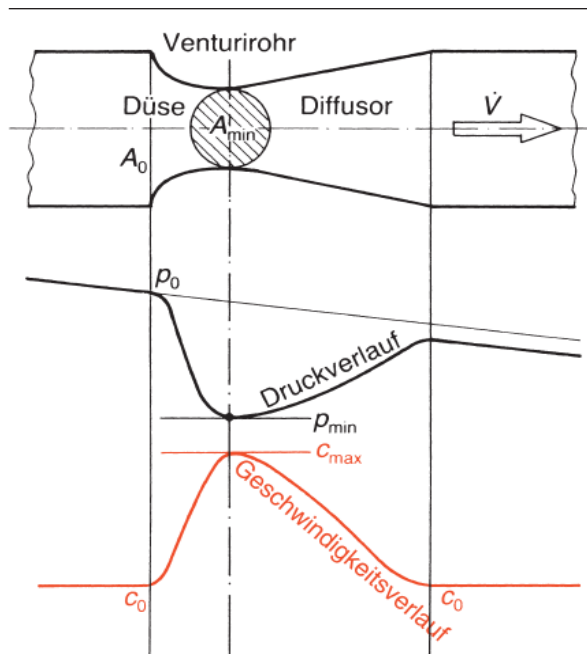


Abb. 1: Druck- und Geschwindigkeitsverlauf in einer Venturidüse.

---

**Zielstellung**

Untersuchungen auf dem Gebiet der Abwassertechnik und der Chemie verdeutlichen eine wesentlich effizientere Energieausbeute bei der Generierung von Kavitation auf hydrodynamischem Wege im Vergleich zur Induktion mittels Ultraschall [11, 12, 13].

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, daher, die nötige Faserumformung zur Mahlung und Druckfarbenabtrennung durch hydrodynamische Kräfte zu realisieren, wodurch Energiekosten in der Stoffaufbereitung eingespart werden sollten. Dabei sollten die morphologischen und strukturellen Veränderungen der Faserwand die Wirkungsweise der auftretenden Kavitation aufklären.

---

### 3 Versuchsdurchführung

**Allgemeines Vorgehen**

Für die Untersuchungen im Labormaßstab wurde ein Versuchsstand basierend auf der von Heller entwickelten Düse zur Ermittlungen von Zugspannungen in Flüssigkeiten genutzt [14]. Der Durchmesser im engsten Querschnitt betrug 8 mm. Mit der angeschlossenen Pumpe wurde eine Fließgeschwindigkeit  $c$  von maximal 29 m/s erreicht.

Im Labormaßstab wurde untersucht unter welchen Bedingungen sich Kavitation einstellt. Dazu wurde neben chemischen Abbaureaktionen (Weissler Reaktion) ein pizeo-elektrischer Beschleunigungssensor genutzt. Untersucht wurden, welchen Einfluss die Eigenschaften des Wassers haben und wie sich das Vorhandensein von Faserstoff auf die Kavitationsintensität auswirkt. Dabei wurden auch sich verändernde Fasermorphologie und Papiereigenschaften betrachtet.

Um eventuelle Skalierungseffekte abzuschätzen und eine optimierte Düsengeometrie zu testen, wurde ein Versuchsstand mit einem Durchmesser von 11 mm untersucht (Abb. 3). Die maximale Fließgeschwindigkeit  $c$  betrug 43-45 m/s.

---

**Versuchsaufbau Labor**

Der Aufbau des Versuchsstands zur Übertragung von hydrodynamischer Kavitation auf Faserstoffsuspensionen liefert Abb. 2. Der Aufbau gliedert sich in:

- Pumpe mit Frequenzumformer
  - Durchflussmesser
  - Kavitationsdüse inklusive Drallerzeuger
  - Differenzdruckaufnehmer zwischen Düsen ein- und Düsenauslauf
  - Pizeo-elektrischer Beschleunigungssensor zur Bewertung der Kavitationsintensität
-



Abb. 2

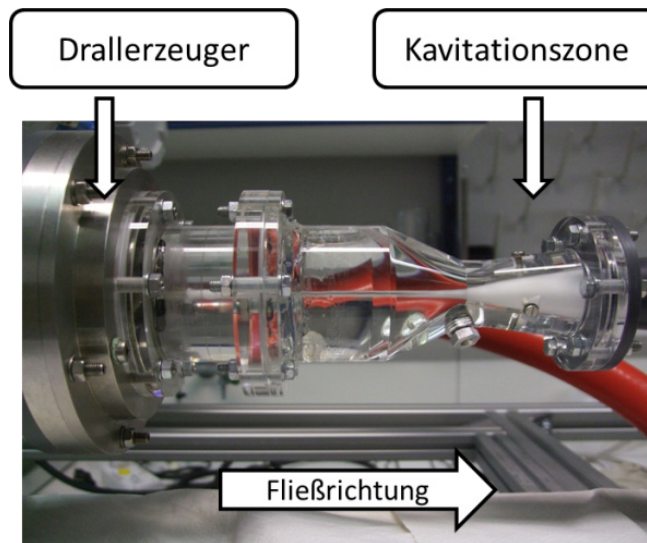


Abb. 2: Kavitationsdüse mit eingebauten Drallerzeuger und sich ausbildender Kavitationszone.

Abb. 3



Abb. 3: Versuchsanlage zur mit optimierter Düsengeometrie im Piltomaßstab.

### Faserstoffe

Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 7 Faserstoffe untersucht (siehe Tab. 2). Die verwendeten Zellstoffe werden in grafischen und hochwertigen Verpackungspapieren sowie in Spezialpapieren eingesetzt. Der BCTMP wurde gewählt, da der erzeugungsbedingt enthaltene hohe Ligninanteil einen andere Glasübergangstemperatur als die Cellulose und der Zellstoffe enthält. Zudem können am Lignin reaktive Substanzen, die während der Kavitation gebildet werden, weitere Veränderungen der Faser bewirken.

Des Weiteren wurde eine Altpapiermischung zur Erzeugung von Wellenstoff (WS) mit einem Glührückstand (525°C) von 15% genutzt, sowie zwei Altpapiere (DIP I und DIP II) zur Herstellung von grafischen Papieren.



Tab. 2

Tab. 2 Liste der verwendeten Faserstoffe

Faserstoff	Baumart	Abkürzung	Bemerkung
Kurzfaserzellstoff (ECF)	<i>eucalyptus urograndis</i>	KF	-
Langfaserzellstoff (ECF)	<i>picea abies/ pinus silvestris</i>	LF	-
Hochausbeute-faserstoff	<i>populus tremula</i>	BCTMP	Bulk 2,0 cm <sup>3</sup> /g, hoher Ligninanteil
Verpackungsaltpapier	-	WS	Wellenstoff
Grafisches Altpapier	-	DIP I	AP-Sorte 1.11
Grafisches Altpapier	-	DIP II	50% Zeitungen 50% Zeitschriften

**Papieranalytik**

Folgende Papiereigenschaften wurden an Laborblättern gemessen:

Tab. 3: Prüfmethode der physikalischen Papiereigenschaften

Parameter	Messmethode
Zugfestigkeit (Tensile-Index)	DIN EN ISO 1924-2
Berstwiderstand (Mullen)	DIN ISO 2758
Spaltarbeit (Scott Bond)	DIN 54 516
Streukoeffizient s	DIN 54 500
Opazität	DIN 53 146
Weißgrad	DIN 53 145-1
Durchreißfestigkeit (Tear-Index)	DIN EN 21 794

**Bewertung der Druckfarbenabtrennung**

Tab. 4: Prüfmethode zur Bestimmung der Druckfarbenablösung

Parameter	Messmethode
Prüfung der Deinkbarkeit	INGEDE Methode 11
Ink Elimination IE	INGEDE Methode 10
Optische Eigenschaften	INGEDE Methode 2

## 4 Ergebnisse zur Bewertung der Kavitationsintensität

### 4.1 Bewertung der Kavitationsintensität mittels chemischer Abbaureaktionen

#### Abbaureaktion über KI

In der Literatur sind unterschiedliche chemische Abbaureaktionen beschrieben, die genutzt werden können, um die Kavitationsintensität zu bewerten. Am weitesten verbreitet ist die Bildung von Triiodid ( $I_3^-$ ) aus einer KI-Lösung (Weissler-Reaktion) [15]. Beim Blasenkollaps entstehen durch die lokal auftretenden hohen Temperaturen und Druck Hydroxylradikale. Die entstandenen Radikale reagieren weiter zu Wasserstoffperoxid und Wasserstoff. Es wird angenommen, dass diese Reaktion in der Kavitationsblase selber und nicht in der Flüssigphase abläuft [16]. Je stärker die Kavitation ist, desto mehr Wasserstoffperoxid wird gebildet. Das Iod reagiert über verschiedene Intermediate weiter zu  $I_3^-$  [17], dessen Konzentration mittels UV-Spektrometer durch Extinktion bei 350 nm bestimmt werden kann. Diese Methode wurde auch in den vorliegenden Arbeiten genutzt, um die grundsätzliche Eignungsfähigkeit der Düsenkonstruktion zur Erzeugung von harter Kavitation in Wasser zu prüfen. Es wurde dabei keine Faserstoffsuspension eingesetzt.

---

#### Anwendbarkeit

Neben der Bildungsreaktion von  $I_3^-$  läuft eine Abbaureaktion im Gleichgewicht ab, wobei die Bildung der Komplexe dominierend ist. In Folge der sich verändernden Temperatur während der Kavitation wird das Reaktionsgleichgewicht weiter verschoben [17], wodurch die Anwendbarkeit der Weissler-Reaktion im Einzelfall zu prüfen ist.

---

**Ergebnis**  
**Kavitationsdüse**  
**am**  
**Versuchsstand**

Zur Bewertung der Kavitationsintensität ist in Abb. 4 die kumulierte Bildungsrate an  $I_3^-$  bei variiertem Differenzdruck dargestellt. Die Bildungsrate bezieht sich auf den Gehalt an  $I_3^-$  zu Beginn der Messung. Bei einem Differenzdruck von 0 bar, der einem Volumenstrom von 18 l/min ( $c=6,0$  m/s) am Versuchsstand entspricht, wurde kein  $I_3^-$  freigesetzt. Damit wurden auch keine Radikale gebildet, die einen Abbau initiieren. Rein visuell war auch keine Kavitation zu beobachten. Doch schon bei einem Differenzdruck von 0,5 bar ( $c=8$  m/s) in der Düse wurden Radikale gebildet die zum Abbau des KI zu  $I_3^-$  führten, auch wenn diese Bedingungen weit unterhalb der theoretisch einsetzenden Kavitation von 14 m/s liegt. Mit fortlaufender Behandlung stieg die Freisetzung des  $I_3^-$ . Die größte Menge wurde entsprechend bei maximalem Differenzdruck von 5,5 bar und einem Volumenstrom von 54 l/min ( $c=17,9$  m/s) gebildet. Die Bildungsrate nahm aber mit zunehmender Kavitationszeit ab. Zieht man die Arbeiten von [17] heran, kann dies mit einem schnelleren Entgasen erklärt werden. In diesem Fall postulieren Suslick et al. [18], dass bei höheren Temperaturen die Freisetzung von  $I_3^-$  drastisch abnimmt, da der Dampfdruck des Wasser erhöht wird und die maximalen Temperaturen beim Blasenkollaps geringer sind mit der Folge, dass auch die Bildung von Radikalen zurück geht. Dies könnte den geringeren Anstieg im weiteren Verlauf der Kurve bei 5,5 bar erklären. Morison und Hutchinson [17] erklären solche Beobachtungen aber mit der einsetzenden Abbaureaktion des  $I_3^-$ .

**Abb. 4**

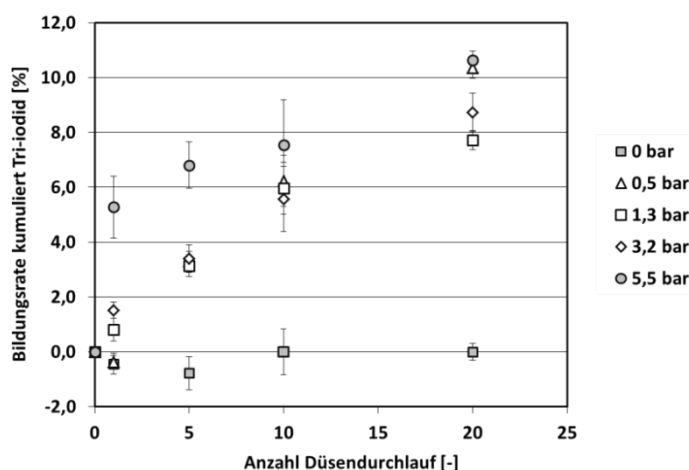


Abb. 4: Kumulierte Bildung von  $I_3^-$  bei variiertem Differenzdruck.

## 4.2 Bewertung der Kavitationsintensität über einen pizeo-elektrischen Sensor

**Allgemein** Die Ergebnisse des KI-Abbaus zeigen, in welchem Umfang Radikale gebildet werden und liefern Aussagen darüber, welche chemischen Vorgänge an der Faser ablaufen können. Neben der Bildung von reaktiven Spezies finden aber auch physikalische Vorgänge durch die Entstehung und Wechselwirkung von Dampf- bzw. Gasblasen statt. Die implodierenden Blasen liefern ein akustisches Signal, dessen Intensität neben den Abbaureaktionen genutzt wurden, um die physikalischen Kräfte, die auf die Fasern wirken können, abzuleiten. Der hier genutzte Sensor war ein pizeo-elektrischer Beschleunigungssensor, der auf der Außenwand der Düse befestigt wurde und damit nicht nur Aussagen bei reinem Wasser zulässt, sondern auch bei Faserstoffsuspensionen angewandt werden kann.

---

**Anwendung  
Messkette am  
Versuchsstand** Zur Messung der Kavitationsintensität wurde der Sensor auf der Düse mit Wachs befestigt. In Abb. 5 ist ein typischer Bildausschnitt einer Messung über 5 min dargestellt. Während der Messung wurde der Volumenstrom schrittweise um 5-6 l/min erhöht. Es wird die Beschleunigung als Vielfaches der Erdanziehung ( $xg$ ) grafisch angegeben. Dazu werden die Minima und Maxima erfasst. Aus dem Betrag wird der Peak-Peak Wert in  $g$  abgebildet, der im Folgenden zur Bewertung der Kavitationsintensität bei unterschiedlichen Zuständen herangezogen wurde. Die Rohdaten wurden zur Auswertung als gleitender Durchschnitt zusammengefasst.

---

**Kavitations-  
beginn** Ab einem Volumenstrom von 32 l/min war zu erkennen, wie sich Blasen in der Düse aus Plexiglas bildeten und hörbar kollabierten. Auch der Sensor zeigte ab diesem Punkt erstmals messbare Amplituden mit geringer Peakhöhe an. Bis zu einem Volumenstrom von 50 l/min trat hörbar und sichtbar Kavitation in der Düse auf, die aber nicht mit zunehmendem Volumenstrom zu höheren Peak-Peak Werten führte. Die Kavitationsintensität nahm erst ab 50 l/min deutlich zu. Die Peak-Peak Werte stiegen bis auf über 200  $xg$  an.

Obwohl also in der Düse Blasen kollabieren war bis zu einem Volumenstrom von 50 l/min ( $c=16$  m/s,  $p= 5$  bar) nur eine sehr geringe Kavitationsintensität messbar. Hier spielen Temperatur und Gasgehalt des Wassers eine wichtige Rolle, die weiter untersucht wurden, um optimale Betriebszustände für eine Behandlung von Faserstoff herauszuarbeiten

---

Abb. 5

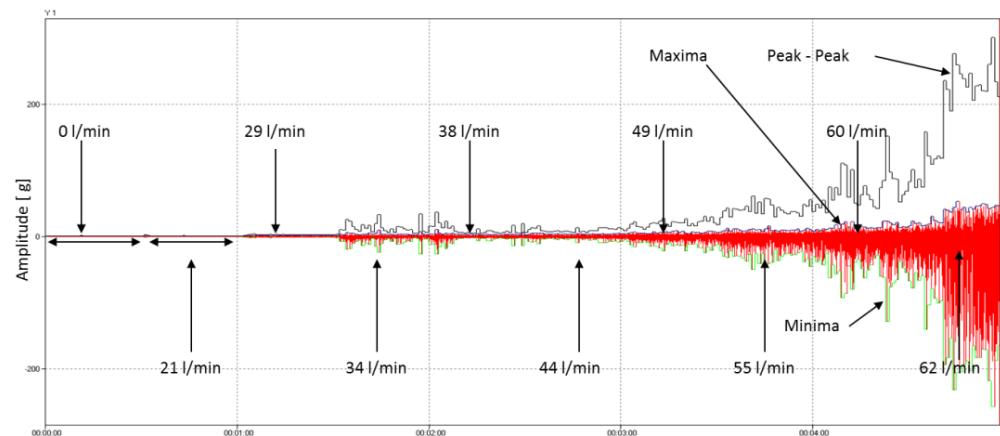


Abb. 5: Messung der Amplituden in g mittels eines piezo-elektrischen Beschleunigungssensors über der Zeit von 5 min für 10 verschiedene Volumenströme/ Leitungswasser ohne Faserstoff. Der Volumenstrom wurde im Abstand von 30 Sekunden um 5-6 l/min erhöht.

### Kavitations- beginn bei Frischwasser

Unter Frischwasser wird im Folgenden Leitungswasser verstanden, welches nur wenige Sekunden bis Minuten nach Abfüllung im Versuchsstand untersucht wurde. In Abb. 6 ist ein Versuch mit Frischwasser bei einem Volumenstrom von 50 l/min über einen Zeitraum von 45 min dargestellt.

Deutlich ist zu erkennen, dass zu Beginn nur geringe Peak-Peak Werte erreicht wurden. Erst nach 10 Minuten wurden maximale Peak-Peak Werte von 250 g ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass zu Beginn der Kavitation gelöstes und freies Gas in Form von Blasen freigesetzt wurde, deren Intensität beim Kollaps nur gering ist, da der Partialdruck der Blase noch oberhalb des Dampfdrucks der Flüssigkeit liegt (Gaskavitation). Zudem ergibt sich der Partialdruck in der kollabierenden Blase aus dem Dampfdruck der Flüssigkeit und dem Partialdruck des Gases. Mit einem höheren Gasanteil sinkt die Zugspannung des Wassers und die Intensität des Blasen kollaps [19].

Dennoch muss auch in Betracht gezogen werden, dass sich bildende Gasblasen und Keime notwendig sind, um Kavitation zu initiieren. Auch Auret et al. [20] bestätigen, dass bei zu hohem Gasgehalt die abrasive Wirkung der Kavitation mit steigendem Anteil an gelöstem Sauerstoff abnimmt. Möglich ist auch, dass das bestehende Keimspektrum in seiner Größenverteilung zerkleinert wird und kleinere Blasenkeime mit höherer Intensität kollabieren.

Abb. 6

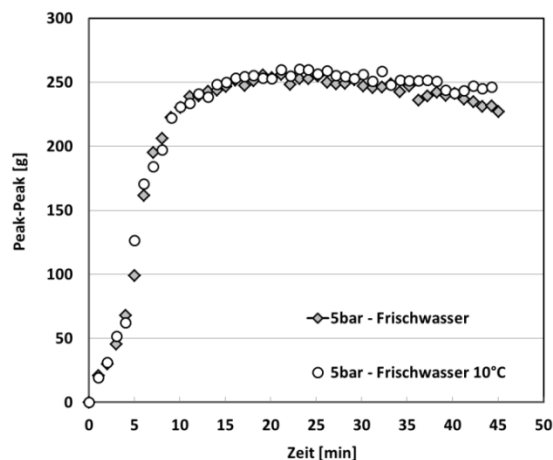


Abb. 6: Verhalten von Frischwasser bei konstanter Pumpenleistung 50 l/min ( $p=5$  bar) über eine Zeitdauer von 45 min.

**Einfluss der Temperatur**

Suslick et al. [18] und Wenniger et al. [21] geben wieder, dass die Intensität der Kavitation mit steigender Temperatur der Flüssigkeit abnimmt, da der Druckgradient zur Erreichung des Dampfdrucks abnimmt. Gleichzeitig nimmt aber auch die Löslichkeit von Sauerstoff/Luft mit steigender Temperatur ab und somit das Ausmaß an dämpfender Gaskavitation. Trotzdem ist in Abb. 7 deutlich zu erkennen, dass der Druckgradient zur Erreichung des Dampfdrucks, der sich durch die unterschiedlichen Temperaturen ergibt, wesentlichen Einfluss auf Kavitationsintensität hat, da die Peak-Peak Werte bei einer Wassertemperatur von 18°C deutlich höher waren als bei 30°C oder 41°C.

Abb. 7

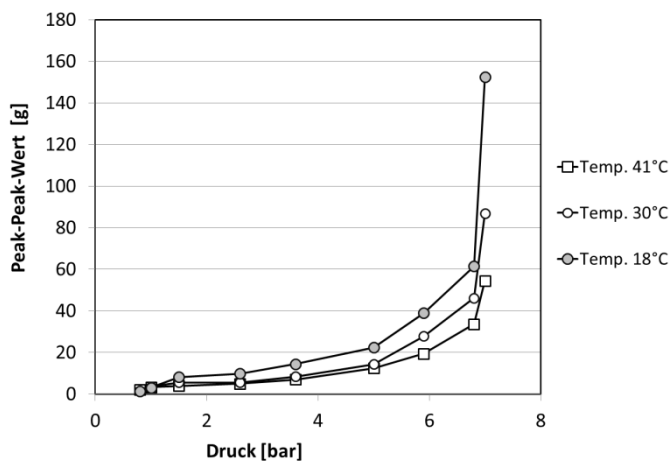


Abb. 7: Peak-Peak-Werte der Amplituden am pizeo-elektrischen Beschleunigungssensor von Wasser mit unterschiedlichen Ausgangstemperaturen. Der Druck bzw. der Volumenstrom wurde innerhalb von 5 min im Abstand von 30 Sekunden um 5-6 l/min erhöht.



### Einfluss des Gasgehalts

Wie in den vorangegangenen Ausführungen dargestellt, ist der Gasgehalt wesentlich für die sich ausprägende Kavitationsintensität. Um die Bedeutung des Gasgehalts der Flüssigkeit auf die Kavitationsintensität zu bewerten, wurde Frischwasser bei annähernd gleicher Temperatur aber nach unterschiedlicher Zeit zum Entgasen bei kontinuierlicher Erhöhung des Volumenstroms und damit des Drucks in der Kavitationsdüse behandelt. Daneben wurde ein Versuch mit Frischwasser durchgeführt, bei dem das Wasser vor der Behandlung für 5 min bei einem Druck von 1 bar nahe der Kavitationsschwelle durch die Düse gefördert wurde, um freies Gas abzutrennen (*Wasser,  $t = 5 \text{ min}$ ,  $T = 18^\circ\text{C}$ ,  $p = 1 \text{ bar}$* ). Die Peak-Peak Werte sind in Abb. 8 dargestellt. Auch hier ist zu sehen, dass in Frischwasser erst ab einem Druck von 6,8 bar hohe Peak-Peak Werte erzielt wurden und damit Blasenkollaps mit hoher Intensität entsteht. Je länger das Wasser zum Entgasen stehen gelassen wurde, desto früher wurden hohe Peak-Peak Werte gemessen. Wurde freies Gas durch eine vorherige Behandlung bei 1 bar schon weitestgehend entfernt, konnte schon bei geringen Volumeströmen harte Kavitation erzeugt werden. Die maximal erreichten Peak-Peak Werte sind allerdings bei allen Zuständen gleich, was darauf hinweist, dass zwar der Kavitationsbeginn verändert wurde, aber nicht die absolut erreichbare Intensität.

Abb. 8

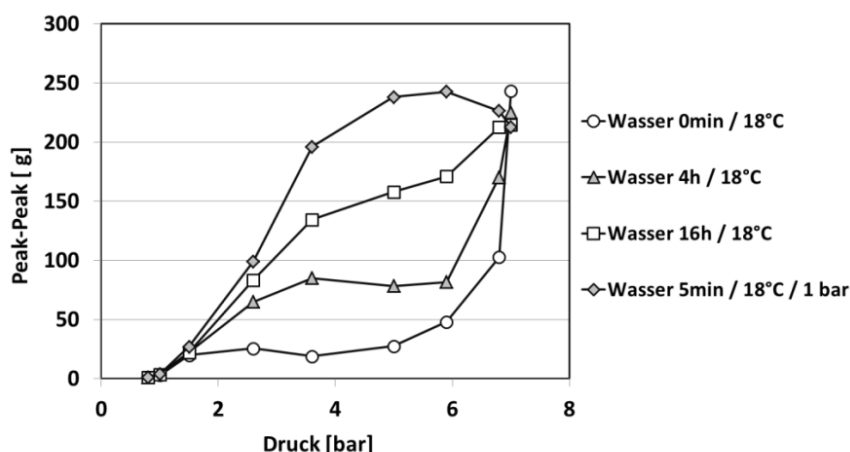


Abb. 8: Peak-Peak Werte der Amplituden am pizeo-elektrischen Beschleunigungssensor von Wasser mit unterschiedlichen Zuständen. Der Druck bzw. der Volumenstrom wurde innerhalb von 5 min im Abstand von 30 Sekunden um 5-6 l/min erhöht.

### 4.3 Einfluss von Faserstoff auf das Kavitationsverhalten

#### Vorgehen

Die Beurteilung der Kavitationsintensität über einen piezo-elektrischen Sensor hat den Vorteil, dass auch Faserstoffsuspensionen untersucht werden können. Chemische Abbaureaktionen sind in dem Mehrphasengemisch nur schwer zu untersuchen und optische Methoden benötigen ein Minimum an Transmission, das mit steigender Stoffdichte nicht gegeben ist.

In den Untersuchungen wurde zunächst eine Faserstoffsuspension mit einer Stoffdichte von 0,5% gewählt, die bei einem Volumenstrom von 50 l/min durch die Düse gepumpt wurde. Es wurde untersucht, wie die Aufbereitung der Faserstoffsuspension erfolgen muss, um eine möglichst hohe Kavitationsintensität zu erreichen.

#### Ergebnisse

In Abb. 9 sind die Amplituden der Versuche A-C über der Zeit aufgetragen. Ohne jegliche Vorbehandlung der Suspension (**A**) wurde erst nach etwa 10 min intensive Kavitation gemessen, auch wenn hörbar kollabierende Blasen im System auftraten. Die Signale sind aber nicht stetig vorhanden. Wurde die Stoffsuspension dagegen über Nacht stehen gelassen (**B**) wurde ein Einsetzen harter Kavitation mit Amplituden  $> 100$   $\mu\text{g}$  schon nach 3 Minuten gemessen.

Am effektivsten hat sich allerdings erwiesen, das Frischwasser vor der Zugabe des Faserstoffs bei einer einsetzender Kavitation zu entgasen (**C**). In der Grafik ist zu erkennen, wie unmittelbar nach Beginn des Versuchs Amplituden  $> 200$   $\mu\text{g}$  einstellen. Nach 20 min wurden 6 Liter Stoffsuspension hinzugegeben. Danach wurde ein Absinken der Amplituden beobachtet. Der Faserstoff wirkt demnach dämpfend auf die Kavitationsintensität. Die Intensitäten sind dennoch sehr hoch und der Blasenkollaps tritt anscheinend mit hoher Frequenz auf.

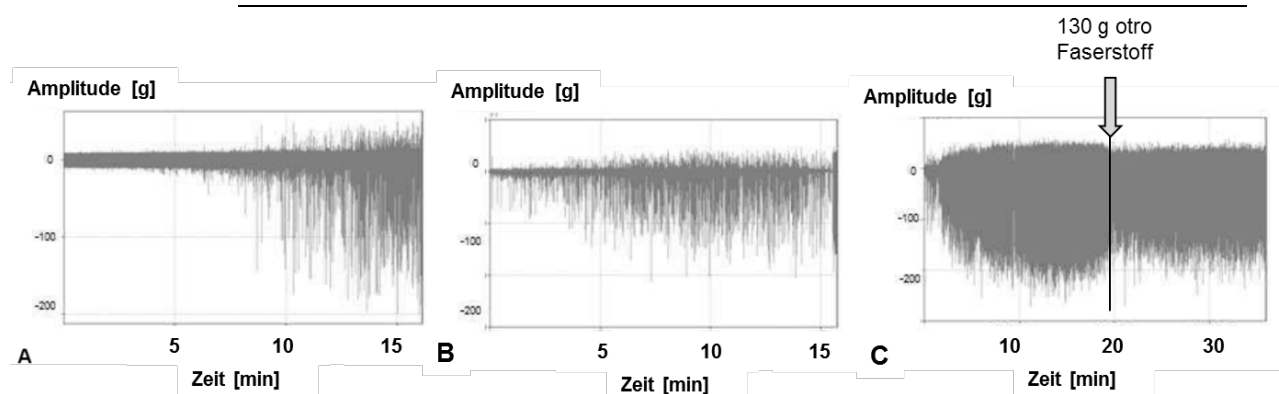


Abb. 9: Kavitationsintensität am Versuchsstand mit KF-Zellstoff. Stoffdichte 0,5%. (**A**) Frischwasser, (**B**) Frischwasser 16h entgast, (**C**) 20 Liter Frischwasser bei 50 l/min für 20 min unter Kavitation behandelt. Anschließend wurden 6 Liter Faserstoffsuspension (2% SD) zugegeben).

#### 4.4 Fazit

**Bewertung der Kavitationsintensität** Im Vergleich der beiden Methoden zur Bewertung der Kavitationsintensität mittels Weissler-Reaktion und Körperschallmessung hat sich gezeigt, dass eine Freisetzung von  $I_3^-$  aus KJ OH<sup>•</sup>-Radikalen bereits unmittelbar mit dem Einsetzen von kollabierenden Blasen eintritt und damit reaktive Spezies in der Suspension vorhanden sind, die oxidative Prozesse an der Cellulose, den Hemicellulosen und Lignin initiieren können. Im Gegensatz dazu detektiert der piezoelektrische Beschleunigungssensor den Körperschall. Hier werden erst intensive Signale messbar, nachdem ein Herauslösen von freien Gasen aus der Suspension stattgefunden hat, auch wenn rein visuell und hörbar schon bei geringen Volumenströmen ein Kollabieren von Blasen zu erkennen war. Entweder wirken die enthaltenen Gasblasen dämpfend oder es tritt eine Verzögerung auf, da die Übertragung des Körperschalls durch die Düsenwandung selbst gedämpft wird. Trotz alledem spielen die Temperatur und der Gasgehalt eine wesentliche Rolle für das Einsetzen harter Kavitation.

---

**Rückschlüsse für die Stoffaufbereitung** Für die Stoffaufbereitung bedeutet das, dass Verdünnungswasser möglichst frei von freien Gasen sein sollte. Gas in der Stoffsuspension ist daneben häufig Ursache für Pinholes und Abrisse in der Produktion und führt zu Messungenauigkeiten bei der Dosierung. Um den Gasgehalt zu minimieren werden in der Papierherstellung chemische Additive genutzt und es erfolgt ein Entlüften durch das Versprühen des Stoffstroms unter Unterdruck in Stoffentlüftern oder Entgaspumpen. Folglich sollte in der Nutzung der hydrodynamischen Kavitation Stoffströme aus den oben genannten Anlagen genutzt werden.

---

**Festlegungen für weitere Versuche** Für die folgenden Versuche wurde festgelegt, dass der Faserstoff bei möglichst hoher Stoffdichte desintegriert werden sollte, um möglichst viel Prozesswasser vor der Stoffzugabe in der Kavitationsdüse durch mehrere Durchläufe zu entgasen. Dazu wurde das Prozesswasser jeweils für 20 min bei einem Volumenstrom von 50 l/min durch die Kavitationsdüse gefördert.

---

## 5 Ergebnisse zu Faser-, Suspensions- und Papiereigenschaften im Labormaßstab

### 5.1 Einfluss hydrodynamischer Kavitation auf Faser und Suspensionseigenschaften

#### Faser- morphologie

Die Fasern passieren in der Düse eine Unterdruckzone mit hoher Turbulenz. Neben der Bildung von OH<sup>•</sup>-Radikalen wirken also hydrodynamische Kräfte auf die Fasern. In Tab. 5 und Tab. 6 sind die fasermorphologischen Kennwerte nach unterschiedlichen Durchlaufzyklen aufgelistet. Auffällig ist, dass insbesondere bei den Primärfaserstoffen ein Rückgang des Curl-Index eintritt, der gleichzeitig zu einer scheinbaren Erhöhung der Faserlänge führt. Allerdings wurde die Faserkonturlänge  $L(w)$  c gemessen, die Abweichungen in der Form berücksichtigen sollte. Der Effekt der Faserstreckung ist ebenso bei anderen Mahlaggregaten [22, 23] zu finden. Vergleichende Messungen der Faserstoffe nach Mahlungen mit Scheibenrefiner zeigen ebenso deutliche Abnahmen im Curl-Index.

Bei BCTMP, dessen Fasern durch den hohen Ligningehalt deutlich steifer sind, wird zusätzlich der Feinstoffanteil erhöht. Im Gegensatz zu den Primärfaserstoffen wird bei Wellenstoff mit Dauer der Behandlung die Faserlänge gekürzt und Feinstoff produziert.

Tab. 5

Tab. 5: Veränderung der Fasermorphologie von Kurz- und Langfaserzellstoff in Folge der Behandlung in der Kavitationsdüse ( $Q= 50$  l/min, SD = 0,7%).

Durchläufe Düse		Langfaser				Kurzfaser			
		0	40	80	120	0	40	80	120
Durchmesser	[ $\mu$ m]	23,9	24,3	24,2	24,4	16,5	16,6	16,5	16,7
Curl-Index	[%]	21,3	20,0	20,2	19,8	17,4	15,4	15,5	15,6
L(l) c	[mm]	2,27	2,33	2,30	2,33	0,75	0,76	0,76	0,76
L(w) c	[mm]	3,02	3,05	3,01	3,06	0,88	0,92	0,91	0,92
finest (n) c	[%]	29,2	27,6	25,6	25,5	11,2	10,2	10,2	10,2

Tab. 6

Tab. 6: Veränderung der Fasermorphologie von BCTMP und Wellenstoff in Folge der Behandlung in der Kavitationsdüse ( $Q= 50$  l/min,  $SD = 0,7\%$ ).

Durchläufe Düse		BCTMP				Wellenstoff			
		0	40	80	120	0	40	80	120
Durchmesser	[ $\mu\text{m}$ ]	22,9	22,9	23,2	23,3	21,7	21,4	21,4	21,2
Curl-Index	[%]	7,9	7,4	7,6	7,3	13,0	12,9	13,2	13,6
L(l) c	[mm]	0,72	0,69	0,71	0,71	1,24	1,24	1,20	1,19
L(w) c	[mm]	0,92	0,89	0,91	0,92	2,03	2,02	1,97	1,93
finest (n) c	[%]	27,6	29,4	29,6	32,6	28,5	31,2	29,9	30,2

### Suspensionseigenschaften

Die Änderungen der fasermorphologischen Kennwerte kommen auch im SR-wert und im WRV zum Ausdruck. Wobei der Anstieg des Wasserrückhaltevermögens bei den Zellstoffen nur moderat ist. Vor allem bei altpapierbasierten Wellenstoff ist der Anstieg des WRV von 130% auf 149% und die des SR-Werts von 36 auf 45 am deutlichsten..

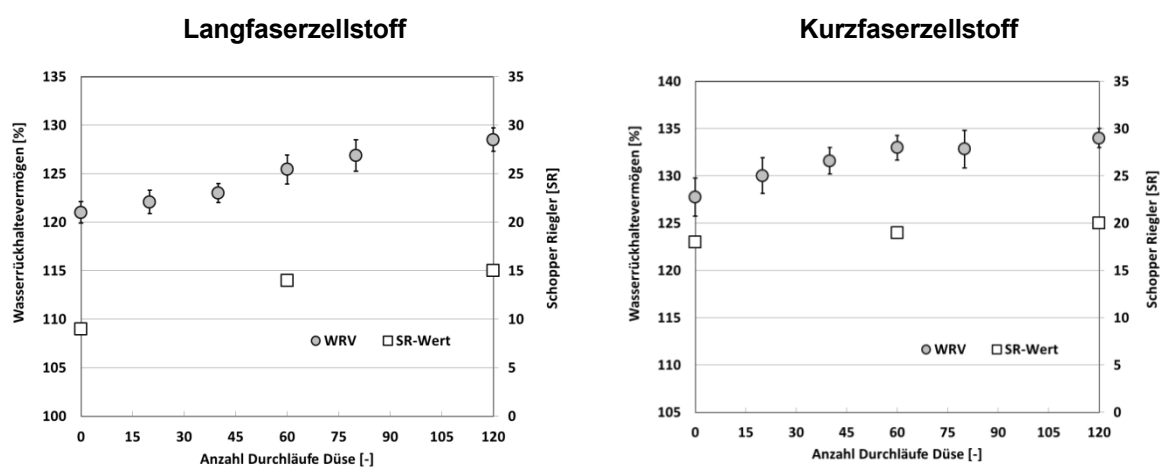


Abb. 10: Veränderung des WRV und SR-Werts von Langfaserzellstoff und Kurzfaserzellstoff durch die Behandlung in der Kavitationsdüse ( $Q= 50$  l/min,  $SD=0,6\%$ ).

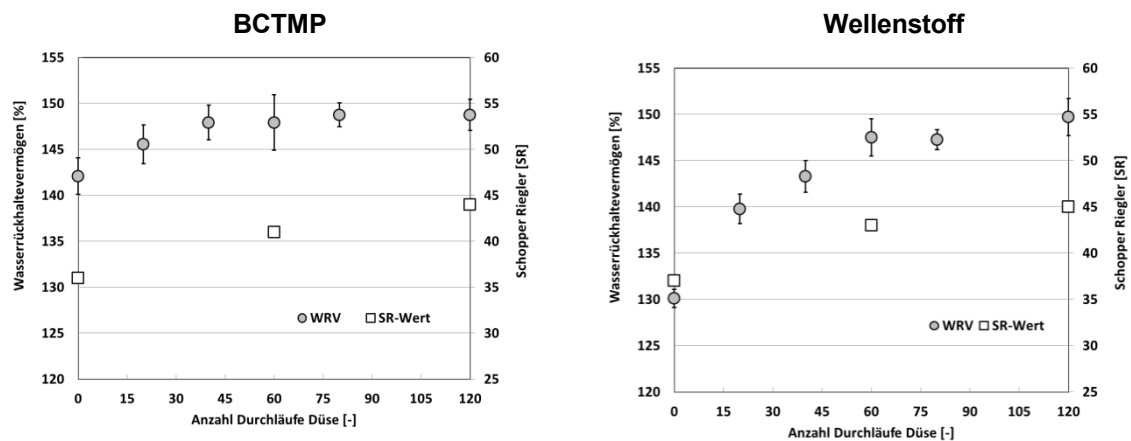


Abb. 11: Veränderung des WRV und SR-Wert von BCTMP und Wellenstoff durch die Behandlung in der Kavitationsdüse ( $Q=50$  l/min,  $SD=0,6\%$ ).

### Mikroskopische Untersuchungen

In den folgenden lichtmikroskopischen Abbildungen ist dargestellt, wie sich die Kavitationsbehandlung auf Langfaserzellstoff, Eukalyptuszellstoff und BCTMP aus Aspe visuell äußert. Deutlich ist zu erkennen, dass beim Langfaserzellstoff und BCTMP eine äußere Fibrillierung stattgefunden hat. Dagegen erscheint die Struktur des Kurzfaserszellstoffs aus Eukalyptus weitestgehend unverändert.

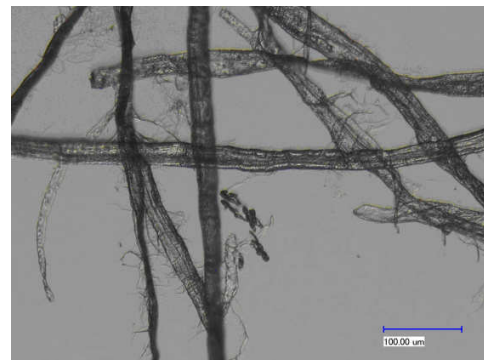


Abb. 12: Lichtmikroskopie von Langfaserzellstoff unbehandelt (links) und nach Kavitationsbehandlung ( $Q=50$  l/min,  $SD=0,6\%$ ).

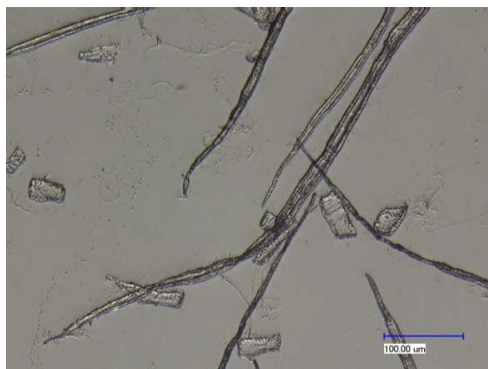




Abb. 13: Lichtmikroskopie von Kurzfasernstoff unbehandelt (links) und nach Kavitationsbehandlung ( $Q=50$  l/min,  $SD=0,6\%$ ).

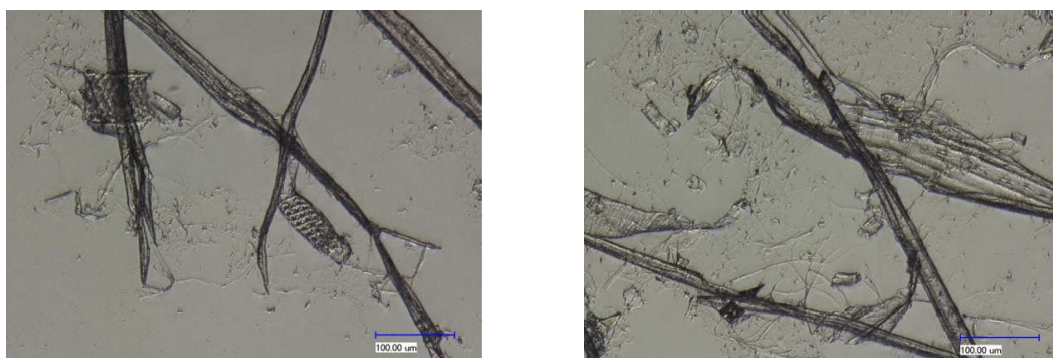


Abb. 14: Lichtmikroskopie von BCTMP unbehandelt (links) und nach Kavitationsbehandlung ( $Q=50$  l/min,  $SD=0,6\%$ ).

## 5.2 Optimierung der hydrodynamischen Kavitation für AP-Faserstoffe im Labormaßstab

### Erhöhung der Fließgeschwindigkeit/ Volumenstrom

Mit der Erhöhung des Volumenstroms wurde die Geschwindigkeit im engsten Querschnitt auf 26,6 m/s erhöht. In Abb. 15 und Abb. 16 ist deutlich zu erkennen, dass dadurch im Vergleich zu vorherigen Untersuchungen die Anzahl der Durchläufe durch die Düse reduziert werden konnte und trotzdem die gleichen Festigkeitssteigerungen erzielt wurden. Dass es einen Zusammenhang von Volumenstrom und damit der Fließgeschwindigkeit bzw. der Kavitationsintensität zu den Faser- und Festigkeitseigenschaften gibt, zeigt auch Abb. 16. Mit Intensivierung der hydrodynamischen Kavitation stieg der SR-Wert von 39 auf 59. Der Tensile Index wurde hier um 21,4% erhöht..

Abb. 15

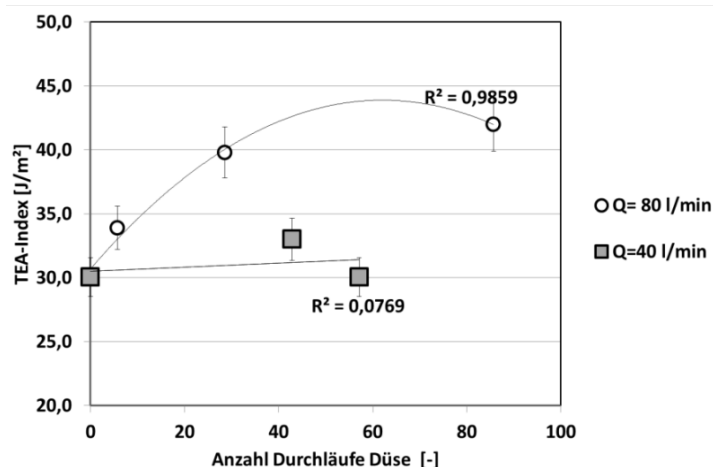


Abb. 15: Arbeitsaufnahmevermögen (TEA) von Laborblättern (80 g/m<sup>2</sup>) aus AP für Wellenstoff nach Behandlung in einer Kavitationsdüse ( $SD=0,7\%$ ) ( $Q=40$  l/min,  $c=13,3$  m/s,  $Q=80$  l/min,  $c=26,6$  m/s).

Abb. 16

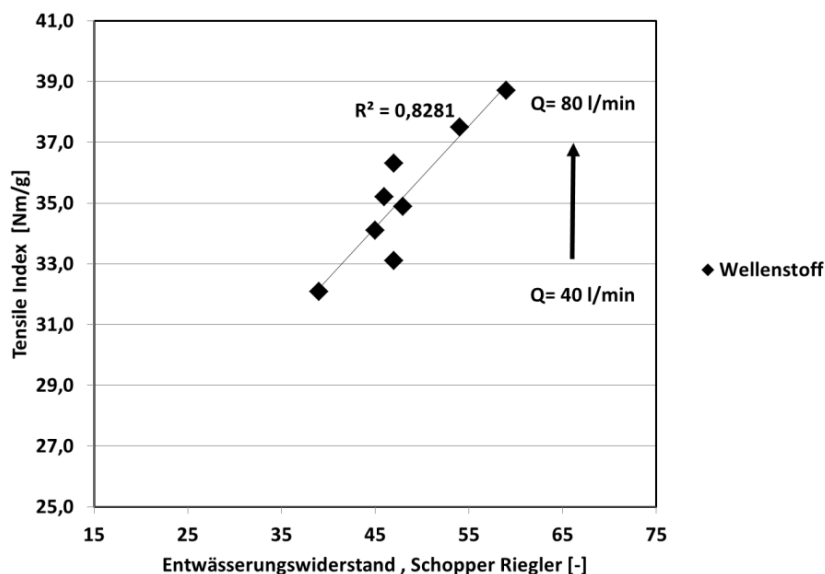


Abb. 16: Tensile Index und SR-Wert der Laborblättern (80 g/m<sup>2</sup>) aus AP für Wellenstoff nach Behandlung in einer Kavitationsdüse (SD=0,7%) mit variiertem Volumenstrom.

**Druckfarben-abtrennung**

Des Weiteren wurden die Erkenntnisse auf Altpapier zum Denken ausgeweitet und geprüft, ob mittels hydrodynamischer Kavitation neben den Papierfestigkeiten auch die Druckfarbenabtrennung verbessert werden kann.

Das Ergebnis in Tab. 7 zeigt, dass sich die Druckfarbenabtrennung berechnet aus dem spektralen Adsorptionskoeffizienten  $k$  und dem Weißgrad  $R_{457}$  durch die Kavitationsbehandlung wesentlich verbesserte. Die Druckfarbenabtrennung wurde von 55% auf 69,5% verbessert und der Weißgrad um 1,6%-Punkte erhöht. Dies ist zum einen auf eine Zerkleinerung von Druckfarben unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze bzw. auf eine Verbesserung der Flotation zurückzuführen. In [24] wurden ähnliche Effekte beschrieben. Damit scheint also die Möglichkeit gegeben, mittels hydrodynamischer Kavitation den Prozess der Druckfarbtrennung und Flotation zu verbessern. Eine Verbesserung der Papierfestigkeiten im Vergleich zur Referenz konnte nicht beobachtet werden.

Tab. 7

Tab. 7: Wirkung hydrodynamischer Kavitation auf die Druckfarbenabtrennung und optische Eigenschaften von grafischem Altpapier ( $Q=80$  l/min,  $c=26,6$  m/s, SD 0,7%, 30 Durchläufe durch Düse).

		SR [-]	$k$ [m <sup>2</sup> /kg]	Ink Elimination [%]	$R_{457}$ [%]
Standard INGEDE	ohne Flotation	60	9,7		50,6
	mit Flotation	55	4,8	55,0	59,8
Behandlung mit Düse nach Desintegrator	ohne Flotation	65	9,2		49,9
	mit Flotation	63	3,3	69,5	61,4

## 6 Übertragung in den Pilotmaßstab

**Versuchsbedingungen** Für die Versuche wurde ein Langfaserzellstoff, Wellenstoff und der DIP II bei folgenden Einstellungen behandelt:

- Düsendurchmesser 11 mm
- Stoffdichte 0,6-2,4%
- DIP-Aufbereitung entsprechend INGEDE, Flotation in Laborflotationszelle
- Der Langfaserzellstoff wurde vorher im Stofflöser bei 5% SD für 15 min desintegriert.
- Vorbehandlung des Prozesswassers für 20 min bei  $Q= 250$  l/min zur Entfernung von Gasen
- Einlaufdruck konstant 10,5 bar
- Behandlungszeit maximal 20 min.

**Stoff- und Fasereigenschaften**

Mit den Versuchen konnten im Wesentlichen die Ergebnisse bezüglich WRV und SR-Wert sowie Fasermorphologie aus den Untersuchungen im Labor bestätigt werden.

Die Faserlänge in AP-basierte Faserstoffen zeigte einen leichten Rückgang, wohingegen die hydrodynamische Kavitation zu einer Streckung der Fasern und einer scheinbaren Erhöhung der Faserlänge beim Zellstoff führte. Der Entwässerungswiderstand (SR) wurde nur geringfügig verändert. Der SR-Wert des DIP vor der Flotation blieb ebenso konstant. Allerdings wurde der SR-Wert von 65 auf 76 des Gutstoffs nach der Flotation erhöht, was für eine Fibrillierung der Faser spricht.

**Papier-eigenschaften Langfaserzellstoff**

Mit der Übertragung der Erkenntnisse auf eine andere Düsengeometrie und Skalierung konnte schon nach 20 Durchläufen eine Steigerung von 18,3% im Tensile Index und 20,3% im Berstdruck erreicht werden (Abb. 17). Das Arbeitsaufnahmevermögen der Laborblätter, das sich aus E-Modul und Dehnung zusammensetzt, wurde von 39,9 J/m<sup>2</sup> auf 54,1 J/m<sup>2</sup> um 35,6% verbessert.

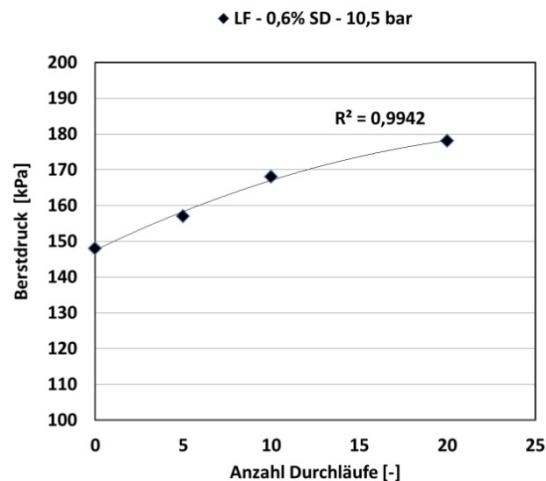
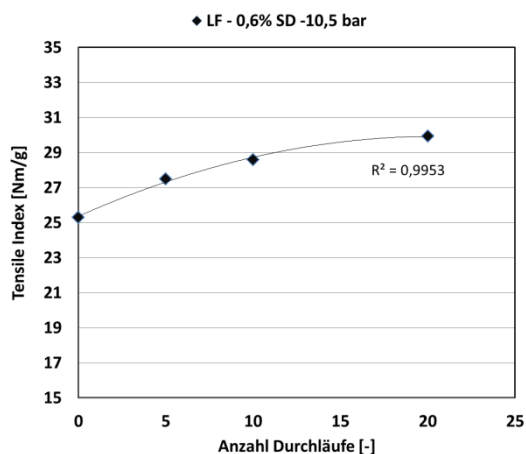


Abb. 17: Tensile Index und Berstdruck von Langfaserzellstoff mit variiert Anzahl an Durchläufen durch die Versuchsanlage mit einer Stoffdichte von 0,6% einem konstantem Einlaufdruck von 10,5 bar ( $c=43$  m/s). Laborblätter 80 g/m<sup>2</sup>.

### Papiereigenschaften Wellenstoff

Die Festigkeitseigenschaften der Laborblätter aus Wellenstoff sind in Abb. 18 dargestellt. Wie in vorangegangenen Untersuchungen konnte der Tensile Index um 20-25% auf 40 Nm/g gesteigert werden. Wobei keinerlei Unterschiede zwischen 0,6% und 2% Stoffdichte erkennbar waren. Bereits nach 5 Durchläufen wurde ein Tensile Index von 38,4 Nm/g erreicht, was eine deutliche Verbesserung in der Effizienz gegenüber vorangegangenen Untersuchungen bedeutete.

Die Berstfestigkeit konnte um 27,4% auf 172 kPa verbessert werden. Im Vergleich dazu wurde die Berstfestigkeit bei einer Fließgeschwindigkeit von 26,6 m/s auf 152 kPa angehoben. Fünf Durchläufe waren ausreichend, um eine signifikante Steigerung auch des Berstdrucks zu erreichen.

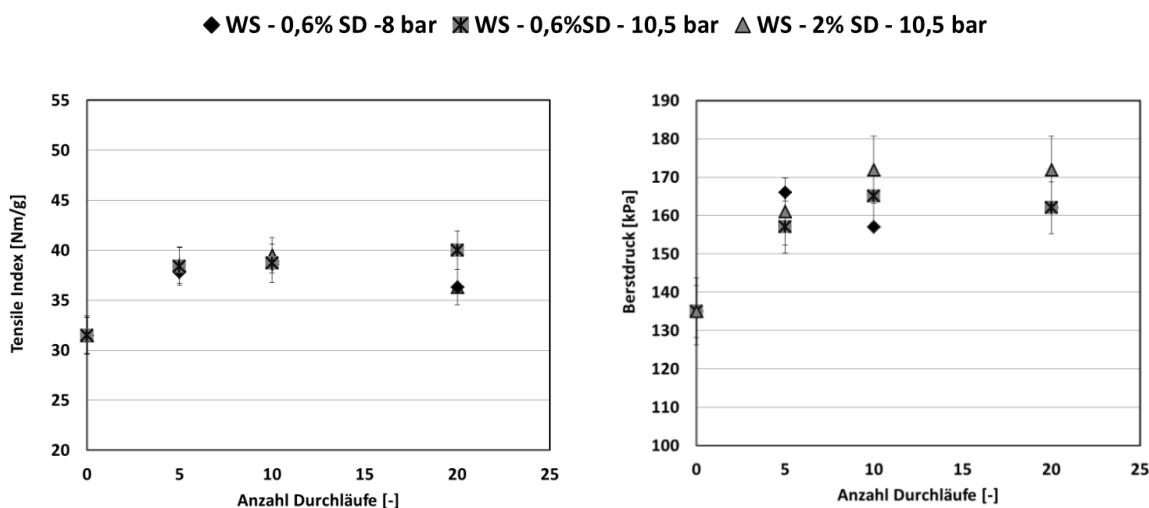


Abb. 18: Tensile Index und Berstdruck Wellenstoff mit variiert Anzahl an Durchläufen durch die Versuchsanlage mit einer Stoffdichte von 0,6% und 2% bei konstantem Einlaufdruck von 10,5 bar ( $c=43$  m/s). Laborblätter 80 g/m<sup>2</sup>.

### DIP II

Mit der Behandlung des DIP II in der optimierten Kavitationsanlage wurde neben der Verbesserung der Papiereigenschaften das Ziel verfolgt, die Druckfarbenabtrennung und den Druckfarbenaustrag in der Flotation zu verbessern. Die Reduzierung der Schmutzpunkte und die Ink Elimination sind in Abb. 19: Schmutzpunktreduzierung bei einer Stoffdichte von 0,6% und 1,2% und konstantem Einlaufdruck von 10,5 bar ( $c=43$  m/s) in die Düse. Abb. 19 und Abb. 20 zusammenfassend dargestellt. Eine nennenswerte Änderung der Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu Referenzmessungen konnte aber nicht festgestellt werden. In Folge der Flotation wurde der Aschegehalt der Papiere von 24% auf 15-17% gesenkt. Unterschiede durch die Kavitationsbehandlung wurden nicht erkennbar.

**Druckfarben-  
austrag DIP II**

Eine deutliche Verbesserung im Austrag sichtbarer großer Schmutzpunkte in der Flotation wurde schon nach nur 5 Durchläufen durch die optimierte Kavitationsdüse erreicht (Abb. 19). Die Schmutzpunkte wurden ohne die Kavitationsbehandlung um 58% und mit Kavitationsbehandlung um bis zu 72% gesenkt. Damit gelangt man in den Bereich, der üblicherweise nur mit einer weiteren Eindickung und Dispergierung mit anschließender Nachflotation erreicht wird.

Auch ein verbesserter Austrag kleiner Druckfarbenpartikel (= k700) war auch unter den Kavitationsverhältnissen bei höherer Stoffdichte von 1,2% möglich (Abb. 20). Der spektrale Absorptionsfaktor  $k$  wurde in diesen Versuchen um 42-54% reduziert und war damit deutlich niedriger als ohne die Kavitationsbehandlung.

**Abb. 19**

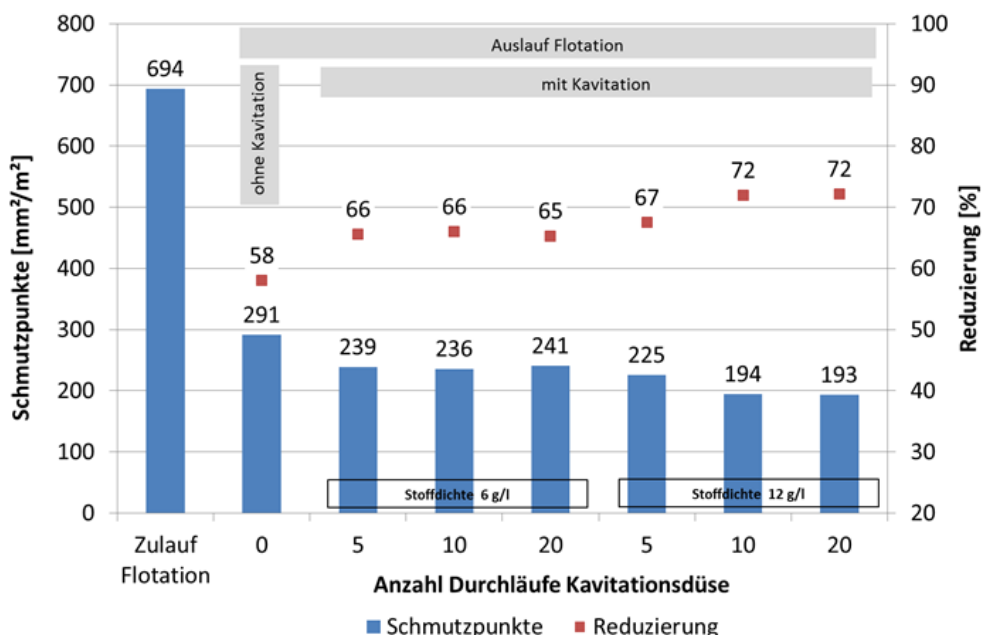


Abb. 19: Schmutzpunktreduzierung bei einer Stoffdichte von 0,6% und 1,2% und konstanten Einlaufdruck von 10,5 bar ( $c= 43$  m/s) in die Düse.

Abb. 20

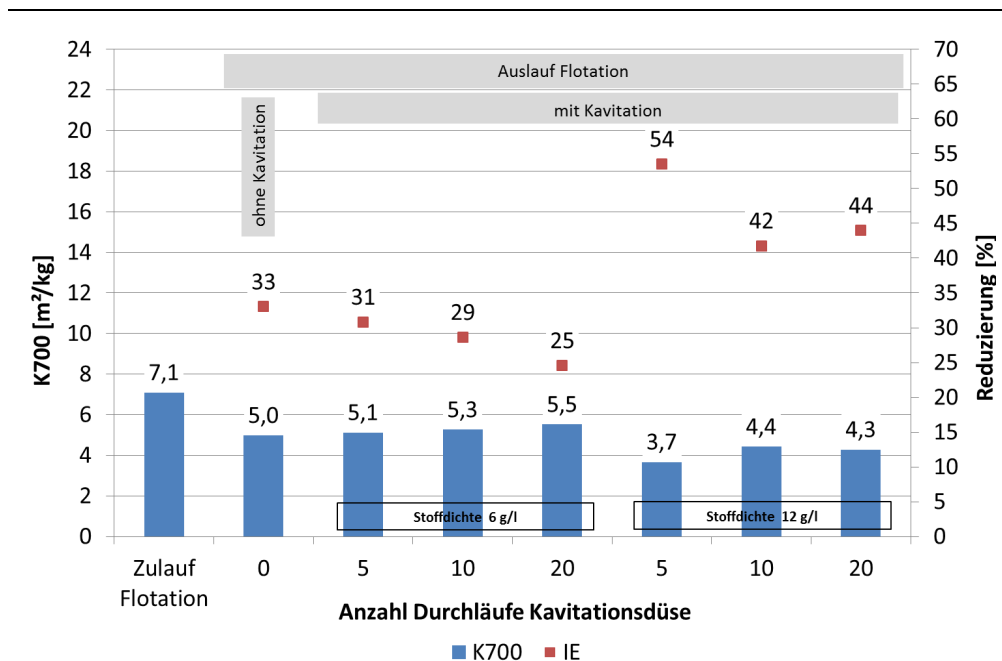


Abb. 20: Druckfarbenabtrennung bei einer Stoffdichte von 0,6% und 1,2% konstante Einlaufdruck von 10,5 bar ( $c = 43$  m/s) in die Düse.

## 7 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 7.1 Allgemeine Effizienzbetrachtung

#### Mahlung von Zellstoff

Ziel des Forschungsvorhabens war es, einen Beitrag zur Ablösung des mechanischen Mahlprozesses mittels hydrodynamischer Kavitation zu leisten und Energiekosten in der Stoffaufbereitung einzusparen. Am weitesten verbreitet ist die Mahlung von Zellstoff mit Scheibenrefinern. Neben der spezifischen Leistung zur Behandlung der Fasern ist Energie für den Umtrieb des Stoffs und den Maschinenantrieb mit Garnituren notwendig. Abb. 21 zeigt vergleichend den Leistungseintrag bei der Mahlung eines Langfaserzellstoffs unter Berücksichtigung einer Leerlaufleistung von 30%. Neueste Anlagen mit einer Anschlussleistung von 500 kW besitzen laut Herstellerangaben eine Leerlaufleistung von etwa 20% am optimalen Betriebspunkt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Festigkeitssteigerung mit einem Refiner wesentlich höher ist, als dies mit der Kavitation in den Versuchen erreicht werden konnte.

Auch der Energieeinsatz war deutlich höher. Allerdings gilt dies für die genutzte Exzentrerschneckenpumpe am Versuchsstand. Im industriellen Maßstab werden bei einem Volumenstrom von 250-300 m<sup>3</sup>/h zum Stofftransport Kreiselpumpen mit einer Anschlussleistung von 20-30 kW eingesetzt, die auch den nötigen Druckaufbau gewährleisten können. Übertragen auf das vorliegende Ergebnis wäre ein Energieeinsatz von 50-100 kWh/t möglich.



Abb. 21

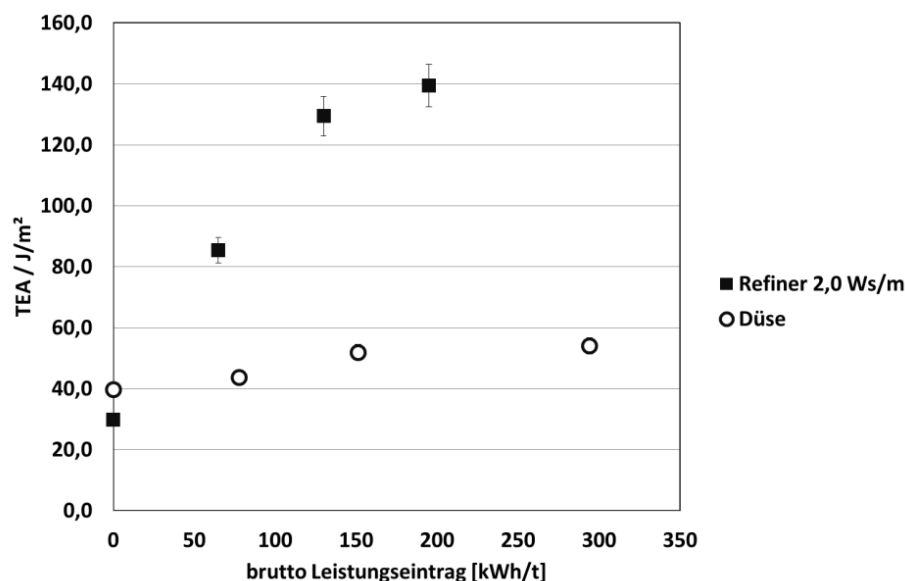


Abb. 21: Vergleich des Arbeitsaufnahmevermögens und Leistungseintrag nach Behandlung von Langfaserzellstoff zwischen Refiner (SEL 2,0 Ws/m) und hydrodynamischer Kavitationsbehandlung in der Kavitationsdüse .

#### Verpackungspapiere auf AP-Basis

Im Verpackungsbereich hergestellte Papiere aus Altpapier werden in der Regel nicht gemahlen, da das Festigkeitspotenzial zu gering ist. Zieht man die Ergebnisse der Festigkeitssteigerung und die industrielle Umsetzung mittels entsprechenden Pumpen und Düsen heran, ist eine Festigkeitssteigerung von 15-20% möglich, wobei hierfür Pumpleistung genutzt werden kann, die zum Stofftransport bereitgestellt werden muss.

Vorteil gegenüber dem Standardverfahren wäre eine vergleichsweise geringe Steigerung des SR-Wert und WRV, die somit in der Entwässerung und Trocknung nicht negativ beeinflusst werden, wie dies durch die Mahlung der Fall ist.

#### Sonstige positive Nebeneffekte

Neben den beschriebenen Möglichkeiten zur Festigkeitssteigerung zeigten sich weitere positive Nebeneffekte, die Ansatz für weitere Untersuchungen sein können. Dies ist z.B. die Abtrennung von freien Gasen aus der Suspension. Freies Gas erschwert in der Praxis die genaue Stoffdichtebestimmung, verursacht damit eine ineffiziente Hilfsmitteldosierung und kann zu Pinholes im Papier führen. Durch die Kavitationsbehandlung wurde freies Gas effektiv aus der Stoffsuspension herausgelöst, wodurch in der Praxis die üblicherweise eingesetzten kostenintensiven Entlüfterchemikalien deutlich reduziert werden könnten.

## 7.2 Deinking von graphischen Papieren

**Einsparpotenzial Kavitationsdeinking Szenario** Anhand der Untersuchungen lässt sich erkennen, dass das größte Einsparpotenzial der hydrodynamischen Kavitation in der Druckfarbenabtrennung liegt. Das Einsparpotenzial des Kavitationsdeinkings ergibt sich durch:

- Einsparung von Energiekosten in der Dispergierung und/oder Flotation 2.
- Reduzierung von Rejekten und damit weniger benötigter Rohstoff in der Flotation durch einen selektiveren Flotationsprozess.

Im folgenden Beispiel wird ein Szenario gerechnet, in dem ein herkömmlicher Disperger durch eine Kavitationsanlage mit um 1/3 reduziertem Energieverbrauch ersetzt wird und die Nachflotation infolge besserer Druckfarbenablösung und -zerkleinerung selektiver arbeitet, d.h. 25% weniger Rejekt erzeugt. In der Kalkulation werden die Investitionskosten bewusst vernachlässigt, da diese bei einer 10jährigen Abschreibungsphase im Vergleich zu den variablen Betriebskosten in der Regel gering sind. Es wird ein Energiepreis von 0,10 €/kWh angenommen.

---

**Quantitative Bewertung Deinking**

Tab. 1 listet die variablen Kosten in einer Deinkinganlage auf. Die Energiekosten stellen den Hauptkostenfaktor in der Stoffaufbereitung dar. In einfachen Deinkinganlagen existiert nur die 1. Dispergierung und die Intensität der Bleiche (Menge Chemikalien, Anzahl Bleichstufen) kann variieren.

Eine mittelgroße Deinkinganlage verarbeitet im Jahr ca. 140.000 t Altpapier. Auf Basis der aufgeführten Kosten ergibt sich beim Energieverbrauch ein Einsparpotenzial von 5,50 €/t und bei den Entsorgungs-/Rohstoffkosten von 2,65 €/t. Bei der genannten jährlichen Produktionsmenge summiert sich ein jährliches Einsparpotenzial von 1.141.000 €.

Aus diesem Beispiel wird deutlich, dass auch bei einer geringeren Reduzierung der Energie- und Materialverbräuche noch signifikante Einsparungen erzielt werden können. Andererseits könnte eventuell komplett auf die Flotation 2 verzichtet werden. Voraussetzung wäre eine vollständige Druckfarbenablösung und vorteilhafte Partikelfragmentierung in einen flotierbaren Größenbereich, so dass die Flotationsaufgabe bereits in der Flotation 1 abgeschlossen ist.

---

### **Ansprechpartner für weitere Informationen:**

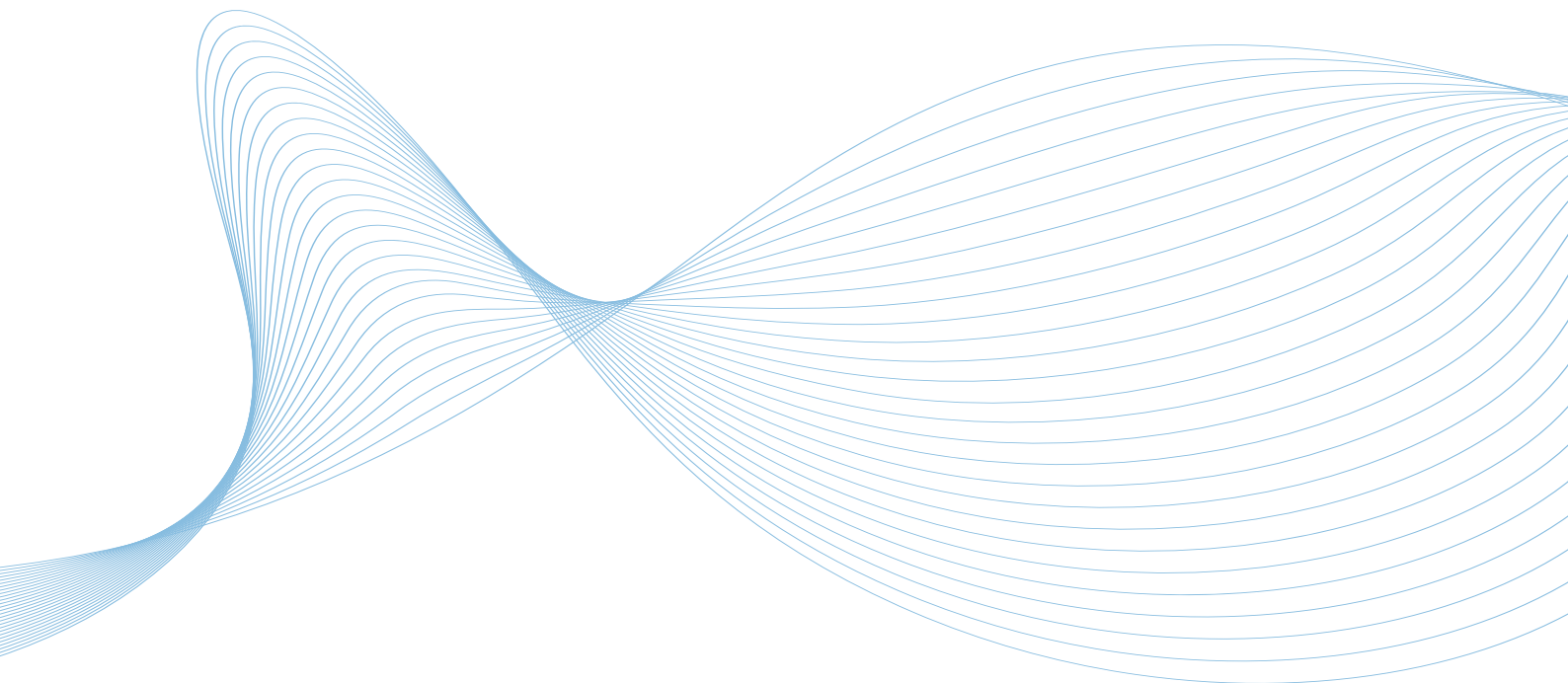
MSc. Tiemo Arndt  
Tel. (03529) 551-643  
[tiemo.arndt@ptspaper.de](mailto:tiemo.arndt@ptspaper.de)

Papiertechnische Stiftung PTS  
Institut für Zellstoff und Papier IZP  
Pirnaer Straße 37  
01809 Heidenau  
Tel. (03529) 551-655  
Fax (03529) 551-899  
e-Mail: [info@ptspaper.de](mailto:info@ptspaper.de)  
[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

**Literaturverzeichnis**

- 1 NN.  
Branchenleitfaden für die Papierindustrie  
Arbeitsgemeinschaft Branchenenergiekonzept Papier 2008
- 2 JAYME, G., CRÖNERT, H., NEUHAUS, W.  
Veränderung kolloidchemischer Eigenschaften von Zellstoff-Fasern durch hochfrequente  
Behandlung.  
Das Papier 13(4):578-583 (1959).
- 3 BOHL, W., ELMENDORF, W.  
Strömungsmaschinen 1. Aufbau und Wirkungsweise.  
Vogel Verlag Und Druck; Auflage: 9. A., Würzburg (Juni 2004).
- 4 SCHMID, A.  
Anwendung hydrodynamisch erzeugter „Superkavitation“ in der Belüftungstechnik  
Chemie Ingenieur Technik 79(4):409-415 (2007).
- 5 TAKAGI, K.-I., WATANABE, N., KATO, H.  
Destruction of Plankton using Cavitating Jet.  
Journal of Fluid Science and Technology 3(1):90-103 (2008).
- 6 GOTO, S., WATANABE, K., TSUJI, H., MIYANISHI, T.  
Process for Producing Recycled Pulp, Method of Modifying Pulp Fiber Surface and Contaminant,  
and Pulp Treating Apparatus.  
European Patent Application EP 1 652 999 A1 (2006).
- 7 ONODERA, I.; WATANABE, K.; GOTO, S.; TUJI, Y. und T. IIMORI  
Apparatus for Treating Papermaking Feedstock.  
European Patent Application EP 1 956 135 A1 (2008).
- 8 EHRlich, H.; ENGERT, P.; GROSSMANN, H. und M. VOGEL  
Ultrasound-assisted deinking of cross linked inks  
ipw – Das Papier 2/2013, 47-51.
- 9 BRENNER, T.; GROSSMANN, H. und T. ARNDT  
Use of ultrasound treatment in fibre suspensions to improve the strength of paper.  
In: Proceedings of 20th PTS Paper Symposium 2012, München, 11.–13. September 2012.
- 10 GROSSMANN, H.; WANSKE, M. und H. FRÖHLICH  
The Potential of Ultrasound Assisted Deinking  
In: 9th Research Forum on Recycling, Marriott Norfolk Waterside, Norfolk, VA, USA, 18.–  
21.10.2010.
- 11 SIVAKUMAR, M., PANDIT, A. B.  
Wastewater treatment: A novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique.  
Ultrasonic Sonochemistry 9(3):123-132 (2002).
- 12 CHAKINALA, A., GOGATE, P., BURGESS, A., BREMNER, D.  
Treatment of industrial wastewater effluents using hydrodynamic cavitation and the advanced  
Fenton process.  
Ultrasonic Sonochemistry 15(1): 49-54 (2008).
- 13 AMBULKEKAR, G. V., SAMANT, A. B., PANDIT, A. B.  
Oxidation of alkylarenes using aqueous potassium permanganate under cavitation: Comparison  
acoustic and hydrodynamic techniques.  
Ultrasonic Sonochemistry 12(1): 85
- 14 HELLER, W.  
Hydrodynamische Effekte und Wasserqualität.  
Habilitationsschrift, Institut für Strömungsmechanik TU Dresden (2005)

- 15 WEISSLER, A.; COOPER, H.W. und S. SNYDER  
Chemical Effect of Ultrasonic Waves: Oxidation of Potassium Iodide Solutions by Carbon Tetrachloride  
Journal of American Chemical Society 72(4): 1769–1775 (1950).
- 16 Anbar, M. und I., Pecht  
On the Sonochemical Formation of Hydrogen Peroxide in Water  
Journal of Physical Chemistry 68(2): 352-355 (1964).
- 17 MORISON, K.R. und C.A. HUTCHINSON  
Limitations of the Weissler reaction as a model reaction for measuring the efficiency of hydrodynamic cavitation  
Ultrasonics Sonochemistry 16(1): 176–183 (2009).
- 18 SUSLICK, K. S., MDLELENI, M. M., RIES J. T.  
Chemistry Induced by Hydrodynamic Cavitation.  
J. Am. Chem. Soc. 119(39): 9303-9304 (1997)
- 19 C.E. BRENNEN  
Cavitation and Bubble Dynamics  
Oxford University Press 1995, ISBN 0-19-509409-3. S-34.
- 20 AURET, J.G.; DAMM, O.F.R.A.; Wright, G.J. und F.P.A. ROBINSON  
The influence of water air content on cavitation erosion in distilled water  
Tribology International 26(6):431-433 (1993).
- 21 WENNINGER, K.R.; CAMARA, C.G. und S.J. PUTTERMANN  
Energy Focusing in a Converging Fluid Flow: Implications for Sonoluminescence  
Physical Review Letter 83(10): 2081-2084 (1999).
- 22 R.S. SETH  
The importance of fibre straightness for pulp strength  
Pulp & Paper Canada 107(1): 34-42 (2006).
- 23 XILING, Z.; RETULAINEN, E.; HEINEMANN, S. UND S. FU  
Fibre deformations induced by different mechanical treatments and their effect on zero-span strength.  
Nordic Pulp and Paper Research Journal 27(2): 335-342 (2012).
- 24 T., TYRALSKA und A., BIEL-TYRALSKA  
The use of ultrasonic and hydrodynamic cavitation for treatment of mixed office waste  
Wochenblatt für die Papierfarikation 6(1):6-10 (2009).



[www.ptspaper.de](http://www.ptspaper.de)

**Papiertechnische Stiftung**

Heßstraße 134 · 80797 München · Telefon +49 (0)89-12146-0 · Telefax +49 (0)89-12146-36 · Mail [info@ptspaper.de](mailto:info@ptspaper.de)

Pirnaer Straße 37 · 01809 Heidenau · Telefon +49 (0)3529-551-60 · Telefax +49 (0)3529-551-899 · Mail [info@ptspaper.de](mailto:info@ptspaper.de)