

"Verfahrensvergleich und Ergebnisse der mechanischen Klärschlamm-Desintegration"

Mitgearbeitet haben:

Dr.-Ing. Johannes Müller, Braunschweig (Sprecher)

Dr. rer. nat. Andreas Tiehm, Karlsruhe (stellv. Sprecher)

Dipl.-Ing. Bernhard Eder, München

Prof. Dr.-Ing. F. Wolfgang Günthert, München

Dr.-Ing. Herbert Hruschka, München

Dipl.-Ing. Julia Kopp, Braunschweig

Prof. Dr. rer. pol. Peter M. Kunz, Mannheim

Dr.-Ing. Jürgen Oles, Gladbeck

Dr.-Ing. Karl-Georg Schmelz, Essen

Dipl.-Ing. Kainan Seiler, Darmstadt

1 Vorbemerkung

Die ATV/DVWK-Arbeitsgruppe AK-1.6 „Klärschlamm-Desintegration“ hat im Jahr 2000 den Teil 1 des Arbeitsberichtes mit dem Titel „Verfahren und Anwendungsgebiete der mechanischen Klärschlamm-Desintegration“ vorgelegt (KA 4/2000, S. 570-576). Im Teil 2 werden nun die vorgestellten Verfahren verglichen und hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten im praktischen Kläranlagenbetrieb bewertet. Die Veröffentlichung einer ausführlichen Fassung der beiden Berichte als Sonderdruck ist vorgesehen. Diese wird dann auch auf der Internetseite der Arbeitsgruppe unter www.klaerschlammdesintegration.de aufrufbar sein. Unter dieser web-Adresse finden sich weitere Hinweise zur Klärschlamm-Desintegration sowie der Teil 1 des Arbeitsberichtes.

Die Zielsetzungen der Desintegration sind das Freisetzen von Zellinhaltsstoffen, um den Schlamm weitergehend als bisher zu stabilisieren bzw. zu mineralisieren, sowie die Bekämpfung von Schaumproblemen. Konkrete Einsatzgebiete sind die Verbesserung der anaeroben Stabilisierung, die Bereitstellung von internen H-Quellen für die Denitrifikation und die verbesserte Absetzbarkeit von Schlämmen, insbesondere Blähschlämmen. Die Klärschlamm-Desintegration ist ein Verfahrensschritt, der auf kommunalen Kläranlagen bisher nur vereinzelt angewandt wird. Die angeführten Ergebnisse basieren daher teilweise auf Erfahrungen, die in labor- und halbtechnischen Versuchsanlagen gewonnen wurden.

2 Vergleich der Aufschlussverfahren

2.1 Betriebsverhalten

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden sechs unterschiedliche Verfahren zur mechanischen Klärschlamm-Desintegration untersucht bzw. eingesetzt. Es handelt sich dabei einerseits um Geräte, die zuvor bereits großtechnisch außerhalb des Abwasserbereiches verwendet wurden

(Rührwerkskugelmühle, Ultraschallreaktor, Hochdruckhomogenisator), andererseits um Neuentwicklungen für die Klärschlamm-Desintegration (Hochleistungspulsreaktor, Prallstrahlgerät) sowie um die Modifikation einer Eindickzentrifuge (Lysat-Zentrifuge). Die Unterschiede der Verfahren bezüglich Betriebserfahrung, Betriebssicherheit und Flexibilität sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Der Umfang der Betriebserfahrungen ist recht unterschiedlich und reicht vom Liter- bis zum Kubikmeter-Maßstab. Der Einsatz der Verfahren zur Desintegration setzt die Anpassung an die spezifischen Eigenschaften des Klärschlammes voraus. So erweist sich das Vorhandensein von grobpartikulären Störstoffen dabei naturgemäß als besonderes Problem für die Betriebssicherheit bei denjenigen Verfahren, die durch eine starke Verengung des Strömungsquerschnittes gekennzeichnet sind (Düsen bei Hochdruckhomogenisator und Prallstrahlverfahren, Siebe zur Mahlkörperabtrennung bei der Rührwerkskugelmühle). Bei diesen Verfahren ist u. U. ein zusätzlicher Verfahrensschritt zur Abtrennung der Grobstoffe vor der eigentlichen Desintegration vorzusehen, um einen Dauerbetrieb zu ermöglichen. Vornehmlich faserartige Bestandteile, wie Haare, können zu Verstopfungen führen. Durch eine angepasste Konstruktion der Geräte können diese Probleme reduziert oder beseitigt werden, wie beispielsweise bei der Rührwerkskugelmühle durch eine Zentrifugalabscheidung der Mahlkörper anstelle einer Siebabscheidung. Bei der Ultraschall-Desintegration und der Hochleistungspulstechnik ist eine Vorbehandlung des Schlammes nicht notwendig, bei der Lysat-Zentrifuge erscheint eine Abtrennung von Grobstoffen jedoch sinnvoll zu sein.

Tab. 1: Betriebsverhalten der mechanischen Verfahren zur Desintegration kommunalen Klärschlammes

	Rührwerks- kugelmühle	Ultraschall- desinte- grator	Hochdruck- homo- genisator	Hoch- leistungs- pulstechnik	Lysat- Zentrifuge	Prallstrahl- verfahren
Umfang der Betriebserfahrung:						
- Labor	++	++	++	+	--	+
- Pilot-Anlage	++	++	++	-	--	--
- großtechn. Versuchsbetrieb	+	+	-	- ²⁾	+	--
- Dauerbetrieb	-	-	--	--	+	--
Stabilität gegenüber Störstoffen	+/- ¹⁾	++	--	++	+	-
Technischer Entwicklungsstand für den Einsatz auf Kläranlagen:	+	+	--	-	+	-

++: sehr viel bzw. sehr gut, +: viel bzw. gut; -: wenig bzw. schlecht, --: sehr wenig bzw. sehr schlecht

¹⁾ + bei Mahlkugelabtrennung im Fliehkraftfeld, - bei Abtrennung über Sieb

²⁾ für die USA liegen einige Versuchsergebnisse zur niedrigerenergetischen Behandlung vor

2.2 Energieeintrag und Aufschlussergebnis

Neben den Betriebseigenschaften der Verfahren sind die entstehenden Kosten und das Aufschlussergebnis von entscheidender Bedeutung. An den Betriebskosten haben die Energiekosten für den Aufschluss einen größeren Anteil (siehe auch Kap. 5).

In vereinheitlichter Darstellung wird in der Regel der spezifische Energiebedarf der Desintegration dargestellt, d.h. der auf die zugeführte Trockenmasse (m_T) bezogene Energiebedarf. Generell nimmt bei allen Verfahren der Energiebedarf mit zunehmendem Desintegrationsgrad zu, wobei sich der Energiebedarf zur Desintegration von Klärschlämmen unterschiedlicher Kläranlagen unterscheidet. Der direkte Vergleich wird auch dadurch erschwert, daß sich unterschiedliche Aufschlussgeräte, denen das gleiche Verfahren zugrunde liegt, in ihrem Wirkungsgrad unterscheiden. So wird beispielsweise bei Geräten, die mit Kavitation als Aufschlussmechanismus arbeiten, ein Teil der eingetragenen Energie auch als Wärme freigesetzt. Um den Anteil der Kavitation möglichst hoch zu halten, sind geeignete Betriebsparameter zu wählen [1]. Die Spannweite des bisher ermittelten spezifischen Energiebedarfs zum Erreichen eines bestimmten Aufschlussgrades ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Definition des Aufschlussgrades findet sich im ersten Teil des Berichtes. Bei allen Verfahren wird durch den Einsatz konzentrierter Schlämme eine bessere Ausnutzung der Energie erreicht [2]. Ein annähernd kompletter Aufschluss der Mikroorganismen ($> 95\% A_s$) wurde bisher mittels Rührwerkskugelmühle, Ultraschalldesintegrator und Hochdruckhomogenisator erzielt.

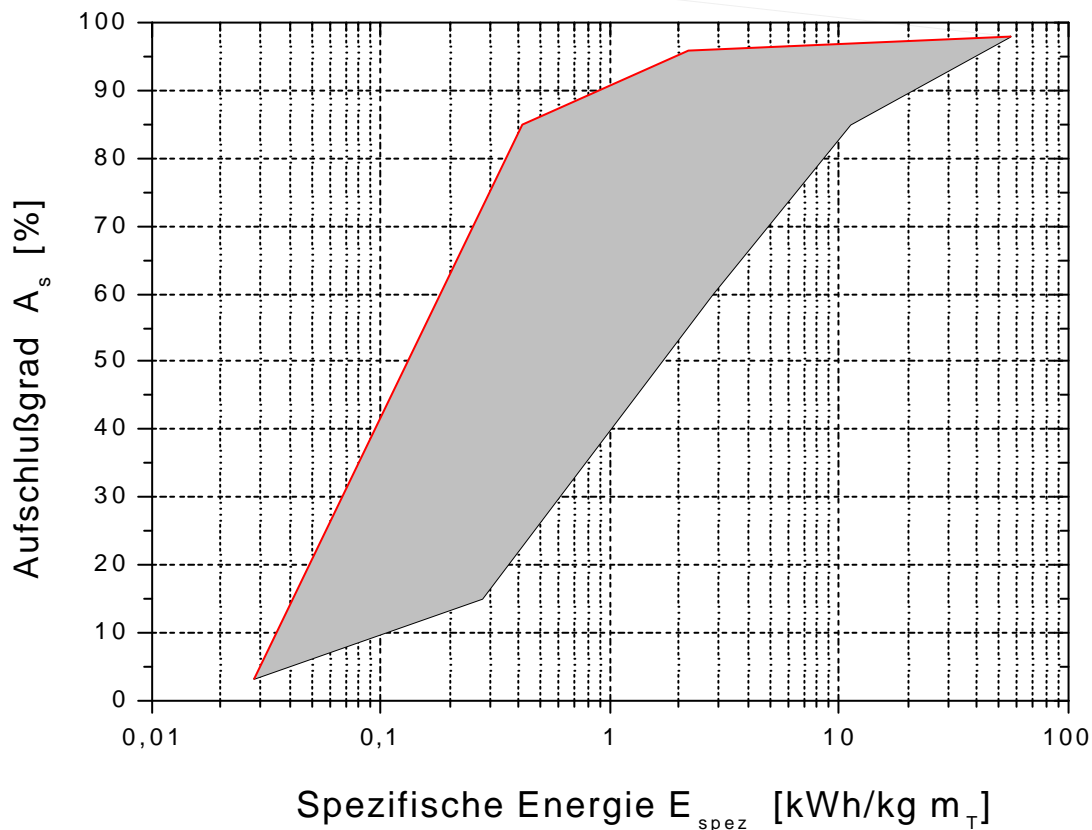


Abb. 1: Spezifischer Energiebedarf für die Desintegration von Überschussschlamm. Der markierte Bereich beinhaltet die Daten für die unterschiedlichen Klärschlämme und Verfahren.

3 Zielsetzung und Ergebnisse der Desintegration

Es wurde wiederholt festgestellt, dass sich der Aufschluss von Überschussschlämmen besonders deutlich auf das Abbauverhalten auswirkt, wohingegen bei Primärschlämmen kaum Verbesserungen beobachtet wurden. Dies lässt sich auf den hohen Anteil an Mikroorganismen im Überschussschlamm zurückführen, deren durch den Aufschluss freigesetzte Zellinhaltsstoffe den Abbauprozessen deutlich leichter zugänglich sind.

3.1 Verbesserung der anaeroben Stabilisierung

Die durch die mechanische Vorbehandlung verursachte erhöhte Bioverfügbarkeit organischer Stoffe im Klärschlamm führt zu einer Beschleunigung der anaeroben Abbauprozesse (Unterstützung der Hydrolyse) und/oder zu einem weitergehenden Abbau der organischen Inhaltsstoffe im Faulbehälter. Der Umfang dieser Verbesserung hängt neben der hydraulischen Aufenthaltszeit im Faulbehälter vor allem von den Schlammeigenschaften (Schlammalter, Anteil der fakultativ anaeroben Organismen u.a.) ab. Untersuchungen im Labor-, halbtechnischen und technischen Maßstab geben einen Anhaltspunkt, in welchen Größenordnungen sich eine Verbesserung der anaeroben Stabilisierung durch die mechanische Desintegration bewegt (Tabelle 2). In der Tabelle werden die relativen Steigerungen des Abbaugrades, des Faulgasanfalls und die relative Erhöhung der Stickstoffrückbelastung in % im Vergleich zur Faulung von unbehandeltem Schlamm bei einer üblichen hydraulischen Verweilzeit von 20 d aufgeführt. Teilweise war für die Ermittlung der relativen Steigerungen eine Extrapolation aus den veröffentlichten Versuchsergebnissen notwendig. Darüber hinaus wurde die Fauldauer abgeleitet, bei der annähernd gleiche Abbaugrade wie bei einer Faulzeit von 20 d erreicht werden kann. Zur Zeit sind lediglich die Ergebnisse zweier Versuche im großtechnischen Maßstab veröffentlicht worden [3, 4]. Aufgrund der Datenlage können die Ergebnisse daher noch nicht umfassend bewertet werden.

Bei einer hydraulischen Verweilzeit von 20 d wurden Steigerungen des Abbaugrades der organischen Substanz von 10 bis über 30 % gemessen. Die relativen Steigerungen des Faulgasanfalls korrespondierten in etwa mit denen des Abbaugrades [5]. Bei sehr hohen hydraulischen Aufenthaltszeiten (> 20 d) in einstufigen Faulbehältern mit suspendierter Biomasse wird kaum eine Verbesserung der anaeroben Stabilisierung erreicht. Hier führt die biologische Hydrolyse zu vergleichbaren Abbauergebnissen. Zur weiteren Steigerung der Abbaugrade müssen mehrstufige Verfahren und/oder weitergehende Behandlungsverfahren (z. B. mit Ozon) herangezogen werden [6, 7]. Der Einsatz der mechanischen Desintegration eignet sich daher besonders bei Faulzeiten von weniger als 15 Tagen (bei suspendierten Systemen). Zu kurze hydraulische Aufenthaltszeiten wirken sich aufgrund der Gefahr des Auswaschens von aktiver Biomasse bzw. der Gefahr einer hydraulischen Überlastung negativ aus. Ein sinnvoller Betriebsbereich dürfte nach bisherigen Erkenntnissen hierfür bei Aufenthaltszeiten im Faulbehälter zwischen 7 und 15 d liegen, wobei hierzu noch keine großtechnischen Erfahrungen vorliegen. Bei solch kurzen Aufenthaltszeiten muß eine gute Durchmischung gewährleistet sein, damit Kurzschlussströmungen vermieden werden.

3.2 Verbesserung des aeroben Stabilisierungsverhaltens und Einsatz des Desintegrates bei der Denitrifikation

Durch die erhöhte Bioverfügbarkeit nach Desintegration des Rücklaufschlammes kann eine Verringerung des Überschussschlammanfalls erreicht werden. Über die erreichbare Verringerung liegen erst wenige Erfahrungen vor. Bei einem mehrmonatigen Betrieb einer Rührwerkskugelmühle auf einer SBR-Kläranlage mit 1.200 EW stellten Kunz et al. eine Verminderung des Anfalls an Überschussschlamm um 60 % fest, ohne dass es aber zu einer Veränderung des Glühverlustes gegenüber dem bei konventioneller Betriebsweise anfallenden Schlamm kam [18]. Auch bei den Ablaufwerten der Kläranlage wurden keine Veränderungen beobachtet. Diese Messwerte erscheinen unerklärlich, da der Verbleib der anorganischen Schlammbestandteile nicht klar ist. Ähnliches wurde auch bei Untersuchungen von Membranbelebungsanlagen berichtet. Für den aeroben Abbau der durch Zellaufschluss freigesetzten Inhaltsstoffe müsste sich ein erhöhter Sauerstoffbedarf einstellen, der in der Praxis aber nicht bestätigt werden konnte. In weiteren großtechnischen Untersuchungen konnten in industriellen Abwässern einmal 40 und einmal 44 % Schlamm-Massenverminderung erreicht werden. In beiden Fällen war der desintegrierte Schlamm in die aerobe Stufe einer kontinuierlich durchflossenen Abwasserreinigungsanlage eingeleitet worden, weil eine Denitrifikation in diesen Betrieben nicht erforderlich war.

Die entstehenden Desintegrationsprodukte können als gezielt einzusetzende Wasserstoffquelle bzw. Elektronendonatoren für die Denitrifikation genutzt werden. Kunz und Wörne [19] verglichen mehrere Substrate anhand der Denitrifikationsgeschwindigkeiten (Tabelle 3). Es kamen Desintegrationsprodukte aus einer Rührwerkskugelmühle mit unterschiedlichen Betriebsparametern (veränderte Umfangsgeschwindigkeit und Kugelgröße) und drei Referenzabwasserproben zum Einsatz. Die Versuche wurden im Labormaßstab durchgeführt. Wie Tabelle 3 zeigt, lassen sich mit den Überständen von desintegrierten Klärschlämmen gleiche, teilweise sogar höhere Denitrifikationsgeschwindigkeiten erreichen, als mit Essigsäure als Wasserstoffdonator. Großtechnische Untersuchungen zum Einsatz des desintegrierten Schlammes für die Denitrifikation in kontinuierlichen Verfahren stehen noch aus.

Tab. 3: Mit verschiedenen Substraten erreichte Denitrifikationsgeschwindigkeiten [19]

H-Quellen bzw. Elektronendonatoren für die Denitrifikation	Denitrifikationsgeschwindigkeiten [mg NO _x - N/l*h]
Desintegrierter Klärschlamm	3,0 - 4,8
Synthetisches Abwasser nach DEV L24	4,0
Kommunales Abwasser KA Mannheim	4,0
Essigsäure	3,9

3.3 Verbesserung der Absetzeigenschaften und des Entwässerungsverhaltens von Überschussschlämmen sowie Bekämpfung von Schaumproblemen

Bezüglich des Absetzverhaltens der Schlämme wurde in mehreren Untersuchungen eine Verbesserung durch Desintegration festgestellt. Dies gilt vor allem dann, wenn durch fadenförmige Mikroorganismen verursachte Absetzprobleme vorliegen (siehe hierzu auch den ersten Teil des Arbeitsberichtes). So ergaben großtechnische Untersuchungen mit Ultraschall-desintegratoren, dass die Absetzvolumina der beschallten Überschussschlammproben, insbesondere bei kurzen Absetzzeiten, um ca. 25 % niedriger als die des Originalschlammes waren [20]. Photographien von Absetzproben (Abbildung 2) verdeutlichen die verbesserten Absetzeigenschaften der beschallten Überschussschlämme. Eine Verringerung des Volumenstroms, der durch die Ultraschallanlage strömte und damit eine Erhöhung des Energieeintrages, brachte nochmals eine Verbesserung des Absetzverhaltens. Bei längeren Standzeiten passten sich die Schlammvolumina wieder an. In den Abbildungen sind auch die verschieden starken Trübungen in den Überständen der beschallten Proben sichtbar, die mit erhöhtem Energieeintrag zunehmen. Im Überstand finden sich gelöste und partikuläre organische Verbindungen. Diese erscheinen nach bisherigen Erkenntnissen biologisch leicht abbaubar zu sein. Es kann aber derzeit nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einer Erhöhung der CSB-Ablaufwerte der Kläranlage kommt (siehe auch Kap. 4.1).



Abb. 2: Sedimentationsverhalten von Überschussschlammproben nach 10 (links) und 30 Minuten (rechts) Absetzzeit, jeweils v. l. n. r.: unbehandelt, geringerer Energieeintrag, höherer Energieeintrag.

In Tabelle 4 wird eine Übersicht über die derzeit vorliegenden Daten über den Einfluss der mechanischen Desintegration auf das Absetzverhalten von Schlämmen gegeben.

Beim Einsatz der mechanischen Desintegration zur Verbesserung des Entwässerungsverhaltens wird eine Veränderung der Flockenstruktur, d.h. kein bzw. nur ein geringer Zellaufschluss angestrebt. Bei einer durch Ultraschallbehandlung optimierten Partikelgrößenverteilung wurde bei der untersuchten Kläranlage von im wesentlichen unverändertem Konditionierungsmittelbedarf und um bis zu 5% (relativ) verbesserten Feststoffausträgen berichtet [25]. Es muss hier angemerkt werden, dass es durch die Desintegration bei anderer Zielsetzung (z.B. verbesserter Abbau) auch zu einer Verschlechterung des Entwässerungsverhaltens des Faulschlammes kommen kann (siehe Kap. 4.2).

Tab. 4: Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zur Verbesserung des Absetzverhaltens

	Verfahren	Energie	Schlammindex [ml/g]			Quelle
		Installierte Leistung; Leistungsdichte; Spez. Energie	Unbehandelt	Desintegriert	Verbesserung	
KA 1 Überschussschlamm	UD	1 kW Schwinger; ~ 0,35 W/cm ² ; ~ 0,9 kWh/kg _{nT}	120	99	17,5 %	Günther & Osswald, 1999 [20]
KA 2 Überschussschlamm	UD	1,1 kW Schwinger; ~ 0,4 W/cm ² ; ~ 0,7 kWh/kg _{nT}	114	93	18,4 %	
KA 3 Überschussschlamm	UD	0,8 kW Schwinger; ~ 0,34 W/cm ² ; ~ 0,1 kWh/kg _{nT}	151	125	17,2 %	
Schwimmschlamm	UD, HDH, RWKM	0,19 - 0,69 kWh/kg _{nT}	200	125	37,5 %	Müller et al., 1999 [21]
Blähschlamm	UD	11,6 kWh/m ³ ~ 5,6 kWh/kg _{nT}	233	128	45 %	Tiehm et al., 1998 [22]
Blähschlamm	SH	nicht bekannt	450 bzw. 600	270 bzw. 240	40 bzw. 60 %	Laube, 1994 [23]
Blähschlamm	SP	nicht bekannt	368	116	68,5 %	Seydler & Näher, 1978 [24]

UD: Ultraschalldesintegrator, HDH: Hochdruckhomogenisator, RWKM: Rührwerkskugelmühle, SH: Scherspalthomogenisator, SP: Tellerseparator

Als Folge der Desintegration können hinsichtlich der Reduktion der Schaumentstehung im Faulbehälter positive Effekte beobachtet werden [21]. Ist die Schaumbildung auf einen hohen Anteil von fadenbildenden Mikroorganismen im Überschussschlamm zurückzuführen, dann wird durch die Desintegration die voluminöse Flockenstruktur aufgelöst und damit die Möglichkeit des Anhaftens von Gasblasen verringert. Die Menge aufschwimmenden Schlammes im Faulbehälter kann somit reduziert werden. Allerdings liegen zu diesem Einsatzfeld der Desintegration erst wenig Erkenntnisse vor.

4 Rückwirkung auf den Kläranlagenbetrieb

Bei der Rückwirkung der mechanischen Klärschlammesintegration auf den Kläranlagenbetrieb sind in Abhängigkeit der verschiedenen Einsatzmöglichkeiten mögliche Veränderungen der Belastung des Schlammwassers, die eventuelle Anreicherung von Schadstoffen und das Entwässerungsverhalten der Schlämme nach der Schlammstabilisierung zu berücksichtigen.

4.1 Rückbelastung der Kläranlage

Die Belastung des Schlammwassers lässt sich durch die Konzentrationen mit C-, N- und P-Verbindungen sowie durch nicht abgeschiedene Partikel erfassen. In Tabelle 5 sind prozentuale mittlere Veränderungen der Rückbelastung und der Schlammmentwässerung zusammengefasst. Die Angaben beziehen sich auf die Laboruntersuchung von fünf

verschiedenen Überschussschlämmen. Die Werte geben die prozentuale Veränderung hinsichtlich der unbehandelten Referenzproben an. Dabei ist zu beachten, daß die Werte in Abhängigkeit der jeweiligen Schlammeigenschaften und des Aufschlussgrades streuen können.

Tab. 5: Einfluss des Zellaufschlusses auf die Entwässerung und Rückbelastung nach einer anaeroben Stabilisierung

Probe	nicht aufgeschlossen	mech. aufgeschlossen	Mittelwerte / Mittlere relative Veränderung in \pm %
Aufschlussgrad As [%]	0	43-57	53%
Fauldauer [d]	13-21	13-20	17 d
Abbaugrad η_{oTR} [%]	28-34	33-49	+19%
Polymerbedarf [g/kg]	5,0-6,5	6,7-9,0	+42%
Trockenrückstand TR_{entw} [g/kg]	5,8-15,4	6,1-14,5	-6%
TKN [mg/l]	156-680	204-822	+28%
CSB _{filtriert} [mg/l]	35-253	46-283	+38%
PO ₄ -P [mg/l]	24-251	20-208	-9%

Bei der mechanischen Desintegration des Überschussschlammes vor der Schlammfäulung werden die freigesetzten Zellinhaltsstoffe dem anaeroben Abbau zugänglich gemacht. Als Endprodukt des Proteinabbaus verbleibt Ammonium im Schlammwasser, so dass in Abhängigkeit des erreichten Aufschluss- und Abbaugrades eine relevante Steigerung der Stickstoffkonzentration von ca. 30% zu verzeichnen ist, die nahezu ausschließlich aus Ammonium besteht. Eine Erhöhung der Phosphatkonzentration konnte nicht beobachtet werden.

Beim Einsatz der mechanischen Desintegration zur Unterstützung der Denitrifikation bzw. zur Verminderung der Überschussschlammproduktion ist zu beachten, dass Schwermetalle und Phosphat nur mit dem Überschussschlamm aus dem Abwasserstrom nach Vorklärung ausgeschleust werden können. Schwermetalle werden durch den Aufschluss kurzfristig mobilisiert [26]. Direkt nach dem Aufschluss ist eine Anreicherung in der flüssigen Phase zu messen. Während der folgenden Schlammstabilisierung werden die Schwermetalle wieder an der Schlammatrix adsorbiert. Es ist dabei zu beachten, dass es durch den vermehrten Abbau organischer Substanz zu einer Erhöhung der Schwermetallkonzentrationen in der anfallenden Restschlammmenge kommen kann. Letzteres gilt natürlich analog auch für die anaerobe Stabilisierung.

Durch den Zellaufschluss freigesetzte organische Verbindungen werden weitgehend biologisch abgebaut. Die daraus entstehende Rückbelastung, gemessen als membranfiltrierter CSB ist dennoch im Mittel um ca. 40% erhöht gegenüber den unbehandelten Schlämmen. Die nicht anaerob abgebauten gelösten organischen Verbindungen sind in der Regel jedoch leicht aerob abbaubar, wie in Sapromatversuchen gezeigt werden konnte. Eine Rückbelastung mit gelösten organischen Verbindungen in den gemessenen Konzentrationen stellt zudem für den Kläranlagenbetrieb keine relevante Beeinflussung dar.

Der Aufschluss bedingt abhängig vom Aufschlussgrad einen erhöhten Anteil feinputikulärer Substanzen im Schlammwasser. Dadurch kommt es auch zu einer erhöhten Rückbelastung der Kläranlage mit partikulärem CSB, der an die Schlammatrix adsorbiert. Insbesondere bei der mechanischen Schwimmschlammbekämpfung ist die übermäßige Bildung von feinputikulärem CSB zu vermeiden, da dies die Qualität des Kläranlagenablaufes beeinträchtigen kann.

4.2 Konditionierungs- und Entwässerungsverhalten

Wird die mechanische Klärschlamm-desintegration nicht zur gezielten Verbesserung des Entwässerungsverhaltens, sondern vor dem Hintergrund der Verbesserung des anaeroben Abbaus betrieben, d.h. mit der Freisetzung von Zellinhaltsstoffen, verschlechtert sich meist das Entwässerungsverhalten des Klärschlammes. Die durch den Aufschluss bedingte Erhöhung feinsten Partikeln führt zu einer Erhöhung des Zwischenraumwasseranteils und zu einer Verminderung des Entwässerungsergebnisses. Bei der anaeroben Stabilisierung reagglomerieren diese Partikel an die Schlammmatrix, so dass nach ausreichender anaeroben Stabilisierung der aufgeschlossenen Schlämme keine wesentliche Veränderung des Feststoffaustrages gegenüber unbehandelten Schlämmen zu erwarten ist. Die untersuchten Schlämme wiesen im Mittel ein um 6% geringeres Labor-Entwässerungsergebnis ($TR_{Entw.}$) im Vergleich zu den unbehandelten Schlämmen auf (siehe Tabelle 5).

Mit dem mechanischen Zellaufschluss verändert sich das Konditionierungsverhalten der Klärschlämme. In Abhängigkeit vom Aufschlussgrad wurden ca. 40% höhere Polymermengen zur Konditionierung der ausgefaulten Schlämme benötigt (Tabelle 5). Der Polymerbedarf eines Schlammes wird unmittelbar durch die negative Oberflächenladung der Schlammteilchen bestimmt. Extrazelluläre polymere Substanzen (EPS) sind aufgrund ihrer starken Polarität nach außen negativ geladen und umgeben die gesamte Partikeloberfläche und die Mikroorganismen. Durch die Desintegration werden zusätzlich polymere Substanzen freigesetzt. Diese Substanzen sind zum Teil von komplexer Struktur und nur schwer abbaubar, so dass sich der erhöhte Flockungsmittelbedarf auf nicht abgebaute polymere Substanzen zurückführen lässt [27].

5 Kostenfaktoren, Wirtschaftlichkeit

Wegen fehlender Erfahrungen aus der großtechnischen Anwendung der Klärschlamm-desintegration kann sich eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung derzeit nur auf Versuchsergebnisse und daraus abgeleitete sinnvolle Schätzungen stützen. Neben den Investitionen und Betriebskosten für die Aufschlusseinheit müssen weitere Kosten berücksichtigt und den möglichen Einsparungen gegenübergestellt werden [28].

5.1 Investitionen

Folgende Kosten sind für die Berechnung der Investitionen gegebenenfalls zu berücksichtigen:

- Anschaffung des Aufschlussgerätes
- Einbindung des Aufschlussgerätes (Schlammleitungen, Stromanschluss, Aufstellungsort)
- Vorrichtung zur Abtrennung von Störstoffen aus dem zu behandelnden Schlamm
- Einrichtung eines separaten Überschussschlammabzugs
- Einrichtung einer Überschussschlammeindickung
- Erweiterung bzw. Einrichtung einer Faulgasnutzung
- Erweiterung des biologischen Teils der Kläranlage zur Behandlung der zusätzlichen Rückbelastung
- Investitionseinsparungen beim Neubau bzw. bei anstehender Erweiterung der Faulung bzw. der Denitrifikationsbecken

Die Anschaffungskosten für Rührwerkskugelmühlen, Hochdruckhomogenisatoren und Lysat-Zentrifugen sind recht genau abschätzbar, für Ultraschallhomogenisatoren existieren erste Kostenansätze [29]. Für die Hochleistungspulstechnik können derzeit noch keine Kosten für die großtechnische Anwendung kalkuliert werden.

Die Kosten für die Installation der Aufschlusseinheit auf der Kläranlage ist sehr stark von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten abhängig. Im ungünstigsten Fall muss für die Unterbringung der Aufschlusseinheit ein neues Gebäude gebaut bzw. ein Gebäudeteil ergänzt werden. Die notwendigen Anschlüsse (Strom, Wasser) sowie die Schlammzuleitungen und -ableitungen müssen geschaffen werden.

Falls nicht vorhanden, muss ein getrennter Überschussschlammabzug und eine Überschussschlammeindickung eingerichtet werden, damit der Aufschluss möglichst effektiv ist. Vor allem beim Hochdruck- und Scherspalthomogenisator, zum Teil auch bei der Kugelmühle sind Einrichtungen zur Abtrennung von Störstoffen (Fasern, kleine Steine und andere Grobstoffe) aus dem zu behandelnden Überschussschlammstrom erforderlich. Verstopfungen und Beschädigungen der Geräte sind sonst nicht auszuschließen.

Soll die Desintegration zur Optimierung der Schlammfaulung eingesetzt werden, kann eine Erweiterung oder sogar ein Neubau der Gasverwertung erforderlich sein, um das durch den Aufschluss gewonnene, zusätzliche Gas verwerten zu können.

Nur in Ausnahmefällen wird die zusätzliche Rückbelastung aus der Schlammwässerung so groß sein, dass eine Erweiterung der biologischen Stufe der Kläranlage nötig wird.

Einsparungen bei den Investitionen können sich ergeben, wenn eine überlastete Faulung durch den Einsatz der Desintegration saniert oder bereits beim Neubau der Klärschlammfaulung das Volumen der Faulbehälter durch die kürzeren erforderlichen Faulzeiten reduziert werden kann. Ebenso können sich Einsparungen ergeben, wenn der desintegrierte Schlamm als Wasserstoffdonator für die Denitrifikation nutzbar ist und so das anoxische Beckenvolumen minimiert werden kann.

5.2 Betriebskosten

Neben den primären Kosten für den Betrieb des Aufschlussgeräts und der zugehörigen peripheren Anlagen ergeben sich durch den Aufschluss weitere Kosten. Zusammen mit den möglichen Einsparungen werden die zu berücksichtigenden Betriebskosten nachfolgend aufgeführt:

- Energiekosten
- Kosten für Reparatur, Wartung und Unterhaltung
- Betriebsmittelkosten (evtl. erhöhter Polymerbedarf)
- Personalkosten
- Kosten für die Behandlung der zusätzlichen Rückbelastung aus der Schlammentwässerung
- Kosteneinsparungen durch erhöhte Faulgasverstromung
- Kosteneinsparung durch reduzierte Klärschlamm-Entsorgungskosten
- Kosteneinsparungen durch verringerten Betriebsaufwand (Bläh- / Schwimmschlammbekämpfung)
- Kosteneinsparungen bei externen H-Quellen

Bei den Energiekosten ist nicht nur das Aufschlussgerät zu berücksichtigen, sondern auch alle weiteren Verbraucher, die im Zusammenhang mit der Desintegration notwendig sind (siehe Kap. 5.1). Das gleiche gilt für die finanziellen Aufwendungen für Reparatur, Wartung und Instandhaltung (RWI-Kosten). Für besonders verschleißintensive Bauteile wie Ultraschallwandler, Homogenisierventile, Mahlkörper, Schlag-/Schneideeinrichtung der Lysatzentrifuge und die zusätzliche BHKW-Kapazität sollten dabei möglichst differenzierte Ansätze gewählt werden.

Vor allem die höhere Stickstofffracht im Schlammwasser verursacht zusätzliche Kosten bei der Abwasserreinigung, in erster Linie durch den erhöhten Lufteintrag (Energiekosten).

Einsparungen bei den Betriebskosten ergeben sich hauptsächlich durch die verringerten Schlammmentsorgungskosten sowie die zusätzliche Stromproduktion aus der Verwertung der größeren Faulgasmenge.

Bei erfolgreicher Bekämpfung von Bläh- und Schwimmschlamm können sich Kosteneinsparungen durch verringerten Betriebsaufwand bzw. durch den Wegfall aufwendiger Entsorgungsmaßnahmen ergeben.

5.3 Gesamtkosten

Bei einer Klärschlamm-desintegration vor der Faulung kann als realistische Kostengröße für die Behandlungskosten, verursacht durch die Desintegration und bezogen auf Trockenmasse behandelten Schlammes, eine Spanne von 100,- bis 300,- DM/Mg m_T angesetzt werden.

Um einen Überblick über die Gesamtkosten und die Verteilung der einzelnen Kostenblöcke zu erhalten, wurde eine detaillierte Kostenberechnung für eine Modellkläranlage mit 100.000 EW durchgeführt. Als Modellkläranlage wurde die im Handbuch „Energie in Kläranlagen“ [30] des nordrhein-westfälischen Umweltministeriums beschriebene Anlage verwendet. Es ergaben sich Gesamtkosten am unteren Ende der o. g. Spannbreite mit folgender Verteilung (Abb. 3):

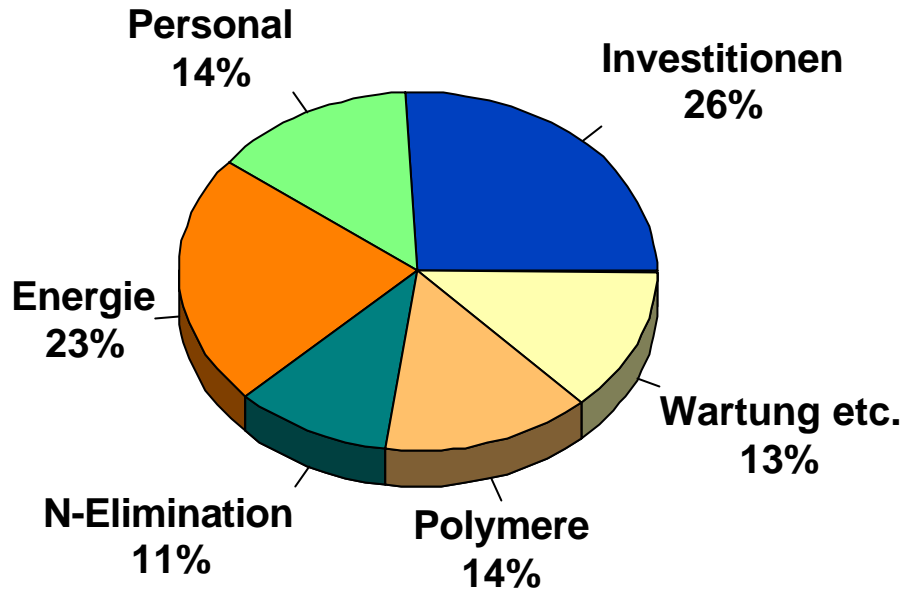


Abb. 3: Kostenanteile bei der Einrichtung und dem Betrieb der mechanischen Klärschlamm-Desintegration vor der Faulung

Von den Aufwendungen für die Energie (Strom) können etwa 70 % durch die Verwertung des zusätzlichen Faulgases in einem Blockheizkraftwerk zurückgewonnen werden. Für die Kostenberechnung der Stickstoffelimination wurden nur die Kosten für den zusätzlichen Strombedarf und für Methanol als H-Quelle zur Denitrifikation des zusätzlichen Stickstoffs angesetzt. Auch bei der Stickstoff-Elimination können sich weitere Einsparungen ergeben, wenn der aufgeschlossene Schlamm als H-Quelle für die Denitrifikation genutzt wird.

Die Kostenbetrachtung für die Modellkläranlage sowie weitere Wirtschaftlichkeitsberechnungen [28] zeigen, dass sich die Klärschlamm-Desintegration derzeit erst bei sehr hohen Schlamm-entsorgungskosten von über 1.000,- DM/Mg m_T finanziell rechnet. In den letzten Jahren waren die Kosten für die Klärschlamm-entsorgung jedoch rückläufig. Für die landwirtschaftliche Verwertung müssen derzeit zwischen 250,- und 500,- DM/Mg m_T , für die thermische Entsorgung zwischen 500,- und 1.000,- DM/Mg m_T aufgewendet werden. Wirtschaftliche Vorteile können sich zukünftig erst dann ergeben, wenn

- Anschaffungs- und Betriebskosten für die Geräte weiter sinken,
- der Betrieb weitgehend automatisch ablaufen kann,
- der Aufschluss mit wesentlich weniger Energie erreicht werden kann und
- die Entsorgungskosten wieder ansteigen.

6 Empfehlungen für den Einsatz der Desintegration sowie Ausblick

Der Einsatz mechanischer Desintegrationsverfahren zur Schlammbehandlung und deren Auswirkungen auf den Kläranlagenbetrieb können derzeit noch nicht umfassend bewertet werden. Dazu sind weitere Untersuchungen – möglichst im betriebstechnischen Maßstab – erforderlich. Trotzdem sind grundlegende Auswirkungen hinreichend belegt, so dass die

Klärschlamm-desintegration zur Leistungssteigerung einzelner Verfahrensschritte prinzipiell in Frage kommt. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass durch den Zellaufschluss an anderer Stelle im Prozessablauf zusätzliche Belastungen auftreten können (z. B. erhöhter O₂-Bedarf, Anreicherung von Schwermetallen oder schwer abbaubaren CSB-Verbindungen). Andererseits ist es im Sinne einer Kreislaufwirtschaft denkbar, die Desintegration als unterstützendes Verfahren für die Rückgewinnung von Wertstoffen einzusetzen. Durch Trennen des Schlammes in einzelne Fraktionen eröffnen sich Möglichkeiten, die teilweise bereits genutzt werden. In jedem Fall stehen den erwünschten Verbesserungen Kosten für Investition und Betrieb der Desintegrationsanlagen gegenüber.

Der Einsatz festinstallierter Desintegrationsanlagen ist dann sinnvoll, sobald betriebliche Vorteile und die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens nachgewiesen sind. Leistungsfähigkeit und Kosten „konventioneller“ Verfahrenstechniken sind in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit einzubeziehen. Gewonnene Betriebsergebnisse sind nur eingeschränkt auf andere Kläranlagen übertragbar. Deshalb sollte – wenn immer möglich – die Wirksamkeit der Desintegration in Vorversuchen auf der jeweiligen Kläranlage getestet werden.

Die Forderung nach Wirtschaftlichkeit tritt jedoch in den Hintergrund, wenn durch Desintegration kurzfristig betrieblichen Störungen, wie z. B. auftretendem Blähschlamm oder einer zeitlich begrenzten Überlastung der Faulung begegnet werden soll. In diesen Fällen ist die Desintegration ein wirkungsvolles Instrument, um einen ordnungsgemäßen Betriebsablauf zu sichern.

7 Literatur

- [1] NEIS, U.; NICKEL, K.; TIEHM, A. (1997):
Intensivierung der Schlammfäulung durch Klärschlammaufschluss mit Ultraschall.
Korrespondenz Abwasser, 44 (1997) 10, S. 1850-1855
- [2] LEHNE, G. und MÜLLER, J. (1999):
The influence of energy consumption on the sewage sludge disintegration.
Ultrasound in Environmental Engineering- 22./23. March 1999.
TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering, Vol. 25, S. 205-216
- [3] OTTE-WITTE, R. (1998):
Verbesserung der Schlammfäulung durch die Eindickung mit der Lysat-Zentrifuge.
Klärschlamm-desintegration.
Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft TU Braunschweig ,
Heft 61, S. 245-252
- [4] SCHMITT, W. (2000):
Betriebsoptimierung von Schlammfäulungs- und Schlammwässerungsanlagen.
Schriftenreihe WAR, TU Darmstadt, Band 109, S. 141-176
- [5] TIEHM, A.; NICKEL, K.; ZELHORN, M.; NEIS, U. (2001):
Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic
stabilization
Water Research: im Druck

- [6] MÜLLER, J.; SCHWEDES, J.; BATTENBERG, S.; NÄVEKE, R.; KOPP, J.; DICHTL, N.; KRULL, R.; HEMPEL, D.C. (1996):
Verbesserter Abbau von Klärschlämmen durch Zellaufschluss.
AWT-Abwassertechnik 47 (1996) 3, S. 48-52
- [7] KOPP, J.; MÜLLER, J.; DICHTL, N.; LEHNE, G.; SCHWEDES, J.; BATTENBERG, S.; NÄVEKE, R.; SCHEMINSKI, A.; KRULL, R.; HEMPEL, D.C.(1997):
Anaerober Abbau mechanisch aufgeschlossener Klärschlämme.
12. ZAF-Seminar „Klärschlammbehandlung und –entsorgung – Erfahrungen und Perspektiven“, Braunschweig, 18/19. Sept. 1997, S.77-97
- [8] NICKEL, K.; TIEHM, A.; NEIS, U. (2000):
Desintegration von Klärschlamm mit Ultraschall zur anaeroben Schlammstabilisierung, *In: Bathen und Schmidt-Traub (Hrsg.), Innovative Energieträger in der Verfahrenstechnik*, Shaker-Verlag, Aachen
- [9] NEIS, U. and TIEHM, A. (1999):
Ultrasound in waste water and sludge treatment. *In Ultrasound in Environmental Engineering*, TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering 25, GFEU-Verlag, ISBN 3-930400-23-5, S. 39-61
- [10] PALMOWSKI, L.; WINTER, A.; SCHMELZ, K.G.; MÜLLER, J.; SCHWEDES, J.; DICHTL, N. (1999):
Halbtechnische Versuche zum mechanischen Aufschluss von Überschussschlämmen mit anschließender anaerober Stabilisierung,
GVC-Tagung Bremen, Preprints Bd.2, S. 823-827
- [11] SEILER, K. und PÖPEL, H. J. (1998):
Klärschlamm-desintegration-Verfahren und Ergebnisse.
Schriftenreihe WAR, TU Darmstadt, S. 141-176
- [12] BARJENBRUCH, M.; HOFFMANN, H.; TRÄNKER, J. (1999):
Minimizing of Foaming in Digesters by Pre-Treatment of the Surplus-Sludge.
Conference on: Disposal and Utilisation of Sewage Sludge: Treatment Methods and Application Modalities, Athen 13-15 Okt. 1999, S. 496-502
- [13] MÜLLER, J.; LEHNE, G.; SCHWEDES, J.; BATTENBERG, S.; NÄVEKE, R.; KOPP, J.; DICHTL, N.; SCHEMINSKI, A.; KRULL, R.; HEMPEL D.C. (1998):
Disintegration of sewage sludges and influence on anaerobic digestion, 19th IAWQ Biennial International Conference - Water Quality International, Vancouver, Proceedings Part 4, S. 104-111 und *Wat. Sci. Tech.* 38 (1998) 8-9, S. 425-433
- [14] BAIER, U. und SCHMIDHEINY, P. (1997):
Enhanced anaerobic degradation of mechanically disintegrated sludge.
Water Science Technology, Vol. 36, No. 11, S. 137-143
- [15] BAIER, U. (2000):
Persönliche Mitteilung

- [16] CHOI, H.-B. (1998):
Rupture of Sewage Sludge by Mechanical Jet and Effects on Anaerobic Digestion.
Klärschlamm-Desintegration.
Veröffentlichung des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft TU Braunschweig ,
Heft 61, S. 165-178
- [17] DOHÁNYOS, M.; ZÀBRANSKÀ, J.; JENICEK, P. (1997):
Enhancement of sludge anaerobic digestion by using a special thickening centrifuge.
Water Science Technology, Vol. 36, No. 11, S. 145-153
- [18] KUNZ, P.; THEUNERT, B.; WAGNER, S. (1996):
Erkenntnisse und Erfahrungen aus praktischen Anwendungen der Klärschlamm-
Desintegration.
Korrespondenz Abwasser 43 (1996) 7, S. 1289-1298
- [19] KUNZ, P. und WÖRNE, D. (1998):
Nachweis der biologischen Verfügbarkeit von Klärschlamm nach Desintegration
mittels Rührwerkskugelmühle im Rahmen einer gezielten Denitrifikation.
Klärschlamm-Desintegration.
Veröffentlichungen des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft TU Braunschweig,
Heft 61, S. 209-214
- [20] GÜNTHERT, F.W. und OSSWALD, M. (1999):
Minimierung des Schlammanfalls auf Kläranlagen durch Desintegration -
Bestandsaufnahme auf großtechnischen Anlagen.
Mitteilungen der Universität der Bundeswehr München, Institut für Wasserwesen;
Heft 69
- [21] MÜLLER, J.; LEHNE, G.; PIEPER, P.; DICHTL, N. (1999):
Mechanische Zerkleinerung von Bläh- und Schwimmschlämmen.
Wasser Abwasser Praxis, Heft 6/99, S. 25-31
- [22] TIEHM, A.; NICKEL, K.; NEIS, U. (1998):
Verbesserte Sedimentation von Blähschlamm durch Ultraschall.
Hamburger Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 11. Fachtagung Weitergehende
Abwasserreinigung zum Schutz von Nord- und Ostsee, Lübeck-Travemünde 11/98
- [23] LAUBE, T. (1994):
Verfahrenstechnische und mikrobiologische Untersuchungen zur Entwicklung und
Bekämpfung von Blähschlamm in einer industriellen Abwasserreinigungsanlage.
Dissertation TH Darmstadt
- [24] SEYDLER, B. und NÄHER, G. (1978):
Maschinelle Bekämpfung von Blähschlämmen in Kläranlagen.
wlb „wasser, luft und boden“ 22, Nr. 10
- [25] FRIEDRICH, H.; POTTHOFF, A.; FRIEDRICH, E.; HIELSCHER, H. (1999):
Improving settling properties and dewaterability of sewage sludges by application of
the ultrasound technology.
Ultrasound in Environmental Engineering, TU Hamburg-Harburg, Reports on
Sanitary Engineering 25, GFEU-Verlag, ISBN 3-930400-23-5, S. 245-255
- [26] KUNZ, P. und WAGNER, S. (1994):
Ergebnisse und Perspektiven aus Untersuchungen zur Klärschlamm-Desintegration.
AWT- Abwassertechnik, Heft 1, S. 50-57

- [27] KOPP, J. und DICHTL, N. (1998):
Influence of Surface Charge and Exopolysaccharides on the Conditioning
Characteristics of Sewage Sludge.
Chemical Water and Wastewater Treatment V, Hahn, H.H.; Hoffmann, E.;
Odegaard, H. (Eds.), Proceedings of the 8th Gothenburg Symposium 1998, Sept. 7-8
1998, Prag, Czechoslovakia, S. 285-295
- [28] MÜLLER, J. (1998):
Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen des
Klärschlammaufschlusses als Verfahrensschritt der anaeroben
Schlammstabilisierung.
Schriftenreihe des Instituts für Siedlungswasserwirtschaft, TU Braunschweig, Band
61, S. 281-294
- [29] MÜLLER, J.; MUES, A.; OLES, J. (1997):
Steigerung der Energieausbeute und Reduzierung der Kosten durch
Klärschlammintegration.
Bochumer Workshop 1997 "Klärschlammbehandlung optimieren,
Entsorgungskosten reduzieren", Bochum, 4. September 1997.
Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft Bochum, Bd. 33, S. 103-134
- [30] Handbuch „Energie auf Kläranlagen“, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und
Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen (Herausgeber), Schwannstr. 3,
40476 Düsseldorf, erschienen im September 1999

Tab. 2: Übersicht über einige beispielhaft ausgewählte Versuchsergebnisse zur Verbesserung der anaeroben Stabilisierung

Versuchsart Quelle	Schlammart (Schlammalter bzw. Fauldauer bei FS)	Aufschluss- verfahren	Aufschluss- grad (CSB)	Energieeintrag	Fauldauer t_R	Mögliche Reduzierung der Fauldauer t_R für $h_{t_R, desint.} \gg h_{20d, unbeh.}$	rel. Steigerung Abbaugrad bei $t_R = 20$ d	rel. Steigerung Faulgasanfall bei $t_R = 20$ d	rel. Erhöhung N- Rückbelastung bei $t_R = 20$ d
	[-]	[-]	[%]	[kWh/(kg m _T)]	[d]	[d]	[%]	[%]	[%]
Techn. Maßstab									
Schmitt, 2000 [4]	PS+ÜS ($t_{TS} \approx 20$ d)	H & UD	k. A.	k. A.	13	k. A.	ca 50 ($t_R = 13$ d)	ca 50 ($t_R = 13$ d)	23
Otte-Witte, 1998 [3]	ÜS	LZ	k. A.	1,1 - 1,4	21	k. A.	ca. 11	ca. 15	k. A.
Halbtechn. Maßstab									
Nickel et al., 2000 [8]	FS ($t_{TS} = 30$ d)	UD	8	2,8 - 5,4	4 - 16	-	23 ($t_R = 16$ d)	14 ($t_R = 16$ d)	k. A.
Neis et. al, 1997 [1] Neis and Tiehm, 1999 [9]	PS+ÜS ($t_{TS} = 16$ d) ÜS ($t_{TS} = 16$ d)	UD	ca. 12 ca. 20	2,8 - 5,6 2,8 - 5,6	8 - 22 4 - 16	ca. 8 ca. 7	ca. 10 ca. 20	0 ca. 20	ca. 2 12 - 16
Palmowski et al., 1999 [10]	ÜS ($t_{TS} = 8$ d) FS ($t_{TS} = 20$ d)	RWKM	11 5	k.A. k.A.	20 20	k. A. -	7 2	ca. 4 0	ca. 5 0
Seiler u. Pöpel, 1998 [11]	ÜS ($t_{TS} = 16$ d)	RWKM	ca. 20	2 - 3	5 - 30	ca. 5	30 - 50	30 - 50	5 - 70
Laborversuche (Durchlaufbetrieb)									
Barjenbruch et al., 1999 [12]	PS+ÜS ($t_{TS} = 13$ d)	HDH	15 - 20	0,4	20	k. A.	20	20	ca. 19
Müller et al., 1998 [13]	ÜS ($t_{TS} = 13$ d) ÜS ($t_{TS} = 3$ d)	HDH	20 - 30	0,3 - 0,4	2 ^Z - 22	ca. 15 ca. 3 ^Z	ca. 10 ca. 12	ca. 12 ca. 15	20 - 30
Laborversuche (Batchbetrieb)									
Baier u. Schmidheiny, 1997 [14] Baier, 2000 [15]	ÜS ($t_{TS} = 7$ d) ÜS ($t_{TS} = 25$ d)	RWKM	1 - 46	8 - 87	20	k. A.	40 - 60 ca. 100	ca. 10 25 - 65	k. A.
Choi, 1998 [16]	ÜS	PSV	k. A.	k. A.	26	5 - 15	5 - 30	k. A.	k. A.
Dohányos et al., 1997 [17]	ÜS	LZ	k. A.	k. A.	25	ca. 3 - 7	ca. 30	30 - 50	k. A.

ÜS: Überschussschlamm, ÜS_{stab}: aerob stabilisierter Überschussschlamm, PS: Primärschlamm, FS: Faulschlamm

HDH: Hochdruckhomogenisator, LZ: Lysatzentrifuge, PSV: Prallstrahlverfahren, RWKM: Rührwerkskugelmühle, UD: Ultraschalldesintegrator, H: Homogenisierung

z: immobilisierte Biomasse, k. A.: keine Angaben verfügbar

