

INFOR-Projekt Nr. 190

**Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit und
Verbesserung der Papiereigenschaften durch
optimierte Ausschussaufbereitung mittels
Kavitationsbehandlung**

Schlussbericht

November 2016

Papiertechnische Stiftung – PTS
Heidenau

Hochschule München
Fakultät 05 – Papiertechnik

TU Dresden
Professur für Papiertechnik

Prof. Dr. Frank Miletzky

Projektbearbeiter:
Dipl.-Ing. Lutz Hamann
Dr.-Ing. Tiemo Arndt

Prof. Dr. Stephan Kleemann
Dipl.-Ing. Anke Lind

Prof. Dr. Harald Großmann
Dr.-Ing. Roland Zelm

INFOR-Projekt Nr. 190

**Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit und
Verbesserung der Papiereigenschaften
durch optimierte Ausschussaufbereitung
mittels Kavitationsbehandlung**

Kurztitel: Ausschussaufbereitung Kavitation

INFOR-Projekt Nr. 190

**Erhöhung der Maschinenverfügbarkeit und
Verbesserung der Papiereigenschaften
durch optimierte Ausschussaufbereitung
mittels Kavitationsbehandlung**

Laufzeit: 01.07.2015 - 30.09.2016

Forschungsstelle 1:	Papiertechnische Stiftung (PTS), Heidenau Dipl.-Ing. Lutz Hamann, Dr.-Ing. Tiemo Arndt
Forschungsstelle 2:	Hochschule München, Fakultät 05 - Papiertechnik Dipl.-Ing. Anke Lind, Prof. Dr. Stephan Kleemann
Forschungsstelle 3:	TU Dresden, Professur für Papiertechnik Dr.-Ing. Roland Zelm, Prof. Dr. Harald Großmann
Projektbegleiter:	Dr. Ingo Gronde, Schoeller Technocell GmbH & Co. KG Peter Schwarz, Sappi Alfeld GmbH Dr. Thomas Pfitzner, Stora Enso Publication Paper

Heidenau/München, November 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Ausgangssituation bei Antragstellung	6
3	Zielstellung des Projektes.....	8
4	Vorgehen und Lösungsweg.....	8
5	Material, Geräte und Methoden	10
6	Ergebnisse	17
6.1	AP 1: Auswahl von Stoffströmen und Festlegung der Zielparameter	17
6.2	AP 2: Behandlung mittels hydrodynamischer Kavitation (Labor)	21
6.3	AP 3: Behandlung mittels akustischer Kavitation (Labor)	25
6.4	AP 5: Untersuchung zur industriellen Nutzung von Kavitationseffekten anhand von zwei Stoffsystemen (Technikum)	32
6.5	AP 6: Vergleichende Bewertung und Berichterstellung.....	38
7	Zusammenfassung	43

1 Zusammenfassung

Projektziel Zielstellung des Forschungsvorhabens war die verbesserte Aufbereitung von Ausschuss an der Papiermaschine.

Das technische und wirtschaftliche Potenzial von akustischer und hydrodynamischer Kavitation zur Ausschussaufbereitung sollte vergleichend untersucht und bewertet werden.

Zielgruppen

Tabelle 1: Zielgruppe(n) der Projektergebnisse und Grad der Nutzbarkeit

Grad der Nutzbarkeit in verschiedenen Branchenbereichen	1	2	3	4	5 stärkste Nutzbarkeit
Graphische Papiere					
Verpackungspapiere					
Hygienepapiere					
Spezialpapiere					

Lösungsweg

In Abstimmung mit den Projektbegleitern wurden die Arbeiten auf den Schwerpunkt „Auflösung nassfester Ausschuss“ konzentriert. Daneben wurde untersucht, ob optische Aufheller durch Kavitationseffekte von den Fasern abgelöst und durch eine nachfolgende Filtration reduziert werden können.

In der ersten Projekthälfte (AP1-4) erfolgten die Untersuchungen zur definierten Vorzerfaserung und ein Technologievergleich zwischen akustischer und hydrodynamischer Kavitation im Labormaßstab. Die weiteren Projektarbeiten (AP 5-6) dienen der Maßstabsvergrößerung, der Ermittlung relevanter Benchmarkdaten als Vergleichsbasis und zur Gesamtbewertung der Eignung der Kavitationstechnologie für die Aufbereitung von Papiermaschinenausschuss.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Durch die Nutzung akustischer und hydrodynamischer Kavitation wurde eine signifikante Reduzierung des Stippengehaltes bei unterschiedlich nassfestem Ausschuss erreicht.

Dabei erwies sich die hydrodynamische Kavitation in einer Venturidüse als Energie effizienter als die akustische Kavitation mittels Ultraschall. Ein Vorteil der hydrodynamischen Kavitation ist die gleichbleibende Faserstoffbehandlung bei erhöhten Stoffdichten und die bessere Skalierbarkeit hinsichtlich größerer Volumenströme.

Der spezifische Energieeintrag der Kavitationsbehandlung lag über der Benchmarktechnologie „industrieller Entstipper“. Es wird insbesondere bei der hydrodynamischen Kavitation weiteres Potenzial zur Reduzierung des spezifischen Energieeintrages gesehen.

Eine Ablösung von optischem Aufheller vom Faserstoff wurde weder mit akustischer noch mit hydrodynamischer Kavitation erreicht. Unter den gewählten Betriebsbedingungen traten keine kavitationsbedingten Oxidationen des optischen Aufhellers auf.

**Förderung &
Danksagung**

Die Autoren danken dem Kuratorium für Forschung und Technik der Zellstoff- und Papierindustrie im VDP für die Förderung des INFOR-Projekts Nr. 190 im Jahr 2015/2016.

Ein besonderer Dank geht auch an die Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses (PBA) für die Diskussionsbereitschaft und die wertvollen Hinweise während der Projektbearbeitung.

2 Ausgangssituation bei Antragstellung

Ausgangssituation

Um die Kundenbedürfnisse zu befriedigen, sind Papierhersteller gezwungen, immer kleinere Losgrößen zu produzieren und gleichzeitig eine hohe Sortenvielfalt anzubieten. Die Papiersorten einer Maschine werden dabei in Teils unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt, wodurch es zusätzliche Einschränkungen in der Rohstoffauswahl und Aufbereitung gibt, da es aufgrund von Zertifizierungen, z.B. für den Lebensmitteleinsatz, erschwert ist, mehrere Sorten auf einer Anlage zeitnah zu produzieren.

Dies hat zur Folge, dass durch häufigen Sortenwechsel der intern anfallende Ausschussanteil stetig steigt, der oft nur genutzt werden kann, um abgestufte Qualitäten mit Preisabschlägen herzustellen. Ursächlich dafür sind die im Papier enthaltenen Additive, Strichbinder, optische Aufheller und andere Hilfsmittel, die notwendig sind, um die entsprechenden optischen Eigenschaften, Barriereigenschaften, Leimungsgrade oder Nassfestigkeiten zu erzielen. Diese führen bei hohem Einsatz von Ausschuss u.a. zu klebrigen Verunreinigungen, Schmutzpunkten im Papier oder zu vermehrten Abrissen

Anlass zur erfolgreichen Nutzung von Kavitationseffekten auf dem Gebiet Ausschussaufbereitung gaben mehrere teils industriefinanzierte Forschungsprojekte an der PTS, der Hochschule München und der TU Dresden, in den gezeigt werden konnte, dass bei minimalem Energieeinsatz Prozesse der Mahlung, Dispergierung, Druckfarbenablösung, Druckfarbenzerkleinerung deutlich vereinfacht werden können [1, 2, 3]. Bei Kavitation werden Mikrometer große Dampfblasen in Flüssigkeiten durch Druckspannungswechsel gebildet, die unter Freisetzung von Radikalen und lokalen Druckimpulsen und Turbulenz kollabieren. Zu unterscheiden sind dabei akustisch erzeugte Kavitation (Ultraschall) und hydrodynamische Kavitation (Venturi-Düse). In dem Vorhaben sollten hydrodynamische Kavitation inklusive Dampfunterstützung und akustische Kavitation vergleichend untersucht werden [4].

Stand der Technik zur Aufbereitung von Ausschuss an der Papiermaschine

Grundsätzlich wird zwischen Nassausschuss (aus Siebpartie, Pressenpartie) oder Trockenausschuss (aus Trockenpartie, Umrollung) unterschieden. So kommt die Wirksamkeit von Nassfestmitteln erst im Trockenausschuss zum Tragen, da die Vernetzungsreaktion dieses Additivs erst in der Trockenpartie der Papiermaschine erfolgt. Die Herausforderungen bei der Aufbereitung von Papiermaschinenausschuss können wie folgt zusammengefasst werden:

- vollständige / gleichmäßige Zerfaserung auch bei hohen temporär anfallenden Mengen
- bei hochgestrichenen Papieren Zerkleinerung von Strichgrieß und ggf. Vermeidung einer Bildung von White-Pitch
- bei gefärbten Papieren Entfärbung oder Zwischenlagerung
- bei Papieren mit optischem Aufheller, Oxidation oder Zwischenlagerung
- bei nassfestem Ausschuss Zerfaserung bis zur Stippenfreiheit

Die Aufbereitung erfolgt in der Regel mechanisch unter Nutzung unterschiedlich starker Scherkräfte im Pulper, Entstipper und Disperger. Die Auflösung von nassfestem oder laminiertem Ausschuss kann bei Bedarf durch erhöhte Temperaturen und spezifisch wirkende Additive forciert werden.

Problemstellung

Die Problemstellung leitet sich aus der Tatsache ab, dass die Nutzung von Kavitationseffekten für die Aufbereitung von internen Stoffströmen durchaus ein hohes Potenzial aufweist. Jedoch sind die stofflichen Zusammensetzungen und die gewünschten Anforderungen, teilweise so unterschiedlich, dass entsprechend der Zielstellung der Behandlung eine Anpassung bzw. die richtige Auswahl der Technologie erfolgen muss.

Grundsätzlich muss daneben geprüft werden, welche Technologie unter Berücksichtigung des Durchsatzes, der Investitions-, Betriebs- und Instandhaltungskosten im Vergleich zu den erreichbaren Effekten wirtschaftlich betrieben werden kann.

Diese können teilweise erheblich voneinander abweichen. Es ist dabei generell zwischen hydrodynamisch erzeugter Kavitation (Venturi-Düsen oder Lochplatten, wobei Lochplatten wenig geeignet scheinen) und akustischer Kavitation (Ultraschall mittels Stabschwinger oder Durchflusszellen) zu unterscheiden (Abb. 1).

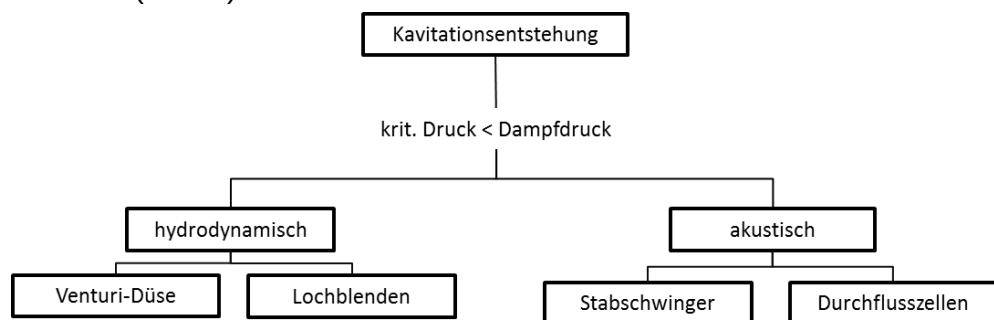


Abb. 1: Mögliche Anlagen zur Nutzung von Kavitationseffekten in der Industrie

Diese können für sich genommen oder mit Unterstützung durch Dampf oder mittels Oxidationsmitteln Energie- und Massentransport in Stoffsystemen beschleunigen oder radikalisch initiierte Reaktionen katalysieren.

Venturi-Düsen haben dabei den Vorteil, dass sie einen sehr hohen Durchsatz bei minimalen Investitionskosten besitzen und vor allem Turbulenzeffekte und die immens hohe Bildungsrate von implodierenden Dampf-/Gasblasen über mehr oder weniger Zerkleinerungsvorgänge unerwünschte Bestandteile im Stoffstrom abbauen [5, 6]. Diese Vorgänge können zusätzlich durch Dampfeinspeisung verbessert werden, da ein gesteuertes Blasenwachstum und deren Zerfall erfolgen kann und nicht zusätzlich Energie für eine homogene Keimbildung von der flüssigen in die dampfförmige Phase notwendig ist [7]. Um radikalisch katalysierte Oxidationsprozesse einzuleiten, etwa für den Abbau von optischen Aufhellern kann zusätzlich z.B. Ozon zugeführt werden, wobei die Kavitation einerseits zu einer verbesserten Oberflächenwirkung führt und andererseits durch gebildete OH-Radikale Oxidationsprozesse katalysiert werden [8].

Gleiche Möglichkeiten kann man auch bei akustischer Kavitation nutzen, auch wenn die Investitions- und Betriebskosten im Vergleich zu Venturi-Düsen sehr hoch sind. Dennoch kann es sinnvoll sein, akustische Kavitation einzusetzen, wenn man tatsächlich sehr hohe Energiedichten benötigt. Die Problemstellung ist somit, dass bisher nicht bekannt ist, welche Verfahrenstechnik der Kavitationsbehandlung für die jeweilige Verfahrensaufgabe unter den gegebenen Randbedingungen am geeignetsten ist.

3 Zielstellung des Projektes

Projektziel

Zielstellung des Forschungsvorhabens war es, die gebundenen und ungebundenen Binder und Additive im Ausschussstrom einer Papierfabrik mittels hydrodynamischer Kavitation abzubauen, um dadurch Ablagerungen und Abrisse zu minimieren, die Anlagenverfügbarkeit zu erhöhen und letztendlich stabilere Papierqualitäten zu produzieren.

Anhand einer vergleichenden Bewertung von akustischer Kavitation und hydrodynamischer Kavitation sollen Aussagen über den wirtschaftlichen Einsatz der einzelnen Technologien getroffen werden, um künftige Investitionsentscheidungen zu erleichtern.

4 Vorgehen und Lösungsweg

Übersicht Lösungsweg

Eine Übersicht der Arbeitspakete ist in Abb. 2 dargestellt. In den Arbeitspaketen 2 und 3 ist die gesamte Bandbreite der generell möglichen Technologieoptionen dargestellt. Für den Einsatz hochreaktiver Oxidationsmittel wie Ozon mit der für signifikante Wirkungen am optischen Aufheller erforderlichen Dosiermenge ist derzeit an den beteiligten Forschungseinrichtungen keine Technologie vorhanden. Daher wurden im Projekt keine Versuche mit Oxidationsmitteln durchgeführt.

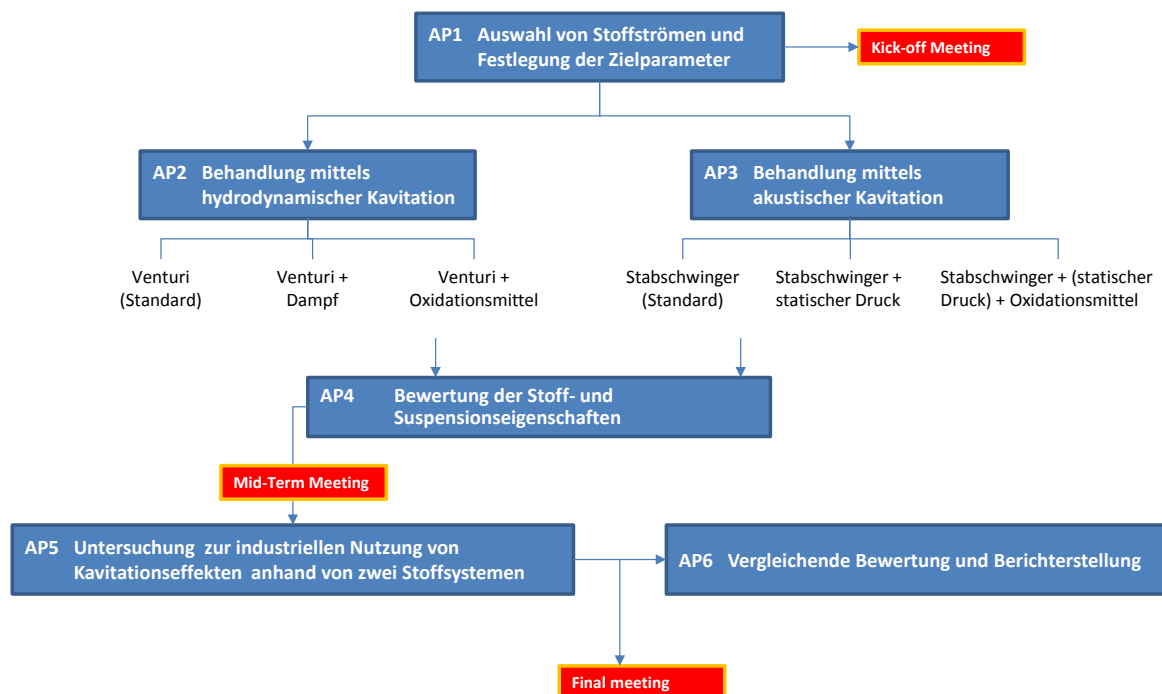


Abb. 2: Lösungsweg

**Arbeitspakete
im Überblick**

Im Folgenden sind alle wesentlichen Inhalte der Arbeitspakete in einer Übersicht zusammengestellt:

Arbeitspaket 1: Auswahl von Stoffströmen und Festlegung der Zielparameter

- Identifizierung relevanter Stoffströme bei den Projektbegleitern
- Bereitstellung ausreichender Stoffmengen durch die Projektbegleiter
- Festlegung der Substanzen/Additive, die inaktiviert werden sollen
- Festlegung der Zielparameter für die Bewertung der Effizienz der Ausschussaufbereitung
- Entwurf der zu nutzenden Anlagenkonfigurationen zur Kavitationsbehandlung, akustisch und hydrodynamisch
- definierte Vorzerfaserung der ausgewählten Faserstoffe

Arbeitspaket 2: Behandlung mittels hydrodynamischer Kavitation (Labor)

- Bereitstellung der unterschiedlichen Ausgangsstoffe
- Faserstoffbehandlung in der Kavitationsdüse (Reijektordüse) der Hochschule München
- Variation der Versuchsparameter: Druck, Temperatur, Durchsatz, Dauer

Arbeitspaket 3: Behandlung mittels akustischer Kavitation (Labor)

- Bereitstellung der unterschiedlichen Ausgangsstoffe
- Faserstoffbehandlung in der Ultraschall-Durchflusszelle der PTS (Stabsonotrode; 0,1 l Reaktorvolumen)
- Variation der Versuchsparameter: Druck, Feststoffgehalt, Temperatur, Dauer, Generatorleistung/Amplitude

Arbeitspaket 4: Bewertung der Stoff- und Suspensionseigenschaften

- Stippengehalt nach BRECHT-HOLL
- Herstellung Ansichtsblätter im RK-Blattbildner und Digitalisierung
- Weißgrad mit/ohne UV-Anteil zur Detektierung des Gehaltes optischer Aufheller
- Datenaufbereitung und Datendokumentation

Arbeitspaket 5: Untersuchung zur industriellen Nutzung von Kavitationseffekten anhand von zwei Stoffsystemen (Technikum)

- Festlegung der Stoffsysteme
- Versuche zur Maßstabsvergrößerung im Technikum der PTS
- Anwendung eines Ultraschall-Plattenschwingers im Technikum der PTS (13 l Reaktorvolumen)
- Anwendung der Technikums-Venturidüse der PTS

Arbeitspaket 6: Vergleichende Bewertung und Berichterstellung

- Vergleich akustischer und hydrodynamischer Kavitationwirkung
- Vergleich zum Benchmark
- technologisches und wirtschaftliches Einsatzpotenzial
- Berichterstellung

5 Material, Geräte und Methoden

Zerfaserung kleintechnisch

Für die Zerfaserung der Papiermuster wurden die folgenden Aggregate verwendet:



Abb. 3: 20l-Technikumpulper PTS (oben) und Pulper der Hochschule München (unten)

**Zerfaserung im
Labor**

Für die Zerfaserung im Labormaßstab kam der Zellcheming-Standard-Desintegrator mit 2l Füllvolumen zum Einsatz.



Abb. 4: Labor-Standard-Desintegrator

**Venturidüse der
Hochschule
München**

Das Konzept der an der Hochschule München vorhandenen Düsenanlage basiert auf einem Patent der Firma Reiflock Abwassertechnik GmbH Baden-Baden („Verfahren zur Behandlung von Brauchwasser bei der Papierherstellung“).

In verschiedenen gemeinsamen Forschungsprojekten der Firma Reiflock und der Hochschule München wurde eine hygienisierende Wirkung auf Abwässer und Schlämme durch die Behandlung in der Düse, im Folgenden Reijektor-Düse genannt, nachgewiesen. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Reduktion von Hefen und Pilzen am Beispiel eines Schlamms aus der Nachklärung der Kläranlage einer Papierfabrik.

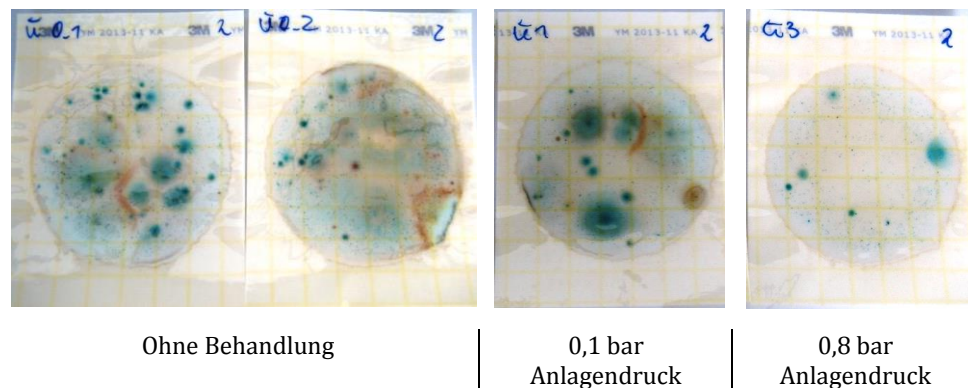


Abb. 5: Bestimmung von Hefen und Pilzen eines Schlamms aus der Kläranlage einer Papierfabrik ohne und mit Behandlung in der Reijektor-Düse bei ca. 48°C und verschiedenen Anlagendrücken [9]

Zur Behandlung in der Reijektor-Düse wird das zu behandelnde Medium (Abwasser, Faserstoffsuspension, Schlamm,...) mittels einer Exzenter-schneckenpumpe in die Reijektor-Düse gefördert. Um 90° versetzt wird Dampf aus einem Dampferzeuger in die Reijektor-Düse geführt und vermischt sich hier mit dem Medium. Das Medium-Dampf-Gemisch fließt dann in der Einströmrichtung des Dampfes aus der Düse heraus.

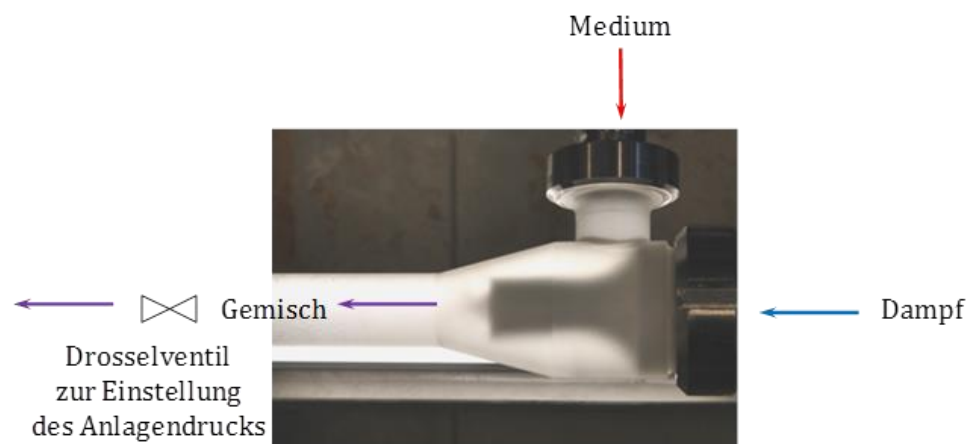


Abb. 6: Einblick in die Reijektor-Düse (Draufsicht)

Betriebsparameter der Reijektor-Düse

Für die Versuchsdurchführung können an der Reijektor-Düse der Hochschule München die folgenden drei Größen variiert werden:

- der Volumenstrom $\dot{V}$ an Medium, der über die Pumpendrehzahl geregelt wird (maximaler Volumenstrom 200 l/h)
- die Mischtemperatur T (Austrittstemperatur des Medium-Dampf-Gemisches), die über die zugeführte Dampfmenge geregelt wird
- der so genannte Anlagendruck p, der sich über eine Drosselung des Mediumausflusses im Inneren der Reijektor-Düse einstellt

Grundlegende Untersuchungen in vorangegangenen Forschungsprojekten haben gezeigt, dass alle drei Größen einen Einfluss auf die Mediumsbeschaffenheit nach der Behandlung ausüben.

In einer früher verwendeten größeren Versuchsanlage bei einem Volumenstrom von 400 l/h und einer relativ geringen Dampfmenge (Temperaturerhöhung des Mediums um 10 K von 40°C auf 50°C) kam es zu eher wenigen, dafür aber kräftigen „Dampfstößen“. Entsprechende Versuche mit den im Normalfall verwendeten Reijektor-Düsen aus Edelstahl zeigten sich durch ein lautes, relativ ungleichmäßiges „Knistern“ aus. Eine Erhöhung der Dampfmenge und damit eine Erhöhung der Mediumtemperatur führte zu deutlich mehr, dafür aber weniger intensiven Dampfstößen (in Edelstahl-Reijektor-Düsen ein durchgehendes, weniger lautes aber konstantes „Knistern“). Bei sehr hohen Durchflussraten - im betrachteten Beispiel 1.200 l/h - wurden zwar deutlich mehr, jedoch in der Intensität sehr geringe Dampfstöße erzielt. Ein solcher Zustand zeigte ein eher leises, sehr konstantes „Knistern“.

Abgeschlossene Forschungsprojekte haben gezeigt, dass an der Anlage der Hochschule München

- bei hohen Anlagendrücken
- hohen Dampfmenngen und damit einer relativ hohen Mischtemperatur

die besten Ergebnisse z.B. hinsichtlich der Hygienisierung von Abwässern erreicht wurden. Bei den mit den oben genannten Einstellungen gefahrenen Versuchen traten jeweils laute, deutlich vernehmbare „Knister“-Geräusche, wie sie für Kavitationseffekte bekannt sind, auf, so dass es hier vermutlich zu relativ hohen kavitationsnahen Kräften in der Reijektordüse kommt.

Weitere Untersuchungen zum Anlagendruck zeigten, dass - entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der Abhängigkeit der Dampftemperatur vom Dampfdruck - bei einem Anlagendruck von 0 bar (d.h. vollständig geöffnetem Drosselventil bzw. ca. 1 bar absolutem Druck) die Dampftemperatur bei etwa 100°C liegt. Die Erhöhung des Anlagendrucks auf etwa 1 bar (bzw. 2 bar absolutem Druck) durch die Schließung des Drosselventils entspricht einer Temperaturerhöhung des Dampfes auf 120°C.

Die zugeführte Dampfmenge kann an der Anlage der Hochschule München nicht gemessen werden. Untersuchungen zeigten jedoch, dass für die Erhitzung des Mediums um etwa 15 K ca. 3% Dampf, bei einer Erwärmung um etwa 25 K etwa 6% Dampf (jeweils bezogen auf die Mediumsmenge) notwendig sind.

**Venturidüse,
Technikum PTS**

Die Kavitationsdüse im Technikum der PTS hat am engsten Querschnitt einen Durchmesser von 8 mm. Die Anlage wird in der Regel bei einem maximalen Zulaufdruck von 6 bar betrieben, dabei fördert die angeschlossene Pumpe einen Volumenstrom von 115 l/min (7,2 m³/h). Bei Bedarf sind auch höhere Zulaufdrücke möglich.

Im Vorlagebehälter wurden max. 100 l Stoffsuspension vorgelegt und im Kreislaufbetrieb durch die Kavitationsdüse gepumpt. Bei einem Volumenstrom von 45 l/min, korrespondierend mit einer Strömungsgeschwindigkeit im engsten Düsenquerschnitt von 14 m/s, traten die ersten Kavitationsgeräusche auf. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit, desto größer ist auch die Kavitationsintensität. Die Strömungsgeschwindigkeit im engsten Düsenquerschnitt im Versuchsbetrieb lag bei 33-37 m/s.

Zur Unterstützung der Kavitationswirkung kann der Stoffstrom unmittelbar vor dem Eintritt in die Kavitationsdüse mit Dampf beheizt werden.

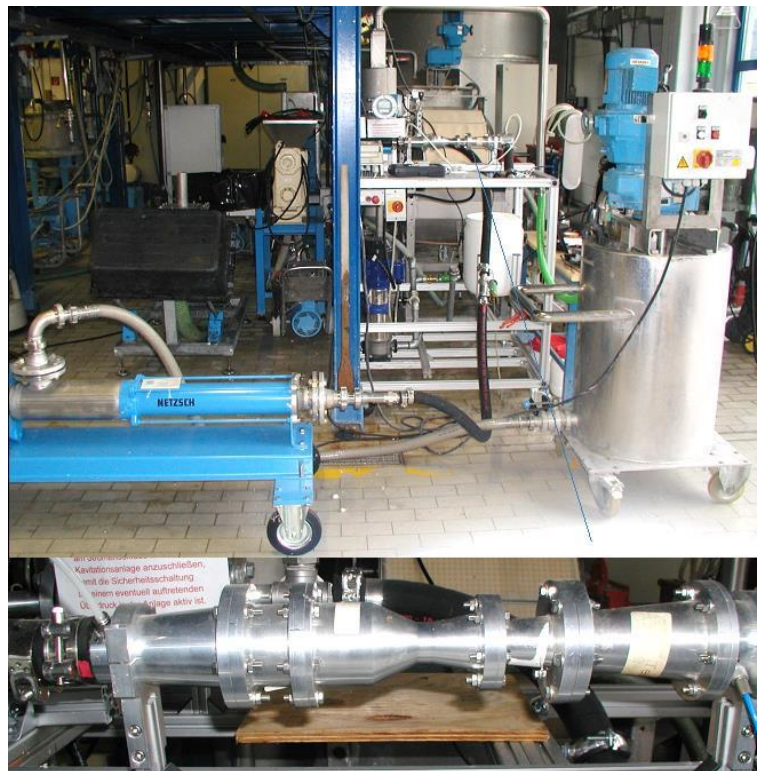


Abb. 7: Gesamtanlage (oben) und Kavitationsdüse im Detail (unten)

**Ultraschall-
Laborreaktor PTS**

Die Labor-Ultraschallanlage der PTS ist mit einer Stabsonotrode mit einer Abstrahlfläche von ca. 8 cm² ausgerüstet. Das Volumen der Reaktorzelle beträgt 0,1 l, es ist ein maximaler Anlagendruck von 5 bar einstellbar. Variablen Einflussgrößen auf die Kavitationsintensität sind Schalleistungsdichte/Amplitude, Druck, Durchflussrate, Beschallungszeit, Stoffdichte und Temperatur. Die Ultraschallgesamtleistung betrug maximal 0,85 kW.



Abb. 8: Labor-Ultraschallanlage mit Ultraschall-Stabsonotrode (links)

**Ultraschall-
Technikumsreak-
tor PTS**

Im Technikum der PTS wurde ein Ultraschall-Plattenschwinger der Fa. Weber-Entec für die Versuche genutzt. Die Ultraschall-Schwingelemente sind auf der Reaktorwand aufgeklebt, versetzen die Gehäusewand in hochfrequente Schwingungen und das Kavitationsfeld verläuft radial nach Innen in Richtung Rohrmitte. Das Volumen der Durchflusszelle betrug 13 l, die eingetragene Ultraschall-Gesamtleistung aller Schwingelemente zusammen betrug 2,0 kW. Der Ultraschallreaktor wurde in die Anlagenperipherie der Kavitationsdüse integriert.

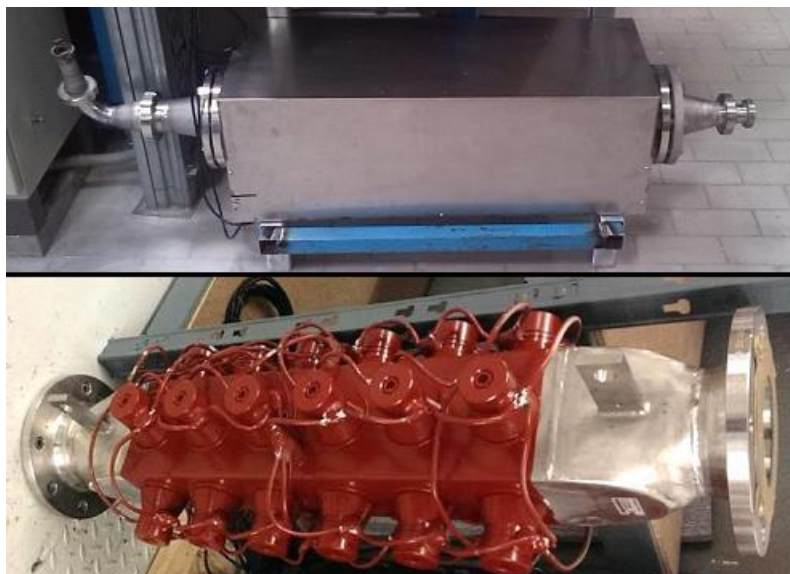


Abb. 9: Ultraschallanlage im Technikum der PTS

Benchmark: Entstipper, Technikum PTS

Für den Anwendungsfall „bestmögliche Zerkleinerung nassfester Ausschuss“ stellt ein industrieller Entstipper den Stand der Technik und damit die Benchmarktechnologie dar. Für die Vergleichsversuche wurde der Technikumsentstipper der PTS eingesetzt. Der Durchsatz lag bei 50 l/min Stoffsuspension, es wurde ein Feststoffgehalt von 40 g/l eingestellt.

Die Betriebsbedingungen bezüglich Rotorumfangsgeschwindigkeit, Stoffdichte und spezifischer Energieeintrag je Durchlauf lagen im Bereich großtechnischer Anlagen in Papierfabriken.



Abb. 10: Technikumsentstipper der PTS

Zur Aufbereitung schwer zerkleinerbarer Papiere wird die Auflöseaufgabe in der Regel zwischen Pulper und Entstipper geteilt. Im Pulper erfolgt die Benetzung und Grobzerkleinerung in Stippen und im nachfolgenden Entstipper die weitergehende Zerlegung in Einzelfasern bis zu einem Reststippengehalt von ca. 2 % (5 %).

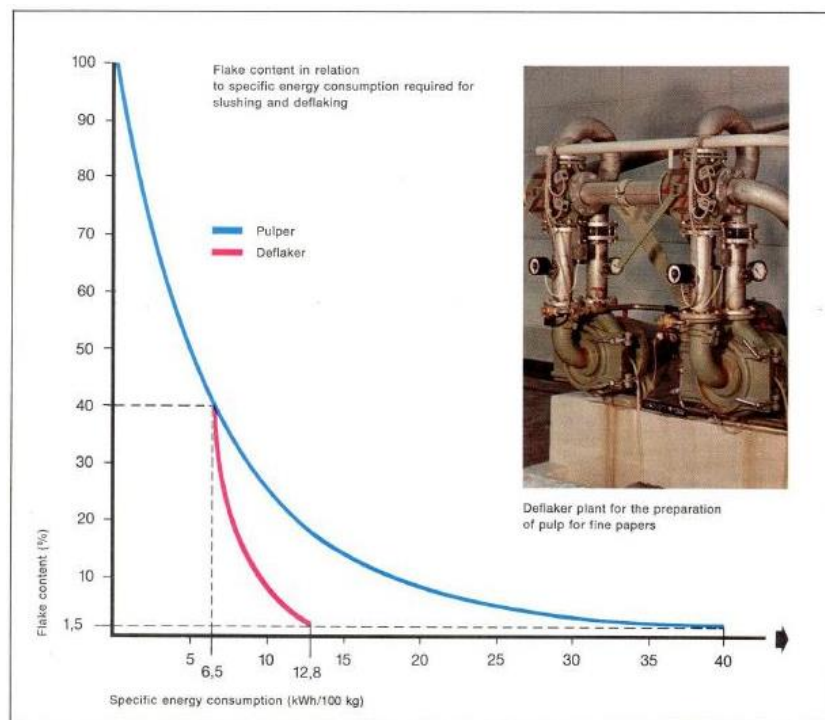


Abb. 11: Zerkleinerungskurven Pulper & Entstipper (Quelle: Escher-Wyss)

6 Ergebnisse

6.1 AP 1: Auswahl von Stoffströmen und Festlegung der Zielparameter

Materialauswahl In Absprache mit den Projektbegleitern wurden die folgenden Papiermuster für die Versuche ausgewählt:

Tabelle 2: ausgewählte Papiermuster

A	Tapetenrohpapier	Stora Enso	hochgeleimt, nassfest
B	Dekorpapier	Schoeller	nassfestes Vorimprägnat
C	OBA, Druckpapier	Sappi	optischer Aufheller im Papierstrich

Alle Muster wurden als Papierzuschnitte in die beteiligten Forschungsstellen geliefert.

Festlegung der Zielparameter

In Abstimmung mit den Projektbegleitern wurden die folgenden Parameter zur Beurteilung der Versuchsergebnisse hinsichtlich Faservereinzlung und Ablösung optischer Aufheller definiert:

- Stippengehalt nach BRECHT-HOLL mit 0,7 mm Lochplatte (Merkblatt V/18/62)
- Visualisierung und Vergleich ausgewählter Proben mittels Durchlicht
- Weißgrad mit/ohne UV-Anteil und Differenzbildung zur Bestimmung des Gehaltes an optischem Aufheller

Zur Bewertung betriebswirtschaftlicher Aspekte der untersuchten Verfahren wurde der spezifische Energieeintrag in kWh/t berechnet und für die vergleichende Bewertung herangezogen.

Desweiteren wurde festgelegt, dass die Kavitationsversuche von 2 unterschiedlichen Startniveaus bezüglich Stippengehalt beginnen sollten: 15 und 40%. Die dazu erforderlichen Zerfaserungszeiten der Pulper wurden aus den aufgenommenen Zerfaserungskurven errechnet.

Versuche zum Zerfaserungsverhalten

Zur Charakterisierung der Ausgangsmaterialien hinsichtlich Scherresistenz wurden Zerfaserungskurven in unterschiedlichen Pulpern aufgenommen. Auf der Basis dieser Versuche wurden die Ausgangsniveaus der Stippenghalte für die Kavitationsversuche festgelegt.

**Zerfaserungsergebnis,
HM**

Die Vorversuche bei einer Stoffdichte von 5 % zeigten, dass das eingesetzte Dekorpapier bei gleicher Aufschlagdauer im Pulper einen deutlich höheren Stippengehalt und damit eine deutlich höhere Nassfestigkeit aufwies.

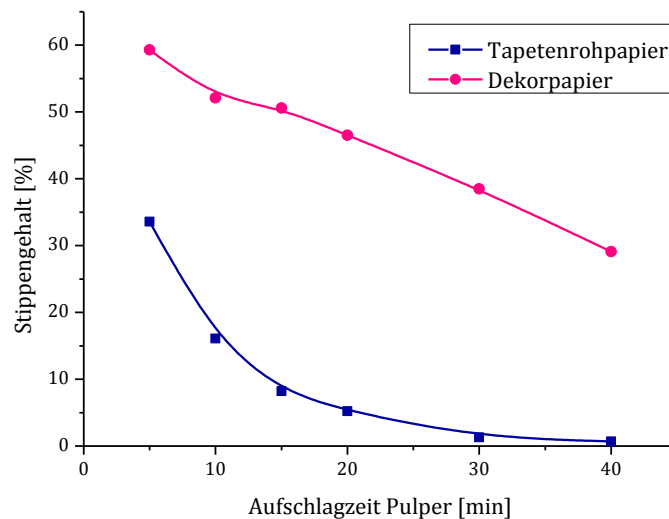


Abb. 12: Einfluss der Aufschlagzeit auf den Stippengehalt von zwei Papiersorten

Im Ergebnis dieser Vorversuche wurden folgende Aufschlagzeiten berechnet:

Tabelle 3: Berechnete Aufschlagzeiten zur Erzielung verschiedener Stippengehalte

	Ziel-Stippengehalt 40%	Ziel-Stippengehalt 15%
Tapetenrohpaper	3 min	11 min
Dekorpapier	27 min	-

Zerfaserung Labor- Standard- Desintegrator, PTS

Die Zerfaserung im Labor bestätigte die an der Hochschule München erhaltenen Trends beim Zerfaserungsverhalten. Das Dekorpapier wies mit Abstand den größten Zerfaserungswiderstand auf.

Eine Anhebung des pH-Wertes auf 11 wirkte sich positiv auf die Zerfaserungsgeschwindigkeit aus. Daher wurde in den weiteren Versuchen für den Anwendungsfall Dekorpapier für die Zerfaserung ein generell ein pH-Wert von 11 eingestellt, um das Startniveau von 40 % Stippengehalt nach dem Pulper zu erreichen. Ein Startniveau von 15 % war beim Dekorpapier ohne den Zusatz spezieller Additive zur Auflösung oder spezielle Zerfaserungsbedingungen wie erhöhte Stoffdichte, Temperaturen $> 70\text{ °C}$ und extrem lange Auflösezeiten nicht realisierbar.

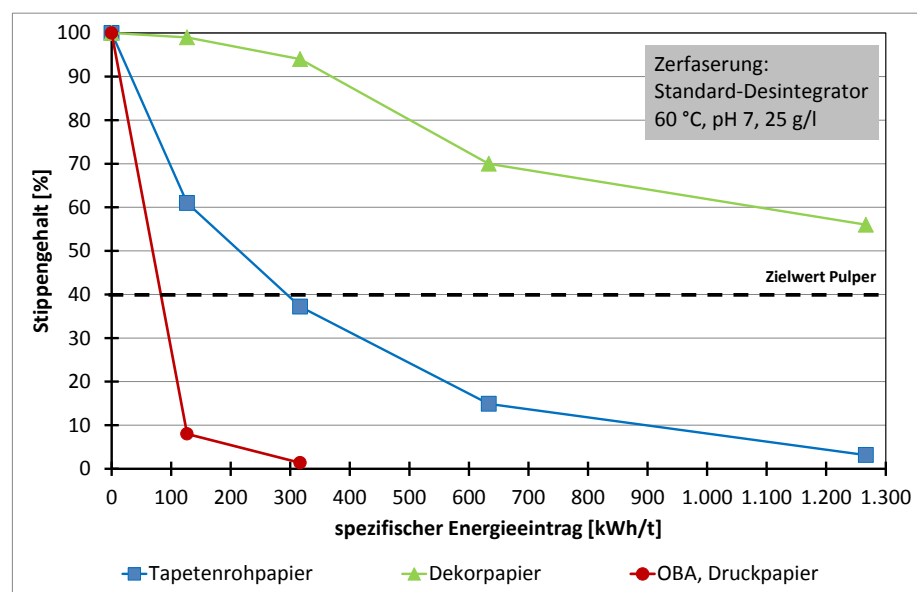


Abb. 13: Zerfaserungsergebnis bei pH 7

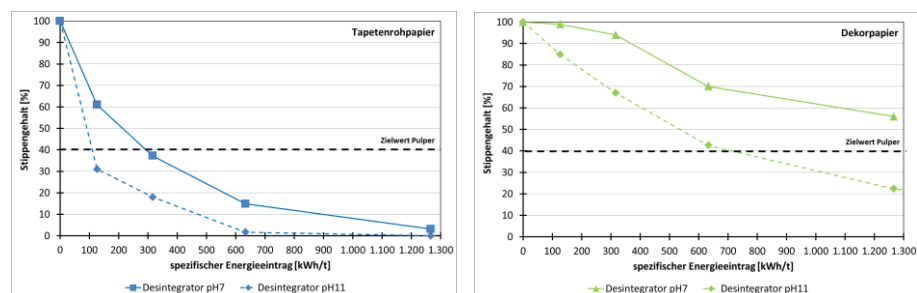


Abb. 14: Zerfaserungsergebnis bei pH 11, Tapetenrohpapier (links) und Dekorpapier

Zerfaserung, Technikumpulper, PTS

Die Zerfaserung im Technikumpulper zeigte die gleichen tendenziellen Unterschiede zwischen den Papiermustern. Das Dekorpapier war mit Abstand am schwersten zu zerfasern.

Der spezifische Energieeintrag war im Technikumpulper geringer als im Labor-Standard-Desintegrator. Die höhere Stoffdichte, der schärfere Rotor und das Vorhandensein von Prallblechen wirkten sich im Technikumpulper positiv auf das Zerfaserungsergebnis aus.

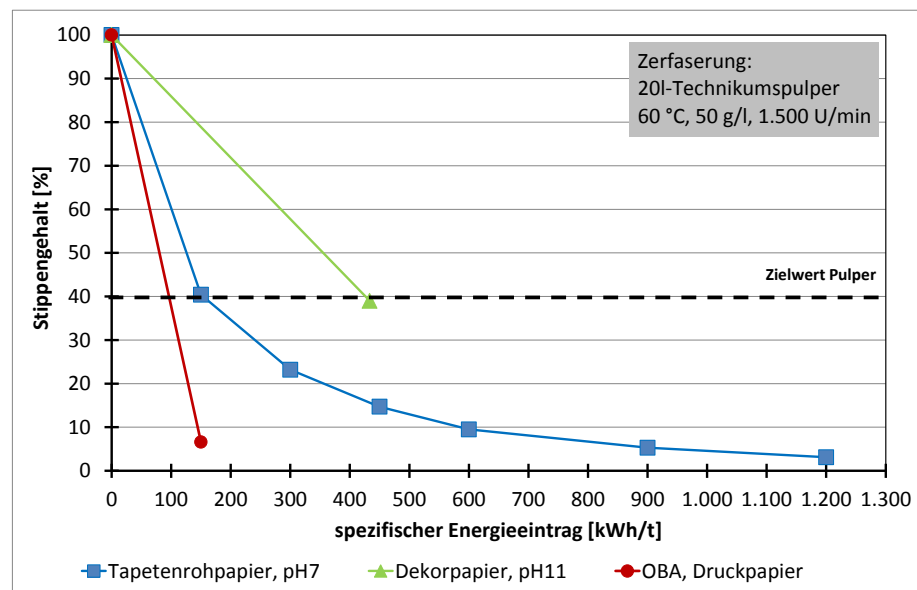


Abb. 15: Zerfaserungsergebnis im Technikumpulper

Fazit zum Zerfaserungsverhalten

Die für das Projekt berücksichtigten Papiermuster wiesen eine stark unterschiedliche Scherresistenz bei der Zerfaserung im Pulper auf. Damit konnte im Projekt eine große Spannbreite unterschiedlicher Ausgangsmaterialien für die Kavitationsversuche Berücksichtigung finden.

Das Dekorpapier konnte nur bei einem pH-Wert von 11 ausreichend zerfasert werden, wobei hier trotzdem ein sehr hoher spezifischer Energieeintrag von mehr als 400 kWh/t erforderlich war, um einen Startstippengehalt von 40 % für die Kavitationsversuche einzustellen.

6.2 AP 2: Behandlung mittels hydrodynamischer Kavitation (Labor)

Arbeitsprogramm

Entsprechend den Erkenntnissen der vorangegangenen Forschungsvorhaben [9; 10] wurde die folgende Versuchsmatrix für die Versuche mit der Reijektordüse gewählt:

1 Düsendurchgang

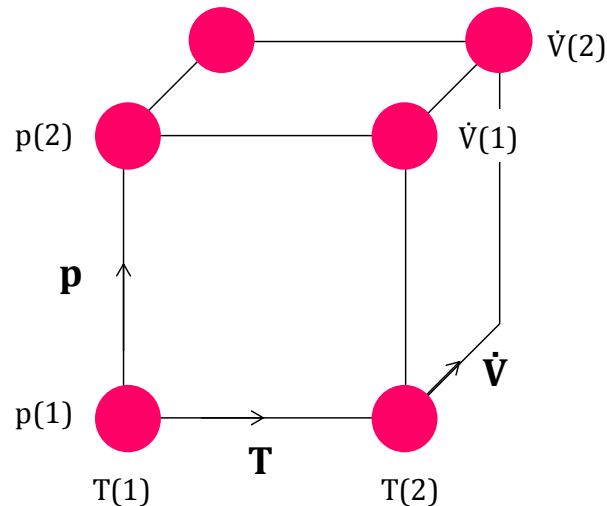


Abb. 16: Versuchsmatrix für die Durchführung der Untersuchungen

Dabei wurden, um möglichst vergleichbar zu den anderen Forschungsstellen zu sein, die folgenden Versuchsbedingungen gewählt:

- Stoffdichte ca. 1%
- Auslauftemperatur T T(1): 40°C T(2): 60°C
- Mediumsdurchfluss $\dot{V}$ $\dot{V}(1)$: ca. 90 l/h $\dot{V}(2)$: ca. 170 l/h

Der Anlagendruckbereich wurde so gewählt, dass für beide eingesetzten Papiersorten sowohl ohne als auch mit Drosselung des Mediumausgangsventils gearbeitet werden konnte. Bei längeren Fasern oder höherem Stippengehalt kommt es häufig vor, dass der reduzierte Mediumausgang verstopft. Ein kontinuierlicher Versuchsprozess ist in einem solchen Fall nicht möglich - daher musste der maximal mögliche Anlagendruck bei den Versuchen wie folgt angepasst werden (der Anlagendruck ohne Drosselung p(1) stellte sich jeweils auf Werte von ca. 0,02 ... 0,09 bar ein):

Tabelle 4: Versuchsübersicht hinsichtlich des möglichen hohen Anlagendruckes p(2)

	Papiersorte	Ziel-Stippengehalt [%]	Anlagendruck p(2) [bar]
Versuch 1	Tapetenroh papier	40	0,2 ... 0,6
Versuch 2	Tapetenroh papier	15	0,5 ... 0,6
Versuch 3	Dekorpapier	40	ca. 0,7

**Arbeitsprogramm
Kreislaufbetrieb**

Abweichend von der beschriebenen Versuchsmatrix wurde Versuch 4 durchgeführt. In diesem Versuch sollte ermittelt werden, welchen Einfluss ein mehrmaliger Durchfluss des Mediums durch die Reijektor-Düse hat. Dabei wurden die folgenden Bedingungen gewählt:

- Stoffdichte ca. 1%
- Papiersorte: Dekorpapier
- Mediumsdurchfluss $\dot{V}$ ca. 180 l/h (maximal mögliche Fördermenge)

Die weitere Versuchsdurchführung dieses Versuchs wird im Ergebnisteil beschrieben.

**Ergebnisse,
40 % Startstippengehalt**

Wie aus der folgenden Übersicht hervorgeht, konnte bei einem hohen Ausgangs-Stippengehalt von ca. 40% keine Reduzierung dieses Stippengehaltes durch die Behandlung in der Reijektor-Düse festgestellt werden.

Zusätzlich zeigten die Messwerte des Stippengehaltes eine relativ große Schwankungsbreite, was vor allem bei dem Tapetenrohpapier mit relativ langen Fasern auftritt. Diese Schwankungen können u.a. durch eine schon beschriebene leichte Verstopfung im Mediumsauslauf verursacht werden. Hierdurch ist es möglich, dass während der Probenahme unterschiedliche Mengen an Stippen entnommen werden. Beim Dekorpapier mit kürzeren Fasern waren die Schwankungen deutlich geringer.

Tapetenrohpapier	Dekorpapier
Stippengehalt vor den Versuchen: 46,9%	Stippengehalt vor den Versuchen: 39,9%
Stippengehalt nach Durchpumpen*: 48,5%	Stippengehalt nach Durchpumpen*: 41,5%
Stippengehalte als Versuchsmatrix (Angaben in %)	

*...dieser Versuchspunkt gibt den Stippengehalt nach dem Austritt aus der Reijektor-Düse an, die ohne Dampf und ohne Drosselung des Mediumaustritts betrieben wurde

Ergebnisse

15 % Startstippengehalt

Bei einem geringeren Ausgangs-Stippengehalt von ca. 15% zeigte sich im Vergleich zu höherem Stippengehalt von ca. 40% ein etwas anderes Bild. Die als Doppelbestimmung gemessenen Stippengehalte wichen deutlich weniger voneinander ab, so dass eine Unterscheidung des Stippengehaltes bei verschiedenen Versuchspunkten möglich war.

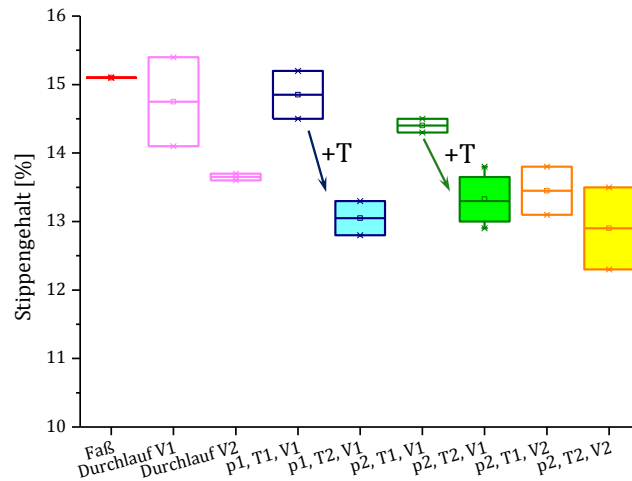


Abb. 17: Box-Diagramm zur Darstellung der Abweichung der einzelnen Messwerte voneinander (Doppelbestimmung bzw. im Fall von p2, T2, V1 als Doppelbestimmung mit zwei Probenahmen, d.h. mit 4 Messwerten)

Es deutete sich also an, dass z.B. durch eine Temperaturerhöhung eine Verringerung des Stippengehaltes möglich ist. Aus diesem Grund wurden die Daten der Versuche mittels statistischer Versuchsplanung ausgewertet.

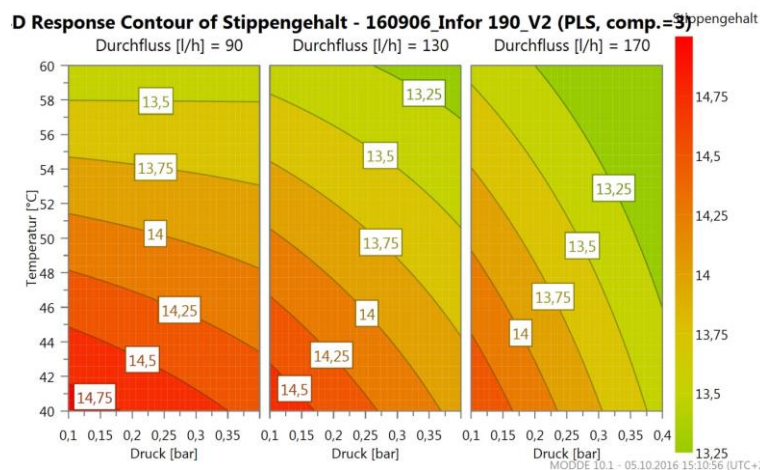


Abb. 18: Tendenz des Stippengehaltes bei Variation von Mediumtemperatur, Anlagendruck und Volumenstrom

Je mehr Dampf zugeführt wurde und je mehr das Drosselventil geschlossen war, umso geringer war der Stippengehalt des Stoffes. Insgesamt war die Verringerung des Stippengehaltes zwar mess- und reproduzierbar, mit maximal 2 %-Punkten von 15 auf 13 %- jedoch als insignifikant zu betrachten.

Ergebnisse, mehrmaliger Düsendurchlauf

Zu Beginn dieser Versuche wurde zunächst mit geringer Dampfzufuhr gearbeitet, um das Medium auf eine Temperatur von etwa 40°C zu erwärmen. Aus dem Volumenstrom der Pumpe und der vorbereiteten Stoffmenge von etwa 20 Litern wurde berechnet, dass dies etwa 2 Durchläufe bzw. 14 min dauerte. Durch die Dampfzufuhr kam es zu leichten „Knister“-Geräuschen in der Reijektor-Düse, was auf das Auftreten von kavitationsnahen Vorgängen hindeutet.

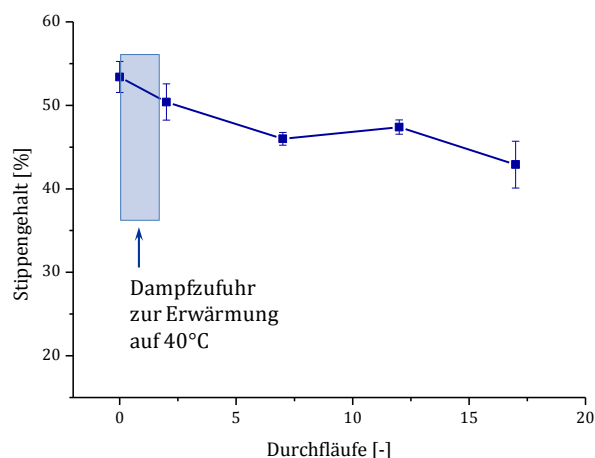


Abb. 19: Stippengehalt des Dekorpapiers bei mehrmaligem Durchlauf

Nachdem eine Temperatur von 39°C im Ein- und Auslauf des Mediums erreicht wurde, wurde die Dampfzufuhr soweit reduziert, dass das Medium weder abkühlte noch weiter erwärmt wurde. Durch diese sehr stark reduzierte Dampfzufuhr konnte kein „Knistern“ mehr wahrgenommen werden - in der Reijektordüse traten vermutlich keine kavitationsnahen Kräfte auf. In Abständen von jeweils 5 Durchgängen wurden nun Proben genommen und der Stippengehalt gemessen:

Tabelle 5: Anzahl der Durchläufe durch die Reijektor-Düse und dafür benötigte berechnete Zeitdauer; für die Zeit wurde die jeweils durch die Probenahme reduzierte durchzupumpende Stoffmenge einberechnet

Berechnete Durchläufe	Dauer [min]	
2	14	Durchläufe mit Dampfzufuhr zur Erwärmung
7 (2+5)	45	
12 (2+10)	73	
17 (2+15)	100	

Wie aus Abb. 19 ersichtlich ist, nahm der Stippengehalt durch das mehrmalige Durchlaufen durch die Reijektor-Düse kontinuierlich, jedoch nur in geringem Maße ab. Nach 15 Durchläufen durch die Düse bei konstanter Temperatur von ca. 40°C wurde der Stippengehalt um etwa 7,5 %-Punkte reduziert. Hier handelt es sich vermutlich eher um einen Temperatur-Zeit-Effekt und nicht um eine Kavitations-Wirkung der. Im Vergleich hierzu wurde eine ähnliche Reduzierung des Stippengehaltes durch Aufschlagen im Pulper in etwa 10 min erreicht.

Fazit

Bei den Versuchen zur Reduzierung des Stippengehaltes mit der an der Hochschule München vorhandenen Reijektor-Düse kam es teilweise zu einer geringfügigen Reduktion der Stippenanzahl.

Diese Reduktion ist jedoch nur sehr gering ausgeprägt, so dass daraus geschlossen werden kann, dass der Einsatz des Konzeptes für die Zielstellung der Reduktion des Stippengehaltes nicht geeignet ist.

Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse der Reijektor-Düse beim abschließenden Technologiebenchmark nicht berücksichtigt.

6.3 AP 3: Behandlung mittels akustischer Kavitation (Labor)

Arbeitsprogramm

Die folgende Übersicht zeigt alle Versuche mit der Labor-Ultraschallanlage der PTS. Die Variationsbreite der einzelnen Parameter ist in der jeweiligen Spalte farblich markiert.

Tabelle 6: Versuchsübersicht zur Ultraschallbehandlung im Labor

Nr.	Druck [bar]	Stippen-gehalt [%]	Feststoff-gehalt [g/l]	pH-Wert	Generator-leistung [%]	T [°C]	Dauer [min]	Faserstoff
1	0	15	20	7	90	32 -> 58	0...50	Tapetenrohpapier
2	2,5	15	20	7	90	30 -> 76	0...50	Tapetenrohpapier
3	5	15	20	7	90	30 -> 74	0...50	Tapetenrohpapier
4	0	15	10	7	90	33 -> 55	0...50	Tapetenrohpapier
5	2,5	15	10	7	90	33 -> 66	0...50	Tapetenrohpapier
6	5	15	10	7	90	39 -> 73	0...50	Tapetenrohpapier
7	2,5	15	10	7	0	36 -> 42	0...50	Tapetenrohpapier
8	2,5	15	10	7	45	37 -> 48	0...50	Tapetenrohpapier
9	0	15	10	7	90	11 -> 46	0...50	Tapetenrohpapier
10	0	40	10	7	90	33 -> 53	0...50	Tapetenrohpapier
11	0	15	10	11	90	33 -> 53	0...50	Tapetenrohpapier
12	0	15	10	11	90	33 -> 55	0...50	Dekorpapier
13	0	8	10	7	90	33 -> 51	0...50	Oba, Druckpapier

Einfluss des statischen Überdruckes

Der Einfluss des statischen Anlagendruckes, eingestellt mittels Druckluftzufuhr im Vorlagebehälter, wurde am Papiermuster Tapetenrohpaper untersucht. Mit steigendem Anlagendruck stieg der Energieverbrauch des Ultraschallgenerators zur Beibehaltung einer konstanten Schwingungsamplitude kontinuierlich an.

Dabei waren bei den beiden untersuchten Feststoffgehalten von 10 und 20 g/l die gleichen tendenziellen Veränderungen mit steigendem Anlagendruck festzustellen. Der spezifische Energieverbrauch bis zur Erreichung des Schwellwertes von 5 % Reststippengehalt lag bei mindestens 2.000 kWh/t.

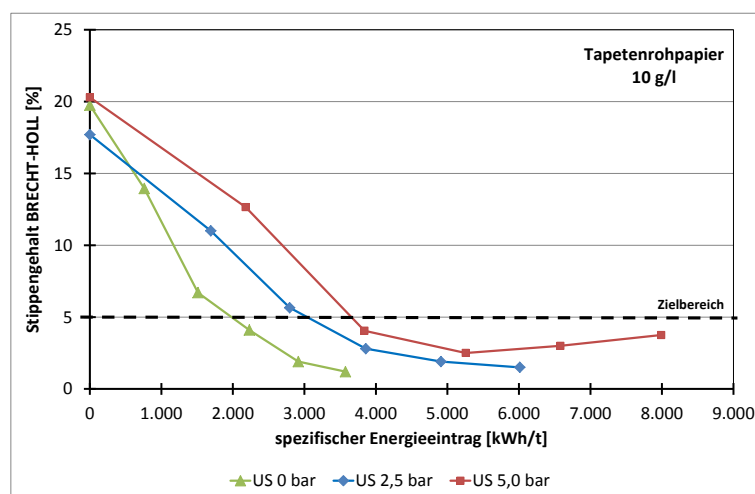


Abb. 20: Einfluss des statischen Anlagendruckes auf die Zerfaserung

Einfluss der Generatorleistung

Generell war der Anlagenbetrieb bei maximaler Generatorleistung von 90 % und damit maximaler Ultraschallamplitude die Energie effizienteste Verfahrensvariante.

Bei einer in allen Versuchen konstanten Gesamtdauer von 50 min konnte nur bei der höchsten Generatorleistung der Zielbereich bezüglich Reststippengehalt erreicht werden. Im Nullversuch wurde der Stoff ohne Ultraschall-Energieeintrag im Kreislauf gepumpt, hier war keine Veränderung im Stippengehalt sichtbar.

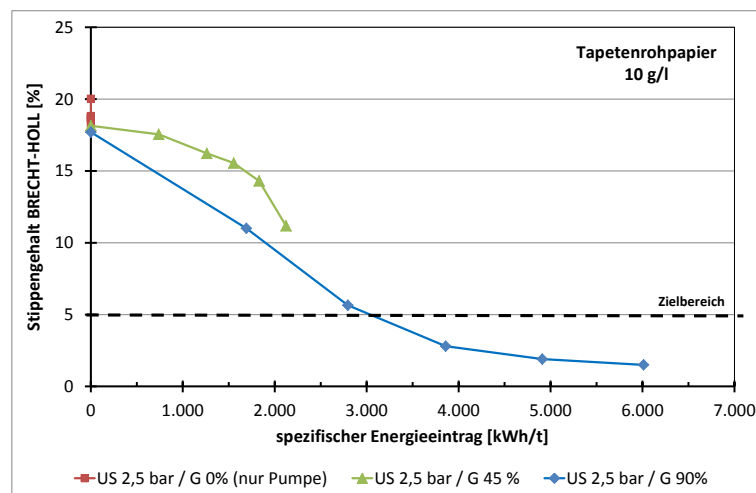


Abb. 21: Einfluss der Generatorleistung auf die Zerkleinerung

Einfluss des Feststoffgehaltes

Die Variation des Feststoffgehaltes brachte bei allen 3 untersuchten Druckniveaus (exemplarisch ist im Diagramm das niedrigste Druckniveau bei 0 bar dargestellt) keine energetischen Vorteile bei erhöhter Stoffdichte.

Ein gleichbleibender spezifischer Energieeintrag bedeutete hier demnach, dass bei der doppelten Stoffdichte entsprechend auch die doppelte Behandlungsdauer im Kreislaufbetrieb erforderlich war, um ein identisches Endniveau des Stippengehaltes zu erreichen. Die Ausbreitung des Ultraschalls bzw. das Fließverhalten der Stoffsuspension durch die geringen Anlagenquerschnitte hat sich bei zunehmender Stoffdichte verschlechtert.

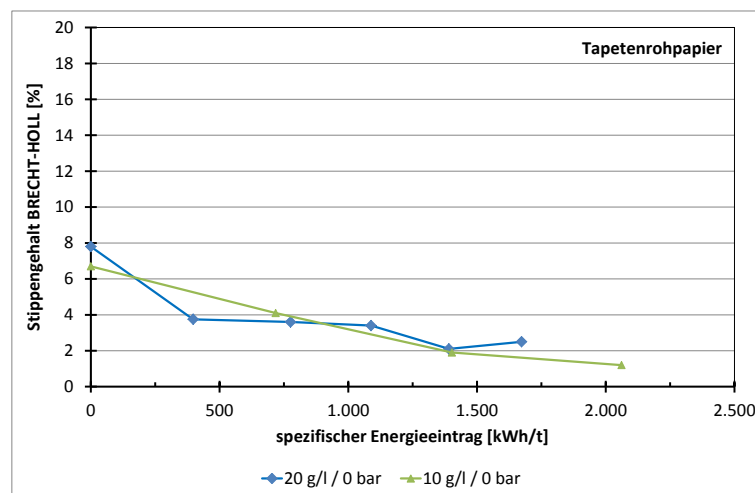


Abb. 22: Einfluss des Feststoffgehaltes auf die Zerfaserung

Einfluss des Start-Stippengehaltes

Bei einem auf 35 % nahezu verdoppelten Ausgangsstippengehalt zu Beginn der Ultraschallbehandlung wurde der Zielbereich nach 50 min Behandlungsdauer ebenfalls erreicht. Für ein vergleichbares Endniveau von 5 % Reststippen wurden dazu 2.750 kWh/t spezifischer Energieeintrag benötigt, also ca. 38 % mehr als bei einer Ausgangsstippenbeladung von 20 %.

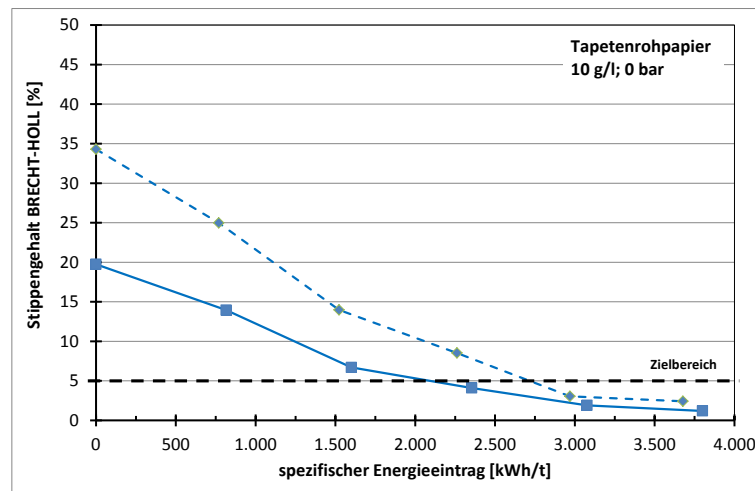


Abb. 23: Einfluss des Start-Stippengehaltes auf die Zerfaserung

Einfluss der Temperatur

Die Temperatur im Kreislauf der Ultraschall-Durchflusszelle hatte im untersuchten Bereich einen deutlichen Einfluss auf die Zerkleinerung der Stippen. Tendenziell erfolgte die Zerkleinerung der nassfesten Stippen bei erhöhter Temperatur schneller. So war der benötigte Energieeintrag bei erhöhter Temperatur und 5 % Reststippen um ca. 20 % verringert. Dieser eindeutige Temperatureffekt wird in der Regel auch im Pulper zur verbesserten Zerfaserung nassfester Papiere bei Temperaturen von mehr als 60 °C genutzt.

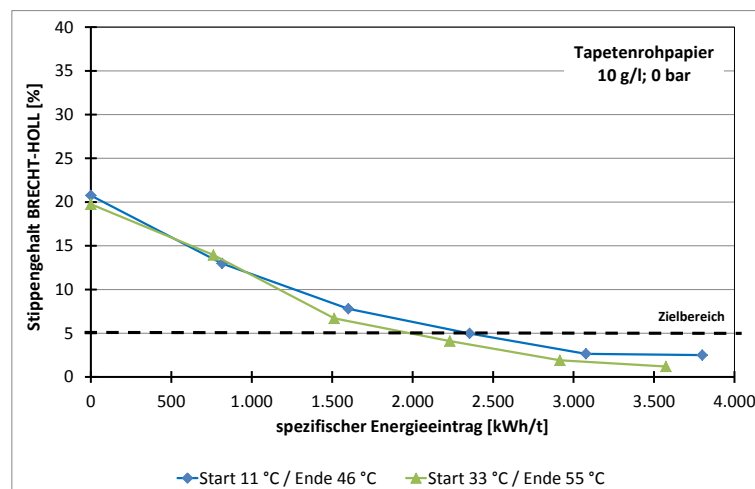


Abb. 24: Temperatureinfluss auf die Zerfaserung

Einfluss des Faserstoffes

Bei allen 3 Papiermustern wurde in der Ultraschallbehandlung in der Laborzelle eine signifikante Reduzierung des Stippengehaltes erzielt. Durch die Anhebung des pH-Wertes auf 11 beim stark nassfesten Dekorpapier konnte auch bei diesem Papiermuster eine starke Reduzierung des Reststippengehaltes realisiert werden. Beim nicht nassfesten Druckpapier war schon nach sehr kurzer Vorverfaserung im Pulper nur noch ein Stippengehalt von ca. 8 % vorhanden.

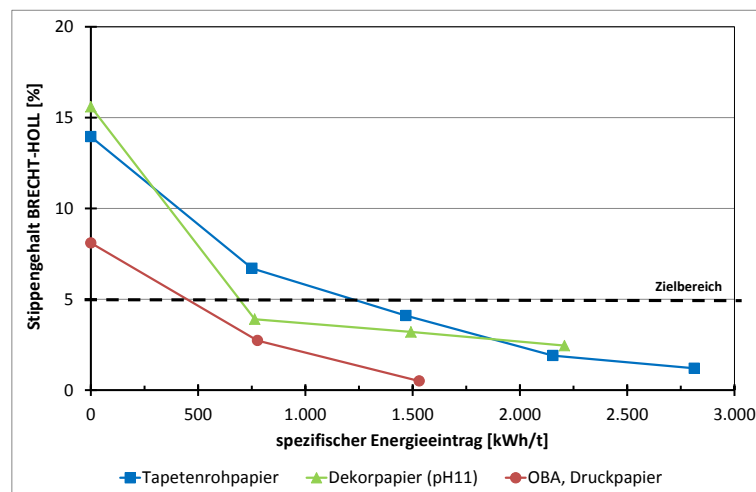


Abb. 25: Einfluss der Rohstoffart auf die Zerfaserung

Visualisierung der Stippenreduzierung

Die folgende Abb. zeigt exemplarisch Durchlichtaufnahmen von Laborblättern des Papiermusters Tapetenrohpapier im Verlauf der Ultraschallbehandlung bis max. 50 min Behandlungsdauer bei 34 und 20 % Ausgangsstippengehalt. Der Bildausschnitt hat eine Größe von 6 x 6 cm und die fortschreitende Reduzierung des Stippengehaltes ist deutlich sichtbar.

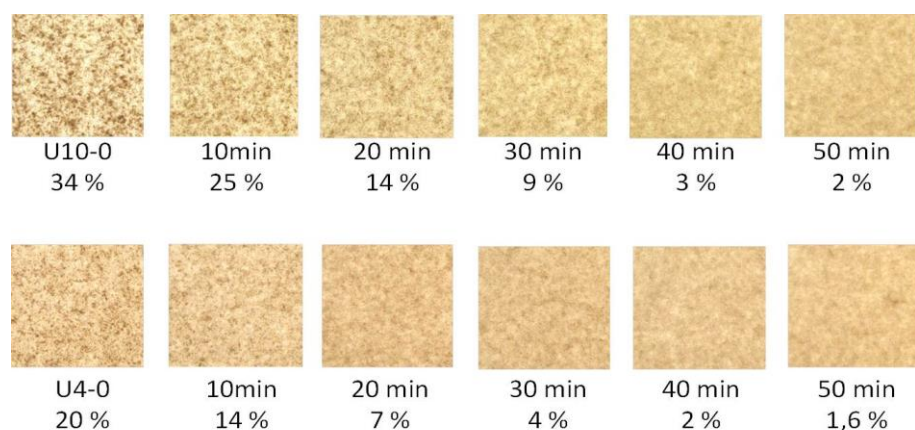


Abb. 26: Reduzierung des Stippengehaltes durch Ultraschall

Fazit

Zusammenfassend können die folgenden Aussagen zur Behandlung von Papiermaschinenausschuss in der Labor-Ultraschall-Durchflusszelle getroffen werden:

- Generell wurde eine signifikante Reduzierung des Gehaltes nassfester Stippen mittels Ultraschall von max. 40 % am Anfang auf deutlich unter 5 % erreicht.
- Die niedrigste spezifische Energieeintrag wurde bei voller Generatorleistung, ohne Zusatzdruck und bei erhöhter Stofftemperatur erzielt.
- Die Erhöhung der Stoffdichte von 10 auf 20 g/l brachte keine energetischen Vorteile.
- Der erforderliche spezifische Energieeintrag ist insgesamt als relativ hoch zu bewerten.
- Eine Reduzierung von optischem Aufheller durch Ultraschall war nicht möglich (vgl. Abb. 31).

6.4 AP 5: Untersuchung zur industriellen Nutzung von Kavitationseffekten anhand von zwei Stoffsystemen (Technikum)

Ausgewählte Stoffsysteme und Kavitationstechnologien

Die folgende Tabelle zeigt das Versuchsprogramm zur Kavitationsbehandlung im Technikum. Untersucht wurden die beiden Kavitationstechnologien Ultraschall-Plattenschwinger und hydrodynamische Kavitationsdüse im Technikum der PTS.

Mit dem Ultraschall-Plattenschwinger wurde nur das Papiermuster mit der größten Scherresistenz untersucht, da für den Ultraschall bereits im Labor in den ausführlichen Versuchen sehr hohe Energieverbräuche ermittelt wurden. Demgegenüber wurde in der Kavitationsdüse die Faserstoffart, der Start-Stippengehalt, die Stoffdichte und die Dampfzugabe variiert.

Ergänzt wurde das Versuchsprogramm an den beiden nassfesten Papiermustern durch die Zerfaserung im Technikumsentstipper, um den spezifischen Energieverbrauch des aktuellen Standes der Technik bei der Aufbereitung von nassfestem Ausschuss zu ermitteln.

Tabelle 7: Versuchsübersicht zur Ultraschallbehandlung im Technikum

Ultraschallreaktor-Technikum (Plattenschwinger)

Nr.	Druck [bar]	Stippengehalt [%]	Feststoffgehalt [g/l]	pH-Wert	Generatorleistung [kW]	T (Start) [°C]	Dauer [min]	Faserstoff
14	0	40	10	11	2,0	51 -> 50	0...60	Dekorpapier

8mm-Kavitationsdüse-Technikum

Nr.	Druckdifferenz [bar]	Stippengehalt [%]	Feststoffgehalt [g/l]	pH-Wert	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	T [°C]	Dauer [min]	Faserstoff
15	5	15	10	7	33	46 -> 46	0...30	Tapetenrohpapier
16	6	40	10	7	36	39 -> 41	0...45	Tapetenrohpapier
17	6	40	10	11	36	53 -> 57	0...60	Dekorpapier
18-Dampf	6	40	10	11	36	52 -> 71	0...60	Dekorpapier
19	6	40	30	11	36	46 -> 51	0...60	Dekorpapier
20	6	8	10	7	36	50 -> 50	0...60	OBA, Druckpapier

Entstipper-Technikum

Nr.	Druck [bar]	Stippengehalt [%]	Feststoffgehalt [g/l]	pH-Wert	Leistung [kW]	T [°C]	Faserstoff
21	0	40	40	7	4,0	40	Tapetenrohpapier
22	0	40	40	11	3,0	40	Dekorpapier

Ergebnisse Kavitationsdüse PTS-Technikum

In der Kavitationsdüse im Technikum der PTS wurde eine gute Zerkleinerung des nassfesten Tapetenroh-papiers erzielt (bei 10 g/l Feststoffgehalt). Es waren je nach Ausgangs-Stippengehalt 4 - 8 Durchläufe durch die Kavitationsdüse erforderlich, bei einem niedrigen spezifischen Energieeintrag von 120 – 240 kWh/t.

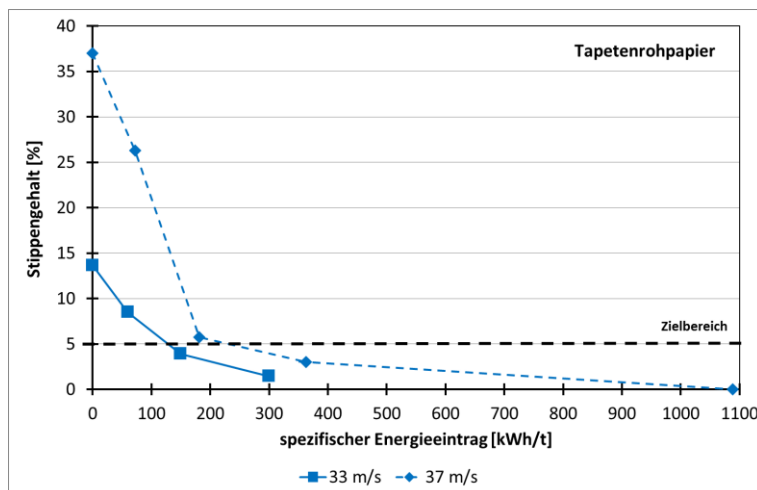


Abb. 27: Zerkleinerung in der Kavitationsdüse, Tapetenroh-papier

Das nassfeste Dekor-papier hatte wie bereits beschrieben generell eine deutlich höhere Scherresistenz als das Tapetenroh-papier. Daher war hier bei vergleichbarer Stoffdichte von 10 g/l ein höherer spezifischer Energieverbrauch von 700 kWh/t erforderlich, um den Zielbereich von 5 % Reststippengehalt zu erreichen. Eine zusätzliche Einleitung von Dampf unmittelbar vor der Kavitationsdüse und die damit verbundene Temperaturerhöhung bewirkte eine deutliche Reduzierung des Energieverbrauches auf weniger als 500 kWh/t. Erhöht man die Stoffdichte von 10 auf 30 g/l ergab sich eine weitere signifikante Verringerung des benötigten Energiebedarfes um den Faktor 3 auf ca. 170 kWh/t. Es waren mindestens 15 Durchläufe durch die Kavitationsdüse erforderlich.

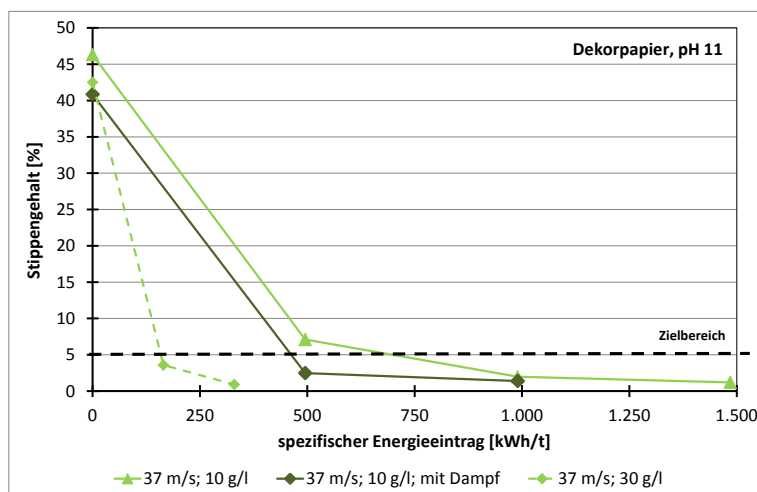


Abb. 28: Zerkleinerung in der Kavitationsdüse, Dekor-papier

Ergebnis Ultraschall, PTS-Technikum

Im Ultraschall-Plattenschwinger war eine vollständige Zerkleinerung des Dekorpapiers möglich. Der für eine Reduzierung des Stippengehaltes von 40 auf 5 % erforderliche spezifische Energieeintrag lag bei ca. 1.100 kWh/t.

Im Vergleich zur Ultraschallbehandlung war die Stippenzerkleinerung in der hydrodynamischen Kavitationsdüse deutlich energieeffizienter. Bei der Ultraschallbehandlung im Technikum waren im Kreislaufbetrieb bei den eingestellten Strömungsbedingungen 20 Durchläufe durch den Kavitationsreaktor erforderlich. Diese Anzahl der Durchläufe ist vor allem für eine mögliche bautechnische Umsetzung der Kavitationsdüsen-Technologie relevant.

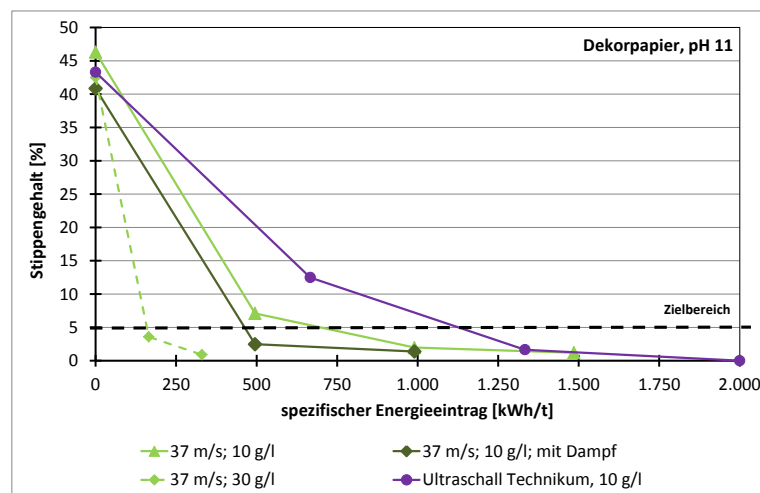


Abb. 29: Zerkleinerung im Ultraschall-Plattenschwinger, Dekorpapier

Visualisierung der Versuchsergebnisse

Die folgende Grafik zeigt Durchlichtaufnahmen der Prüfblätter der in der Kavitationsdüse behandelten Faserstoffe. Die nach der Zerkleinerung im Pulper vorhandenen Stippen wurden in der Kavitationsdüse sukzessive und vollständig in Einzelfasern zerlegt.

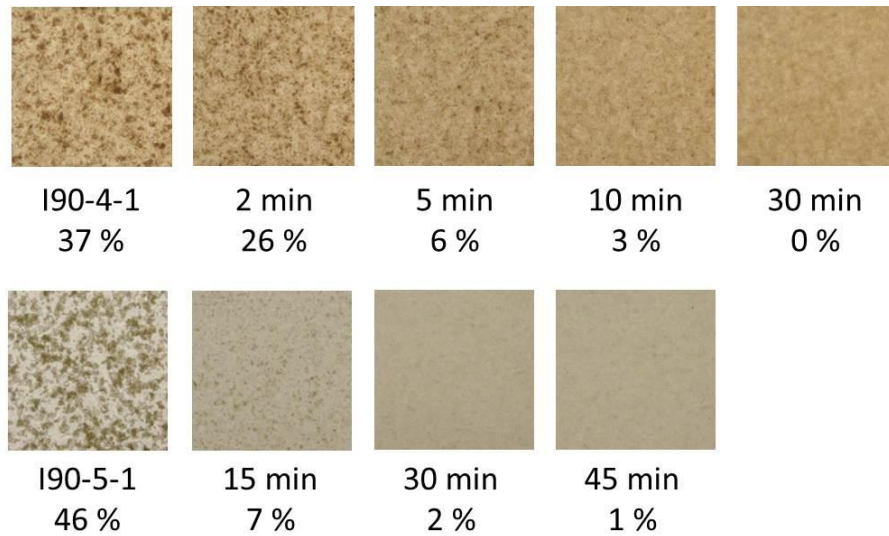


Abb. 30: Visualisierung des Zerkleinerungsergebnisses in der Kavitationsdüse, oben = Tapetenrohmaterial, unten = Dekorpapier

Ablösung optischer Aufheller (OBA)

Der Gehalt optischer Aufheller in einer Papierprobe kann über die Differenz der Weißgrade mit und ohne UV-Anteil ermittelt werden. Reduziert sich diese Differenz im Verlauf der Versuche, dann konnte ein Austrag oder eine Deaktivierung des optischen Aufhellers erzielt werden.

Im Diagramm ist der Verlauf der Beladung mit optischem Aufheller für die Kavitationsdüse und die Labor-Ultraschallanlage dargestellt. Zum Vergleich wurden die Werte für eine Zerkleinerung des Druckpapiers im Standard-Desintegrator bis zur Stippenfreiheit eingefügt.

Eine Reduzierung des optischen Aufhellers wäre dann zu erwarten, wenn der Aufheller von den Cellulosefasern ablösbar ist oder wenn der Papierstrich inkl. optischem Aufheller so weit zerkleinert wird, dass der optische Aufheller bei der Blattbildung ins Filtrat gelangt. Da in der untersuchten Papierprobe nur Tetra-Typen des optischen Aufhellers mit sehr hoher Affinität zu den Cellulosefasern zum Einsatz kam und da der optische Aufheller vorzugsweise im Papierstrich gebunden ist, war generell nur geringes Potenzial zur Reduzierung vorhanden.

In den Ergebnissen wird sichtbar, dass keine der untersuchten Technologien in der Lage war, den Gehalt des optischen Aufhellers in der Papierprobe zu verringern. Die Differenz der Weißgrade wurde im versuchsverlauf nicht reduziert.

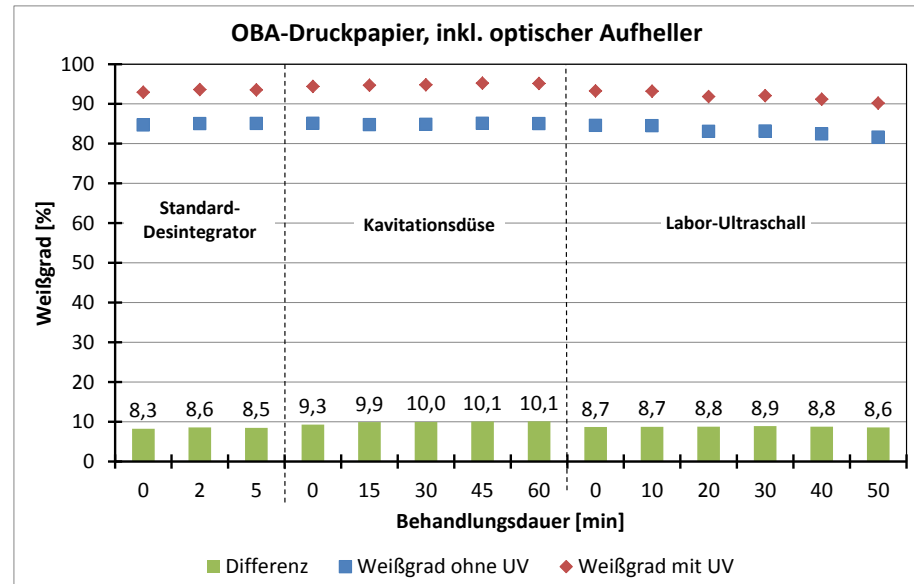


Abb. 31: Veränderung der Beladung mit optischem Aufheller mit verschiedenen Kavitationstechnologien

Fazit

Zusammenfassend können die folgenden Aussagen zur Behandlung von Papiermaschinenausschuss in der hydrodynamischen Kavitationsdüse getroffen werden:

- Es wurde mit vertretbarem technologischen Aufwand eine schnelle und signifikante Reduzierung des Stippengehaltes erreicht.
 - Eine Erhöhung der Temperatur begünstigte die Zerfaserung der nassfesten Stippen.
 - Die Erhöhung der Stoffdichte von 10 auf 30 g/l brachte deutliche energetische Vorteile.
 - Der erforderliche spezifische Energieeintrag war im Vergleich zur Ultraschallbehandlung deutlich geringer.
 - Eine Reduzierung von optischem Aufheller durch hydrodynamische Kavitation war nicht möglich.
-

6.5 AP 6: Vergleichende Bewertung und Berichterstellung

Vergleich der Kavitationsverfahren zum-Benchmark

Für eine abschließende Bewertung der Kavitationstechnologie sind grundsätzlich die beiden Gesichtspunkte

- Kosteneffizienz und
- technologische Machbarkeit

heranzuziehen. Zur Bewertung der Kosteneffizienz von Prozesstechnologien der Stoffaufbereitung sind insbesondere die laufenden Kosten des Anlagenbetriebs, ausgedrückt als spezifischer Energieverbrauch in kWh/t oter Faserstoff, maßgeblich. Die Abschreibungskosten der ggf. benötigten Kavitationsreaktoren bzw. Venturidüsen sind derzeit schwer kalkulierbar, da für diese Technologien noch keine großtechnische Umsetzung für die relevanten großen Volumenströme in der Papierindustrie existiert. Insbesondere bei Ultraschallanlagen kann jedoch davon ausgegangen werden, dass solche Anlagen nicht preisgünstiger sind, als die bisherige Stoffaufbereitungstechnologie.

Die technologische Machbarkeit beinhaltet Aspekte der Skalierbarkeit kleiner Versuchsanlagen in einen großtechnischen Maßstab und die Realisierung eines ggf. erforderlichen kontinuierlichen Anlagenbetriebes in Vorwärtsführung. In Pilotversuchen zur Grundlagenforschung erfolgt oftmals eine Kreislaufführung der behandelten Medien mit mehrfachem Durchgang durch denselben Reaktor.

Der Technologiebenchmark für die Kavitationsverfahren ist die Zerkleinerung im Pulper, die allerdings bis zur Stippenfreiheit nicht wirtschaftlich ist, und der in Papierfabriken vielfach eingesetzte Entstipper zur mechanischen Stippenzerkleinerung im nassfesten Ausschuss (vgl. Abb. 11).

**Verfahrensvergleich
bei Tapetenrohpapier,
Startstippengehalt
40 %**

Beim Tapetenrohpapier erforderte die Ultraschallbehandlung den mit Abstand größten spezifischen Energieeintrag von ca. 2.700 kWh/t, um das Zielniveau des Stippengehaltes von 5 % zu erreichen. Die hydrodynamische Kavitationsdüse war deutlich energieeffizienter als die beiden eingesetzten Pulper. Die Energieeffizienz der Kavitationsdüse kann zukünftig weiter signifikant verbessert werden, indem die Stoffdichte von 10 auf 30 – 40 g/l angehoben wird und weitere Parameter wie Strömungsgeschwindigkeit und Düsendesign zielgerichtet optimiert werden.

Der vergleichsweise geringe spezifische Energieeintrag der Benchmark-technologie Entstipper wurde mit den Kavitationsverfahren bisher nicht erreicht.

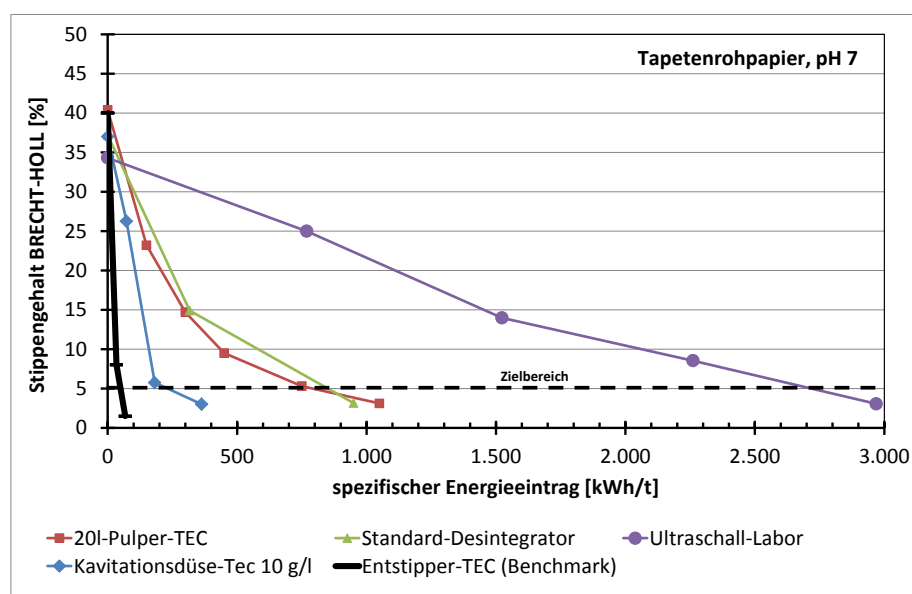


Abb. 32: Technologievergleich aller Verfahren, Tapetenrohpapier

**Verfahrensvergleich
bei Dekorpapier,
Startstippengehalt
40 %**

Das am schwersten zerfaserbare Papiermuster Dekorpapier konnte nur bei einem erhöhten pH-Wert ausreichend zerfaserung werden. Die Ultraschallbehandlung im Technikum war effektiver als die Zerfaserung im Labor-Standard-Desintegrator. Die beste Variante der Behandlung in der Kavitationsdüse war noch einmal deutlich besser als die Ultraschallbehandlung und benötigte zur Reduzierung des Stippengehaltes von 40 auf 5 % nur noch ca. 170 kWh/t. Im Vergleich dazu wurde im Entstipper ein spezifischer Energieeintrag von 50 kWh/t errechnet.

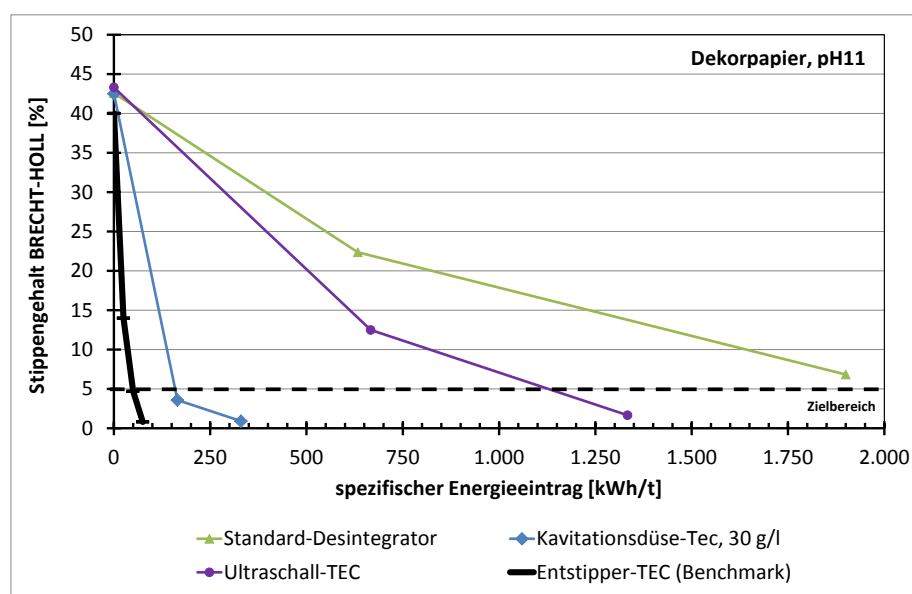


Abb. 33: Technologievergleich aller Verfahren, Dekorpapier, 40 % Start-Stippengehalt

Verfahrensvergleich bei Dekorpapier, Startstippengehalt 15 %

Bei einem auf 15 % reduzierten Startstippengehalt konnte zusätzlich die Ultraschallbehandlung im Labormaßstab in die Vergleichsbetrachtung einbezogen werden. Allerdings lag der spezifische Energieeintrag bei beiden Ultraschallbehandlungen deutlich höher als beim Technologiebenchmark Entstipper.

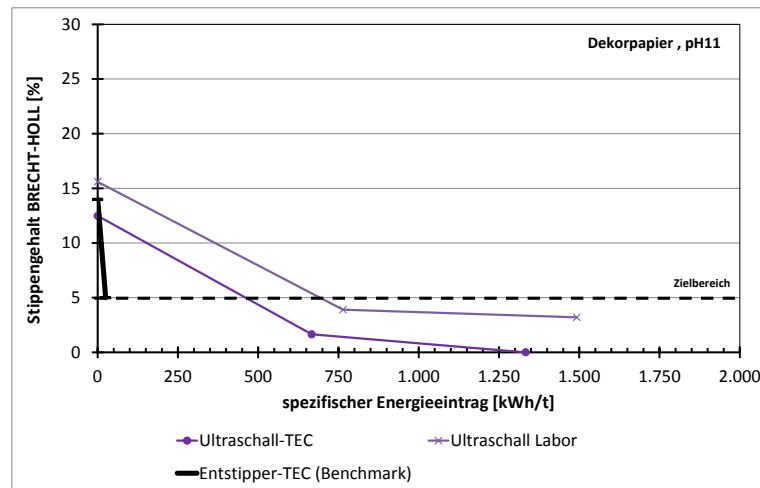


Abb. 34: Technologievergleich aller Verfahren, Dekorpapier, 15 % Start-Stippengehalt

Einschätzung der technologischen Machbarkeit Ultraschallbehandlung

Ultraschall-Reaktoren in Form verschleißbarer Plattenschwinger existieren derzeit nur in kleintechnischer Größenordnung für die Behandlung von wenigen m³ Fluid je Stunde. Diese Ultraschallreaktoren im kontinuierlichen Durchflussbetrieb werden derzeit z.B. für die Desintegration von Biomasse zur Erhöhung der Gasausbeute in Biogasanlagen eingesetzt. Eine Reihenschaltung mehrerer Reaktoren ist grundsätzlich möglich.

Der Volumenstrom und damit der generelle Anlagendurchsatz durch die Ultraschall-Reaktoren ist jedoch aus 2 Gründen grundsätzlich begrenzt: Die Verweilzeit und die räumliche Ausdehnung des Kavitationsfeldes. In der Ultraschallbehandlung ist eine verbesserte Wirksamkeit zu verzeichnen, wenn die Verweildauer des zu behandelnden Mediums im Kavitationsfeld steigt. Bei einem steigenden Durchsatz und damit erhöhter Strömungsgeschwindigkeit reduziert sich die Verweilzeit im Kavitationsfeld. Dies muss durch eine erhöhte Anzahl der Reaktoren in Reihe kompensiert werden. Der Reaktorquerschnitt kann ebenfalls nicht beliebig vergrößert werden, da die Ultraschall-Erzeuger außen auf der Gehäusewand montiert sind und über einen lokal begrenzten Bereich nach innen abstrahlen, so dass in der Mitte des Rohrreaktors generell die geringste Kavitationsintensität auftritt.

Vor diesen Hintergründen erscheint die Ultraschallbehandlung eher für eine Behandlung begrenzter Volumenströme geeignet.

**Einschätzung der
technologischen
Machbarkeit
Hydrodynamische
Kavitationsdüse**

Hydrodynamische Kavitationsdüsen werden derzeit im Forschungsbereich und in kleintechnischen Anlagen mit Durchsätzen bis zu 15 m³/h angewendet. Eine Reihenschaltung von mehreren Düsen wurde bisher nicht realisiert.

Eine Erweiterung des Düsenquerschnitts für die Förderung größerer Volumenströme stellt grundsätzlich kein Problem dar, da die Kavitationsblasen im gesamten Rohrleitungsquerschnitt auftreten. Bei einer Maßstabsvergrößerung muss die grundsätzliche Düsengeometrie beibehalten werden.

Technisch anspruchsvoll ist eine Reihenschaltung mehrerer Kavitationsdüsen, da sich durch mehrere Düsen hintereinander ein zunehmender Gegendruck aufbaut. Damit kann die Kavitationsintensität durch die veränderten Druckverhältnisse zum Teil gesteigert, aber auch bis zum vollständigen Verschwinden reduziert werden. Außerdem steigt die Leistungsaufnahme der Zulaufpumpe deutlich, wenn mehrere Düsen in Reihe geschaltet werden bzw. der Anlagendurchsatz wird reduziert.

Für begrenzte Volumenströme im Anwendungsfall einer Behandlung von Papiermaschinenausschuss wäre eine Behandlung im Kreislaufbetrieb mit 5 Düsendurchgängen wie im Projekt ermittelt, eine mögliche Technologieoption. Generell ist auch eine Reihenschaltung mit einer neuen Zulaufpumpe vor jeder einzelnen Düse denkbar. Wesentlich dabei wäre eine Entspannung der Stoffsuspension nach jedem Düsendurchgang, um einen entsprechenden Drucksprung für einen definierten Kollaps der Kavitationsblasen zu realisieren.

7 Zusammenfassung

Vergleich der Kavitationsverfahren

In der folgenden Tabelle sind noch einmal die spezifischen Energieverbräuche zum Erreichen des Zielwertes 5 % Reststippengehalt gegenübergestellt.

Tabelle 8: Verfahrensvergleich bezüglich Energieeffizienz

Muster	Tapetenrohpapier, pH = 7	Dekorpapier, pH = 11
Stippengehalt Reduzierung	40 % -> 5 %	40 % -> 5 %
Energieeintrag	[kWh/t]	[kWh/t]
Desintegrator	850	2.000
Pulper	800	-
Ultraschall Labor	2.700	-
Ultraschall TEC	-	1.100
Kavitationsdüse TEC 1% SD	240	700
Kavitationsdüse TEC 1% SD + Dampf	(160)*	470
Kavitationsdüse TEC 3% SD	(80)*	170
Kavitationsdüse TEC 3% SD + Dampf	(50)*	(110)*
Entstipper (Benchmark)	30	50

* auf Basis der Ergebnisse beim Dekorpapier errechnet

Zusammenfassend können die folgenden Aussagen zur Wirksamkeit der untersuchten Kavitationsverfahren zur Zerfaserung nassfester Stippen und zur Reduzierung von optischem Aufheller getroffen werden:

- Mittels Ultraschallbehandlung und hydrodynamischer Kavitationsdüse mit hoher Strömungsgeschwindigkeit wurde eine vollständige Zerfaserung nassfester Stippen erzielt. In der Reijector-Düse mit Dampfzuführung war keine Reduzierung der Stippenbeladung realisierbar.
- Der spezifische Energieverbrauch der Benchmarktechnologie Entstipper wurde in den Kavitationsverfahren bisher nicht erreicht, wobei die effektivste Variante der Kavitationsdüse bereits nahe am Benchmarkbereich lag.
- Eine Reduzierung der Beladung mit optischem Aufheller konnte in der Kavitationsbehandlung nicht erreicht werden.

Literaturverzeichnis

- 1 Arndt, T.; Brenner, T.; Hamann L. und Kießler, B.
Application of hydrodynamic cavitation as alternative technology for stock preparation processes in comparison to standard ultrasound assisted and industrial processes.
EFPRO – CEPI 3rd Early Stage Researchers Workshop, November 2014, Brussels
- 2 Arndt, T.; Hamann, L. und Weber, R.
Hydrodynamic cavitation treatment of pulp – a cost-effective alternative to ultrasonic treatment?
International Symposium on Applied Chemistry, 25-26 February 2014, Munich
- 3 Grossmann, H.; Fröhlich, H. und Wanske, M.
The potential of ultrasound assisted deinking.
9th Research Forum on Recycling, Marriott Norfolk Waterside, Norfolk, VA, USA, 2010
- 4 Lauterborn, W.
Kapitel 25: Cavitation
Encyclopedia of Acoustics, S. 263., Editor: M.J. Crocker, 4. Auflage, 1997
- 5 Zhang, X.; Fu, Y.; Li, Z. und Zhao, Z.
The collapse intensity of cavities and the concentration of free hydroxyl radical released in cavitation flow.
Chinese Journal of Chemical Engineering 16 (2008) 4, 547-551
- 6 Capocelli, M.; Musmarra, D.; Prisciandaro, M. und Lancia, A.
Chemical effect of hydrodynamic cavitation: Simulation and experimental comparison.
AIChE Journal 60 (2014) 7, S. 2566–2572
- 7 Kashchiev, D.
Nucleation: Basic Theory with Applications.
Oxford: Verlag Butterworth-Heinemann (Hrsg.), 2000.
- 8 Suslick, K. S.; Mdeleleni, M. M. und Ries J. T.
Chemistry Induced by Hydrodynamic Cavitation.
Journal of American Chemical Society 119 (1997) 39, S. 9303-9304.
- 9 Zollner-Croll, H., Kleemann, S. und Lind, A
Entwicklung eines Schlamm-/Medienvorbehandlungsverfahrens mittels Kavitation zur Wasser- und Ressourceneinsparung in Filtrationsprozessen, Teilprojekt 2
Abschlussbericht zum Forschungsprojekt kmU innovativ, Förderkennzeichen 02WQ1234
- 10 Kleemann, S., Röber, S. und Lind, A
Entwicklung eines neuen Verfahrens und der geeigneten Anlagentechnik zur Aufbereitung von Prozess- und Abwasser in der Papierindustrie auf Basis des Funktionsprinzips der Kavitation
Abschlussbericht zum Forschungsprojekt des Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand (ZIM), Fördermodul Kooperationsprojekte, Förderkennzeichen KF 2717401SA0