

Steigerung der Gasproduktion

# Enzymatische Optimierung der Schlammfäulung

Dr.-Ing. Jörg STRUNKHEIDE; Gerd EWALD

Langzeiterfahrungen kommunaler Kläranlagen bei der Anwendung des Enzymstufenpräparates Celluform.

Zur Verbesserung der Faulgasausbeute in der Anaerobstufe wenden Kläranlagenbetreiber unterschiedliche Strategien und Techniken an. Die Cofermentation ist dabei ein zunehmend häufig beschrittener Weg. Bei vorhandener freier Faulraumkapazität werden Rest- oder Abfallstoffe dem Faulbehälter mit der Zielsetzung der Steigerung der Gasausbeute zugeführt. In der Freude über das zusätzlich gebildete Faulgas sollte bei der Erstellung der Gesamtbilanz nicht vergessen werden, dass neben Faulgas in der Anaerobstufe auch Biomasse gebildet wird und die zugeführte Trockensubstanz in einer herkömmlichen mesophilen Fäulung nicht quantitativ, sondern bestenfalls zu 35 bis 40 % abgebaut wird. Die Kosten für die Konditionierung und Entsorgung der Rest-Trockensubstanz sowie mögliche höhere Stickstoffrückbelastungen der Kläranlage ließen schon so manch bunten Power-Point-Chart nach kurzer Zeit verblasen.

Eine weitere Möglichkeit stellt die mechanische oder chemische Desintegration dar. Diese Techniken stellen darauf ab, unter Anwendung von mechanischen Einrichtungen oder Chemikalien die Lyse der Zellmembran des Überschussschlammes und damit die Freisetzung von Zellwasser zu bewirken. Die Anwendung dieser Technologien ist oftmals mit hohen Investitionen, Umbauten und/oder hohen laufenden Kosten (Energiebedarf) verbunden.

Die biologische Desintegration mittels selektierter Enzyme ist hierzu eine verfügbare Alternative, die wegen ihrer Vorteile zwischenzeitlich auch weite Verbreitung findet.

Die Investitionen für eine automatische Dosieranlage (Bild 1) beschränken sich auf ein Minimum und auch die laufenden Betriebskosten stehen in keinem Verhältnis zu den realisierten Einsparungen.

Anhand von praktischen Beispielen sollen in diesem Beitrag die Langzeiterfahrungen unter Anwendung des Enzymstufenpräparates Celluform aufgezeigt werden.

### Funktionsprinzip

Ein biologischer Abbau kann nur von wasserlöslichen Stoffen erfolgen. Hochmolekulare Partikel oder große wasserunlösliche Moleküle erfordern deshalb zum biologischen Abbau eine vorherige Aufspaltung (Hydrolyse) in wasserlösliche Spaltprodukte (Bild 2). Im Belebungsbecken oder im Faulbehälter einer Kläranlage erledigt diese Arbeit die Biozönose, die hierfür spezielle Eiweiße – so genannte Enzyme – produziert und freisetzt. Diese Exoenzyme bewirken außerhalb der Zelle eine Zerlegung der unlöslichen Stoffe in Fragmente, die, soweit dann wasserlöslich geworden, dem Stoffwechsel zur Verfügung stehen.

Für verschiedene im Klärschlamm enthaltene Stoffgruppen erfolgt jedoch keine Ausbildung der erforderlichen Enzyme durch die vorhandene Biozönose, da deren Produktion unter den Faulraumbedingungen einen höheren Energieaufwand erfordern würde als aus dem anschließenden Stoffwechsel der Spaltprodukte gewonnen werden kann.

Obwohl rein organischer Natur, werden deshalb Stoffe wie z. B. Haare (Keratin), Polysaccharide (Faserstoffe) oder hochmoleku-

lare Eiweiße und Lipoproteine nicht oder nicht vollständig abgebaut. Auch die EPS – eine extracelluläre polymere Substanz der Mikroorganismen, die so genannte Schleimschicht, zählt zu den Stoffen, für deren Abbau innerhalb der Schlammfäulung keine Enzyme ausgebildet werden.

### Spezialisten gesucht und gefunden

Die gezielte Suche nach Mikroorganismen, die zum Bioabbau derartiger hochmolekularer Substanzen in der Lage sind, war der erste Schritt in der Entwicklung. Geeignete



DOSIERANLAGE im praktischen Einsatz

Bild 1

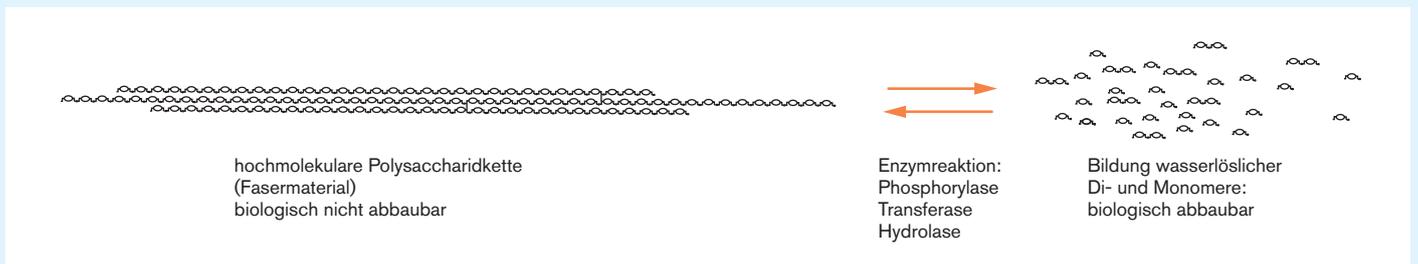


Bild 2

**HYDROLYSE:**  
Darstellung der Gleichgewichtsreaktion

Kulturen wurden selektiert, gezogen und zunächst direkt dem Faulbehälter zugeführt. Es zeigte sich sehr bald, dass sich die Vermehrung dieser Spezialisten im Faulraum schwierig gestaltete und die ursprüngliche Biozönose am Ende wieder dominierte. Deshalb wurden im zweiten Schritt die hydrolytisch wirksamen Exoenzyme von diesen Spezialisten gewonnen. Der Vorteil hierbei ist, dass die Exoenzyme außerhalb der Zelle wirken, auch unabhängig von dem Wirt, der sie einst produziert hat. Das vorhandene Enzymspektrum im Faulbehälter wird auf diese Weise durch weitere, natürliche Enzyme ergänzt, wodurch zusätzliche Primär- und Sekundärschlammbestandteile aufgeschlossen und der Methangärung zugänglich gemacht werden.

## Synergie zwischen den Enzymen und der Biologie erforderlich

Damit die zusätzlich eingebrachten und selektierten Enzyme ihre volle Wirkung erbringen können, ist es erforderlich, dass die gebildeten Spaltprodukte auch vollständig von der Faulraumbiologie abgebaut werden. Sind die hierfür erforderlichen Mikroorganismen nicht oder nicht in der erforderlichen Menge vorhanden, dann bilden sich diese in der Schlammfäulung aus. Neue Kulturen

wachsen heran und die Vielfalt der Mikroorganismen im Faulraum vergrößert sich. Anaerobier weisen bekanntermaßen ein sehr langsames Wachstum auf. Es ist deshalb keine Seltenheit, dass die Abbauleistung und die Biogasproduktion der Faulbehälter unter Anwendung von Celluferm über zwei bis drei Jahre hinweg anhaltend gesteigert wird, wie die folgenden praktischen Beispiele aufzeigen.

## Reaktionsmechanismen der Enzyme

Alle enzymatischen Reaktionen sind reversible Gleichgewichtsreaktionen, angedeutet im Bild 2 durch die in beide Richtungen weisende Pfeile. Eine Gleichgewichtsreaktion kann man sich bildlich vorstellen wie eine Waage, dargestellt im Bild 3. Zunächst ist die linke Waagschale gefüllt mit der hochmolekularen Substanz, die einem Stoffwechsel zugeführt werden soll. Durch die Einwirkung des Enzym A erfolgt die Hydrolyse. Durch diesen Vorgang füllt sich die rechte Seite der Waagschale mit den Spaltprodukten so lange, bis sich die Waage im Gleichgewicht befindet. Im Gleichgewichtszustand findet dann keine weitere Auflösung der Ausgangsmaterialien mehr statt, das Enzym A reagiert in beide Richtungen. Hochmolekulare Substanz wird genauso gespalten wie

gebildet – die enzymatische Reaktion ist zum Erliegen gekommen.

Nur durch das Entfernen eines Reaktionspartners aus dem System kann dieses Gleichgewicht gestört und die Reaktion wieder in Gang gesetzt werden. Und an dieser Stelle greifen die Mikroorganismen entscheidend in das System ein. Sie entfernen durch Stoffwechsel die Spaltprodukte auf der rechten Seite der Waagschale, woraufhin die enzymatische Reaktion nun vermehrt in diese Richtung ablaufen kann.

Dieser Vorgang, Einstellen des Gleichgewichts und Abbau der Spaltprodukte, wiederholt sich nun fortwährend. So erfolgt zunächst langsam und dann mit zunehmender Geschwindigkeit, so wie die Population der erforderlichen Mikroorganismen zunimmt, der gezielte Abbau hochpartikulärer Substanz.

## Enzymhemmung

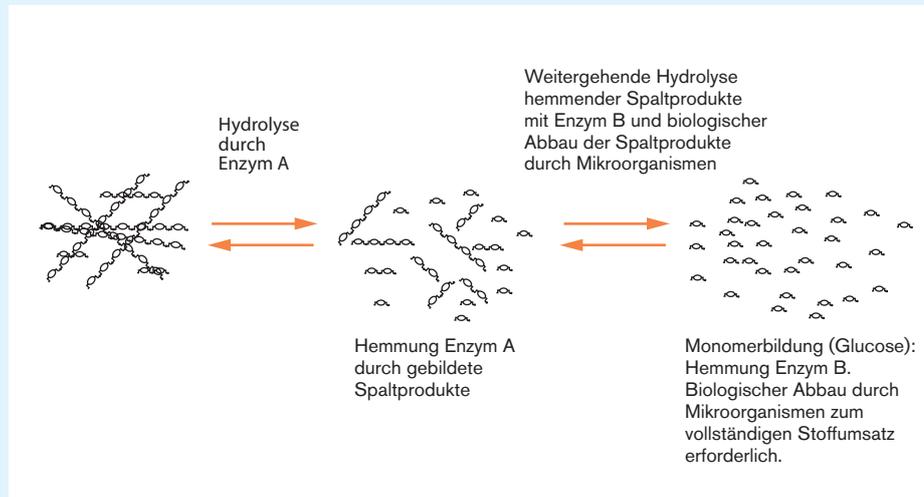
Die tatsächlichen enzymatischen Abläufe innerhalb der Schlammfäulung sind jedoch wesentlich komplexer als dargestellt. Die Gleichgewichtsreaktionen erstrecken sich über mehrere Zwischenstufen, wie das Bild 4 aufzeigt, wobei die jeweils gebildeten Zwischen- und Endprodukte eine Hemmung der beteiligten Enzyme bewirken.

Diese Endprodukt-Hemmung (Feedback Inhibition) ist für alle enzymatischen Reaktionen charakteristisch.

Sie ist ein natürlicher Mechanismus der Stoffwechselkontrolle. Das Endprodukt einer biochemischen Reaktionskette hemmt die Aktivität der beteiligten Enzyme, wodurch einer übermäßigen Produktion dieses Endprodukts entgegengewirkt wird. Diese Endprodukt-Hemmung ist beispielsweise dafür verantwortlich, dass, unabhängig vom Gärzeitraum und Restzuckergehalt, beim Keltern von Wein (alkoholische Gärung) keine Alkoholkonzentration von circa 12 bis 14 % überschritten werden kann.

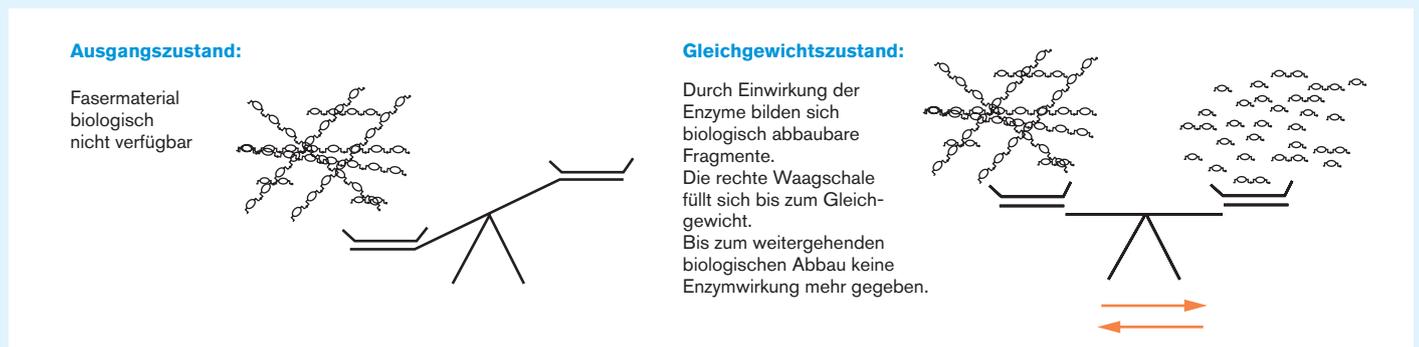
## Zur Faulbehälterräumung genutzt

Die beschriebene Endprodukt-Hemmung ist bei der praktischen Anwendung des Enzymstufenpräparates Celluferm von großem Vor-



Mehrstufige Gleichgewichtsreaktion mit Zwischen- und Endprodukt-Hemmung

Bild 4



BEISPIEL GLEICHGEWICHTSREAKTION: Darstellung als Waage

Bild 3

teil. Zwar wirken diese Mechanismen verzögernd, eine plötzliche, allumfassende Hydrolyse ist aber alles andere als gewünscht und vorteilhaft.

Im täglichen Betrieb lagern sich in einem Faulbehälter Ablagerungen an den Seitenwänden oder am Boden ab oder es bilden sich Verzapfungen. Diese bestehen aus Haaren, Kunststoffen, Sand und sedimentiertem Dickschlamm.

Faserstoffe wirken zusätzlich verdichtend und diese sehr kompakten Konglomerate können mitunter in sehr großen Mengen im Faulraum vorhanden sein. Diese Ablagerungen werden durch die Enzymanwendung nun teilweise biologisch abgebaut, wodurch die restlichen Ablagerungen gelockert und durch die Umwälzung der Faulbehälter wieder mobilisiert werden.

Eine plötzlich einsetzende und vollständige Hydrolyse aller Faserbestandteile würde ein Abrutschen der Ablagerungen/Verzapfungen bewirken und in der Konsequenz zu Betriebsstörungen führen. Trichterspitzen und Bodenablässe würden sich zusetzen und Umwälzleitungen verstopfen.

Diesen „Worst-Case“ gilt es zu vermeiden und ist bei keinem einzigen der bisherigen Anwendungsfälle in über 16 Jahren eingetreten.

Im praktischen Alltag nutzen viele Anlagebetreiber diese Möglichkeit, um eine manuelle Faulbehälterräumung zu vermeiden. Schonend und ohne Unterbrechung des laufenden Betriebs können so Faulbehälter gereinigt werden. Selbst Faulbehälter, deren vollständige Umwälzung bedingt durch Ablagerungen nicht mehr möglich war, konnten nach einer gewissen Zeit wieder in den Routinebetrieb übergehen.

### Voraussetzungen für den vollständigen Abbau

Für den vollständigen biologischen Abbau von z. B. Polysacchariden oder Lipoproteinen sind zusammenfassend betrachtet mehrere Faktoren einflussnehmend und zu berücksichtigen:

- Alle beteiligten Enzyme, die zum Erreichen der Zwischen- und Endstufe erforderlich sind, müssen in ausreichender Menge und Reaktivität dem Prozess zur Verfügung stehen. Das Enzymstufenpräparat Celluform erfüllt hierzu die qualitativen Voraussetzungen, das erforderliche Enzymspektrum wird vollständig abgebildet. Deren Reaktivität kann jedoch einschränkenden Faktoren unterliegen, z. B. durch Schwermetalle, durch die Auswahl der eingesetzten Betriebsstoffe oder durch ungünstige Betriebsweise der Faulbehälter. Dem ist bei der Anwendung dieser Biotechnologie Rechnung zu tragen.
- Die entstehenden Zwischen- und Endprodukte müssen vollständig aus dem System entfernt, d. h. abgebaut werden. Sind die



Durch enzymatische Hydrolyse ausgetragene Verzapfungen

Bild 5



Räumung des ausgetragenen Materials aus dem Nacheindicker

Bild 6

dafür erforderlichen Mikroorganismen nicht in der ausreichenden Menge vorhanden, dann wachsen diese heran. Das Erreichen der maximalen Faulbehälterleistung wird hierdurch zeitlich verzögert.

- Die bekannten Rahmenbedingungen für einen optimierten Faulungsprozess, wie Temperaturkonstanz oder vollständige Durchmischung, gleichmäßige Beschickung, gelten selbstverständlich auch für den Faulungsprozess, der mittels externer Enzyme optimiert wurde. Jedoch mit der Abweichung, dass das Faulbehältervolumen wesentlich kleiner ausgelegt werden kann. Faulzeiten von 12 bis 14 Tage erwiesen sich in der Praxis als völlig ausreichend.

### Langzeiterfahrungen im praktischen Einsatz

#### Beispiel 1: Moosburg a. d. Isar

Die Kläranlage Moosburg a. d. Isar setzt das Enzymstufenpräparat Celluform seit Anfang 2005 ein. Für diese Anlage wurde ein umfassendes Gesamtkonzept erstellt, das die Faulgasverwertung mittels Brennstoffzelle und BHKW sowie die Klärschlamm-trocknung unter Abwärmenutzung vorsieht. Zentrales Element ist die intensive Annahme von Co-Substraten, die in die vorhandene Faulung eingebracht werden. Zielsetzung des Enzymeinsatzes war dabei, die hierfür erforderlichen Faulraumkapazitäten freizusetzen.

Bild 7 zeigt die Entwicklung des TS- und oTS-Abbaugrades vom Startzeitpunkt bis Ende 2009 auf. Der Wirkungsgrad wurde, ausgehend von ca. 31 % TS- und 51 % oTS-Abbau gesteigert auf durchschnittlich 56 bis 57 % TS- und 64 bis 66 % oTS-Abbau (Mittelwert der Jahre 2007 - 2009).

Ab Dezember 2005/Januar 2006 begann die Annahme der Co-Fermente zunächst in geringen Mengen. Dabei konnte die Faulgasproduktion, ausgehend von 700 bis 800 m<sup>3</sup>/Tag, gesteigert werden auf aktuell 4.900 bis 5.000 m<sup>3</sup>/Tag. Bild 8 zeigt die Entwicklung der organischen Raumbelastung (B<sup>R</sup><sub>oTR</sub>) auf. Obwohl wesentlich stärker belastet konnte der Wirkungsgrad der Schlammfäulung auf dem hohen Niveau gehalten werden.

## Beispiel 2: Konstanz am Bodensee

Ab Mitte 2004 erfolgte in der Kläranlage Konstanz der Enzymeinsatz und im Laufe des Jahres 2007 wurde die angewandte Dosismenge modifiziert. Bild 9 verdeutlicht, dass der oTS-Abbaugrad, ausgehend von ca. 45 bis 46 % Abbau der organischen Trockensubstanz, gleichmäßig auf einen Wirkungsgrad von ca. 60 % anstieg.

Parallel verlief die Entwicklung in der Faulgasproduktion. Die zulaufspezifische Gas-

produktion stieg ebenfalls gleichmäßig, ausgehend von 0,460 m<sup>3</sup>/kg Rohschlamm-oTS auf 0,573 m<sup>3</sup>/kg Rohschlamm-oTS als Jahresmittelwert 2008, an. Den Verlauf der abbauspezifischen Gasproduktion zeigt das Bild 10. Ergänzend muss dargestellt werden, dass ab 2007 sporadisch auch industrielle Reststoffe (Alkohole) cofermentiert werden, die ursächlich für die auftretenden Spitzen sind. Reparatur- und Wartungsarbeiten führten zu dem Rückgang der Gasproduktion im Jahr 2009. Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht der Jahresmittelwerte im Vor- und Einsatzzeitraum wieder.

## Auswirkungen auf die entsorgten Schlammengen

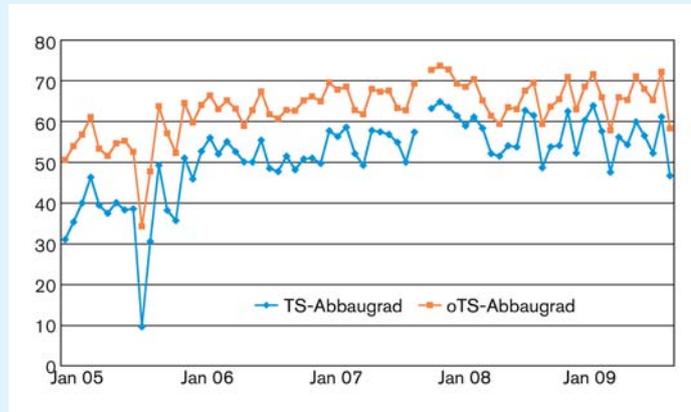
In früheren Publikationen (/1, 2, 3/) wurde bereits von dem Steigerungspotenzial bei der Anwendung des Enzymstufenpräparats

Celluform berichtet. Mesophile Schlammfäulungsanlagen weisen i. d. R. einen TS-Abbaugrad von ca. 35 % und einen oTS-Abbaugrad von ca. 52 % auf, der auf 52 - 54 % TS- und 64 - 66 % oTS-Abbau gesteigert werden kann.

Diese Publikationen führten zu intensiven Diskussionen, wobei Messunsicherheiten der Gasmengenmessung, Toleranzen der Probenahme und Analytik, insbesondere bei dem Primärschlamm, entgegengehalten wurden. Eine Erhöhung des Faulbehälterwirkungsgrades muss jedoch zwangsläufig einen Rückgang der zu entsorgenden Schlammengen zur Folge haben, welche in der Regel auf amtlichen Waagen dokumentiert werden. Die Bilder 11 bis 16 stellen die langfristige Entwicklung der entsorgten Schlammengen verschiedener Anwender dar. Die jeweils orangenen Balken zeigen den Beginn der Enzymdosierung auf.

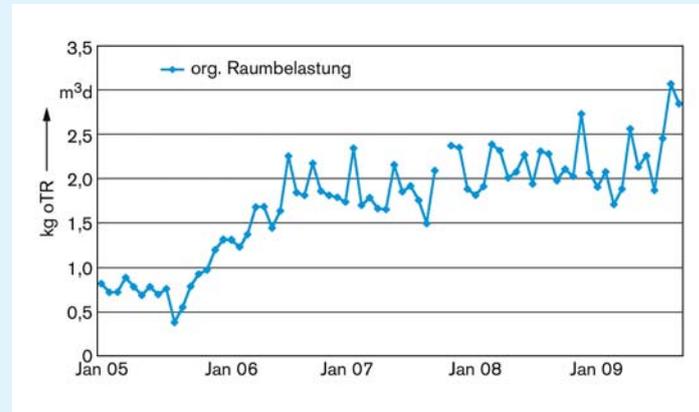
**Wirkungsgrad der Schlammfäulung der Kläranlage Konstanz**  
**Übersicht der Jahresmittelwerte im Vor- und Einsatzzeitraum** Tab. 1

| Jahr | AfG TS in % | AfG oTS in % | Gas in m <sup>3</sup> /kg RS-oTS |
|------|-------------|--------------|----------------------------------|
| 2004 | 33,6        | 45,8         | 0,460                            |
| 2005 | 39,2        | 54,0         | 0,500                            |
| 2006 | 41,2        | 55,0         | 0,540                            |
| 2007 | 43,4        | 57,3         | 0,544                            |
| 2008 | 44,8        | 56,4         | 0,573                            |
| 2009 | 47,4        | 59,4         | 0,522                            |



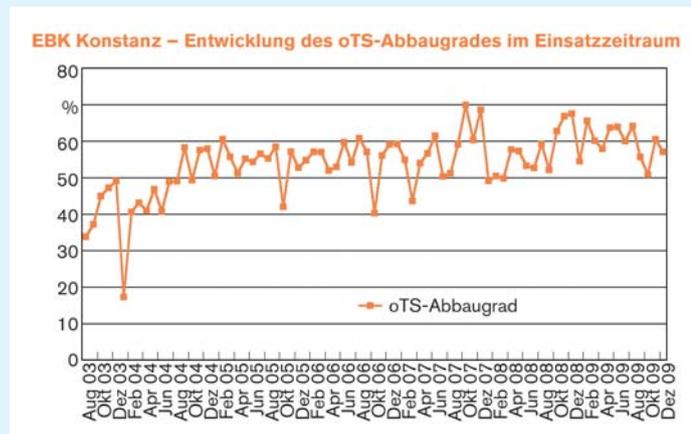
**KLÄRANLAGE MOOSBURG:**  
Entwicklung des TS- und oTS- Abbaugrades

Bild 7



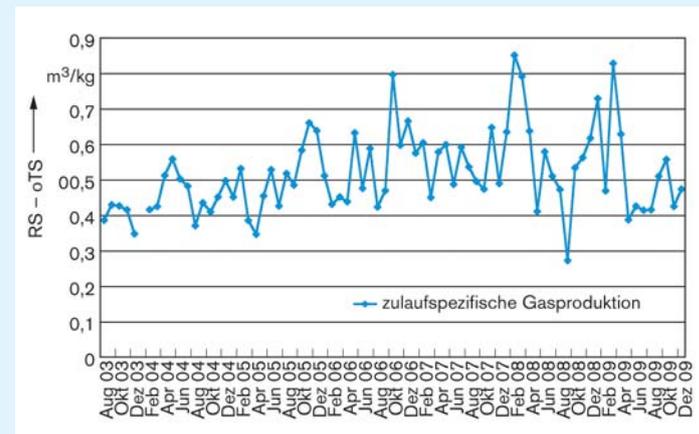
**KLÄRANLAGE MOOSBURG:**  
Zunahme der organischen Raumbelastung

Bild 8



**KLÄRANLAGE KONSTANZ:**  
Entwicklung des oTS-Abbaugrades

Bild 9



**KLÄRANLAGE KONSTANZ:**  
Entwicklung der zulaufspezifischen Faulgasproduktion

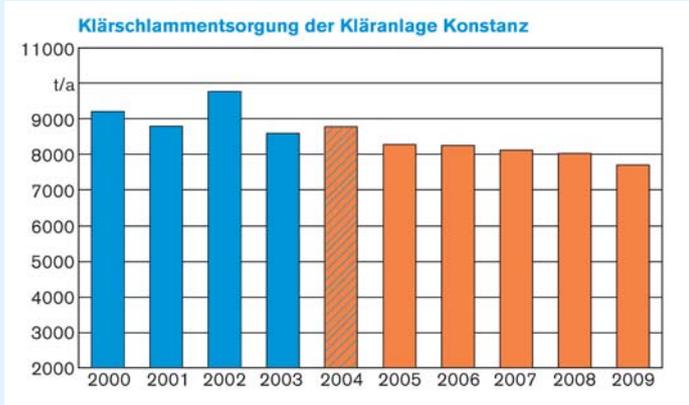
Bild 10

Bei keiner dieser angeführten Anlagen trat eine Verschlechterung des Entwässerungsverhaltens des Klärschlammes auf.

Betrachtet man die Entsorgungsmengen der angeführten Kläranlagen vor Anwendung des Enzymstufenpräparats, dann entsorgten diese in der Summe jährlich 30.638 Tonnen

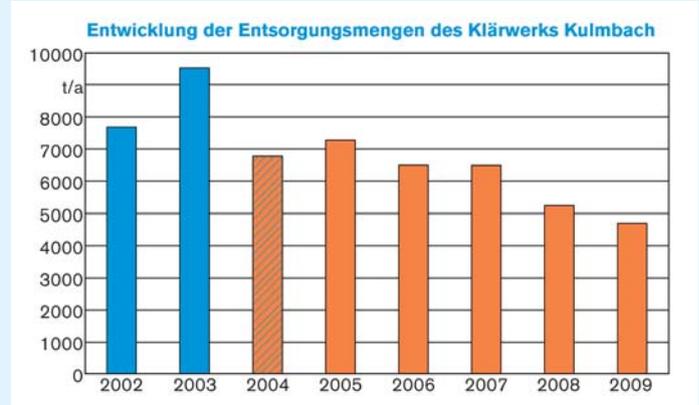
teilentwässerten Klärschlamm, die auf 23.505 Tonnen verringert wurden (Tabelle 2). Dies entspricht in der Größenordnung relativ exakt einer Steigerung des TS-Abbaugrades von 35 % (Durchschnitt mesophiler Faulungsanlagen) auf 50 % (Angaben der EUROZYMES BIOTEC GmbH).

Unter Berücksichtigung dessen, dass durch den Einsatz des Enzymstufenpräparats Cellulferm auch Ablagerungen aus den Faulbehältern ausgetragen werden, die anfänglich zu erhöhten Entsorgungsmengen beitragen, und unter Berücksichtigung der vorhandenen Dynamik, die in den Bildern 7, 9 und 11 bis 16



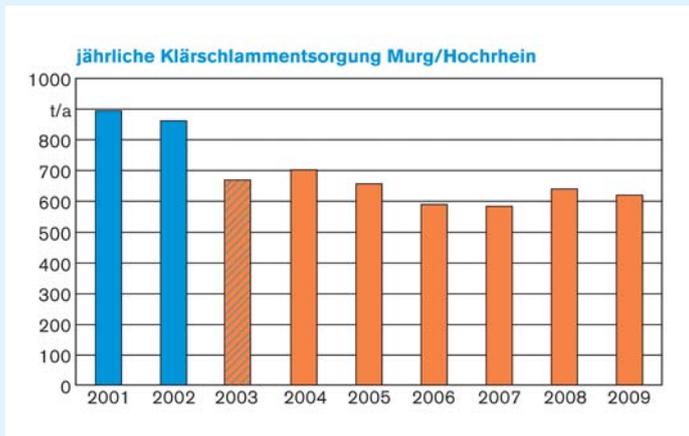
RÜCKGANG DER ENTSORGUNGSMENGEN

Bild 11



RÜCKGANG DER ENTSORGUNGSMENGEN

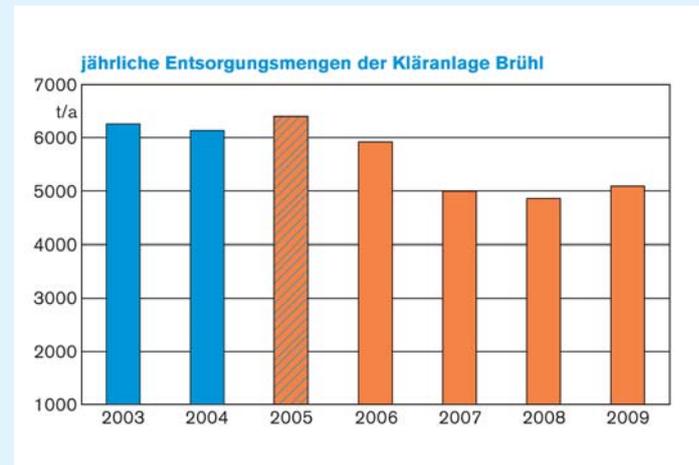
Bild 12



RÜCKGANG DER ENTSORGUNGSMENGEN

Bild 13

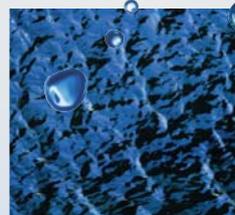
orange mit Enzymstufenpräparat



RÜCKGANG DER ENTSORGUNGSMENGEN

Bild 14

## Den Kreislauf gestalten



In Sachen Entsorgung sind wir Experten. Das wissen unsere Kunden zu schätzen. Wir sind für Haushalte, Industrie- und Gewerbebetriebe der professionelle und wirtschaftlich kluge Abwasserspezialist. Ob Pla-

nungen, Bau und Betrieb von Abwasseranlagen, Inspektion und Sanierung von Kanalnetzen, Entsorgung von Klärschlamm oder energetische Verwertung von Reststoffen, durch unsere jahrzehntelange Erfahrung

können wir Ihnen maßgeschneiderte und zuverlässige Entsorgungskonzepte anbieten.

Mehr Informationen finden Sie unter: [www.hanseWasser.de](http://www.hanseWasser.de)

erkennbar sind, können mit diesen vorgestellten durchschnittlichen Langzeitergebnissen die Herstellerangaben und die früheren Publikationen hinsichtlich der Steigerung auf 52 bis 54 % Trockensubstanzabbau praktisch bestätigt werden. In dem Beispiel der Kläranlage Konstanz ist eine Steigerung der zulaufspezifischen Faulgasausbeute von ca. 25 % aufgezeigt. Die Entsorgungsbetriebe Zweibrücken befassten sich bereits 2001 mit

der biologischen Desintegration und führten intensive Versuche auf der Zentralkläranlage durch. Anfang 2005 berichtete Schwarz /4/ über die Ergebnisse und die, in Abhängigkeit von der angewandten Enzymkonzentration, festgestellte Steigerung der spezifischen Faulgasproduktion. Die Anwendung des Enzymstufenpräparats erfolgt kontinuierlich bis heute, wobei versuchsweise das eingesetzte Enzymspektrum ab September 2008 erweitert

wurde. Die Tabelle 3 zeigt die seinerzeit von Schwarz /4/ veröffentlichten Ergebnisse auf, die um die neuesten Zahlen ergänzt wurden. Die spezifische Gasausbeute konnte von 0,379 (Referenzzeitraum) durch Einsatz des Enzymstufenpräparats Celluform auf 0,606 m<sup>3</sup>/kg oT<sub>S</sub>zugeführt gesteigert werden.

## Zusammenfassung

Die hier angeführten Beispiele zeigen auf, dass die erzielten Steigerungen der Faulbehälterleistung nachhaltig sind.

Mutmaßungen darüber, die Effekte seien möglicherweise nur kurzfristiger Natur oder es könnte eine Gewöhnung der Mikroorganismen an die eingesetzten Enzyme stattfinden, sind mit den vorgestellten Langzeitergebnissen widerlegt. Theoretisch war dies auch auszuschließen, da die eingesetzten Enzyme der Firma EUROZYMES BIOTEC GmbH spezifisch auf das Substrat Klärschlamm eingestellt sind. Die praktischen Beispiele zeigen einen Rückgang der entsorgten Klärschlamm-mengen von ca. 25 % sowie ein Steigerungspotenzial für die Faulgasmenge von 25 bis 35 % auf. Die spezifischen Betriebskosten von 0,108 Eurocent/(EGW \* Jahr) netto erweisen sich als äußerst gering.



Bild 15

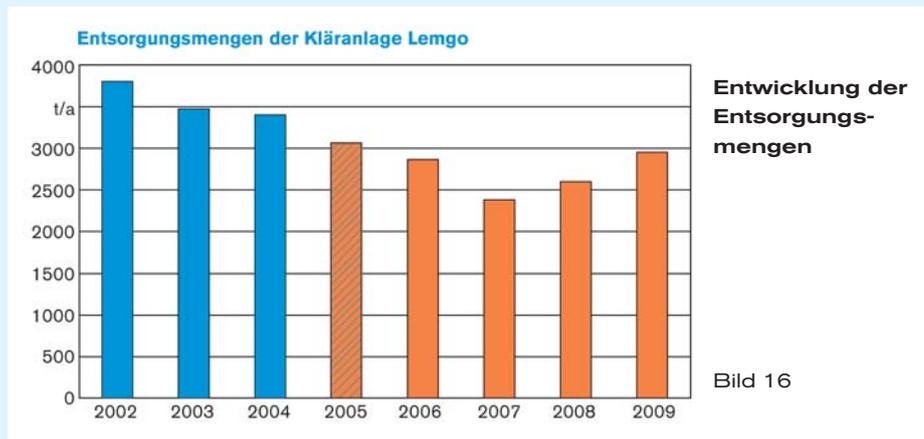


Bild 16

## LITERATUR

### Literatur

- /1/ Strunkheide, J.; Seibert, M.: Biokatalysierte Schlammfaulung. In: wwt, Heft 10/2005, S. 23-26
- /2/ Strunkheide, J.; Crone, M.; Nix, W.; Littmann, R.: Der Einsatz selektierter Enzyme. In: wwt, Heft 11-12/2007, S. 20-25
- /3/ Ewald, G.: Was bewirkt die enzymatische Biokatalyse? In: wwt, Heft 10/2008, S. 19-23
- /4/ Schwarz, E.: Enzyme in der Schlammbehandlung. In: wwt, Heft 1-2/2005, S. 34-35

## Entwicklung der Entsorgungsmengen von Kläranlagen im Vor- und Einsatzzeitraum

Tab.2

| Kläranlage       | Zeitraum vor Enzymeinsatz | Durchschnittliche jährliche Entsorgungsmenge vorher in t Klärschlamm/a | Einsatzzeitraum | Durchschnittliche jährliche Entsorgungsmenge mit Anwendung Stufenpräparat t Klärschlamm/a |
|------------------|---------------------------|--|-----------------|---|
| Lemgo            | 2002–2004                 | 3.554  | 2006–2008       | 2.692   |
| Brühl            | 2003–2005                 | 6.244  | 2007–2009       | 4.971   |
| Murg             | 2001–2002                 | 877  | 2003–2009       | 634   |
| Mühlheim a. Main | 2002–2004                 | 2.366  | 2005–2009       | 1.931   |
| Kulmbach         | 2002–2003                 | 8.585  | 2008–2009       | 5.219   |
| Konstanz         | 2002–2004                 | 9.012  | 2008–2009       | 8.058   |
| Summe vorher     |                           | <b>30.638</b>  | Summe mit       | <b>23.505</b>   |

## Entwicklung der zulaufspezifischen Faulgasproduktion der Kläranlage Zweibrücken

Tab.3

| Zeitraum Referenzzeitraum | Vorgang  | spezifische Gasausbeute in m <sup>3</sup> /kg oT <sub>S</sub> zugeführt |
|---------------------------|--|---|
| Jan. 00 – Sept. 01        | Ermittlung der Ausgangswerte   | 0,379   |
| Sept. 01 – Feb. 03        | Grunddosierung   | 0,489   |
| Mrz. 03 – Aug. 04         | Steigerung der Dosiermenge   | 0,532   |
| Sept. 04 – Dez. 06        | Steigerung der Dosiermenge   | 0,570   |
| Jan. 07 – Aug. 08         | Konsolidierung konstante fortgesetzte Dosierung                                    | 0,570   |
| Sept. 08 – Dez. 09        | konstante Dosierung und Erweiterung des angewandten Enzymspektrums (4. Komponente) | 0,606   |