

Abschlussbericht

des BMBF F/E-Vorhabens

„Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlamm mittels Ultraschall“

Finanzierung	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen	02WA0053
Laufzeit des Vorhabens	01.03.2001 – 30.06.2003
Berichtszeitraum	01.03.2001 – 30.06.2003

Projektleitung und Zuwendungsempfänger	Technische Universität Hamburg-Harburg Arbeitsbereich Abwasserwirtschaft Prof. Dr.-Ing. Uwe Neis Eißendorfer Str. 42 21073 Hamburg
Telefon:	+40 42878 3107
Telefax:	+40 42878 2684
Email-Adresse	neis@tu-harburg.de

INHALT

<u>TEIL I: KURZDARSTELLUNG</u>	3
1 <u>AUFGABENSTELLUNG</u>	3
2 <u>VORAUSSETZUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS</u>	4
3 <u>PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS</u>	5
4 <u>WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND BEI BEGINN DES PROJEKTS</u>	6
5 <u>ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN</u>	6
<u>TEIL II: AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG</u>	7
1 <u>ERGEBNIS DES VORHABENS</u>	7
1.1 <u>GRUNDLAGEN</u>	7
1.1.1 <u>Bläh-, Schwimmschlamm- und Schaumprobleme auf Kläranlagen</u>	7
1.1.2 <u>Fadenförmige Mikroorganismen</u>	7
1.1.3 <u>Bekämpfungsmethoden</u>	8
1.1.4 <u>Ultraschallanwendung zur Blähschlammbekämpfung</u>	10
1.2 <u>ZIELSETZUNG DES VORHABENS</u>	11
1.3 <u>VERSUCHSDURCHFÜHRUNG</u>	11
1.3.1 <u>Pilotanlage zur Durchführung der Langzeitversuche</u>	11
1.3.2 <u>Vorversuche mit der Pilotanlage</u>	13
1.3.3 <u>Versuchsaufbau auf den Kläranlagen</u>	13
1.3.4 <u>Begleitende Laboruntersuchungen</u>	14
1.3.5 <u>Analysen</u>	17
1.4 <u>ERGEBNISSE DER BATCHTESTS UND VORVERSUCHE</u>	19
1.4.1 <u>Analysenmethoden</u>	19
1.4.2 <u>Energieeintrag</u>	21
1.4.3 <u>Viskosität und Kavitation</u>	22
1.5 <u>EINFLUSS DER ULTRASCHALLBEHANDLUNG AUF DIE ANAEROBE STABILISIERUNG</u>	23
1.5.1 <u>Absetzverhalten</u>	23
1.5.2 <u>Organismen und strukturelle Fähigkeit</u>	26
1.5.3 <u>Schaumbildungspotenzial</u>	28
1.5.4 <u>Stabilität und Qualität der Faulung</u>	30
1.6 <u>EINFLUSS DER ULTRASCHALLBEHANDLUNG AUF DAS SYSTEM KLÄRANLAGE</u>	31
1.6.1 <u>Entwässerbarkeit des Faulschlammes</u>	31
1.6.2 <u>Erneute Entwicklung von Fadenbakterien in der Belebung</u>	32
1.7 <u>TECHNISCHE BEURTEILUNG DES VERFAHRENS</u>	33
1.8 <u>MONETÄRE BEWERTUNG DES VERFAHRENS</u>	33
1.9 <u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	34
1.10 <u>REFERENZEN</u>	36
2 <u>VERWERTUNGSPLAN</u>	38
3 <u>FORTSCHRITT IN DER BLÄH- UND SCHWIMMSCHLAMMBEKÄMPFUNG</u>	38
4 <u>VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE</u>	38

Teil I: KURZDARSTELLUNG

1 Aufgabenstellung

Bläh- und Schwimmschlamm ist ein weitverbreitetes Problem auf Kläranlagen mit biologischer Nährstoffelimination. Die Massenentwicklung fadenförmiger Mikroorganismen tritt meist saisonal auf. Dieses Phänomen ist als Bläh- und Schwimmschlamm-Bildung bekannt. Durch die Änderung der Schlammstruktur werden substantielle Betriebsprobleme verursacht. Die Abtrennung der Biomasse in der Nachklärung wird erschwert und führt bei der nachfolgenden anaeroben Stabilisierung zum Übersäumen des Faulbehälters. Die Folgen sind massive Betriebsprobleme und Einbußen in der Biogasproduktion. Keine derzeit auf dem Markt befindliche Methode ist in der Lage, den Bläh- und Schwimmschlamm jederzeit sicher zu bekämpfen oder zu verhindern.

Unsere Erfahrungen mit der Klärschlamm-Desintegration (BMBF-Projekt, Fördernr. 02 WS 9460/7) haben gezeigt, dass Hochleistungs-Ultraschall biologische Zellen wirkungsvoll zerlegt. Ziel ist nunmehr das Ultraschallverfahren dahingehend weiter zu entwickeln, dass fädige Blähschlammstrukturen wirkungsvoll zerstört werden. Gleichzeitig ist nachzuweisen, dass damit sowohl der Prozess der biologischen Abwasserreinigung als auch der der Schlammfäulung dauerhaft störungsfrei bleibt.

Wissenschaftliche Arbeitsziele sind:

- Schlammmerkmale zu bestimmen und Analysemethoden zu entwickeln, die es erlauben, eine systematische und allgemeingültige Einstufung der unterschiedlichen Bläh- und Schwimmschlämme vorzunehmen und daran den Erfolg der Beschallung zu messen,
- die Nachhaltigkeit der Ultraschallbehandlung von Blähschlämmen zu bestätigen durch den Nachweis einer ungestörten anschließenden anaeroben Stabilisierung (Pilotanlage),
- die Nachhaltigkeit der Ultraschallbehandlung von Blähschlämmen zu bestätigen durch den Nachweis, dass fädige Organismen nicht erneut im Abwasserkreislauf/Belebtschlamm nachwachsen (Laborversuche).

Technische Arbeitsziele sind:

- ein marktfähiges Verfahren zur Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlämmen zu entwickeln, welches im praktischen Kläranlagenbetrieb kurzfristig (saisonal) einsetzbar und betriebssicher ist,
- die optimale Konfiguration der Ultraschallparameter *akustische Intensität* und *Beschalldauer* zu ermitteln, um mit minimal eingetragener Energie die bestmöglichen Resultate im Hinblick auf die Zerstörung der Blähschlammstrukturen zu erzielen,
- die Kosten für das vorgeschlagene Verfahren zu errechnen,
- eine ökonomische Bewertung der Marktchancen durchzuführen.

2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Die Auswahl geeigneter Kläranlagen war eine wichtige Voraussetzung für die praktische Durchführung des Vorhabens. Folgende Merkmale waren gefragt:

- Die Kläranlagen müssen sowohl Bläh- oder Schwimmschlammprobleme in der Belegung als auch Schaumprobleme im Faulbehälter aufweisen
- Betriebsstörungen auf den Kläranlagen durch die Bläh- und Schwimmschlamm- bzw. die Schaumbildung sind evident
- Die Distanz zur Technischen Universität Hamburg-Harburg muss kurz sein (limitierte Reisekosten) und damit bei Betriebsproblemen der Pilotanlage Projektmitarbeiter schnell vor Ort sein können
- Das Einverständnis der Betriebsleiter der Kläranlagen zur Aufstellung und zum Betrieb der Pilotanlage liegt vor
- Gute Dokumentation der Betriebsabläufe.

Herkömmliche Analysen zur Beurteilung von Schlammdesintegrationswirkungen sind kaum entwickelt. Die Entwicklung von Analysemethoden, die es erlauben die Wirkung der Ultraschallbehandlung auf Schlämme zu quantifizieren war Voraussetzung für die Gestaltung des Projektes. Kriterien für die Auswahl der Analysemethoden waren:

- Nachweisbarer Zusammenhang zwischen Ultraschalldosis und gemessenem Effekt auf den Schlamm
- Praktische Anwendbarkeit, z.B. im Hinblick auf zeitlichen Aufwand, einfache Handhabung
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Nr.	Projektphase	Dauer (Monaten)					
		03.01	07.01	01.02	07.02	01.03	03.03
		- 06.01	- 12.01	- 06.02	- 12.02	- 02.03	- 06.03
A	Aufbau der mobilen Containeranlage						
A	Aufbau der mobilen Containeranlage						
B	Anpassung analytischer Methoden zur Identifizierung der Schlammorganismen und Entwicklung von Merkmalen zur Beurteilung des Erfolges der Blähschlammbekämpfung						
B	Anpassung analytischer Methoden zur Identifizierung der Schlammorganismen und Entwicklung von Merkmalen zur Beurteilung des Erfolges der Blähschlammbekämpfung						
C1	Ultraschallbehandlung von Bläh- und Schwimmschlamm, Kläranlage 1						
C1	Ultraschallbehandlung von Bläh- und Schwimmschlamm, Kläranlage 1				Bis 08/02		
C2	Ultraschallbehandlung von Bläh- und Schwimmschlamm, Kläranlage 2						
C2	Ultraschallbehandlung von Bläh- und Schwimmschlamm, Kläranlage 2				Ab 10/02		
C3	Ultraschallbehandlung von Bläh- und Schwimmschlamm, Kläranlage 3						
C3	Ultraschallbehandlung von Bläh- und Schwimmschlamm, Kläranlage 3						
D	Begleitende Batch-Tests						
D	Begleitende Batch-Tests				X		
E	Kosten und Bewertung des Verfahrens						
E	Kosten und Bewertung des Verfahrens						

Legende:

	Zeitraumen der geplanten Projektphase
	Tatsächlich in Anspruch genommener Zeitraumen
X	Unterbrechung der Batch-Tests wegen Krankheit der CTA (09.02-12.02)

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Beginn des Projekts

In vielen Kläranlagen entwickeln sich in periodischen Abständen fadenförmige Mikroorganismen im Belebtschlamm. Dieses Phänomen ist als Bläh- und Schwimmschlamm-Bildung bekannt. Durch diese Änderung der Schlammstruktur werden substantielle Betriebsprobleme verursacht. Die übliche nachfolgende anaerobe Stabilisierung des Bläh- und Schwimmschlammes im Faulbehälter ist oftmals nicht möglich.

In der Abwasserreinigung wird generell zwischen unspezifisch und spezifisch wirkenden Maßnahmen zur Blähschlamm-Bekämpfung unterschieden. Die unspezifischen bestehen i.d.R. aus der Zugabe von Chemikalien mit dem Ziel der Beschwerung der Schlammflocken oder der Zerstörung der Organismen durch Oxidation. Unspezifische Maßnahmen wirken auf die gesamte Biozönose und schädigen oftmals die Gesamtheit der Organismen. Die spezifischen Maßnahmen verringern die Selektionsvorteile der Fadenorganismen und eliminieren diese gezielt aus dem System. Die von *Microthrix parvicella* dominierten Bläh- und Schwimmschlämme lassen sich gegenwärtig nur durch Zugabe von Polyaluminiumchloriden, die sehr teuer sind, sicher bekämpfen.

Für die Bekämpfung von Schaumproblemen in der Praxis werden folgende Maßnahmen empfohlen (Westlund et al 1998):

- Absenken des Schlammspiegels im Faulbehälter,
- Installation von Schaumrührern,
- Zugabe von Entschäumern,
- Vorbehandlung des Schlammes durch Erhitzen,
- Separate Entsorgung des Überschussschlammes.

Diese Ansätze sind jedoch sowohl unter technischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten fragwürdig.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aus dem vorangegangenen BMBF-Projekt 02 WS 9460/7 wissen wir, dass Hochleistungs-Ultraschall biologische Zellen wirkungsvoll zerlegt. Für die Anwendung der Ultraschalltechnik zur Blähschlamm-Bekämpfung wurde ein neuer Hochleistungs-Ultraschallreaktor unter Berücksichtigung der bisherigen Forschungsergebnisse konstruiert. Der Hersteller Sonotronic Nagel GmbH (Becker-Görling-Str. 17, 76307 Karlsbad-Ittersbach) baute den Hochleistungs-Ultraschallreaktor nach Maßgabe der Projektgruppe der Technischen Universität Hamburg-Harburg, die das konstruktive Design entwickelt hat. Im Frühjahr 2002 wurde ein zweiter Reaktor durch den Hersteller ebenfalls kostenlos bereit gestellt, so dass die finanzielle Beteiligung der Herstellerfirma an diesem Vorhaben insgesamt mit 120.000 € (ursprünglich 60.000 €) zu bewerten ist.

Teil II: Ausführliche Darstellung

1 Ergebnis des Vorhabens

1.1 Grundlagen

1.1.1 Bläh-, Schwimmschlamm- und Schaumprobleme auf Kläranlagen

Im Zuge der weitergehenden Abwasserreinigung werden heute Belebungsverfahren mit sehr geringen Schlammbelastungen ($B_{TS} < 0,1 \text{ kg BSB}_5 / (\text{kg TS} \cdot \text{d})$) betrieben. Grund dafür ist die angestrebte Nährstoffelimination. Die Massenentwicklung fadenförmiger Mikroorganismen, die sich unter diesen veränderten Bedingungen besonders gut entwickeln, bewirkt massive Betriebsstörungen auf den Kläranlagen, wie:

- Schlammabtrieb aus der Nachklärung,
- Steigender Schlammindex,
- Reduzierung der Nitrifikationsleistung,
- Überschäumen des Faulbehälters,
- Verringerung des nutzbaren Gasraums im Faulbehälter,
- Geringere Gasproduktion im Faulbehälter.

Generell werden drei unterschiedliche Erscheinungsformen dieser „Schlammartung“ unterschieden. **Blähschlamm** ist definiert als schlecht absetzbarer Schlamm mit einem Verdünnungsschlammindex (ISV) $> 150 \text{ mL/g}$, der eine hohe Anzahl an Fadenorganismen aufweist. **Schwimmschlamm** und **Schaum** werden verursacht durch die Anreicherung fadenförmiger Organismen an der Grenzfläche Wasser/Luft, vor allem an der Wasseroberfläche. Hat sich die noch keine feste Schlammdecke auf den Belebungs- oder Nachklärbecken gebildet, spricht man von Schaum. Verfestigt sich der Schaum und bildet dichte Schlammdecken auf den Belebungs- oder Nachklärbecken spricht man von Schwimmschlamm. Die Entstehung von Schwimmschlamm und Schaum wird von folgenden Faktoren im Abwasser begünstigt:

- Fein verteilte Gasbläschen,
- Hydrophobe Abwasserinhaltsstoffe und/oder Zellstrukturen,
- Oberflächenaktive Substanzen.

Schaumbildung tritt oftmals auch als eigenständiges Phänomen im Faulbehälter auf. Neben der Massenentwicklung von Fadenorganismen kann Schaumbildung in der Faulung andere Ursachen haben. Prinzipiell unterscheidet man bei den in der Faulung entstehenden Schäume die mechanisch stabilen von den mechanisch instabilen, also durch mechanische Einwirkungen (z.B. Rühren) zerstörbare Schäume. Mechanisch instabile Schäume werden sowohl von Fadenorganismen als auch von flotierenden Fetten verursacht. Mechanisch stabile Schäume dagegen entstehen durch instabile Faulprozesse oder hydrophobe Substanzen (Westlund et al. 1998). Grundsätzlich besteht jedoch ein enger ursächlicher Zusammenhang zwischen der Fädigkeit in der aeroben Abwasserreinigungsstufe und der Schaumbildung im Faulbehälter (Knoop 1997).

1.1.2 Fadenförmige Mikroorganismen

In stickstoff- und phosphoreliminierenden Anlagen ist der Hauptverursacher der Bläh- und Schwimmschlammprobleme *Microthrix parvicella*. Dieser Fadenorganismus tritt häufig in Kombination mit anderen Fadenbakterien, wie Typ 0041/0675, *Nostocoida limicola*, Typ 1851, Typ 0092 und Typ 0914, auf.

Microthrix parvicella

Zwar ist die endgültige taxonomische Einordnung noch nicht abgeschlossen, aber eine umfassende taxonomische Charakterisierung ergab, dass *Microthrix parvicella*-Isolate weltweit eine sehr große genetische Ähnlichkeit aufweisen. Sie sind weitläufig verwandt mit den *Nocardioformen Actinomyceten* (Schade und Lemmer 2002).

Als wichtigste Selektionsfaktoren für *Microthrix parvicella* sind bekannt:

- Niedrige Temperaturen, optimal 10-15°C,
- Niedrige Schlammbelastung, <0,1 kg BSB₅/(kg TS * d),
- Hohes Schlammalter,
- Langkettige Fettsäuren (LKFS) im Abwasser, sowie
- Das Vorhandensein reduzierter Stickstoffverbindungen.

Durch mikroautoradiographische in situ-Methoden wurde bestätigt, dass die wichtigsten Substratanforderungen LKFS (insbesondere Ölsäure), reduzierte Stickstoff-, Phosphor und Schwefelverbindungen sind (Andreasen und Nielsen 2000). Gleichzeitig wurde nachgewiesen, dass *Microthrix parvicella* LKFS auch unter anaeroben Bedingungen aufnehmen und akkumulieren kann. Zusammen mit der Einlagerung von Polyphosphat, welches als Energiequelle dienen kann, weist dies auf die Überlebensstrategie von *Microthrix parvicella* im anaeroben Milieu hin.

Die Temperaturtoleranz des Organismus zeigt sich in Untersuchungen von Mamais et al. (1998), bei denen *Microthrix parvicella* ab 29°C vollständig aus der Biozönose eliminiert wurde. Es zeigt sich mit zunehmender Temperatur eine Verkürzung der Fadenlängen und nach Foot et al (1992) auch eine Reduzierung der Schaumbildung. Untersuchungen von Knoop (1997) zeigen wiederum, dass *Microthrix parvicella* im anaeroben Milieu bei einer Temperatur von ca. 35°C unter Verkürzung der Fadenlängen überleben können und die Schaumbildung hiervon unbeeinflusst ist.

Die Hydrophobizität der Zelloberflächen insbesondere von älteren *Microthrix parvicella* – Kulturen begünstigen die Schaum- und Schwimmschlamm-Bildung, indem sich Gasbläschen in den Fadenstrukturen einlagern können und der Schlamm flotiert.

1.1.3 Bekämpfungsmethoden

Blähschlamm, Schwimmschlamm und Schaum werden meist bereits in der Abwasserreinigungsstufe bekämpft. Nachfolgend werden einige Bekämpfungsmethoden mit ihren Vor- und Nachteilen vorgestellt. Generell sind die Bekämpfungsmaßnahmen in unspezifisch wirkende und in spezifisch wirkende zu unterscheiden.

Die unspezifischen Maßnahmen wirken auf die gesamte Biozönose und schädigen oftmals die Gesamtheit der Organismen. Zu diesen Maßnahmen zählt man:

Tabelle 1: Unspezifische Maßnahmen zur Blähschlammbekämpfung

Maßnahme	Wirkungsweise	Literatur
Zugabe von Schichtsilikaten/Talg	Beschwerung des Schlamms, Nachteil: große Überschussschlammengen	ATV-Arbeitsgruppe 2.6.1 1988
Zugabe von Kalk	Kurzzeitige Anhebung des pH-Werts auf 10-11, stärkere Schädigung der Fäden, da exponierte Lage außerhalb der Flocken, Nachteil: Einbruch der Reinigungsleistung	ATV-Arbeitsgruppe 2.6.1 1988
Zugabe von Oxidationsmitteln (Ozon, H ₂ O ₂ , Chlor)	Bei geringer Dosierung durchaus Erfolge zu verzeichnen, auf Chlor sollte aber wegen der Umweltverträglichkeit verzichtet werden	Lemmer 1996
Zugabe organischer Flockungsmittel	Beschwerung des Schlamms, Verbesserung der Agglomeration des Schlamms, bei Überdosierung allerdings Umkehrung des Effekts	ATV-Arbeitsgruppe 2.6.1 1998
Zugabe von Bakterien-/Enzympräparaten	Die Dosierung muss in entsprechend hohen Mengen erfolgen, daraus ergeben sich sehr hohe Betriebskosten	Kunst et al 2000

Spezifische Maßnahmen dagegen wirken speziell gegen die Fadenorganismen und eliminieren diese gezielt aus dem System.

Tabelle 2: Spezifische Maßnahmen zur Blähschlammbekämpfung

Maßnahme	Wirkungsweise	Literatur
Erhöhung der O ₂ -Konzentration auf ≥ 2 mg/L	Förderung der flockenbildenden Bakterien, Verringerung des Selektionsvorteils für Fadenbildner	Lemmer 1996
Erhöhung der Schlammbelastung	Nur bis zu einer Größenordnung von 0,15 kg/(kg*d) möglich, sonst Auswaschung von Nitrifikanten	Lemmer 1996
Aerobe Selektoren	Nicht für Low F/M Bakterien geeignet	Kunst et al. 2000

Maßnahme	Wirkungsweise	Literatur
Anoxischer Selektor	Erfolgreich gegen Actinomyceten, Keine Maßnahme gegen <i>Microthrix parvicella</i>	Kunst et al. 2000
Schwimmschlammräumung	Räumung und getrennte Entsorgung des Schwimmschlammes, Austrag der Organismen, allerdings keine Bekämpfung	Lemmer 1996
Zugabe von PAC	Polyaluminiumchloride wirken speziell gegen <i>Microthrix</i> , die eine Empfindlichkeit gegenüber Aluminium aufweisen, allerdings wirken nur speziell für die Bläh- und Schwimmschlammbekämpfung entwickelte Produkte. Nachteil: sehr hohe Betriebskosten	Kunst et al. 2000

Microthrix parvicella, Hauptverursacher heutiger Bläh- und Schwimmschlammprobleme, weist eine Empfindlichkeit gegenüber Aluminium auf. Einfache Aluminiumsalze, die auch zur Fällung eingesetzt werden, wirken aber nur bedingt gegen *Microthrix parvicella* dominierten Bläh- und Schwimmschlamm. Nur speziell für die Bläh- und Schwimmschlammbekämpfung entwickelte Polyaluminiumchloriden können derzeit eine Elimination von *Microthrix parvicella* garantieren. Diese Produkte sind allerdings sehr kostspielig.

Um Schaumbildung im Faulbehälter zu unterbinden, gibt es unterschiedliche Ansätze (Westlund et al. 1998):

- Absenken des Schlammspiegels im Faulbehälter,
- Installation von Schaumrührern,
- Zugabe von Entschäumern,
- Vorbehandlung des Schlammes durch Erhitzen,
- Separate Entsorgung des Überschussschlammes.

Diese Ansätze sind jedoch sowohl unter technischen als auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten fragwürdig.

1.1.4 Ultraschallanwendung zur Blähschlammbekämpfung

Ein neuer Ansatz zur Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlamm ist die Anwendung niederfrequenten Ultraschalls. Unter Ultraschall versteht man den Bereich von Schallwellen jenseits des menschlichen Hörvermögens (> 20 kHz). In wässrigen Medien bewirkt der Ultraschall eine periodische Kompression und Dekompression. Durch diese Beanspruchung des Mediums entstehen bevorzugt an Instabilitätsstellen (z. B. suspendierte Partikel) kleine mit Gas gefüllte Hohlräume, so genannte Kavitationsbläschen. Die Bläschen pulsieren mit der periodischen Bewegung des Mediums, wobei ihre Größe zunimmt. Bei Erreichen der kritischen Größe implodieren die Bläschen unter Freisetzung lokaler Druck- und Temperaturspitzen (Neis 2001). Die hohen lokalen Scherkräfte führen zu einer mechanischen Zerstörung der Fadenstrukturen des Schlammes.

Parallel laufen in den Kavitationsblasen oder in deren Nähe sonochemische Prozesse ab, d.h. die Bildung von H und OH Radikalen aus Wasserdampfmolekülen. Insbesondere hydrophobe Moleküle, Polymere oder Partikel sind den Radikalenreaktionen ausgesetzt. Es ist deshalb nicht auszuschließen, dass die Ultraschallanwendung auch die Hydrophobizität der Zelloberflächen von Fadenbildnern maßgeblich beeinflusst.

1.2 Zielsetzung des Vorhabens

Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines marktfähigen Verfahrens zur Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlamm mittels Ultraschall. Die Ultraschallbehandlung führt zum mechanischen Aufbruch der filamentösen Schlammstrukturen und zur Veränderung der Oberflächeneigenschaften der Schlammmatrix. Die erfolgreiche Ultraschallbehandlung wird den nachfolgenden ungestörten anaeroben Abbau des Schlammes ohne Schaumprobleme ermöglichen. Ein Chemikalienzusatz ist nicht notwendig. Im Projekt ist vorgesehen, daß ein Hochleistungs-Ultraschallreaktor als Teil einer mobilen Behandlungsanlage in einem Container aufgebaut wird. Im Container sind ebenfalls fünf 200-Liter-Faulbehälter installiert, um die Effekte der Beschallung der Blähschlämme auf die anaerobe Stabilisierung zu überprüfen.

Mit diesem Konzept wird den Anforderungen der Praxis entsprochen, nämlich ein flexibles Verfahren zu entwickeln, das mobil ist und saisonal und kurzfristig auf Kläranlagen zum Einsatz kommen muss.

Die Ziele des Forschungsvorhabens im einzelnen sind:

Wissenschaftliche Arbeitsziele

- Schlammmerkmale zu bestimmen und Analysenmethoden zu entwickeln, die es erlauben, eine systematische und allgemeingültige Einstufung der unterschiedlichen Bläh- und Schwimmschlämme vorzunehmen und daran den Erfolg der Beschallung zu messen,
- die Nachhaltigkeit der Ultraschallbehandlung von Blähschlämmen zu bestätigen durch den Nachweis einer ungestörten anschließenden anaeroben Stabilisierung (Pilotanlage),
- die Nachhaltigkeit der Ultraschallbehandlung von Blähschlämmen zu bestätigen durch den Nachweis, dass fädige Organismen nicht erneut im Abwasserkreislauf/Belebtschlamm nachwachsen (Laborversuche).

Technische Arbeitsziele

- ein marktfähiges Verfahren zur Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlämmen zu entwickeln, welches im praktischen Kläranlagenbetrieb kurzfristig (saisonal) einsetzbar und betriebssicher ist,
- die optimale Konfiguration der Ultraschallparameter *akustische Intensität* und *Beschalldauer* zu ermitteln, um mit minimaler eingetragener Energie die bestmöglichen Resultate im Hinblick auf die Zerstörung der Blähschlammstrukturen zu erzielen,
- die Kosten für das vorgeschlagene Verfahren zu errechnen,
- eine ökonomische Bewertung der Marktchancen durchzuführen.

1.3 Versuchsdurchführung

1.3.1 Pilotanlage zur Durchführung der Langzeitversuche

Die eingesetzte Pilotanlage besteht aus einer Pumpe, einer Schlammvorlage inklusive Rührer, 4 Fermentern mit je 200 L Volumen und einem Ultraschallmodul mit 5 KW

installierter Leistung (Abb. 2). Die Fermenter sind ausgestattet mit einer automatischen Temperaturregulierung und einem Rührwerk. Das Ultraschallmodul besteht aus 5 Einzelsonotroden, welche separat über die Generatoren betrieben werden können. Die Leistung der Generatoren ist zwischen 50 % und 100 % (~ 500 – 1000 W) stufenlos regelbar. Der Energieeintrag und somit die Ultraschalldosis werden durch die Variation der Generatorleistung und durch die Beschalldauer (= Verweilzeit im Ultraschallreaktor) bestimmt. Die Verweilzeit im Reaktor ist abhängig vom Volumenstrom des Schlammes, der durch die Pumpenförderleistung regelbar ist.



Abb. 1: Pilotanlage von außen



Abb. 2: Pilotanlage von innen; links: Fermenter, rechts: Hochleistungs-Ultraschallreaktor

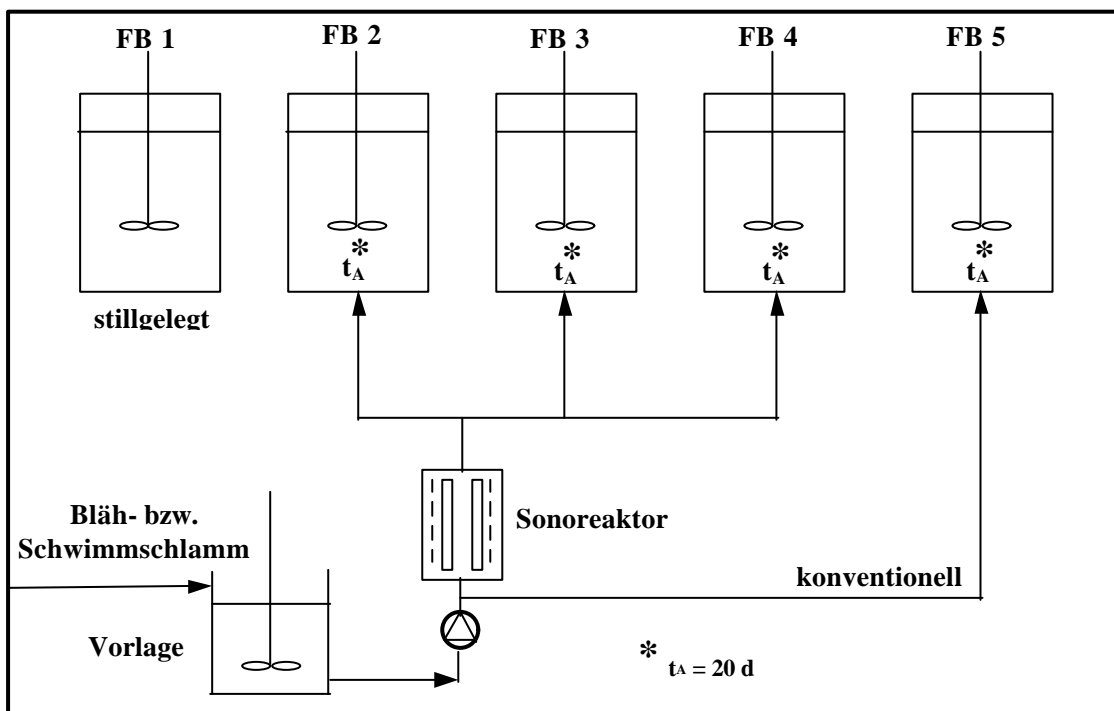


Abb. 3: Schema der Pilotanlage

1.3.2 Vorversuche mit der Pilotanlage

Ziel der Vorversuche mit der Pilotanlage war die Zerstörung der Fadenstrukturen im Überschussschlamm bei möglichst geringem Energieeintrag. Da der Energieeintrag sowohl vom Volumenstrom des Schlammes als auch von der eingetragenen elektrischen Leistung abhängt, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, bei denen Durchflüsse zwischen 2 und 16,7 L/min gewählt wurden. Bei jedem Durchfluss wurde die Generatorleistung zwischen 50 und 100% variiert. Als Parameter zur Quantifizierung der Fadenzerstörung wurde der Schlammindex herangezogen. Die Konfiguration der Ultraschallparameter des besten Ergebnisses sollte für die Langzeitversuche übernommen werden. Der Schlamm wurde in dieser Phase noch nicht ausgefault.

1.3.3 Versuchsaufbau auf den Kläranlagen

Schaumbildung im Faulbehälter auf allen besuchten Kläranlagen entsteht vor allem im Frühjahr und im Herbst, wenn die Belebungs- und Nachklärbecken größtenteils eine dichte Schaumdecke aufweisen. Alle Kläranlagenbetreiber geben an, dass die Probleme seit der Erweiterung der Anlagen auftreten. Auf der Kläranlage Brunsbüttel wird der Überschussschlamm aus diesem Grund seit 1997 nicht mehr ausgefault.

In unseren Untersuchungen wurde immer nur Überschussschlamm mit Ultraschall behandelt und anschließend ausgefault, da die Fadenorganismen i.d.R. mit dem Überschussschlamm in die Faulung gelangen. Die Einbindung der Pilotanlage erfolgte im Überschussschlammstrom nach der separaten Überschussschlammeindickung. Nur auf der Kläranlage Brunsbüttel wird Überschussschlamm nicht separat eindickt (siehe oben), dort wurden die Versuche daher mit nicht eingedicktem Überschussschlamm durchgeführt.

Die Kenndaten der Kläranlagen und die Randbedingungen für den Versuchsaufbau werden in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 3: Ausgewählte Kläranlagen und Versuchsbedingungen

Kläranlage	Reinfeld	Brunsbüttel	Winsen
Versuchszeitraum 1 Versuchszeitraum 2	02.04.02 – 20.06.02 21.06.02 – 31.07.02	20.10.02 – 21.02.03	01.03.03 – 31.05.03
Einwohnerwerte	9000	9000	50000
Schlammtypus in der Belebung	Schwimmschlamm	Blähschlamm	Schwimmschlamm
Schlammeindickung	Statisch	Keine	Siebband
Einsatz von Flockungsmitteln	Keine	Keine	Kationische Polymere

Kläranlage	Reinfeld	Brunsbüttel	Winsen
Faulzeit (Tage)	30	20	18

Pilotanlage

Schlammzufuhr	Eingedickter Überschussschlamm	Nicht eingedickter Überschussschlamm	Eingedickter Überschussschlamm
Faulzeit (Tage)	20	20	20
Mittlerer TR der eingedickten ÜSS (%)	2,5	0,5	3
Spezifischer Ultraschall-Energieeintrag zur Behandlung der Schlämme (Wh/L):			
Fermenter Nr. 2	8,3 (5,5 ab 21.06.02)	5,5	5,5
Fermenter Nr 3	8,3	8,3	8,3
Fermenter Nr. 4	16,7	16,7	16,7
Fermenter Nr. 5	Kontrolle	Kontrolle	Kontrolle

1.3.4 Begleitende Laboruntersuchungen

1.3.4.1 Batchtests

Anhand der Batchtests werden Schlammmerkmale bestimmt und Analysemethoden entwickelt, um eine systematische und allgemeingültige Einstufung der unterschiedlichen Bläh- und Schwimmschlämme vorzunehmen und daran den Erfolg der Beschallung zu messen. Eine Reihe neuer bzw. wenig verwendeter Analysemethoden wurden auf ihre Anwendbarkeit untersucht.

Analysemethoden

Schaumbildungspotenzial und Schaumstabilität

Die Schaumentwicklung in einem Faulbehälter ist nicht unmittelbar mess- und vergleichbar. Als einheitlicher Parameter für die potenzielle Schaumentwicklung eines Schlammes im Faulbehälter wurde das Schaumbildungspotenzial entwickelt. In Anlehnung an Pagilla et al. 1998 wird das Schaumbildungspotenzial mit Hilfe eines Begasungstests ermittelt.

Man benötigt für die Durchführung einen konischen 1 L Messzylinder, eine Aquarienpumpe (Elite 801 mit 4 PSI) und einen Begasungsstein.

Der Messzylinder wird mit 500 mL Schlamm gefüllt und 15 Minuten begast. Die Schaumhöhe wird am Ende der Zeit abgelesen und prozentual auf das Originalvolumen bezogen. Sollte der Messzylinder überschäumen, ist der Versuch mit weniger Probevolumen zu wiederholen. Anschließend wird der Messzylinder 10 weitere Minuten stehengelassen und ebenfalls die Schaumhöhe ermittelt. Bezogen auf das Originalvolumen der Probe ergibt sich daraus die Schaumstabilität, ebenfalls ausgedrückt in Prozent.

Hydrophobizität

Der Anteil des belebten Schlamms, der in der Lage ist, sich an einen mit Wasser nicht mischbaren Kohlenwasserstoff zu binden, nennen wir hydrophob. Die Hydrophobizität wurde in Anlehnung an den BATH (Bacterial Adhesion to Hydrocarbons) –Test (Rosenberg et al. 1980, 1983) und der von Bleich (1993) publizierten Methode gemessen. Der verbesserte Hydrophobizitätsversuch von Knoop (1997) konnte nicht angewendet werden, da die Probenvorbereitung für unsere Aufgabenstellung nicht geeignet war.

Für die Hydrophobizitätsmessung benötigt man folgende Geräte: Wasserbad (30°C), Spektralphotometer, Reagenzgläser, Quarzküvetten, Whirlmix, Mikropipette 1-5 mL, Laborzentrifuge und Zentrifugengläser. Als Reagenz wurde n-Hexadecan (HD) eingesetzt.

Die Durchführung der Hydrophobizitätsbestimmung erfordert saubere, säuregespülte Geräte, da Anhaftungen von Detergenzien die Bestimmung beträchtlich stören können. 100 mL Überschussschlamm wurden 10 Minuten bei 10.000 min^{-1} zentrifugiert. 4 mL des Überstands wurden als Nullprobe in ein Reagenzglas pipettiert. Mit dem restlichen Überstand wurden 5 mL Überschussschlamm 1:10 verdünnt, das Pellet wurde verworfen. In 6 Reagenzgläser wurden je 4 mL des verdünnten Schlamms pipettiert. Drei der Reagenzgläser wurden zusätzlich mit 2 mL Hexadecan (HD) versetzt. Alle sieben Reagenzgläser wurden zehn Minuten bei 30°C im Wasserbad inkubiert. Anschließend wurden die Reagenzgläser zwei Minuten bei höchster Stufe auf dem Whirlmix geschüttelt. In der nachfolgenden Ruhephase von 15 Minuten findet eine Phasentrennung zwischen dem Hexadecan und der wässrigen Phase statt. Die Messung der Extinktion der wässrigen Phase erfolgt im Spektralphotometer bei einer Wellenlänge von 400 nm. Als Referenzwerte dienen die Extinktionen der Proben ohne Hexadecanzugabe.

Die Quantifizierung der Hydrophobizität erfolgt nach folgender Gleichung:

$$\text{Hydrophobizität} = \left(1 - \frac{\text{Mittelwert der Extinktionen der mit HD versetzten Proben}}{\text{Mittelwert der Extinktionen der Proben ohne Hexadecan}} \right) * 100 [\%]$$

India Ink Reverse Färbung

Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) werden zunehmend in den Zusammenhang mit fädigen, flotierenden Schlämmen gebracht. Da diese Substanzen aus Proteinen, Lipiden und Polysacchariden bestehen können, ist eine quantitative Bestimmung nur über die Bestimmung der Einzelstoffe möglich.

Um den Gehalt an EPS qualitativ nachzuweisen und deren Quantität abzuschätzen, wird in der Literatur (Kunst et al. 2000) die India Ink Reverse Färbung als einfach zu handhabende Methode angegeben. Das Prinzip dieser Methode beruht darauf, dass ein hoher Gehalt an EPS Tusche beim Eindringen in die Belebtschlammflocken behindert. Im Hellfeld des Mikroskops sind die Bereiche sichtbar, die nicht eingefärbt wurden. Ähnlich wie bei der Bestimmung der Fädigkeit wird der Gehalt an EPS mit Hilfe von Referenzabbildungen, die insgesamt 4 Kategorien unterscheiden, abgeschätzt.

Zur Durchführung wird Indische Tusche (auch normale schwarze Zeichentusche möglich) und Schlamm zu gleichen Teilen auf einem Objektträger miteinander vermischt. Es wird ein Deckgläschen aufgelegt und das Präparat sofort bei 100 – 200 facher Vergrößerung im Hellfeld beobachtet.

Viskosität

Nach ersten Erkenntnissen aus der Praxis wurde deutlich, dass die Viskosität der behandelten Schlämme einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Ultraschallbehandlung hat. Deshalb wurde in zusätzlichen Experimenten im Labor systematisch untersucht, welchen Einfluss die Viskosität beschallter Medien auf die Blasenbildung und damit Intensität der Kavitation hat. Dazu wurden Versuche sowohl mit Glycerin-Wasser-Lösungen als Modellsubstanz unterschiedlicher Viskosität als auch mit Klärschlamm (TR 0 - 3,5 %) durchgeführt. Klärschlammproben wurden ohne Flockungshilfsmittel mit einer Zentrifuge stufenweise auf bis zu 3,5 % TR eingedickt. Die Proben wurden immer 30 s lang beschallt. Die Kavitationswirkung wurde anhand der Anzahl von „Kavitationslöchern“ in einer Alufolie bestimmt, die in einem konstanten Abstand von der Ultraschall-Sonotode in der Probe fixiert war.

Der Versuchsstand bestand aus einer 1000 Watt Einzelsonotrode (Sonotronic GmbH, Ittersbach) auf Stativ und einem 1 L Becherglas inklusive Fixierung für die Aluminiumfolien.

1.3.4.2 Kontinuierliche Labortests

Mit Hilfe einer kontinuierlich betriebenen Laborkläranlage sollte der Nachweis geführt werden, dass die fadenförmigen Mikroorganismen durch die Ultraschallbehandlung nachhaltig aus dem System eliminiert werden und nicht in der Lage sind, sich erneut im Abwasserkreislauf zu entwickeln.

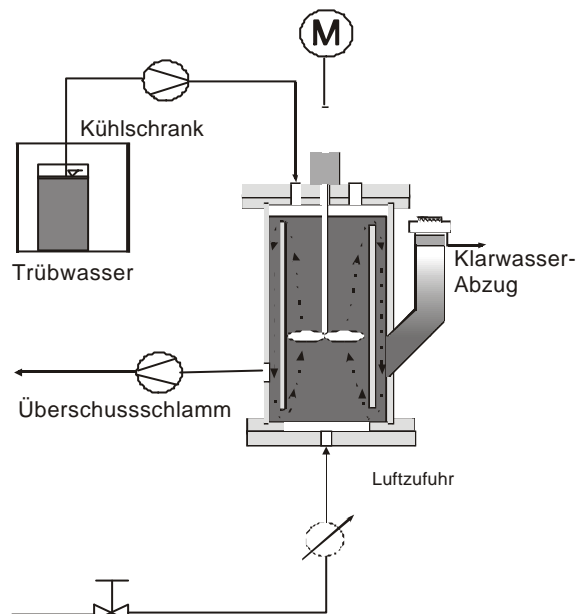


Abb. 4: Schematische Darstellung der Laboranlage

Die Laborkläranlage besteht aus drei Reaktoren mit je 10 L Volumen nach Bauart eines Schlaufenreaktors. Die Einbauten erzeugen eine Walzenströmung, die neben den Überkopfrührern für eine optimale Durchmischung sorgen. Die Belüftung erfolgt mittels Druckbelüftung über eine Tellermembran am Gefäßboden. Der Zulauf der Laborreaktoren wird automatisch über Schlauchpumpen dosiert. Die Nachklärung ist direkt an den Reaktoren integriert; der Klarwasserabzug ist als Überlauf konzipiert. Anfallender Überschussschlamm wird der Anlage manuell entnommen.

Für die Versuche wurde Belebtschlamm eingesetzt, der keine Fadenbakterien aufwies. Das zugeführte Substrat bestand für die Einfahrphase der Reaktoren aus synthetischem Abwasser gemäß DIN EN ISO 9887. Nach Abschluss der Einfahrphase wurde Trübwasser aus den Fermentern der Pilotkläranlage als Substrat eingesetzt. Hierzu wurden die ausgefaulten Schlämme der Pilotanlage zentrifugiert und der Überstand als Trübwasser eingesetzt. Da das Nährstoffverhältnis nicht dem eines Kläranlagenzulaufs entspricht, wurde es durch die Dosierung von Ethanol als Kohlenstoffquelle angeglichen. Im Mittel wurde ein Nährstoffverhältnis von CSB:N:P = 200:5:1 erreicht.

Die Abbauleistung der Laborkläranlagen wurde anhand der Parameter CSB, N und P im Zulauf und im Ablauf der Anlagen überprüft. Der Belebtschlamm wurde regelmäßig der lichtmikroskopischen Analyse unterzogen, um die Bildung von Fadenbakterien zu beobachten.

1.3.5 Analysen

1.3.5.1 Physikalische Messgrößen

Trockenrückstand und organischer Trockenrückstand

Als Trockenrückstand (TR) eines Schlammes bezeichnet man den nach Trocknung erhaltenen Massenanteil fester Substanz im Schlamm. Der Trockenrückstand wird in % angegeben. Bestimmung des Trockenrückstands erfolgt nach DIN 38414 – S2.

Als organischen Trockenrückstand (oTR) bezeichnet man den durch das Glühen bei 550 °C der Trockenmasse eines Schlammes oder Sediments unter bestimmten Bedingungen als Gas entwichener Massenanteil. Die Bestimmung des oTR erfolgt nach DIN 38414 – S3.

Schlammvolumenanteil und Schlammindex

Unter dem Schlammvolumenanteil versteht man den Anteil des Volumens, den der belebte Schlamm eines Schlammwassergemisches nach ungestörtem Absetzens innerhalb von 30 Minuten einnimmt. Der Schlammvolumenanteil wird ausgedrückt in mL/L.

Der Schlammindex ist definiert als Quotient aus Schlammvolumenanteil und Trockenmasse eines Schlammes. Der Schlammindex wird angegeben in mL/g. Die Bestimmung des Schlammvolumenanteils und des Schlammindex erfolgt nach DIN 38414 – S10.

Schaumbildungspotenzial

Das Schaumbildungspotenzial wurde als maßgeblicher Parameter herangezogen, das Schaumbildungsvermögen im Faulbehälter abzubilden. Es wurde in Anlehnung an die Methode von Pagilla et al. (1998) bestimmt. 500 mL Schlamm wird in einem 1 L Standard-Messzylinder für 15 min feinblasig belüftet. Das Schaumbildungspotenzial wird in Prozent des Original-Probevolumens ausgedrückt.

Viskosität

Die Viskosität von Schlammproben wurde mit dem Rotationsviskosimeter VISCO 88, Bohlin Instruments, gemessen.

Capillary Suction Time (CST)

Der CST-Test ist eine Methode zur Bestimmung des Entwässerungsverhaltens, genauer des Wasserabgabevermögens von Schlämmen. Das Prinzip der Messmethode besteht darin, dass der Filtrationseffekt durch die kapillare Saugkraft eines standardisierten Filterkartons bewirkt wird. Grundsätzlich gilt: Je höher der CST-Wert desto schlechter ist das Entwässerungsverhalten. Als Richtwerte zur Beurteilung des Entwässerungsverhaltens gelten:

Tabelle 4: Kategorien des Entwässerungsverhaltens

Entwässerungsverhalten	CST [s]
Gut	< 80
Mittelmäßig	80 – 400
Schlecht	> 400

1.3.5.2 Biologische Messgrößen

Fädigkeit

Da die Fädigkeit eines Belebtschlammes im Phasenkontrast des Mikroskops oftmals nur schwer zu ermitteln ist, wurde zur besseren Sichtbarkeit der Fäden die Kristallviolett-Färbung angewandt. Durch die Färbung sind große kompakte Flockenbereiche im mikroskopischen Bild violett gefärbt. Die fadenförmigen Bakterien werden durch eine orange-gelbe, leuchtende Färbung deutlich hervorgehoben.

Die Fädigkeit wurde nach Kunst et al (2000) ermittelt. Die Einteilung in die Fädigkeitsstufen (0-7) erfolgt anhand von Referenzabbildungen. Berücksichtigt wird hierbei nur die sogenannte ISV-relevante Fädigkeit, d.h. die Fadenbildung außerhalb der Belebtschlammflocken.

Identifizierung der fadenförmigen Bakterien

Zur Identifizierung der fadenförmigen Bakterien wurden Trockenpräparate hergestellt und diese mit den nachfolgend vorgestellten Methoden angefärbt. Die Identifizierung der Bakterien erfolgte anhand der Bestimmungsschlüssel von Eikelboom und van Buisen (1983).

- Gram-Färbung: Mit dieser Methode werden Bakterien zunächst mit Carbolgentianaviolett dunkelblau angefärbt. Danach wird das Präparat mit Alkohol gewaschen, wobei die Zellen einiger Bakterienarten den Farbstoff wieder abgeben und aus diesem Grund gram-negativ genannt werden. Gram-positive Bakterien behalten die dunkelblaue Färbung. Die farblosen Gram-negativen Bakterien werden mit Safranin gefärbt und erhalten dadurch eine helle Rotfärbung.
- Neisserfärbung: Einige Bakterienarten bilden zur Speicherung von Reservestoffen in der Zelle Granula aus, die hauptsächlich aus Polyphosphaten bestehen. Durch die Neisser-Färbung wird die Phosphatgranula blau-schwarz angefärbt. Die Bakterien mit blau-schwarzer Granula werden Neisser-positiv genannt. Neisser-negative Fadenbakterien sind hellbraun bis gelblich gefärbt und häufig nur schwer zu erkennen. Unter den Fadenbakterien gibt es zwei Typen, die durch die Neisserfärbung vollkommen grau-blau gefärbt werden.
- Sudanschwarz (PHB) –Färbung: Polyhydroxybuttersäure (PHB) ist ein Speicherstoff phosphateliminerender Bakterien, der von ihnen hauptsächlich unter anaeroben Bedingungen gebildet wird. Mit der Sudanschwarzfärbung lassen sich PHB-Granula in der Zelle schwarz anfärben und sind als Punkte in den Zellen zu erkennen. Ist keine PHB-Granula in den Zellen vorhanden erscheinen die Zellen gelblich.
- Schwefeltest: Einige fadenförmige Bakterien sind in der Lage, Schwefelgranula in ihren Zellen einzulagern, sofern sie in Gegenwart einer ausreichenden Konzentration an reduzierten Schwefelverbindungen wachsen. Mit dem Schwefeltest wird die Konzentration an reduzierten Schwefelverbindungen in einer Belebtschlammprobe erhöht, sodass diese Bakterienarten den Schwefel in ihren Zellen einlagern. Anschließend kann im Mikroskop die stark lichtbrechende Schwefelgranula deutlich beobachtet werden.

1.4 Ergebnisse der Batchtests und Vorversuche

1.4.1 Analysenmethoden

Über die Ursachen und Zusammenhänge, die zu einer Schaumbildung führen bzw. diese forcieren, gibt es bislang nur begründete Vermutungen. Offenbar handelt es sich um ein Zusammenwirken von Hydrophobizität, EPS und Fadenstrukturen. Wie diese Interaktionen im Einzelnen aussehen ist zur Zeit noch unklar. Es war geplant, mit Hilfe der Parameter Hydrophobizität, India Ink Reverse (EPS), Schaumbildungspotenzial (Schaumstabilität) und Fädigkeit diese Zusammenhänge zu erfassen und den Einfluss der Ultraschallbehandlung auf das Wirkungsgefüge zu untersuchen. Zunächst wurden die Analysenmethoden auf ihre Eignung untersucht.

Schaumbildungspotenzial und Schaumstabilität

Nach einigen Modifikationen der Methode von Pagilla et al. (1998) konnte die Bestimmung des Schaumbildungspotenzial und der Schaumstabilität erfolgreich durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Bestimmung zeichnen sich durch eine gute Reproduzierbarkeit auf. Durch die einfache Handhabung und den überschaubaren Zeitaufwand eignen sie sich als Routineparameter zur täglichen Überprüfung.

Das Schaumbildungspotenzial und die Schaumstabilität wurden als Standardparameter zu den Routineanalysen beim Betrieb der Pilotanlage hinzugenommen.

Der erste Dauereinsatz der Pilotanlage zeigte, dass die Schaumstabilität kaum andere Ergebnisse aufwies als das Schaumbildungspotenzial. In der Auswertung der Dauerversuche der Pilotanlage wurde sie deshalb nicht separat berücksichtigt.

Hydrophobizität

Die Hydrophobizitätsbestimmung konnte unseren Anforderungen an die Analysenverfahren nicht gerecht werden. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse konnte trotz Dreifach-Bestimmung nicht gewährleistet werden, in derselben Probe wurden beispielsweise –2 % bis 54 % Hydrophobizität gemessen. Zur Vergleichmäßigung der Ergebnisse wurden von Knoop (1997) die Schlämme mit Ultraschall vorbehandelt. In diesem Vorhaben konnten wir diese Vorbehandlung nicht anwenden, da gerade der Einfluss der Ultraschallbehandlung auf die Hydrophobizität der Schlämme untersucht werden sollte.

Die Modifikation der Bestimmung im Hinblick auf das Probevolumen und die Analysenmethode (gravimetrisch statt photometrisch) brachte keinen Erfolg im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Zur Anwendung bei der täglichen Analysenroutine eignet sich die Hydrophobizitätsbestimmung darüber hinaus nicht, weil sie in der Vorbereitung und Durchführung der Analysen sehr zeitintensiv ist und eine Menge analytische Erfahrung erfordert.

Nachdem die Hydrophobizitätsbestimmung mehrfach nach Originalvorschrift und in modifizierter Form getestet worden ist und keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden konnten, wurde diese Bestimmung aus dem Analysenplan gestrichen.

India Ink Reverse Färbung

Die India Ink Reverse Färbung ist ein einfaches Hilfsmittel, um EPS qualitativ nachzuweisen. Eine exakte Quantifizierung von EPS kann nur über die Einzelstoffe erfolgen. Die hierzu erforderlichen Einzelanalysen sind sehr aufwändig und erfordern spezielle Laborausstattungen. Zur Abschätzung der Quantität der EPS wird das mikroskopische Bild des gefärbten Präparates herangezogen und anhand von Referenzabbildungen werden vier Häufigkeitskategorien (ähnlich der Fädigkeitsbestimmung) unterschieden. Die so abgeschätzte Quantität der EPS soll mit der Fädigkeit des Schlammes korrelieren (Kunst et al. 2000).

Wir haben festgestellt, dass die Fehlerquellen dieser Methode sehr gross sind. In der technischen Durchführung muss extrem darauf geachtet werden, dass die Präparate immer die gleiche Dicke aufweisen, sonst wird das Ergebnis verfälscht. Die Tusche muss in ausreichender Menge vorliegen und die Auswertung muss sofort nach dem Vermischen von Schlamm und Tusche erfolgen, weil die Einwirkzeit der Tusche einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Quantifizierung anhand der Referenzabbildungen ist maßgeblich vom Betrachter abhängig, sodass die Ergebnisse eine gewisse Subjektivität aufweisen.

Nach dem ersten Dauerbetrieb der Pilotanlage wurde die India Ink Reverse Färbung aus dem Analysenprogramm herausgenommen. Wir konnten über den gesamten

Versuchsbetrieb keine Korrelation zwischen den Routineparametern (ISV, Schaumbildungspotenzial, Fädigkeit) und dem EPS-Gehalt herstellen.

1.4.2 Energieeintrag

Ziel der Vorversuche war die Zerstörung der Fadenstrukturen im Überschussschlamm bei minimalem Energieeintrag, um die Betriebspunkte der Ultraschallbehandlung für die nachfolgenden Langzeitversuche zu bestimmen. Als maßgeblicher Parameter für die Fadenerstörung wurde der Schlammindex herangezogen.

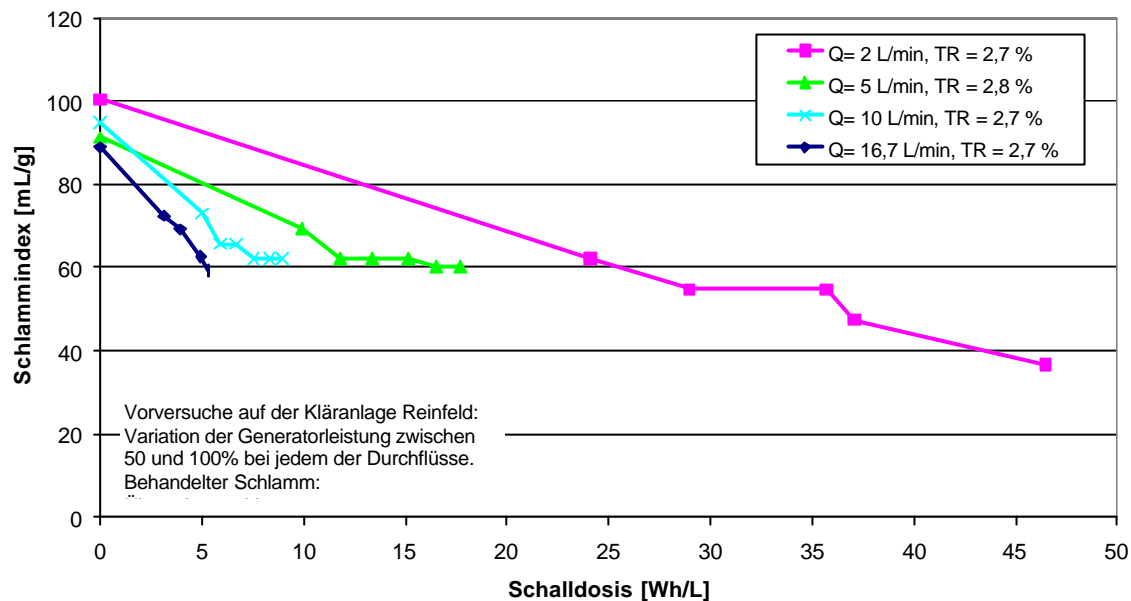


Abb. 5: Veränderung des Schlammindex bei zunehmender Schalldosis und verschiedenen Durchflüssen

In Abb. 5 werden die Ergebnisse der Vorversuche auf der Kläranlage Reinfeld dargestellt. Die Versuche wurden mit statisch eingedicktem Überschussschlamm (TR = 2,7%) durchgeführt, da dieser auch im Dauerbetrieb der Pilotanlage eingesetzt wird. Der Schlammindex des unbehandelten Überschussschlammes lag zwischen 90 und 100 mL/g. Der Schlammindex des Überschussschlammes der Kläranlage Reinfeld konnte bei Q = 5 bis 16,7 L/min von 90 auf 60 mL/g gesenkt werden. Eine deutliche Erhöhung der Schalldosis auf 25 Wh/L und mehr (Q = 2 L/min) brachte eine weitere Reduktion des Schlammindex (Abb. 5). Für den Klärschlamm der KA Reinfeld gilt, dass die Ultraschallwirkung auf das Absetzverhalten des Schlammes bei hohen Volumenströmen (Energieeintrag konstant) günstiger ist. Mit anderen Worten: es ist besser Schlamm nur kurz zu beschallen, um den Schlammindex zu verringern. Im konkreten Fall zeigt die Beschalldauer von nur 100 Sekunden (Q= 16,7 L/min) die besten Wirkung.

Anhand des Beispiels der KA Reinfeld wird deutlich, dass es grundsätzlich mehrere Konfigurationen gibt, um dieselbe Reduktion des Schlammindex und damit die Fadenerstörung zu erreichen.

Aus Wirtschaftlichkeitsgründen haben wir den Energieeintrag für den Dauerbetrieb der Pilotanlage auf Schalldosen $< 20 \text{ Wh/L}$ begrenzt. Für den ersten Versuchszeitraum der Pilotanlage wurden zunächst die Durchflüsse $Q = 5 \text{ L/min}$ und $Q = 10 \text{ L/min}$ ausgewählt. Im zweiten Versuchszeitraum wurde der Durchfluss $Q = 16,7 \text{ L/min}$ hinzugenommen. Prinzipiell wurde bei der Ultraschallbehandlung die maximale Generatorleistung gewählt.

1.4.3 Viskosität und Kavitation

Der Einfluss der Viskosität auf das Ergebnis der Ultraschallbehandlung wurde durch Auszählung der durch Kavitation hervorgerufenen Löcher in Alufolie ermittelt. Die Versuche wurden zunächst mit einer Glycerin-Wasser-Lösung durchgeführt. Vorteil dieser Lösung ist, dass sie zu den Newtonschen Stoffen zählt und somit bei gleicher Glycerinkonzentration unabhängig vom Schergefälle und der Dauer der Scherbeanspruchung immer dieselbe Viskosität aufweist. Klärschlamm dagegen verhält sich meist nicht Newtonisch. Das Fließverhalten von Schlämmen wird durch die Konzentration von Feststoffen evtl. verwendeten polymerischen Konditionierungsmitteln stark beeinflusst. Schergefälle und Dauer der Scherbeanspruchung verändern die Viskosität. Es gilt allgemein die Gleichung:

$$\tau = \eta \cdot \gamma$$

mit: τ Schubspannung [Pa]
 η dynamische Viskosität [Pas]
 γ Schergefälle (Geschwindigkeitsgradient) [s^{-1}].

In den Versuchen wurde die Viskosität der Klärschlamme bei einem konstanten Schergefälle von $\gamma = 1209 \text{ s}^{-1}$ bestimmt. Qualitativ erfolgt mit zunehmender Viskosität zunächst eine Zunahme der Kavitationswirkung bis zu einem Maximalwert. Wird die Viskosität über den Maximalwert erhöht, erfolgt eine Abnahme der Wirkung bis auf Null (keine Kavitation mehr nachweisbar). Dieser qualitative Verlauf konnte sowohl für die Modellschlamme als auch für Klärschlamm nachgewiesen werden (Abb. 6).

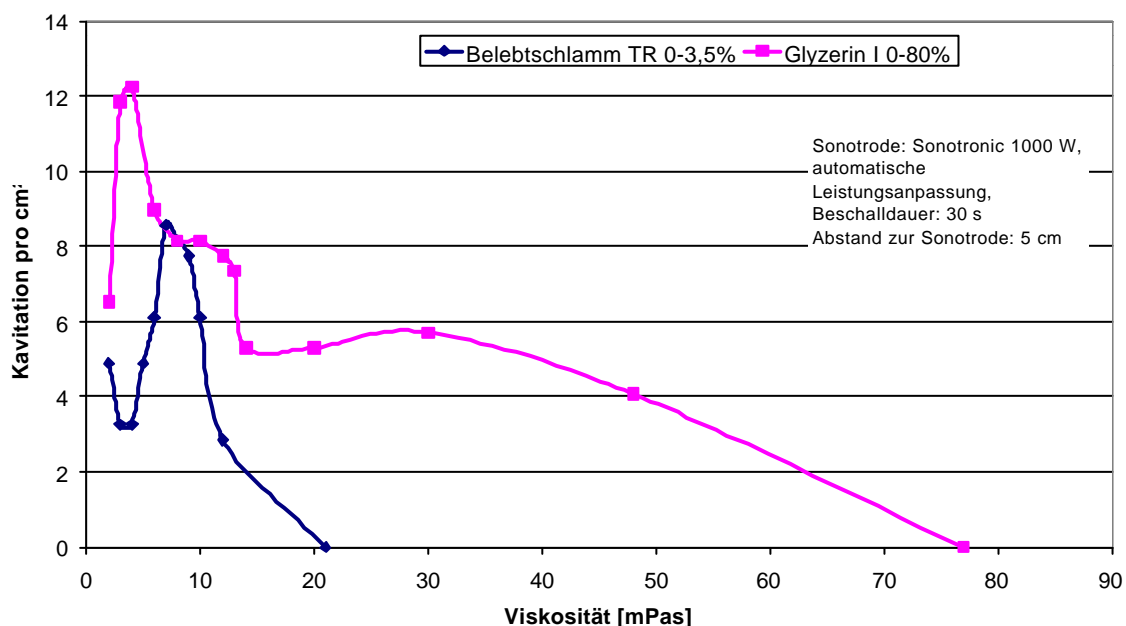


Abb. 6: Kavitation in Abhängigkeit von Viskosität und Medium

Analog der Resultate der Batchtests war zu erwarten, dass die Viskosität der Überschussschlämme mit steigender Ultraschalldosis (= Scherbeanspruchung) abnimmt. Die Überschussschlämme der Kläranlage Winsen wiesen aber nach der Ultraschallbehandlung eine wesentlich höhere Viskosität auf. Die nachfolgend dargestellten Werte wurden wieder bei einem Schergefälle von 1209 s^{-1} gemessen.

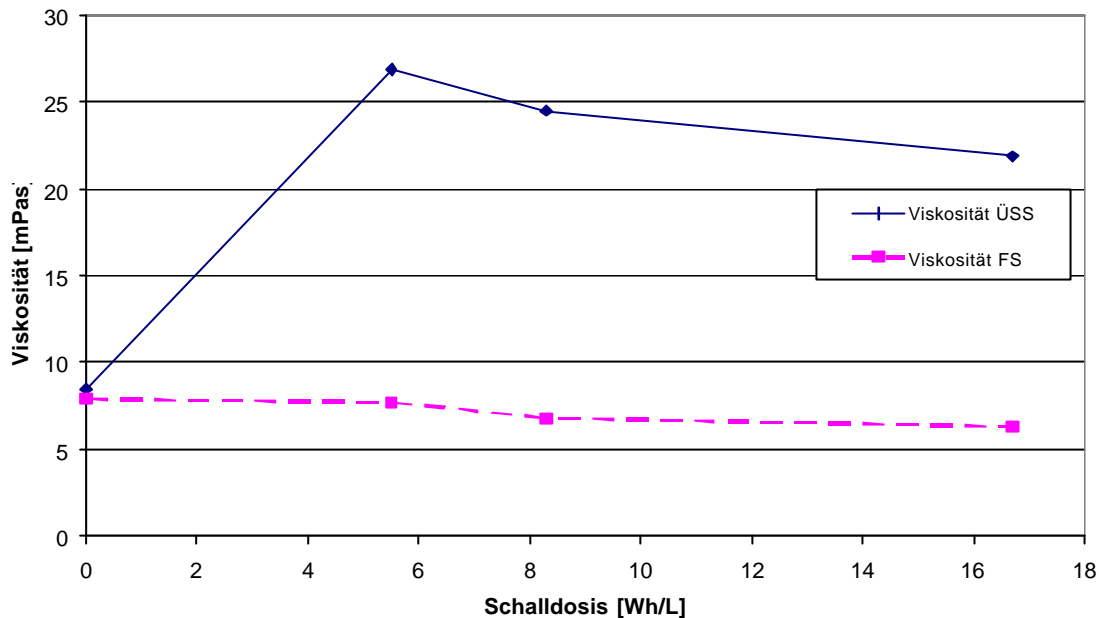


Abb. 7: Viskosität der Überschuss- und Faulschlämme der KA Winsen

Die Viskosität des Überschussschlammes wird bei Beschallung deutlich von 8,5 auf 26,9 mPas erhöht und sinkt nachfolgend bei höheren Schalldosen wieder leicht ab. In der Faulung sinkt die Viskosität der ultraschallbehandelten Schlämme wieder auf das Niveau des unbehandelten Faulschlammes. Der Überschussschlamm auf der Kläranlage Winsen wird eingedickt mit Hilfe eines kationischen Polymers als Flockungshilfsmittel (FHM). Es scheint, dass die Flockenverbände, die durch Zugabe des FHM gebildet werden, zunächst bei schwacher Beschallung ($< 8 \text{ Wh/L}$) in kleinere Einheiten zerlegt werden, welche eine größere innere Reibung erzeugen. Bei intensiverer Beschallung werden die noch bestehenden Flockeneinheiten nach und nach aufgelöst, die polymerischen langkettigen Substanzen „in Lösung“ verursachen aber eine insgesamt höhere Viskosität als die mit FHM gut geflockte Ursprungsschlamm suspension. Im Faulbehälter werden die organischen polymerischen Substanzen biologisch ebenso abgebaut wie die restliche organische Materie, die Viskosität der ausgefaulten Schlämme sinkt wieder und bewegt sich auf dem Niveau des unbehandelten Faulschlammes. Diese These wird durch das Absetzverhalten der Winsener Schlämme gestützt (siehe Kap. 1.5.1).

1.5 Einfluss der Ultraschallbehandlung auf die anaerobe Stabilisierung

1.5.1 Absetzverhalten

Das Absetzverhalten wurde anhand des Schlammindex (ISV) quantifiziert. Alle Kläranlagen wiesen im Mittel einen Schlammindex von $< 150 \text{ mL/g}$ auf. Der Überschussschlamm der

Kläranlage Brunsbüttel überstieg diesen Wert zum Ende des Versuchszeitraums allerdings regelmäßig, sodass ein Hinweis auf ein Blähschlammproblem vorlag. Die Kläranlagen Reinfeld und Winsen wiesen eindeutig Schwimmschlammprobleme auf, da dichte Schlammdecken auf den Belebungen festzustellen waren.

Das Absetzverhalten der Überschussschlämme konnte auf den Kläranlagen Reinfeld (V1) und Brunsbüttel wie erwartet mit steigender Schalldosis auf Werte bis zu 56 mL/g verbessert werden (Abb. 8). Der zweite Versuchszeitraum auf der Kläranlage Reinfeld (V2) zeigte nur eine marginale Verbesserung der Schlammindeces der Überschussschlämme. In dieser Periode war der Schlammindeces des unbehandelten Überschussschlammes bereits recht niedrig (89 mL/g).

Der Überschussschlamm der KA Winsen jedoch wies bei vergleichbarer Schalldosis den umgekehrten Effekt auf, das Absetzverhalten verschlechterte sich um 10-20 mL/g (Abb. 8). Betrachtet man dazu noch die Analyse der (geringeren) Fädigkeit der Ultraschall behandelten Überschussschlämme (vgl. Kap. 1.5.2), würde man auch für die Überschussschlämme in Winsen ein verbessertes Absetzverhalten erwarten. Dies ist aber nicht der Fall, es muss daher eine andere Erklärung gefunden werden. Allerdings korreliert das Absetzverhalten mit der Viskosität der Schlämme (Abb. 9).

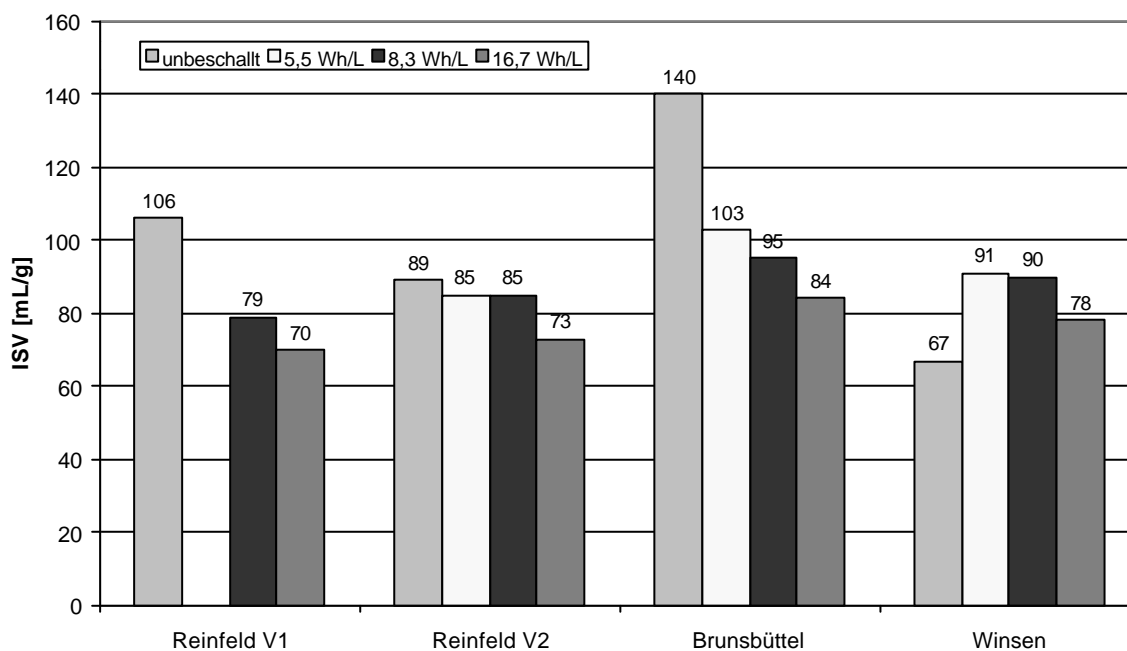


Abb. 8: Durchschnittliche Schlammindeces der Überschussschlämme

In Abb. 9 ist zu erkennen, dass im Falle KA Winsen das Absetzverhalten (ISV-Werte) sowohl der Überschussschlämme als auch der Faulschlämme mit der Viskosität korreliert. Wir halten fest, dass die Beschallung des mit FHM eingedickten Überschussschlammes sowohl die Viskosität als auch das Absetzverhalten des Schlammes maßgeblich beeinflusst. In Kap. 1.4.3 ist dieser Sachverhalt bereits diskutiert worden. Für entsprechende zukünftige Anwendungen des Ultraschallverfahrens muss das Wirkungsgefüge zwischen Dosierung polymerischer FHM, Flockenbildung und Wirkung auf das Fließverhalten der Schlammsuspensionen systematisch untersucht werden.

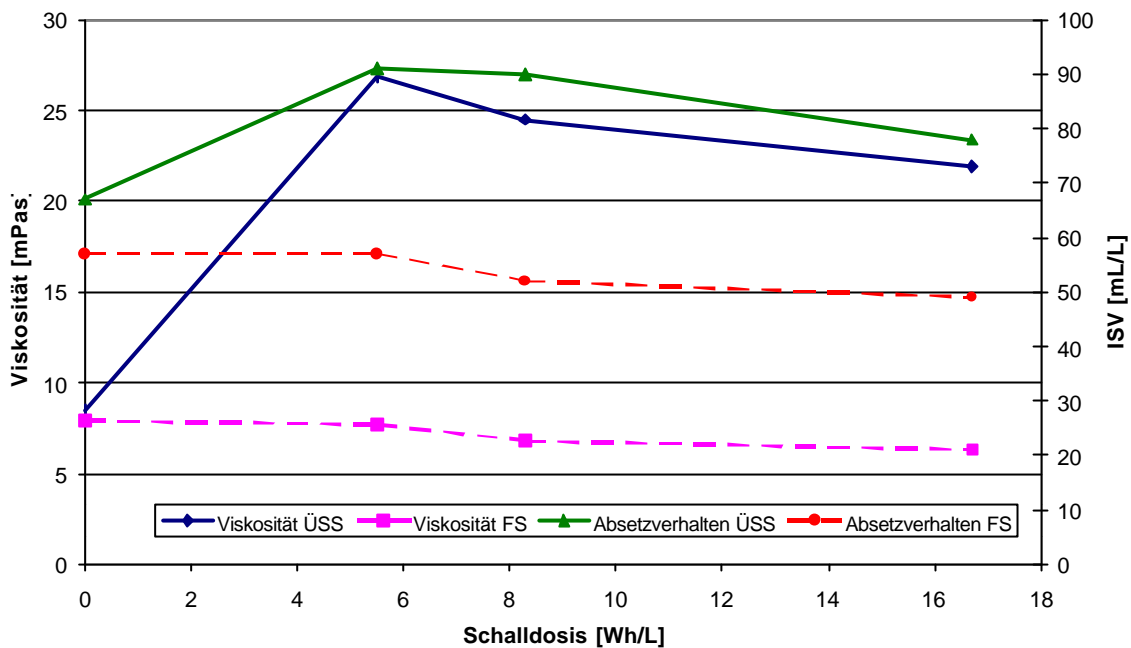


Abb. 9: Viskosität und Absetzverhalten der Überschuss- und Faulschlämme der KA Winsen

Das Absetzverhalten der Faulschlämme wurde ebenfalls untersucht (Abb. 10). Wie erwartet zeigen ultraschallbehandelte Faulschlämme ein besseres Absetzverhalten als unbehandelte. Die Schlammdices wurden um 3 bis 33 mL/g gesenkt. Insgesamt weisen die Faulschlämme niedrigere Schlammdices auf als die zugehörigen Überschussschlämme (vgl. Abb. 8).

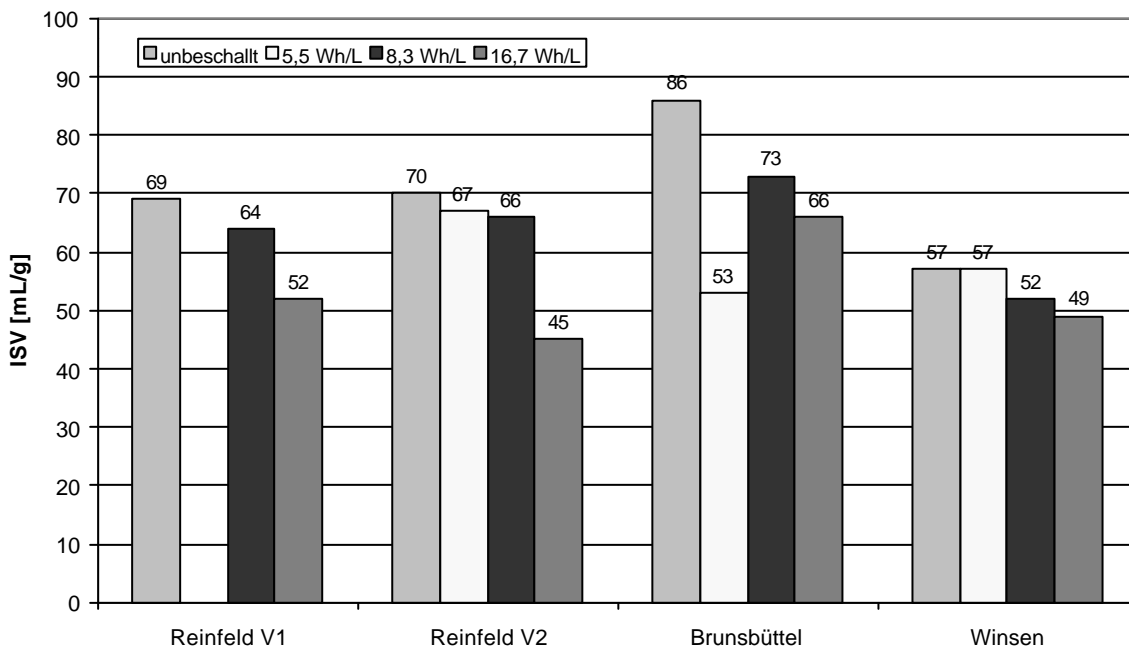


Abb. 10: Durchschnittliche Schlammdices der Faulschlämme

1.5.2 Organismen und strukturelle Fädigkeit

Mit Hilfe der Färbemethoden wurden in den Überschussschlämmen folgende fadenförmige Organismen identifiziert:

Tabelle 5: Identifizierte Fadenorganismen auf den Kläranlagen

Fadenorganismus	Kläranlage Reinfeld	Kläranlage Brunsbüttel	Kläranlage Winsen
<i>Microthrix parvicella</i>	ausschließlich	dominant	dominant
<i>Nostocoida limicola</i> (II)	-	X	X
Typ 1851	-	X	X
<i>Haliscomenobacter hydrossis</i>	-	X	-

Als Hauptverursacher der Bläh- bzw. Schwimmschlammprobleme in der Abwasserreinigungsstufe konnte für alle untersuchten Kläranlagen *Microthrix parvicella* identifiziert werden. Im Überschussschlamm der Kläranlagen Brunsbüttel und Winsen wurden weitere Fadenbakterien identifiziert, die aber nur eine geringe Häufigkeit aufweisen.

Die strukturelle Fädigkeit konnte durch die Ultraschallbehandlung des Überschussschlammes deutlich reduziert werden. Auf der Kläranlage Brunsbüttel ergab sich z.B. folgendes mikroskopisches Bild für die Überschuss- bzw. Faulschlämme (Abb. 11-14):

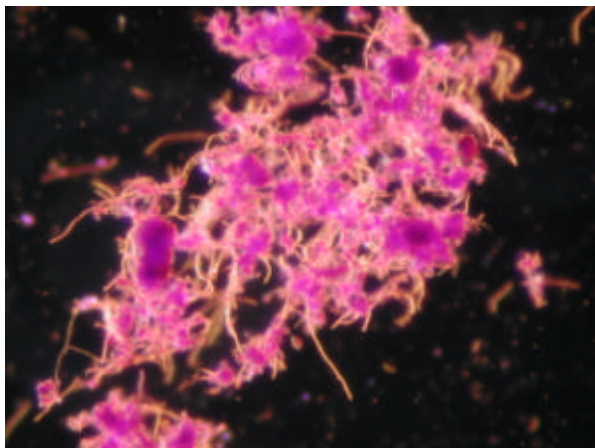


Abb. 11: Überschussschlamm, unbeschallt, Kristallviolett färbung, 200fach

Abb. 12: Faulschlamm, unbeschallt, Kristallviolett färbung, 200fach

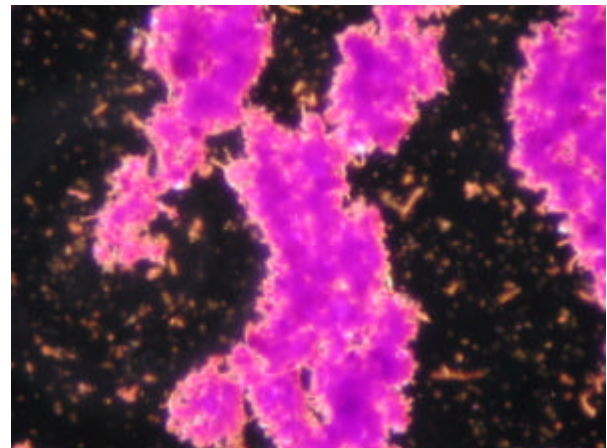
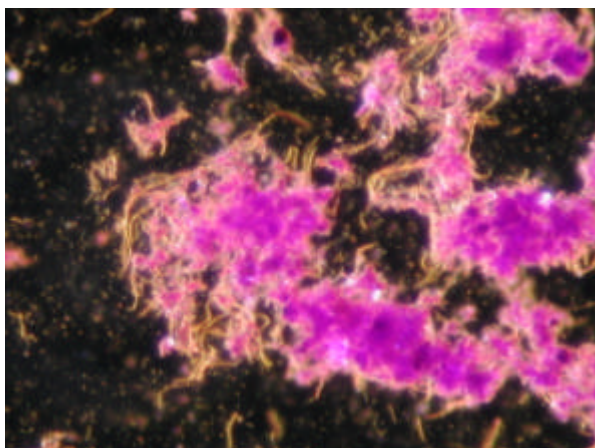


Abb. 13: Überschussschlamm, Ultraschall behandelt (16,7 Wh/L), Kristallviolett färbung, 200fach



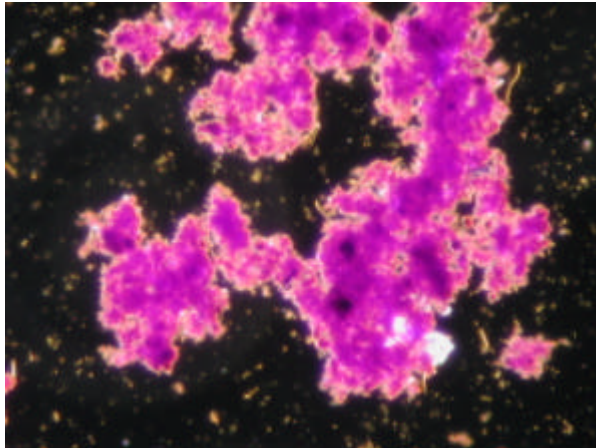


Abb. 14: Faulschlamm, Ultraschall behandelt (16,7 Wh/L), Kristallviolett färbung, 200fach

Die Fädigkeiten der Überschuss- und Faulschlämme der Kläranlagen wurden im Durchschnitt wie folgt bestimmt:

Tabelle 6: Fädigkeiten der Überschuss- und Faulschlämme der Kläranlagen

	KA Reinfeld		KA Brunsbüttel	KA Winsen
	V1	V2		
ÜSS unbehandelt	4	3-4	4-5	3
ÜSS 5,5 Wh/L		1	2	2-3
ÜSS 8,3 Wh/L	1	1	1-2	1-2
ÜSS 16,7 Wh/L	0-1	0-1	0-1	0-1
FS unbehandelt	2	1-2	3-4	2
FS 5,5 Wh/L		1	1-2	2
FS 8,3 Wh/L	1	1	0-1	1-2
FS 16,7 Wh/L	0-1	0-1	0-1	0-1

Generell kann festgestellt werden:

- Die strukturelle Fädigkeit des Überschussschlammes wird Ultraschallbehandlung signifikant verringert.
- Durch die geringere Fädigkeit des zugeführten Schlammes nach Ultraschallbehandlung weisen auch entsprechende Faulschlämme geringere Fädigkeit auf.
- Mit zunehmender Schalldosis wird die Fädigkeit stärker reduziert (besonders auffällig in Brunsbüttel).
- Im Überschussschlamm identifizierten Fadenorganismen werden auch im Faulschlamm identifiziert.

Merke: Ist die strukturelle Fädigkeit Ursache der Schaumbildung im Faulbehälter, so ist die Bekämpfung mittels Ultraschall problemlos möglich !

1.5.3 Schaumbildungspotenzial

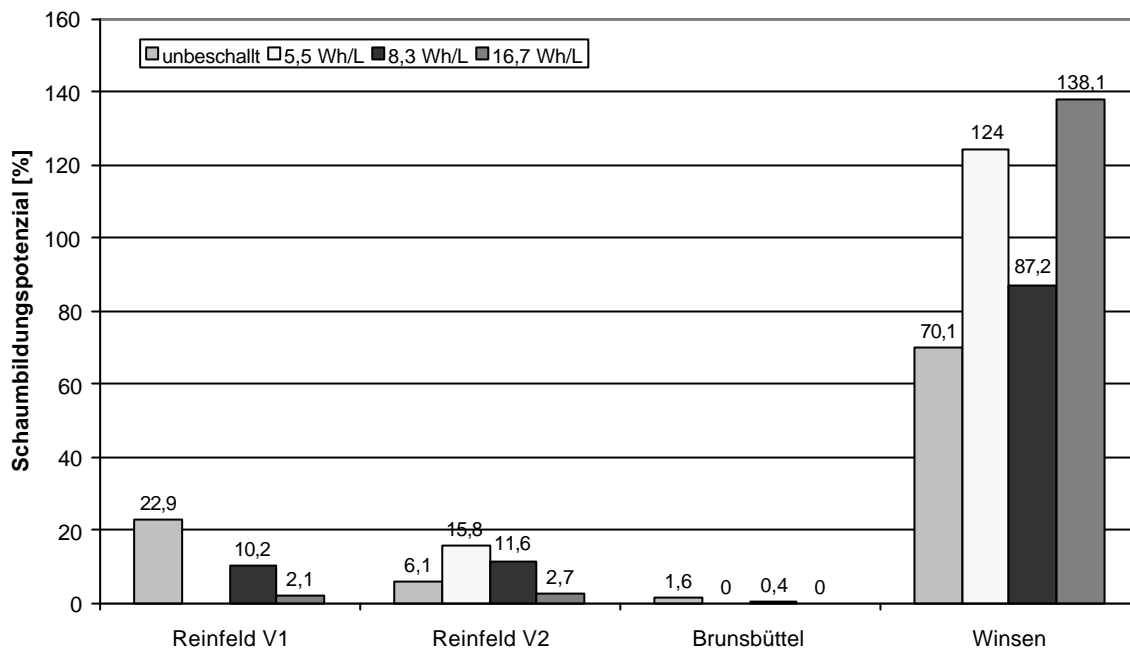


Abb. 15: Durchschnittliches Schaumbildungspotenzial der Faulschlämme

Das Schaumbildungspotenzial wurde ebenfalls zur Beurteilung der Ultraschallwirkung auf Faulschlämme herangezogen. Obwohl die Problematik auf allen Kläranlagen ähnlich schien, offenbarte die Analyse des Schaumbildungspotenzials signifikante Unterschiede (Abb. 15).

Im Fall Faulschlamm der Kläranlage Reinfeld konnte eine Korrelation des Schaumbildungspotenzials zur strukturellen Fädigkeit nachgewiesen werden. Das Schaumbildungspotenzial des Faulschlammes (erster Versuchsabschnitt V1) wurde durch Ultraschallbehandlung des Überschussschlammes deutlich von 22,9 % auf 2,1 % reduziert. Im gleichen Versuchsabschnitt wurde die Fädigkeit der Faulschlämme von Fädigkeitsstufe 2 auf nahe Null reduziert (Tab. 6).

Im zweiten Versuchsabschnitt (ab 21.06.2002) konnte die Reduktion des Schaumbildungspotenzials von 6,1 % auf 2,7 % nur durch eine hohe Ultraschalldosis von 16,7 Wh/L erreicht werden (Abb. 15). Die Fädigkeit nahm ab von Fädigkeitsstufe 1-2 auf nahe Null (Tab. 6). Ein Schaumbildungspotenzial von 6,1 % für unbehandelten Faulschlamm kann als unkritisch für den Faulprozess bewertet werden; in der Tat beobachteten wir im Faulbehälter der Kläranlage Reinfeld gegen Ende Juni 2002 ebenfalls keine Schaumbildung mehr.

Korrelationen zwischen Fädigkeit und Schaumbildungspotenzial der Faulschlämme sind in Abb. 16 für beide Versuchsabschnitte dargestellt.

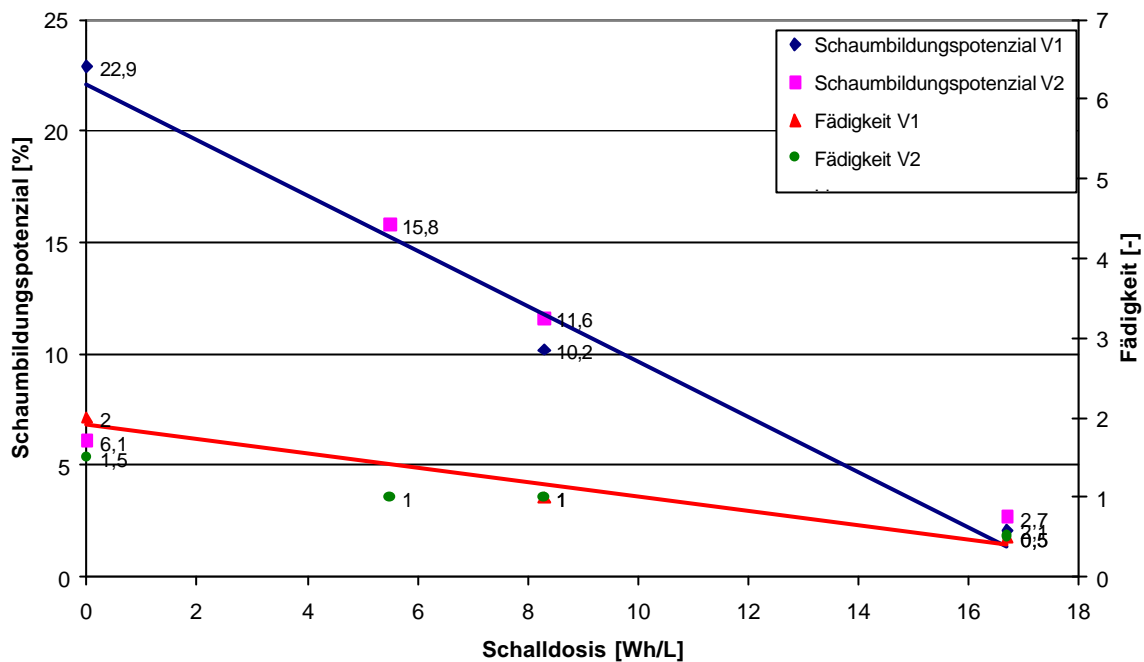


Abb. 16: Schaumbildungspotenzial und Fädigkeit bei steigender Schalldosis (KA Reinfeld)

Obwohl der Faulschlamm der Kläranlage Brunsbüttel mit einer durchschnittlichen Fädigkeit von 3-4 die höchsten Werte aller Faulschlämme aufwies, konnte mit einem Schaumbildungspotenzial von durchschnittlich 1,6 % die real bestehende Schaumproblematik in unserer Pilotanlage nicht nachvollzogen werden. Mögliche Ursache dafür ist möglicherweise der fehlende Anteil Primärschlamm in unseren Tests (aus konstruktiven Gründen auf der Kläranlage nicht herstellbar). Schaumbildung auf der großen Anlage Brunsbüttel wäre demzufolge den Eigenschaften der Mischung von Primär- und Überschussschlamm zuzuschreiben.

Die Kläranlage Winsen wies mit einem durchschnittlichen Schaumbildungspotenzial von 70,1 % im unbehandelten Faulschlamm die höchsten Wwerte aller untersuchten Kläranlagen auf. Das Schaumbildungspotenzial des Faulschlammes erhöhte sich durch die Ultraschallbehandlung um durchschnittlich 46% (Abb. 15), wobei die höchste Ultraschalldosis auch das höchste Schaumbildungspotenzial verursachte. Wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits erläutert, ist der Einsatz von Flockungshilfsmitteln zur Eindickung des Überschussschlammes ein besonderes Merkmal der KA Winsen (im Vergleich zu den beiden anderen besuchten Anlagen). Hier liegt offenbar wieder eine plausible Ursache für das besondere Verhalten mit Bezug auf das gestiegene Schaumbildungspotenzial des ultraschallbehandelten Faulschlammes. Es wird offenbar, dass die Verwendung von (kationischen) FHM die Oberflächeneigenschaften der auszufaulenden Schlämme signifikant in der Weise verändert, dass ein stark vergrößertes Schaumbildungspotenzial entsteht (quasi hydrophobisierende Wirkung). In derartigen Fällen ist die Frage nach dem Sinn der Verwendung, oder zumindest nach der optimalen Dosierung der FHM zu stellen, und zwar nicht nur im Sinne der besseren Voreindickung der Schlämme, sondern – gewissermaßen in ganzheitlicher Betrachtung – nach der Wirkung auf das Schaumbildungspotenzial im Faulprozess. Auf die strukturelle Fädigkeit kann die

Schaumbildung der Kläranlage Winsen nicht zurückgeführt werden, da diese durch die Ultraschallbehandlung deutlich reduziert wird (Tabelle 6).

1.5.4 Stabilität und Qualität der Faulung

Zum Nachweis einer ungestörten Faulung werden die Parameter oTR und Biogasausbeute der ausgefaulten Schlämme bewertet. Im Vergleich zu den unbehandelten zeigen ultraschallbehandelte Faulschlämme immer geringere oTR-Werte (0,5% - 2% weniger, Tabelle 7). Obwohl nicht primäres Ziel unserer Tests, bestätigt sich hier wieder, dass Ultraschall-Vorbehandlung die anaerobe Stabilisierung der Schlämme begünstigt.

Tabelle 7: Durchschnittlicher Organischer Trockenrückstand [%] der ausgefaulten Schlämme

Schalldosis	KA Reinfeld	KA Brunsbüttel	KA Winsen
Unbehandelt	60,3	56,3	65,5
5,5 Wh/L	58,4	55,3	64,9
8,3 Wh/L	58,6	55,6	64,4
16,7 Wh/L	58,4	55,0	64,6

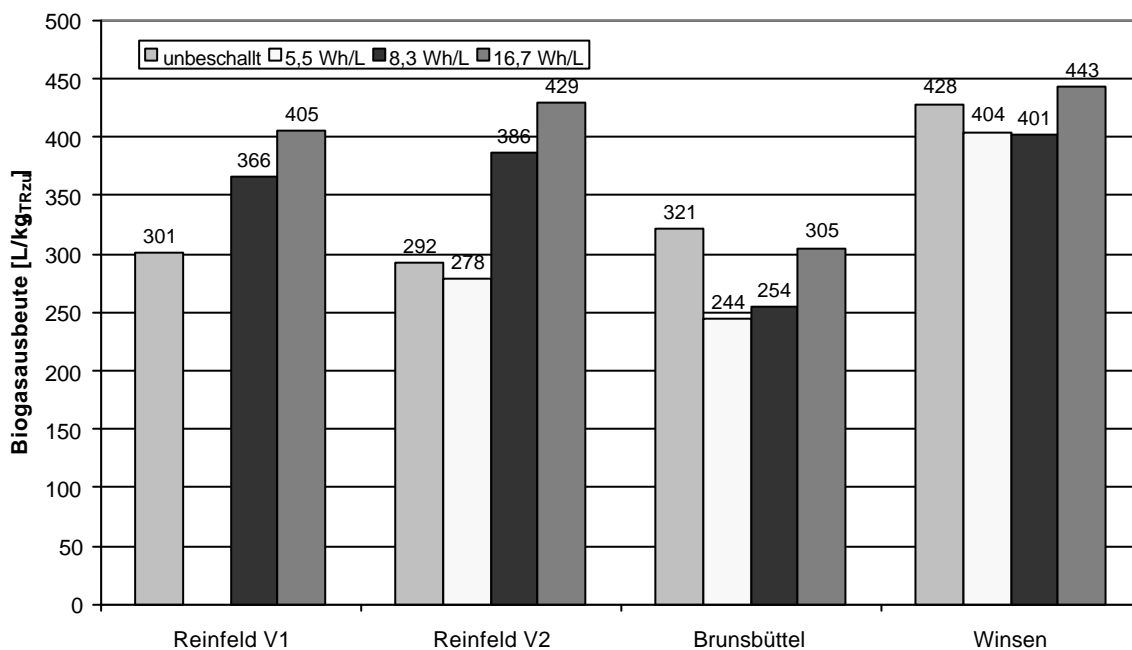


Abb. 17: Biogasausbeute bezogen auf die zugeführte organische Fracht

Im Fall Beschallung des Überschussschlammes der Kläranlage Reinfeld sehen wir eine deutliche Steigerung der Biogasausbeute (Abb. 17). Mit der hohen Ultraschalldosis von 16,7 Wh/L ging eine Steigerung von 34,5 % (V1) bzw. 46,9 % (V2) einher, wohingegen die Reduzierung des oTR nur rund 2% ausmacht. Verbessertes Gasaustrag aus dem Schlammkörper durch die fehlenden Fadenstrukturen könnte eine Erklärung für diesen Sachverhalt sein.

Im Falle der Beschallung der Überschussschlämme Brunsbüttel und Winsen war keine Verbesserung der Biogasausbeute festzustellen. Die ultraschallbehandelten Faulschlämme

wiesen hier in der Regel sogar geringere Biogasausbeuten auf als die unbehandelten (Abb. 17). Die Biogasmengenmessung auf unserer Pilotanlage in Winsen wurde durch das Überschäumen der Fermenter gelegentlich gestört. Da nicht alle Fermenter gleichzeitig schäumten und die genauen Zeitpunkte nicht rekonstruierbar sind, können hier Fehler in der Messwerterfassung Ursache für die geringeren Biogasausbeuten sein.

Die Unterschiede der Biogasausbeuten auf der Pilotanlage in Brunsbüttel lassen sich mit den aufgenommenen Parametern nicht erklären. Obwohl die oTR-Werte um etwa 1% abnehmen, also ungestörten Faulprozess manifestieren, weisen die ultraschallbehandelten Schlämme eine geringere Biogasausbeute auf, obwohl Beschallung die Fädigkeit der Schlämme reduziert, also ebenfalls positiv für den Faulprozess zu bewerten ist.

1.6 Einfluss der Ultraschallbehandlung auf das System Kläranlage

1.6.1 Entwässerbarkeit des Faulschlammes

Ultraschallbehandlung beeinflusst auch das Entwässerungsverhalten des Faulschlammes, positiv oder negativ. Bisherige Aussagen in der Literatur sind widersprüchlich. Um diesen Ansatz zu überprüfen, kann man entweder den spezifischen Filtrationswiderstand oder die Capillary Suction Time (CST) messen. Diese Parameter geben erste, brauchbare Hinweise auf das tatsächliche Entwässerungsverhalten in der Praxis, welches aber noch von weiteren Einflüssen abhängt (Entwässerungstechnik, Konditionierungsmittel etc.).

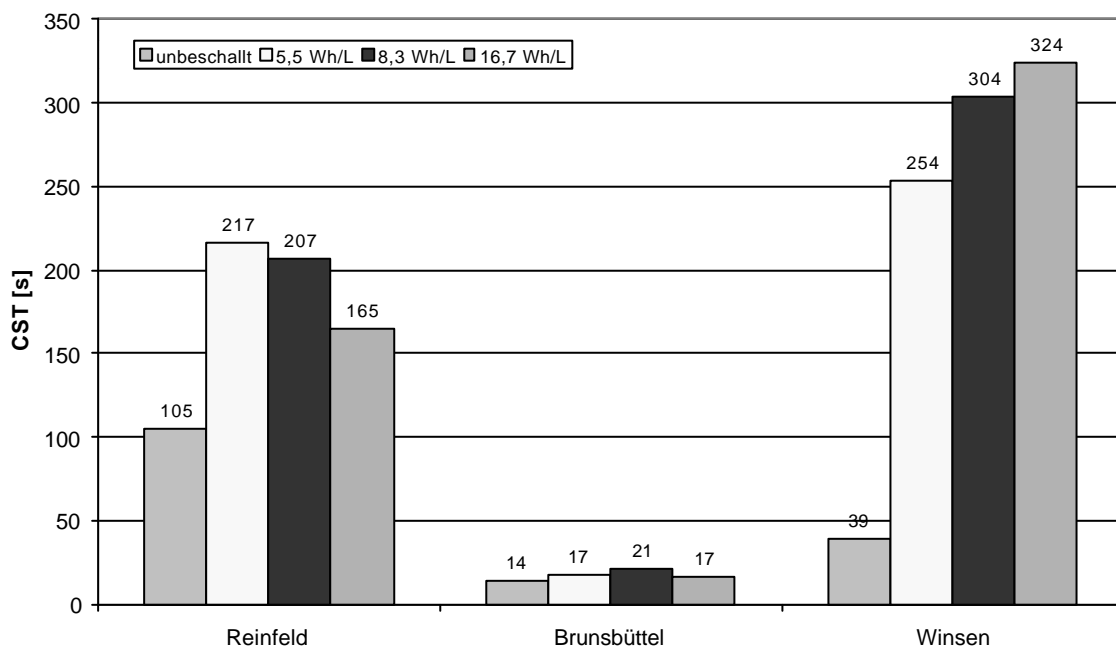


Abb. 18: CST der Faulschlämme

Durch die Ultraschall-Vorbehandlung erhöhen sich die CST-Werte der Faulschlämme Reinfeld und Winsen erheblich. Die Schlämme Reinfeld weisen im Mittel einen um 87% höheren CST-Wert auf als der unbehandelte Faulschlamm (Abb. 18), die Faulschlämme Winsen gar einen um 653% höheren Wert. Der Fall Winsen ist besonders krass, was wiederum im Zusammenhang mit der Ultraschallwirkung auf Flockenzerstörung und deren

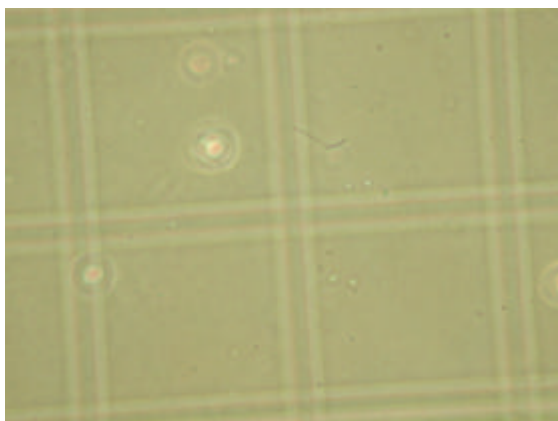
Folgen zu sehen ist. Am Beispiel Winsen sehen wir, dass die positive Wirkung der Beschallung von Überschussschlamm im Hinblick auf besseres Absetzverhalten und geringere Fädigkeit von negativen Effekten bezüglich Schaumbildungspotenzial und Entwässerungsverhalten überlagert wird. Diese Sachverhalte werden eindeutig geprägt durch die Verwendung des kationischen Polymers! Die CST-Werte der Faulschlämme Brunsbüttel werden durch die Ultraschallbehandlung nur marginal beeinflusst.

1.6.2 Erneute Entwicklung von Fadenbakterien in der Belebung

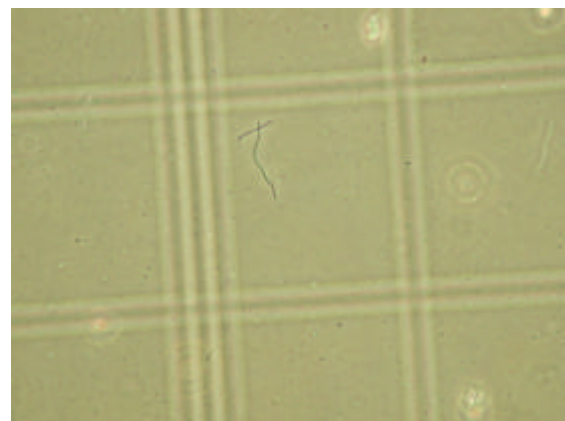
Mit kontinuierlichen Laborversuchen sollte nachgewiesen werden, dass die Ultraschallbehandlung Fadenorganismen zwar nachhaltig zerstört und diese sich - über die Trübwasserrückführung aus dem Faulbehälter - nicht erneut im Abwasserkreislauf entwickeln.

Grundvoraussetzung für die Durchführung der Versuchsreihen war, dass fadenfreier Belebtschlamm als Animpfslamm zur Verfügung stand. Es sollte ausgeschlossen werden, dass andere Faktoren als die Trübwasserrückführung für das Fadenwachstum in den Laborreaktoren verantwortlich sein konnten. Die Erfüllung dieser Bedingung erwies sich real als schwierig, da viele Kläranlagen einen gewissen Anteil Fadenbakterien im Belebtschlamm aufweisen. Diese Voraussetzung wurde insoweit modifiziert, dass Fadenorganismen, die im Überschussschlamm bzw. Faulschlamm der Pilotanlage vorkamen, nicht im Animpfslamm vorhanden sein durften.

Die kontinuierlichen Labortests wurden über einen Zeitraum von zweimal vier Wochen durchgeführt. In keinem der drei Laborreaktoren konnte anhand des mikroskopischen Bildes der Belebtschlämme Fadenwachstum durch die Trübwasserrückführung nachgewiesen werden. Im Vergleichsreaktor (Trübwasser aus unbehandeltem Faulschlamm) hätte man allerdings eine Entwicklung fadenförmiger Organismen erwarten können. Wir haben daraufhin die Trübwässer intensiv auf Fadenorganismen untersucht und festgestellt, dass nach Entwässerung (Zentrifugation) des Faulschlammes nur noch vereinzelt Fadenbruchstücke in der Wasserphase nachweisbar sind (Abb 24 + 25).



**Abb. 19: Trübwasser, Ultraschall
vorbehandelter Faulschlamm (16,7 Wh/L),
Phasenkontrast 200fach**



**Abb. 20: Trübwasser, nicht vorbehandelter
Faulschlamm, Phasenkontrast 200fach**

Ein erneutes Wachstum im Abwasserkreislauf von Fadenbakterien aus den Trübwässern der Schlammbehandlung schließen wir deshalb aus.

1.7 Technische Beurteilung des Verfahrens

Da Bläh- und Schwimmschlammabbildung auf Kläranlagen in der Regel saisonal auftritt, ist ein Verfahren gefordert, welches sich entsprechend schnell und flexibel in Betrieb nehmen lässt. In dieser Hinsicht bietet das Ultraschallverfahren gewisse Reize. Das benutzte Gerät der Fa. Sonotronic z.B. ist sehr kompakt, da die notwendigen Reaktionszeiten, wie oben dargestellt, im Bereich weniger Minuten liegen. Die Einbindung der kleinen Geräte in den Betrieb von Kläranlagen dürfte problemlos über genormte Rohrverbindungen (DN 50 oder 100) zu bewerkstelligen sein. Auf der Kläranlage sind dafür Formstücke und Rohre oder Schläuche vorzuhalten oder fest zu installieren. Die meisten Ultraschallgeräte auf dem Markt arbeiten mit einer Frequenz von 20 kHz und hoher Intensität, was zu deutlich hörbarem Lärm führt. Ausreichende Kapselung der Geräte ist deshalb nötig, um das Betriebspersonal akustisch nicht zu gefährden.

Auf unserer Pilotanlage lief das Sonotronic-Gerät problemlos ca. 1000 Stunden, wobei der Betrieb jedoch nur diskret und tageweise stattfand, also nicht rund um die Uhr. Es gibt aber bereits auf deutschen Kläranlagen großtechnische Anwendungen zur Desintegration von Schlämmen, so dass man heute davon ausgehen kann, dass Hochleistungs-Ultraschallgeräte im Praxisbetrieb bestehen.

1.8 Kosten des Verfahrens

Wie wir oben gesehen haben, sind die Erfolge der Beschallung von Blähschlamm auf den drei Kläranlagen sehr unterschiedlich. Das heißt der Nutzen dieses Verfahrens lässt sich nur von Fall zu Fall darstellen. Wenn wir aus unseren Ergebnissen einen Mittelwert für einen gewissen, notwendigen Energieeintrag ansetzen, können wir aber die Größenordnung der Kosten abschätzen. Wir setzen deshalb 8 kWh/m³ als spezifischen Energieeintrag an und rechnen das Beispiel für eine 100.000 EW Anlage.

Tabelle 8: Jährliche Kosten zur Blähschlammabkämpfung mit Ultraschall (100.000 EW Klärwerk)

Überschuss- bzw. Blähschlammfall (TR= 3%)	99 m ³ /d
Ultraschallanlage, Leistung	33 kW
Ultraschallanlage, Investition incl. periphere Ausstattung	396.000 €
Jahreskosten (Abschreibung 10 Jahre, i= 4%, a= 0,1233)	48.826 €
Stromkosten (7 ct/kWh), saisonweiser Halbjahresbetrieb	10.900 €
Verschleiß und Reparatur, Personalbedarf (1 h/Woche)	3.000 €
Jahreskosten	62.726 €
Spezifische Jahreskosten	3,48 €/m³

Tabelle 8 zeigt, dass die Fixkosten (Abschreibung) den größten Anteil an den Gesamtkosten darstellen. Für die spezifischen Kosten bedeutet der hohe Fixkostenanteil, dass das Verfahren kostengünstiger wird, je höher die Betriebsstunden p.a. sind. Geht man beispielsweise vom ganzjährlichen Betrieb aus, so entstünden nur noch spezifische Kosten von 2,04 €/m³. Es ist noch zu bemerken, dass die lineare Übertragung unserer Daten vom Pilot- in den Praxismaßstab sicherlich hinterfragt werden kann. Oft erweist sich der reale Praxisbetrieb kostengünstiger als der Betrieb im kleineren Maßstab. Ein Beispiel: Seit August 2003 ist auf dem Klärwerk Heiligenstadt (Biologische Abwasserreinigung mit aerober Stabilisierung) eine großtechnischen Überschussschlammbehandlung mit Ultraschall in

Betrieb mit Beschallung eines Teilstromes von nur 30% des Überschusschlammes (Energieeintrag 4 kWh/m^3). Seither wird keine Blähschlamm-Bildung in den Belüftungsbecken mehr festgestellt. Berechnet man für eine derartige Konstellation die Jahreskosten analog Tabelle 8, so ergeben sich nur noch $1,40 \text{ €/m}^3$, siehe Tabelle 9.

Tabelle 9: Jährliche Kosten zur Blähschlamm-Bekämpfung mit Ultraschall im Teilstrom (100.000 EW Klärwerk)

Überschuss- bzw. Blähschlamm-Anfall (TR= 3%, 30% Teilstrom)	33 m^3/d
Ultraschallanlage, Leistung	5,5 kW
Ultraschallanlage, Investition incl. periphere Ausstattung	69.000 €
Jahreskosten (Abschreibung 10 Jahre, $i = 4\%$, $a = 0,1233$)	8.508 €
Stromkosten (7 ct/kWh), Volljahresbetrieb	3.373 €
Verschleiß und Reparatur, Personalbedarf (1 h/Woche)	5.000 €
Jahreskosten	16.881 €
Spezifische Jahreskosten	1,40 €/m³

Zweifellos wird das Ultraschallverfahren in Zukunft bessere Chancen zum Einsatz auf unseren Kläranlagen haben, wenn entweder die Investitionskosten gesenkt werden können, was sicher bei höheren Produktionsstückzahlen der Fall sein wird (heute sind die Geräte noch Einzelanfertigungen) oder die Effizienz gesteigert werden kann, d.h. konkret mehr Nutzen aus der eingetragenen Energie gewonnen werden kann. Dies darf in Zukunft auch erwartet werden mit fortschreitendem Wissen über die komplexen Zusammenhänge zwischen Ausmaß und Ausbreitung der Kavitation und die damit verursachten Reaktionen mit der Schlamm-Matrix im Ultraschallfeld.

Die Marktchancen des Ultraschallverfahrens können deshalb derzeit nur grob abgeschätzt werden. Die spezifischen Kosten sind noch relativ hoch (siehe oben), die Kosten von Konkurrenzverfahren wie Flockungsmitteldosierung (PAC) liegen jedoch in der gleichen Größenordnung. Die Zahl der Kläranlagen mit Bläh- und Schwimmschlammproblemen ist seit der letzten Umfrage von Lind und Lemmer (1998) durch die gesetzlich geforderten Erweiterungen eher gestiegen. Ein potenzieller Markt bietet sich aber nicht nur in Deutschland, sondern in allen Industrieländern mit ähnlichen Umweltproblemen.

1.9 Zusammenfassung

Unsere Versuche mit der Pilotanlage haben nachgewiesen, dass:

- Eine erfolgreiche Bekämpfung der Schaumbildung im Faulbehälter durch Ultraschallbehandlung von Überschussschlamm prinzipiell möglich ist. Voraussetzung: die Ursache der Schaumbildung liegt eindeutig in der strukturellen Fädigkeit des zugeführten Überschussschlammes
- Der Faulprozess dann auch stabil abläuft
- Der Abbau organischer Substanz im Faulprozess danach leicht verbessert wird
- Eine Wiederanimpfung des Abwasserkreislaufs mit Fadenorganismen durch die Trübwasserrückführung nahezu ausgeschlossen werden kann.

Wir haben festgestellt, dass die Verwendung von polymerischen (kationischen) Flockungshilfsmitteln (FHM) zur besseren Voreindickung der Schlämme für die Anwendung der Ultraschalltechnik problematisch ist. Die Zugabe von (nicht optimal dosierten) FHM

bewirkt eine Erhöhung der Viskosität der Schlammsuspension, was die Kavitationswirkung der Beschallung beeinträchtigt. Das Schaumbildungspotenzial wird durch die Zugabe von FHM offenbar erhöht, was sich in der Praxis negativ durch Schäumen im Faulbehälter manifestiert. Die Wechselwirkungen zwischen FHM Zugabe, Flockenbindung und Kavitation sind noch genauer zu untersuchen.

Als am besten geeignetes Merkmal zur Charakterisierung von Bläh- und Schwimmschlamm im Zusammenhang mit Schaumproblemen in der Faulung, betrachten wir das Schaumbildungspotenzial. Der Erfolg der Ultraschall-Vorbehandlung von Überschussschlamm kann daran gemessen werden.

Die endgültige kostenmäßige Bewertung des Verfahrens kann erst die großtechnische Anwendung bringen. Die spezifischen Kosten liegen in der Größenordnung von 2 bis 3 € pro m³. Die Chancen für eine Markteinführung werden dennoch als gut eingeschätzt, weil das Angebot an Konkurrenzverfahren gering ist und deren Kosten vergleichbar sind. Eine verlässliche Bilanzierung von Kosten/Nutzen ist nur von Fall zu Fall möglich, weil der Nutzen sehr Klärwerk spezifisch ausgeprägt ist.

1.10 Referenzen

Andreasen K., Nielsen P.H. (2000): Growth of *Microthrix parvicella* in nutrient removal activated sludge plants: studies of in situ physiology. *Wat. Res.* 34, S. 1559-1569

ATV Arbeitsgruppe 2.6.1 (1988): Verminderung und Bekämpfung von Blähschlamm und Schwimmschlamm. *KA*, 35 (2), S. 152 -163

ATV Arbeitsgruppe 2.6.1 (1998): Blähschlamm, Schwimmschlamm und Schaum in Belebungsanlagen – Ursachen und Bekämpfung. *KA*, 45 (10), S. 1959 -1968

Eikelboom D.H., van Buijsen H.J.J. (1983): Handbuch für die mikroskopische Schlammuntersuchung. Hirthammer Verlag, München.

Foot R.J., Kocianova E., Forster C.F. (1992): Variable morphology of *Microthrix parvicella* in activated sludge systems. *Wat. Res.* 26, S. 875-880

Knoop S. (1997): Untersuchungen zum Vorkommen von *Microthrix parvicella* in Kläranlagen mit Nährstoffelimination. Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 101.

Kunst S., Helmer C., Knoop S. (2000): Betriebsprobleme auf Kläranlagen durch Blähschlamm, Schwimmschlamm, Schaum. Handbuch zur Identifizierung und Bekämpfung fädiger Bakterien. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Lemmer H. (1996): Biologische Ursachen von Schaum und Schwimmschlamm in Belebungsanlagen sowie mögliche Gegenmaßnahmen. In: Lemmer, Griebe, Flemming (Hrsg.) *Ökologie der Abwasserorganismen*. Springer Verlag Berlin Heidelberg 1996.

Lind G., Lemmer H. (1998): Biologische Charakterisierung von Schäumen in Belebungsanlagen, Teil I, Bedeutung fädiger Belebtschlamm Bakterien. *Gwf Wasser-Abwasser* 139: 1-6

Mamais D., Andreadakis A., Noutsopoulos C., Kalergis C. (1998): Causes of, and control strategies for, *Microthrix parvicella* bulking and foaming in nutrient removal activated sludge systems. *Wat. Sci. Tech.* 37 (4-5), S. 9-17

Neis U. (2001): Desintegrationsverfahren zur Intensivierung der Schlammbehandlung. In: Schlammbehandlung, -verwertung und -beseitigung. ATV-DVWK-Fortbildungskurs für Wassergütewirtschaft und Abwassertechnik 22.-24.10.2001 in Kassel

Nickel K. (2001): Intensivierung der anaeroben Klärschlammstabilisierung durch vorgeschalteten Zellaufschluss mittels Ultraschall. *Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft*, Heft 34

Pagilla K.R., Jenkins D., Kido W. (1998): *Nocardia* effects in waste activated sludge. In: *Water Quality International '98, IAWQ 19th Biennial International Conference*, Conference Preprint Book 3: 240-247.

Schade M., Lemmer H. (2002): Charakterisierung von Fadenbakterien zur Bekämpfung von Schaum in Belebungsanlagen. Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Materialien Nr. 104.

Westlund A.D., Hagland E., Rothmann M. (1998): Operational aspects on foaming in digesters caused by *microthrix parvicella*. Wat. Sci. Tech. Vol. 38, No 8-9, pp 29-34.

2 Verwertungsplan

Wirtschaftliche Verwertungsmöglichkeiten

Wir sind davon ausgegangen, dass in Deutschland ca. 10% der Schlämme auf kommunalen Kläranlagen mit Faulung wegen Bläh- und Schwimmschlammereignissen nicht ordnungsgemäß abgebaut werden können. Dies entspricht einer jährlichen Menge von etwa 250.000 t Trockenrückstand bzw. 5 Mio m³. Die Entwässerung und Entsorgung der biologisch nicht stabilisierten Schlämme verursacht jährliche Kosten von ca. 200 Mio EUR. Diese Kosten könnten durch Ultraschallbehandlung der fädigen Schlämme vermieden werden.

Es gibt nach wie vor kein unumstrittenes Sanierungskonzept für Blähschlammfälle, so dass von einem prinzipiellen Interesse der Zielgruppen (Betreiber, Ingenieurbüros) an der neuen Verfahrenstechnik ausgegangen werden kann.

Im Anschluss an das Projektende soll diese Verfahrenstechnik auf Messen und Tagungen bei den Zielgruppen bekannt gemacht werden. Die 2001 gegründete Firma ULTRAWAVES GmbH, Hamburg, zum Beispiel ist Know-how-Träger bezüglich der Ultraschallanwendung im Umweltsektor und wird in Kooperation mit dem Gerätehersteller SONOTRONIC GmbH ein Konzept zur Vermarktung dieses Verfahrens aufstellen.

Wir erwarten, dass innerhalb der nächsten zwei Jahre ein Einstieg in den Markt erfolgt. Da Bläh- und Schwimmschlamm ein weltweites Problem ist, wird auch langfristig (Zeithorizont ~ 5 Jahre) eine europäische und /oder außereuropäische Vermarktung angestrebt.

3 Fortschritte in der Bläh- und Schwimmschlammbekämpfung

Microthrix-Tagung am 25./26. Februar 2002, Universität Hannover

Inhalt der Veranstaltung:

- Zusammenfassung des aktuellen Wissens über den Organismus "Microthrix parvicella", den Hauptverursacher heutiger Bläh- und Schwimmschlammprobleme.
- Neue Bekämpfungsstrategien.

Fazit:

- Eine der aktuellen und üblichen Bekämpfungsmethoden ist die Anwendung von Polyaluminiumchlorid. Der Einsatz ist zwar auf vielen Kläranlagen erfolgreich, aber sehr kostspielig. Die Schlammengen werden erhöht.
- Ein Pilotprojekt läuft auf der Kläranlage Hildesheim, wo der Einsatz eines Hochdruck-homogenisators (HDH) getestet wird. HDH ist, so gesehen, ein Konkurrenzverfahren zur Ultraschallbehandlung.

4 Veröffentlichung der Ergebnisse

Am 22. und 23. März 2002 hat an der TU Hamburg-Harburg das vom Berichterstatter organisierte 2. Internationale Symposium über "Ultraschall in der Umwelttechnik" stattgefunden mit großem Erfolg stattgefunden. Das Symposium und die eingegangenen Echos dazu bestätigen die auch international führende Rolle der Arbeitsgruppe des Projektleiters auf dem genannten Gebiet der Ultraschallanwendung.

- Neis, U. (Hrsg.). Ultrasound in Environmental Engineering II, TU Hamburg-Harburg Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, Bd. 35, 2002, ISBN 3-930400-47-2.

darin

1. Vortrag der Projektmitarbeiterin auf dem 2. Internationalen Symposium "Ultraschall in der Umwelttechnik", TU Hamburg-Harburg, 22./23. März 2002 bzw. Veröffentlichung im Tagungsband "Ultrasound in Environmental Engineering" (siehe Literaturliste): "Bekämpfung von Blähschlamm".
2. Vortrag des Projektleiters auf dem 2. Internationalen Symposium "Ultraschall in der Umwelttechnik", TU Hamburg-Harburg, 22./23. März 2002 bzw. Veröffentlichung im Tagungsband "Ultrasound in Environmental Engineering" (siehe unten): "Intensivierung biologischer und chemischer Prozesse durch Ultraschall".

Wünsch B, Neis U (2002): Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlamm mittels Ultraschall, 15. Fachtagung Norddeutsche Tagung für Abwasser- und Gewässerschutz 18./19.11.2002, Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 40, 137-146.