

# Schlammbehandlung mit Ultraschall: Ein aktuelles Leistungsbild

Prof. Dr.-Ing. Uwe Neis<sup>\*</sup>, Dipl.-Ing. Klaus Nickel<sup>\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Technische Universität Hamburg-Harburg, Abwasserwirtschaft, 21071 Hamburg, e-mail: neis@tuhh.de

<sup>\*\*</sup>WAVES Wasser- und Umwelttechnologien GmbH, Kasernenstr. 12, 21073 Hamburg

## 1. Einleitung

Bei der mechanisch-biologischen Reinigung kommunaler und gewerblicher Abwässer fallen Klärschlämme an. Die in den letzten Jahrzehnten erzielten Fortschritte in der Abwasserbehandlung führten zu einem deutlichen Anstieg der Klärschlammmengen in Deutschland und Europa. Diese Schlämme weisen unerwünschte Eigenschaften auf, so daß sie nicht unmittelbar verwertet oder beseitigt werden können. Die Rohschlämme bedürfen einer Behandlung, die Beschaffenheit und Eigenschaften derart verändern, daß keine kritischen Belastungen mehr für die Umweltsektoren Boden, Luft und Wasser auftreten. Auf kommunalen Kläranlagen hat sich für diese Aufgabe in erster Linie die anaerobe Schlammstabilisierung etabliert.

Die anaerobe Stabilisierung ist anerkannte Regel der Technik und führt zu einem Abbau der organischen Rohschlammbestandteile in der Größenordnung von 40 bis 60%. Eine Verminderung der zu entsorgenden Schlammmasse geht damit einher. Darüber hinaus wird die Entwässerbarkeit verbessert und eine Reduktion pathogener Keime erzielt. Die Erzeugung von energiereichem Biogas stellt einen wesentlichen Vorteil der Schlammfäulung dar (Abwassertechnische Vereinigung, 1994).

Der Nachteil der anaeroben Klärschlammstabilisierung liegt in der geringen Umsatzleistung. Der geschwindigkeitsbestimmende Schritt ist die Hydrolyse der organischen Feststoffe (Eastman & Ferguson, 1981). Übliche Faulzeiten liegen bei 20 Tagen, so daß große Faulbehälter benötigt werden. Trotz der langen Faulzeiten bestehen die stabilisierten Restschlämme noch zu hohen Anteilen aus organischer Substanz. Darüber hinaus werden zunehmend Betriebsprobleme durch Schaumbildung im Faulprozeß beobachtet, deren Ursache oft im übermäßigem Wachstum fädiger Belebtschlammorganismen zu finden ist (Knoop, 1997).

## 2. Ultraschall und Kavitation

Ziel der Anwendung von Ultraschall ist die akustische Erzeugung von Kavitation in der Klärschlamm suspension. Ultraschall breitet sich in Form von Longitudinalwellen aus und bewirkt eine periodische Verdichtung und Entspannung in flüssigen Medien (Abb. 1). Es bilden sich mikroskopisch kleine Hohlräume in der Flüssigkeit (Kavitation) durch die Einwirkung eines Unterdrucks in der Entspannungsphase. Aufgrund lokaler Unterschreitung des Wasserdampf- bzw. Gassättigungsdrucks bestehen die sich bildenden Kavitationsbläschen aus einem Wasserdampf-Gasgemisch. Die Kavitationsblasen pulsieren zunächst in Resonanz mit der Ultraschallschwingung unter Zunahme ihres Volumens. Bei Erreichen einer kritischen Größe, dem sogenannten Resonanzradius, kommt es zum Blasen kollaps in der Druckphase. Diese schlagartige Blasenimplosion ist durch hohe Druckunterschiede und einem extremen Temperaturanstieg in der Blase und ihrer unmittelbaren Umgebung gekennzeichnet. Schließlich werden sehr schnelle

Strömungen, sogenannte „Jet streams“, erzeugt, die zu hohen mechanischen Scherkräften führen (Mason, 1999).

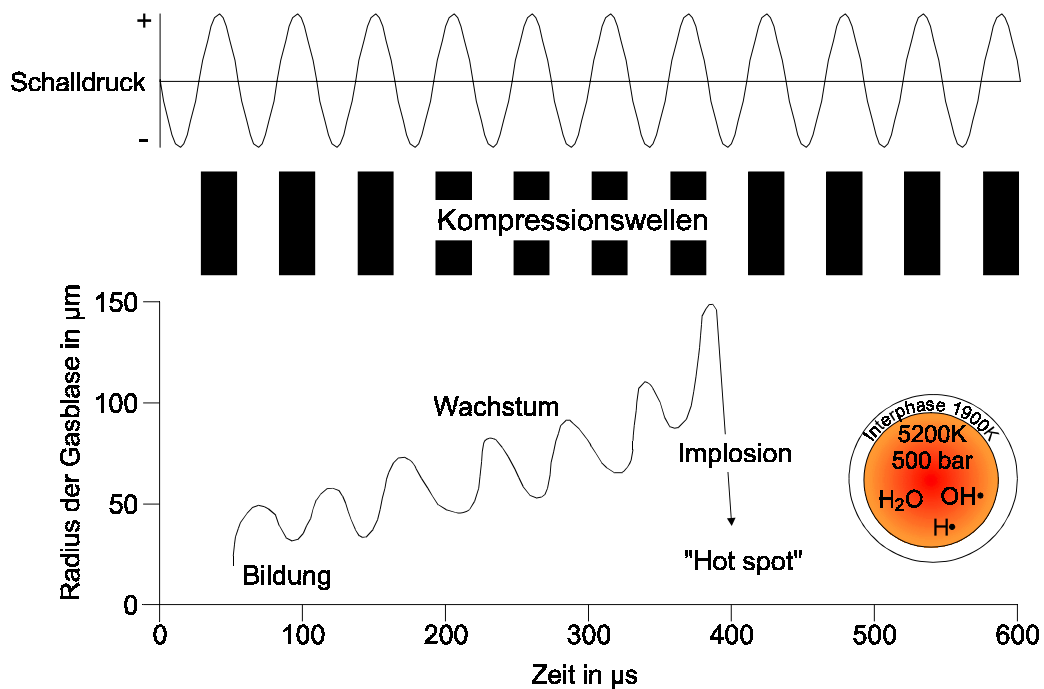


Abbildung 1: Bildung, Wachstum und Kollaps einer Kavitationsblase im Ultraschallfeld

### 3. Zwei Phasen der Desintegration von Klärschlamm mit Ultraschall

Die bei der Ultraschallkavitation ausgelösten extremen hydromechanischen Kräfte können genutzt werden, um die Schlammstruktur in einer Weise zu verändern, die beim konventionellen, enzymatisch-biologischen Stabilisierungsprozeß erst in Tagen erreicht wird (Neis *et al.*, 2001). Bereits nach sehr kurzer Beschallzeit bzw. geringem Energieeintrag werden die Schlammflocken (Agglomerate) in einzelne Partikel zerlegt (deagglomert). Es tritt die Zerstörung der Schlammflockenstruktur ein (Phase I). Mit zunehmendem Energieeintrag setzt ein Aufschluß der biologischen Zellen im Klärschlamm ein. Das heißt, dass die Zellwände zerstört werden und das Zellinnere in Lösung geht. Der Aufbruch der mikrobiellen Zellwände führt also zur Freisetzung gelöster organischer Substanzen im Schlammwasser (Phase II). Dieses Zweiphasenmodell der Klärschlamm-desintegration mit Ultraschall wird in Abbildung 2 illustriert. Über die Parameter Beschallzeit und Ultraschall-Intensität kann der Prozeß, je nach Behandlungsziel, von der Flockenzerlegung bis zur vollständigen Zerstörung aller Zellen geführt werden.

Man kann das Ausmaß der Zellzerstörung über den sogenannten Aufschlußgrad bestimmen. Der Aufschlußgrad bezieht den Anteil zerstörter Zellen auf die gesamte Anzahl zerstörbarer Zellen im Klärschlamm. Zur Quantifizierung des Aufschlusses eignet sich daher die Bestimmung des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) in der wässrigen Schlammfraktion. Der maximal freisetzbare CSB wird durch eine chemische Hydrolyse mit Natriumhydroxid bestimmt. Der Aufschlußgrad  $A_{CSB}$  wird definiert als das prozentuale Verhältnis von CSB-Freisetzung in die wässrige Schlammphase durch Ultraschallbehandlung zur CSB-Freisetzung durch alkalische Hydrolyse (Abwassertechnische Vereinigung, 2000).

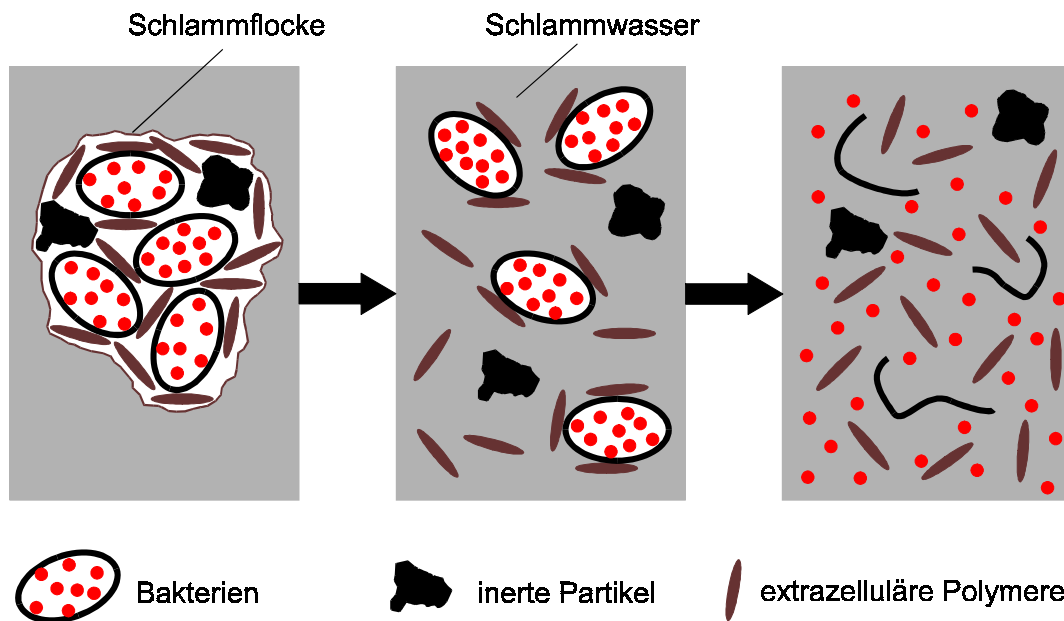
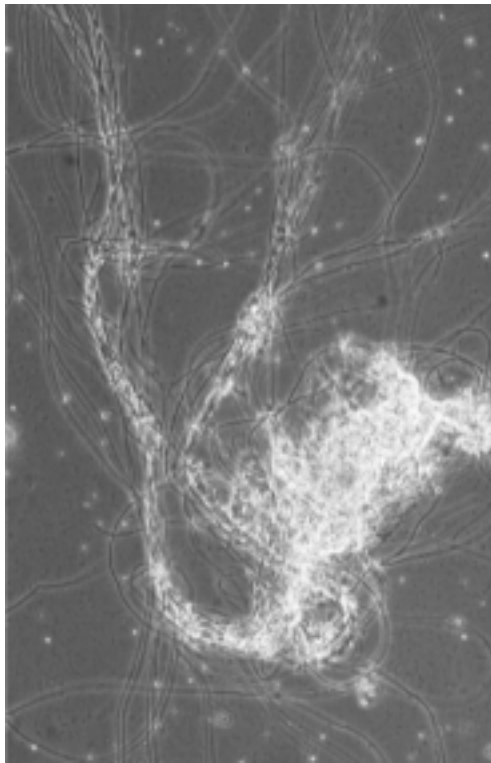


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Deagglomeration (Bild Mitte) und der Zellzerstörung (Bild rechts) von biologischen Schlämmen durch Ultraschallbehandlung

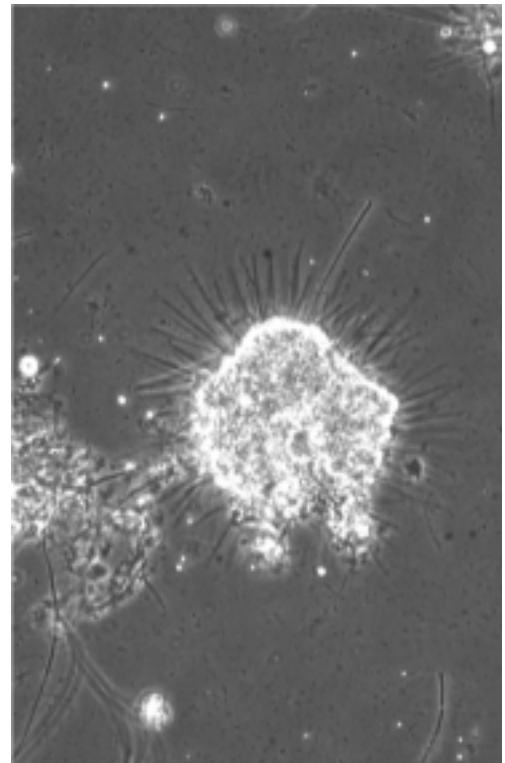
#### 4. Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlamm mittels Ultraschall

In vielen Kläranlagen entwickeln sich in periodischen Abständen fadenförmige Mikroorganismen im Belebtschlamm. Dieses Phänomen ist als Bläh- und Schwimmschlamm bekannt. Durch diese Änderung der Schlammstruktur werden substantielle Betriebsprobleme verursacht. Aufgrund der schlechten Sedimentation des Blähschlammes verringert sich der Schlammgehalt und damit die Reinigungsleistung in der Belebung. Die anaerobe Stabilisierung von Blähschlamm ist oftmals nicht möglich, da bei der Faulung erhebliche Schaumprobleme auftreten (Lemmer *et al.*, 1998; Matsché & Keuzinger, 1998).

Das Ziel der Ultraschallbehandlung ist die Zerstörung der fädigen Schlammstrukturen, um die Sedimentationseigenschaften zu verbessern und den nachfolgenden anaeroben Abbau der Schlämme ohne Betriebsprobleme zu gewährleisten. Unsere Untersuchungen wurden im Labormaßstab mit niederfrequentem Ultraschall durchgeführt. Zur Bewertung des Erfolges der Bläh- und Schwimmschlammbekämpfung wurde das Sedimentationsverhalten herangezogen. Anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen erfolgte die visuelle Beurteilung der Zerstörung der fädigen Struktur. In Abbildung 3A ist eine lichtmikroskopische Aufnahme des unbehandelten Blähschlammes gezeigt. Die hohe Fädigkeit dieses Blähschlammes ist deutlich zu erkennen. Bereits die kurzzeitige Beschallung mit einem Energieeintrag von 5,8 Wh/l führt zur Zerkleinerung der Fäden (Abb. 3B). Die Fäden werden nahe der Flockenoberfläche abgetrennt. Die Struktur der dichteren Flocken änderte sich durch die Kurzzeitbehandlung nicht.



A) unbehandelt



B) ultraschallbehandelt (5,8 Wh/l)

Abbildung 3: Struktur des Blähschlammes A) vor und B) nach Ultraschallbehandlung

Die Auswirkung der Ultraschallbehandlung auf das Sedimentationsverhalten des Blähschlammes ist in Abbildung 4 dargestellt. Der Energieeintrag von 5,8 Wh/l führte zur Reduktion des Schlammindezes von 233 ml/g auf 154 ml/g. Mit 11,6 Wh/l wurde der Schlammindeze weiter bis auf 128 ml/g gesenkt. Ein höherer Energieeintrag resultierte wieder in schlechteren Absetzeigenschaften. Die Verbesserung der Absetzeigenschaften ist zunächst auf die Zerstörung der Fäden zurückzuführen. Das Fadennetzwerk ist zerbrochen, die Flocken sedimentieren gut. Die weitere Steigerung der Ultraschalldosis bewirkt die Zerlegung der Flockenstrukturen. Der Schlammindeze steigt wieder an, weil die Sinkgeschwindigkeit von Einzelpartikeln im Vergleich zu Flocken geringer ist. Die optimalen Effekte werden bei einer genau dosierten kurzen Behandlung erzielt.

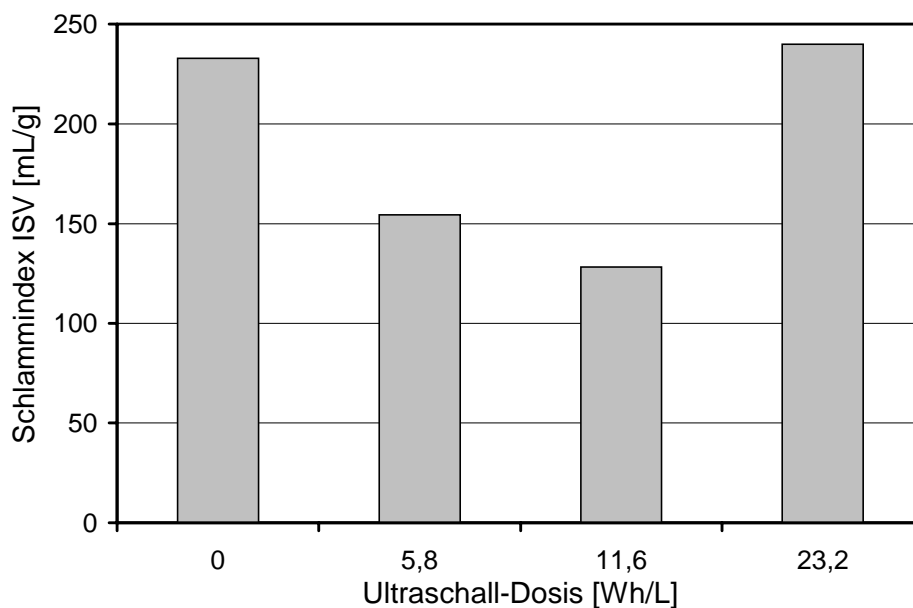


Abbildung 4: Entwicklung des Schlammindex von Blähschlamm als Funktion der Ultraschall-Dosis

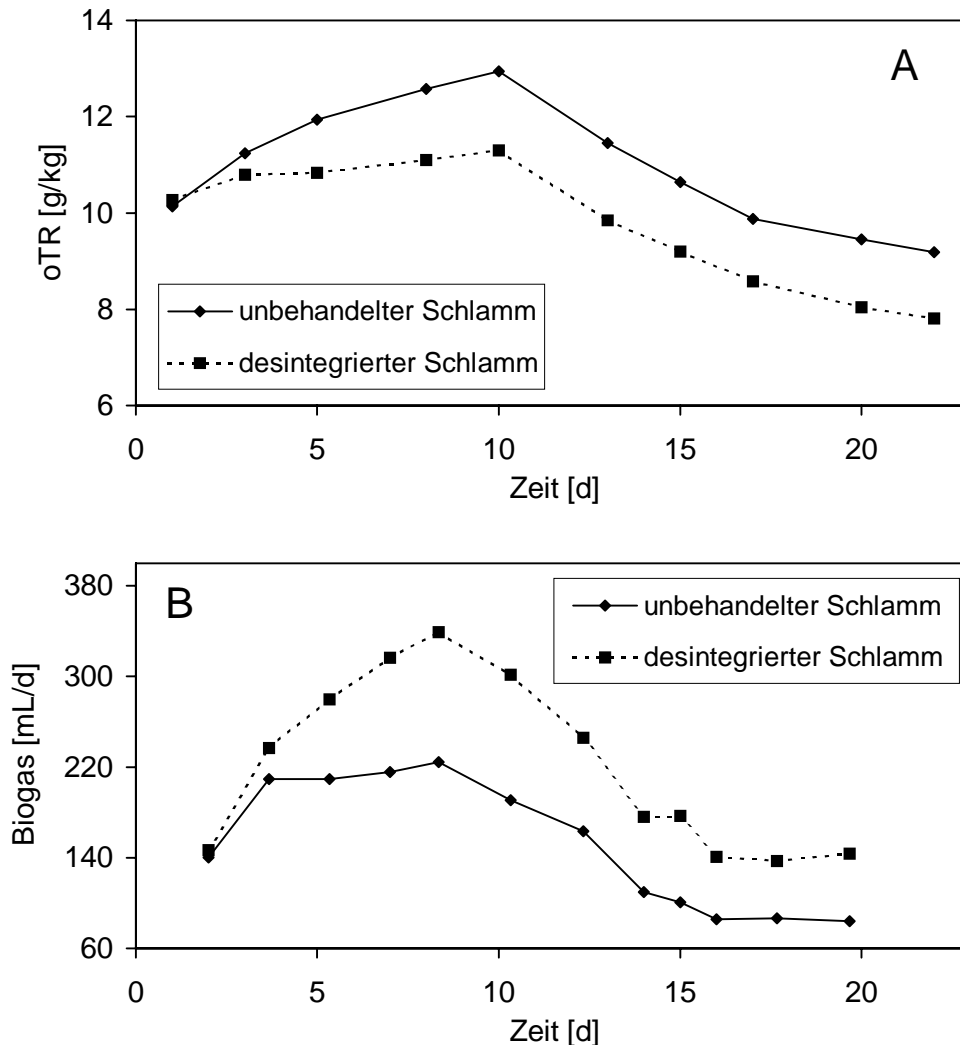
In einem aktuellen Forschungsvorhaben (BMBF 02WA0053) wird die Nachhaltigkeit der Ultraschallbehandlung von Bläh- und Schwimmschlamm durch den Nachweis einer ungestörten anaeroben Stabilisierung untersucht. Hierfür erfolgt der Betrieb einer mobilen Versuchsanlage bestehend aus fünf 200-Liter Faulbehältern auf verschiedenen Kläranlagen mit Problemschlämmen. Zugleich werden Schlammerkmale bestimmt und Analysemethoden entwickelt, die es erlauben, eine systematische und allgemeingültige Einstufung der unterschiedlichen Bläh- und Schwimmschlämme vorzunehmen und daran den Erfolg der Beschallung zu messen. Durch Einsatz eines neuen Hochleistungsultraschallreaktors kann mit sehr kurzen Beschallzeiten bei signifikant reduziertem Energieeintrag gearbeitet werden. Kurzzeitige Beschallung im Sekundenbereich bedeutet auch, daß nur kleine Reaktorvolumina benötigt werden: ein großer Vorteil bei der Idee, den Ultraschallreaktor während saisonaler Blähschlammereignisse schnell auf die Kläranlagen zu bringen. Bei Bedarf kann ein Reaktor auch permanent auf einer Kläranlage stehen, quasi als stand-by, ohne viel Raum zu beanspruchen.

## 5. Intensivierung der Schlammfäulung

Umfangreiche Untersuchungen zum anaeroben Abbau ultraschallbehandelter Klärschlämme wurden direkt vor Ort auf einer kommunalen Kläranlage durchgeführt. Der anaerobe Schlammabbau erfolgte bei 37°C im semikontinuierlichen Parallelbetrieb von fünf Faulbehältern im Labor- und Pilotmaßstab. Durch die Ultraschallbehandlung wurde der Aufschlußgrad  $A_{CSB}$  des Überschussschlammes zwischen 0 und 24% variiert. Über den gesamten Versuchszeitraum erfolgte die Bestimmung der Frachten der den Faulbehältern zu- und abgeführten organischen Schlammrückstände. Für die lückenlose Bilanzierung wurden die Veränderungen der im Faulbehälter gespeicherten organischen Feststoffe berücksichtigt.

### Steigerung des Schlammabbaus

Durch Aufschluß des Zellmaterials im Klärschlamm wird ein weitergehender Abbau während der anaeroben Stabilisierung erzielt. Die Menge des ausgefaulten Schlammes wird reduziert und weist einen verminderten organischen Restgehalt auf (Abb. 5A). Infolge des gesteigerten Abbaus ergibt sich ein quantitativer Anstieg an methanhaltigem Biogas (Abb. 5B), was zur energetischen Optimierung der Kläranlagenprozesse beiträgt.

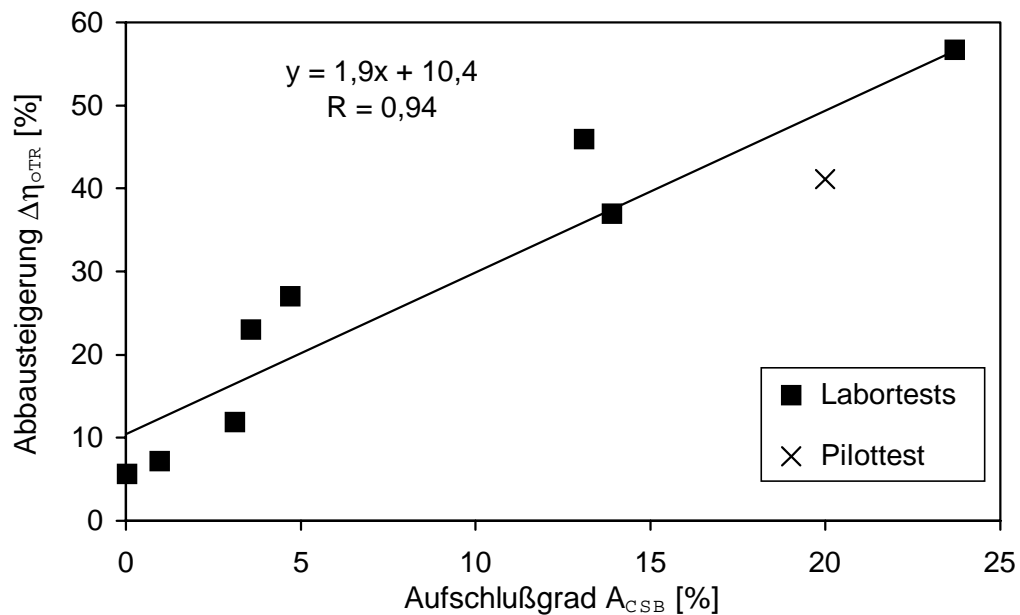


**Abbildung 5:** A) Organischer Trockenrückstand und B) Biogasanfall in den Fermentern, die mit unbehandeltem und desintegriertem Überschussschlamm ( $A_{CSB} = 24\%$ ) bei 8 Tagen Faulzeit betrieben wurden

Abbildung 6 faßt die Ergebnisse der Abbauprobe zusammen. Dargestellt ist die prozentuale Steigerung des Abbaus (bezogen auf den konventionellen oTR-Abbau) bei konstanter Verweilzeit als Funktion des Aufschlußgrades. Die Regressionsanalyse verweist auf einen linearen Funktionsverlauf. Die Steigung dieser Regressionsgeraden beträgt 1,9. Dies bedeutet, daß durch eine 10%ige Erhöhung des Aufschlußgrades der anaerobe Abbau um 19% gesteigert werden kann.

Auf den ersten Blick schwer interpretierbar erscheint der Ordinatenabschnitt. Wie in Kapitel 3 erläutert, bewirkt eine kurzzeitige Ultraschallbehandlung die Deagglomeration von Schlammflocken ohne Zellaufschluß (Abb. 2). Der abbaufördernde Effekt dieser Flockenzerstörung basiert auf dem verminderten Stofftransportwiderstand bei der biologisch-enzymatischen Hydrolyse. Die Exoenzyme erreichen die Zellwände der

vereinzelt Mikroorganismen schneller im Vergleich zu dem Zellmaterial, welches in die Schlammflocken eingebunden ist.



**Abbildung 6:** Steigerung des anaeroben Abbaus von Überschussschlamm (8 Tage Faulzeit) als Funktion des Aufschlußgrades  $A_{CSB}$  nach Ultraschallbehandlung

#### Beschleunigung des Schlammabbaus

Um den Einfluß des Zellaufschlusses auf die Beschleunigung des anaeroben Abbaus zu bestimmen, erfolgte die Stabilisierung des Überschussschlammes bei Faulzeiten zwischen 4 und 16 Tagen. Durch eine 90-sekündige Ultraschallbehandlung wurde ein Aufschlußgrad  $A_{CSB}$  von 20% erzielt. Tabelle 1 zeigt die bilanzierten oTR-Abbaugrade sowie Abbauleistungen im Fermenter. Die Menge an abgebauter organischer Substanz konnte infolge des Zellaufschlusses bei 16 Tagen Verweilzeit um über 30% (335:257) gesteigert werden, wie sich aus dem Vergleich zum konventionellen Faulsystem ergibt. Bei weiter verkürzter Faulzeit von 8 Tagen wurde der Abbaugrad um über 40% (38,1:27,0) gesteigert. Die höchste Abbauleistung ergab sich bei der kürzesten Faulzeit von nur 4 Tagen. Gegenüber der konventionellen 16-tägigen Faulung wurde ein um den Faktor 3,93 (1011:257) erhöhter Raum-Zeit-Umsatz ermittelt. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß der anaerobe Abbauprozess durch den vorgeschalteten Zellaufschluß signifikant beschleunigt werden kann. So wird es möglich, auch bei sehr verkürzten Reaktionszeiten übliche Abbaugrade zu erreichen. Dies bedeutet ein enormes Einsparpotential im Hinblick auf Faulbehältervolumen. Überlastete Faulbehälter können dauerhaft entlastet und Neubauten deutlich kleiner bemessen werden.

**Tabelle 1:** Einfluß der Ultraschalldesintegration auf die Abbauleistung im Fermenter und den Abbaugrad von Überschußschlamm

| Überschußschlamm | Verweilzeit<br>[d] | Abbauleistung<br>[g oTR <sub>ab</sub> /(m <sup>3</sup> <sub>Reaktor</sub> *d)] | oTR-Abbau<br>[%] |
|------------------|--------------------|--|------------------|
| unbehandelt      | 16                 | 257  | 32,3             |
| desintegriert    | 16                 | 335  | 42,4             |
| unbehandelt      | 8                  | 430  | 27,0             |
| desintegriert    | 8                  | 603  | 38,1             |
| desintegriert    | 4                  | 1011   | 32,0             |

## 6. Forschung und Entwicklung

Das weitreichende Potential der Klärschlammbehandlung mit Ultraschall wurde bereits von verschiedenen internationalen Arbeitsgruppen aufgezeigt, siehe Tabelle 2. Jorgensen & Kristensen (1996) verwiesen auf die Eignung einer sehr kurzzeitigen Ultraschallbehandlung zur Zerstörung fädiger Schlammorganismen. Als Steuerungselement wurde vorgeschlagen, die Ultraschallbehandlung zur Kontrolle der Fädigkeit von Belebtschlamm in den Abwasserreinigungsprozeß zu integrieren. Der Zellaufschluß mit Ultraschall zur Extraktion intrazellulärer Bestandteile wird bereits seit mehreren Jahren industriell genutzt (Harrison, 1991). Eigene Untersuchungen ergaben, daß das Klärschlamm desintegrat als interne Kohlenstoffquelle für den Denitrifikationsprozeß geeignet ist (Nickel *et al.*, 1998). Shimizu *et al.* (1993) zeigten, daß infolge des Ultraschallaufschlusses der anaerobe Schlammabbau mit einer zehnfach erhöhten Geschwindigkeit gegenüber der konventionellen Stabilisierung erfolgen kann. Darüber hinaus wurde der organische Restanteil im stabilisierten Klärschlamm signifikant reduziert.

Die neue Entwicklung von Hochleistungsreaktoren ermöglicht die Behandlung großer Schlammengen in kleinen Aufschlußgeräten (Schneider, 1998; Mues & Peiffer, 1999). Heute stehen modular aufgebaute Durchflußreaktoren für nahezu alle Kläranlagengrößen zur Verfügung (Abb. 7). Diese Hochleistungsreaktoren werden seit kurzem von der Firma WAVES Wasser- und Umwelttechnologien vermarktet, die als junges Start-up-Unternehmen aus den Forschungsarbeiten an der TU Hamburg-Harburg hervorgegangen ist. Aufgrund des Konstruktionsprinzips und der verhältnismäßig großen durchströmten Querschnitte weist der Ultraschallreaktor eine hohe Betriebssicherheit auf. Eine Einrichtung zur Abtrennung von Störstoffen (Grobstoffe, Steine, Fasern, etc.) ist auch bei Verwendung hoher Schlammfeststoffkonzentrationen nicht notwendig. Die Einbindung der kompakten Ultraschallreaktoren kann zügig, flexibel und ohne großen Materialaufwand erfolgen. Hierfür muß ausschließlich ein Stromanschluß sowie eine Schlammzuleitung und -ableitung bereitgestellt werden.



Tabelle 2: Forschung und Anwendungen des Ultraschalls in der Schlammbehandlung

| <i>Ultraschallanwendung zur</i>  | <i>Literatur</i>   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intensivierung der Schlammfäulung</li> </ul>                              | Shimizu <i>et al.</i> (1993); Neis <i>et al.</i> (1997); Nickel (1999); Tiehm <i>et al.</i> (2001) |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zerstörung von Bläh- und Schwimmschlamm</li> </ul>                        | Jorgensen & Kristensen (1996); Tiehm <i>et al.</i> (1998)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktion interner Kohlenstoffquellen für die Denitrifikation</li> </ul> | Nickel <i>et al.</i> (1998)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entkeimung von Klärschlamm</li> </ul>                                     | Jean <i>et al.</i> (1999)  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserung der Schlammsedimentation</li> </ul>                          | Wiebusch (1996); Spengler & Jekel (1999)   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Verbesserung der Schlammentwässerbarkeit</li> </ul>                       | Friedrich <i>et al.</i> (1999)   |

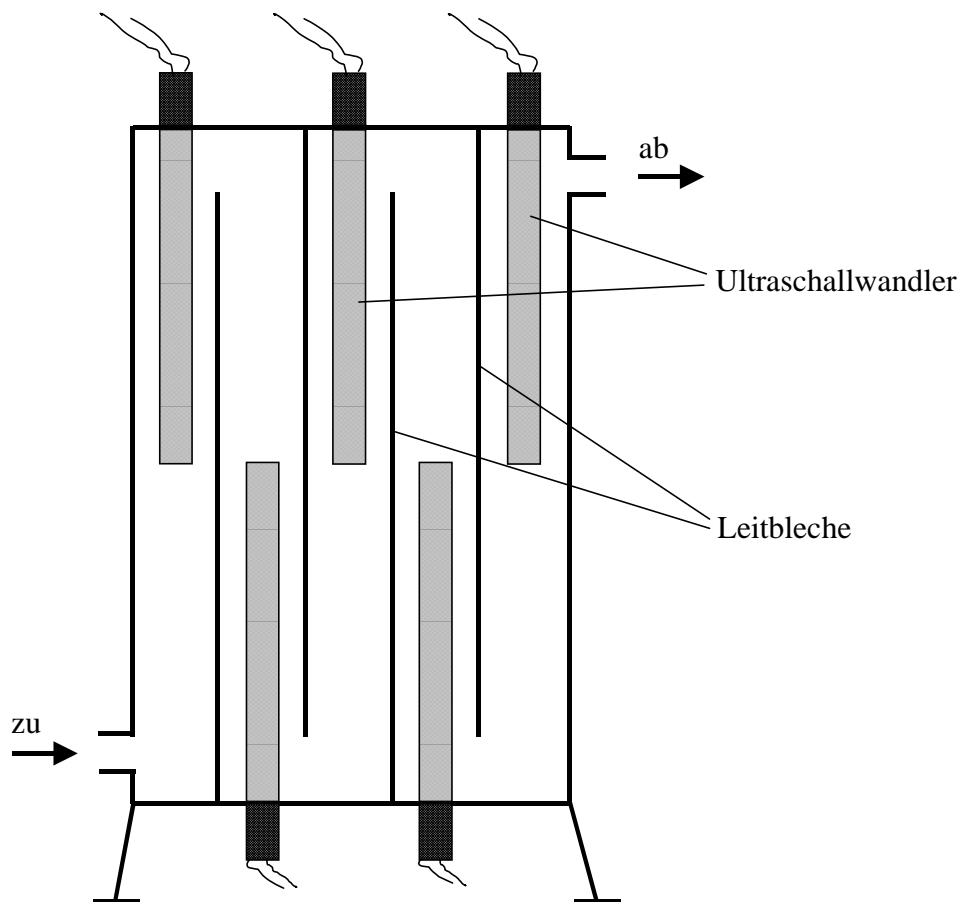


Abbildung 7: Schema eines großtechnischen Ultraschallmoduls (WAVES Wasser- und Umwelttechnologien, Hamburg) zur Desintegration von Klärschlamm

## 7. Zusammenfassung

Aufgrund der in den vergangenen Jahren stattgefundenen Forschung und Entwicklung stehen heute innovative und voll praxistaugliche Ultraschallanwendungen für die Klärschlammbehandlung zur Verfügung. Bei der niederfrequenten Ultraschallbehandlung werden infolge der ausgelösten Kavitation extreme hydromechanische Kräfte erzeugt, die gezielt zur Veränderung der Schlammstruktur oder zum Zellaufschluß genutzt werden können. Die Bläh- und Schwimmschlammbehandlung mit Ultraschall führt zur Zerstörung der fädigen Strukturen und damit zur Verbesserung der Schlammsedimentation. Der durch den Aufschluß der Schlammzellen freigesetzte CSB eignet sich als bioverfügbare Kohlenstoffquelle für die Denitrifikation. Bei der Faulung desintegrierten Klärschlammes wird infolge des erhöhten Angebots an gelöstem Substrat die Geschwindigkeit des anaeroben Abbaus signifikant gesteigert. In den dargestellten Versuchen konnte die Faulzeit von 16 auf 4 Tage ohne Leistungseinbußen reduziert werden. Die erhöhte Abbaugeschwindigkeit führt zu gesteigertem Abbaugrad, so daß der Restgehalt an organischer Masse im Faulschlamm reduziert und die Ausbeute an energetisch verwertbarem Biogas verbessert wird.

## Danksagung

Die Verfasser danken dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) für die finanzielle Unterstützung der Projekte. Weiterer Dank gilt den Mitarbeitern der Kläranlage Bad Bramstedt für die praktische Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

## Literatur

- Abwassertechnische Vereinigung (1994). Arbeitsbericht der ATV/BDE/VKS-Arbeitsgruppe 3.1.1: Stabilisierungskennwerte für biologische Stabilisierungsverfahren. Korrespondenz Abwasser, Heft 3, 41: 455-460.
- Abwassertechnische Vereinigung (2000). Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 3.1.6: Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlamm-desintegration. Korrespondenz Abwasser, Heft 4, 47: 570-576.
- Eastman, J.A., Ferguson, J.F. (1981). Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. Journal WPCF, Heft 3, 53: 352-366.
- Friedrich, H., Potthoff, A., Friedrich, E., Hielscher, H. (1999). Improving settling properties and dewaterability of sewage sludges by application of the ultrasound. *In*: Tiehm, A., Neis, U. (Hrsg.) Ultrasound in environmental engineering. TUHH Reports of Sanitary Engineering, 25, Technische Universität Hamburg-Harburg: 245-255.
- Harrison, S.T.L. (1991). Bacterial cell disruption: a key unit operation in the recovery of intracellular products. Biotechnol. Adv., 9: 217-240.
- Jean, D.S., Chang, B.V., Liao, G.S., Tsou, G.W., Lee, D.J. (1999). Reduction of microbial density level in sewage sludge through pH adjustment and ultrasonic treatment. *In*: IAWQ Specialised Conference on Disposal and Utilisation of Sewage Sludge - Treatment Methods and Application Modalities, Athen, Griechenland: 177-184.

- Jorgensen, P.E., Kristensen, G.H. (1996). Sonication on activated sludge – increased settleability through breakup of filaments. *In: IAWQ 18<sup>th</sup> Biennial International Conference: Water Quality International '96, Singapore, Conference Preprint Book 2: 70-77.*
- Knoop, S. (1997). Untersuchungen zum Vorkommen von *Microthrix parvicella* in Kläranlagen mit Nährstoffelimination. Dissertation Universität Hannover. *In: Rosenwinkel (Hrsg.) Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 101.*
- Lemmer, H., Eikelboom, D., Kappeler, R., Klein, B., Kunst, S., Matsché, N., Popp, W., Schön, G., Wagner, F., Wolfgramm, J., Zander-Hauck, S. (1998). Blähschlamm, Schwimmschlamm und Schaum in Belebungsanlagen - Ursachen und Bekämpfung. *Korrespondenz Abwasser, Heft 10, 45: 1959-1968.*
- Mason, T.J. (1999). Ultrasound in environmental protection - an overview. *In: Tiehm, A., Neis, U. (Hrsg.) Ultrasound in environmental engineering. TUHH Reports of Sanitary Engineering, 25, Technische Universität Hamburg-Harburg: 1-9.*
- Matsché, N., Kreuzinger, N. (1998). Blähschlamm, Schwimmschlamm, Schaum - Ursachenerkennung und Bekämpfung. *In: Kroiß H. (Hrsg.) Wiener Mitteilungen Wasser - Abwasser - Gewässer, Band 145: 141-177.*
- Mues, A., Peiffer, A. (1999). Design of ultrasound systems for low and high frequencies. *In: Tiehm, A., Neis, U. (Hrsg.) Ultrasound in environmental engineering. TUHH Reports of Sanitary Engineering, 25, Technische Universität Hamburg-Harburg: 91-99.*
- Neis, U., Nickel, K., Tiehm, A. (1997). Intensivierung der Schlammfäulung durch Klärschlamm-aufschluß mit Ultraschall. *Korrespondenz Abwasser, Heft 10, 44: 1850-1855.*
- Neis, U., Nickel, K., Tiehm, A. (2001). Ultrasonic disintegration of sewage sludge for enhanced anaerobic biodegradation. *In: Mason, T. (Hrsg.) Advances in Sonochemistry, Band 6, Elsevier Science, England, im Druck.*
- Nickel, K., Neis, U., Tiehm, A. (1998). Waste water denitrification with disintegrated sewage sludge as internal carbon source. *Biospectrum 1/98: 135.*
- Nickel, K. (1999): Improving anaerobic degradation by ultrasonic disintegration of sewage sludge. *In: Tiehm, A., Neis, U. (Hrsg.) Ultrasound in Environmental Engineering. TUHH Reports on Sanitary Engineering, 25, Technische Universität Hamburg-Harburg: 217-231.*
- Schneider, D. (1998). Technik des Ultraschallaufschlusses von Klärschlämmen. *In: Müller, J., Dichtl, N., Schwedes, J. (Hrsg.) Klärschlamm-desintegration Forschung und Anwendung. Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, Heft 61, Technische Universität Braunschweig: 49-73.*
- Shimizu, T., Kudo, K., Nasu, Y. (1993). Anaerobic waste-activated sludge digestion - a bioconversion mechanism and kinetic model. *Biotech. and Bioeng., 41: 1082-1091.*

- Spengler, J., Jekel, M. (1999). Ultrasound assisted solid-liquid separation in environmental and water technology – large scale processing performance enhancement and small scale analytical applications. *In: Tiehm, A., Neis, U. (Hrsg.) Ultrasound in Environmental Engineering. TUHH Reports on Sanitary Engineering, 25, Technische Universität Hamburg-Harburg: 189-204.*
- Tiehm, A., Nickel, K., Neis, U. (1998). Verbesserte Sedimentation von Blähschlamm durch Ultraschall. *In: Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Heft 22: 11. Fachtagung Weitergehende Abwasserreinigung als Beitrag zum Schutz von Nord- und Ostsee.*
- Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., Neis, U. (2001). Application of ultrasound for sludge disintegration and enhanced anaerobic stabilization. *Water Research, im Druck.*
- Wiebusch B. (1996). Einsatz von Ultraschall zur Behandlung von Klärschlämmen. *Awt Abwassertechnik, Heft 3: 42-47.*