

Kofermentation biologischer Abfallstoffe in Faultürmen von Kläranlagen

Bachelorarbeit zum Erlangen des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

Erstkorrektor:

Prof. Dr. rer. nat. Josef Hofmann

Zweitkorrektor:

Prof. Dr. rer. pol. Joachim Knappe

vorgelegt von:

Korbinian Zens, Landshut

am:

3. März 2011

Erklärung zur Bachelorarbeit

(gemäß § 11, Abs. 4 der Allgemeinen Prüfungsordnung der HS Landshut)

Name, Vorname des Studierenden:

Zens Korbinian

Fachhochschule Landshut Fakultät Maschinenbau

Profilierungsrichtung:

Energie- und Umwelttechnik

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit mit dem Thema

Kofermentation biologischer Abfallstoffe in Faultürmen von Kläranlagen

selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benützt sowie wörtliche und sinn-gemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Die Bachelorarbeit darf



über die Fachhochschulbibliothek zugänglich gemacht werden



nach einer Sperrfrist von ____ Jahren über die Fachhochschulbibliothek zugänglich gemacht werden

Landshut, den _____

Unterschrift des Studierenden

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Inhaltsverzeichnis | 3 |
| Abbildungsverzeichnis | 5 |
| Tabellenverzeichnis | 5 |
| Abkürzungsverzeichnis | 6 |
| 1 Aufgabenstellung | 8 |
| 2 Rahmenbedingungen | 9 |
| 3 Rechtliche Grundlagen | 10 |
| 3.1 Genehmigungen nach Abfall-, Wasserhaushalts- und Bundesimmissionsschutzgesetz | 11 |
| 3.2 Weitere Bestimmungen des Abfallrechts | 13 |
| 3.3 Änderung des §55 Wasserhaushaltsgesetz..... | 14 |
| 3.4 Bestimmungen des Veterinärrechts..... | 14 |
| 4 Vorstellung der Kläranlage Moosburg | 20 |
| 5 Anaerober Abbau von Biomasse in Faultürmen | 24 |
| 5.1 Grundlagen des anaeroben Abbaus | 24 |
| 5.2 Grundlegende Kenngrößen | 25 |
| 5.2.1 Trockensubstanz und Trockenrückstand | 25 |
| 5.2.2 Stabilisierungsgrad | 26 |
| 5.2.3 Faulzeit und organischer Abbaugrad | 27 |
| 5.3 Einflussgrößen | 27 |
| 5.3.1 pH-Wert..... | 27 |
| 5.3.2 Pufferkapazität | 28 |
| 5.3.3 Temperatur..... | 28 |
| 5.3.4 Stickstoffverbindungen | 29 |
| 5.4 Hemmstoffe..... | 30 |
| 5.4.1 Sauerstoff..... | 30 |
| 5.4.2 Organische Säuren | 31 |
| 5.4.3 Schwefelverbindungen | 31 |
| 5.4.4 Schwermetalle..... | 33 |
| 6 Kofermentation in der Praxis..... | 34 |
| 6.1 Auswirkungen der Substratzusammensetzung | 35 |
| 6.2 Realisierung eines stabilen Kofermentationsprozesses | 38 |
| 6.2.1 Substratanalysen..... | 39 |
| 6.2.2 Gärversuche..... | 39 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.2.3 | Anlaufphase | 40 |
| 6.2.4 | Wichtige zu überwachende Parameter | 42 |
| 6.3 | Diskussion möglicher Kosubstrate..... | 44 |
| 6.4 | Technische Einrichtungen zur Kofermentation | 52 |
| 6.4.1 | Stickstoffeliminierung / Zentratwasserbehandlung | 52 |
| 6.4.2 | Annahmestation | 52 |
| 6.4.3 | Tankbehälter | 53 |
| 6.4.4 | Störstoffabtrennung | 53 |
| 6.4.5 | Mischbehälter mit Rührwerk | 53 |
| 6.4.6 | Aufbereitungsanlage | 53 |
| 6.4.7 | Hygienisierungsanlage | 54 |
| 6.4.8 | Gasverwertung | 54 |
| 6.4.9 | Voreindicker | 55 |
| 6.5 | Begrenzung der Mitbehandlung von Kosubstraten | 55 |
| 6.6 | Absicherung durch Lieferantenverträge | 56 |
| 7 | Zusammenfassung..... | 57 |
| | Literaturverzeichnis | 59 |
| | Anhang A: Nährstoffseitige Mindestanforderungen für den anaeroben Abbau ... | 66 |
| | Anhang B: Grenzwerte hinsichtlich der hemmenden und toxischen Wirkung von Schwermetallen..... | 67 |
| | Anhang C: Fragenkatalog zur Sammlung von Betriebserfahrungen hinsichtlich der Kofermentation..... | 68 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------------|---|----|
| Abb. 3.4 | Flussdiagramm zur Genehmigungspflicht von Kofermentationsanlagen auf Kläranlagen..... | 19 |
| Abb. 4 | Fließbild Kläranlage Moosburg..... | 21 |
| Abb. 5.1 | Schema des mehrstufigen anaeroben Abbaus | 25 |
| Abb. 5.2.3 | Organischer Abbaugrad für unterschiedliche TS-Gehalte in Abhängigkeit der Faulzeit..... | 27 |
| Abb. 5.3.4 | Zulässige Ammoniumkonzentrationen..... | 30 |
| Abb. 5.4.2 | Hemmung der Methanbakterien bei zu hohen Essigsäurekonzentrationen | 31 |
| Abb. 5.4.3 | Auswirkung von Schwefelwasserstoff auf die Faulturbioogie..... | 32 |
| Abb. 6 | Bayerische Kläranlagen die Kosubstrate verwenden..... | 35 |
| Abb. 6.1 | Schematische Darstellung des Versäuerungsprozesses... | 36 |
| Abb. 6.4.2 | Annahmestation mit Tankbehälter der Kläranlage Moosburg..... | 52 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------------|--|----|
| Tab. 3.4a | Verarbeitungsmethoden nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002: Kapitel III..... | 16 |
| Tab. 3.4b | Kategorien für die Hygienisierung von tierischen Nebenprodukten und für Vergärungsanlagen relevante Behandlungsoptionen nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 und TierNebG..... | 17 |
| Tab. 5.2.2 | Beurteilung des Stabilisierungsgrades nach dem Gehalt an organischen Säuren..... | 26 |
| Tab. 6 | Bayerische Kläranlagen die Kosubstrate verwenden..... | 34 |
| Tab. 6.1 | Gaszusammensetzungen und spezifische Gasmengen..... | 37 |
| Tab. 6.3a | Eigenschaften getesteter Kosubstrate..... | 46 |
| Tab. 6.3b | Stoffliche Eigenschaften von Kosubstraten quantifiziert..... | 48 |
| Tab. 6.3c | Weitere mögliche Kosubstrate..... | 49 |
| Tab. 6.3d | Produktbeschreibungen..... | 50 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|--|
| a. d. | an der |
| Abb. | Abbildung |
| AbwV | Abwasserverordnung |
| BHKW | Blockheizkraftwerk |
| BifA | Bayerisches Institut für angewandte Umweltforschung und –technik |
| BImSchG | Bundes-Immissionsschutzgesetz |
| BioAbfV | Bioabfallverordnung |
| BIUKAT | Bayerisches Institut für Umwelt- und Kläranlagentechnologie |
| BSE | Bovine spongiforme Enzephalopathie |
| bzgl. | bezüglich |
| bzw. | beziehungsweise |
| C/N | Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff |
| ca. | zirka, etwa, ungefähr |
| Cd | Cadmium |
| CH ₄ | Methan |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid |
| Cr | Chrom |
| Cu | Kupfer |
| d | Tag |
| d. h. | das heißt |
| DWA | deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall |
| EAK | europäischer Abfallkatalog |
| EEG | Erneuerbare-Energien-Gesetz |
| EG | europäische Gemeinschaft |
| etc. | et cetera, und so weiter |
| evtl. | eventuell |
| GV | Glühverlust |
| GWh | Gigawattstunde |
| H ₂ | Wasserstoff |
| H ₂ S | Schwefelwasserstoff |
| HCL | Salzsäure |
| Hg | Quecksilber |
| inkl. | inklusive |
| Jan. | Januar |
| KA | Kläranlage |
| kg | Kilogramm |
| kW | Kilowatt |
| kWh | Kilowattstunde |
| KWKG | Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz |
| l | Liter |
| LfU | Bayerisches Landesamt für Umwelt |
| m ³ | Kubikmeter |
| mg | Milligramm |
| min | Minuten |
| Mio. | Millionen |
| mm | Millimeter |

| | |
|-------------------------------|--|
| Mrd. | Milliarden |
| münd. | mündlich |
| MW | Megawatt |
| N ₂ | Stickstoff |
| N _{ges} | Gesamtstickstoff |
| NH ₃ | Ammoniak |
| NH ₄ ⁺ | Ammonium |
| Ni | Nickel |
| Nm ³ | Normkubikmeter (Normbedingungen: 1,013 bar, 0°C) |
| NO ₂ ⁻ | Nitrit |
| NO ₃ ⁻ | Nitrat |
| Nov. | November |
| Okt. | Oktober |
| oTR | organischer Trockenrückstand |
| oTR _{zu} | zugeführter organischer Trockenrückstand |
| oTS | organische Trockensubstanz |
| oTS _{ab} | abgebaute organische Trockensubstanz |
| oTSv | vergärbare organische Trockensubstanz |
| P ₂ O ₅ | Phosphorpentoxid |
| Pb | Blei |
| PO ₄ ³⁻ | Phosphat |
| pos. | positiv |
| ppm | parts per million, Teile von einer Millionen |
| SBR | Sequentielle Biologische Reinigung |
| SO ₃ ²⁻ | Sulfit |
| SO ₄ ²⁻ | Sulfat |
| sog. | so genannt |
| StMUG | Bayerisches Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit |
| t | Tonne |
| T | Temperatur |
| Tab. | Tabelle |
| TierNebG | Tierische-Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz |
| TM | Trockenmasse |
| TR | Trockenrückstand |
| TS | Trockensubstanz |
| UTF | Umwelttechnikforum |
| UVP | Umweltverträglichkeitsprüfung |
| vgl. | vergleiche |
| Vol.-% | Volumen-Prozent |
| WHG | Wasserhaushaltsgesetz |
| WWB | Wind, Wasser und Boden |
| z. B. | zum Beispiel |
| Zn | Zink |

1 Aufgabenstellung

Die vorliegende Bachelorarbeit „Kofermentation biologischer Abfallstoffe in Faultürmen von Kläranlagen“ soll dazu dienen, Kläranlagenbetreibern Informationen über den Kofermentationsprozess in die Hand zu geben, um diesen auf den eigenen Kläranlagen realisieren zu können. Sie wurde in Zusammenarbeit mit der Kläranlage Moosburg GmbH und der Fachhochschule Landshut für das „Bayerische Institut für Umwelt- und Kläranlagentechnologie (BIUKAT) e.V.“ erstellt.

Unter Kofermentation versteht man die gemeinsame Vergärung von biologischen Abfallstoffen und Klärschlamm. Die dadurch zusätzlich anfallende Menge an Klärgas ermöglicht es den Kläranlagenbetreibern große wirtschaftliche Potentiale zu erschließen.

Zu Beginn dieser Arbeit soll die komplizierte Rechtslage auf diesem Gebiet erläutert werden. In Abhängigkeit der Art und Menge der eingesetzten Abfallstoffe soll im Einzelfall geklärt werden, welche Gesetzesschriften zu beachten sind und welchen Genehmigungen es hierfür bedarf.

Im Weiteren werden die biochemischen Grundlagen des Vergärungsprozesses behandelt, um später die Prozessstabilität der Vergärung beurteilen zu können. Dazu werden auch die wichtigsten chemischen Parameter vorgestellt und deren Einfluss auf die Biochemie im Faulturm erläutert.

Im letzten Abschnitt wird auf die Frage eingegangen, wie die Kofermentation in der Praxis sicher und stabil umgesetzt werden kann. Da die Biochemie im Faulturm durch die Zugabe von Abfallstoffen erheblich gestört werden kann, wird im Detail auf die Auswirkungen der Beschaffenheit möglicher Abfallstoffe eingegangen. Es werden zwei mögliche Vorgehensweisen zum Erreichen eines stabilen Kofermentationsprozesses aufgeführt.

Um den Kläranlagenbetreibern einen Überblick über geeignete Abfallstoffe zur Kofermentation zu geben, wurden solche tabellarisch erfasst und im Einzelnen näher charakterisiert.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit beruhen vornehmlich auf Literaturrecherchen und Praxiserfahrungen von Kläranlagenbetreibern.

2 Rahmenbedingungen

Um auf Kläranlagen organische Abfallstoffe (Kosubstrate) vergären zu können, müssen einige Rahmenbedingungen eingehalten werden. Kläranlagen sind dazu entworfen worden, um Abwasser zu reinigen. Da die Mitbehandlung von Kosubstraten ursprünglich nicht vorgesehen war, muss die Verfahrenstechnik der Kläranlage so angepasst werden, dass der Klärauftrag in jedem Fall erfüllt werden kann.

Um dem Faulturm zusätzliche Abfallstoffe beizumischen, bedarf es zunächst freien Kapazitäten. Die meisten Kläranlagen verfügen zwar über freie Faulturmkapazitäten, jedoch wurden diese bei der Planung der Kläranlage bewusst geschaffen, um die kommunale Entwicklung der Industrie nicht zu stören. So müssen auf einer Kläranlage stets Kapazitäten zurückgehalten werden, um auch Abwässer von neu entstehenden Industriebetrieben aufnehmen zu können. Zur Kofermentation müssen deshalb unter Umständen mittels Schlammeindickung freie Faulturmkapazitäten geschaffen werden (siehe Kapitel 6.4.9).

Weiterhin bedeutet der Zusatz von organischen Abfallstoffen eine erhebliche Steigerung der biologischen Belastung im Faulturm und somit auch im Zentratwasser¹. Es muss sichergestellt werden, dass die Reinigungsleistung der Kläranlage ausreichend ist, sodass sich die Schadstoffgehalte im Ablauf der Kläranlage nicht erhöhen. Denn genau wie der Faulturm wurde auch die Abwasserreinigung nicht zur Kofermentation dimensioniert. Den größten Anspruch auf eine Änderung der Verfahrenstechnik stellen hierbei die Stickstofffrachten. Sie werden sich so weit erhöhen, dass zusätzliche Einrichtungen nötig sind, um den Stickstoff aus dem Zentratwasser zu entfernen (Finsterwalder, 2011, mündl.). Weitere bauliche Maßnahmen, die evtl. nötig sind, werden im Kapitel 6.4 erläutert. Für den Faulturm ist außerdem noch zu beachten, dass sich durch den erhöhten Massendurchsatz verstärkt Sedimente und Schwimmstoffe im Faulturm bilden, die diesen überlasten können.

Ein weiteres Kriterium, das es unbedingt einzuhalten gilt, ist eine stabile Faulturmbiologie. Kosubstrate nehmen massiven Einfluss auf die Faulturmbiologie, da die meisten Kosubstrate einen wesentlich höheren Feststoffgehalt aufweisen als Klärschlamm. Die biologische Belastung des Faulturms steigt dadurch um ein Vielfaches. Bei falscher Anwendung (Art und Menge der Kosubstrate) muss deshalb mit dem Versagen der Faulturmbiologie gerechnet werden (siehe Kapitel 6.1 bis 6.3) (Finsterwalder, 2011, mündl.).

¹ Zentratwasser: Siehe Kapitel 4

3 Rechtliche Grundlagen

Grundsätzlich ist bei der Mitbehandlung von Kosubstraten im Faulturm eine behördliche Genehmigung erforderlich. Bei der Erteilung einer Genehmigung sind Wasser-, Abfall- und Immissionsschutzrecht zu beachten. Die komplizierte Rechtslage führt dazu, dass obwohl die Kofermentation große wirtschaftliche Potentiale bietet, viele Kläranlagenbetreiber der Kofermentation abgeneigt sind. Die wichtigste Frage für die Kläranlagenbetreiber ist hierbei, welche Genehmigungen zu beantragen sind, da man sich nicht in einem klar abgegrenzten Rechtsgebiet bewegt. Die Antwort auf diese Frage hängt maßgeblich von der Art und Menge der eingesetzten Kosubstrate ab.

Da Kläranlagen einer wasserrechtlichen Erlaubnis unterliegen, muss zunächst geprüft werden, ob die Behandlung von Kosubstraten gemäß dieser Erlaubnis zulässig ist und ob die wasserrechtliche Erlaubnis angepasst werden muss. Unter Umständen ist für die Genehmigung zur Kofermentation auch ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und evtl. auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) erforderlich (Müller S.2, 2010).

Um die Frage nach den nötigen Genehmigungen beantworten zu können, wurde ein Flussdiagramm (Abbildung 3.4) erstellt, welches einen Überblick der aktuellen Rechtslage schafft.

Die nachfolgenden Erläuterungen des Flussdiagramms beruhen, sofern nicht anders angegeben, auf einem Manuskript (Müller, 2010), welches für diese Arbeit zur Verfügung gestellt wurde. Auf andere Quellen wurde auf Grund der komplizierten Rechtslage bewusst weitgehend verzichtet. Außerdem ist in Rechtsfragen zwingend darauf zu achten, dass sich Gesetzestexte in einer ständigen Weiterentwicklung befinden und viele Quellen deshalb nicht mehr auf dem aktuellen Rechtsstand sind. Weiterführende Literatur auf diesem Themengebiet stellt das „Merkblatt DWA-M 380“ der DWA (deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) dar. Auch das bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) erarbeitet derzeit ein Merkblatt, welches den Kläranlagenbetreibern eine Hilfestellung in Rechtsfragen bzgl. der Kofermentation geben soll. Es enthält außerdem Hinweise zu den erforderlichen fachlichen Prüfungen und zu den Antragsunterlagen (Stand: 22.11.2010).

3.1 Genehmigungen nach Abfall-, Wasserhaushalts- und Bundesimmissionsschutzgesetz

Bei der Behandlung von Kosubstraten muss zunächst unterschieden werden, ob es sich dabei laut dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG) um Abwasser oder um Abfall handelt.

- **Abwasser:** Das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte Wasser. Hierzu gehören z. B. Fettabscheiderinhalte, Fäkalschlamm oder Deponiesickerwasser, da diese Stoffe der Kläranlage auch regulär über die Kanalisation zugeführt werden können (DWA-M 380 S.11, 2009).
- **Abfall:** Alle übrigen Entsorgungsgüter, die den Abwasserbegriff nicht erfüllen (z. B. überlagerte Lebensmittel oder Küchen- und Kantinenabfälle).

Handelt es sich bei den Kosubstraten um Abwasser, sind eine Anpassung der wasserrechtlichen Erlaubnis des Betreibers und eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung des Faulbehälters grundsätzlich nicht notwendig. Die Bestimmungen der örtlichen Entwässerungssatzung sind hierbei aber weiter zu beachten.

Weiter muss noch geprüft werden, ob für die Kosubstrate gemäß der Abwasserverordnung (AbwV) eine Indirekteinleitergenehmigung² nach § 58 WHG nötig ist. Besteht die Anforderung auf eine Indirekteinleitergenehmigung, so ist diese vom Abwassererzeuger bei der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde einzuholen.

Zu beachten ist, dass die wasserrechtliche Erlaubnis nur Kosubstratmengen bis max. 50% des Gesamtdurchsatzes vorsieht. Übersteigt die Menge an Kosubstraten diesen Grenzwert, ist eine Genehmigung nach Baurecht oder BImSchG erforderlich (DWA-M 380 S.12, 2009).

Handelt es sich bei den Kosubstraten um Abfall, ist in jedem Fall eine Erweiterung der wasserrechtlichen Genehmigung nötig. Die Kofermentation wird in diesem Fall als Abfallverwertung in die Genehmigung aufgenommen und es werden ggf. Auflagen für den Kläranlagenbetreiber ergänzt (z. B. thermische Verwertung des Faulschlammes (Littmann, Jan. 2011, mündl.)). Zusätzlich können eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung und eine Umweltverträglichkeitsprüfung notwendig sein. Hierfür ist eine weitere Charakterisierung der Kosubstrate nötig.

- Kosubstrate mit unerheblichem Feststoffanteil nach der Vergärung:

Diese Kosubstrate sind in der Regel flüssig und ohne Vorbehandlung pumpfähig. Sie können einen Wasseranteil aufweisen (z. B. Fettabscheiderinhalte) oder (annähernd) wasserfrei sein (z. B. Lösemittelgemische). Der nach der

² Industriebetriebe benötigen zum Einleiten von Abwässern in das kommunale Abwassernetz eine Indirekteinleitergenehmigung, um sicher zu stellen, dass die Kläranlage nicht mit nicht-abbaubaren Schadstoffen belastet wird (Umweltamt, Website, 2011).

Vergärung noch vorhandene Schadstoffanteil wird dem Zentratwasser zugeführt.

- Kosubstrate mit erheblichem Feststoffanteil nach der Vergärung:

Der Feststoffanteil wird bei der Vergärung nicht abgebaut und daher mit dem Faulschlamm³ ausgetragen und entsorgt (schlammige oder feste Entsorgungsgüter).

Die Entscheidung ob ein Kosubstrat nun einen erheblichen oder einen unerheblichen Feststoffgehalt aufweist, wird aber im Einzelfall vom zuständigen Landesamt getroffen. Eindeutige Grenzwerte von möglichen Bestimmungskriterien, wie z. B. des TR-Gehalts⁴ oder des Abbaugrades⁵ des Kosubstrats, sind nicht festgelegt (Müller, 2011, mündl.).

Für Kosubstrate mit unerheblichem Feststoffanteil bedarf es neben der Anpassung der wasserrechtlichen Genehmigung keiner UVP und Genehmigung nach dem BImSchG.

Kosubstrate die einen erheblichen Feststoffanteil aufweisen, unterliegen dem Abfallrecht. Der Faulturn wird in diesem Fall, zusätzlich zu seiner Funktion als Abwasserbehandlungsanlage, zur biologischen Abfallbehandlungsanlage. Diese unterliegt dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Es muss deshalb geprüft werden, ob aufgrund der Art und Menge der Kosubstrate eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung und eine UVP erforderlich sind. Die Kriterien hierfür sind die tägliche Durchsatzmenge (Kosubstrat + Rohschlamm)⁶ und die Einstufung der Kosubstrate als „gefährlicher“ oder „ungefährlicher“ Abfall. Für die Kofermentation geeignete Kosubstrate sind im Regelfall nicht als „gefährlicher Abfall“ eingestuft.⁷ Die jeweiligen Grenzwerte für die Durchsatzmengen können dem Flussdiagramm (Abbildung 3.4) entnommen werden.

Eine Genehmigung nach dem BImSchG ist die aufwands- und kostenintensivste Variante der Genehmigungen zur Kofermentation⁸. Sie beinhaltet dafür aber eine

³ Faulschlamm: Siehe Kapitel 4

⁴ TR-Gehalt: Siehe Kapitel 5.2.1

⁵ Abbaugrad: Siehe Kapitel 5.2.3

⁶ Durchsatzmenge = Kosubstrat + Rohschlamm: Aktuelle Rechtsauffassung des bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit (StMUG).

⁷ Die „Verordnung über das europäische Abfallverzeichnis“ enthält eine Auflistung von Abfällen, sortiert nach deren Abfallschlüsselnummern. Die mit einem Stern gekennzeichneten Abfallschlüsselnummern gehören Abfällen an, die als gefährlich eingestuft wurden. Die Abfallverzeichnisverordnung kann online unter folgender Adresse abgerufen werden: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/avv/gesamt.pdf> (Stand: 22.1.2011).

Abfallschlüsselnummer: Zur Zuordnung und Charakterisierung sind Abfälle gemäß dem europäischen Abfallkatalog gelistet und mit einer Abfallschlüsselnummer versehen.

⁸ Auf der Kläranlage Moosburg beliefen sich die Gesamtkosten für die BImSchG-Genehmigung auf etwa 30.000 Euro. Die Bearbeitungszeit betrug ca. 3-4 Monate (Littmann, Jan. 2011, mündl.).

Reihe anderer Genehmigungen wie z. B. Genehmigungen nach Bauplanungs-, Bauordnungs-, Abfall-, Düngemittel- und Veterinärrecht (Burger S.23, 2010).

Für Durchsatzmengen zwischen 10 und 50 t/d (bzw. zwischen 1 und 10 t/d bei „gefährlichen Abfällen“) sieht das Bundesimmissionsschutzgesetz ein vereinfachtes Genehmigungsverfahren vor. Diese Grenzwerte sind jedoch äußerst niedrig angesetzt. Nicht im Flussbild dargestellt ist, dass für das vereinfachte Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG das Blockheizkraftwerk⁹ (BHKW) eine Gesamtfeuerungs-wärmeleistung¹⁰ von 1 MW nicht überschreiten darf (DWA-M 380 S.13, 2009).

3.2 Weitere Bestimmungen des Abfallrechts

Mit dem Abtransport vom Ort des Entstehens unterliegen Kosubstrate dem Abfallrecht. Sie sind daher mit einer Dokumentationspflicht hinsichtlich ihres Verbleibs behaftet. Als gefährlich eingestufte Abfälle müssen sich einem Nachweisverfahren unterziehen, für alle anderen Abfälle gilt die einfachere Registrierungspflicht. Dies gilt auch für Klärschlamm, der von einer Abwasserreinigungsanlage zu einer anderen transportiert wird. Ausgenommen von der Dokumentationspflicht ist Fäkalschlamm aus Kleinkläranlagen. Er unterliegt der kommunalen Abwasserbeseitigungspflicht, so dass sein Entsorgungsweg über die kommunale Fäkalschlamm Entsorgung und Kläranlage eindeutig vorgegeben ist.

Abfälle dürfen von einer Kläranlage nur zur Verwertung, nicht aber zur Beseitigung angenommen werden. Die Kläranlage muss sich daher von der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde eine Anerkennung als Verwerter einholen. Bei einer BImSchG-Genehmigung ist diese Anerkennung bereits mit inbegriffen (Littmann, Jan. 2011, mündl.). Eine Anerkennung als Verwerter erfolgt nur dann, wenn sich durch die Mitbehandlung von Kosubstraten ein Nutzen für die Kläranlage ergibt. Ein ausreichender Nutzeffekt ist anzunehmen wenn:

- Eine Methanausbeute von mindestens 250 l/kg oTR¹¹ erzielt wird.
- Der organische Abbaugrad sich nicht wesentlich verschlechtert (DWA-M 380 S.10, 2009).
- Die Kläranlage über ausreichende Kapazitäten zur Behandlung von Kosubstraten verfügt (Faulturm Volumen; Stickstoffeliminierung) (Müller S.6, 2008).
- Keine zusätzlichen Schadstoffbelastungen auftreten, sowohl im Ablauf der Kläranlage, als auch im Faulschlamm. Bei einer thermischen Verwertung des

⁹ Blockheizkraftwerk: Verbrennungsmotor (Gas-Otto-Motor oder Zündstrahlmotor), der zur Stromerzeugung mit einem Generator gekoppelt ist.

¹⁰ Die Gesamtfeuerungs-wärmeleistung bezieht sich auf die Verbrennungsenergie, die dem BHKW zugeführt wird. Bei einem BHKW mit einer Gesamtfeuerungsleistung von 1 MW und einem elektrischen Wirkungsgrad von 35% entspricht dies einer elektrischen Leistung des BHKWs von 350 kW. (DWA-M 380 S.13, 2009).

¹¹ oTR: organischer Trockenrückstand: Siehe Kapitel 5.2.1

Faulschlamm kann hiervon unter Umständen abgesehen werden (DWA-M 380 S.10, 2009).

Als Bewertungsgrundlage für geeignete Kosubstrate können Positivlisten dienen (z. B. potenziell geeignete Abfälle aus dem Anhang I der Bioabfallverordnung (BioAbfV¹²) oder die Anhänge B und C des DWA-Merkblattes M 380). In dieser Arbeit sind geeignete Kosubstrate im Abschnitt 6.3 zu finden.

Für Nebenanlagen (z. B. Lagerbehälter, BHKW, Gasfackel, Zerkleinerungsanlage) können weitere Genehmigungspflichten bestehen. Da solche Anlagen nicht der Abwasserreinigung dienen, richtet sich die Genehmigung je nach Anlage nach dem Baurecht oder BImSchG (DWA-M 380 S.12, 2009).

3.3 Änderung des §55 Wasserhaushaltsgesetz

Im März 2010 wurde folgende Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) §55 Absatz (3) formuliert (Bundesrecht S.27, 2010):

§ 55 WHG(Gesetz)Grundsätze der Abwasserbeseitigung

*(3) Flüssige Stoffe, die kein Abwasser sind, können mit Abwasser **beseitigt** werden, wenn eine solche Entsorgung der Stoffe umweltverträglicher ist als eine Entsorgung als Abfall und wasserwirtschaftliche Belange nicht entgegenstehen.*

Diese Änderung bedeutet allerdings nicht, dass flüssige Kosubstrate jetzt ohne Genehmigung im Faulturm mitbehandelt werden dürfen. Das Einbringen von Kosubstraten in den Faulturm fällt unter den Begriff „Verwertung“ von Abfällen. Im WHG §55 Absatz (3) Zeile (1) wird jedoch der Begriff „beseitigt“ verwendet. Hiermit ist das Einleiten von flüssigen Abfallstoffen (z. B. Hemmstoffmilch) in das Belebungsbecken¹³ bzw. in den Zulauf der Kläranlage gemeint. Die Beseitigung von flüssigen Abfallstoffen über den Kläranlagenzulauf ist jedoch nur gestattet, wenn auch die Zeilen (2) und (3) dieses Paragraphen eingehalten werden. Das heißt eine Fachbehörde muss in einem Wasserrechtsverfahren darlegen, dass die Beseitigung auf der Kläranlage der günstigere Weg der Entsorgung ist (Müller, 2010, mündl.).

3.4 Bestimmungen des Veterinärrechts

Werden auf der Kläranlage tierische Nebenprodukte (z. B. Speisereste) zur Kofermentation eingesetzt, ist zusätzlich eine veterinärrechtliche Zulassung nötig. Diese erfolgt im Sinne der EG-Hygieneverordnung 1774/2002¹⁴ (Burger S.23, 2010).

¹² Die Bioabfallverordnung kann online unter folgender Adresse abgerufen werden: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bioabfv/gesamt.pdf> (Stand: 22.1.2011).

¹³ Belebungsbecken: Siehe Kapitel 4

¹⁴ EG-Hygieneverordnung 1774/2002: Verordnung zur Durchführung des Tierische-Nebenprodukte-Beseitigungsgesetzes (TierNebG) (Burger S.23, 2010).

Artikel 15 und Anhang VI¹⁵ dieser Verordnung stellen im Wesentlichen Anforderungen an:

- Lagerung, Transport und Reinigung von Containern und aller anderen Anlagenbereiche
- Erstellung eines Ungezieferbekämpfungsplans
- Durchführen von Hygienekontrollen
- Getrennte Lagerung der Kosubstrate
- Überwachung des Faulschlammes hinsichtlich verschiedener schädlicher Bakterienkulturen und Krankheitserregern

Erfolgte die Genehmigung zur Kofermentation nach dem Immissionsschutzgesetz (Genehmigung nach BImSchG), so ist eine separate Beantragung einer veterinärrechtlichen Genehmigung nicht nötig, da diese schon Bestandteil der BImSchG-Genehmigung ist (Schneichel S.13, 2010).

Das Veterinärrecht schreibt vor der Behandlung von tierischen Nebenprodukten im Faulturn eine Hygienisierung¹⁶ vor, da solche Kosubstrate mit Seuchen- oder Krankheitserregern belastet sein können (Burger S.24, 2010). Dies gilt unabhängig davon, ob die veterinärrechtliche Genehmigung separat eingeholt wurde oder ob die Erlaubnis zur Kofermentation von tierischen Nebenprodukten über eine evtl. vorhandene BImSchG-Genehmigung erfolgt.

Laut DWA (DWA-M 380 S.20, 2009) werden bei einer thermischen Verwertung des Faulschlammes die Anforderungen der Hygienisierung erfüllt. In diesem Fall kann somit in der Regel von einer Hygienisierung der Kosubstrate abgesehen werden. Die Kläranlage Moosburg konnte dies jedoch nicht bestätigen. Dort müssen tierische Abfallprodukte (hier Speisereste) vor der Vergärung im Faulturn hygienisiert werden, obwohl der Faulschlamm nach der Vergärung einer thermischen Verwertung zugeführt wird. Die Hygienisierung der Kosubstrate erfolgt in der Kläranlage Moosburg bereits durch die Zulieferer am Ort des Entstehens (Littmann, Jan. 2011, mündl).

Wird der Faulschlamm keiner thermischen Behandlung zugeführt, also z. B. auf Ackerböden als Düngemittel ausgebracht, so müssen in jedem Fall die folgenden Vorschriften zur Hygienisierung beachtet werden.

Die Kosubstrate werden zunächst nach ihrer hygienischen Bedenklichkeit in drei Kategorien eingeteilt. Kategorie 1 (z. B. Teile von BSE erkrankten Tieren) stellt das größte seuchenhygienische Risiko dar. Abhängig von der jeweiligen Kategorie der Kosubstrate, schreibt die EG-Hygieneverordnung eine Hygienisierung nach einer von

¹⁵ Die EG-Hygieneverordnung 1774/2002 kann online unter folgender Adresse abgerufen werden (Artikel 4-6: S.8ff. Artikel 15: S.17. Anhang V: S.45ff. Anhang VI: S. 51ff):
<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/de/consleg/2002/R/02002R1774-20060401-de.pdf>
(Stand: 26.2.2011)

¹⁶ Abtöten von Krankheitserregern durch Erhitzen

insgesamt sieben Hygienisierungs-Methoden oder nach der sog. „Standardmethode“ (Artikel 15 dieser Verordnung) vor.

Die Hygienisierungs-Methoden sind im Anhang V der EG-Hygieneverordnung 1774/2002 dargestellt (siehe S. 15 Fußnote 15). Tabelle 3.4a beschreibt dies in zusammengefasster Form.

Die Einstufung der Kosubstrate in die jeweiligen Kategorien ist in den Artikeln 4 bis 6 der EG-Hygieneverordnung festgelegt (siehe S. 15 Fußnote 15). Tabelle 3.4b beschreibt dies in zusammengefasster Form.

| | Methode 1 | Methode 2 | Methode 3 | Methode 4 | Methode 5 | Standardmethode |
|---------------------|------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|
| Zerkleinerung * | 50 mm | 150 mm | 30 mm | 30 mm | 20 mm | 12 mm |
| Zeit und Temperatur | 20 min 133 °C | 125 min 100 °C oder 120 min 110 °C oder 50 min 120 °C | 95 min 100 °C oder 55 min 110 °C oder 13 min 120 °C | 16 min 100 °C oder 13 min 110 °C oder 3 min 130 °C | 120 min 80 °C oder 60 min 100 °C | 60 min 70 °C (Chargenbetrieb) |
| Druck | ≥ 3 bar | Keine Vorgabe | Keine Vorgabe | Keine Vorgabe | Keine Vorgabe | Keine Vorgabe |

Tabelle 3.4a: Verarbeitungsmethoden nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 Kapitel III (Quelle: DWA-M 380 S.17, 2009, modifiziert)

* Maximale Teilchengröße zweidimensional definiert (d. h. die Kosubstrate müssen einen Sieb mit den dargestellten Lochdurchmessern passieren können).

| Kategorie | Kategorie 1 | Kategorie 2 | Kategorie 3 |
|------------|--|---|---|
| Material | <p>Alle Körperteile einschließlich Haut BSE-verdächtiger Tiere, Versuchstiere, Wildtiere</p> <p>Küchen- und Speiseabfälle aus dem grenzüberschreitenden Verkehr</p> | <p>Gülle sowie Magen- und Darminhalte (Sonderregelungen! Siehe Kapitel 2.2)</p> <p>Tiermaterial, das bei der Behandlung von Abwässern aus Schlachthöfen gesammelt wird, einschließlich Siebreste, Abfall aus Sandfängen, Fett-/Ölgemische, Schlämme und Material aus den Abflussleitungen solcher Anlagen</p> | <p>Schlachtkörperteile</p> <p>Häute, Hufe, Hörner, Schweineborsten, Federn</p> <p>Blut von anderen Tieren als Wiederkäuern</p> <p>Blut, Häute, Hufe, Federn, Wolle, Hörner, Haare, Pelze von Tieren, die keine Anzeichen einer über diese Erzeugnisse übertragbaren Krankheiten zeigen</p> <p>Rohmilch</p> <p>Küchen- und Kantinenabfälle</p> |
| Behandlung | <p>Unverzögliche Abholung und Verbrennung</p> <p><u>oder</u></p> <p>Behandlung nach Methode 1 bis 5 (Methode 1 auf Verlangen der Behörde)</p> <p><u>und</u></p> <p>Geruchsstoffmarkierung</p> <p><u>und</u></p> <p>Verbrennung</p> | <p>Wie Kategorie 1</p> <p><u>oder</u></p> <p>Behandlung nach Methode 1</p> <p><u>und</u></p> <p>Geruchsstoffmarkierung</p> <p><u>und</u></p> <p>Verarbeitung in einer nach Artikel 15 zugelassenen Biogas- oder Kompostieranlage</p> | <p>Wie Kategorie 2</p> <p><u>oder</u></p> <p>Verarbeitung in einer nach Artikel 15 zugelassenen Biogas- oder Kompostieranlage, d. h. Hygienisierung (12mm, 70°C, 60 min)</p> <p>Ausnahme: Milch, Kolostrum und Milcherzeugnisse sofern Genehmigung durch zuständige Behörde</p> |

Tabelle 3.4b: Kategorien für die Hygienisierung von tierischen Nebenprodukten und für Vergärungsanlagen relevante Behandlungsoptionen nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 und TierNebG (Quelle: DWA-M 380 S.16, 2009)

Weitere Hinweise zur Hygienisierungspflicht (DWA-M 380 S.16ff, 2009):

- Für die Behandlung von Kosubstraten in Faultürmen von Kläranlagen erscheinen nur die „Standardmethode“ und „Methode 1“ als praxisrelevant.
- Kosubstrate der Kategorie 1 können in Faultürmen nicht mitbehandelt werden.
- Eine Hygienisierung nach der Standardmethode ist nicht erforderlich wenn:
 - Nur tierische Nebenprodukte der Kategorie 2 und 3 verarbeitet werden, die zuvor der Verarbeitungsmethode 1 unterzogen wurden.
 - Nur Material der Kategorie 3 verarbeitet wird, das an einem anderen Ort nach der Standardmethode hygienisiert wurde.
 - Nur tierische Nebenprodukte verarbeitet werden, die ohne Vorbehandlung verwendet werden dürfen. Dies sind:
 - Darminhalt, der vom Magen und Darmtrakt getrennt wurde.
 - Gülle (bei hofinternen Biogasanlagen).
 - Milch und Milcherzeugnisse, soweit durch die zuständige Behörde genehmigt.

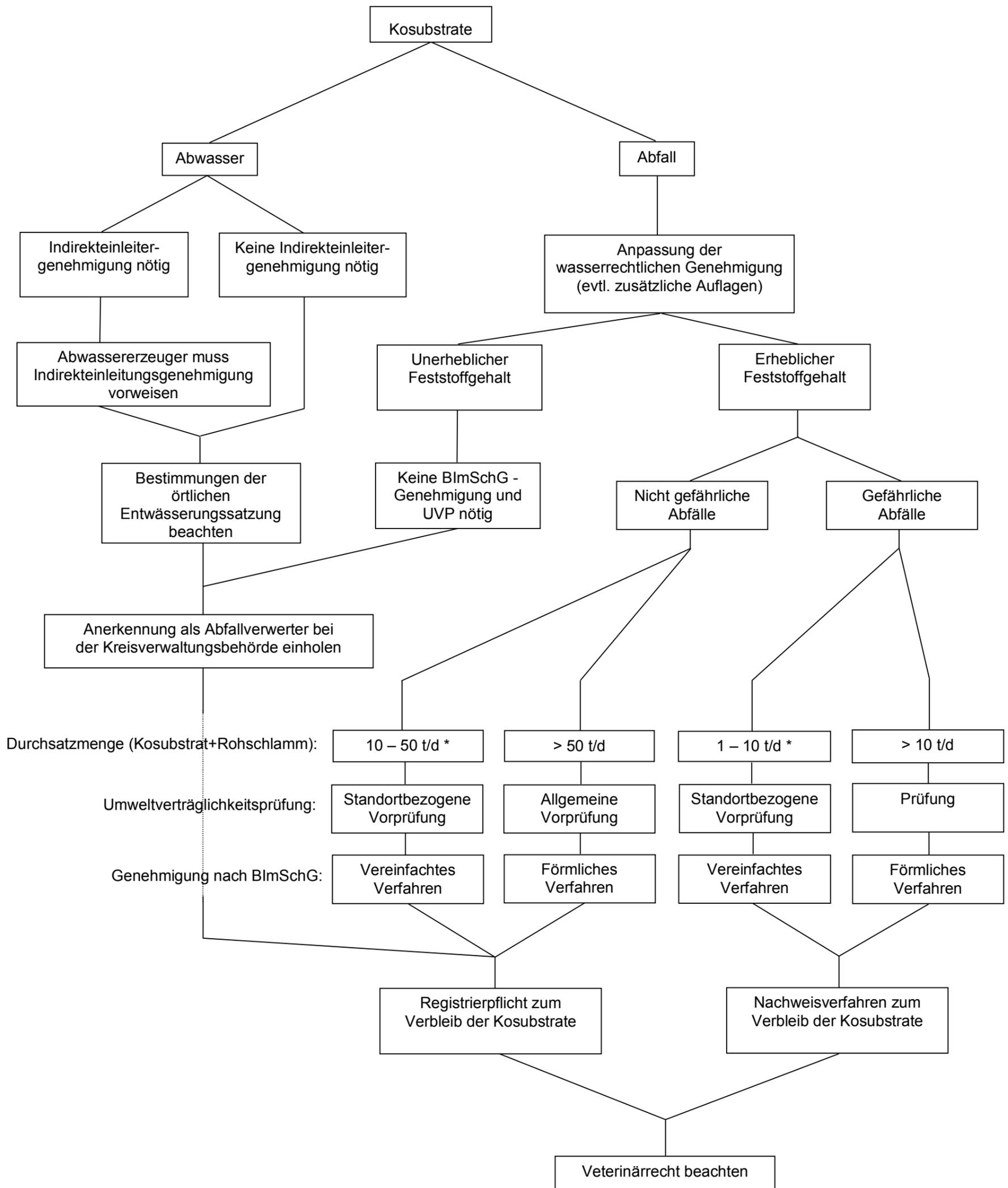


Abbildung 3.4: Flussdiagramm zur Genehmigungspflicht von Kofermentationsanlagen auf Kläranlagen

* Unterhalb dieser Grenzwerte ist eine Genehmigung nach Baurecht möglich (DWA-M 380 S.13, 2009).

4 Vorstellung der Kläranlage Moosburg

Anhand des auf S.21 dargestellten Ablaufschemas (Abbildung 4) soll die Abwasserreinigung der Kläranlage Moosburg (33.000 Einwohnergleichwerte) erläutert werden.

Das in der Kanalisation gesammelte Abwasser wird zunächst über den Zulauf der Kläranlage in ein Rechenbecken geleitet. Mit Hilfe eines Umlaufrechens werden dort grobe Feststoffe, wie Hygieneartikel oder Kunststoffgegenstände, abgegriffen. Die abgetrennten Stoffe werden in der Rechengutwäsche gereinigt und anschließend entsorgt. Der Abwasserstrom wird weiter zum Sand- und Fettfang geleitet. Hier werden Öle, Fette und mineralische Feststoffe, wie Sand, abgetrennt. Im Vorklärbecken werden durch Sedimentation Stoffe abgetrennt, die von Rechen und Sandfang nicht erfasst werden konnten. Die hier abgesetzten Stoffe bilden den sog. Primärschlamm. Dieser wird von einem Räumler in den Beckentrichter geschoben, von wo aus er zum Voreindicker gepumpt wird (Provinz, Website, 2010).

Die nächsten beiden Stufen der Abwasserreinigung dienen der Stickstoffentfernung. Stickstoff, der vor allem über den Harnstoff in die Kläranlage eingetragen wird, liegt fast ausschließlich in reduzierter Form als Ammonium (NH_4^+) vor. Da der Abbau von Ammonium stark sauerstoffzehrend ist, muss dieser Abbau innerhalb der Kläranlage erfolgen, um die Umwelt nicht zu gefährden. Andernfalls wären durch den Sauerstoffverbrauch im Vorfluter¹⁷ Schäden, wie Fischsterben und starkes Algenwachstum, möglich. Der Abbau von Ammonium geschieht in der Nitrifikation. Dort oxidieren Bakterien den Ammoniumstickstoff über Nitrit (NO_2^-) zu Nitrat (NO_3^-). In der Denitrifikation wird das Nitrat unter anoxischen (sauerstofffreien) Bedingungen zu molekularem Stickstoff (N_2) umgewandelt, welcher in die Atmosphäre entweicht (Klärwärter-Taschenbuch S.133, 1998). Um die Durchsatzmenge zu erhöhen, ist die Denitrifikation der Nitrifikation vorgeschaltet. Das in der Nitrifikation gebildete Nitrat gelangt erst über den Rücklaufschlamm in die Denitrifikation (Späth S.8, 2008). Im Belebungsbecken, in dem auch die Nitrifikation stattfindet, wird das Abwasser außerdem von organischen Stoffen gereinigt, die sich im Wasser gelöst haben. Dies geschieht mit Hilfe von Bakterien und Kleinstlebewesen, die sich von diesen Stoffen ernähren (Wasser-Wissen 2010, Belebungsanlagen). Sie werden über den Rücklaufschlamm eingebracht und mittels Druckluft mit Sauerstoff versorgt. Des Weiteren bauen die Bakterien im Belebungsbecken auch einen Teil des als Phosphat (PO_4^{3-}) vorliegenden Phosphors ab. Das restliche Phosphat wird anschließend in der Phosphorfällung durch die Zugabe von Eisensalzen weitgehend gefällt, d. h. chemisch gebunden, sodass es später abgepumpt werden kann (Provinz, Website, 2010). Im Nachklärbecken setzen sich die Bakterien dann durch Sedimentation ab und bilden den Belebtschlamm. Das jetzt gereinigte Abwasser wird in den Vorfluter geleitet und der Belebtschlamm wird abgepumpt. Der größte Teil des Belebtschlammes wird als

¹⁷ Vorfluter: Gewässer in welches das Abwasser nach durchlaufen der Kläranlage eingeleitet wird.

Betriebsgebäude und den Faulturm zu heizen. Zur Absicherung gegen Ausfälle der Brennstoffzelle oder des BHKWs ist außerdem eine Notfackel installiert, über die das Methangas notfalls verbrannt werden kann.

Um den Gasertrag deutlich zu steigern, werden dem Schlamm organische Abfälle, sog. Kosubstrate, beigemischt, die anschließend im Faulturm gemeinsam mit dem Klärschlamm vergoren werden. Kosubstrate sind biologische Abfallstoffe die in der Industrie, Lebensmittelproduktion oder Gastronomie anfallen. Die Mitbehandlung von Kosubstraten im Faulturm stellt eine Verwertung¹⁸ von Abfällen dar. Da Abfälle von Betrieben grundsätzlich kostenpflichtig entsorgt werden müssen, ist für die Annahme von Kosubstraten ein Erlös von ca. 5 bis 20 Euro pro m³ üblich¹⁹. Typische Kosubstrate, im Folgenden auch abgekürzt als Substrate bezeichnet, sind flüssige Speiseabfälle, Schlachtabfälle oder Fette aus Fettabscheidern.

Der Mehrertrag an Klärgas ist dadurch bedingt, dass jetzt insgesamt mehr Biomasse zur Verfügung steht, die im Faulturm von den Bakterien verstoffwechselt werden kann. Aber auch die wichtige Tatsache, dass mit den organischen Abfällen den Bakterien ein ausgewogeneres Nahrungsangebot zur Verfügung gestellt wird, steigert den Gasertrag. Denn genau wie auch Menschen sind Bakterien wesentlich aktiver wenn sie sich nicht einseitig ernähren müssen (Hoppenheid, 2010, mündl.). Des Weiteren besitzen manche Kosubstrate schlicht weg ein höheres Energiepotential als Klärschlamm.

Die tägliche Schlammmenge aus der Abwasserreinigung beträgt in Moosburg ca. 70 - 80 m³, die Menge an Kosubstraten ca. 33 m³. Der tägliche Gasertrag konnte somit von 800 m³ auf 5000 m³ gesteigert werden (Littmann, Okt. 2010, mündl.). Die dadurch erzeugte Menge an elektrischen Strom betrug im Jahr 2009 etwa 2,17 GWh (2.167.800 kWh). Das entspricht dem jährlichen Stromverbrauch von 1277 Einzelpersonen²⁰ (KA d. Zukunft S.6 und S.17, 2010).

Die Kosubstrate werden nach der Anlieferung an der Annahmestation in einen der sieben Tankbehälter gepumpt. Eine Vorbehandlung der Kosubstrate wie z. B. Zerkleinerung, Störstoffabtrennung oder Hygienisierung ist nicht nötig, da die Kosubstrate von den Lieferanten bereits in aufbereiteter Form angeliefert werden. Von den Tankbehältern aus werden sie in gleichmäßigen Intervallen (stündlich) in den Mischbehälter mit Rührwerk geleitet, in dem sie mit dem Primär- und Überschussschlamm aus der Abwasserreinigung vermischt werden. Für einen störungsfreien Abbauprozess im Faulturm ist eine effiziente Durchmischung des Klärschlammes (Primär- und Überschussschlamm) und der Kosubstrate erforderlich. Nur so kann eine gleichmäßige Belastung und Verteilung der Bakterien im Faulturm gewährleistet werden (Kofermentation S.12, 1998). Das Gemisch aus Schlamm und

¹⁸ Abfallverwertung: Höherwertige Entsorgung unter Gewinnung von Energie oder Rohstoffen.

¹⁹ Eigene Erhebung. Anzahl der hierfür befragten Kläranlagen: 3

²⁰ Berechnung des jährlichen Stromverbrauchs einer Einzelperson: Unter der angegebenen Quelle wird ein jährlicher Nettostromverbrauch von 139,2 Mrd. kWh für die deutschen Haushalte angegeben. Dieser Wert wurde durch die Einwohnerzahl Deutschlands (82 Mio.) dividiert. Es ergibt sich ein Verbrauch 1697 kWh pro Person und Jahr (nur im Haushalt).

Kosubstrat (im Weiteren als Frischschlamm bezeichnet) wird über Rohrleitungen vom Mischbehälter in das Innere des Faulturms gepumpt. Der Faulturm der Kläranlage Moosburg, welcher eine Kapazität von 2400 m³ hat, wird hydraulisch durchmischt und mit der Abwärme aus dem BHKW und der Brennstoffzelle beheizt (Littmann, Okt. 2010, mündl.). Auch im Faulturm ist eine gute Durchmischung erforderlich, um einen stabilen und störungsfreien Abbauprozess zu gewährleisten. Bei der Mitbehandlung von Kosubstraten ist dies besonders wichtig, da die Faulturmbelastung hier um ein Vielfaches steigt.

Der ausgefaulte Schlamm wird zur weiteren Entwässerung in den Nacheindicker und anschließend in den Bandrockner geleitet. Nachdem sein Gewicht durch die Entwässerung auf ein Minimum reduziert wurde, wird er zur Verbrennung in ein Braunkohlekraftwerk abtransportiert. In naher Zukunft soll der Faulschlamm aber allotherm vergast²¹ werden, um mit dem Gas eine Mikrogasturbine zu speisen. Das bei der Entwässerung anfallende Wasser wird als Zentratwasser bezeichnet. Es ist hoch mit Schadstoffen belastet und wird daher wieder der Abwasserreinigung zugeführt. Da in Moosburg aufgrund der Kofermentation das Zentratwasser besonders hoch belastet ist, wird es zuerst noch mittels einer SBR-Anlage (Sequentielle Biologische Reinigung) vorgereinigt. Stammt das Zentratwasser aus Schlämmen anderer Kläranlagen, kann es direkt wieder der Abwasserreinigung zugeführt werden (Littmann, Okt. 2010, mündl.).

²¹Allotherme Vergasung: Umwandlung von Biomasse bei hohen Temperaturen, Sauerstoffausschluss und externer Wärmezufuhr zu einem brennbaren Gas (Hofmann, 2010, Energie aus WWB S. 5_8).

5 Anaerober Abbau von Biomasse in Faultürmen

Faultürmen auf Kläranlagen können nicht ohne Weiteres beliebige Kosubstrate zugeführt werden. Die Bakterien im Faulturm bilden eine sensible Faulturmbiologie, welche von vielen chemischen Parametern abhängig ist. Diese Parameter werden im Wesentlichen von den Abbauprodukten gebildet, die beim Abbau von Klärschlamm entstehen. Sie sind im Gleichgewicht mit der Faulturmbiologie. Wird dieses Gleichgewicht gestört, kann der Faulungsprozess zum Erliegen kommen und muss durch kostenintensive Maßnahmen neu gestartet werden. Da die biologische Zusammensetzung der Kosubstrate ungleich der des Klärschlammes ist, sind auch die Mengen der verschiedenen Abbauprodukte von biologischen Abfallstoffen ungleich der von Klärschlamm. Die Zugabe von Kosubstraten hat also immer Auswirkungen auf die Höhe und Konzentrationen der chemischen Parameter im Faulturm.

Um den Faulungsprozess sicher steuern zu können, wird deshalb im Folgenden besprochen, welche Parameter Einfluss auf die Faulturmbiologie nehmen und wie deren Auswirkungen sind. Hierfür werden zunächst die Grundlagen des anaeroben Abbaus von Biomasse in Faultürmen erläutert.

5.1 Grundlagen des anaeroben Abbaus

Das beim anaeroben Abbau von Biomasse entstehende Klärgas besteht zu 50 - 70% aus Methan (CH_4) und zu 30 - 50% aus Kohlenstoffdioxid (CO_2). Es ist das Stoffwechselprodukt der anaerob lebenden Bakterien. Die Umwandlung in Methan kann jedoch nicht von einer einzigen Bakteriengruppe bewerkstelligt werden, sondern ist das Produkt einer Nahrungskette von vier verschiedenen, voneinander abhängigen Bakteriengruppen. Das Abbauprodukt der ersten Bakteriengruppe bildet die Nahrungsgrundlage für die zweite Bakteriengruppe. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis schließlich durch die vierte Bakteriengruppe Methangas erzeugt wird. Die Umwandlung zu Methan erfolgt also in vier Phasen (siehe Abbildung 5.1) (Schröppel S.12, 2002).

In der ersten Phase, der Hydrolyse-Phase, werden die organischen Substrate durch Enzyme in gelöste Bruchstücke wie Einfachzucker, Aminosäuren und Fettsäuren gespalten (Schröppel S.12, 2002). Diese werden anschließend in der Versäuerungs-Phase zu organischen Säuren, Alkoholen, Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2) abgebaut. In der acetogenen Phase werden die Alkohole und organischen Säuren dann weiter zu Essigsäure umgewandelt. In der methanogenen (methanbildenden) Phase wird schließlich, vornehmlich aus CO_2 , H_2 und Essigsäure, Methan gebildet (Anaerobtechnik S.25ff, 2004).

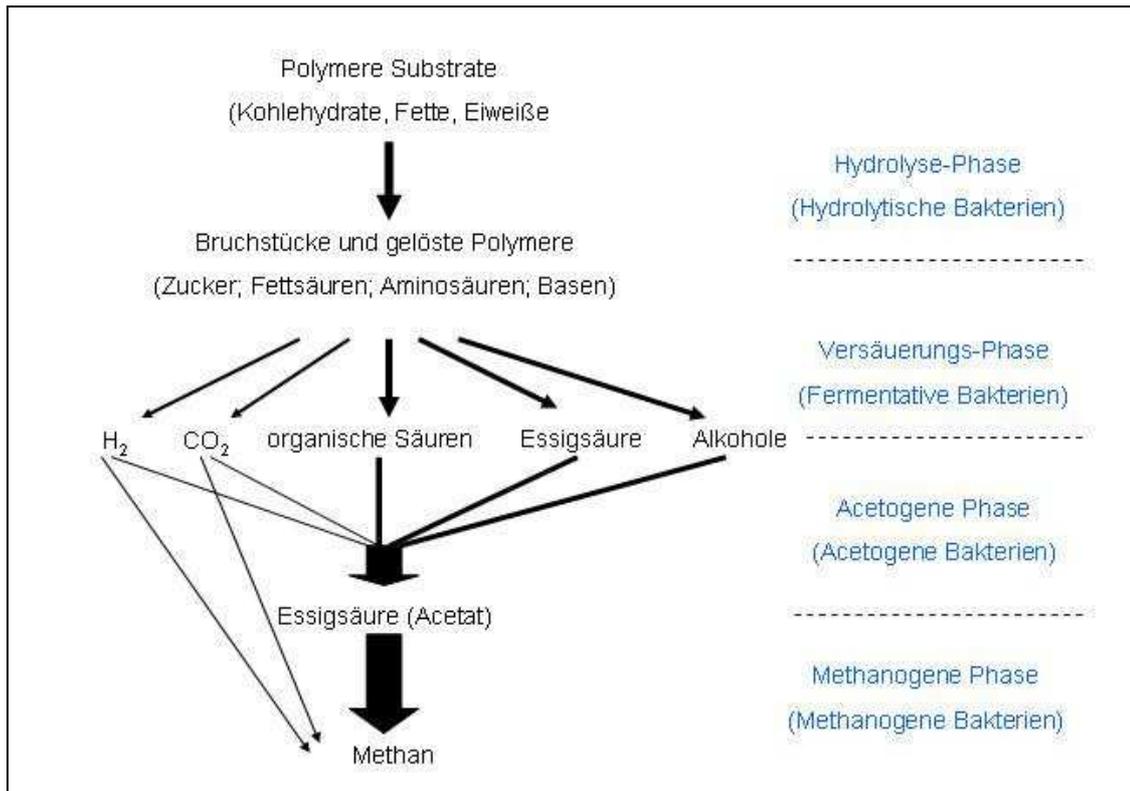


Abbildung 5.1: Schema des mehrstufigen anaeroben Abbaus (Anaerobtechnik S.24, 2004, modifiziert).

5.2 Grundlegende Kenngrößen

5.2.1 Trockensubstanz und Trockenrückstand

Klärschlamm besteht im Wesentlichen aus Wasser, organischen Feststoffen und Mikroorganismen. Der nach dem völligen Austrocknen eines Schlammes übrigbleibende Rest wird als Trockenmasse (TM) bezeichnet (Wasser-Wissen 2010, Klärschlamm).

Der Trockensubstanzgehalt (TS-Gehalt) ist eine Angabe der Trockenmasse bezogen auf das Schlammvolumen. Die Einheit ist demzufolge $[kg/m^3]$ (Bank S.1422, 2000).

Als organische Trockensubstanz (oTS) wird nur der organische Anteil der Trockenmasse im Verhältnis zum Schlammvolumen bezeichnet. Nicht organische Bestandteile der Trockenmasse sind Mineralien, wie z. B. Sand. Die organische Trockensubstanz trägt oft auch die Bezeichnung Glühverlust (GV).

Unter vergärbare organische Trockensubstanz (oTSv) versteht man den Anteil der organischen Trockensubstanz, der im Faulturm vergärt werden kann. Lignin (Bestandteil pflanzlicher Zellwände) beispielsweise ist zwar organischer Natur, kann aber von den Bakterien im Faulturm nicht abgebaut werden (Finsterwalder, 2010, mündl.).

Die Angabe Trockenrückstand (TR) entspricht der des TS-Gehalts, nur wird hier auf die Massen Bezug genommen. Es handelt sich um eine Massenprozent-Angabe der Trockenmasse bezogen auf die ursprüngliche Schlammmasse. Die Einheit ist [kg/kg · 100%] (Anaerobtechnik S.99, 2004).

Analog zur organischen Trockensubstanz bezeichnet der Begriff organischer Trockenrückstand (oTR) den organischen Anteil des Trockenrückstandes. Es handelt sich hier um eine Prozentangabe, die meistens auf den Trockenrückstand TR und nicht auf die absolute Schlammmasse bezogen ist.

Der TR-Gehalt spielt bei der Vergärung eine wichtige Rolle. Je geringer er ist, desto effektiver ist die Durchmischung im Faulturm, und somit auch die Aktivität der Mikroorganismen (Schäfer S.14, 1998). Des Weiteren muss auf die Pumpfähigkeit der Substrate geachtet werden. So können, je nach eingesetzter Pumptechnik, schon ab einem TR-Gehalt von 12% Probleme bei der Förderung auftreten (Klußmann S.2, 2010). Für die Kläranlage Moosburg kommen Kosubstrate bis zu einem TR-Gehalt von rund 20% in Frage (Littmann, Okt. 2010, mündl.).

In der Literatur finden sich oft die Angaben [kg TR] und [kg TS]. Gemeint ist hiermit die anfangs erwähnte Trockenmasse TM in [kg]. Da die Größen TR und TS aber Verhältnisse beschreiben, sind die Bezeichnungen [kg TR] und [kg TS] für den Laien oft irreführend. Da sie aber in der Literatur fast ausschließlich in dieser Form verwendet werden, werden sie auch in dieser Arbeit so übernommen.

Analog hierzu werden die Größen [kg oTR] und [kg oTS] verwendet. Sie bezeichnen die organische Trockenmasse in [kg].

5.2.2 Stabilisierungsgrad

Da die Stabilisierung oberstes Ziel der Klärschlammfäulung ist, darf sie durch die Kofermentation auf keinen Fall soweit negativ beeinflusst werden, dass der Faulschlamm nicht mehr zwischengelagert oder entsorgt werden kann. Der Grad der Stabilisierung kann am besten über den Gehalt an organischen Säuren im ausgefauten Schlamm bemessen werden (Schmelz S. 74ff, 2000). Besitzt ein ausgefauter Schlamm ein hohes Maß an organischen Säuren, so kann davon ausgegangen werden, dass der Abbauprozess der Bakterien nicht vollständig ablief oder Störungen aufgetreten sind. Das bedeutet auch andere organische Substanzen wurden nicht vollständig abgebaut und der Faulschlamm ist unter Umständen nicht ausreichend stabilisiert. Tabelle 5.2.2 beschreibt den Stabilisierungsgrad anhand des Gehalts an organischen Säuren im Faulschlamm.

| Gehalt an organischen Säuren [mg/l] | Stabilisierungsgrad |
|-------------------------------------|---------------------|
| < 100 | Sehr gut ausgefaut |
| 100 – 1000 | Gut ausgefaut |
| 1000 – 2500 | Mäßig ausgefaut |

Tabelle 5.2.2: Beurteilung des Stabilisierungsgrades nach dem Gehalt an organischen Säuren (Schmelz S. 41, 2000).

5.2.3 Faulzeit und organischer Abbaugrad

Unter der Faulzeit versteht man die Aufenthaltszeit des Frischschlammes im Faulturm. Der organische Abbaugrad gibt an, wie viel Prozent der zugeführten organischen Substanz während dieser Zeit abgebaut wurde. Der Zusammenhang zwischen Faulzeit und Abbaugrad ist in Abbildung 5.2.3 dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Abbau zunächst schnell voranschreitet, sich dann aber asymptotisch einem maximalen Abbaugrad von etwa 50% annähert. Nach 20 bis 30 Tagen sind bereits 90% des maximalen Abbaugrades erreicht. Da ab diesem Zeitpunkt ein weiterer Abbau der organischen Substanz nur noch sehr langsam stattfindet, kann der Schlamm als stabilisiert betrachtet werden (Anaerobtechnik S.118, 2004). Die Faulzeit ist vor allem von der Temperatur im Faulturm abhängig. Übliche Mindestfaulzeiten betragen in der Praxis rund 22 Tage (Finsterwalder, 2011, mündl.).

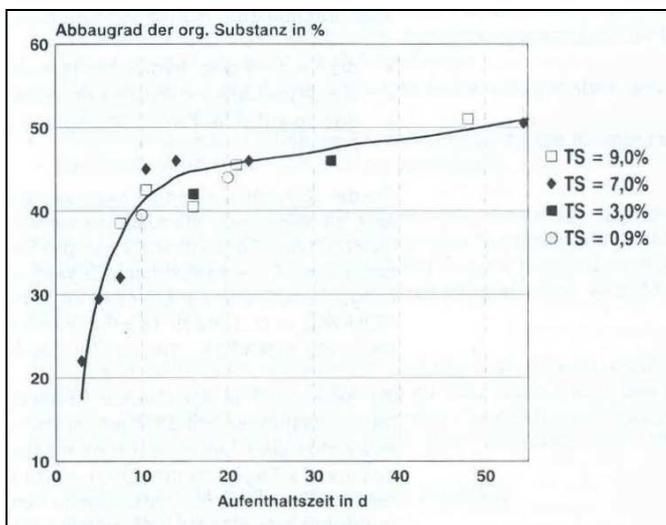


Abbildung 5.2.3: Organischer Abbaugrad für unterschiedliche TS-Gehalte in Abhängigkeit der Faulzeit (Schmelz S.40, 2000).

5.3 Einflussgrößen

5.3.1 pH-Wert

Die ungestörte Entwicklung der Mikroorganismen im Faulturm ist sehr eng mit einem optimalen pH-Wert verbunden. Für die anaerobe Biozönose²² im Faulturm wird in der Literatur ein Toleranzbereich von pH=6,8 bis pH=7,5 angegeben (Schmelz S.20, 2000). Zu niedrige pH-Werte können sich auf die methanbildenden Bakterien toxisch auswirken (Schröppel S.12, 2002).

Bei der Behandlung von kommunalen Schlämmen stellt sich dieser pH-Wert oft von selbst ein (Schmelz S.25, 2000). Bei der Behandlung von Kosubstraten kann dieser

²² Biozönose: Gemeinschaft von Organismen verschiedener Arten in einem abgegrenzten Lebensraum (Wikipedia 2010, Biozönose).

enge Bereich aber oft Probleme bereiten, da die Konzentration der gebildeten organischen Säuren stark ansteigen kann. Zur Verhinderung des Absinkens des pH-Wertes in diesem Zusammenhang können dem Faulturm alkalische Neutralisationsmittel wie

- Natriumcarbonat (Na_2CO_3)
- Calciumhydroxid (gelöschter Kalk) ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)
- Natronlauge (NaOH)

zugegeben werden (Anaerobtechnik S.55, 2004).

Bei zu hohen pH-Werten kann es ebenfalls zu Hemmungen des Bakterienwachstums kommen, da mit steigenden pH-Werten auch der Gehalt des toxisch wirkenden Ammoniaks zunimmt (siehe Kapitel 5.3.4). Die Zugabe von Salzsäure (HCl) kann den pH-Wert wieder senken (Buchmeier, 2010, mündl.).

5.3.2 Pufferkapazität

Die Pufferkapazität, oft auch als Säurekapazität bezeichnet, beschreibt die Menge an Salzsäure die einer Messprobe von 100 ml zugegeben werden muss, bevor sich ein pH-Wert von 4,3 einstellt (Umwelttech. Berufe S.360, 2003). Die Höhe der Pufferkapazität wird maßgeblich vom Gehalt an Carbonaten und Bicarbonaten (auch Hydrogencarbonat genannt) und Kohlenstoffdioxid bestimmt.

Carbonate und Bicarbonate sind in der Lage, Säuren chemisch zu binden, sodass die Zugabe von Säuren keinen Einfluss auf den pH-Wert hat. Die Menge an Carbonaten und Bicarbonaten im Faulturm wird in der Regel als „Kalkreserven“ bezeichnet und in [mg/l] angegeben. Bei der Zugabe von Basen sorgt das Kohlenstoffdioxid durch chemische Bindungen für einen stabilen pH-Wert. Die Pufferkapazität eines Schlammes beschreibt also seine Fähigkeit, Säuren oder Basen aufzunehmen, ohne dass sich dessen pH-Wert wesentlich ändert (Wasser-Wissen 2010, Puffervermögen).

5.3.3 Temperatur

Mit zunehmender Temperatur steigt die Abbauleistung der Bakterien im Faulturm exponentiell an, allerdings nur bis zu einem bestimmten Temperaturwert. Danach werden die Zellbestandteile der Bakterien mit fortschreitender Temperatur zerstört. Das bedeutet jede Organismenart hat ein Temperaturoptimum, bei dem die Stoffwechselaktivität am größten ist. Mikroorganismen werden häufig in drei Temperaturbereiche eingeteilt (Anaerobtechnik S.49, 2004):

- Psychrophil: $< 20\text{ °C}$
- Mesophil: 20 bis 40 °C
- Thermophil: $> 40\text{ °C}$

Auch in jedem dieser Temperaturbereiche gibt es ein Temperaturoptimum. Die Aktivität der fermentativen und methanbildenden Bakterien ist im mesophilen Bereich bei ca.

37 °C am größten. Die Aktivität ist dort aber um 40% geringer als die im thermophilen Bereich bei ca. 52 °C (Schmelz S.24, 2000). Faultürme werden jedoch in der Regel trotzdem im mesophilen Bereich bei 37 °C betrieben, weil dieser gegenüber dem thermophilen Bereich folgende Vorteile bietet (Schmelz S.38, 2000):

- Stabilerer und unempfindlicherer Faulbehälterbetrieb, da die meisten methanbildenden Bakterien zu den mesophilen Organismen zählen.
- Mesophile Faulbehälter benötigen nur etwa die Hälfte an Wärmeenergie.
- Der mesophil ausgefaulte Schlamm riecht weniger stark und lässt sich besser entwässern.

Das wichtigste Argument gegen den thermophilen Betrieb von Faultürmen ist aber, dass sich bei hohen Temperaturen Ammonium zu dem Zellgift Ammoniak umwandelt, welches hemmend auf methanbildenden Bakterien wirkt (siehe Kapitel 5.3.4) (Schmelz S.32, 2000).

5.3.4 Stickstoffverbindungen

Stickstoffverbindungen (vornehmlich Ammonium (NH_4^+)) entstehen beim Abbau des Klärschlammes und der Kosubstrate im Faulturm. Ein weiterer Teil gelangt über die Abwasserreinigung in den Faulturm.

Stickstoff und Stickstoffverbindungen sind für den Abbauprozess im Faulturm erforderlich, zu hohe Konzentrationen können das Bakterienwachstum aber hemmen. Von den Mikroorganismen wird Stickstoff zum Aufbau von Eiweißen (Proteinen) benötigt (Schröppel S.14, 2002).

Die basische Stickstoffverbindung Ammonium wirkt den organischen Säuren entgegen, sodass sich im Faulturm ein stabiler pH-Wert einstellt. Neben dem Ammonium bildet sich beim Abbau von stickstoffhaltigen Substraten (proteinreiche Substrate) aber auch das in Kapitel 5.3.3 erwähnte toxische Ammoniak (NH_3) (Schmelz S.31, 2000).

Ammonium und Ammoniak bilden ein chemisches Gleichgewicht (bei $\text{pH}=7,0$ und $T=38\text{ °C}$ 99,5% Ammonium und 0,5% Ammoniak (Anaerobtechnik S.79, 2004)). Mit steigendem pH-Wert verschiebt sich dieses Gleichgewicht in Richtung Ammoniak. Eine ammoniakbedingte Hemmung tritt bei üblichen 38 °C und $\text{pH}=7,0$ ab einer Ammoniumkonzentration von 3500 mg/l auf. Steigt die Konzentration des basischen Ammoniums an (z. B. durch die Zugabe von proteinhaltigen Substraten), so steigt auch der pH-Wert. Bei einem pH-Wert von 7,5 beginnt die Ammoniakhemmung bereits bei einer Ammoniumkonzentration von 1000 mg/l (Schmelz S. 31, 2000).

Wie in Kapitel 5.3.3 bereits angesprochen führt auch ein Anstieg der Temperatur dazu, dass sich das Gleichgewicht von Ammonium und Ammoniak in Richtung Ammoniak verschiebt.

In beiden Fällen führt eine zu hohe Ammoniakkonzentration dazu, dass die Methanbakterien gehemmt werden, was wiederum zu einer Zunahme an organischen Säuren

führt²³. Der pH-Wert kann dadurch bis auf pH=4 fallen, was zum völligen Absterben der Methanbakterien führt. Beide Fälle, der Anstieg des pH-Wertes und auch der Anstieg der Temperatur, können also zu einem starken Absinken des pH-Wertes führen (Finsterwalder, 2010, mündl.).

Abbildung 5.3.4 zeigt die zulässigen Ammoniumkonzentrationen in Abhängigkeit des pH-Wertes und der Temperatur, bevor es zu einer ammoniakbedingten Hemmung kommt.

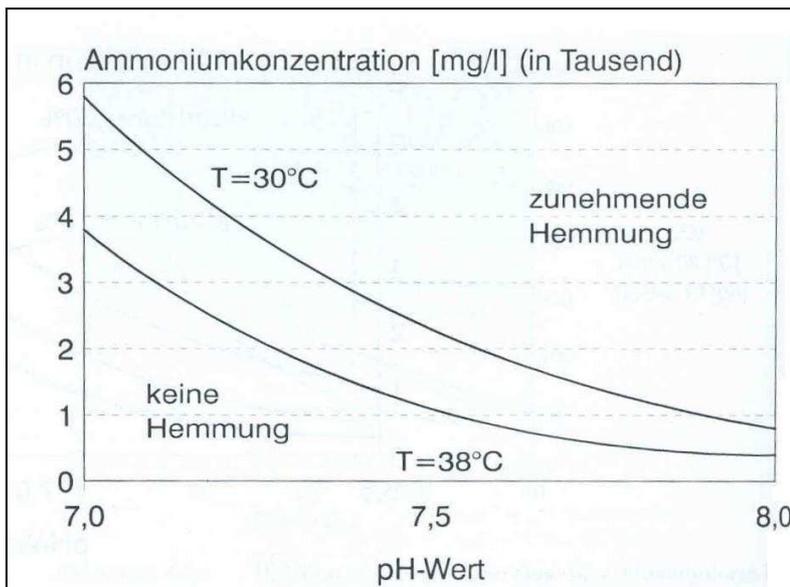


Abbildung 5.3.4: Zulässige Ammoniumkonzentrationen (Schmelz S. 32, 2000).

Laut Anaerobtechnik (Anaerobtechnik S.78ff, 2004) können geringe Anstiege der Ammoniakkonzentration jedoch von selbst ausgeglichen werden. Erfolgt der Absturz des pH-Wertes infolge des Absterbens der Methanbakterien nicht zu schnell, so können sich die Methanbakterien evtl. selbst wieder erholen, da mit sinkenden pH-Wert die Ammoniakkonzentration wieder sinkt und somit eine hemmende Komponente dieser Bakterien wegfällt.

5.4 Hemmstoffe

5.4.1 Sauerstoff

Für die ersten beiden Bakteriengruppen im Faulturm, den hydrolytischen und den fermentativen Bakterien, spielt die Anwesenheit von Sauerstoff keine Rolle. Sie können sowohl bei Gegenwart als auch bei Abwesenheit von Sauerstoff existieren. Auf die methanogenen und acetogenen Bakterien wirkt Sauerstoff aber bereits in geringen Mengen toxisch. Luftkontakt muss deshalb so gut es geht vermieden werden

²³ Eine Hemmung der Methanbakterien ist immer mit einer Hemmung der acetogenen Bakterien gekoppelt. Die acetogenen Bakterien können dann die organischen Säuren nicht mehr ausreichend abbauen. Weiterführende Erläuterung: Siehe Kapitel 6.1

(Anaerobtechnik S.67, 2004). Ein nur kurzes Öffnen des Faulturmdeckels hat laut Schmelz (Schmelz S. 28, 2000) jedoch keine großen Auswirkungen, da geringe Mengen an Sauerstoff in der Regel schnell durch die hydrolytischen und fermentativen Bakterien abgebaut werden.

5.4.2 Organische Säuren

Organische Säuren (auch Fettsäuren genannt) entstehen durch den Abbauprozess im Faulturm. Da durch sie der pH-Wert gesenkt wird, wirken organische Säuren wachstumshemmend auf die Methanbakterien. Bei einem stabilen Faulungsprozess halten sich Säureangebot und Säureabbau das Gleichgewicht. Die Konzentration an organischen Säuren liegt in diesem Fall bei unter 200 mg/l (Anaerobtechnik S.75, 2004). In Kapitel 6.1 wird gezeigt, wie die Zugabe von Kosubstraten dieses Gleichgewicht stören kann. Dieser Fall kann zu einem sich selbst aufschaukelnden Prozess der Versäuerung durch organische Säuren führen. Die Methanbakterien können dadurch im schlimmsten Fall vollständig abgetötet werden. Der Gehalt an organischen Säuren sollte deshalb ständig überwacht werden.

In Abbildung 5.4.2 ist die Hemmung der Methanbakterien in Abhängigkeit der Gesamteessigsäurenkonzentration und des pH-Wertes aufgetragen. Entgegenwirken kann man einer zu hohen Säurekonzentration durch die Rücknahme der Substratzufuhr und/oder durch die Anhebung des pH-Wertes mittels Neutralisationsmitteln (vgl. Kapitel 5.3.1) (Anaerobtechnik S.75, 2004).

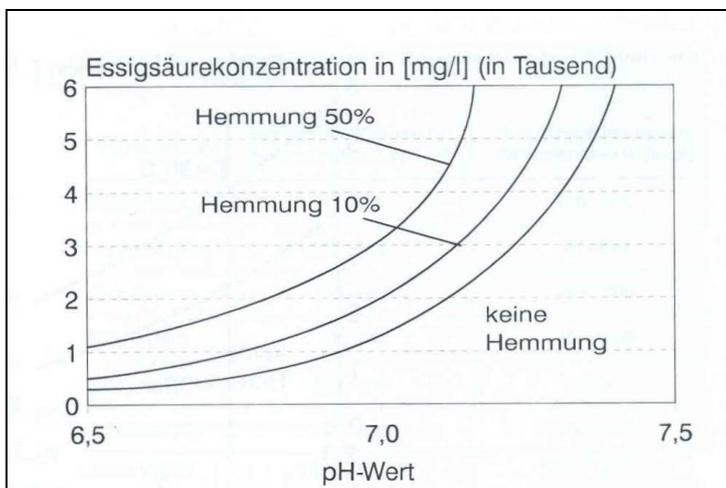


Abbildung 5.4.2: Hemmung der Methanbakterien bei zu hohen Essigsäurenkonzentrationen (Schmelz S. 31, 2000).

5.4.3 Schwefelverbindungen

Schwefel in Form von Sulfat (SO_4^{2-}) oder Sulfit (SO_3^{2-}) kann Spurenelemente wie Eisen, Kalium, Magnesium und Nickel, chemisch binden (Schröppel S.15, 2002). Wie in Kapitel 5.4.4 noch erläutert wird, wirken diese Elemente in zu hohen Konzentrationen zwar toxisch auf die Methanbakterien, geringe Mindestmengen werden aber als Nahrungsgrundlage benötigt. Werden durch zu hohe Konzentrationen an Sulfat oder Sulfid zu viele Spurenelemente chemisch gebunden, führt dies zu einer Unterernährung der Methanbakterien und somit zu einer Verringerung ihrer

Abbauleistung (Finsterwalder, 2011, mündl.). Die Mindestanforderungen an Spurenelementen sind im Anhang A zu finden.

Die meisten der in den organischen Substanzen enthaltenen Schwefelverbindungen und das im Abwasser befindliche Sulfat (SO_4^{2-}), werden im Faulturm der Kläranlage zu Schwefelwasserstoff (H_2S) reduziert. Die Menge des hier gebildeten Schwefelwasserstoffes ist abhängig vom pH-Wert. Je niedriger der pH-Wert, desto höher ist der Gehalt an Schwefelwasserstoff. Schwefel in Form von Schwefelwasserstoff wirkt sich auf zwei Weisen schädlich auf den Abbauprozess aus. Zum einen wirkt er toxisch auf die Methanbakterien und zum anderen bewirkt er in hohen Konzentrationen ein Anwachsen der sog. Desulfurikanten. Desulfurikanten sind Bakterien, die Wasserstoff und Essigsäure verwerten. Sie sind also Nahrungskonkurrenten der Methanbakterien (Schmelz S. 29, 2000).

Eine Hemmung bzw. Verringerung der Methanbakterien bewirkt aber, dass sich organische Säuren anreichern, was einen Abfall des pH-Wertes zur Folge hat²⁴. Dies bedeutet wiederum einen weiteren Anstieg des H_2S -Gehalts. Mit einer H_2S -bedingten Hemmung wird also ein sich selbst verstärkender Hemmungsprozess in Gang gesetzt, der rasch zum Umkippen²⁵ des Faulturms führen kann. Abbildung 5.4.3 zeigt dies in schematischer Form.

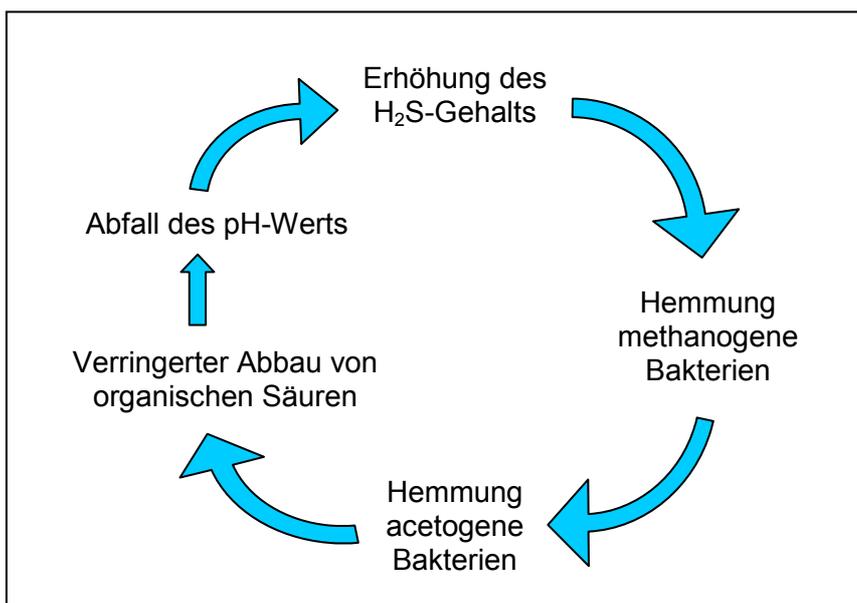


Abbildung 5.4.3: Auswirkung von Schwefelwasserstoff (H_2S) auf die Faulturmbiologie

Eine Hemmung der Methanbakterien tritt ab einer H_2S -Konzentration von 2% im Faulgas ein. Toxisch wirkt der Schwefelwasserstoff ab 8%. Wird eine erhöhte H_2S -Konzentration festgestellt, muss unverzüglich gehandelt werden. Mögliche Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der H_2S -Konzentration (Anaerobtechnik S.72ff, 2004):

²⁴ Eine Hemmung der Methanbakterien ist immer mit einer Hemmung der acetogenen Bakterien gekoppelt. Die acetogenen Bakterien können dann die organischen Säuren nicht mehr ausreichend abbauen. Weiterführende Erläuterung: Siehe Kapitel 6.1

²⁵ Umkippen: Umgangssprachlich für das Absterben der Faulturmbiologie.

- Zugabe von Eisensalzen wie Eisen-III-Chlorid zur H₂S-Fällung
- Erhöhung des pH-Wertes im Faulturm
- Rücknahme der Substratzufuhr zur Steigerung der Abbauleistung
- Verdünnung mit sulfatfreiem bzw. sulfatarmen Wasser oder Abwasser

5.4.4 Schwermetalle

Schwermetalle lagern sich im Klärschlamm an und werden in geringem Maße von den Bakterien als Nahrung benötigt. Sie können in zu hohen Konzentrationen aber den Stoffwechsel der Bakterien im Faulturm hemmen. Auf kommunalen Kläranlagen ist die Konzentration jedoch meist gering. Stellen sie jedoch trotzdem ein Problem dar, so können Kupfer (Cu), Cadmium (Cd), Zink (Zn), Nickel (Ni) und Blei (Pb) durch die Zugabe von Sulfat (SO₄²⁻) oder Sulfit (SO₃²⁻) gefällt werden. Sie bilden so schwer lösliche Metallsulfide, die auf die Bakterien nicht toxisch wirken. Chrom (Cr) kann auf diese Weise nicht gefällt werden und ist gesondert zu behandeln (Anaerobtechnik S.83, 2004). Bei der Zugabe von Sulfat oder Sulfit ist aber darauf zu achten, dass sich die Schwefelwasserstoffkonzentration im Faulturm erhöhen wird. Sind erhöhte Schwermetallkonzentrationen auf die Zugabe von Kosubstraten zurückzuführen, sollten deshalb andere Kosubstrate in Betracht gezogen werden. In der Regel führt die Zugabe von Kosubstraten aber eher zu einer Unterernährung der Bakterien, da mit den Kosubstraten auch die oben genannten Schwefelverbindungen in den Faulturm eingebracht werden, welche die Schwermetalle chemisch binden.

Die Mindestanforderungen an Schwermetallen sind im Anhang A zu finden. Eine Tabelle mit den Grenzwerten hinsichtlich der hemmenden und toxischen Wirkung der Schwermetalle befindet sich im Anhang B.

6 Kofermentation in der Praxis

Ziel dieser Arbeit ist es, Kläranlagenbetreibern praxisnahe Informationen, Hinweise und Erfahrungen über eine gewinnbringende Realisierung des Kofermentationsprozesses mitzuteilen. Zu diesem Zweck wurde neben den Literaturrecherchen auch eine Umfrage durchgeführt. In dieser Umfrage wurden Kläranlagenbetreiber, die die Kofermentation bereits realisiert haben, über ihre Erfahrungen und Erkenntnisse auf diesem Gebiet befragt. Um möglichst systematisch an relevante Informationen zu kommen, erfolgte die Umfrage über einen Fragenkatalog (siehe Anhang C). Zur Wahrung von Betriebsgeheimnissen werden die ausgefüllten Fragenkataloge nicht als Ganzes veröffentlicht. Alle für diese Arbeit relevanten Informationen sind im Fließtext eingebunden und als mündliche Quelle der jeweiligen Kläranlage gekennzeichnet.

Um einen Überblick zu erhalten, welche bayerischen Kläranlagen bereits Kofermentation betreiben, wurde eine Liste des bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) verwendet. Diese Liste erhebt allerdings keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit aller Angaben. Insgesamt wurden mit ihr zehn Kläranlagen ausfindig gemacht, die bei der Vergärung zusätzlich Kosubstrate verwenden. Bei fünf von ihnen fand die Befragung in einem Interview statt, bei zwei per E-Mail. Weitere zwei Kläranlagen antworteten nicht auf den geschickten Fragenkatalog. Die Kläranlage Garching a. d. Alz konnte nicht berücksichtigt werden, da sie sich noch in der Testphase befindet. Insgesamt konnte die Umfrage also bei sieben Kläranlagen durchgeführt werden. Sie sind in Tabelle 6 aufgeführt und nach dem Anteil an Kosubstraten an der gesamten Beschickungsmenge sortiert (Kosubstrat + Primärschlamm + Überschussschlamm).

Abbildung 6 zeigt die Lage der zehn Kläranlagen in Bayern, die bereits Kofermentation betreiben.

| Kläranlage | Anteil an Kosubstraten [Vol.- %] | Einwohnergleichwerte |
|--------------|-------------------------------------|----------------------|
| Straubing | 50 | 200.000 |
| Moosburg | 30,5 | 33.000 |
| Nersingen | 29 | 10.000 |
| Landsberg | 3 | 78.500 |
| Freyung | 1,8 | 11.000 |
| Pfarrkirchen | 1,3 | 50.000 |
| Augsburg | 0,5 | 750.000 |

Tabelle 6: Bayerische Kläranlagen die Kosubstrate verwenden

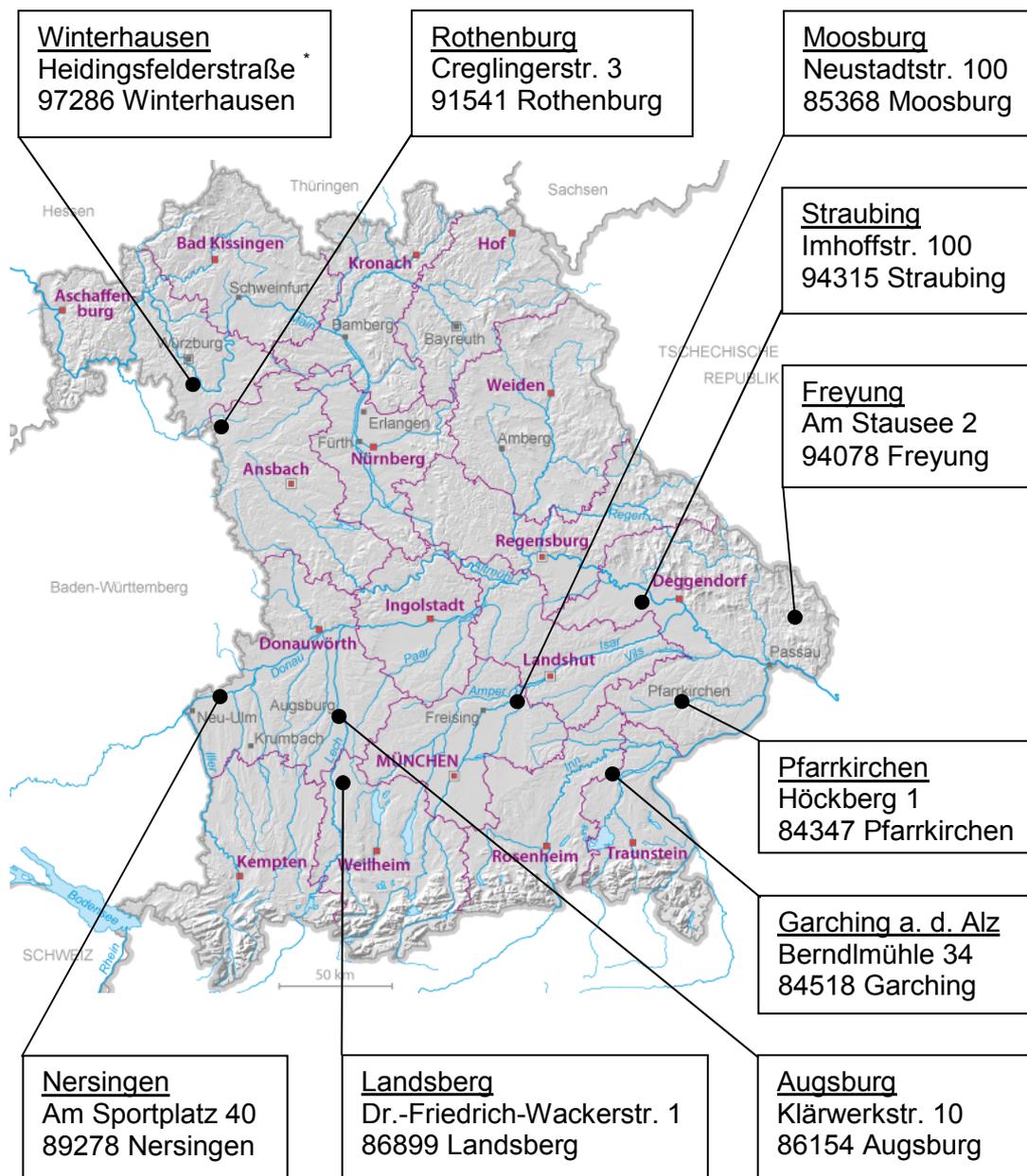


Abbildung 6: Bayerische Kläranlagen die Kosubstrate verwenden (Lfu-Wasser, Website, 2010, modifiziert).

* Die Anschrift der Kläranlage Winterhausen trägt keine Hausnummer.

6.1 Auswirkungen der Substratzusammensetzung

Die in Kapitel 5.1 beschriebenen vier Bakteriengruppen, die im Faulturm für den Abbauprozess verantwortlich sind, bilden untereinander ein sehr empfindliches Gleichgewicht. Die Zugabe von Kosubstraten bedeutet einen massiven Eingriff in die Faulturmbiologie. Für die Kläranlagenbetreiber ist es deshalb äußerst wichtig, die Abbaueigenschaften der Kosubstrate und deren Auswirkungen auf die Faulturmbiologie genau zu kennen, da selbst geringe Störungen der Faulturmbiologie zum raschen Absterben der Bakterien führen können.

Allgemein bieten Kosubstrate den fermentativen Bakterien (2. Phase) ein größeres Nahrungsangebot als Klärschlamm. Dies führt zu einer schnellen Vermehrung der fermentativen Bakterien. Den acetogenen (3. Phase) und methanogenen (4. Phase) Bakterien steht dann zwar natürlich auch mehr Nahrung zur Verfügung, jedoch können sich diese nicht so schnell reproduzieren wie die fermentativen Bakterien (Braun S.7, 1996). Die Verdopplungszeit der methanogenen Bakterien liegt bei etwa sieben Tagen, die der fermentativen Bakterien hingegen bei lediglich einigen Minuten (Finsterwalder, 2010, mündl.). Das führt dazu, dass die organischen Säuren in der zweiten Phase schneller entstehen als sie in der dritten Phase abgebaut werden können. Das Resultat ist ein niedriger pH-Wert (Hofmann, 2010, Energie aus WWB S.6_5, mündl.). Da die methanbildenden Bakterien sehr empfindlich auf niedrige pH-Werte sind, sinkt ihre Anzahl.

Die acetogenen Bakterien sind aber wiederum auf die methanbildenden Bakterien angewiesen, da diese Wasserstoff abbauen, der auf die acetogenen Bakterien wachstumshemmend wirkt (Anaerobtechnik S.99, 2004). D. h. eine Hemmung der methanogenen Bakterien zieht auch eine Hemmung der acetogenen Bakterien mit sich. Mit verringerter Anzahl an acetogenen Bakterien sinkt der pH-Wert weiter, da jetzt noch weniger organische Säuren abgebaut werden. Der Prozess der Versäuerung kann sich also selbst verstärken, bis die Methanbildung vollständig zum Erliegen kommt und der Abbauprozess umkippt (Schröppel S.13, 2002). Abbildung 6.1 zeigt dies in schematischer Form.

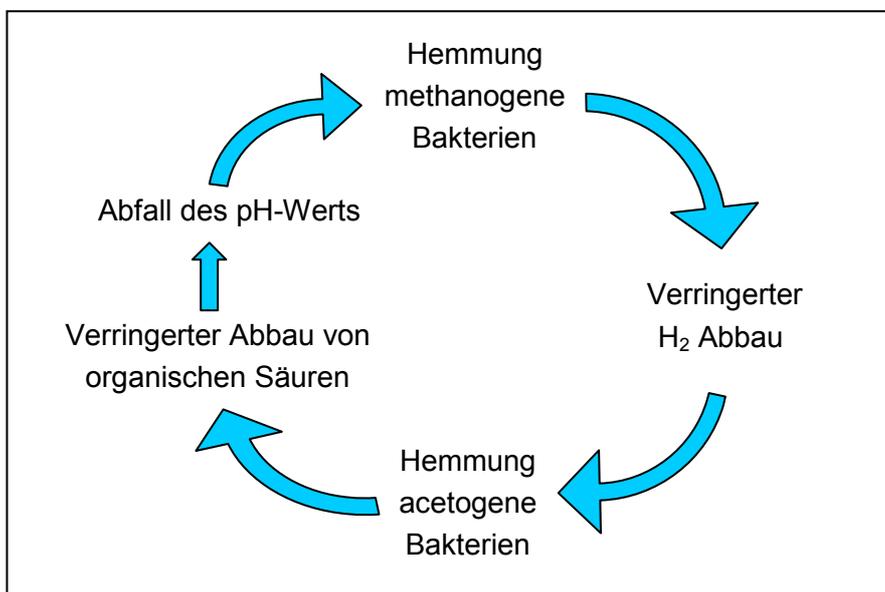


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung des Versäuerungsprozesses

Bei der Zugabe von Kosubstraten muss also darauf geachtet werden, dass der Abbau durch die fermentativen Bakterien nicht zu schnell erfolgt und der Prozess dadurch versäuert. Dies ist der Fall, wenn den Bakterien ein zu großes Nahrungsangebot an leicht abbaubaren Substraten zur Verfügung gestellt wird. Wird ein zu großer Anstieg der Säurenkonzentration beobachtet, muss dem Abfall des pH-Wertes unverzüglich gemäß Kapitel 5.3.1 mit Neutralisationsmitteln entgegengewirkt werden, um den

Versäuerungsprozess zu stoppen. Am größten ist die Gefahr der Versäuerung durch ein Nahrungsüberangebot bei der Zugabe von fetthaltigen Substraten. Organische Stoffe setzen sich aus Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen (Eiweißen) zusammen. Von diesen drei Nährstoffen sind es die Fette, die von den fermentativen Bakterien am leichtesten abgebaut werden können. Folglich werden sie auch am schnellsten abgebaut, was gemäß der vorhergegangenen Erläuterung zu einem hohen Gehalt an organischen Säuren führen kann (Linke S.82ff, 1997).

Der Abbau von Proteinen wiederum führt zu hohen Stickstoffbelastungen, welche sich im Zentratwasser wieder finden und die Stickstoffeliminierung der Kläranlage erheblich belasten können (Finsterwalder UTF2 S.55, 2008). Für den Faulturm bedeutet der Abbau von Proteinen einen hohen Ammoniumgehalt.

Der Abbau von Fetten, Proteinen und Kohlenhydraten führt nicht nur zu unterschiedlichen Belastungen, sondern auch zu unterschiedlichen Gaserträgen. Die spezifischen Gaserträge sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Bei den sieben befragten Kläranlagen hat sich der Methangehalt durch die Mitbehandlung von Kosubstraten nur sehr unwesentlich geändert.

| | Methangehalt CH₄ [Vol.- %] | Kohlendioxid CO₂ [Vol.- %] | Spezifische Gasmenge [Nm ³ / kg oTS _{ab}] | Spezifische Methanmenge [Nm ³ _{CH₄} /kg oTS _{ab}] |
|----------------------|---|---|--|--|
| Fette | 68 | 32 | 1,27 | 0,86 |
| Proteine | 71 | 29 | 0,70 | 0,50 |
| Kohlenhydrate | 50 | 50 | 0,79 | 0,40 |

Tabelle 6.1: Gaszusammensetzungen und spezifische Gasmengen (Schmelz S.27, 2000; modifiziert).

Neben dem natürlichen Nährstoffgehalt der Kosubstrate bzgl. Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen, können Kosubstrate auch Schadstoffe enthalten, die sich auf die Bakterien im Faulturm negativ auswirken.

Kosubstrate aus der industriellen Nahrungsmittelverarbeitung können Probleme mit sich bringen, sofern die Nahrungsmittel bei der Verarbeitung mit schwefelhaltigen Chemikalien aufgeschlossen wurden. Zur Fällung von Backhefe wird beispielsweise oft Magnesiumsulfat verwendet, welches sich auch in den Abfallstoffen wiederfindet. Im Faulturm führt das Sulfat zu einer starken H₂S-Bildung und somit zum Absterben der Methanbakterien (vgl. Kapitel 5.4.3). Eine Analyse des Salzgehaltes kann Aufschluss über eine mögliche Sulfatbelastung der Kosubstrate geben (Hoppenheid, 2010, mündl.).

Es ist ebenfalls zwingend darauf zu achten, dass die Kosubstrate frei von Verunreinigungen sind. Störstoffe wie Knochensplinter, Kunststoffe, Metallteile oder größere Klumpen dürfen nicht unterschätzt werden. Sie können schnell zum Absterben der Bakterien im Faulturm führen und verschleissen zusätzlich Pumpen und ähnliche

Bauteile (Finsterwalder, 2010, mündl.). Zu erheblichen Störungen kann es auch kommen, wenn industrielle Abwässer (z. B. alkoholhaltige Abwässer aus der Lösungsmittelindustrie) mit Antibiotika verunreinigt sind, deren eigentliche Funktion es ist, Bakterien abzutöten (Littmann, Okt. 2010, mündl.).

Die Zusammensetzung der Kosubstrate hat also einen entscheidenden Einfluss auf die Faulturmbiologie. Ist die Zusammensetzung und Menge der Kosubstrate nicht exakt auf die Faulturmbiologie abgestimmt, bzw. überschreitet der Kläranlagenbetreiber die Belastungsgrenzen seiner Faulturmbiologie, wird das sensible Zusammenspiel der Bakteriengruppen im Faulturm unvermeidlich aus dem Gleichgewicht gebracht. Die Folgen sind erhebliche Störungen der Faulturmbiologie bis hin zum vollständigen Erliegen des Faulungsprozesses.

In den folgenden Abschnitten soll beschrieben werden, wie eine Überschreitung der biologischen Belastungsgrenzen möglichst vermieden wird und die Kofermentation in die Praxis umgesetzt werden kann.

6.2 Realisierung eines stabilen Kofermentationsprozesses

Eine der zentralen Fragen hinsichtlich des Einsatzes von Kosubstraten ist es, wie eine ausreichende Prozessstabilität gewährleistet werden kann. Das bedeutet, welche Kosubstrate können in welchen Mengen zugeben werden, ohne dass es durch die oben aufgeführten Prozessstörungen zum Absterben der Bakterien kommt.

Diese entscheidende Frage kann jedoch nicht pauschal beantwortet werden, da sich alle Kläranlagen in ihrer Faulturmbiologie voneinander unterscheiden und im Detail nicht miteinander verglichen werden können.

So kann die genaue Zusammensetzung des Klärschlammes je nach Art und Vielfalt der angebundenen Industrie stark variieren, was die Schwermetallbelastung, den Nährstoffeintrag und die Stickstofffracht im Zulauf und somit auch im Faulturm betrifft. Auch die Höhe der Schwermetallbelastung in den umliegenden Ackerböden hat letztlich Auswirkungen auf die Kläranlage. Zudem besitzt jede Kläranlage andere Verfahrenstechniken in der Abwasserreinigung, andere Rührtechniken im Faulturm und unterschiedliche Beheizungs- und Beschickungssysteme der Faultürme. Auch die Faulturmvolumina unterscheiden sich deutlich voneinander, was unterschiedliche Temperaturverteilungen in den Faultürmen zur Folge hat.

Dies alles führt dazu, dass jeder Faulturm in seiner genauen Biologie einzigartig ist. Das heißt auch Kläranlagen ohne Kofermentation unterscheiden sich deutlich bzgl. Pufferkapazität, Kalkreserven und den Konzentrationen an organischen Säuren, Schwermetallen, Stickstoff und Schwefelwasserstoff. Folglich unterscheiden sich auch die oben erwähnten biologischen Belastungsgrenzen von Kläranlage zu Kläranlage. Die Frage, wie hoch die Belastung an organischen Säuren oder Schwermetallen durch Kosubstrate noch gesteigert werden kann, bevor eine Hemmung der Bakterien eintritt, kann also pauschal nicht beantwortet werden.

Hinzu kommt noch, dass die Kosubstrate in ihrer Beschaffenheit auch erheblichen Schwankungen unterliegen. Auch gleichartige Kosubstrate, beispielsweise Fettabscheiderinhalte aus zwei verschiedenen Bezugsquellen, können sich bzgl. Trockenrückstand und Nährstoffzusammensetzung (Kohlenhydrate, Fette, Proteine) stark unterscheiden, was natürlich Einfluss auf die Abbaueigenschaften und Abbauprodukte und somit auch auf die Prozessstabilität haben kann.

Mit anderen Worten: Die Unterschiedlichkeit der Faulturmbiologien hat zur Folge, dass Erfahrungen über die Art und Menge der eingesetzten Kosubstrate einer Kläranlage K1 nicht analog auf eine andere Kläranlage K2 übertragen werden können. Geschieht dies trotzdem, so werden die Bakterien im Faulturm der Kläranlage K2 mit großer Wahrscheinlichkeit absterben, da die Art und Menge der Kosubstrate nicht speziell auf die Faulturmbiologie der Kläranlage K2 eingestellt wurde (Finsterwalder, 2010, mündl.).

6.2.1 Substratanalysen

Um nun zu ermitteln, ob und in welchen Mengen ein Substrat zur Kofermentation eingesetzt werden kann, muss es also getestet werden. Bevor man mit Gärversuchen beginnt, können Substratanalysen schon erste Auskünfte liefern.

- Eine Salzanalyse kann Aufschluss über den Sulfatgehalt geben und damit ein mögliches H₂S-Problem verhindern (vgl. Kapitel 5.4.3).
- Sind die Stickstoff- und Phosphorgehalte im Faulturm oder im Ablaufwasser ohnehin schon sehr hoch, so können über die Bestimmung dieser Parameter ebenfalls schon mögliche Kosubstrate ausgeschlossen werden. Gleiches gilt für Schwermetalle wie Cr, Cu, Hg, Ni, Pb und Zn.

6.2.2 Gärversuche

Substratanalysen können erste Eindrücke über die Substrate vermitteln und dienen der Vorauswahl. Eine verlässliche Aussage, ob ein Substrat zur Kofermentation geeignet ist, kann aber nur nach einigen Gärversuchen im Labormaßstab getroffen werden. Bei einem Gärversuch wird das zu untersuchende Kosubstrat gemeinsam mit Klärschlamm aus der eigenen Kläranlage in einem kleinen Faulbehälter vergoren. Auf diese Weise können erste Eindrücke über die Gasmenge und Gaszusammensetzung des Kosubstrats gewonnen werden. Ebenso kann der Abbaugrad, das Abbauverhalten und die ideale Faulzeit ermittelt werden. Es kann auch festgestellt werden, ob sich ein Substrat beim Abbau hemmend oder gar toxisch auf die Faulturmbiologie auswirkt (Schmack, Website, 2011). Die Beschickung im Gärversuch sollte nach Möglichkeit kontinuierlich erfolgen. Dies ist zwar kostenintensiver als eine stoßartige Beschickung, liefert aber realistischere Messwerte (Finsterwalder, 2011, mündl.). Sind auf der Kläranlage entsprechende Einrichtungen nicht vorhanden, so können Gärversuche und Substratanalysen auch von externen Instituten wie dem „BifA Umweltinstitut“ in Augsburg durchgeführt werden (Hoppenheid, 2010, mündl.).

Faultürme sind für Versuchszwecke gänzlich ungeeignet, da die Zugabe von unbekanntem Substraten mit nicht geringer Wahrscheinlichkeit zum Umkippen der Faulturmbiologie führen kann. Da der biologische Abbau im Faulturm ein zeitintensiver Prozess ist, treten Anzeichen von Störungen der Faulturmbiologie erst zeitlich verzögert auf. In vielen Fällen kann dann nicht mehr rechtzeitig reagiert werden (Finsterwalder, 2011, mündl.). Die Zugabe von Kosubstraten in den Faulturm sollte aus diesem Grund ausschließlich erst nach Gärversuchen erfolgen.

6.2.3 Anlaufphase

Auch nach positiv verlaufenen Gärversuchen ist bei der Zugabe von Kosubstraten in den Faulturm größte Vorsicht geboten. Auch wenn Kosubstrate im Gärversuch keine direkte Hemmung der Faulturmbiologie verursachen, so stellt die Kofermentation trotzdem eine erhebliche biologische Zusatzbelastung dar, für die Faultürme nicht dimensioniert wurden. Des Weiteren kann anhand eines Gärversuches die Gefahr einer möglichen Versäuerung durch ein Überangebot an leicht abbaubaren Substraten unter Umständen nicht ausreichend bemessen werden. Die Zugabe von Kosubstraten in den Faulturm sollte deshalb zunächst nur mit geringen Mengen erfolgen und dann bei positivem Vorlauf langsam gesteigert werden. Zu große Sprünge in der Substratzugabe bedeuten für die Faulturmbiologie eine große Umstellung und somit auch eine große Belastung (Schröppel S.13, 2002). Dies kann auch bei bereits erprobten Kosubstraten zu Störungen führen und ist daher unbedingt zu vermeiden. Des Weiteren ist es im Falle von plötzlichen störstoffbedingten Problemen natürlich von Vorteil, wenn das auslösende Kosubstrat nur in möglichst geringen Mengen eingebracht wurde. Die Beschickung sollte möglichst in gleichmäßigen Intervallen erfolgen, um die Bakterien gleichmäßig zu belasten. Häufige und schnelle Wechsel der Kosubstrate wirken sich negativ auf die Bakterien im Faulturm aus (Schröppel S.12, 2002). Auch sollte eine Testphase mit einer bestimmten Menge an Kosubstraten nicht zu kurz andauern, damit sich die Bakterien auf die neuen Umstände einstellen können und sich entsprechend vermehren können. Auf diese Weise erhält man eine breite Basis an Messwerten und nicht nur Werte von Bakterien in einer „gestressten Umstellungsphase“.

Während der Testphase müssen kritische Parameter (siehe Kapitel 6.2.4) verstärkt gemessen und überwacht werden. Im Falle einer Störung kann so evtl. rechtzeitig eingegriffen werden.

Die Verwendung mehrerer verschiedener Kosubstrate hat oft positive Auswirkungen auf den biologischen Abbauprozess. Bakterien bevorzugen ein breites Nahrungsspektrum und können bei einer ausgewogenen Ernährung am effizientesten arbeiten. Auch die ungleichmäßige Zusammensetzung mancher Abfallstoffe spricht für einen Mix aus mehreren Kosubstraten. Einseitig zusammengesetzte Substrate, wie Altfett (Mangel an Stickstoff) oder Speiseabfälle (Überschuss an Stickstoff), lassen sich unter Umständen nicht zufriedenstellend vergären. Werden diese Substrate gemeinsam vergoren, gleichen sich die Stickstoffgehalte aus und es kann eine höhere Gasausbeute erzielt werden (Kofermentation S.24, 1998). Sollen auf einer Kläranlage

mehrere Kosubstrate verwendet werden, so müssen diese auch im Gärversuch gemeinsam getestet werden.

Um einen maximalen Gasertrag zu erzielen sollte, neben der Art und Menge an Kosubstraten, auch eine optimale Verfahrenstechnik hinsichtlich den Beschickungsintervallen, der Faulraumtemperatur und der Umwälzung erprobt werden.

Die Kläranlage Straubing beschickt ihre Faultürme heute täglich mit etwa 140 m³ Klärschlamm und der gleichen Menge an Kosubstraten. Dies war nach einer ca. einjährigen Anlaufphase mit ständiger Steigerung der Substratmenge möglich (Buchmeier, 2010, mündl.).

Auf der Kläranlage Moosburg erfolgte die richtige Einstellung der Kosubstrate mit Hilfe des Simulationsprogramms „BIOTIP“ der Firma „Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG“. Nach der Eingabe einiger Kenngrößen der Kosubstrate und der Verfahrenstechnik des Faulturms ist dieses Programm in der Lage, den Gärungsprozess im Faulturm zu simulieren. Zeigen sich in der Simulation Störungen im Abbauprozess, so kann diesen mit einer Anpassung der Substratzufuhr rechtzeitig aus dem Weg gegangen werden (BIOTIP S.2, 2005). Die Verwendung eines Simulationsprogramms ist vor allem für Kläranlagen mit nur einem Faulturm vorteilhaft. Da die Faulversuche bei einer Simulation im Computer erfolgen, wird somit das Risiko einer Störung im Faulturm erheblich verringert. Treten im Faulturm während der Anlaufphase Störungen auf, die zum Erliegen des Faulungsprozesses führen, so können Kläranlagen mit mehreren Faultürmen den anfallenden Klärschlamm aus der Abwasserreinigung auf intakte Faultürme verteilen. Der Faulungsprozess im ersten Faulturm muss anschließend neu gestartet werden, was einige Zeit in Anspruch nimmt. Für Kläranlagen mit nur einem Faulturm bedeutet dies einen erheblichen finanziellen Schaden, da sie den anfallenden Klärschlamm in dieser Zeit anderweitig entsorgen müssen.

Für eine Simulation mit „BIOTIP“ werden von den Kläranlagenbetreibern folgende Informationen über ihre Kosubstrate benötigt:

- TS-Gehalt
- oTS-Gehalt
- oTSv-Gehalt
- Prozentuale Zusammensetzung der Kosubstrate bzgl. Proteine, Kohlenhydrate und Fette

Für den letzten Punkt konnten im Rahmen dieser Arbeit keine Literaturangaben für relevante Kosubstrate ausfindig gemacht werden. Die Finsterwalder Umwelttechnik GmbH verfügt jedoch über eine Datenbank, in der diese Zusammensetzungen für einige gängige Kosubstrate bereits bestimmt wurden. Ist die Zusammensetzung nicht bekannt, muss das Substrat einer Analyse unterzogen werden.

Mit den Ergebnissen aus dieser Simulation ist ein sicherer Faulungsprozess möglich, sofern die Art und Menge der zugegebenen Kosubstrate nicht eigenmächtig variiert

wird. Das bedeutet, es ist auch auf Schwankungen des TS-Gehalts der Kosubstrate zu achten. Steigt der TS-Gehalt eines Kosubstrats, sollte es in entsprechend geringeren Mengen zugegeben werden, um den Faulturn immer mit der gleichen Menge an organischem Material zu belasten.

Die Kosten für eine Zusammenarbeit mit der Finsterwalder Umwelttechnik GmbH belaufen sich je nach Anlagengröße auf ca. 300 Euro – 500 Euro pro Monat (inkl. Betreuung bei Störfällen) (Finsterwalder, 2010, mündl.).

6.2.4 Wichtige zu überwachende Parameter

Das wichtigste Kriterium bei der Kofermentation ist die Sicherheit des Faulturns. Um ein Umkippen des Faulturns zu verhindern, ist es deshalb notwendig den Gärungsprozess ständig zu überwachen, um bei Störungen der Prozessstabilität rechtzeitig reagieren zu können. Um die Stabilität der Faulturnbiologie beurteilen zu können, sollten die im Folgenden aufgeführten Parameter ständig überwacht werden.

6.2.4.1 pH-Wert

Da die Faulturnbiologie ganz entscheidend vom pH-Wert abhängig ist, sollte dieser auch täglich gemessen werden. Wegen der Pufferkapazität des Frischschlammes treten Schwankungen des pH-Wertes aber oft erst zeitlich verzögert ein, nachdem Störungen der Faulturnbiologie evtl. längst begonnen haben. Um eine mögliche Versäuerung so früh wie möglich zu bemerken, ist es deshalb ratsam, auch folgende Parameter zu überwachen (Leitfaden S.1, 2004):

- Wasserstoff (H₂)
 - Organische Säuren
 - Gasertrag
 - Kalkreserven
 - Kohlenstoffdioxid (CO₂)
- } Gesundheitszustand der Methanbakterien

Ein zu niedriger pH-Wert ist die Folge erhöhter Konzentrationen organischer Säuren. Diese Konzentrationserhöhung wiederum ist in der Regel durch eine Hemmung der Methanbakterien bedingt, welche meist auf ein Überangebot an leicht abbaubaren Kosubstraten zurückzuführen ist (vgl. Kapitel 6.1). Sie kann aber auch durch eine Schwefelwasserstoff-, Ammoniak- oder Antibiotikavergiftung hervorgerufen werden. In jedem Fall aber deutet eine Verschlechterung des Gesundheitszustandes der Methanbakterien auf einen baldigen Abfall des pH-Wertes hin. Für die Beurteilung des Gesundheitszustandes der Methanbakterien können der Wasserstoffgehalt, der Gehalt an organischen Säuren und der Gasertrag dienen.

Erhöht sich der Wasserstoffgehalt im Faulturn, kann davon ausgegangen werden, dass eine Hemmung der Methanbakterien vorliegt, da diese für den Abbau des Wasserstoffes zuständig sind. Ein hoher Gehalt an organischen Säuren bedeutet eine Hemmung der acetogenen Bakterien (zuständig für den Abbau von organischen

Säuren), welche mit einer Hemmung der Methanbakterien einhergeht (vgl. Kapitel 6.1). Die Verringerung des Gasertrages oder des Methangehalts ist ebenfalls ein Zeichen einer Hemmung der Methanbakterien, da dies bedeutet, dass die Methanbakterien nicht mehr optimal arbeiten.

Schwankungen der Kalkreserven und des CO₂-Gehalts deuten auf eine Veränderung der Pufferkapazität hin und sind somit ebenfalls erste Anzeichen für eine kritische Veränderung der Faulturmbiologie (Leitfaden S.1, 2004).

Die Konzentration an organischen Säuren, die Pufferkapazität und der pH-Wert sollten allerdings immer im Zusammenhang betrachtet werden. Es ist normal, dass die Konzentration von organischen Säuren nach der Zugabe von Kosubstraten ansteigt. Steigen gleichzeitig auch die Pufferkapazität und der pH-Wert an, so kann von einem stabilen Abbauprozess ausgegangen werden (Finsterwalder UTF1 S. 79, 2007).

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Zugabe von Kosubstraten durchaus auch zu einer Erhöhung des pH-Wertes führen kann (Buchmeier, 2010, mündl.). Dies ist z. B. der Fall, wenn durch proteinhaltige Substrate die Ammoniumkonzentration im Faulturm stark ansteigt, die Konzentration an Ammoniak aber noch keine Hemmung der Methanbakterien verursacht. Das Ammonium führt dann zu einer Erhöhung des pH-Wertes (Dries S.3, 2002). Ein Anstieg des pH-Wertes auf über 7,5 sollte vermieden werden (vgl. Kapitel 5.3.1).

6.2.4.2 Ammonium

Eine häufige Ursache für Hemmung des Bakterienwachstums ist eine zu hohe Stickstoffkonzentration (Finsterwalder UTF2 S.61, 2008). Dies gilt insbesondere für den in Form von Ammoniak vorliegenden Stickstoff. Um gemäß Kapitel 5.3.4 auf eine Hemmung durch Ammoniak schließen zu können, sollte regelmäßig der Ammoniumgehalt im Faulturm gemessen werden. Stickstoffverbindungen werden vor allem durch Substrate mit hohem Proteinanteil in den Faulturm eingebracht. Auf der Kläranlage Straubing hat sich der Ammoniumgehalt (in mg/l) im Faulturm fast verdoppelt, nachdem der Kosubstratanteil auf 50% gesteigert wurde (Buchmeier, 2010, mündl.). Der Absolutwert hat sich demzufolge vervierfacht. Repräsentative Messwerte anderer Kläranlagen liegen nicht vor.

6.2.4.3 Schwermetalle

Da sich der Gehalt an Schwermetallen im Faulturm durch die Zugabe von Kosubstraten erhöhen kann (Hofmann, Nov. 2010, mündl.), sollte er in der Anlaufphase regelmäßig überprüft werden um eine hemmende Wirkung auf die Bakterien oder einen zusätzlichen Schadstoffeintrag auszuschließen. Auch zu niedrige Schwermetallkonzentrationen gilt es zu vermeiden (vgl. Kapitel 5.4.4).

Fünf der sieben befragten Kläranlagen machten die Angabe, keine Störungen durch zu hohe oder zu niedrige Schwermetallkonzentrationen zu haben. Die Kläranlage Augsburg hatte dabei jedoch mögliche Kosubstrate aufgrund ihres hohen Schwermetallanteils, und den damit verbundenen Schadstoffeintrag, im Vorfeld

ausgeschlossen. Die anderen beiden Kläranlagen konnten über die Schwermetallbelastung keine Auskunft geben.

6.2.4.4 Schwefelwasserstoff

Schwefelwasserstoff im Faulturm kann sehr schnell zum Absinken des pH-Wertes und somit zum Absterben der Faulturbio­logie führen (vgl. Kapitel 5.4.3). Des Weiteren wirkt sich Schwefelwasserstoff im Faulgas korrosiv auf das BHKW aus und ist schon in sehr geringen Mengen schädlich für Brennstoffzellen (Wiegand S.65, 2008). Erhöhte Schwefelwasserstoffgehalte im Faulturm sind in der Regel durch sulfathaltige Substrate bedingt (Hoppenheid, 2010, mündl.). Eine genaue Überwachung des H₂S-Gehalts ist deshalb besonders in der Anlaufphase äußerst wichtig.

6.3 Diskussion möglicher Kosubstrate

Im Folgenden Abschnitt soll auf die Eignung möglicher Substrate für die Kofermentation eingegangen werden. Es werden Substrate behandelt, die in der Industrie oder im Gewerbe als Abfallstoffe anfallen und sich prinzipiell zur Kofermentation eignen, d. h. organischer Natur sind und einen TR-Gehalt von maximal 20% aufweisen. Ligninhaltige Stoffe wurden vernachlässigt. Ist bei Substraten der zu erwartende Gasertrag nicht bekannt, ist es wichtig auf einen hohen oTR-Gehalt zu achten, da dieser maßgeblich für den Gasertrag ist. Bei niedrigen Gaserträgen ist der Grundsatz der Abfallverwertung nicht mehr gegeben. Die Behandlung entsprechender Substrate wird als Abfallbeseitigung angesehen und ist somit für Kofermentationsanlagen unzulässig (vgl. Kapitel 3.2)

In Tabelle 6.3a werden Kosubstrate vorgestellt, die auf den sieben befragten Kläranlagen zum Einsatz kommen. Da zu diesen Kosubstraten Praxiserfahrungen vorliegen, können Aussagen über ihre Eigenschaften, Anfallorte, Probleme und Risiken getroffen werden. Die Gaserträge der jeweiligen Kosubstrate sind in Tabelle 6.3b zu finden. Über sie kann in Tabelle 6.3a keine Aussage getroffen werden, da:

- in der Regel mehrere Kosubstrate zugegeben werden, die unterschiedliche Abbaugrade und Zusammensetzungen aufweisen. Auch ist die prozentuale Aufteilung dieser Kosubstrate nicht bekannt, bzw. schwankt je nach Anlieferung. Die Gaserträge können somit nicht auf die einzelnen Kosubstrate zurückgerechnet werden.
- die TR-Gehalte der zugegebenen Kosubstrate sehr stark schwanken. Gaserträge können aber immer nur im Zusammenhang mit dem jeweiligen TR-Gehalt des Kosubstrats angegeben werden, da eine Verdoppelung des TR-Gehalts auch eine Verdoppelung des Gasertrages bedeuten würde (vorausgesetzt der Abbaugrad bleibt konstant).
- die Anzahl der an die Kläranlagen angeschlossenen Häuser und Industrie ständig schwankt und nur bei fünf der sieben befragten Kläranlagen die

Menge an Kosubstraten bei über 3% liegt. Vorher-Nachher-Vergleiche des Gasertrages sind somit nur sehr schwer zu errechnen.

Tabelle 6.3b enthält ausschließlich Literaturangaben über die stofflichen Eigenschaften der Kosubstrate. Es sind übliche TR- und oTR-Gehalte der jeweiligen Kosubstrate aufgeführt, sowie deren Gasertrag und Methananteil. Des Weiteren gibt die Tabelle einen Überblick über die Konzentrationen an Schwermetallen, Gesamtstickstoff, Stickstoff in Form von Ammonium (NH_4^+) und Phosphor in Form von Phosphorpentoxid (P_2O_5). Die zum Teil erheblichen Schwankungen der angegebenen Kenngrößen sind dadurch bedingt, dass sich auch gleichartige Kosubstrate je nach Herkunft in ihrer Beschaffenheit (TR-Gehalt, Nährstoffzusammensetzung und Abbaueigenschaften) voneinander unterscheiden können. Ebenfalls aufgeführt ist das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C/N-Verhältnis). Aus dem C/N-Verhältnis lässt sich auf die Eignung zum anaeroben Abbau schließen (Reipa S.36, 2003). Bei einem zu hohen Kohlenstoffgehalt zeigen die Methanbakterien nicht ihre maximale Abbauleistung. Bei zu hohen Stickstoffgehalten steigt auch der Stickstoffgehalt im Faulturn. In der Literatur werden optimale Werte von C/N = 20 angegeben (Braun S.15, 1996). Jedoch schwanken diese Angaben je nach Literaturquelle stark. Da in Faultürmen von Kläranlagen ohnehin sehr hohe Stickstoffkonzentrationen vorherrschen, können hohe C/N-Verhältnisse bei den Kosubstraten in der Regel nicht schaden. In der letzten Spalte sind für einige Substrate außerdem noch die Abfallschlüsselnummern nach dem europäischen Abfallkatalog (EAK) aufgelistet.

In Tabelle 6.3c sind weitere mögliche Kosubstrate aufgelistet, für die jedoch keine Kennzahlen ausfindig gemacht werden konnten. Da auch die Angabe des TR-Gehalts fehlt, ist zu beachten, dass dieser durchaus über 20% liegen kann. In diesem Fall ist eine Aufbereitung in eine pumpfähige Form nötig (siehe Kapitel 6.4.6).

Gülle wurde als Kosubstrat nicht berücksichtigt, da der Gasertrag vergleichsweise niedrig ist (200 – 400 l/kg oTS_{zu} (Kofermentation S.20, 1998)). Außerdem ist ein Erlös für die Annahme von Gülle nicht zu erwarten, da Landwirte in der Regel ihre Gülle kostenfrei auf Ackerflächen ausbringen können.

| Substrat | Beschreibung | Eigenschaften | Anfallort | Risiken und bekannte Probleme |
|--|---|--|---|--|
| Inhalte aus Fettabscheider | Aus Reinigungs- und Abwässern abgetrennte Fette | <ul style="list-style-type: none"> - Hoher Fettanteil - Hoher Gasertrag⁸ - Werden von fünf der sieben befragten Kläranlagen verwendet (meist nicht als einziges Kosubstrat) - Es können auch Fette aus Fettfängen der Kläranlage verwendet werden | <ul style="list-style-type: none"> - Großgaststätten - Metzgereien - Schlachthöfe - Großküchen (Kantinen; Krankenhäuser; Kurkliniken; Schnellimbiss-Restaurants)* | <ul style="list-style-type: none"> - Fetthaltige Substrate können zu Ablagerungen in Rohrleitungen und Pumpen führen (besonders bei hohem Feststoffgehalt). Es empfiehlt sich deshalb eine Erwärmung des Substrats auf ca. 40 °C.¹ - Leicht abbaubar, deshalb Gefahr der Versäuerung.² - Eine von fünf Kläranlagen hatte beim Einsatz von Fettabscheiderinhalten Probleme mit Störstoffen wie Klumpen, Knochen und Kunststoffteilen. Zur Abtrennung dieser Stoffe wurde erfolgreich ein Fangkorb mit Löchern eingerichtet.³ - Schaum- und Schwimmdeckenbildung möglich. Gegen Schwimmdecken können Schraubenschaufler eingesetzt werden, deren Drehrichtung sich umkehren lässt, sodass Schwimmdecken untergemischt werden.⁷ |
| Molkereiabfälle (Laktose und Hemmstoffmilch) | Laktose: Milchzucker Hemmstoffmilch: Mit Antibiotika belastete Milch, die nicht zum Verzehr geeignet ist | <ul style="list-style-type: none"> - Hoher Proteinanteil¹⁰ - Hoher Gasertrag¹⁰ | Molkerei / Käserei | <ul style="list-style-type: none"> - Da Hemmstoffmilch mit einer unbekanntenen Menge an Antibiotika belastet ist, muss sehr genau auf die Dosierung geachtet werden, um die Bakterien im Faulturm nicht abzutöten.¹⁰ |
| Alkohole als organische Lösungsmittel | Lösungsmittel sind Chemikalien, die in der Industrie sehr vielseitig in der Produktion oder Reinigung eingesetzt werden Die folgende Beschreibung gilt nur für die Alkohole Methanol, Ethanol und Glykol. Andere Lösungsmittel können abweichen oder für die Kofermentation gar gänzlich ungeeignet sein. | <ul style="list-style-type: none"> - Abbaugrad nahe zu 100%, da Alkohole ein Zwischenprodukt der Abbaukette im Faulturm sind.⁹ - Geringe Rückbelastung, da sehr hoher Abbaugrad.⁹ - Niedriger Methangehalt da Alkohole aus Kohlenhydrate bestehen.¹¹ | Großindustrie die Lösungsmittel zu Produktions- oder Reinigungszwecken verwendet | <ul style="list-style-type: none"> - Da es sich um flüssige Abfälle aus der Industrie handelt, besteht die Gefahr einer Verunreinigung durch Schadstoffe. Deshalb ist eine entsprechende analytische Überwachung erforderlich.⁹ - Zur Substratspeicherung werden wegen der leichten Entflammbarkeit von Alkoholen spezielle explosionsgeschützte Speicher benötigt.⁹ - In Lösungsmitteln aus der Kosmetikindustrie können sog. Siloxane enthalten sein. Siloxane sind Siliziumverbindungen die im BHKW zu Quarz verbrennen und somit zu erheblichen Verschleißproblemen führen. Siloxane lassen sich jedoch mit Aktivkohlefiltern herausfiltern.⁹ |

Tabelle 6.3a Teil 1/2: Eigenschaften getesteter Kosubstrate

Quellenangaben: ¹⁾ Buchmeier, 2010, mündl. ²⁾ Linke S.82ff, 1997. ³⁾ Vogel, 2010, mündl. ⁴⁾ Kofermentation S.24, 1998. ⁵⁾ Wikipedia 2010, Weinherstellung. ⁶⁾ Finsterwalder UTF2 S.59, 2008. ⁷⁾ KA-Wasserwirtschaft S.1449, 2001. ⁸⁾ Kofermentation S.20, 1998. ⁹⁾ Neupert, 2010, mündl. ¹⁰⁾ Littmann, Jan. 2011, mündl. ¹¹⁾ Finsterwalder, 2010, mündl.

| Substrat | Beschreibung | Eigenschaften | Anfallort | Risiken und bekannte Probleme |
|----------------|---|---|--|--|
| Speisereste | Nicht verzehrte Nahrungsmittel | - Müssen aufbereitet werden (flüssige Form und frei von Klumpen, Knochen und Metall- oder Kunststoffteilen) - Hoher Proteingehalt ⁴ | - Großgaststätten - Großküchen (Kantinen; Krankenhäuser; Kurkliniken; Schnellimbiss-Restaurants)* | Gefahr von Störstoffen wie Klumpen, Knochen, Kunststoffen, Glas, Keramik, Sand oder Metallteilen (Besteck). |
| Flotatfette | Fetthaltige Reststoffe und Rückstände aus Schlachtbetrieben | - Hoher Fettanteil - Hoher Gasertrag ⁸ | Schlachthöfe | Können unter Umständen Knochen oder Metallteile enthalten. Die Kläranlage Straubing verfügt deshalb über einen Metallabscheider und eine Zerkleinerungseinheit um Knochen zu zerkleinern. ¹ |
| Heferückstände | Abpresswasser aus der Hefeproduktion und hefehaltige Abwässer | - Hoher Proteingehalt ⁶ | - Winzerbetriebe ⁵ - Hefeindustrie - Brauereien - Backwarenindustrie | In einer Simulation eines Gärungsprozesses führten Rückstände aus der Hefeproduktion zu einer gefährlich hohen H ₂ S-Produktion. ⁶ Dies ist vermutlich auf einen hohen Sulfatgehalt der Heferückstände zurückzuführen. |

Tabelle 6.3a Teil 2/2: Eigenschaften getesteter Kosubstrate

Quellenangaben: ¹⁾ Buchmeier, 2010, mündl. ²⁾ Linke S.82ff, 1997. ³⁾ Vogel, 2010, mündl. ⁴⁾ Kofermentation S.24, 1998. ⁵⁾ Wikipedia 2010, Weinherstellung. ⁶⁾ Finsterwalder UTF2 S.59, 2008. ⁷⁾ KA-Wasserwirtschaft S.1449, 2001. ⁸⁾ Kofermentation S.20, 1998. ⁹⁾ Neupert, 2010, mündl. ¹⁰⁾ Littmann, Jan. 2011, mündl. ¹¹⁾ Finsterwalder, 2010, mündl.

* In der Regel arbeiten solche Betriebe mit Entsorgerfirmen zusammen. In diesem Fall können die Speisereste evtl. über die Entsorgerfirmen beschafft werden.

| Quellen- angabe | Kosubstrat [*] | Anfallort | TR [%] | oTR [% TR] | Gasertrag [l / kg oTR _{zu}] | Methan- gehalt [%] | N _{ges} [% TR] | NH ₄ ⁺ [% TR] | P ₂ O ₅ ^{**} [% TR] | C/N | Cd [mg/kg TR] | Cr [mg/kg TR] | Cu [mg/kg TR] | Hg [mg/kg TR] | Ni [mg/kg TR] | Pb [mg/kg TR] | Zn [mg/kg TR] | EAK-Code |
|--------------------|---|---|-----------|---------------|--|--------------------------|----------------------------|--|---|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|------------------|-------------------|----------|
| ¹ | Klärschlamm (Mischschlamm) | Kläranlage | 3,6 - 7,6 | 50,5 - 65,1 | 525 ² | 60 ² | | | | 9,7 | 2,7 | 57 | 323 | 0,8 | 37 | 115 | 1191 | |
| ¹ | Primärschlamm | Kläranlage | 0,2 - 7,6 | 65,3 - 93,3 | | | | | | | 0,2 | 29 | 350 | 0,4 | 18 | 34 | 570 | |
| ¹ | Überschussschlamm | Kläranlage | 2,3 - 4,1 | 66,0 - 85,2 | | | | | | | < 0,1 | 16 | 330 | 0,5 | 17 | 23 | 590 | |
| | Abfälle aus der Nahrungsmittelproduktion | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ³ | Molke | Käserei | 4,3 - 6,5 | 80 - 92 | 750 ⁵ | 53 ⁵ | 0,7 - 1,5 | 0,14 - 0,3 | 0,8 - 1,8 | 27 | | | | | | | | 020599 |
| ⁵ | Vollmilch | Molkerei | 13 | 95 | 900 | 63 | 4,1 | | 2,2 | | | | | | | | | |
| ² | Molkereiabwasser | Molkerei | 2 | 96 | 700 | 52 | | | | | | | | | | | | |
| ³ | Kollagen | Gelatineherstellung; Metzgerei | 5 - 12 | 97 - 99 | | | 11,8 - 20,9 | 0,41 - 0,84 | 0,02 - 0,04 | | | | | | | | | 020202 |
| ⁷ | Hefeabpresswasser | Brauerei; Hefeindustrie; Winzerei | 5 | | | | | | | | | | | | | | | |
| ⁶ | Masserübe | Futtermittelproduktion; Massentierhaltung | 12 | 75 - 85 | 620 - 850 | 53 - 54 | 1,9 | 0,006 - 0,008 | 0,3 | | | | | | | | | |
| ⁶ | Gehaltsrübe | Futtermittelproduktion; Massentierhaltung | 12 | 75 - 85 | 620 - 850 | 53 - 54 | 1,9 | 0,006 - 0,008 | 0,4 | | | | | | | | | |
| ² | Kartoffelschälabfall (roh) | Kartoffelindustrie; Großgastronomie | 11 | 94 | 656 | 51 | | | | | | | | | | | | |
| ² | Apfeltrester | Getränkeindustrie / Saftindustrie | 22 | 97 | 760 | 53 | | | | | | | | | | | | |
| ⁵ | Obsttrester | Getränkeindustrie / Saftindustrie | 22 | 98 | 520 | 52 | 1,7 | | 0,5 | | | | | | | | | |
| | Organische Reststoffe | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ³ | Fettabscheiderinhalte ^x | Gastronomie | 2 - 70 | 69 - 99 | 600 - 1000 | | 0,1 - 3,6 | 0,02 - 1,5 | 0,1 - 0,6 | 17 ¹ | < 0,3 ¹ | 15,1 ¹ | 42,6 ¹ | 0,1 ¹ | 7 ¹ | 7 ¹ | 93 ¹ | 020204 |
| ³ | Speiseabfälle ^x | Gastronomie | 9 - 37 | 74 - 98 | 500 - 1000 | 45 - 65 | 0,6 - 5,0 | 0,06 - 0,5 | 0,3 - 1,5 | 15 - 21 | < 0,3 ¹ | 3,2 ¹ | 4,8 ¹ | < 0,05 ¹ | 1,9 ¹ | < 3 ¹ | 31,2 ¹ | 200108 |
| ³ | Gemüseabfälle | Lebensmittelgroß- und Einzelhandel | 5 - 20 | 76 - 90 | 400 | | 3 - 5 | | 0,8 | 15 | 0,35 - 0,8 | 2,25 - 8,5 | 5,2 - 12,2 | 0,01 - 0,03 | 3,2 - 8,5 | 1,8 - 4,6 | 85 - 94 | 200302 |
| | Nebenprodukte der Alkoholherstellung | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ³ | Apfelschlempe | Alkoholindustrie / Brennerei | 2 - 3,7 | 94 - 95 | 300 - 650 | 58 - 65 | | | 0,73 | 6 | | | | | | | | 020702 |
| ³ | Kartoffelschlempe | Alkoholindustrie / Brennerei | 6 - 15 | 85 - 95 | 250 - 700 | 58 - 65 | 5 - 13 | | 0,9 | 3 - 9 | | | | | | | | 020702 |
| ³ | Weizenschlempe | Alkoholindustrie / Brennerei | 3 - 8 | 83 - 98 | 430 - 700 | 58 - 65 | 6,0 - 9,9 | | 3,6 - 6,0 | | | | | | | | | 020702 |
| ³ | Melassenschlempe | Alkoholindustrie / Brennerei | 10,5 | 71,2 | | | | | | | | | | | | | | 020702 |
| ³ | Biertreber | Brauerei | 15 - 25 | 66 - 95 | 370 - 750 | | 4 - 5 | | 1,5 | 9 - 10 | 0,1 - 0,25 | 0,5 - 18 | 6 - 15 | 0,03 - 0,04 | 16 - 19 | 1 - 1,5 | 76 - 140 | 020799 |
| ⁴ | Bierhefe | Brauerei | 16 | 94 | 528 | | | | | | | | | | | | | |
| | Nebenprodukte der Stärkeerzeugung | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ⁶ | Kartoffelpülpe (frisch) | Stärkeindustrie | 13 | 90 | 650 - 750 | 52 - 65 | 0,5 - 1 | 0,04 | 0,1 - 0,2 | | | | | | | | | |
| ⁶ | Fruchtwasser (Stärkeindustrie) | Stärkeindustrie | 3,7 | 70 - 75 | 1500 - 2000 | 50 - 60 | 4 - 5 | 0,8 - 1 | 2,5 - 3 | | | | | | | | | |
| ⁶ | Prozesswasser (Stärkeindustrie) | Stärkeindustrie | 1,6 | 65 - 90 | 3000 - 4500 | 50 - 60 | 7 - 8 | 0,6 - 0,8 | 2 - 2,5 | | | | | | | | | |
| | Schlachtrückstände | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ³ | Flotatfett ^x | Schlachthof / Schlachtereier | 5 - 24 | 83 - 98 | 600 - 1200 | 60 - 72 | 3,2 - 8,9 | 0,01 - 0,06 | 0,9 - 3,0 | 66 ¹ | < 0,3 ¹ | 50,9 ¹ | 10,7 ¹ | < 0,05 ¹ | 24,6 ¹ | 3,3 ¹ | 69,9 ¹ | 020204 |
| ³ | Mageninhalt (Schwein) ^x | Schlachthof / Schlachtereier | 12 - 15 | 80 - 84 | 200 - 450 | 60 - 70 | 2,5 - 2,7 | | 1,05 | 17 - 21 | | | 49 - 53 | | | | 163 - 190 | 020299 |
| ³ | Panseninhalt (unbehandelt) ^x | Schlachthof / Schlachtereier | 11 - 19 | 80 - 95 | 200 - 400 | 58 - 62 | 1,3 - 2,2 | 0,4 - 0,7 | 1,1 - 1,6 | 17 - 21 | 2 | 33 | 5 - 99 | | 20 | 20 | 71 - 321 | 020299 |
| ² | Blut ^x | Schlachthof / Schlachtereier | 18 | 96 | 685 | 70 | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 6.3b: Stoffliche Eigenschaften von Kosubstraten quantifiziert.

Quellenangaben: Sofern nicht anders gekennzeichnet, beziehen sich die Quellenangaben immer auf die gesamte Zeile. ¹⁾ Reipa S.38ff, 2003. ²⁾ Archea S.1, 2010. ³⁾ Kofermentation S.20ff, 1998. ⁴⁾ Bekker S. 21ff, 2007. ⁵⁾ Faustzahlen S. 61, 2007. ⁶⁾ Handreichung S. 88ff, 2004. ⁷⁾ Schulz S. 119, 2001.

^x Diese Substrate müssen vor der Behandlung hygienisiert werden, da es sich um tierische Nebenprodukte handelt (vgl. Kapitel 3.4).

^{*} Für nicht gängige Kosubstrate befinden sich in Tabelle 6.3d Produktbeschreibungen.

^{**} P₂O₅: Diphosphorpentoxid: Als Diphosphorpentoxid vorliegendes Phosphor.

| Kosubstrat* | Anfallort |
|--|--|
| Überschuss aus der Futtermittelproduktion ¹ | Futtermittelproduktion Massentierhaltung |
| Verdorbene Feldfrüchte Überproduktion von Obst und Gemüse Unverkäufliches und überlagertes Obst und Gemüse Kartoffel- und Maiskraut ¹ Sortier- und Rüstabgang (Pilze, Gemüse, Früchte, etc.) ⁷ Sauerkrautlake Gewürzgurkenlake Honigabwasser ² | Großverteiler und Handel Lebensmittelgroß- und Einzelhandel Wochen und Privatmärkte Gemüse- und Obstgroßmärkte ¹ Obst- und Gemüseverarbeitung Imkereien ² |
| Fehlchargen aus der Fleischverarbeitung Fleisch- und Fischabfälle ¹ Lake aus der Fischkonservenindustrie Flotate aus der Fischverarbeitung Fischwasser ⁴ | Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetriebe ¹ Fischverarbeitungsbetriebe ⁴ |
| Malztreber Hopfentreber Trub und Schlamm aus Brauereien ¹ Bierhefe ⁴ Kieselgur mit Filtrerrückständen ² Heferückstände Hefeschlempe Melasse Kartoffelstärke Maische ¹ | Mälzereien Brauereien Alkoholdestillation / Brennereien Stärkeindustrie Zuckerfabriken Hefefabriken Backwarenindustrie ¹ |
| Back- und Teigabfälle ³ | Backwarenindustrie ³ |
| Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung/Lebensmittelproduktion Fett- und ölhaltige Schlämme ¹ Papierschlamm ⁷ | Obst-, Gemüse-, Zucker-, Milch-, Back-, Süßwaren- und Getränkeindustrie Speiseöl- und Fettindustrie ¹ Papierindustrie ⁷ |

Tabelle 6.3c Teil 1/2: Weitere mögliche Kosubstrate

| Kosubstrat* | Anfallort |
|--|--|
| Überlagerte Fruchtsäfte ⁴ Apfel-, Obst- und Rebentrester ⁵ Teetreber, Teesatz, Abgänge aus der Produktion von Tee ⁷ Überschusswein/Hefe ² | Getränkeindustrie ⁴ Weinbau ² |
| Fruchtkonzentrat ² | Süßwarenindustrie ² |
| Speise-, Fritier- und Altfett ³ | Großküchen; Kantinen ³ |
| Enteisungslösung von behandelten Flugzeugen ⁷ | Flughafen ⁷ |
| Glycerinphase ³ | Biodieselherstellung ³ |
| Druckpastenreste ² | Textilveredelung ² |
| Chlorfreie Schlämme aus der Lederindustrie ³ | Lederindustrie ³ |
| Rückstände aus der Pharmaindustrie ⁴ | Pharmaindustrie ⁴ |
| Rückstände aus der Kosmetikindustrie ⁶ | Kosmetikindustrie ⁶ |
| Hochlastwasser Produktionswasser der Klebstoffindustrie ² | Chemieindustrie ² |

Tabelle 6.3c Teil 2/2: Weitere mögliche Kosubstrate

Quellenangaben (jeweils nur in der untersten betroffenen Zeile dargestellt): ¹⁾ Schmelz S.5, 2000. ²⁾ KA-Wasserwirtschaft S.1444, 2001. ³⁾ Puchas S.50-59, 2003. ⁴⁾ Schmelz S.67, 2000. ⁵⁾ Kofermentation S.20, 1998. ⁶⁾ Schröppel S.86, 2002. ⁷⁾ Pos.Liste Kompost, Website, 2010

* Für nicht gängige Kosubstrate befinden sich in der folgenden Tabelle Produktbeschreibungen.

| Substrat | Beschreibung |
|------------------|---|
| Druckpastenreste | Betriebsstoffe zur Bedruckung von Textilien (Patents, Website, 2010) |
| Fruchtwasser | Abgepresstes Obst- oder Gemüsewasser |
| Gehaltsrübe | Futterrübenart (Wikipedia 2010, Futterrübe) |
| Glycerinphase | = Rohglycerin (Hauptbestandteile: Seifen, Glycerin, Methanol). (Amon S.3, 2004) |

Tabelle 6.3d Teil 1/2: Produktbeschreibungen

| Substrat | Beschreibung |
|----------------|---|
| Kartoffelpülpe | Kartoffelpülpe ist das bei der Stärkegewinnung übrigbleibende Kartoffelmark mit Schalen (Toffi, Website, 2011) |
| Kieselgur | Fein gemahlene, sedimentierte Algen. Hilfsmittel zum Filtrieren von Bier, in dem sich Eiweiß- und Hefestoffe ablagern (Reiter, 2011, mündl.) |
| Kollagen | Bestandteil des Bindegewebes. Verwendung in der Wursthaut- und Gelatineproduktion (Wikipedia 2011, Kollagen) |
| Lake | Salzhaltiger Sickersaft, der beim Herstellungsprozess anfällt (Springerlink, Website, 2011) |
| Maische | Mit Wasser angesetztes Malz, Trauben, Kartoffeln, Getreide oder Obst, zur Umwandlung von Stärke in Zucker bzw. Zucker in Alkohol (Wikipedia 2011, Maische) |
| Masserübe | Futterrübenart (Wikipedia 2010, Futterrübe) |
| Melasse | Zuckersirup (Wikipedia 2011, Melasse) |
| Molke | Grünlich-gelbe Restflüssigkeit, die bei der Käseherstellung entsteht. Bestandteile: Wasser und Milchzucker (Wikipedia 2011, Molke) |
| Pansen | Vormagen von Wiederkäuern |
| Prozesswasser | Wasser das bei Herstellungsprozessen als Betriebs- oder Hilfsmittel eingesetzt wird. Es kommt mit dem Produkt oder anderen Betriebsstoffen in Berührung und kann nährstoffreiche Inhaltsstoffe herauslösen. |
| Schlempe | Rückstand aus der Alkoholdestillation (Wikipedia 2011, Schlempe) |
| Treber | Die Bezeichnung Treber wird hauptsächlich bei der Bier- und Weinproduktion verwendet. Es handelt sich um Pflanzenreste (bei der Bierherstellung Hülsen der Malzkörner), die beim Herstellungsprozess abgepresst, gefiltert oder anderweitig vom Produkt abgetrennt werden (Reiter, 2011, mündl.). |
| Trester | Rückstände, die nach dem Auspressen des Saftes von Pflanzenbestandteilen übrig bleiben (Wikipedia 2011, Trester) |
| Trub | Ausgeflockte Eiweißstoffe und Hopfenreste, die nach dem Kochen ausfallen (Reiter, 2011, mündl.) |

Tabelle 6.3d Teil 2/2: Produktbeschreibungen

6.4 Technische Einrichtungen zur Kofermentation

Die Zugabe von Kosubstraten in Faultürmen erfordert eine verfahrenstechnische Anpassung der Kläranlage. Das zentrale Element einer Vergärung, der Fermenter, befindet sich zwar schon in Form des Faulturms auf der Kläranlage, jedoch sind für einen störungsfreien Kofermentationsprozess ggf. weitere Einrichtungen nötig.

6.4.1 Stickstoffeliminierung / Zentratwasserbehandlung

Grundsätzlich können auf einer Kläranlage nur dann Kosubstrate verwertet werden, wenn genügend Kapazitäten zur Stickstoffeliminierung vorhanden sind. Durch die Mitbehandlung von Kosubstraten steigen die Stickstofffrachten im Zentratwasser in der Regel erheblich an. Sind nicht genügend Kapazitäten zur Nitrifikation und Denitrifikation vorhanden, so müssen entsprechende Einrichtungen ausgebaut bzw. ergänzt werden. Die Kapazitäten der Stickstoffeliminierung durch Nitrifikation und Denitrifikation sind vor allem durch die niedrigen Temperaturen im Winter begrenzt (Finsterwalder, 2011, mündl.). Beispiele zur zusätzlichen Behandlung des Zentratwassers:

- SBR-Anlage (Kläranlage Moosburg. Siehe Kapitel 4)
- Strippung + Saure Wäsche²⁶ (Kläranlage Straubing)

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass vor allem der Abbau von proteinreichen Substraten zu hohen Stickstoffbelastungen führt (Finsterwalder UTF2 S.55, 2008).

6.4.2 Annahmestation

Zur Annahme der Kosubstrate ist eine Annahmestation nötig, von wo aus die Kosubstrate aus den Tankwagen über hydraulische Anschlüsse und Rohrleitungen in die Tankbehälter oder direkt in den Faulturm gepumpt werden können.



Abbildung 6.4.2: Annahmestation mit Tankbehälter der Kläranlage Moosburg (Strunkheide S.15, 2007)

²⁶ Strippung: Umwandlung von Ammonium zu Ammoniak.

Saure Wäsche: Umwandlung von Ammoniak mittels Schwefelsäure zu Ammoniaksulfat, welches anschließend ausgeschleust werden kann (Schreff S.7, 2010).

6.4.3 Tankbehälter

Nach der Annahme können die Kosubstrate entweder direkt in den Faulturm (nur bei kleinen Mengen), oder zur Zwischenspeicherung in Tankbehälter gepumpt werden. Die Zwischenspeicherung in Tankbehältern ist zu empfehlen, da so eine kontinuierliche Beschickung des Faulturms möglich ist. Die Kosubstrate können so stündlich in kleineren Mengen in den Faulturm gepumpt werden.

Bei der Verwendung von leicht entzündlichen Kosubstraten (z. B. Lösungsmittel) ist darauf zu achten, dass spezielle explosionsgeschützte Tankbehälter zu verwenden sind (Neupert, 2010, mündl.).

Nach Möglichkeit sollten in einem Tankbehälter immer nur gleichartige Kosubstrate gespeichert werden. Unterschiedliche Kosubstrate können unter Umständen chemisch miteinander reagieren und zur Freisetzung von Gasen führen. Der resultierende Überdruck kann zu einer Explosionsgefahr führen (Finsterwalder, 2010, mündl.).

6.4.4 Störstoffabtrennung

Bei störstoffhaltigen Kosubstraten müssen Einrichtungen zur Abtrennung der Störstoffe installiert werden. Beispiele zur Störstoffabtrennung:

- Metallabscheider, zur Abtrennung von Metallteilen
- Sieb zum Filtern von Klumpen und anorganischen Material (Kunststoff, Glas, etc.)
- Zerkleinerungseinheit (Mazerator, Scheibenmühle) zum Zerkleinern von organischen Bestandteilen (Knochen, Essensreste, Klumpen, etc.)

6.4.5 Mischbehälter mit Rührwerk

Bevor die Kosubstrate in den Faulturm gepumpt werden, sollten sie mit dem Klärschlamm vermischt werden, um ein weitgehend homogenes Gemisch zu erzeugen. Dies kann in einem Mischbehälter mit Rührwerk erfolgen (vgl. Abb. 4). Ein homogenes Gemisch gewährleistet einen intensiven Kontakt zwischen Substrat und Bakterien und sorgt somit für einen optimalen Stoffwechselfvorgang (Kofermentation S.12, 1998).

6.4.6 Aufbereitungsanlage

Für die Kofermentation in Faultürmen von Kläranlagen sind nur flüssige und störstofffreie Substrate geeignet. Speisereste oder ähnliche biologische Abfälle liegen ursprünglich oft nicht in dieser Form vor. Vorteilhaft ist es, wenn diese Abfälle vom Zulieferer oder direkt am Anfallort in eine störstofffreie, wässrige Lösung überführt werden, da der Kläranlage somit die Investitionskosten für Aufbereitungsanlagen erspart bleiben. Gibt es in der Umgebung einer Kläranlage jedoch Betriebe, in denen Speisereste oder ähnliches in großen Mengen anfällt, so können sich die Investitionen in eine Aufbereitungsanlage durchaus lohnen. Des Weiteren kann eine Aufbereitungsanlage einer Kläranlage Vorteile im Konkurrenzkampf um mögliche Kosubstrate bieten, da man nicht mehr nur auf flüssige Abfälle angewiesen ist.

In der Dissertationsschrift von Karl-Georg Schmelz „Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfällen“ (RHOMBOS Verlag, 2000) wird ein mögliches Ablaufschema zur Aufbereitung biologischer Abfallstoffe vorgestellt. Es soll hier in zusammengefasster Form skizziert werden:

Die Annahme und Aufbereitung der Bioabfälle sollte in einer geschlossenen Halle mit Abluftbehandlung stattfinden, um Geruchsprobleme zu vermeiden.

Die Bioabfälle werden in einen Flachbunker entladen, von wo aus sie über eine Schraubenmühle in den Abfallpulper transportiert werden. Der Pulper hat die Aufgabe, die organischen Stoffe zu zerfasern und aufzulösen und anorganische Stoffe und Grobstoffe abzutrennen. Die Schraubenmühle dient auch dem Zweck einer ersten Zerkleinerung der Abfälle. Wahlweise kann sich über der Schraubenmühle auch ein Überbandmagnet befinden, um Eisenmetalle abzutrennen.

Um die Bioabfälle in eine wässrige Lösung zu überführen, wird dem Pulper Flüssigkeit zugegeben (Ablaufwasser der Kläranlage oder voreingedickter Überschussschlamm).

Die Zerfaserung im Pulper erfolgt über ein schnell laufendes Rührwerk. Durch die entstehenden Fliehkräfte werden schwere Störstoffe wie Steine, Knochen und Metallteile an die Außenwand des Pulpers gedrückt. Dort befindet sich eine Vertiefung, in die diese Stoffe hineinfallen und abtransportiert werden. Leichte Störstoffe wie Textilien oder Folien werden in einem langsamen Rührgang abgetrennt. Sie schwimmen bei geringer Fließgeschwindigkeit oben auf und können über einen Rechen abgegriffen werden. Kleine Feststoffe wie Sand oder kleine Steine können vom Pulper nicht abgetrennt werden. Sie müssen im Anschluss durch einen Hydrozyklon²⁷ entfernt werden, da sie zu Verschleiß an den Pumpenlaufrädern und zu Ablagerungen in den Rohrleitungen führen können. Die flüssigen Bioabfälle können jetzt dem Faulturm bzw. dem Mischbehälter zugeführt werden.

6.4.7 Hygienisierungsanlage

Sollen Kosubstrate tierischen Ursprungs behandelt werden, so ist eine Hygienisierung der Substrate erforderlich (vgl. Kapitel 3.4). In diesem Fall muss eine Anlage zur Erhitzung der Substrate auf die geforderte Temperatur eingerichtet werden.

6.4.8 Gasverwertung

Da die Mitbehandlung von Kosubstraten eine erhebliche Klärgassteigerung bedeutet, reicht die Kapazität des bestehenden Blockheizkraftwerks (BHKW) oftmals nicht aus. Um der anfallenden Gasmenge gerecht zu werden, ist ggf. die Installation eines zusätzlichen BHKWs nötig. Neben dem klassischen BHKW können aber auch andere Einrichtungen zur Gasverwertung in Betracht gezogen werden.

²⁷ Hydrozyklon: Gerät zur Abtrennung von Feststoffen nach dem Fliehkraftprinzip (Herbold, Website, 2011).

6.4.8.1 Mikrogasturbine

Trotz eines ähnlichen elektrischen Wirkungsgrads von ca. 30%, ist eine Mikrogasturbine in der Anschaffung teurer als ein klassisches BHKW. Jedoch bietet sie folgende Vorteile (HEAG S.16, 2010):

- Geringer Raumbedarf
- Geringe Wartungskosten, da nur ein bewegliches Teil
- Lange Lebensdauer
- Geringe Emissionswerte
- Geringe Lärmbelastung
- Regelbare elektrische Leistung

6.4.8.2 Karbonatbrennstoffzelle

Auch die Karbonatbrennstoffzelle ist im Einkauf wesentlich teurer als ein BHKW. Die Vorteile der Karbonatbrennstoffzelle sind (Lindner S.41, 2010):

- Hoher elektrischer Wirkungsgrad (ca. 47%)
- Geringe Schadstoffemissionen (kein CO₂ Ausstoß)
- Geringe Schallemissionen
- Gutes Teillastverhalten (Anstieg des Wirkungsgrades bei Teillast)
- Hohe Temperatur der Abwärme, daher ideal zur Kraft-Wärme-Kopplung geeignet

6.4.9 Voreindicker

Bietet der Faulturn nicht genügend freie Kapazitäten für Kosubstrate, so können der Primär- und Überschussschlamm mit einem Voreindicker eingedickt werden. Im Voreindicker wird dem Schlamm, mittels einer Zentrifuge, Wasser entzogen. Da durch die Entwässerung jetzt die gleiche Menge an Trockenmasse bei einem geringeren Volumen in den Faulturn eingebracht werden kann, entstehen freie Kapazitäten für Kosubstrate.

6.5 Begrenzung der Mitbehandlung von Kosubstraten

Auch bei einem stabilen Faulungsprozess kann die Menge an zugegebenen Kosubstraten limitiert sein. Begrenzende Faktoren sind:

- Mangel an verfügbaren Kosubstraten
- Die in der Genehmigung festgelegte Maximalmenge an Kosubstraten
- Faulturnkapazität
- Stickstoffeliminierungskapazität

- Erreichen von Hemmstoffgrenzwerten, wie z. B. dem Gehalt an organischen Säuren

6.6 Absicherung durch Lieferantenverträge

Da technische Einrichtungen zur Kofermentation für Kläranlagen ggf. große Investitionskosten bedeuten, muss die Versorgung mit Kosubstraten sichergestellt werden. Um eine mittel- bis langfristige Versorgungssicherheit bzgl. Menge und Qualität der Kosubstrate zu gewährleisten, sollten folgende Punkte vertraglich oder in Zweckvereinbarungen festgehalten werden (Kofermentation S.45, 1998):

- Art und Menge der Kosubstrate
- Preis bezogen auf Menge oder Gewicht
- Art und maximale Menge an Schadstoffen
- Wer ist für die Hygienisierung verantwortlich, falls erforderlich
- Was geschieht bei einem Lieferausfall oder bei Störungen der Kläranlage
- Vertragslaufzeit mit den Lieferanten

Verfügt eine Kläranlage nicht über die Kapazitäten, die Kosubstrate nach jeder Anlieferung auf ihre Schadstoffgehalte zu analysieren, sollten sog. Rückstellproben entnommen werden. Rückstellproben sind kleine Mengen der angelieferten Kosubstrate, die zur Aufbewahrung eingefroren werden. Kommt es im Rahmen der Kofermentation zu schadstoffbedingten Störfällen, die einen finanziellen Schaden mit sich ziehen, so können die Rückstellproben im Nachhinein analysiert werden. Stellt sich bei der Analyse heraus, dass die vertraglich festgelegten Schadstoffgehalte vom Lieferanten überschritten wurden und diese der Grund für den finanziellen Schaden war, so kann evtl. Schadensersatz gefordert werden (Littmann, Jan. 2011, mündl.).

7 Zusammenfassung

Die Mitbehandlung von organischen Abfallstoffen im Faulturm ermöglicht es den Kläranlagenbetreibern wirtschaftliche Potentiale ihrer Kläranlage auszuschöpfen. Um diese Potentiale erschließen zu können, bedarf es jedoch zunächst auch einigen Investitionen. Soll die Zugabe von Kosubstraten in größeren Mengen erfolgen, ist eine Genehmigung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz notwendig. Diese beansprucht jedoch viel Zeit und Geld (vgl. S.12 Fußnote 8). Auch die Investitionskosten für zusätzliche Anlagenteile, wie einer Annahmestation, Tankbehälter, Stickstoffeliminierung oder ein zusätzliches BHKW sind nicht zu unterschätzen. Eine weitere Schwierigkeit stellt die Suche nach geeigneten Kosubstraten dar. Auch wenn in dieser Arbeit einige potentielle Kosubstrate vorgestellt wurden, so kann sich die Suche nach passenden Lieferanten durchaus als aufwendig erweisen. Aus finanziellen Gründen kommen meist nur Lieferanten aus der näheren Umgebung in Frage. Auch wird die Nachfrage an Kosubstraten in den nächsten Jahren steigen, da auch die Anzahl der Biogasanlagen zunimmt.

Betrachtet man jedoch auch die positiven Seiten der Kofermentation, so stellt man fest, dass diese dem Aufwand durchaus gerecht werden. Die Kläranlage Moosburg konnte durch die Nutzung ihrer freien Faulturmkapazitäten (täglich 33 m³ Kosubstrate) den Gasertrag um mehr als 4000 l/d steigern. Durch den daraus resultierenden Stromerlös, dem Erlös durch die Annahme der Kosubstrate und der Nutzung der Abwärme wird erwartet, dass sich die Investitionskosten (BHKW, Annahmestation, Genehmigung etc.) nach etwa acht Jahren amortisiert haben (Littmann, Jan. 2011, mündl.). Nicht mit einberechnet wurden hier jedoch die steuerlichen Begünstigungen, die sich durch die Abschreibungen der Anlagenteile ergeben. Die Kläranlage Straubing investierte etwa 2 Mio. Euro in Anlagen zur Kofermentation und behandelt heute eine tägliche Kosubstratmenge von 140 m³. Mit den sich dadurch ergebenden Gewinnen kann die Kläranlage eine jährliche Einsparung von rund 200.000 Euro erzielen (Buchmeier S.79, 2008). Die hohe Gebühr einer BImSchG-Genehmigung wird durch diesen Betrag bei weitem aufgewogen. Zu den Investitionskosten ist anzumerken, dass diese in der Regel nicht auf einmal anfallen, sondern sich mit fortlaufendem Ausbau der Anlage nach und nach summieren (weitere Tankbehälter, zusätzliches BHKW, zusätzliche Stickstoffeliminierung).

Die größte Gefahr geht bei der Kofermentation von der sensiblen Faulturmbiologie aus. Da Faultürme nicht zur Kofermentation dimensioniert wurden, kann die Zugabe von Kosubstraten die Faulturmbiologie aus dem Gleichgewicht bringen. Das größte Risiko ist hierbei wohl eine mögliche Versäuerung des Faulturms und eine Ammoniak- oder Schwefelwasserstoffvergiftung der dort lebenden Bakterien. Für Kläranlagenbetreiber ist es deshalb äußerst wichtig, relevante Kenngrößen ständig zu überwachen und die Abbaueigenschaften der eingesetzten Kosubstrate genau zu kennen. Für die Einstellung einer stabilen Faulturmbiologie sind daher Gärversuche oder Simulationen mit dem Programm „BIOTIP“ unumgänglich. Weiterhin kann bei der Zugabe von

Kosubstraten durch den erhöhten Nährstoffeintrag auch die Nährstoffkonzentration im Kläranlagenablauf steigen. Gleiches gilt für die Schwermetall-, Phosphor- und Stickstoffkonzentrationen. Insbesondere die erhöhten Stickstoffkonzentrationen im Zentratwasser können dazu führen, dass die Kapazitäten zur Stickstoffeliminierung überschritten werden. Bei größeren Mengen an Kosubstraten sind deshalb oft zusätzliche Einrichtungen zur Stickstoffeliminierung nötig. Die Kofermentation kann sich außerdem negativ auf den Abbau- und Stabilisierungsgrad des Faulschlammes auswirken. Von den insgesamt sieben befragten Kläranlagen konnte dies jedoch nicht bestätigt werden. Der zusätzliche Arbeitsaufwand durch die Kofermentation beläuft sich auf etwa vier Arbeitsstunden pro Woche (Littmann, Jan. 2011, mündl.).

Als Fazit dieser Arbeit kann festgehalten werden, dass eine weitere Verbreitung der Kofermentation auf Kläranlagen insgesamt als wünschenswert zu betrachten ist. Einige Pioniere auf diesem Gebiet, wie z. B. die Kläranlagen Moosburg und Straubing, haben nicht nur die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit der Kofermentation demonstriert, sondern somit auch einen ökologischen Entsorgungsweg für eine Reihe von Abfallstoffen geschaffen. Aus entsorgungspflichtigen Abfällen entstehen durch die Kofermentation Produkte zur Erzeugung von sauberer, umweltfreundlicher und regenerativer Energie, die durch das EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) und KWKG (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) hoch vergütet werden kann. Besonders der letzte Aspekt, die Ökologie, sollte in Zeiten des Klimawandels und der fortschreitenden Verknappung von Öl und Kohle, eine zentrale Rolle bei der Entscheidung zur Kofermentation spielen.

Literaturverzeichnis

Amon, 2004: Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Amon. Universität für Bodenkultur Wien. "Untersuchungen zur Wirkung von Rohglycerin aus der Biodieselerzeugung als leistungssteigerndes Zusatzmittel zur Biogaserzeugung aus Silomais, Körnermais, Rapspresskuchen und Schweinegülle". Website: http://www.nas.boku.ac.at/fileadmin/_/H93/H931/AmonPublikationen/SEEG-Endbericht.pdf (Datum des Zugriffs: 8.1.2011).

Archea, 2010: ARCHEA Service GmbH. "Gaserträge und Nährstoffe - Abfall". Website: http://www.archea-biogas.de/_mediafiles/9-substrate.pdf (Datum des Zugriffs: 3.12.2010).

Anaerobtechnik, 2004: Prof. Dr.-Ing. W. Bischofsberger, Prof. Dr. Ing. K.H. Rosenwinkel, Prof. Dr.-Ing. N. Dichtl, Prof. Dr.-Ing. C.F. Seyfried. Anaerobtechnik. Springer-Verlag.

Bank, 2000: Dipl.-Ing. Matthias Bank. Basiswissen Umwelttechnik. Vogel Buchverlag.

Bekker, 2007: Dissertationsschrift Marina Bekker. Universität Karlsruhe (TH). "Charakterisierung der anaeroben Abbaubarkeit von spezifischen organischen Stoffen". Verlag Siedlungswasserwirtschaft Karlsruhe. Website: http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=998326607&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=998326607.pdf (Datum des Zugriffs: 3.1.2011).

BIOTIP, 2005: A. Kottmair, Dr.-Ing. K. Finsterwalder. Ernährungsberatung für Biogasanlagen mit BIOTIP. Fachartikel veröffentlicht in der Zeitschrift Biogas Journal: Ausgewogen Füttern, 8. Jahrgang Nr. 1/05 S. 18-20. Website: http://www.biogas-infoboard.de/pdf/060804_ak_biotip.pdf (Datum des Zugriffs: 26.12.2010).

Braun, 1996: R. Braun, W. Himmel, F. Steyskal, R. Steffen. Institut für angewandte Mikrobiologie. Fachartikel "Empfehlungen für Kläranlagenbetreiber und Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen zur Verwertung biogener Abfälle in Faultürmen". Website: http://www.abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10177117_46576/12af4998/Studie_biogene_Abfaelle_in_Faultuermen_1996.pdf (Datum des Zugriffs: 15.12.2010).

Buchmeier, 2008: Johann Buchmeier, Abteilungsleiter Kläranlage Straubing. „Welche Chancen bietet die Kofermentation nicht ausgefallter Abwasserschlämme?“. Artikel erschienen im Tagungsband des 2. Moosburger Umwelttechnikforum „Effizienz auf Kläranlagen“. Website: <http://biukat.de/wb/>

Buchmeier, 2010, mündl.: Johann Buchmeier, Abteilungsleiter Kläranlage Straubing. Mündliche Auskunft am 17.11.2010.

Bundesrecht, 2010: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG). Website: http://www.bundesrecht.juris.de/bundesrecht/whg_2009/gesamt.pdf (Datum des Zugriffs: 02.01.2011).

Burger, 2010: Wolfgang Burger, Regierungspräsidium Freiburg. Vortrag zum LUBW - Kolloquium 2010: "Vollzugsfragen aus der Abfallwirtschaft". Website: http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/61673/tischvorlage-kolloquium_2010_3.pdf?command=downloadContent&filename=tischvorlage-kolloquium_2010_3.pdf (Datum des Zugriffs: 02.01.2011).

Dries, 2002: Dipl.-Ing. (FH) Bernd-Rüdiger Dries, Dipl.-Ing. Kirsten Sölter. ORGANISCHE SÄUREN - Bedeutung und Bestimmung. Website: http://www.hach-lange.de/shop/action_q/download%3Bdocument/DOK_ID/5090/type/pdf/lkz/DE/spkz/de/TOKEN/--D4bFtR7Wh7IIWxafzeFAK8fhY/M/13SzPw (Datum des Zugriffs: 30.11.2010).

DWA-M 380, 2009: Merkblatt DWA-M 380. Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).

Faustzahlen, 2007: Helmut Döhler, Dr. Anke Niebaum, Astrid Hauptmann, Susanne Krötzsch. "Faustzahlen Biogas". Herausgeber: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL).

Finsterwalder UTF1, 2007: Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder, Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co.KG in Bernau. „Wie können biogene Abfälle in Kläranlagen verwertet werden?“. Artikel erschienen im Tagungsband des 1. Moosburger Umwelttechnikforum „Innovative Kläranlagentechnologie“. Website: <http://biukat.de/wb/>

Finsterwalder UTF2, 2008: Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder, Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co.KG in Bernau. „Welche Abfälle eignen sich zur Kofermentation in Faultürmen?“ Artikel erschienen im Tagungsband des 2. Moosburger Umwelttechnikforum „Effizienz auf Kläranlagen“. Website: <http://biukat.de/wb/>

Finsterwalder, 2010, mündl.: Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder, Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG in Bernau. Mündliche Auskunft am 8.10.2010.

Finsterwalder, 2011, mündl.: Dr.-Ing. Klemens Finsterwalder, Finsterwalder Umwelttechnik GmbH & Co. KG in Bernau. Mündliche Auskunft am 28.2.2011.

Handreichung, 2004: "Handreichung - Biogasgewinnung und -nutzung". Ersteller: Institut für Energietechnik und Umwelt gGmbH. Herausgeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

- HEAG, 2010:** HEAG Südhessische Energie AG (HSE). Einsatz einer Mikrogasturbine im Klärwerk Darmstadt-Eberstadt. Website: http://www.hessenenergie.de/Downloads/DI-Nach/dln-fklkwk/fklkwk-0802/0802-pdfs/Wacker_210208.pdf (Datum des Zugriffs: 13.12.2010).
- Herbold, Website, 2011:** Infoblatt der Herbold Meckesheim GmbH. Website: <http://www.schneidmuehlen-herbold.de/info/info47-DE-Hydrozyklone.pdf> (Datum des Zugriffs: 21.1.2011).
- Hofmann, 2010, Energie aus WWB S. 5_8:** Prof. Dr. J. Hofmann. FH-Landshut. Vorlesungsskriptum "Energie aus Wind Wasser und Boden". Sommersemester 2010.
- Hofmann, 2010, Energie aus WWB S. 6_5, mündl.:** Prof. Dr. J. Hofmann. FH-Landshut. Mündliche Ergänzung zur Vorlesung "Energie aus Wind Wasser und Boden". Kapitel 6, Seite 5. Sommersemester 2010.
- Hofmann, 2010, Energie aus WWB S. 6_6, mündl.:** Prof. Dr. J. Hofmann. FH-Landshut. Mündliche Ergänzung zur Vorlesung "Energie aus Wind Wasser und Boden Kapitel 6, Seite 6". Sommersemester 2010.
- Hofmann, Nov 2010, mündl.:** Prof. Dr. J. Hofmann. FH-Landshut. Mündliche Auskunft am 12.11.2010.
- Hoppenheid, 2010, mündl.:** Dr. K. Hoppenheid, Projektmanager am Bayerischen Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik GmbH (BifA GmbH) in Augsburg. Mündliche Auskunft am 9.11.2010.
- KA d. Zukunft, 2010:** Prof. Dr. J. Hofmann. Fachartikel: Kläranlage der Zukunft. Artikel vorgetragen am 30.11.2010 im Literaturhaus München im Rahmen des Fachforums "Kläranlagen - wirtschaftlich optimieren". Herausgeber: Bayerische Verwaltungsschule (BVS).
- KA-Wasserwirtschaft, 2001:** Prof. Dr.-Ing. Ute Austermann-Haun, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel. Großtechnische Erfahrungen mit der Co-Fermentation in Deutschland. Artikel erschienen in: KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2001 (48) Nr. 10.
- Klärwärter-Taschenbuch, 1998:** E. Stier, M. Fischer. Klärwärter-Taschenbuch. Herausgeber: ATV (Abwassertechnische Vereinigung e.V.). F. Hirthammer Verlag München.
- Klußmann, 2010:** Dr. Heinrich-Wilhelm Klußmann. Pump- und Rührtechnik in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Website: http://www.bfl-online.de/media/pump_und_%20ruehrtechnik_in_%20biogasanlagen.pdf (Datum des Zugriffs: 24. 12.2010).
- Kofermentation, 1998:** Dr. B. Biskupek. Kofermentation. Herausgeber: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Arbeitsblatt 249.

Leitfaden, 2004: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Leitfaden Nr. 2-7: Betrieb von Abwasseranlagen; Ermittlung der organischen Säuren durch Bestimmung der Kalkreserve im Faulwasser.

Lfu-Wasser, Website, 2010: Landkarte Bayern. Website: http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/gewaesserentwicklung/gewaesserentwicklungskonzepte/pic/aa_gek_by_neu.gif (Datum des Zugriffs: 23.1.2011).

Lindner, 2010: Daniela Lindner. Brennstoffzellen - Energietechnologie der Zukunft. Website: <http://www.ipe.uni-stuttgart.de/content/web3/handouts/brennstoffzellen.pdf> (Datum des Zugriffs: 13.12.2010).

Linke, 1997: B. Linke. Fachartikel "Entsorgung organischer Reststoffe durch Co-Fermentation". Erschienen in der Zeitschrift "Landtechnik" Band 52/2.

Littmann, Okt. 2010, mündl.: Roland Littmann, Abwassermeister Kläranlage Moosburg. Mündliche Auskunft am 10.10.2010.

Littmann, Jan. 2011, mündl.: Roland Littmann, Abwassermeister Kläranlage Moosburg. Mündliche Auskunft am 20.1.2011.

Müller, 2008: Dr. Kurt Müller, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg. „Kofermentation bei kommunalen Kläranlagen“.

Müller, 2010: Dr. Kurt Müller, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg. Manuskript: „Co-Vergärung – Kriterien für die Genehmigung“. November 2010.

Müller, 2010, mündl.: Dr. Kurt Müller, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg. Mündliche Auskunft am 20.11.2010.

Müller, 2011, mündl.: Dr. Kurt Müller, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Augsburg. Mündliche Auskunft am 11.1.2011.

Neupert, 2010, mündl.: Werner Neupert. Kläranlage Augsburg. Mündliche Auskunft am 29.11.2010.

Patents, Website, 2011: Beschreibung von Textildruckprozessen. Website: <http://www.freepatentsonline.com/EP0892105.html> (Datum des Zugriffs: 8.1.2011).

Pos.Liste Kompost, Website, 2010: Positivliste für Vergär- und Kompostieranlagen. Website: http://www.kompost.ch/aktuell/xmedia/Positivliste_deutsch.pdf (Datum des Zugriffs: 15.1.2011).

Provinz, Website, 2010: Ablaufbeschreibung von Sand- und Fettfang sowie Vorklärung. Website: <http://www.provinz.bz.it/umweltagentur/wasser/1265.asp> (Datum des Zugriffs: 7.10.2010).

Puchas, 2003: Ing. Karl Puchas, Birgit Resch. Biogasstrategiekonzept - Steirische Gas-Wärme GmbH - Endbericht Teil I. Website: http://www.noest.or.at/intern/dokumente/068_EB_Biogas_Strategiekonzept.pdf (Datum des Zugriffs: 12.12.2010).

Reipa, 2003: Dipl.-Ing. Anja Reipa. Kostenreduzierung für Kommunen und Verbände durch effiziente Erzeugung und Verwertung von Faulgas als Primärenergie sowie Reduzierung der Faulschlammmenge. Website: http://hikwww1.fzk.de/ptwte/w/Schlussbericht-EG_LV.pdf (Datum des Zugriffs: 7.12.2010).

Reiter, 2011, mündl.: Manuel Reiter. Brauer & Mälzer Geselle. Mündliche Auskunft am 8.1.2011.

Schäfer, 1998: Joachim Schäfer. Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Vergärung von Biomüll und Klärschlamm. IRB Verlag.

Schmelz, 2000: Dissertationsschrift K.G. Schmelz. Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfällen. RHOMBOS-Verlag.

Schneichel, 2010: Hans-Walter Schneichel. Aktuelle Rechtsfragen der Co-Vergärung im Faulturm. Website: http://www.sachsen-anhalt.de/LPSA/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LLFG/dokumente/KoNaRo/veranstaltungsbeitraege/Europ_Biomassetage_07_10_10/Schneichel_Magdeburg_071010.pdf (Datum des Zugriffs: 02.01.2011).

Schröppel, 2002: Volker Schröppel. Diplomarbeit "Biologische Verwertungsalternativen für wässrige, organische Rückstände am Beispiel von Altkosmetika", Fachhochschule Augsburg. Website: http://www.hs-augsburg.de/medium/download/itw/verg_kosmetika_schr_F6ppel.pdf (Datum des Zugriffs: 3.10.2010).

Schmack, Website, 2011: Website der Schmack Biogas GmbH: <http://www.schmack-biogas.com/wDeutsch/biogasanlage-informationen/gaerversuch.htm> (Datum des Zugriffs: 16.1.2011).

Schreff, 2010: Dr.-Ing. Dieter Schreff. „Stickstoffrückbelastung-Quellen-Relevanz-Lösungsansätze“. Website: http://www.ib-schreff.de/fileadmin/Daten/Publikationen/ibSchreff_dwa_rueckbelastung_2010_small.pdf

Schulz, 2001: Heinz Schulz. "Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele". Ökobuch Verlag.

Späth, 2008: Dipl.-Ing. Harald Späth, Ingenieurbüro Schlegel München. „Welche Möglichkeiten zur Nährstoffentfernung aus dem Abwasser gibt es?“ Artikel erschienen im Tagungsband des 2. Moosburger Umwelttechnikforum „Effizienz auf Kläranlagen“. Website: <http://biukat.de/wb/>

Springerlink, Website, 2011: Buchauszug. E. Letzig. "Über ein wasserlösliches hochmolekulares Kohlenhydrat in Sauerkrautlake". Website: <http://www.springerlink.com/content/v87782077u168586/> (Datum des Zugriffs: 10.1.2011).

Strunkheide, 2007: Dr.-Ing. Jörg Strunkheide, Institut Wasser und Boden e.V. in Hattingen. „Welche Vorteile bringt ein ganzheitlicher Optimierungsansatz?“.. Artikel erschienen im Tagungsband des 1. Moosburger Umwelttechnikforum „Innovative Kläranlagentechnologie“. Website: <http://biukat.de/wb/>

Toffi, Website, 2011: Beschreibung zur Verwertung von Kartoffelpülpe und Schälabfällen. Website: http://www.toffi.net/kiss/verwertung/v_10.htm (Datum des Zugriffs: 8.11.2011).

Umweltamt, Website, 2011: Website Umweltamt Landeshauptstadt Düsseldorf: http://www.duesseldorf.de/umweltamt/betrieblicher_umweltschutz/f_a_q/faq_und_antworten.shtml (Datum des Zugriffs: 14.1.2011).

Umwelttech. Berufe, 2003: E. Stier, H.-C. Baumgart, M. Fischer. Handbuch für Umwelttechnische Berufe (Ver- und Entsorger). F. Hirthammer Verlag München.

Vogel, 2010, mündl.: Herr Vogel, Kläranlage Nersingen. Auskunft per E-Mail am 29.11.2010.

Wasser-Wissen 2010, Belebungsanlagen: Onlinelexikon. Artikel "Belebungsanlagen". Website: <http://www.abwasserpool.de/abwasserlexikon/b/belebungsanlagen.htm> (Datum des Zugriffs: 7.11.2010).

Wasser-Wissen 2010, Klärschlamm: Onlinelexikon. Artikel "Klärschlamm". Website: <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/k/klaerschlam.htm> (Datum des Zugriffs: 7.11.2010).

Wasser-Wissen 2010, Puffervermögen: Onlinelexikon. Artikel "Puffervermögen". Website: <http://www.wasser-wissen.de/abwasserlexikon/p/puffervermoegen.htm> (Datum des Zugriffs: 1.12.2010).

Wiegand, 2008: Steffen Wiegand, AWITE Bioenergie GmbH in Langenbach. „Wie kann der Faulungsprozess zuverlässig gesteuert werden?“ Artikel erschienen im Tagungsband des 2. Moosburger Umwelttechnikforum „Effizienz auf Kläranlagen“. Website: <http://biukat.de/wb/>

Wikipedia 2010, Biozönose: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Biozönose“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Bioz%C3%B6nose> (Datum des Zugriffs: 27. 10.2010).

Wikipedia 2010, Fermentation: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Fermentation“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Fermentation> (Datum des Zugriffs: 3. 11.2010).

Wikipedia 2010, Weinherstellung: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Weinherstellung“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Weinherstellung> (Datum des Zugriffs: 12. 12.2010).

Wikipedia 2011, Futterrübe: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Futterrübe“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Futterrübe> (Datum des Zugriffs: 3.1.2011).

Wikipedia 2011, Kollagen: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Kollagen“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kollagen> (Datum des Zugriffs: 3.1.2011).

Wikipedia 2011, Maische: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Maische“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Maische> (Datum des Zugriffs: 10.1.2011).

Wikipedia 2011, Melasse: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Melasse“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Melasse> (Datum des Zugriffs: 10.1.2011).

Wikipedia 2011, Molke: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Molke“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Molke> (Datum des Zugriffs: 10.1.2011).

Wikipedia 2011, Schlempe: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Schlempe“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schlempe> (Datum des Zugriffs: 10.1.2011).

Wikipedia 2011, Schwarzlauge: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Schwarzlauge“. Website: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzlauge> (Datum des Zugriffs: 10.1.2011).

Wikipedia 2011, Trester: Website der Wikimedia Foundation Inc. Artikel „Trester_Pressrückstände“. Website: http://de.wikipedia.org/wiki/Trester_%28Pressr%C3%BCckst%C3%A4nde%29 (Datum des Zugriffs: 10.1.2011).

Anhang A: Nährstoffseitige Mindestanforderungen für den anaeroben Abbau

| Element | Konzentration |
|--------------------------|------------------|
| Gesamtkohlenstoff | 0,2 – 50 g/l CSB |
| Phosphat | 50 – 150 ppm* |
| Natrium | 45 – 200 ppm |
| Kalium | 75 – 250 ppm |
| Magnesium | 10 – 40 ppm |
| Schwefel | 50 – 100 ppm |
| Eisen | 10 – 200 ppm |
| Nickel | 0,5 – 30 ppm |
| Kobalt | 0,5 – 20 ppm |
| Molybden, Wolfram, Selen | 0,1 – 0,35 ppm |
| Zink | 0 – 3 ppm |

Quelle: Schröpel S.15, 2002

* ppm: parts per million (deutsch: Teile von einer Millionen)
1 ppm entspricht 0,0001 Vol. -%

Anhang B: Grenzwerte hinsichtlich der hemmenden und toxischen Wirkung von Schwermetallen

Da Autorenangaben der Grenzwerte stark schwanken, werden in Tabelle 5.5 verschiedene Autoren zitiert. Die einzelnen Angaben haben einen großen Toleranzbereich. Das liegt daran, dass sich Bakterien an bestimmte Schwermetalle gewöhnen können. Alle Werte sind daher nur als Richtwerte anzusehen.

| Schwermetalle | Angaben verschiedener Autoren in [mg/l] | | | | | |
|-----------------------|---|-----------|-------------|-----------|--------------------------|-----------|
| | Böhnke 1993 | | Köhler 1966 | | Scherber u. Steiner 1982 | |
| | Hemmung | Toxizität | Hemmung | Toxizität | Hemmung | Toxizität |
| Kupfer (Cu) | 40 - 250 | 170 - 300 | 150 - 250 | 300 | 40 - 250 | 170 - 300 |
| Cadmium (Cd) | 150 - 600 | 20 - 600 | - | - | 150 - 600 | - |
| Zink (Zn) | 150 - 600 | 250 - 600 | 150 | 250 | 250 - 400 | 250 - 600 |
| Nickel (Ni) | 10 - 300 | 30 - 1000 | 100 - 300 | 500 | 10 - 300 | 130 - 500 |
| Blei (Pb) | 300 - 340 | 340 | - | - | 340 | 340 |
| Chrom III (Cr) | 120 - 300 | 260 - 500 | 100 - 300 | 500 | 120 - 300 | 260 - 500 |
| Chrom VI (Cr) | 100 - 110 | 200 - 420 | 100 | 200 | 100 - 110 | 200 - 220 |

Quellen: Anaerobtechnik S. 82, 2004 und Schmelz S.33, 2000

Anhang C: Fragenkatalog zur Sammlung von Betriebserfahrungen hinsichtlich der Kofermentation

| Art der Kosubstrate und Beschickung | |
|---|---|
| 1 | Wie viele Einwohnergleichwerte behandeln sie in ihrer Kläranlage? |
| 2 | Wie groß ist die Faulturmkapazität? (Bei mehreren Faultürmen bitte einzeln angeben) |
| 3 | Wird der Faulturm in gleichmäßigen Intervallen beschickt oder stoßartig je nach Anlieferung der Kosubstrate? |
| 4 | Welche zusätzlichen Einrichtungen mussten sie für die Kofermentation installieren? (z. B. zur Stickstoff-Eliminierung; Schlammverdickung; Tankbehälter; Störstoffabtrennung etc.) |
| 5 | Durch was wird der Einsatz von Kosubstraten bei ihnen begrenzt? - Verfügbare Menge an Kosubstraten? - Faulturmvolumen? - Stickstoffeliminierungskapazität? - zu geringe Pufferkapazität? |
| 6 | Welche Kosubstrate haben sie im Einsatz? |
| 7 | Werden die Kosubstrate mit dem Frischschlamm vermischt und dann in den Faulturm gegeben oder werden sie der Abwasserreinigung zugeführt? |
| 8 | Ist etwas über die Zusammensetzung der Kosubstrate bzgl. Kohlehydrate; Proteine und Fette bekannt? |
| 9 | Welche Anforderungen stellen ihre Kosubstrate an die Beschickung? -Reinigung (Rechen/Sieb/Steinfang)? -Zerkleinerung? -Vermischung mit Wasser um den TS-Gehalt zu senken? -Eindicken um pumpfähig zu machen? -Hygienisierung? -Vorgeschaaltete Erwärmung für fetthaltige Substrate? -Zwischenlager mit Abluftsaugung für abgetrennte geruchsintensive Störstoffe? -Sonstige Schritte nötig bevor das Substrat mit dem Klärschlamm vermischt wird? |
| 10 | Ist der TS; oTS und oTSv (vergährbarer Anteil der organischen Trockensubstanz) der Kosubstrate bekannt? |
| 11 | TS und oTS des Klärschlamm? |
| 12 | Wie viel m ³ (kg) Schlamm und wie viel m ³ Kosubstrat werden täglich zugegeben? |
| Raumbelastung; Gasertrag; Gaszusammensetzung | |
| 13 | Organische Raumbelastung [kg oTS / m ³ _{Faulraum} *d)]? Vor dem Beginn der Zugabe von Kosubstraten und hinterher. |
| 14 | Gasproduktion? Vor dem Beginn der Zugabe von Kosubstraten und hinterher. (Bitte angeben ob auf Tag; Woche; Monat oder Jahr bezogen) |
| 15 | Methananteil des Klärgases? Vor dem Beginn der Zugabe von Kosubstraten und hinterher. |
| 16 | Hat sich durch die Kofermentation der Schwefelwasserstoffgehalt und der Formaldehydgehalt verschlechtert? Wenn ja, welche Maßnahmen haben sie ergriffen, um wieder die ursprünglichen Werte zu erreichen? |

| Abbaugrad, Faulzeit und Klärschlammmenge | |
|---|---|
| 17 | Wie lange beträgt die Faulzeit? Hat sie sich verändert? |
| 18 | Mussten sie betriebliche Maßnahmen wie z. B. Installation eines Voreindickers ergreifen, um freie Kapazitäten für die Zugabe von Kosubstraten zu schaffen? |
| 19 | Wie groß ist der organische Abbaugrad? Hat er sich durch die Zugabe von Kosubstraten verändert? |
| 20 | Stabilisierungsgrad: Hat sich die Konzentration von organischen Säuren im ausgefaulten Schlamm verändert? |
| 21 | Hat die Zugabe von Kosubstraten negative Auswirkungen auf die Entwässerbarkeit des Faulschlammes gehabt? Wenn ja haben sie Maßnahmen gefunden, um den Faulschlamm trotzdem auf den ursprünglichen TS-Gehalt zu bringen? |
| Toxische und hemmende Stoffe im Faulturm | |
| 22 | Wie hoch sind Temperatur und pH-Wert im Faulturm? |
| 23 | In wie weit hat sich die Ammoniumkonzentration im Faulturm geändert? |
| 24 | In wie weit hat sich die Konzentration von organischen Säuren im Faulturm geändert? |
| 25 | Haben diese beiden Veränderungen Auswirkungen auf die Pufferkapazität gehabt, sodass sie entweder Säuren (Salzsäure) oder Basen (Kalkmilch; Natronlauge etc.) zugeben müssen um den pH-Wert zu stabilisieren? |
| 26 | Sind die Schwermetall-Konzentrationen im Faulturm gestiegen? (Kupfer; Cadmium; Zink; Nickel; Blei; Chrom III und VI; Quecksilber) |
| Rückbelastung und Ablaufwasser | |
| 27 | Wie haben sich die Konzentrationen bzw. Frachten im Zentratwasser bezüglich Stickstoff; Phosphor; CSB und BSB5 verändert? |
| 28 | Wie weit sind die Konzentrationen von CSB; BSB5; Stickstoff und Phosphor im Ablaufwasser gestiegen? |
| 29 | Sind die Schwermetall-Konzentrationen im Ablaufwasser gestiegen? (Kupfer; Cadmium; Zink; Nickel; Blei; Chrom III und VI und Quecksilber) |
| Lieferanten und Rahmenbedingungen | |
| 30 | Woher beziehen sie ihre Kosubstragte? |
| 31 | Können sie Preisspannen für die einzelnen Kosubstrate nennen? |
| 32 | Haben sie mit den Lieferanten Absicherungen, Verträge oder Zertifikate bezüglich: <ul style="list-style-type: none"> - Art; Menge und Grenze an Stör -und schadstoffen in den Kosubstraten - Höhe des TS-Gehalts - Störstoffe wie größere Klumpen - Wer hygienisiert die Substrate falls nötig - Was geschieht bei einem Lieferausfall / Kläranlagenstörung |
| 33 | Haben sie schon negative Erfahrungen mit Kosubstraten machen müssen, deren Schadstoffgehalte zu hoch waren? Wenn ja was waren das für Substrate? |

| | |
|----|--|
| 34 | <p>Wie wurde die Kofermentation bei ihnen eingeführt (Menge und Art der Kosubstrate)?</p> <p>z. B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Analyse der Kosubstrate auf mögliche Hemmstoffe wie hohe Salz- oder säuregehalte - Faulversuche von Instituten wie Bifa durchführen lassen - Erfahrungswerte aus anderen Kläranlagen - Simulation der Faulturmbiologie mit Programmen wie BIOTIP - Empirisch Schritt für Schritt durch eigene Versuche heran getastet |
| 35 | <p>Haben sie ansonsten schon negative Erfahrungen mit manchen Kosubstraten gemacht, wie z. B. :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Versäuerung (Azidose) des Fermenters - Zu hohe Schwefelwasserstoffgehalte - Störstoffe im Kosubstrat (Holz; Antibiotika; anorganische Bestandteile; große Klumpen) - Zu hohe Konzentrationen an Schwermetallen - Zu hohe Stickstoff-Rückbelastungen - etc... <p>Wenn ja, welche und was waren die Folgen und wie konnten die Folgen behoben werden?</p> |
| 36 | Welche Maßnahmen ergreifen sie zur Qualitätssicherung ihrer Kosubstrate? |
| 37 | Gibt es aus ihrer Erfahrung heraus besonders überwachungsbedürftige Parameter wie z.B. die Pufferkapazität oder die Konzentration an Schwermetallen? |
| 38 | Welche rechtlichen Genehmigungen wie z.B. BImSchG waren für sie zum Betreiben der Kofermentation nötig? |
| 39 | <p>Haben sie Substrate die eine gesonderte Genehmigung brauchen (z. B. vom Veterinäramt) bzw. auf Grund von Hygienevorschriften gesondert behandelt werden müssen? (z. B. Schlachtabfälle - Hygienisierung)</p> <p>Wenn Ja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Welche Substrate sind das? - Welche zusätzliche Genehmigung ist erforderlich? - Wie müssen diese Substrate behandelt werden? |