

# BIOGAS

aus festen Abfällen  
und  
Industrieabwässern

Eckdaten für  
PlanerInnen



|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| <b>Trägerorganisation</b>            | VSA, Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute                   |
| <b>Patronat</b>                      | ANS, SIA, STV  |
| <b>Verantwortliche<br/>Redaktion</b> | Werner Edelmann, arbi, Maschwanden<br>Hans Engeli, engeli engineering, Neerach |
| <b>PACER-Programmleitung</b>         | Arthur Wellinger, Infoenergie, Ettenhausen                                     |
| <b>Satz und Layout</b>               | Education Design Sepp Steibli, 3006 Bern                                       |

Die vorliegende Broschüre lehnt sich in verschiedenen Bereichen an die zuerst erschienene Publikation 724.231f «Digestion des déchets et effluents industriels et ménagers» an, welche durch ein Autorenteam unter der Leitung von Yves Membrez, Erep SA, Aclens, verfasst wurde.

ISBN 3-905232-59-6

Originalausgabe französisch: ISBN 3-905232-24-3

Copyright© Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, Februar 1996  
Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe erlaubt.

Zu beziehen bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, 3000 Bern  
(Bestellnummer 724.231 d)

Form. 724.231 d 2.96 1000 U30249

# Vorwort

Das Aktionsprogramm «Bau und Energie» ist auf sechs Jahre befristet (1990–1995) und setzt sich aus den drei Impulsprogrammen (IP) zusammen:

- IP BAU – Erhaltung und Erneuerung
- RAVEL – Rationelle Verwendung von Elektrizität
- PACER – Erneuerbare Energien

Mit den Impulsprogrammen, die in enger Kooperation von Wirtschaft, Schulen und Bund durchgeführt werden, soll der qualitative Wertschöpfungsprozess unterstützt werden. Dieser ist gekennzeichnet durch geringen Aufwand an nicht erneuerbaren Rohstoffen und Energie sowie abnehmende Umweltbelastung, dafür gesteigerten Einsatz von Fähigkeitskapital.

Im Zentrum der Aktivität von PACER steht die Förderung verstärkter Nutzung erneuerbarer Energien. Bis heute ist der Beitrag der erneuerbaren Energien, mit Ausnahme der Wasserkraft und trotz des beträchtlichen Potentials, sehr gering geblieben. Das Programm PACER soll deshalb

- die Anwendungen mit dem besten Kosten-/ Nutzenverhältnis fördern,
- den Ingenieuren, Architekten und Installateuren die nötigen Kenntnisse vermitteln,
- eine andere ökonomische Betrachtungsweise einführen, welche die externen Kosten (Umweltbelastung usw.) mit einbezieht, sowie
- Behörden und Bauherren informieren und ausbilden.

## **Kurse, Veranstaltungen, Publikationen, Videos usw.**

Umgesetzt werden sollen die Ziele von PACER durch Aus- und Weiterbildung sowie Information. Die Wissensvermittlung ist auf die Verwendung in der täglichen Praxis ausgerichtet. Sie baut hauptsächlich auf Publikationen, Kursen und Veranstaltungen auf. Zielpublikum sind vor allem IngenieurInnen, ArchitektInnen, InstallateurInnen sowie Angehörige bestimmter spezialisierter Berufszweige aus dem Bereich der erneuerbaren Energien. Die Verbreitung allgemeiner Information ist ebenfalls ein wichtiger Bestandteil des Programmes. Sie soll Anreize geben bei Bauherren, ArchitektInnen, IngenieurInnen und Behördenmitgliedern.

InteressentInnen können sich über das breitgefächerte, zielgruppenorientierte Weiterbildungsangebot in der Zeitschrift IMPULS informieren. Sie erscheint viermal jährlich und ist (im Abonnement, auch in französisch und italienisch) beim Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, gratis erhältlich. Jedem/r Kurs- oder VeranstaltungsteilnehmerIn wird jeweils eine Dokumentation abgegeben. Diese besteht zur Hauptsache aus der für den entsprechenden Anlass erarbeiteten Fachpublikation. Diese Publikationen können auch unabhängig von Kursbesuchen direkt bei der Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale (EDMZ), 3000 Bern, bezogen werden.

## **Zuständigkeiten**

Um das ambitionierte Bildungsprogramm bewältigen zu können, wurde ein Organisations- und Bearbeitungskonzept gewählt, das neben der kompetenten Bearbeitung durch SpezialistInnen auch die Beachtung der Schnittstellen sowie die erforderliche Abstützung bei Verbänden und Schulen der beteiligten Branchen sicherstellt. Eine aus VertreterInnen der interessierten Verbände, Schulen und Organisationen bestehende Kommission legt die

Inhalte des Programmes fest und stellt die Koordination mit den übrigen Aktivitäten zur Förderung der erneuerbaren Energien sicher. Branchenorganisationen übernehmen die Durchführung der Weiterbildungs- und Informationsangebote. Für deren Vorbereitung ist das Programmleitungsteam (Dr. Jean-Bernard Gay, Dr. Charles Filleux, Jean Graf, Dr. Arthur Wellinger, Irene Wuillemin, BfK) verantwortlich. Die Sachbearbeitung wird im Rahmen von Arbeitsgruppen erbracht, die inhaltlich, zeitlich und kostenmässig definierte Einzelaufgaben zu lösen haben.

**Dokumentation**

Die vorliegende Dokumentation «Biogas aus festen Abfällen und Industrieabwässern» soll in allgemeinverständlicher Form die Grundlagen der Vergärung wie auch detailliertere Angaben zum praktischen Einsatz von Gärprozessen vertiefen. Sie ergänzt die PACER-Publikation 724.230d «Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern» zum gleichen Thema, bei welcher jedoch die Schwerpunkte etwas anders gesetzt sind.

Wie im Untertitel ausgedrückt wird, soll die Broschüre Grundlagen und Eckdaten liefern, welche für PlanerInnen und BehördenvertreterInnen notwendig sind, um die generelle Machbarkeit von Gärprozessen abzuschätzen: LeserInnen müssten nach der Lektüre in der Lage sein, für einen bestimmten Fall die in Frage kommenden Technologien und die Dimensionierungsgrundlagen soweit anzugeben, dass die Kosten einer anaeroben Verwertung grob abgeschätzt werden können.

Die ersten Kapitel widmen sich – nach einem einleitenden Teil über den Einsatzbereich aerober und anaerober Verfahren – den Grundlagen der Gärtechnik, der Dimensionierung und der Verfahrenswahl. In einem zweiten Block wird den Produkten Biogas und Gärgut Aufmerksamkeit geschenkt. Im letzten Teil kommen Fragen zur Sprache, welche bei der Ausarbeitung eines Projekts wichtig sind.

Die Kosten für den Betrieb einer Anlage hängen nur zu einem relativ kleinen Teil von den Investitionskosten für den Gärtel ab; wichtig ist immer, auch das Umfeld, d.h. die Integration der Anlage in die lokale Situation zu berücksichtigen. Es wurde daher bei der Verfassung der Broschüre Gewicht darauf gelegt, nicht nur den eigentlichen Gärprozess vertieft zu beleuchten, sondern auch Fragen zu erörtern, die sich im weiteren Zusammenhang mit Planung, Bau und Inbetriebnahme einer Anlage ergeben, wie beispielsweise Gasverwertungsaspekte, Eingliederung der Vergärung in die Reststoffverwertung oder Umweltprobleme.

Die vorliegende Dokumentation lehnt an eine erste PACER-Publikation in französischer Sprache an. Sie ist jedoch sorgfältig überarbeitet und in sehr vielen Teilen ergänzt worden. Die Autoren hatten freie Hand, divergierende Ansichten zu einzelnen Fragen nach eigenem Ermessen zu beurteilen. Sofern Sie als LeserIn Anregungen oder Ergänzungen machen möchten, nimmt dies der verantwortliche Redaktor, Dr. W. Edelmann (Adressen siehe Anhang Seite 108), oder das Bundesamt für Konjunkturfragen gerne entgegen.

Für die wertvolle Mitarbeit zum Gelingen dieser Publikation sei an dieser Stelle allen Beteiligten bestens gedankt.

Februar 1996 Bundesamt für Konjunkturfragen  
 Prof. B. Hotz-Hart  
 Vizedirektor für Technologie

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Vorwort</b>                                      | <b>3</b>  |
| <b>1 Vergärbare Abfälle und Abwässer</b>            | <b>7</b>  |
| 1.1 Einleitung                                      | 9         |
| 1.2 Aerobe oder anaerobe Prozesse                   | 10        |
| 1.3 Einsatzbereiche anaerober Prozesse              | 11        |
| <b>2 Gärtechnik</b>                                 | <b>13</b> |
| 2.1 Biologische Grundlagen                          | 15        |
| 2.2 Betriebs- und Messgrößen                        | 17        |
| 2.3 Abfälle und Abwässer aus Industrie und Gemeinde | 22        |
| 2.4 Gärsysteme                                      | 24        |
| 2.5 Dimensionierungsgrößen                          | 32        |
| 2.6 Komponenten des Fermenters                      | 39        |
| 2.7 Vor- und Nachbehandlung                         | 42        |
| 2.8 Inbetriebnahme                                  | 47        |
| 2.9 Überwachung des Gärprozesses                    | 49        |
| <b>3 Verfahrenswahl</b>                             | <b>53</b> |
| 3.1 Einsatzbereiche einzelner Verfahren             | 55        |
| 3.2 Eventuell nötige Vorabklärungen                 | 57        |
| 3.3 Massenbilanz                                    | 61        |
| <b>4 Das Produkt Biogas</b>                         | <b>63</b> |
| 4.1 Eigenschaften von Biogas                        | 65        |
| 4.2 Biogasreinigung                                 | 71        |
| 4.3 Gasspeicherung                                  | 73        |
| 4.4 Verwertung von Biogas                           | 75        |
| <b>5 Verwertung der Gärprodukte</b>                 | <b>83</b> |
| 5.1 Feste biogene Abfälle                           | 85        |
| 5.2 Anaerob behandelte Abwässer                     | 86        |
| 5.3 Qualität des Gärguts als Dünger                 | 87        |
| <b>6 Ausarbeitung eines Projekts</b>                | <b>89</b> |
| 6.1 Die Vergärung als Glied der Reststoffbehandlung | 91        |
| 6.2 Umweltaspekte                                   | 96        |
| 6.3 Kosten und Nebenkosten                          | 97        |
| 6.4 Rechtliche Aspekte                              | 101       |

---

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| <b>Literaturhinweise</b> | <b>107</b> |
|--------------------------|------------|

---

|                  |                                  |     |
|------------------|----------------------------------|-----|
| <b>Beispiele</b> | <b>109</b>                       |     |
| Beispiel 1       | Industrieabwässer: Ostsaft       | 111 |
| Beispiel 2       | Industrieabwässer: Papier        | 115 |
| Beispiel 3       | Industrieabwässer: Zucker        | 118 |
| Beispiel 4       | Industrieabwässer: Kartoffeln    | 120 |
| Beispiel 5       | Feste Bioabfälle: Kombianlage    | 123 |
| Beispiel 6       | Feste Bioabfälle: Gäranlage      | 128 |
| Beispiel 7       | Landwirtschaftliche Co-Vergärung | 133 |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>Publikationen und Videos des Impulsprogrammes PACER</b> | <b>137</b> |
|--|------------|

---

# 1 Vergärbare Abfälle und Abwässer

---

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1.1</b> | <b>Einleitung</b>                         | <b>9</b>  |
| <b>1.2</b> | <b>Aerobe oder anaerobe Prozesse</b>      | <b>10</b> |
| <b>1.3</b> | <b>Einsatzbereiche anaerober Prozesse</b> | <b>11</b> |

---



## 1.1 Einleitung

Biogene Stoffe sind prinzipiell biologisch abbaubar. Unter biogenen Stoffen versteht man Material pflanzlicher oder tierischer Herkunft, wie sie unter anderem in separat gesammelten Haushaltsabfällen oder in organisch belasteten Abwässern vorkommen können. In der Biologie bestehen zwei grundsätzliche Abbauwege für biogenes Material: Der **aerobe Abbau** mit Hilfe von Luftsauerstoff sowie **anaerobe Abbauwege**, welche ohne Sauerstoffzufuhr funktionieren. Die Methanisierung oder Vergärung, von welcher dieses Buch handelt, ist ein anaerober Abbauweg. In diesem Fall entsteht beim Abbau das Biogas, ein hochwertiger erneuerbarer Energieträger.

Parallel zum materiellen Lebensstandard ist auch die Produktion von **festen Abfällen** gestiegen. Dies hat zur heute bekannten Abfallproblematik geführt, wo immer grössere Abfallmengen zu immer höheren Preisen entsorgt werden müssen. Mit der Entwicklung des ökologischen Bewusstseins hat sich das Kreislauf- und das Energiebewusstsein verstärkt. Heute wird daher die Forderung, die biogenen Abfälle separat zu erfassen und auch separat zu behandeln, vermehrt in die Tat umgesetzt. Auf Grund der technischen Verordnung Abfall, TVA, ist die flächendeckende Separatbehandlung von biogenen Abfällen in der Schweiz einzuführen. Für die Gemeinden hat dies den Vorteil, dass der noch in die Verbrennung gelangende Restmüll deutlich abnimmt. Allerdings müssen in gewissen Fällen zusätzliche Sammeltouren für biogene Abfälle eingeführt werden. Feste biogene Abfälle aus der Industrie, welche oft sortenrein anfallen, werden oft schon seit längerer Zeit separat verwertet, beispielsweise in der Tierernährung. Allerdings bestehen auch in der Industrie grössere Mengen von Abfällen, welche entsorgt werden müssen.

**Organisch belastete, industrielle Abwässer** werden heute noch relativ selten direkt auf dem Betrieb behandelt. Traditionellerweise gelangen diese Abwässer in die Kanalisation und werden mit kommunalen Abwässern verdünnt, bevor sie in der kommunalen Abwasserreinigung aerob behandelt werden. Bei einer separaten Behandlung vor Ort könnte ein deutlich höherer Frachtanteil eliminiert werden, da vor der Verdünnung ein grösserer Prozentsatz biologisch abgebaut werden kann. Da heute vermehrt frachtbezogene Abwassergebühren eingeführt werden, kann eine Abwasserbehandlung auf dem Industriebetrieb finanziell vorteilhaft sein. Zudem besteht in diesem Fall der Vorteil, dass für ein spezifisches Abwasser die geeignetste Behandlungstechnik eingesetzt werden kann: sehr oft können gewisse industrielle Inhaltsstoffe durch die aeroben Bakterien einer ARA nur ungenügend angegriffen werden, wären jedoch nach einer anaeroben Vorbehandlung deutlich besser abbaubar. Bei direkter Einleitung solcher Abwässer in die ARA hat eigentlich niemand einen Vorteil: Der Industriebetrieb zahlt unnötigerweise hohe Reinigungsgebühren, die ARA ist gestört und arbeitet mit schlechtem Wirkungsgrad, und die Umwelt erhält eine unerwünschte Fracht an organischen Stoffen.

Heute sind Techniken bekannt, um sowohl feste biogene Abfälle als auch organisch belastete Abwässer optimal vor Ort zu behandeln, was auch das vermehrte Schliessen ökologischer Kreisläufe ermöglicht (mit der biotechnologischen Behandlung der biogenen festen Abfälle kann beispielsweise ein grosser Anteil des schweizerischen Humusdefizits kompensiert werden). Das vorliegende Buch soll Informationen liefern, welche die Entscheidungsfindung bei der Wahl der optimalen Verwertungswege von biogenen Stoffen erleichtert. Es ergänzt die Publikation «Vergärung von häuslichen

Abfällen und Industrieabwässern», welche 1993 durch das Bundesamt für Konjunkturfragen bei der EDMZ in Bern publiziert wurde.

## 1.2 Aerobe oder anaerobe Prozesse

Sowohl aerobe wie auch anaerobe Prozesse weisen ihre Vorteile auf. Je nach Eigenschaften der Ausgangsmaterialien kann der eine oder der andere Abbauweg oder aber eine Kombination von beiden ins Auge gefasst werden. Zwischen dem aeroben und dem anaeroben Abbau bestehen **prinzipielle Unterschiede**:

Erstens unterscheiden sich die beiden Abbauwege in der **Energiebilanz**. Der aerobe Abbau benötigt eine grosse Energiemenge zur Belüftung des Substrates. Beim Abbau selbst – welcher ja ein biologischer Verbrennungsprozess ist – wird sehr viel Energie frei. Leider fällt diese Energie jedoch auf einem sehr tiefen Temperaturniveau (maximal 60–70 °C) an, so dass die Energie nur in ganz wenigen Ausnahmefällen genutzt werden kann. Beim anaeroben Abbau wird keine biologische Prozesswärme frei. Das Substrat muss allenfalls auf Gärtemperatur erwärmt werden. Hingegen entsteht Biogas, welches ein hochwertiger Energieträger ist, der zu Strom und Wärmeproduktion wie auch zum Antrieb von Motoren eingesetzt werden kann. Während beim aeroben Abbau netto viel Energie aufgewendet werden muss, wird beim anaeroben Abbau netto viel Energie zur Nutzung frei.

Ein zweiter wesentlicher Unterschied betrifft die **Abbauprodukte**: Beim aeroben Abbau wird neben CO<sub>2</sub> und Wasser relativ viel Biomasse gebildet, was zu einem höheren Schlammaufkommen führt als beim anaeroben Abbau. Beim anaeroben Abbau sind die Hauptprodukte das brennbare Methan sowie Kohlendioxyd. Bakterienbiomasse, welche allenfalls als Schlamm entsorgt werden muss, entsteht anaerob nur wenig.

Ein dritter Unterschied betrifft **die am Abbau beteiligten Phasen**: Beim aeroben Abbau sind meist drei Phasen beteiligt, nämlich: 1.) die zu einem grossen Teil festen biogenen Partikel, welche abgebaut werden müssen, 2.) die Flüssigkeit, in welcher die Mikroorganismen leben, sowie 3.) die Gasphase, welche den lebensnotwendigen Sauerstoff enthält. Die anaeroben Bakterien benötigen zum Abbau keine gasförmigen Stoffe als Ausgangsmaterial; die festen Partikel werden in der flüssigen Phase umgewandelt, wobei das dabei entstehende Biogas ein Produkt ist, d.h. nicht ein für den Abbau notwendiges Edukt. In der Regel ist ein Zweiphasenprozess spürbar einfacher zu steuern als ein Dreiphasenprozess.

Ein letzter Unterschied besteht wahrscheinlich noch im **technischen Aufwand**: Da für die Vergärung isolierte, gasdichte Behälter sowie Infrastruktur für die Gasverwertung notwendig sind, ist der technische Aufwand tendenziell grösser als bei Anlagen für den aeroben Abbau. Andererseits wird besonders bei der Behandlung von festen Abfällen für den anaeroben Abbau deutlich weniger Platz beansprucht, was sich positiv auf die Investitionskosten auswirkt.

Generell kann gesagt werden, dass speziell auch dann anaerobe Techniken gewählt werden sollten, wenn grosses Gewicht auf die Volumenreduktion der Reststoffe sowie auf die Erzeugung und Nutzung von erneuerbarer Energie gelegt werden soll.

### 1.3 Einsatzbereiche anaerober Prozesse

Die Tabelle 1 veranschaulicht, in welchen Bereichen anaerobe Abbauprozesse zum Einsatz gelangen können.

| Betriebszweig                               | Vergärbare feste Abfälle  | Vergärbare Abwässer   |
|---|---|---|
| <b>Kommunale Entsorgung</b>                 | Organische Fraktion der Haushaltsabfälle<br>Garten- und Landschaftspflegeabfälle (Rasen- und Grasschnitt, Laub, Wasserpflanzen)<br>Nasses Papier<br>Restaurationsabfälle<br>Früchte- und Gemüseabfälle aus dem Handel und Gewerbe | Klärschlamm   |
| <b>Lebensmittelindustrie</b>                |   |   |
| • Milchverarbeitung                         |   | Molke, Betriebsabwässer   |
| • Zuckerindustrie                           | Zuckerrüben-Presskuchen   | Wasch-, Press- und Betriebsabwässer                                   |
| • Brennereien                               | Schlempe  | Schlempe, Hefe  |
| • Schlachthöfe                              | Panseninhalt  | diverse Betriebsabwässer  |
| • Fruchtsaftindustrie                       | Fruchtrückstände, Schlämme  | Wasch- und Transportabwässer  |
| • Brauereien                                | Mälzerei- und Braurückstände (Treber)   | Wasch-, Reinigungs- und Kühlabwässer                                  |
| • Kartoffelindustrie                        | Schälbrei, Waschschlämme, Verarbeitungsreste  | Wasch-, Transport-, Press- und Reinigungsabwässer                     |
| • Konservenindustrie                        | Produktionsabfälle  | Wasch- und Bleichabwässer   |
| • Weinbau und -herstellung                  | Traubentrester  | Schlempe  |
| • Fett-, Öl- und Margarineherstellung       | Filtrationsrückstände   | Wasch- und Extraktionsabwässer  |
| • Tee- und Kaffeeherstellung                | Extraktionsrückstände und Kaffeesatz  |   |
| <b>Andere Industrien</b>                    |   |   |
| • Pharmazeutische und kosmetische Industrie | Extraktionsrückstände   | Kulturbrühen, Mycelschlämme, Waschabwässer                            |
| • Papierindustrie                           |   | Produktionsabwässer aus der Zellstoff-, Papier- und Kartonherstellung |

Tabelle 1:  
Einsatzbereiche anaerober  
Prozesse

Auf Grund einer Reihe von **Beurteilungskriterien** kann beurteilt werden, ob ein Abwasser oder ein Abfall sinnvoll vergoren werden kann. Es handelt sich in erster Näherung um folgende Einflussgrößen, welche weiter hinten im Buch noch im Detail besprochen werden:

Die **Temperatur** des Ausgangsmaterials spielt insofern eine Rolle, als Gäranlagen normalerweise bei rund 35 °C, unter Umständen sogar bei rund 57 °C betrieben werden. Sofern die Abfälle und Abwässer bereits auf einem hohen Temperaturniveau anfallen, ist dies natürlich vorteilhaft. Für das Aufheizen kalt anfallender Abwässer oder Abfälle muss ein entsprechender Teil der erzeugten Energiemenge eingesetzt werden. Die biogenen Ausgangsmaterialien sollten, damit der bakterielle Gärprozess optimal ablaufen kann, genügend **Nährstoffe und Spurenelemente** aufweisen. Allgemein wird ein Verhältnis von C : N : P von etwa 100–200 : 4 : 1 empfohlen. Weitere Elemente, wie Na, K und Ca, sowie Spurenelemente, wie Fe, Zn, Cu, Mg usw., beeinflussen den Abbauvorgang.

Die **Konzentration der organischen Inhaltsstoffe**, ausgedrückt als Fracht in Form von CSB (chemischem Sauerstoffbedarf) oder OS (organischer Substanz; vgl. unten), beeinflusst die Verfahrenswahl wesentlich: Anaerobe Bakterien bevorzugen hohe Substratkonzentrationen, wo sie sich mit relativ wenig (energetischem) Aufwand mit Nahrung versorgen können. Anaerobe Prozesse eignen sich daher speziell für mittel- und hochbelastete Substrate mit (sehr) hohen CSB-Konzentrationen zwischen einigen und einigen Dutzend Gramm pro Liter. Unterhalb von 2 g/l werden vorteilhaft aerobe Mikroorganismen eingesetzt. Aerobe Prozesse können daher speziell gut zur Nachreinigung anaerob vorgereinigter Substrate eingesetzt werden.

Ein wichtiger Punkt für die Verfahrenswahl ist der Gehalt an **suspendierten Feststoffen**. Generell kann gesagt werden, dass bei mehr als 10% suspendierten Feststoffen anaerobe Hochleistungsprozesse zur Flüssigvergärung nur noch sehr beschränkt zum Einsatz kommen können. Substrate mit höheren Feststoffgehalten werden vorteilhaft konventionell vergoren, d.h. bei relativ langer Verweilzeit im Fermenter und entsprechend niedrigerer Faulraumbelastung behandelt.

Ebenfalls zu beachten ist der Gehalt an potentiellen **Hemmstoffen**, welche unter Umständen in gewissen Industrieabwässern vorkommen können und welche entweder eine entsprechende Adaptation der Bakterien und/oder eine Vorbehandlung des Abwassers erfordern.

Bei der **Vergärung fester biogener Abfälle** ist der Trockensubstanzgehalt wichtig: Gärprozesse sind besonders interessant bei Feststoffgehalten zwischen rund 25 und 35% Trockensubstanzgehalt. Zu beachten ist, dass stark lignifizierte Substrate anaerob nicht oder nur unbedeutend abgebaut werden. Substrate mit mehr als 40% Trockensubstanzgehalt sind für die Vergärung zu trocken und müssen entsprechend befeuchtet werden.

## 2 Gärtechnik

---

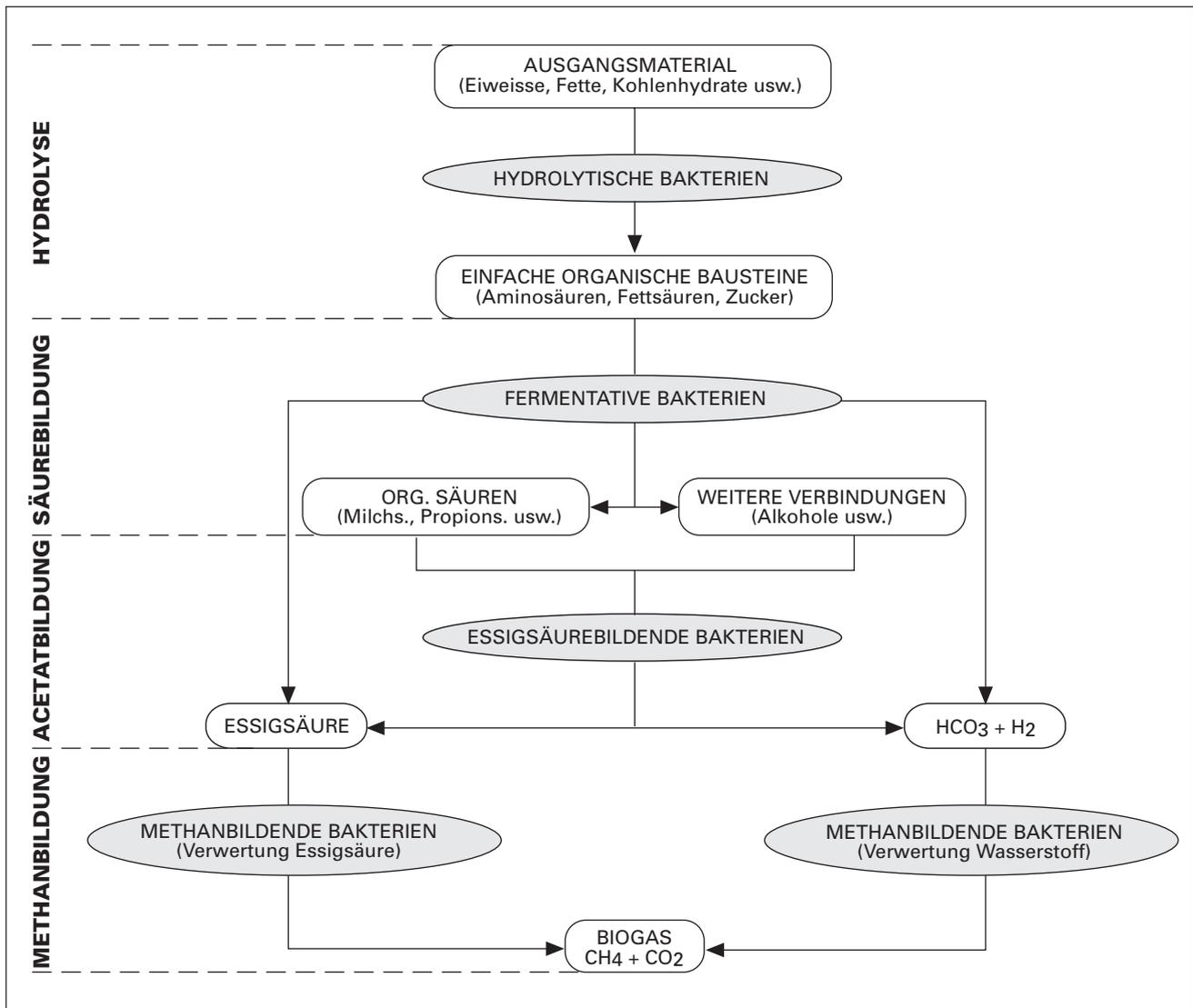
|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>2.1</b> | <b>Biologische Grundlagen</b>                          | <b>15</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Betriebs- und Messgrößen</b>                        | <b>17</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Abfälle und Abwässer aus Industrie und Gemeinde</b> | <b>22</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Gärsysteme</b>                                      | <b>24</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Dimensionierungsgrößen</b>                          | <b>32</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Komponenten des Fermenters</b>                      | <b>39</b> |
| <b>2.7</b> | <b>Vor- und Nachbehandlung</b>                         | <b>42</b> |
| <b>2.8</b> | <b>Inbetriebnahme</b>                                  | <b>47</b> |
| <b>2.9</b> | <b>Überwachung des Gärprozesses</b>                    | <b>49</b> |

---



## 2.1 Biologische Grundlagen

Im Gegensatz zum aeroben Abbau, wo auch einzellige Organismen und Mehrzeller beteiligt sein können, erfolgt **der anaerobe Abbau ausschliesslich durch Bakterien**. Es sind dabei **verschiedene Bakteriengruppen** beteiligt, welche in Serie einzelne Teilschritte des Abbaus vollziehen und aufeinander angewiesen sind. In Figur 2 sind die einzelnen Teilschritte des Abbaus schematisch dargestellt. Aerobe Organismen sind im Gegensatz dazu für sich allein in der Lage, komplexe Ausgangsmaterialien bis hin zu den Endprodukten  $\text{CO}_2$  und Wasser abzubauen.



Figur 1:  
Der biologische Weg des anaeroben Abbaus von organischem Material zu Biogas

Die einzelnen Bakteriengruppen des anaeroben Abbaus haben – unter anderem auch in Abhängigkeit des verwendeten Ausgangsmaterials – zum Teil ganz **unterschiedliche Wachstumsgeschwindigkeiten**. Dies hat zur Folge, dass die Geschwindigkeit des Gesamtabbaus durch die jeweils am langsamsten wachsende Bakteriengruppe limitiert wird.

Wie in Figur 2 dargestellt, werden in einem ersten Schritt, oft auch **Hydrolyse** genannt, polymere und komplexe Moleküle durch hydrolytische und fermentative Bakterien in eine ganze Reihe niedermolekularer Verbindungen umgewandelt (Monomere, niedere Fettsäuren, Milchsäure, Alkohole usw.). Die prozentuale Zusammensetzung dieser Zwischenprodukte wird beeinflusst durch den **Wasserstoffpartialdruck**: Bei tiefen Wasserstoffkonzentrationen wird bereits jetzt viel Essigsäure gebildet, während ein höherer Partialdruck die Bildung von Propion-, Butter- und Milchsäure sowie Aethanol bewirkt.

In einem zweiten Schritt, der sogenannten **Essigsäurebildung**, werden die Reaktionsprodukte der ersten Gruppe in die Vorläuferstoffe von Biogas, nämlich in Essigsäure, CO<sub>2</sub> und Wasserstoff, umgewandelt. Dem Wasserstoff kommt bei dieser Reaktion eine Schlüsselrolle zu, denn nur bei sehr tiefen Wasserstoffpartialdrücken können beispielsweise Reaktionsprodukte wie Propion- oder Buttersäure noch mit einem kleinen Energiegewinn in Essigsäure umgewandelt werden.

In der nun folgenden dritten Stufe, der **Methanbildung**, entsteht durch die eigentlichen Methanbakterien das Biogas. Rund 70% des Biogases wird durch die Spaltung von Essigsäure in CO<sub>2</sub> und CH<sub>4</sub> gebildet; rund 30% entsteht durch die Verbindung von Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zu CH<sub>4</sub> und Wasser. Die Methanbildung ist sehr eng an den Abbau von Propionsäure geknüpft, da die Methanbildner dafür sorgen müssen, dass der Wasserstoffpartialdruck nicht zu hoch wird, indem sie den Wasserstoff laufend zu Methan umsetzen. Alle Methanbildner können aus H<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> Biogas erzeugen. Die Bildung von Biogas aus Essigsäure ist energetisch ungünstiger; sie kann daher nur von einem Teil der methanbildenden Bakterien bewerkstelligt werden. Trotzdem entsteht der grössere Teil des Biogases aus Essigsäure.

Alle drei erwähnten Prozesse laufen in einer Biogasanlage gleichzeitig, jedoch oft nicht mit gleicher Geschwindigkeit, ab. Der **geschwindigkeitsbestimmende Schritt** der Biogasbildung ist normalerweise die Hydrolyse. Speziell Zellulose und Hemizellulose, welche in biogenen Abfällen normalerweise recht häufig vorkommen, sind durch die Bakterien nur langsam zu hydrolysieren. Sofern grosse Mengen an leicht abbaubaren Verbindungen vorliegen, wie beispielsweise in gewissen Abwässern von Brennereien oder Molkereien sowie in gewissen Küchenabfällen, kann die Methanbildung zum geschwindigkeitsbestimmenden Schritt werden, da sich die Säurebildner in diesem Fall relativ rasch vermehren. Es ist dann darauf zu achten, dass nicht zuviel Material in den Reaktor gegeben wird, da sonst durch die hydrolytischen Bakterien ein Übermass an Säuren produziert wird, welche den pH-Wert auf eine ungünstige Grösse absinken lassen. Durch diese Versauerung wird die Methanbildung verlangsamt, was zu einer zusätzlichen Anhäufung von Säuren führt; dies bewirkt schliesslich, dass der Prozess zum Erliegen kommt. Im Falle von solchen Wachstumsstörungen muss normalerweise die Zufuhr von Frischmaterial vorübergehend eingestellt oder zumindest reduziert werden. (Daher ist speziell bei sehr leicht abbaubaren Substraten ein By-Pass um den Fermenter vorteilhaft.)

Der Holzbestandteil **Lignin** ist durch anaerobe Bakterien **nicht abbaubar**. Neben Lignin jedoch bestehen nur sehr wenige organische Verbindungen, welche dem anaeroben Abbau nicht zugänglich sind.

## 2.2 Betriebs- und Messgrößen

### Temperatur

Weil die anaeroben Bakterien mit nur sehr wenig Betriebsenergie auskommen müssen, wird beim anaeroben Abbau keine Wärme frei. Höhere Temperaturen ermöglichen jedoch generell schnellere Abbauzeiten. Man unterscheidet **psychrophile** Bakterien, welche in einem Temperaturbereich bis etwa 25 °C gedeihen, **mesophile** Bakterien, welche ein Temperaturoptimum um rund 35 °C aufweisen und **thermophile** Stämme, welche ein Optimum um rund 57 °C besitzen. Obwohl auch am Seegrund bei 4 °C anaerobe Abbauprozesse ablaufen, kommen so tiefe Temperaturen für technische Prozesse nicht in Frage, da die Abbauvorgänge dort äusserst langsam ablaufen. Zwischen den beiden Optima der mesophilen und thermophilen Bakterienstämme besteht bei rund 45 °C ein Temperaturbereich, wo die Abbauprozesse ebenfalls ungünstig verlaufen.

Für technische Prozesse werden vor allem mesophile und thermophile Stämme eingesetzt. Da beim Prozess keine Wärme entsteht, muss das Substrat **auf Gärtemperatur aufgeheizt** werden. Die Wahl des Temperaturbereichs hängt unter anderem davon ab, wie hoch der Wassergehalt des Substrats ist. Wenn das Substrat kühl ist und viel Wasser – welches kein Biogas liefert – enthält, ist eine hohe Gärtemperatur nicht sinnvoll, da sonst ein zu grosser Anteil des produzierten Gases als Prozessenergie aufgewendet werden muss. Für feste Abfälle hingegen, welche relativ wenig Wasser aufweisen, kann der thermophile Abbau vorteilhaft sein, insbesondere auch, weil bei thermophiler Temperatur Krankheitserreger und Unkrautsamen besser vernichtet werden. Für dünne Substrate kann ein thermophiler Prozess beispielsweise dann interessant sein, wenn ein industrielles Abwasser bereits auf einem sehr hohen Temperaturniveau anfällt. In Tabelle 2 sind einige Vor- und Nachteile mesophiler und thermophiler Vergärung aufgelistet.

| Mesophile Vergärung   | Thermophile Vergärung                              |
|---|--|
| kleinerer Wasserdampfgehalt des Gases   | schnellere Wachstumsraten                          |
| weniger CO <sub>2</sub> im Gas (da CO <sub>2</sub> besser in der Flüssigkeit gelöst bleibt) | daher kürzere Verweilzeit                          |
| in der Regel bessere Energiebilanz  | bessere Abtötung von pathogenen Keimen             |
| grössere Vielfalt der Organismen  | Reduktion des Schlammvolumens                      |
| und daher grössere Stabilität der Biozönose   | schlechtere Löslichkeit von Sauerstoff im Substrat |
| Möglichkeiten, Niedertemperaturabwärme zur Prozessheizung einzusetzen                       | daher schnelles Erreichen anaerober Bedingungen    |

Tabelle 2:  
Vorteile von mesophiler und thermophiler Vergärung

### pH und Alkalinität

Der **optimale pH-Bereich** für die Methanbildung liegt zwischen rund 7 und 7.5. Biogas kann auch noch knapp unter- und oberhalb dieses Bereiches gebildet werden. Bei den einstufigen Verfahren (vgl. weiter unten) stellt sich in der Regel automatisch ein pH-Wert im optimalen Bereich ein, da die Bakteriengruppen ein selbstregulierendes System bilden. Beim Zweistufen-Prozess ist der pH-Wert in der Hydrolysestufe normalerweise zwischen

5 und 6.5, da die säurebildenden Bakterien in diesem Bereich ihr Optimum aufweisen. Bei einem pH-Wert von rund 4.5 hemmen die hydrolytischen und säurebildenden Bakterien ihr eigenes Wachstum durch ihre eigenen Ausscheidungsprodukte. Der pH-Wert wird in der methanogenen Stufe normalerweise dank der Pufferkapazität des Mediums wieder in den neutralen Bereich angehoben.

Ein Absinken des pH-Wertes führt zu einem **Aufschauklungsprozess**: Weil bei tieferen pH-Werten die methanogenen Bakterien nicht mehr arbeiten können, häufen sich Säuren zusätzlich an, was zu einem weiteren Absinken des pH-Wertes führt. Der Reaktor versauert dann. Sobald erste Zeichen einer Versauerung sichtbar werden (Ansteigen der Propionsäurekonzentration usw.), muss die Substratzufuhr gedrosselt oder eingestellt werden, um den methanogenen Bakterien zu ermöglichen, zunächst einmal die bereits vorhandenen Säuren abzubauen und so wieder günstigere Lebensbedingungen zu schaffen.

Durch das beim Abbau freigesetzte CO<sub>2</sub> wird der pH-Wert im Neutralbereich gepuffert: Das CO<sub>2</sub> ist im Gleichgewicht mit Hydrogencarbonat, welches in Konzentrationen von 2.5 bis 5 g/l stark puffernd wirkt. Konzentrationen von weniger als 1.5 g/l Hydrogencarbonat führen normalerweise zu einem Absinken des pH-Wertes.

### Redoxpotential

Lebensprozesse sind immer mit Redoxreaktionen verbunden. Für das Gedeihen von Methanbakterien sind **tiefe Redoxpotentiale** erforderlich; bei Reinkulturen sind Potentiale von -300 bis -330 Millivolt optimal. In einem Fermenter können die Potentiale jedoch deutlich höher sein (im Extremfall bis zu maximal 0 Millivolt). Um tiefe Potentiale zu gewährleisten, ist es sinnvoll, dem Fermenter möglichst wenig Oxydationsmittel zuzuführen. Neben Sauerstoff sind dies insbesondere Sulfate, Nitrate und Nitrite.

### Hemmstoffgehalt

In seltenen Fällen können gewisse Substanzen für den Gärprozess hemmend wirken. Die Hemmung ist abhängig von der Konzentration des oder der Hemmstoffe, der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials sowie der Anpassung der Bakterien an den Hemmstoff. In Tabelle 3 sind Hemmstoffe und deren kritische Konzentrationen zusammengefasst.

Über die **maximal zulässigen Konzentrationen** von toxischen Stoffen wurden sehr viele, zum Teil sehr widersprüchliche Daten publiziert. Unterschiedliche Beobachtungen können darauf zurückgeführt werden, dass sich unterschiedliche Bakterienpopulationen unterschiedlich gut an einzelne Hemmstoffe anpassen können. Je nach Fermentertyp, Fahrweise und Wechselwirkungen mit anderen Inhaltsstoffen der Substrate können unterschiedliche Grenzkonzentrationen beobachtet werden. In diesem Sinn hat Tabelle 3 nur indikativen Charakter. Es ist sinnvoll, folgende Überlegungen zu berücksichtigen:

### Adaptationszeit:

Wie alle Lebewesen sind auch die anaeroben Bakterien sensibel auf gewisse hemmende Stoffe. Der überwiegende Teil dieser Hemmstoffe jedoch zeigt normalerweise nur eine reversible Wirkung, welche nach einer gewis-

|                                      |  |  |   |
|--------------------------------------|--|--|---|
| <b>Natrium</b>                       | Regulierung des pH der methanogenen Bakterien; kann zwischen 6 und 30 g/l hemmen; angepasste Populationen ertragen bis zu 60 g/l; Wechselwirkung möglich mit Kalium.   | <b>Petrochemische Produkte</b>             | Bei unadaptierten Systemen bereits Hemmungen ab 0.1 mM Kohlenwasserstoffen, aromatischen und halogenisierten Verbindungen usw.. Adaptierte Biozönosen hingegen bauen petrochemische Produkte sehr gut ab, z.B. 1 g/l Phenol.  |
| <b>Kalium</b>                        | Regulierung der Osmose der Methanbakterien; hemmend ab 3 g/l, Wechselwirkung mit Natrium und Ammonium.   | <b>Cyanid</b>                              | Hemmend ab 5 mg/l; angepasste Gemeinschaften tolerieren bis zu 30 mg/l.   |
| <b>Calcium</b>                       | hemmend ab 2.8 g/l CaCl <sub>2</sub> ; Wechselwirkung mit langkettigen Fettsäuren.   | <b>Chlorierte Verbindungen</b>             | Anpassung an Chloroform möglich bis zu 40 mg/l; Chlorfluorkohlenwasserstoffe und andere halogenierte kleine Verbindungen toxisch im Bereich um 50 mg/l.   |
| <b>Magnesium</b>                     | hemmend ab 2.4 g/l MgCl <sub>2</sub> ; Wechselwirkung mit Fettsäuren.  | <b>Formaldehyd</b>                         | Für nicht adaptierte Kulturen ab 100 mg/l hemmend; Adaptation möglich bis zu 1200 mg/l.   |
| <b>Ammonium</b>                      | im Gleichgewicht mit Ammoniak (je nach pH-Wert); hemmend zwischen 2.7 und 10 g/l; adaptierte Kulturen können bei relativ tiefem pH-Wert bis zu 30 g/l ertragen; Ammoniak ab 0.15 g/l hemmend; Wechselwirkung je nach Organismen mit Ca <sup>2+</sup> oder Na <sup>+</sup> .  | <b>Wasserstoff</b>                         | Zusammenhang mit der Akkumulierung und dem Abbau von niederen Fettsäuren: Für den Propionsäureabbau sind möglichst tiefe Konzentrationen erwünscht. Grenzwert je nach Bedingungen bei rund 1 µM/l (~ 1.3 g/l im Gas).   |
| <b>Schwefel</b>                      | Schwefelverbindungen hemmend ab 50 mg/l H <sub>2</sub> S, 100 mg/l S <sup>2-</sup> und 160 mg/l Na <sub>2</sub> S; adaptierte Kulturen können bis zu 600 mg/l Na <sub>2</sub> S und 1000 mg/l Schwefelwasserstoff ertragen; Fällung in Anwesenheit von gewissen Metallionen. Ebenfalls hemmend können Thio-Brücken wirken, wobei die Hemmschwellen je nach Substanz recht verschieden sein können.                 | <b>Kohlensäure</b>                         | Kritisch für den Propionatabbau. Hemmung spätestens bei 1 bar CO <sub>2</sub> -Partialdruck.  |
| <b>Schwermetalle als freie Ionen</b> | Nickel ab 10 mg/l; Kupfer ab 40 mg/l; Chrom ab 130 mg/l; Blei ab 340 mg/l; Zink ab 400 mg/l. In Carbonatform: Zink ab 160 mg/l, Kupfer ab 170 mg/l, Kadmium ab 180 mg/l, Chrom <sup>3+</sup> ab 530 mg/l; Eisen ab 1750 mg/l. 1 bis 2 mg/l Sulfid kann rund 1 mg/l Schwermetall durch Fällung neutralisieren. Möglichkeit der Elimination von Kupfer, Kadmium, Blei und Zink durch Polyphosphate (Komplexbildner). | <b>Aethen und Terpen</b>                   | Ungefähr 50 mg/l Öl von Zitrusfrüchten kann hemmend wirken; Schwelle bei ca. 1 mg/l.  |
| <b>Verzweigte Fettsäuren</b>         | Schon ab 50 mg/l Iso-Buttersäure hemmend.  | <b>Stickoxyde, Nitrat, Nitrit</b>          | werden im anaeroben Milieu normalerweise denitrifiziert.  |
| <b>Höhere Fettsäuren</b>             | Der Abbau ist von der Anwesenheit von freien Calciumionen abhängig; kleine Mengen von altem Fritieröl kann die Gasproduktion drastisch erhöhen; Hemmungen jedoch ab 1.2 mM C <sub>12</sub> und C <sub>18</sub> beobachtet.   | <b>Aromatische Aminosäuren</b>             | L-Dopa kann wahrscheinlich zu Hemmungen führen (z.B. Abwasser Kartoffelverarbeitung); Wechselwirkung mit Fettsäuren, Adaptation möglich.  |
|                                      |  | <b>Desinfektionsmittel und Antibiotika</b> | (letztere werden oft in der Landwirtschaft als Futterzusatz eingesetzt): Können hemmend in Bereichen ab rund 1–100 mg/l wirken – müssen aber nicht, da die anaeroben Bakterien nicht auf alle Antibiotika ansprechen (z.B. wirkt Penicillin nur auf die Zellwandsynthese von <i>aeroben</i> Bakterien). |

Tabelle 3:  
Angaben zu Hemmstoffen

sen Adaptationszeit wieder verschwindet. Wie schnell die Anpassung vor sich geht, hängt von der ursprünglich vorhandenen Biozönose ab.

#### Art der Zugabe:

Die Zugabe eines Hemmstoffes hat nicht die gleichen Konsequenzen für den Betrieb eines Fermenters, je nachdem, ob sie punktuell oder chronisch

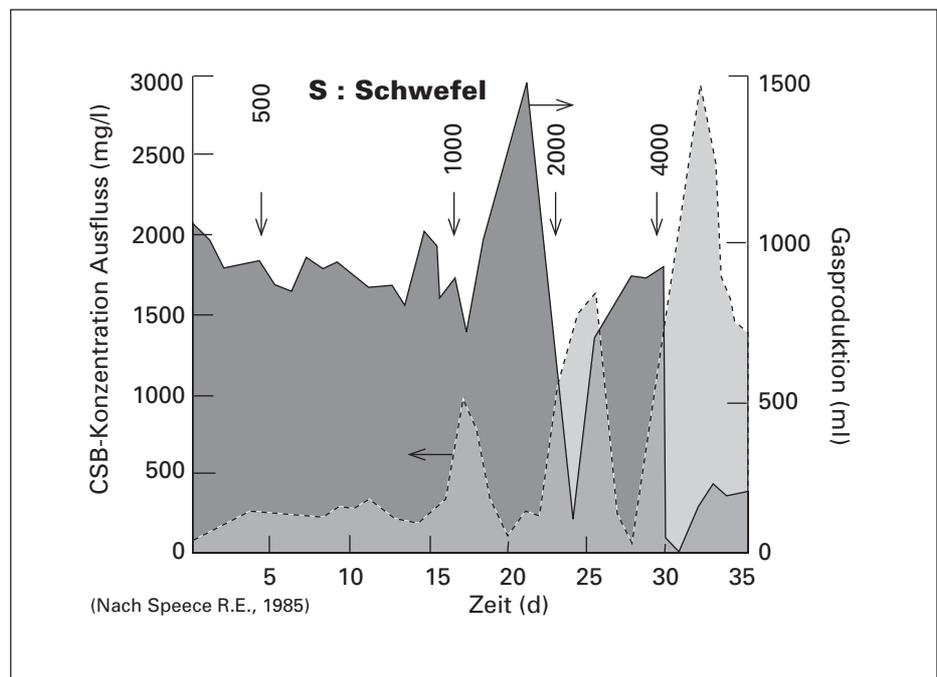
erfolgt. Bei einer unter Umständen zufälligen, punktuellen Art der Zugabe entsteht nur dann ein irreversibler Schaden, wenn die Expositionszeit genügend lang und die Konzentrationen genügend hoch waren.

**Fermentertyp:**

Fermenter mit zurückgehaltener Biomasse (Filter, UASB usw.) sind im allgemeinen weniger anfällig auf toxische Substanzen als konventionelle Fermenter, welche eine kleinere Biomassekonzentration aufweisen. Konventionelle, vollständig durchmischte Reaktoren weisen andererseits eine längere hydraulische Verweilzeit auf, was zur Folge hat, dass Giftstöße stärker verdünnt werden und so weniger Wirkung zeigen. Bei immobilisierter Biomasse dringt die Giftwirkung normalerweise bei kurzer Exposition nicht bis in die Tiefen der Bakterienagglomerate.

**Antagonismen/Synergismen:**

Die Wirkung verschiedener Hemmstoffe wird durch die Anwesenheit von anderen Komponenten, d.h. durch antagonistische oder synergistische Effekte beeinflusst. So hängt beispielsweise die hemmende Wirkung von Schwermetallen davon ab, welche Anionen gleichzeitig vorhanden sind, da gegebenenfalls die Metalle ausgefällt oder in Komplexen gebunden werden können. Metalle werden etwa in Anwesenheit von Schwefelwasserstoff ausgefällt. Zu hohe Sulfid-Ionenkonzentrationen andererseits können je nach Temperatur und pH-Wert selbst wieder toxisch wirken. Die Reduktion eines Schadstoffes durch Zugabe eines antagonistisch wirkenden Stoffes kann daher infolge verschiedener Wechselbeziehungen nicht sehr einfach sein.



Figur 2:  
Adaptation einer Gäranlage  
an Schwefelbelastung  
(Quelle: Speece)

Figur 2 zeigt die **Adaptation einer Gäranlage** an eine zunehmend hohe Belastung mit Schwefel. Bei jeder Zugabe sinkt zunächst die Gasproduktion und steigt entsprechend der CSB im Ausfluss. Diese Störung wird jedoch im Verlauf einiger Tage (oder Wochen) wieder behoben, so dass nach einem sorgfältigen Einfahren einer Anlage Konzentrationen toleriert werden, welche zu Beginn den Prozess zum Erliegen gebracht hätten.

Ganz allgemein kann festgehalten werden, dass **anaerobe Prozesse** gegenüber Hemmstoffen **relativ unempfindlich** sind und dass in einem grossen Teil der Fälle eine Anpassung auch an ursprünglich toxische Konzentrationen möglich ist.

### Gaszusammensetzung:

Die **Gaszusammensetzung**, das heisst in erster Linie das Verhältnis von Kohlendioxyd und Methan, ist nur bedingt beeinflussbar: der **Methan-gehalt** hängt ab von:

- der **Zusammensetzung des Ausgangsmaterials**: fettreiches Material gibt – sofern es nicht in allzu grossen Mengen vorhanden ist – pro Masse beispielsweise mehr und besseres Gas als Kohlenhydrate oder Eiweisse. Leicht abbaubare Komponenten müssen für den Abbau möglichst zugänglich sein: wenn sie in Ligninstrukturen eingebettet sind, kann die Art des Substrataufschlusses eine Rolle spielen (Zerreissen und Zerfasern ist in der Regel besser als Zerschneiden usw.).
- dem **Wassergehalt des Gärguts**: je dünnflüssiger der Fermenterinhalt ist, desto mehr CO<sub>2</sub> wird im Wasser gelöst, d.h. desto mehr Methan ist im Biogas.
- der **Gärtemperatur**: je höher die Gärtemperatur, desto weniger CO<sub>2</sub> wird im Wasser gelöst, d.h. der CO<sub>2</sub>-Anteil im Gas steigt bei einer allerdings grösseren totalen Gasmenge infolge von zusätzlichem CO<sub>2</sub>.
- dem **Druck im Fermenter**: je höher der Druck, desto mehr CO<sub>2</sub> wird im Wasser gelöst, d.h. desto besser das Biogas; es könnte sich auf die Gasqualität leicht positiv auswirken, wenn Material vom Fermentergrund ausgetragen wird und so etwas mehr CO<sub>2</sub> mit dem Austrag nach aussen gelangt.
- der **Aufenthaltszeit**: je länger die Aufenthaltszeit, desto besser erfolgt der Abbau. In späten Abbauphasen, wenn die (v.a. CO<sub>2</sub> freisetzende) Hydrolyse abklingt, entsteht überproportional viel Methan, d.h. deutlich besseres Biogas.
- der **Aufenthaltszeitverteilung**: je besser das Pfropfstromverhalten, desto kleiner ist die Gefahr, dass ein Teil des Materials nur die CO<sub>2</sub>-bildende Hydrolyse durchläuft und dann als unabgebaute Fettsäuren ausgetragen wird, bevor das Methan entstanden ist; d.h. je besser das Pfropfstromverhalten, desto besser die Gasqualität.
- der **Animpfung**: je besser und homogener das eintretende Material bereits angeimpft wird, desto schneller beginnt der Gärprozess überall, d.h. desto besser wird der Abbau und desto besser wird damit die Gasqualität mit der Methanbildung in der zweiten Phase des Prozesses. Es ist zu bedenken, dass fünf Zentimeter für ein Bakterium eine Weltreise darstellen können und dass bei der langsamen Verdopplungszeit sehr viel Zeit verstreichen kann, bis im Innern von nicht angeimpften Paketen der Gärprozess einsetzt. Ohne Animpfen wird die Verweilzeit, während welcher die Gärung effektiv abläuft, speziell bei der Feststoffvergärung drastisch verkürzt.

### 2.3 Abfälle und Abwässer aus Industrie und Gemeinde

Während früher die anaerobe Gärung sich vor allem auf dünnflüssige Substrate konzentrierte, sind heute auch feste biogene Abfälle der Vergärung zugänglich. Unter **festen** Abfällen versteht man Stoffe mit mehr als rund 15% Trockensubstanzgehalt. Die Mehrheit dieser organischen Abfälle weist kein freies Wasser auf. Schlämme zwischen rund 6 und 15% Trockensubstanzgehalt enthalten eine mehr oder weniger grosse Menge freien Wassers, bzw. grosse Konzentrationen von Feststoffen in Suspension; sie weisen normalerweise eine relativ hohe Viskosität auf und werden als **halbfest** bezeichnet, während die eigentlichen Abwässer, d.h. die **flüssigen** Substrate, normalerweise Trockensubstanzgehalte von unter 6% aufweisen.



Figur 3:  
Bei der Kartoffelverwertung  
anfallende Abfälle und  
Abwässer

In den Bereich der **halbfesten** oder dickflüssigen organischen Abfälle fallen gewisse **Restaurantabfälle** oder **Abfälle der Landschaftspflege**, wie sie bei der Seenreinigung anfallen. Gärbare Industrieabfälle fallen wegen Zugabe von Prozesswasser sehr oft ebenfalls in einer nassen oder zumindest stark feuchten Form an. Bei vielen industriellen Prozessen fallen sowohl Abwässer als auch Abfälle – allenfalls in Schlammform – an, wie dies die Beispiele in Figur 3 und den Tabellen 4a und 4b illustrieren mögen:

**Schlachthausabfälle**

| <b>Tätigkeiten</b>                         | <b>produzierte Abfälle</b>   |
|--|--|
| Reinigung der Transportbehälter            | Kot, Stroh, Mist, verschiedene Abfälle   |
| Aufstallung vor der Schlachtung            | Heu, Mist, Stroh usw.  |
| Schlachtung: Ausbluten, Ausschachten       | Panseninhalte (anverdaute Zelluloseverbindungen), Blutgerinsel, Knochenspäne, Horn (Nägel, Borsten, Hörner usw.), schlecht verwertbare Körperteile wie Ohren usw., Abfälle von Fett und Sehnen |
| Kuttlerei                                  | Fett, Darminhalt, Bindegewebe usw.   |
| Reinigung Apparate und Gebäulichkeiten     | Waschwasser mit diversen, zum Teil festen Inhaltsstoffen   |
| Mechanische Vorreinigung der Abwässer      | feste Abfälle der Vorbehandlung wie Rückstände im Rechen, im Sieb und Fett aus der Flotation   |
| Abwasserbehandlungsanlage (wenn vorhanden) | Klärschlämme (eventuell eingedickt oder vorgetrocknet)   |

*Tabelle 4a:  
Biogene Abfälle, welche beim  
Schlachtbetrieb anfallen*

| <b>Abwasser</b>                      |  | <b>Menge</b>           | <b>BSB<sub>5</sub></b>  |
|--------------------------------------|--|------------------------|---|
| Gülle                                | ausgewachsenes Rindvieh und Pferde<br>andere | 15 l/d<br>3 l/d        | 15 g/l  |
| Blut                                 | ausgewachsenes Rindvieh und Pferde           | 20 l/Tier              | 0.7 g/kg Kadaver  |
|                                      | Schweine, Rinder                             | 5 l/Tier               | 0.4 g/kg Kadaver  |
|                                      | Kälber, Ziegen                               | 1.5 l/Tier             | 0.4 g/kg Kadaver  |
| Mist und Stroh                       | ausgewachsenes Rindvieh und Pferde           | 0.17 m <sup>3</sup> /t | 0.5–3.5 g/kg Kadaver<br>je nach Transportart<br>und Infrastruktur |
|                                      | Rinder                                       | 0.2 m <sup>3</sup> /t  |   |
|                                      | Schafe                                       | 0.25 m <sup>3</sup> /t |   |
| Innereien                            |  |                        | 0.4 g/kg Kadaver  |
| Kuttlerei (Waschwasser)              |  |                        | 6–8 g/kg Kadaver  |
| Waschwasser (von Boden und Material) |  |                        | 2 g/kg Kadaver  |
| Nebenbetriebe                        | Entfernung der Knochen                       |                        | 0.5 g/kg  |
|                                      | Salzen und Konservieren                      |                        | 10 g/kg   |
|                                      | Behandlung von Nebenprodukten                |                        | 5 g/kg  |
|                                      | Weitere Aktivitäten                          |                        | 5 g/kg  |

*Tabelle 4b:  
Organisch belastete Abwässer,  
welche beim Schlacht-  
betrieb anfallen*

Während früher die anaerobe Gärung für relativ dünne Abwässer mit weniger als 10% Trockensubstanz eingesetzt wurde, sind heute Prozesse vorhanden, um Abfälle mit mehr als 30% Trockensubstanz zu vergären.

## 2.4 Gärssysteme

Die verfahrenstechnischen Grundlagen der Vergärung wurden bereits in der Publikation «Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern», **PACER-Nr. 724.230d**, ausführlich behandelt. In diesem Kapitel wird daher verzichtet, bereits gemachte Angaben zu den Prozessen im Detail zu wiederholen, bzw. alle Verfahrensschemata nochmals abzubilden. Es werden daher nur einige besonders wesentliche Angaben zu den Prozessen wiederholt und allenfalls durch einige Zusatzinformationen ergänzt.

Gärprozesse können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden:

- a) nach der Art des Einspeisens von Ausgangsmaterial in den Fermenter
- b) bei Flüssigprozessen nach der Art des Rückhaltens von aktiver Biomasse
- c) nach der Art des Auftrennens des Prozesses in unter Umständen mehrere Teilschritte.

Das Substrat kann entweder **diskontinuierlich** oder **(semi)kontinuierlich** zugeführt werden. Im Fall der diskontinuierlichen Einspeisung wird der Fermenter einmal gefüllt und nachher bis zum Schluss der Vergärung nicht mehr geöffnet. Man spricht auch vom «Batch-Verfahren». Beim kontinuierlichen Verfahren wird ständig Frischmaterial zugeführt und dieselbe Menge vergorenen Materials dem Fermenter entnommen. Speziell bei festen Abfällen, welche beispielsweise tagsüber aufbereitet werden müssen, oder bei unregelmässig anfallenden Abwässern ist es möglich, dass das Frischmaterial nicht rund um die Uhr kontinuierlich eingespiesen wird. Man spricht dann vom semikontinuierlichen Betrieb.

Bei Abwässern sind verschiedene Möglichkeiten gegeben, die **aktive Biomasse** im Fermenter zu **erhöhen**: Eine einfache Methode ist, die ausgetragenen Bakterien zu sedimentieren und den **Bakterienschlamm** wieder in den Fermenter **zurückzuführen** (sogenannte Kontaktreaktoren). Im Fermenter selbst können Materialien mit grosser Oberfläche als Wachstumsfläche für Bakterien angebracht werden. Ebenfalls ist es möglich, suspendierte Bakterienagglomerate im Fermenter zurückzuhalten.

Unter gewissen Umständen kann es interessant sein, **biologische Stufen** räumlich voneinander zu **trennen**. Wenn die Hydrolyse und Säurebildung in einem anderen Behälter ablaufen als die eigentliche Methanisierung, spricht man von einem Zweistufenprozess. Die Hydrolysestufe ist dann so dimensioniert, dass die Aufenthaltszeit genügend gross ist, um das Wachstum der hydrolytischen und säurebildenden Bakterien zu ermöglichen. Bei leicht hydrolysierbaren organischen Substraten läuft die Hydrolyse genügend rasch ab, so dass sich die Methanisierung in der ersten Stufe nicht entwickeln kann (Auswaschung der Methanbildner).

Wenn zur Hydrolyse des Ausgangsmaterials mehr als 2 bis 3 Tage benötigt werden, können sich unter Umständen dort auch Methanbildner entwickeln, und die Trennung der biologischen Stufen ist dann nicht mehr vollständig. In diesen Fällen, d.h. bei langsamer Hydrolyse, ist jedoch der Zweistufenprozess aus ökonomischen Überlegungen meistens nicht mehr vorteilhaft.

Ein Zweistufenprozess kann bei festen Abfällen auch mit einem **Zwei-phasenprozess** gekoppelt werden. In diesem Fall werden die festen Abfälle in einer Hydrolysestufe hydrolysiert. Die säurehaltige Prozessflüssigkeit wird danach in einer fest/flüssig-Trennung von der festen Phase abgetrennt und über einen Hochleistungsreaktor methanisiert. In diesem

Fall hat man den Vorteil, dass für die flüssige Phase ein Hochleistungsprozess mit erhöhter Biomassekonzentration eingesetzt werden kann, während die feste Phase in der Regel innerhalb von wenigen Tagen hydrolysiert wird.

Im Fall einer **Rührkesselkaskade** werden mehrere Fermenter in Serie hintereinander geschaltet. In diesem Fall hat man in der Regel keine eindeutige Trennung der biologischen Stufen, obwohl die hydrolytische Aktivität im ersten Fermenter wahrscheinlich etwas grösser ist, als in den folgenden. Rührkesselkaskaden haben den Vorteil, dass die Wahrscheinlichkeit klein ist, frisch zugeführtes Material gleich wieder auszutragen. Diese Gefahr besteht in konventionellen, voll durchmischten, einzeln parallel geschalteten Rührkesseln.

Kurzschlüsse zwischen Ein- und Austrittsöffnung können auch durch **Pfropfstromreaktoren** weitgehend verhindert werden: In diesem Fall hat der Reaktor eine längliche Form und das Frischmaterial tritt an einer Stirnseite ein, bzw. an der gegenüberliegenden Stirnseite aus. Während der Wanderung durch den Fermenter durchläuft das Frischmaterial die verschiedenen Stufen des biologischen anaeroben Abbaus.

### Verfahren zur Behandlung von Abwässern

Konventionelle Fermenter sind normalerweise **voll durchmischt**. Mit Vorrichtungen zur Durchmischung, wie mechanischen Rührwerken oder Lanzen zur Einpressung von Gas, wird der Reaktorinhalt ständig oder nach Intervallen in Bewegung gehalten. Dies bewirkt, dass die Bakterien in Suspension gehalten sind und damit natürlich auch mit dem austretenden Material ausgetragen werden. Die hydraulische Aufenthaltszeit im Reaktor muss daher so gewählt werden, dass genügend Zeit für die Reproduktion der Bakterien vorhanden ist (bei zu kurzer Aufenthaltszeit werden mehr Bakterien ausgewaschen, als nachwachsen können). Voll durchmischte Reaktoren werden vor allem als Faultürme in Kläranlagen oder als landwirtschaftliche Biogasanlagen mit Aufenthaltszeiten im Bereich von 20 Tagen eingesetzt.

Beim **Kontaktprozess** folgt dem Fermenter eine Sedimentationsstufe, wo Bakterienbiomasse von der Flüssigkeit abgetrennt und wieder in den Fermenter zurückgeführt wird. Dank der dadurch erhöhten Biomassekonzentration im Fermenter verläuft der Abbau schneller, sodass die Aufenthaltszeit zwei- bis dreimal kürzer wird als in einem konventionellen, voll durchmischten Reaktor. Es sind auch Reaktoren mit im Reaktor integrierter Sedimentation bekannt. Kontaktprozesse werden oft dort eingesetzt, wo stark belastete Abwässer eine hohe Menge an partikulärem Kohlenstoff enthalten.

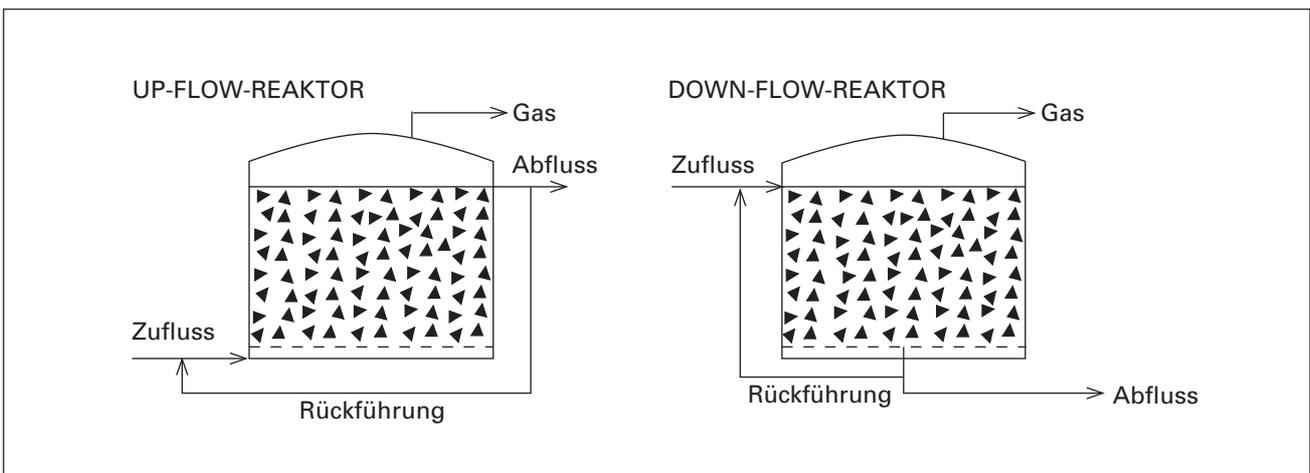
Bei den sogenannten **Schlammbedreaktoren** wachsen die Bakterien entweder für sich selbst in kleinen Klümpchen oder aber auf Trägermaterialien wie feinen Sandkörnern auf. Die so entstandenen Bakterienagglomerate werden durch eine entsprechend grosse Strömung von unten nach oben in Suspension gehalten. Wenn die Bakterien für sich selbst Klümpchen bilden, spricht man vom UASB-Prozess (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Hier müssen durch entsprechende Einbauten im oberen Reaktorbereich Vorkehrungen getroffen werden, dass diese Bakteriengranulate nicht mit dem behandelten Wasser ausgetragen werden, sondern im Reaktor verbleiben.

Die für den UASB-Prozess notwendigen Bakterienklümpchen bilden sich besonders gut im Abwasser, welches reich an Zucker oder an niedrigen Fettsäuren ist. Da das spezifische Gewicht der Bakterienklümpchen sich nur unwesentlich von demjenigen von Wasser unterscheidet und zusätzlich kleine Methangasbläschen den Auftrieb verstärken können, sind nur sehr geringe Strömungsgeschwindigkeiten von 0.5 bis 1 m/h sinnvoll. Der UASB-Prozess eignet sich zur Behandlung organisch stark belasteter Abwässer, welche wenig partikulären Kohlenstoff enthalten.

Wenn die Bakterien auf inerten Feststoffpartikeln, wie Sand, etc., aufwachsen, spricht man vom **Wirbelbettreaktor**. Da hier die Bakterienklümpchen ein höheres spezifisches Gewicht aufweisen, sind höhere Strömungsgeschwindigkeiten erforderlich, um die Teilchen zu suspendieren: Beim «fluidized bed»-Reaktor, wo die Suspension nur im unteren Reaktorbereich erfolgt, sind Geschwindigkeiten von 5 bis 8 m/h die Regel, während beim «expanded bed»-Reaktor, wo die Bakterienmasse über die gesamte Reaktorhöhe verteilt werden soll, Geschwindigkeiten zwischen 15 und 30 m/h erforderlich sind.

Bei Wirbelbettreaktoren wird die Flüssigkeit daher ständig umgepumpt, was eine vollständige Durchmischung bewirkt. Da zum Umpumpen viel Energie benötigt wird, ist die Energiebilanz eines Wirbelbettreaktors normalerweise spürbar weniger günstig als diejenige von anderen Hochleistungsreaktoren. Eingesetzt werden Wirbelreaktoren zur Behandlung stark belasteter Abwässer mit vorwiegend gelösten organischen Komponenten.

Bei den **Anaerobfiltern** wachsen die Bakterien als Bakterienfilm auf Trägermaterialien auf. Die inerten Trägermaterialien (Kunststoff, Mineralien oder Holz) weisen eine grosse spezifische Oberfläche von 50 bis über 200 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> auf. Wie in Figur 4 dargestellt ist, unterscheidet man zwischen Upflow- und Downflow-Betrieb. Daneben sind auch horizontale Auslegungen möglich, wie sie bei dynamischen Anaerobfiltern realisiert werden: Bei dynamischen Anaerobfiltern wird das Trägermaterial gegenüber dem Abwasser leicht bewegt, so dass der Kontakt zwischen Bakterienfilm und Abwasser intensiviert sowie das Ausgasen begünstigt wird. Man unterscheidet zwischen rotierenden (anaeroben Scheibentropfkörpern) und pulsierenden dynamischen Anaerobfiltern.



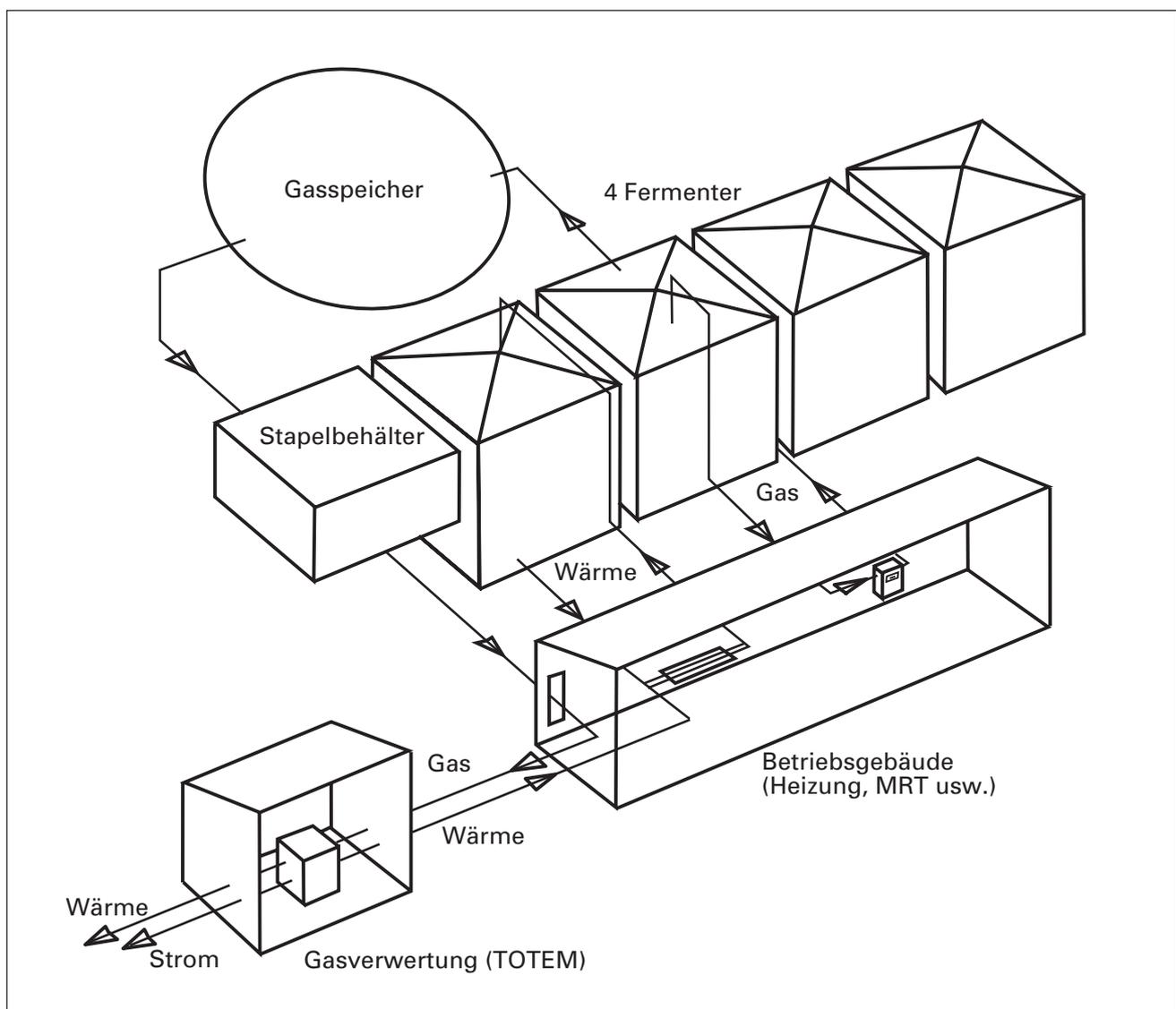
Figur 4:  
Schematische Darstellung von Anaerobfiltern im Upflow- und Downflow-Betrieb

Im Vergleich zu den Bakterienklümpchen des UASB-Prozesses wachsen auf den Trägermaterialien in der Regel Bakterienbiozönosen mit einer höheren Diversität auf, was auch den Abbau von Inhaltsstoffen, welche sich für Schlammbettprozesse weniger eignen, ermöglicht. Anaerobfilter werden ebenfalls zur Behandlung von stark belasteten Abwässern ohne gröbere Feststoffpartikel eingesetzt. Letztere könnten besonders bei grossen spezifischen Oberflächen zu Verstopfungen führen.

### Verfahren zur Behandlung fester Abfälle

Systeme mit **diskontinuierlicher Beschickung** eignen sich eher zur Vergärung fester Substrate, da in diesem Fall der Bau von Einfachsystemen möglich ist. Normalerweise werden mehrere Fermenter zeitlich verschieben nebeneinander betrieben. Jeweils ein Fermenter wird entleert bzw. wieder neu gefüllt. In Figur 5 ist eine solche diskontinuierliche Anlage, wie sie im Waadtland realisiert wurde, dargestellt. Beim diskontinuierlichen Prozess ist es sinnvoll, Prozesswasser zur Befeuchtung des frischen Ausgangsmaterials zu verwenden, um so das Frischmaterial mit Bakterien anzuimpfen.

Figur 5:  
Schematische Darstellung  
einer diskontinuierlichen  
Anlage zur Vergärung fester  
biogener Abfälle.  
(Quelle: EREP SA, Aclens)



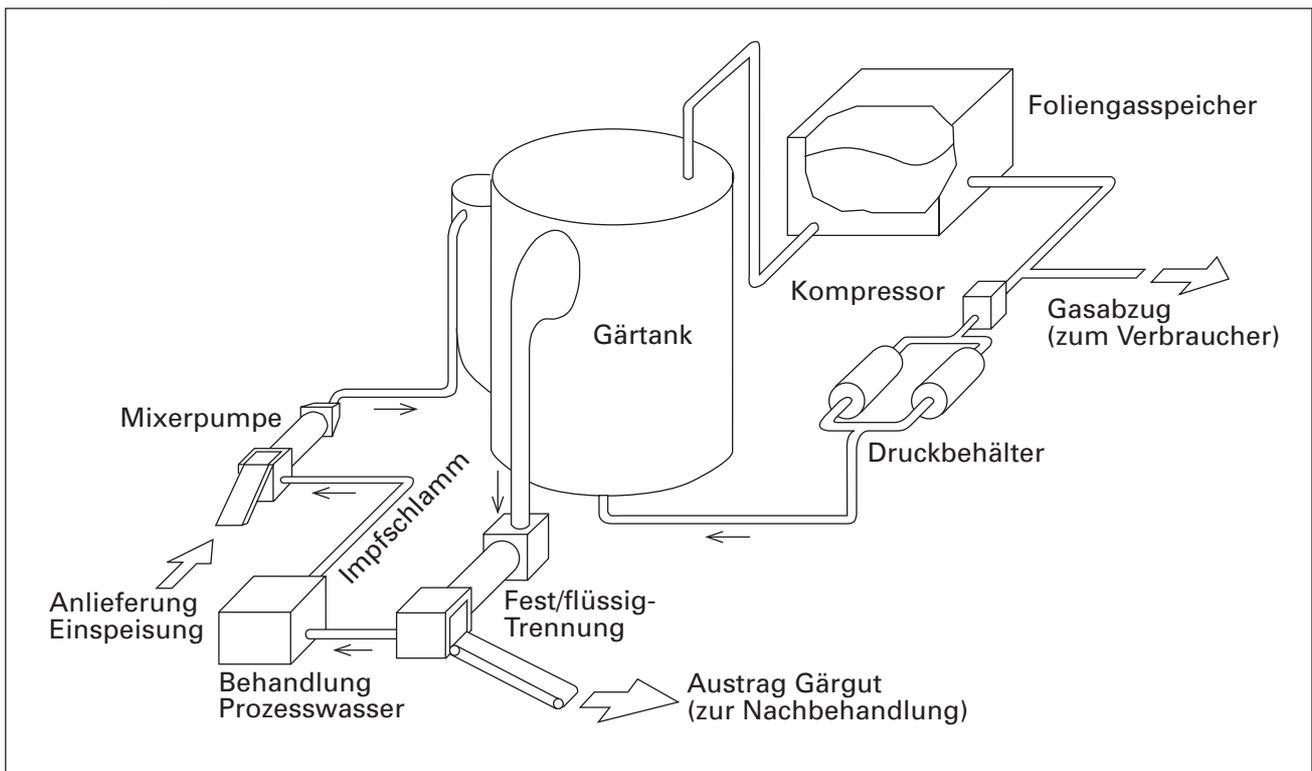
**Kontinuierliche Einstufenprozesse** sind sowohl für den mesophilen wie auch den thermophilen Temperaturbereich entwickelt worden. Die Reaktoren sind entweder voll durchmischt oder aber mehr oder weniger ausgeprägte Pfropfstromreaktoren. Zur Durchmischung werden interne mechanische Rührwerke, Gaseinpressen oder Rezirkulation des Gärguts über eine externe Schlaufe eingesetzt. Die Fermenter können als stehende oder liegende Zylinder bzw. längliche, rechteckige Behälter ausgebildet sein. Es stehen sowohl mesophile als auch thermophile einstufige Gärverfahren zur Verfügung. In Figur 6 ist das Fließbild einer mesophilen Valorga-Anlage dargestellt. Vor der Einspeisung werden die Abfälle zerkleinert und mit vergorenem Presswasser angemaischt. Nach der Gärung wird das Gärgut auf einen Trockensubstanzgehalt von 35 und 55% entwässert und normalerweise einer kurzen Nachkompostierung unterworfen.

Einstufige Prozesse können bei TS-Gehalten von maximal annähernd 40% Trockensubstanz betrieben werden, wie dies bei gewissen thermophilen Verfahren bereits demonstriert wurde.

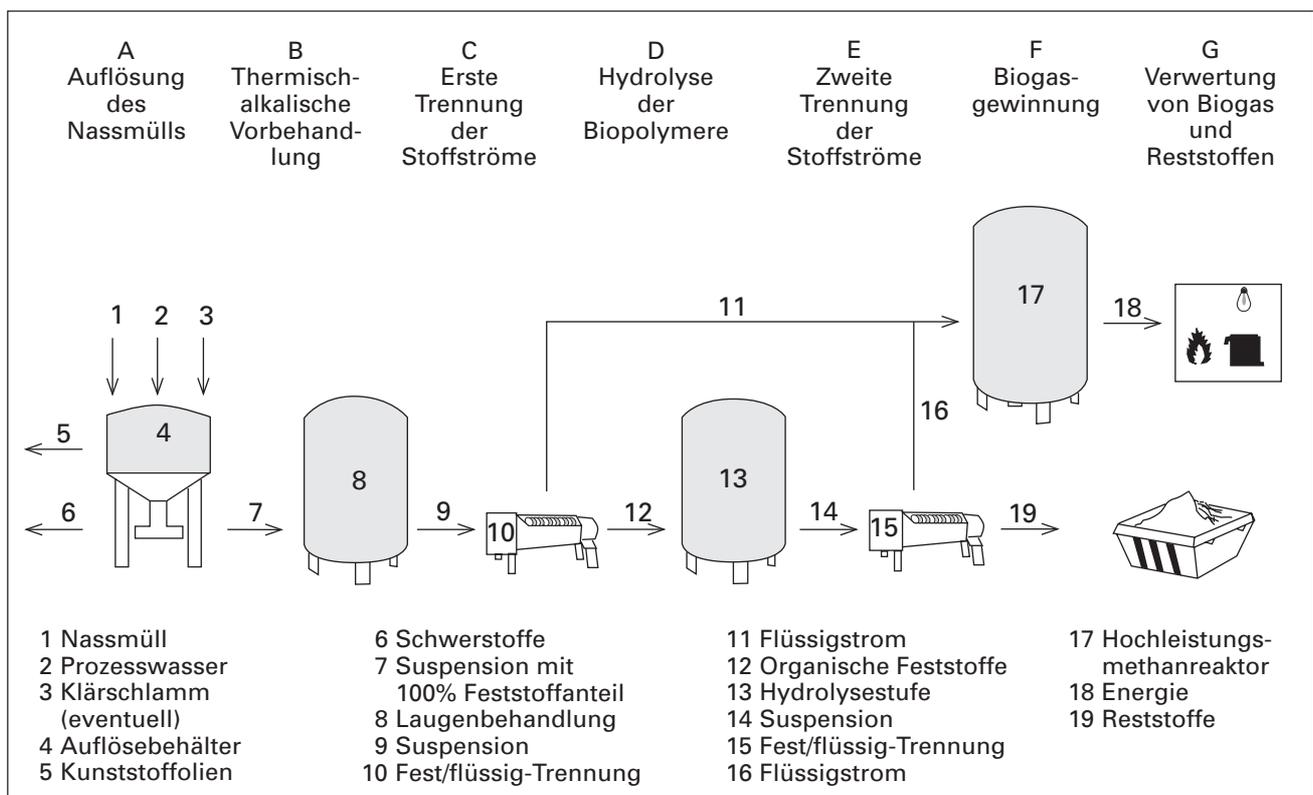
**Zweistufenprozesse** sind bei der Vergärung fester Abfälle meist auch Zweiphasenprozesse. Die Feststoffe verbleiben normalerweise in der Hydrolysestufe, während ein säurereiches Prozesswasser im Kreislauf über eine Hochleistungsmethanisierung geleitet wird. Für die Hydrolysestufe bestehen nun verschiedene Optionen:

- Diskontinuierliche Beschickung und Perkolation mit Kreislaufwasser.
- Kontinuierliche Beschickung und Hydrolyse in relativ flüssiger Phase durch Anmischen der Feststoffe mit Presswasser aus der anschliessenden fest/flüssig-Trennung.
- Perkolation in einer ständig durchmischten festen Phase.

Figur 6:  
Fließbild einer einstufigen mesophilen Anlage zur Vergärung fester biogener Abfälle (Quelle: Valorga)



Figur 7 zeigt ein Fließbild des BTA-Prozesses, bei welchem die Abfälle in einem Behälter (modifizierter Pulper aus der Papierindustrie) suspendiert werden und anschliessend jeweils nach den beiden Hydrolysestufen wieder entwässert werden. Feste Abfälle, welche anaerob abbaubar sind, können bei diesem zweistufigen Ansatz in 2 bis 4 Tagen zu anaerobem Kompost abgebaut werden. Allerdings ist zusätzlich zu den (relativ kleinen) Hydrolysestufen nochmals ein Fermenter zur Behandlung der flüssigen Phase notwendig, was das gesamte Fermentervolumen rund auf die Hälfte desjenigen einer thermophilen, einstufigen Anlage anwachsen lässt. (In thermophilen Einstufenprozessen sind Aufenthaltszeiten von 15 bis 20 Tagen die Regel.) Der Pulper dient gleichzeitig zur Abtrennung von Störstoffen in einer Sink-/Schwimm-Trennung, wo Schwerstoffe über eine Schleuse entnommen und aufräumende Kunststoffe mit einem Rechen abgezogen werden können. (Bei einstufigen Feststoffprozessen werden Fremdstoffe manuell oder maschinell aussortiert.)



Figur 7:  
Fließbild einer zweistufigen Anlage zur Feststoffvergärung (Quelle: BTA)

## Co-Vergärung

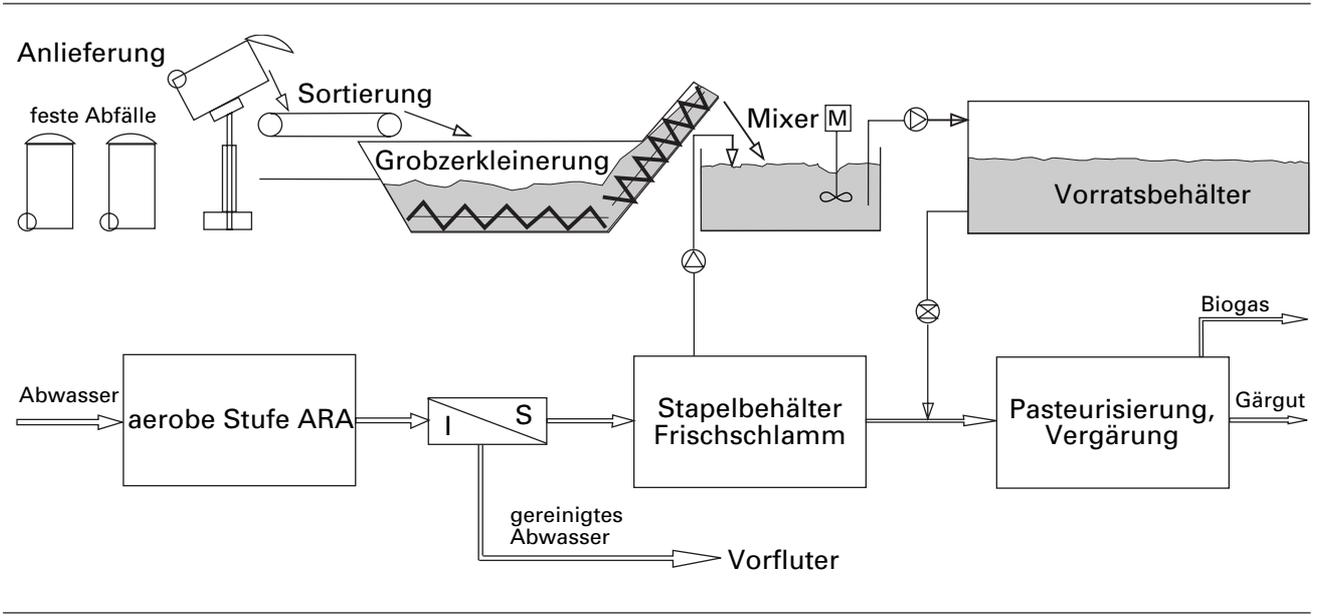
Feste Abfälle können auch in flüssigen Einstufenprozessen vergoren werden: In diesem Fall werden die Abfälle zerkleinert und unter Umständen in einem ebenfalls zu vergärenden Abwasser aufgeschlämmt. Man spricht in diesem Fall von einer sogenannten **Co-Vergärung**.

Co-Vergärungsanlagen haben den sehr grossen Vorteil, dass auf meist bereits vorhandene Infrastruktur zur Vergärung zurückgegriffen werden kann und dass organisch relativ schwach belastete Fermenter dadurch eine bessere Ausnutzung erfahren. Diese Symbiose wirkt sich sehr positiv bei den Kosten aus. Eine Möglichkeit bieten Faultürme von **kommunalen Kläranlagen**, wo feste Gewerbe- und Hotellerieabfälle direkt mit dem Frischschlamm dem Faulturm zugegeben und vergoren werden; allerdings

muss in diesem Fall die Schlammqualität einwandfrei sein und die Gewähr bestehen, dass das erzeugte Gärgut in der Landwirtschaft Einsatz finden kann.

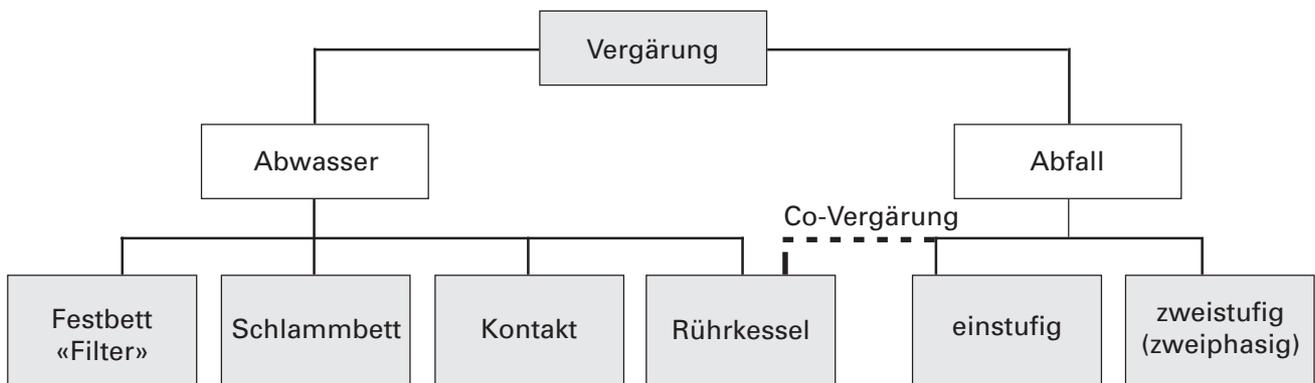
Heute gewinnt die **landwirtschaftliche Co-Vergärung** an Bedeutung, wo sich die Vergärung fester Abfälle zusammen mit Gülle von Rindern und Schweinen anbietet. Speziell im ländlichen Raum und in Gebieten mit viel Gastgewerbe bietet die Co-Vergärung eine sinnvolle Alternative zu Feststoffgäranlagen, welche in kleinem Masstab ökonomisch nicht sinnvoll zu betreiben sind.

Reine **Flüssigverfahren**, wo die festen Abfälle mit reinem Wasser verdünnt werden, sind nicht sehr sinnvoll, da in diesem Fall unnötig viel – bezüglich der Methanbildung unproduktives – Prozesswasser unnütz erwärmt werden muss. In Figur 8 ist das Fließbild einer möglichen Anordnung der Co-Vergärung auf einer Kläranlage dargestellt: Die Abfälle werden zunächst grob zerkleinert, von Fremdstoffen befreit und anschliessend mit Frischschlamm angemaischt. Aus einem Stapeltank wird dann das Material dem Faulturm bzw. der Schlammstabilisierung zugeführt.



Figur 8:  
Fließbild einer Co-Vergärung  
auf einer Kläranlage  
(Quelle: arbi)

Figur 9 zeigt eine Übersicht über die verfahrenstechnischen Möglichkeiten der Vergärung:



Figur 9:  
Schematische Übersicht über die verfahrenstechnischen Möglichkeiten der Vergärung (Quelle: arbi)

Bei den Flüssiggärverfahren kann der Kontaktprozess als eine Weiterentwicklung des Rührkessels betrachtet werden. Schlammbett- und Festbett-Reaktoren sind Weiterentwicklungen, bei welchen die aktive Biomasse im Fermenterinnern noch weiter erhöht wird. Feststoffgärverfahren können ein- oder zweistufig ablaufen, wobei im zweiten Fall gleichzeitig auch eine Phasentrennung zwischen den festen Abfällen und der Prozessflüssigkeit stattfindet. Einstufige Verfahren können bei hohen Trockensubstanzgehalten ablaufen oder aber als konventionelle Flüssigvergärungen im Rührkessel erfolgen. Zweistufige Vergärungen sind ebenfalls bei gewissen speziellen Abwässern denkbar, wo eine Vorversäuerung Vorteile bringen kann. In der Regel finden die Vergärungen bei mesophilen Temperaturen statt. Der thermophile Temperaturbereich wird (wegen der zusätzlichen Hygienisierung und aus energetischen Überlegungen) vor allem bei einstufigen Verfahren zur Vergärung von festen biogenen Abfällen gewählt.

## 2.5 Dimensionierungsgrößen

Ein Fermenter wird normalerweise nach ökonomischen Kriterien dimensioniert. Das heisst, dass nicht unbedingt die maximale Gasausbeute bzw. der maximale Abbau der organischen Inhaltsstoffe angestrebt wird, sondern ein mit **vernünftigem Aufwand erreichbarer Abbau**. Wenn man die theoretische, maximale Gasausbeute erreichen wollte, müsste man sehr lange Aufenthaltszeiten im Reaktor in Kauf nehmen, da die schwer abbaubaren Komponenten sich erst im Laufe längerer Zeit – wenn überhaupt – in Biogas umwandeln würden. Die Kunst des Anlagenbaues besteht darin, innerhalb vorgegebener sinnvoller Grenzen das Maximum an Abbauleistung zu erreichen.

### Erfassen der abbaubaren Anteile des Ausgangsmaterials

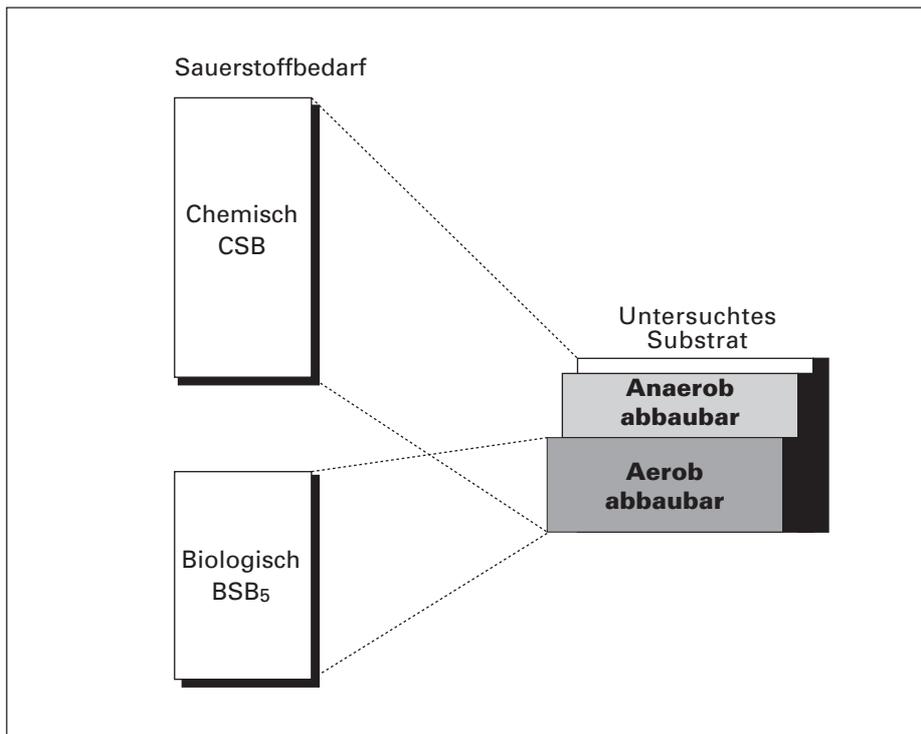
Bei festen Substraten kann der **Trockensubstanzgehalt (TS)** durch Trocknen bei 105 °C sowie der organische Anteil durch Messen des **Glühverlustes («OS»)** bei Erhitzen auf 550 °C relativ genau bestimmt werden. Bei gewissen Substraten ist es allerdings relativ schwierig, nur mit solchen recht groben chemisch-physikalischen Parametern den Anteil an abbaubarem Material zu erfassen. Bei Abwässern ist zudem die Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes oft problematisch, da sie Inhaltsstoffe wie organische Säuren enthalten können. Organische Säuren bilden zum Teil mit Wasser azeotrope Gemische, welche beim Trocknen verdampfen und daher so nicht erfasst werden.

Für Abwässer wird beim aeroben Abbau oft der **BSB<sub>5</sub>-Wert**, d.h. der **biologische Sauerstoffbedarf**, gemessen, bei welchem eine zuvor meist stark verdünnte Probe des Abwassers mit Belebtschlamm aus einer Kläranlage über 5 Tage inkubiert wird und dabei die Sauerstoffzehrung gemessen wird. Diese an sich schon recht unsichere Methode ist für anaerobe Abbauprozesse nur sehr bedingt aussagekräftig, da die anaeroben Bakterien gegenüber aeroben Mikroorganismen ganz andere biochemische Abbauewege beschreiten und daher auch nicht dieselben organischen Komponenten abbauen. (Während beispielsweise das Lignin des Holzes von anaeroben Bakterien nicht geknackt werden kann, können verschiedene andere Komponenten von aeroben Bakterien nicht abgebaut werden.) Einmal abgesehen von Lignin können anaerobe Bakterien in der Regel ein grösseres Spektrum von chemischen Verbindungen abbauen als aerobe.

Der gesamte organische Anteil eines Abwassers oder auch von Abfall kann mit dem **CSB**, d.h. dem **chemischen Sauerstoffbedarf**, erfasst werden. Beim CSB wird die Probe mit sehr aggressiven Chemikalien total oxydiert. So werden die organischen Komponenten quantitativ erfasst. Allerdings können auch gewisse mineralische Komponenten zusätzlich oxydiert werden, was das Resultat etwas verfälschen kann. Trotzdem scheint der CSB-Wert der zuverlässigste Indikator für das Verschmutzungspotential eines Abwassers zu sein.

In Figur 10 ist eine Situation dargestellt, welche sich beim anaeroben Abbau eines Abwassers oft präsentieren kann: Während der BSB<sub>5</sub>-Wert des Substrates nur rund die Hälfte des CSB-Wertes ausmacht, kann in diesem Fall von anaeroben Bakterien rund 90% des CSB-Wertes abgebaut werden. Hier wird die weiter oben erwähnte Tatsache ersichtlich, dass der BSB<sub>5</sub>-Wert auf aeroben Abbauewegen beruht und daher für die Anaerobie nicht repräsentativ ist. Wenn daher ein unbekanntes Abwasser oder feste Abfälle unbe-

kannter Zusammensetzung anaerob abgebaut werden sollen, ist es am sinnvollsten, im Labor einige Laborgärungen anzusetzen und so die Abbaubarkeit des Substrates zu überprüfen.



Figur 10:  
Vergleich BSB/CSB und  
Abbauleistung von anaeroben  
Bakterien

### Die Faulraumbelastung

Ein sehr wichtiger Dimensionierungsparameter ist die **Faulraumbelastung**, ausgedrückt als Belastung in CSB oder in organischer Substanz. Er wird angegeben als

$$\text{kg CSB/m}^3\cdot\text{d} \text{ oder } \text{kg OS/m}^3\cdot\text{d} .$$

Wenn die tägliche Frachtmenge in Form von CSB oder OS eines Abwassers bzw. Abfalls bekannt ist, ergibt sich automatisch bei bekannter Abbaubarkeit des Substrates je nach Reaktortyp auf Grund der Verweilzeit ein bestimmtes Reaktorvolumen.

Die **Abbauleistung** hängt sehr stark mit dem Reaktordesign zusammen: Je mehr aktive Biomasse pro Fermentervolumen vorhanden ist, desto schneller läuft generell der Abbau. (Da die Methanbildung über Hunderte von Jahrmillionen optimiert worden ist, kann sie auch mit gentechnologischen Methoden nicht weiter optimiert werden. Nur in einem sehr kleinen «thermodynamischen Fenster» kann der anaerobe Abbau noch mit einem kleinen Energiegewinn erfolgen. Daher wachsen anaerobe Bakterien, insbesondere Methanbildner, sehr langsam und setzen beim Wachstum auch keine Wärme frei. Wenn die Abbauleistung erhöht werden soll, kann dies in erster Linie über eine Erhöhung der Anzahl aktiver Bakterien erfolgen, und kaum durch irgendwelche Manipulationen, welche den biochemischen Abbau beschleunigen sollen.)

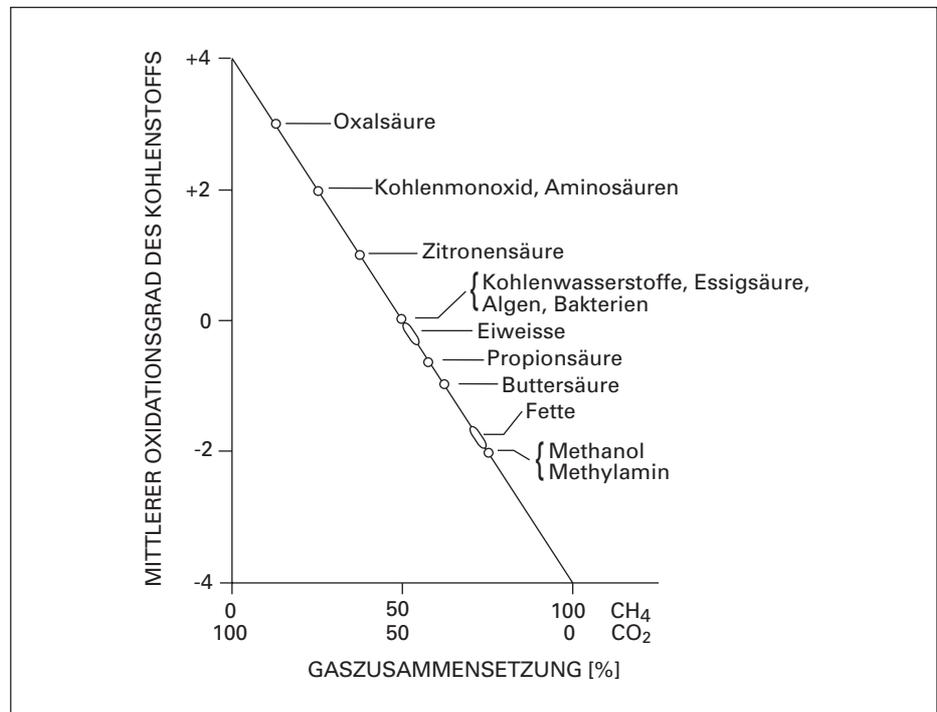
Ein biologischer Dimensionierungsparameter ist daher der **Abbau pro kg aktive Biomasse und Zeit**. Er wird in diesem Fall angegeben als

kg CSB<sub>abgebaut</sub>/kg aktive Biomasse.d, bzw. kg OS<sub>abgebaut</sub>/kg aktive Biomasse.d. Dieser Parameter ist mehr oder weniger unabhängig vom eingesetzten Reaktortyp und hängt vom Substrat ab, dh. von:

- dessen chemisch-physikalischen Eigenschaften (Temperatur, pH, Alkalinität usw.)
- der Substratzusammensetzung (Nährstoffgehalt, generelle Abbaubarkeit, vorhandene Hemmstoffe usw.)

Es ist allerdings nicht unproblematisch, die aktive Biomasse zu bestimmen, da Bakterien im Inneren von Bakterienflocken oder -filmen weniger aktiv sind, als diejenigen (mit Substrat besser versorgten) an der Oberfläche einer Agglomeration.

Die **Methanausbeute** des Abbaus hängt – wie weiter oben bereits erwähnt – primär mit der chemischen Zusammensetzung des Substrates zusammen. Dies ist auch in Figur 11 dargestellt, wo aufgezeigt wird, dass der Methangehalt des Gases mit dem mittleren Oxidationsgrad des Kohlenstoffes verknüpft ist (theoretische Werte unter der Annahme einer vollständigen Mineralisation der Substanzen, d.h. ohne Biomassebildung).



Figur 11: Zusammenhang zwischen mittlerem Oxidationsgrad des Kohlenstoffs in chemischen Verbindungen und der beim Abbau entstehenden Biogasmischung

Die Abbaugeschwindigkeit von verschiedenen Komponenten ist unterschiedlich gross: So braucht beispielsweise der Abbau von Zellulose deutlich mehr Zeit als jener von Eiweissen, Zucker oder Fetten. In Wasser gelöste Substanzen können ganz allgemein besser abgebaut werden als noch in Feststoffen gebundene Komponenten, da die Säure- und Methanbildner nur gelöste Verbindungen aufnehmen können. Die Verflüssigung der Feststoffe, sprich die Hydrolyse, ist daher im Ablauf des anaeroben Abbaus normalerweise der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Hydrolytische Bakterien lösen Feststoffe in der Regel so, dass sie sogenannte Exoenzyme nach aussen an das Medium, d.h. an die Oberfläche der Feststoffpartikel,

abgeben, welche dann Bindungen von Makromolekülen so auftrennen, dass lösliche Bruchstücke entstehen, welche alsdann von den Mikroorganismen aufgenommen werden können. Dieses Vorgehen kann speziell bei grossen organischen Feststoffpartikeln entsprechend zeitaufwendig sein.

Für den Anlagebetreiber besonders interessant ist natürlich die **spezifische Abbauleistung**. Diese wird normalerweise nicht nur auf das Fermentervolumen, sondern auch auf die Zeit bezogen. Sie hängt einerseits von der spezifischen Aktivität der Biomasse und andererseits von der Biomassekonzentration im Reaktor ab. Sie kann dargestellt werden als:

$$CSB_{\text{abgebaut}}/m^3 \text{ Reaktor} \cdot d$$

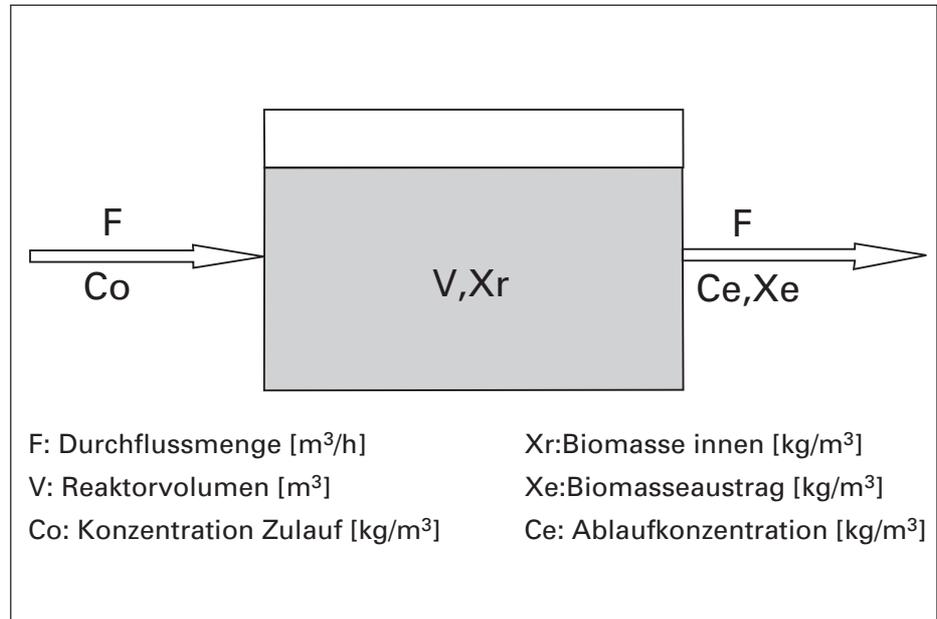
Wie bereits weiter oben dargestellt wurde, bestehen bei Abwässern verschiedene Möglichkeiten, die aktive Biomasse im Fermenter zu erhöhen und so die **spezifische Abbauleistung zu erhöhen**. Bei der einstufigen Vergärung fester Abfälle fallen diese Möglichkeiten weitgehend dahin. Einzig die Rückführung von ausgegorenem Material zur Beimpfung des Frischmaterials kann die Bakterienpopulation im Fermenter erhöhen, wobei hier natürlich ein Optimum gesucht werden muss, damit nicht zuviel Reaktorvolumen durch bereits ausgegorenes Material blockiert wird. In Tabelle 5 sind einige typische Faulraumbelastungen von verschiedenen Reaktortypen dargestellt:

|                                |                                    |                                   |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Rührkessel                     | 2 kg CSB/m <sup>3</sup> .d         | relatives Volumen 20              |
| Kontaktprozess                 | 5 kg CSB/m <sup>3</sup> .d         | relatives Volumen 8               |
| UASB                           | 15 kg CSB/m <sup>3</sup> .d        | relatives Volumen 3               |
| Anaerobfilter                  | 15 kg CSB/m <sup>3</sup> .d        | relatives Volumen 3               |
| Wirbelbett                     | bis zu 40 kg CSB/m <sup>3</sup> .d | relatives Volumen 1               |
| <hr/>                          |                                    |                                   |
| feste Abfälle ohne Rückimpfung |                                    | 8 bis 13 kg OS/m <sup>3</sup> .d  |
| feste Abfälle mit Rückimpfung  |                                    | 18 bis 30 kg OS/m <sup>3</sup> .d |

*Tabelle 5:  
Vergleich der Belastungsgrenzen verschiedener Reaktortypen*

## Aufenthaltszeit

Eine weitere sehr wichtige Dimensionierungsgrösse ist die **Aufenthaltszeit**, welche oft auch Verweilzeit genannt wird. Man unterscheidet normalerweise zwischen der hydraulischen Aufenthaltszeit (**HRT = Hydraulic Retention Time**) und der Aufenthaltszeit der nicht gelösten, partikulären Stoffe (**SRT = Solid Retention Time**). Die hydraulische Aufenthaltszeit muss so gewählt werden, dass nicht mehr Bakterien aus dem Fermenter ausgewaschen werden, als in ihm nachwachsen können bzw. festgehalten werden. Die hydraulische Aufenthaltszeit errechnet sich aus dem Reaktorvolumen im Verhältnis zum Volumen der täglich zugeführten Substratmenge (vergleiche Figur 12). Die ausgewaschene Biomassemenge ( $F \cdot X_e$ ) darf nicht grösser sein als die im Reaktor nachwachsende Biomasse, welche abhängig ist vom Reaktorvolumen, von der vorhandenen Biomasse und deren Wachstumsfaktor.



Figur 12:  
 Im Zusammenhang mit der  
 Aufenthaltszeit wichtige  
 Parameter.

Die HRT errechnet sich nach der Formel: **HRT = V/F [d]**

Je stärker verdünnt ein Abwasser ist, desto grösser wird die **Gefahr des Auswaschens** von Bakterien, wenn die Dimensionierung nur auf die Faulraumbelastung mit CSB ausgelegt ist. Einerseits haben gewisse anaerobe Bakterien im mesophilen Temperaturbereich Verdopplungszeiten von bis zu 10 und mehr Tagen, andererseits kann bei einem dünnen Abwasser die HRT nur wenige Stunden betragen. Ein gutes Festhaften der Bakterien auf Trägermaterialien ist hier Voraussetzung für einen erfolgreichen Gärprozess.

Die SRT kann bei bestimmten Reaktortypen deutlich von der HRT abweichen: Im sogenannten **«anaerobic baffled reactor»** werden beispielsweise vertikale Trennwände als Schikanen eingebaut, welche die Feststoffe als Sediment und als Schwimmdecke im Reaktor zurückhalten, während die flüssige Phase ungehindert passieren kann. Dies schafft die nötigen Voraussetzungen, dass die Feststoffe hydrolysiert werden können, bevor sie ausgetragen werden. Die SRT ist in diesem Fall um mehrere Faktoren grösser als die HRT.

**Gehalt an suspendierten und anderen Inhaltsstoffen**

In der Praxis trifft man kaum rein feste Abfälle oder vollständig feststofffreie Abwässer an. Normalerweise sind in Abwässern bestimmte Anteile des organischen Materials als **Feststoffpartikel suspendiert**. Wenn diese Anteile eine spürbare Grösse annehmen, stellt sich die Frage, ob man den Reaktor auf Grund der notwendigen Hydrolysezeit dimensionieren will (Rührkessel oder Kontaktprozess), oder ob man es vorzieht, die Feststoffe vorgängig abzutrennen und sie separat zu hydrolysieren (Zweistufenprozess). Wenn dem Fermenter mehr Feststoffe zugeführt werden als hydrolysiert werden können, besteht die Gefahr, dass Feststoffe sich im Reaktorinnern akkumulieren und so den Abbau zunehmend behindern.

Neben organischen können auch **mineralische Feststoffe** vorkommen. Diese sind mit mechanischen Mitteln (sieben, sedimentieren usw.) nach Möglichkeit vor der Gärung zu eliminieren. Wenn sie nicht oder nur ungenügend ausgeschieden werden, besteht die Gefahr, dass sie sich im Reaktor akkumulieren und so zur Verringerung des aktiven Fermentervolumens beitragen. Beim Kontaktprozess beispielsweise besteht die Gefahr, dass Inertstoffe in der anschliessenden Sedimentation ausgeschieden und wieder in den Fermenter rückgeführt werden. So wurde beispielsweise die Akkumulation von Kalk in Fermentern der Zuckerindustrie oft beobachtet.

Neben von aussen eingetragenen mineralischen Stoffen sind auch **Ausfällungen von Salzen** im Reaktor selbst unerwünscht. Spezielle Aufmerksamkeit sind Abwässern zu widmen, welche hohe Carbonatkonzentrationen aufweisen. Es sind Fälle bekannt, wo Anaerobfilter in der Zuckerindustrie durch Carbonatausfällungen nach zwei bis drei Betriebsjahren verstopften.

### Gasausbeute

Die Biogasproduktion hängt in erster Linie ab von der Substratzusammensetzung, der Gärtemperatur und der Aufenthaltszeit des Substrates im Fermenter.

Die **Substratzusammensetzung** beeinflusst einerseits den maximal erreichbaren Abbaugrad und andererseits die Abbaugeschwindigkeit. Im Substrat können beispielsweise gewisse hemmende Stoffe vorkommen, an welche sich die Bakterien erst nach einer bestimmten Zeit oder nur teilweise adaptieren. So kann beispielsweise ein zu hoher Salzgehalt die Gasausbeute negativ beeinflussen. Ebenfalls besteht ein Zusammenhang zwischen dem Trockensubstanzgehalt und der maximal erreichbaren Gasausbeute. Oberhalb von rund 12% TS kann unter Umständen die Gasausbeute bereits ein wenig eingeschränkt werden. Es können – speziell bei einseitig zusammengesetzten Monochargen wie beispielsweise Kaffeesatz – bei hohen TS-Gehalten Hemmungen auftreten, welche darauf zurückzuführen sind, dass infolge hoher TS auch die Hemmstoffe in erhöhten Konzentrationen vorliegen. Bei TS-Gehalten von mehr als 35 bis 40% hört die Gärung praktisch auf, da zu wenig Feuchtigkeit für das Bakterienwachstum vorhanden ist.

In der Regel interessiert die **spezifische Gasausbeute**, welche jedoch auf verschiedene Grössen bezogen werden kann. Sie wird normalerweise in Beziehung gesetzt zum CSB bzw. zur organischen Substanz und wird angegeben als **m<sup>3</sup>/kg CSB** bzw. **m<sup>3</sup>/kg OS**. Beim CSB und der OS wird in der Regel der in den Reaktor zugeführte Wert angegeben (m<sup>3</sup>/kg CSB<sub>zugeführt</sub>); es kann jedoch auch interessieren, wie gross die Gasausbeute in bezug auf den abgebauten CSB bzw. die abgebaute OS ist. Dieser zweite Wert sagt etwas aus über den Oxydationsgrad der abgebauten Substratanteile. Bei der Gasmenge wird normalerweise das produzierte Biogas angegeben. Es ist jedoch auch möglich, die Methanmenge, welche aus energetischen Überlegungen speziell interessiert, zu deklarieren.

Beim **Vergleich von publizierten Werten** ist es daher immer nötig, abzuklären, ob es sich um produziertes Biogas oder Methan bezogen auf die zugeführte oder abgebaute Substratmenge handelt. (Die Methanmenge beträgt normalerweise rund  $\frac{2}{3}$  der Biogasmenge; die Gasausbeute pro abgebautem Material ist natürlich unter Umständen deutlich höher als diejenige pro zugeführtem Material.) Je nachdem, ob gemessene oder in

Normkubikmeter umgerechnete Gasmengen angegeben werden, können die Gasausbeuten ebenfalls recht stark schwanken (speziell wenn das Gas bei thermophiler Vergärung in noch warmem, d.h. expandiertem Zustand gemessen wird). Da leider keine «unité de doctrine» bezüglich der Angabe von Gasausbeuten besteht und nicht selten sogar Angaben fehlen, auf was sich die Ausbeute bezieht, sind Werte oft nur beschränkt vergleichbar.

Die **Gärtemperatur** kann die **Gasausbeute** direkt und indirekt ebenfalls **beeinflussen**: Nach gewissen Publikationen bauen mesophile Bakterien mit einem Temperaturoptimum von rund 35 °C gewisse Substanzen noch ab, welche von thermophilen Bakterien mit einem Optimum bei rund 57 °C nicht mehr oder unvollständiger abgebaut werden, was zu einer – allerdings kleinen – Verminderung der Gasausbeute im thermophilen Bereich führen kann. Erhöht wird der Biogasertrag im thermophilen Bereich durch die bei hohen Temperaturen deutlich schlechtere Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in der Flüssigkeit: Gas aus thermophilen Anlagen hat daher normalerweise einen höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt als Gas aus vergleichbarem Substrat bei mesophiler Vergärung (vgl. oben). Obwohl daher im thermophilen Bereich eher mehr Gas freigesetzt wird, ist die produzierte Methan- bzw. Energiemenge nicht grösser als im mesophilen Bereich, wo der Methangehalt des Gases bei gleichem Ausgangsmaterial entsprechend höher ist. Zusätzliche Verzerrungen können entstehen, wenn die Temperatur des Gases nicht berücksichtigt wird (d.h., wenn das Biogas bzw. das Methan nicht in Norm-m<sup>3</sup> [Nm<sup>3</sup>] umgerechnet wird): Warmes Gas kann infolge eines erhöhten Wasserdampfgehalts, von ausgasendem CO<sub>2</sub> und durch thermische Expansion ein deutlich grösseres Volumen einnehmen als Gas bei Raumtemperatur.

Mit der **Aufenthaltszeit** des Gärgutes im Fermenter kann dessen **Abbaugrad** beeinflusst werden. Im mesophilen Temperaturbereich sind infolge langsamen Bakterienwachstums längere Aufenthaltszeiten für denselben Abbaugrad nötig, als im thermophilen Temperaturbereich. Psychrophile Bakterienstämme mit einem Temperaturoptimum bei 20 bis 25 °C werden für Industrieabwässer oder feste Abfälle in der Regel nicht eingesetzt, da zu grosse Fermentervolumina notwendig wären.

Ob **meso- oder thermophil** gefahren wird, hängt in der Regel vom Trockensubstanzgehalt des Ausgangsmaterials ab: Dünne Abwässer, welche infolge des hohen Wassergehalts relativ wenig Biogas liefern, werden normalerweise mesophil vergoren, da zuviel Prozessenergie notwendig wäre, um sie auf thermophile Temperatur zu erwärmen. Vorbehalten sind Abwässer aus der Lebensmittel- oder Papierindustrie, welche bereits auf einem sehr hohen Temperaturniveau anfallen. Feste Abfälle hingegen, die einen hohen Anteil an organischer Substanz aufweisen, werden vorteilhaft thermophil vergoren, da relativ wenig Wasser unnütz erwärmt werden muss. Dadurch kann einerseits der Abbau beschleunigt werden und andererseits besteht der Vorteil einer besseren Hygienisierung des Gärgutes als im mesophilen Temperaturbereich. In der Regel werden Aufenthaltszeiten gewählt, bei welchen rund  $\frac{3}{4}$  des theoretisch maximal abbaubaren CSB bzw. der OS abgebaut werden. Um die maximale Gasausbeute zu erreichen, wären oft Aufenthaltszeiten von mehreren Monaten notwendig, was zu sehr grossen und unrentablen Fermentervolumina führen würde.

## 2.6 Komponenten des Fermenters

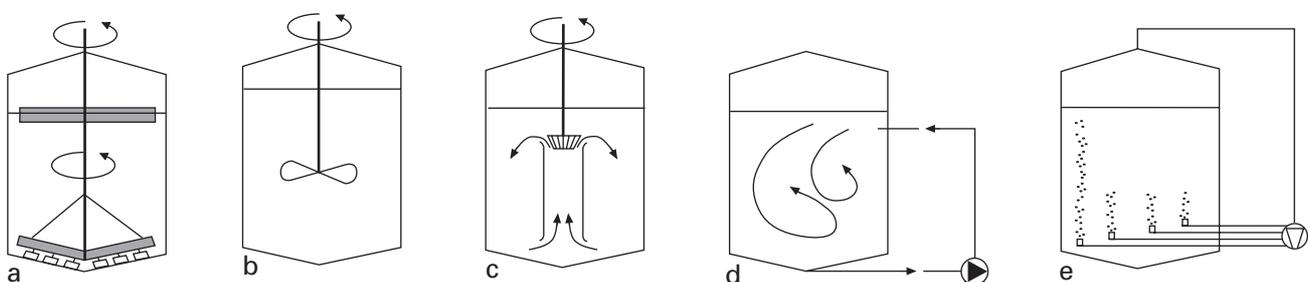
Als **Baumaterial für die Fermenter** wurde früher oft armerter **Beton** eingesetzt. Neben relativ hohen Kosten bei Kleinanlagen zeigten sich Korrosionsprobleme an der Phasengrenze flüssig/gasig im Fermenterinnern. In diesem Bereich kann nicht nur Beton, sondern auch rostfreier Stahl 1.4435 beschädigt werden. Beton sollte daher speziell in diesem kritischen Bereich mit einer Epoxyhaut oder einer Polyethylenfolie abgedeckt werden. Ausrüstungsgegenstände sollten nach Möglichkeit nicht aus Metall bestehen.

Aus ökonomischen Gründen ist heute der grösste Teil der industriellen Fermenter aus vorgefabriziertem rostfreiem **Stahl** gefertigt. Die Wanddicke beträgt rund 5 mm bei Betriebsdrucken von  $-10$  bis  $+30$  Millibar. Solche vorgefabrizierte Stahlfermenter können Kapazitäten von  $100$  bis über  $500 \text{ m}^3$  aufweisen. Vorgefertigte Fermenter aus **Kunststoff** können nur für kleine Anlagen eingesetzt werden. Im Gegensatz dazu ist es heute möglich, Fermenter einfach aus **Holz** – welches anaerob nicht abgebaut wird, korrosionsbeständig und billig ist sowie nur sehr wenig graue Energie enthält – in Grössen von bis zu  $1000 \text{ m}^3$  zu erstellen. Vorgefabrizierte Wandelemente werden dann vor Ort zusammengesraubt. Das Holz quillt mit der Feuchtigkeit des Abwassers und wird damit dicht wie ein Fass. Zur Gaserfassung und -speicherung werden Kunststofffolien auf der Substratoberfläche eingesetzt.

Die **Isolation** gegen Wärmeverluste wird mit mineralischen Dämmatten oder Polyurethanschaum bzw. anderen Isolationsmaterialien, welche nach Möglichkeit feuchtigkeitsbeständig sind, realisiert. Eine genügend starke Isolation ist für einen störungsfreien Betrieb und eine gute Energie-Nettoausbeute Voraussetzung.

Die **Durchmischung des Gärgutes** während des Gärprozesses fördert den Abbau, da Substratgradienten ausgeglichen werden und der Kontakt zwischen Bakterien und Substrat intensiviert wird. In Figur 13 sind exemplarisch einige wichtige Möglichkeiten zur Durchmischung dargestellt. Daneben bestehen noch weitere Konzepte, wie beispielsweise die Ausnutzung des entstehenden Gasdruckes bei der Biogasproduktion.

Figur 13:  
Beispiele von Rührreinrichtungen in Fermentern



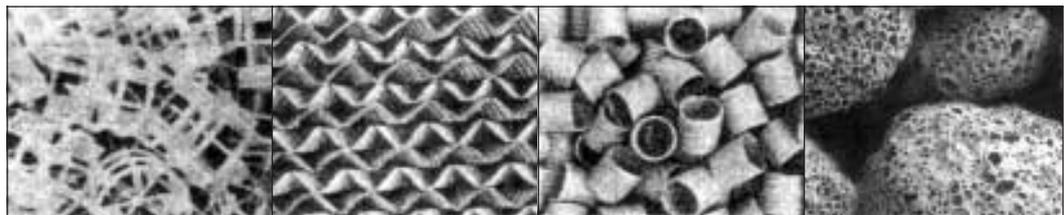
- a Paddelrührwerk (am Grund)
- b Propellerrührwerk
- c Mammutpumpe
- d Externe Rezirkulation
- e Gaseinblasen

Zur **Beschickung** des Fermenters müssen Komponenten eingesetzt werden, welche zuverlässig sind, einfach unterhalten werden können und welche die Kanalbildung im Fermenter nach Möglichkeit verhindern.

Ein UASB-Reaktor wird daher durch ein ausgeklügeltes Netz von Verrohrungen auf dem Fermentergrund gleichmässig beschickt. Anaerobfilter, welche im Downflow-Betrieb arbeiten, weisen ein Verteilsystem für das zufließende Abwasser auf, welches Gewähr bietet, dass die Oberfläche der Trägermaterialien gleichmässig versorgt wird. Für Feststoffgäranlagen werden normalerweise Kolbenpumpen oder Exzentrerschneckenpumpen eingesetzt. Bei gewissen Reaktortypen sorgen Trennwände im Fermenterinnern dafür, dass frisch zugeführtes Material nicht gleich wieder ausgetragen wird.

Der **Austrag des vergorenen Materials** geschieht bei vertikalen Anlagen normalerweise mit Hilfe der Gravitation über einen Siphon, welcher unerwünschten Gasaustritt verhindert. In Feststoffanlagen muss das Gärgut normalerweise mechanisch (Saugpumpe, Schnecke oder Kratzboden) aus dem Fermenter abgezogen werden.

In Fermentern zur Flüssiggärung können – wie bereits mehrfach erwähnt – Vorkehrungen getroffen werden, um die Biomasse zurückzuhalten. Während beim UASB-Prozess relativ leicht sedimentierbare Bakterienklümpchen gezüchtet werden, kommen im Fall von Anaerobfiltern inerte **Trägermaterialien** zum Einsatz. In Figur 14 sind einige solcher Trägermaterialien beispielhaft aufgezeigt. Als Trägermaterialien kommen Kunststoffe, Metalle, mineralische Inertstoffe oder auch Holz in Frage.

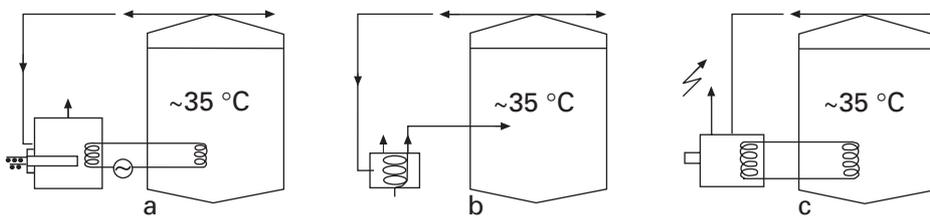


| Typ                                 | HIFLOW | PLASDEK | FLOCOR | SIRAN  |
|-------------------------------------|--------|---------|--------|--------|
| a [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ] | 65     | 148     | 150    | 30 000 |
| ε [%]                               | 96.5   | 96      | 97     | 70     |

Figur 14:  
Beispiele und Eigenschaften  
von Trägermaterialien für  
bakterielles Wachstum

a: spezifische Oberfläche  
ε: Leervolumen

Normalerweise sind industrielle und kommunale Gäranlagen beheizt. Zur **Heizung** werden in der Regel Wärmetauscher eingesetzt, welche Wärme von Wasser auf das Gärgut übertragen. Als Wärmequellen kommen neben Heizkesseln auch Wärme/Kraft-Kopplungen in Frage. Sofern die Heizung mit Biogas betrieben wird, ist daran zu denken, eine Notheizung zu installieren, damit bei Ausfall der Biogasproduktion der Fermenter trotzdem betrieben werden kann. Es kann das Gärgut sowohl im Innern des Fermenters, als auch im Vorgefäss, in der Zulaufleitung (oft bei Feststoffvergärung) oder in einer externen Schlaufe ausserhalb des Fermenters beheizt werden. Einige Beispiele von Heizungen sind in Figur 15 exemplarisch dargestellt.



- (a) Kessel mit Wärmetauscher Wasser/Schlamm  
 (b) Einpressen von Dampf aus dem Dampfgenerator  
 (c) Nutzung der Abwärme einer Wärme-Kraft-Kopplung

Figur 15:  
 Beispiele von  
 Beheizungs­möglichkeiten von  
 Fermentern

Beim Betrieb einer Anlage möchte man möglichst viel Biogas gewinnen. Daher ist – wie bereits weiter oben erwähnt – auf die Isolation des Behälters und auf den TS-Gehalt des Substrates Augenmerk zu legen. In Tabelle 6 ist die **Energiebilanz** eines mesophilen Rührkessels bei 5% TS schematisch dargestellt (Vorgaben: Belastung: 1,6 kg CSB/m<sup>3</sup>.d, T Substrat: 15 °C, T Luft: –8 °C). Bei kleinerer TS bzw. OS ist natürlich die Biogasausbeute entsprechend geringer, und es muss ein entsprechend höherer Prozentsatz des Biogases für die Beheizung des Substrates eingesetzt werden. Für eine befriedigende Energiebilanz einer Anlage ist eine genügend hohe organische Belastung des Abwassers Voraussetzung.

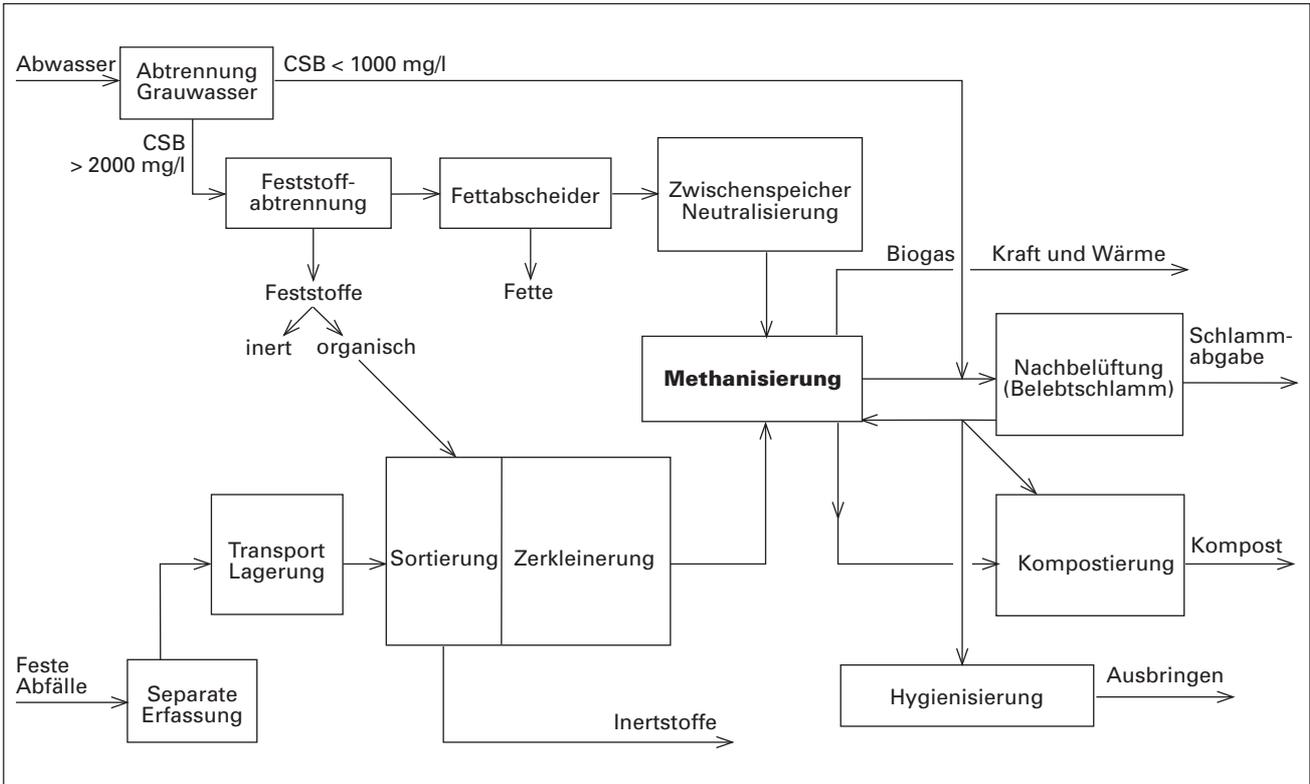
| Energieaufwand           | Energiebedarf<br>(% der Bruttoproduktion) |
|--------------------------|---|
| Heizen des Substrats     | 11–15                                     |
| Wärmeverluste            | 7–9                                       |
| Rühren und Pumpen        | 2–3                                       |
| verschiedene Komponenten | 2–3                                       |
| <b>Total</b>             | <b>22–30</b>                              |

Tabelle 6:  
 Schematische Darstellung des  
 Energieaufwands in einem  
 konventionellen Rührkessel  
 (Quelle: Chynoweth)

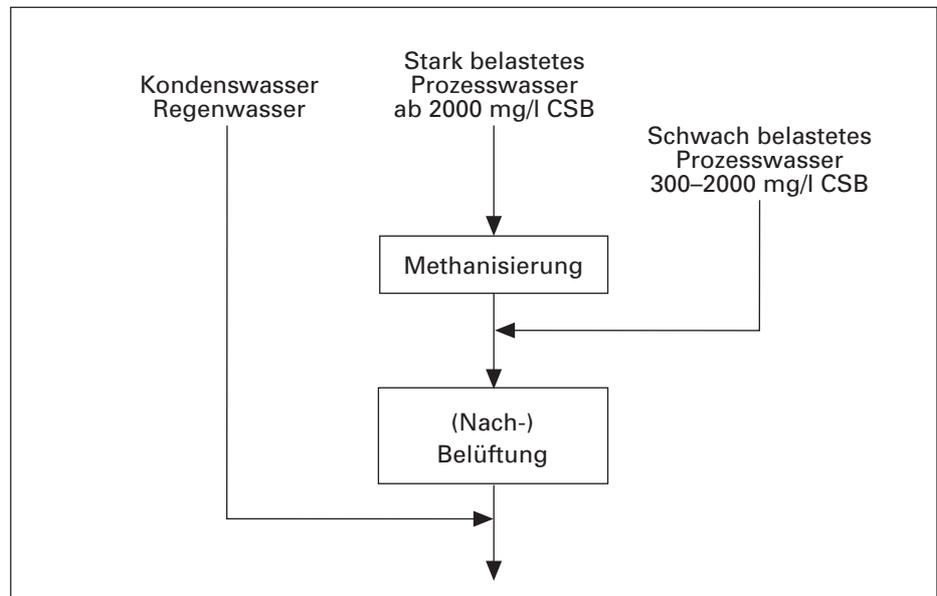
Die **Gasstrasse** einer Anlage muss mindestens folgende Komponenten enthalten: Einen Kondenswasserabscheider, welcher Wasseransammlungen in den Leitungen verhindert, eine Überdruck- und Unterdrucksicherung des Fermenters sowie eine Flammenrückschlagsicherung. Unter Umständen können Reaktoren bei gewissen Abwässern auch noch Einrichtungen zur Schaumbekämpfung aufweisen. Da das Methan relativ schlecht in Wasser löslich ist, kann praktisch 100% des Methans erfasst werden.

## 2.7 Vor- und Nachbehandlung

Figur 16 gibt eine Übersicht über vor- und nachgeschaltete Komponenten einer anaeroben Abwasser- bzw. Feststoffbehandlung. Bei der Vorbehandlung sollen die Substrate möglichst gut auf die Gärung vorbereitet werden: Die Vorbehandlung spielt eine entscheidende Rolle, da es von ihr abhängt, ob das Material dem Abbau gut oder schlecht zugänglich ist. Bei der Nachbehandlung werden die Produkte so aufbereitet, dass sie weiterverwendet, an die Umwelt abgegeben oder als Inertstoffe deponiert werden können.



Figur 16: Übersicht über der Vergärung vor- und nachgeschaltete Komponenten



Figur 17: Schematische Darstellung getrennter Erfassung und Behandlung von unterschiedlichen Abwasserströmen

## Vorbehandlung

Industriebetriebe liefern meist eine Mischung unterschiedlich stark belasteter und verschieden zusammengesetzter Abwässer. Zunächst muss hier einmal überlegt werden, **welche Abwasserströme getrennt erfasst** werden können und was die angepassten Behandlungswege sind. In Figur 17 ist ein einfaches Beispiel schematisch dargestellt.

Eine gute und wohlüberlegte Vorbehandlung trägt äusserst viel zum optimalen Betrieb einer Biogasanlage bei (vergleiche auch Figur 17): Ein wichtiger Schritt der Vorbehandlung kann die **Feststoffabtrennung** sein. Einerseits müssen nicht abbaubare Feststoffe (Mineralien, refraktärer Kohlenstoff usw.) möglichst gut abgetrennt werden, damit sie nicht unnötig viel aktives Fermentervolumen reduzieren. Andererseits sind organische Feststoffe in UASB-Reaktoren und anderen Hochleistungsprozessen nicht erwünscht, da bei der dort üblichen kurzen Aufenthaltszeit ein Abbau nicht möglich ist. Bei Anaerobfiltern kann im Falle von groben Feststoffpartikeln zudem die Gefahr des Verstopfens der Filterelemente bestehen.

Zur Feststoffabtrennung kommen Einrichtungen zur Sedimentation / Flotation, Zentrifugen, Siebe oder Netze (Trommelsiebe) in Frage. Kleine **Fettpartikel** (z.B. in Schlachthausabwässern) können mit Sieben, welche regelmässig mit heissem Wasser gereinigt werden, zurückgehalten werden. Bei höheren Fettkonzentrationen ab rund 200 mg pro Liter kommen klassische Fettabscheider zum Einsatz.

Damit der Fermenter regelmässig gespiesen werden kann, ist bei unregelmässigem Abwasseranfall ein **Pufferbehälter** vor dem Fermenter vorzusehen. In diesem Pufferbehälter kann auch die Temperatur eingestellt und Nährstoff zugeführt werden. Sofern das Abwasser sehr wenig Feststoffpartikel aufweist, ist die Möglichkeit eines Wärmeaustausches vom warmen, ausgegorenen Abwasser auf das zulaufende, noch unvergorene Abwasser in Betracht zu ziehen, was die Energieausbeute der Anlage natürlich verbessert.

Bei verschiedenen einseitig zusammengesetzten Abwässern kann eine **Nährstoffzugabe** notwendig sein. Insbesondere geht es um die Elemente Stickstoff und Phosphor, aber eventuell auch um gewisse Spurenelemente (Ni, Co, Fe usw.).

Da der günstige pH-Wert für die Methanisierung im neutralen Bereich liegt, kann eine **pH-Regulierung** vor der Einspeisung in den Fermenter sinnvoll sein. Bei Abwässern mit besonders hohen oder tiefen pH-Werten ist zumindest die Möglichkeit einer pH-Regulierung vorzusehen, obwohl diese in vielen Fällen nicht notwendig ist, da im Methanreaktor durch die Bakterien ein gepuffertes Milieu erzeugt wird, welches den pH-Wert normalerweise im günstigen Bereich stabilisiert.

In gewissen Fällen, wo hemmende Substanzen in sehr grossen Konzentrationen vorkommen, kann es auch vorteilhaft sein, in einer Vorstufe **Hemmstoffe** auszufällen oder mit anderen Mitteln (Strippen usw.) deren Konzentration zu reduzieren (z.B. Reduktion von übermässig hohen Sulphatgehalten in gewissen Abwässern).

Bei festen **Abfällen** lohnt sich eine aufwendige Aufbereitung speziell, da der beim Abbau entstehende (anaerobe) Kompost qualitativ hochwertig sein muss, damit er vermarktet werden kann. Eine möglichst vollständige

**Fremdstoffabtrennung** muss nach Möglichkeit bereits **an der Quelle** erfolgen. Trotzdem immer noch vorhandene Fremdstoffe und Verunreinigungen werden in der Regel vor dem Gärprozess ausgeschieden. Bei der Trockenaufbereitung bewegt sich beispielsweise das Gärgut über ein langsam laufendes Förderband, wo manuell und eventuell mit Magnetabscheider Fremdstoffe, wie Plastik, Gartenscheren, Glas, Blumentöpfe usw., entfernt werden. Wenn die festen biogenen Abfälle angemischt werden, besteht die Möglichkeit einer Nassaufbereitung: Hier können mit einer Schwimm/Sink-Trennung Schwerstoffe (Steine, Metalle, Glas usw.) bzw. Schwimmstoffe (Kunststoff usw.) maschinell weitgehend entfernt werden.

Bei festen biogenen Abfällen ist zudem die **Zerkleinerung und Homogenisierung** des Ausgangsmaterials äusserst wichtig (Motto: «Gut gekaut ist halb verdaut...!»). Beim Zerkleinern ist es wichtig, dass das Material möglichst nicht geschnitten, sondern zerfasert wird (Oberflächenvergrößerung) und dass langsam laufende Apparate eingesetzt werden, da in diesen Fällen normalerweise weniger Schwermetallabrieb in das Substrat gelangt. Mechanisch so aufgeschlossene Abfälle werden normalerweise anschliessend gesiebt, um immer noch vorhandene grobe Feststoffe abzutrennen. Als Zerkleinerungsaggregate kommen beispielsweise Schnecken-, Trommel- oder Hammermühlen zum Einsatz. Im Fall einer Nassaufbereitung kann einer groben Vorzerkleinerung eine weitere Zerkleinerungsstufe mit einem Mazerator nachgeschaltet sein, bei welcher die Partikelgrösse auf wenige Millimeter reduziert wird. Eine gute Zerquetschung und Zerfaserung des Ausgangsmaterials ist sinnvoll, da dadurch die spezifische Oberfläche (Angriffsfläche für Bakterien) vergrössert wird, was den Abbauprozess beschleunigt. Es sind Partikelgrössen von maximal 3 cm bzw. kleiner anzustreben.

Da bei zellulosehaltigem Ausgangsmaterial die Hydrolyse der Zellulose geschwindigkeitsbestimmend ist, kann eventuell ein Schritt zum **Zelluloseaufschluss** vorgeschaltet werden. Tabelle 7 gibt einen Überblick über mögliche Aufschlusschritte.

| Verfahren                                     | Lignin   | Zellulose           | Kosten, Bemerkungen  |
|---|----------|---------------------|--|
| Behandlung mit Lauge                          | Lösung   | Aufquellen          | vorgängige Hemizelluloseextraktion wünschenswert zur Reduktion von Chemikalienkosten |
| Behandlung mit Schwefeldioxid                 | Lösung   | beschränkter Effekt | bei anschliessendem anaerobem oder aerobem Abbau nicht sinnvoll                      |
| Ligninaufschluss mit Lösungsmitteln           | Lösung   | kein Effekt         | Potential an ligninhaltigen Nebenprodukten   |
| Aufschluss mit Dampf                          | Aufbruch | beschränkter Effekt | Verlust an Hemizellulose, Kosten für Dampferzeugung                                  |
| Biologischer Ligninaufschluss                 | Angriff  | kein Effekt         | zu langsam   |
| Kälteaufschluss mit flüssigem NH <sub>3</sub> | Aufbruch | Aufschluss möglich  | hohe Kosten für Ammoniak   |

Tabelle 7:  
Möglichkeiten der Vorbehandlung ligno-zellulosehaltiger Substrate (Quelle: Tsao)

Bei allen erwähnten Methoden wird der Aufschluss von verholztem Material und die verbesserte Erzeugung von Mono- und Disacchariden anvisiert. Allerdings ist es sehr fraglich, ob sich der finanzielle Aufwand im einzelnen Fall lohnt.

## Nachbehandlung

Der Vergärung von Abwässern nachgeschaltete Schritte können umfassen: Aerobe Nachreinigung, Nitrifizierung/Denitrifizierung, Behandlung des Überschussschlammes sowie von Abluft. Bei der Vergärung fester Abfälle kommen in Frage: Hygienisierung und Nachkompostierung des Gärgutes, Behandlung des Überschusswassers sowie Abluftbehandlung.

Wenn industrielle **Abwässer** vergoren werden, handelt es sich in der Regel um eine **Vorreinigung**, bei welcher der CSB auf 1000 bis maximal 300 mg/l reduziert wird. In der Schweiz ist eine zusätzliche Reinigungsstufe notwendig, bevor diese Abwässer in den Vorfluter gelangen können. Eine Möglichkeit ist, diese in der organischen Fracht nun doch beträchtlich reduzierten Abwässer der kommunalen Kläranlage zuzuführen, sofern diese eine genügende Kapazitätsreserve aufweist und sofern nicht unnötig hohe Einleitungskosten anfallen (z.B. bei Abwassergebühren auf Grund des Volumens und nicht der Fracht).

Als zweite Möglichkeit besteht die Behandlung vor Ort. In diesem Fall wird dem anaeroben Reaktor eine **Belüftung** nachgeschaltet, wo der Überschussschlamm sowie allenfalls anaerob nicht abgebauter COD weitestmöglich abgebaut wird.

Ebenso kann es sinnvoll sein, bei hohen Stickstoffgehalten eine **Nitrifizierung/Denitrifizierung** nachzuschalten. Im anaeroben Milieu entsteht Ammonium-Stickstoff. Durch eine nachträgliche Belüftung wird dieser biologisch zu Nitrit und Nitrat oxydiert, um anschliessend im anoxischen Milieu biotechnologisch zu elementarem Stickstoff reduziert zu werden.

Sowohl bei der anaeroben Gärung als auch bei den biologischen Nachbehandlungen entsteht **Überschussschlamm**. Beim anaeroben Abbau kann etwa mit 0.1 bis 0.15 kg Bakterien-TS pro kg abgebautem CSB gerechnet werden. Dieser Überschussschlamm muss vorzugsweise entweder direkt nach der Vergärung oder allenfalls als Belebtschlamm nach der Belüftungsstufe in einer Fest/Flüssig-Trennung abgetrennt und separat entsorgt werden.

Sofern es sich bei der Methanisierung nicht um einen UASB-Reaktor handelt, dessen Granulat relativ leicht sedimentierbar ist, fällt der Bakterien-schlamm mit einer TS von etwa 3–5% an. Eine weitere Eindickung erfordert einen relativ hohen und kostspieligen technischen Aufwand. Beim direkten Ausbringen auf das Feld sind die Auflagen der eidgenössischen Klärschlammverordnung bezüglich der Hygiene einzuhalten (weniger als 100 Enterococci pro g), was in einzelnen Fällen eine nachträgliche **Hygienisierung** nötig machen könnte.

Vergorene Abwässer können **Gerüche** emittieren: Speziell wenn der Gärprozess in Folge kurzer HRT unvollständig abläuft, ist es möglich, dass im Abfluss noch höhere Konzentrationen an organischen **Säuren** vorhanden sind, welche übel riechen. Bei hohen Schwefelgehalten des Abwassers entwickelt sich in der Anaerobie **Schwefelwasserstoff**, welcher nach faulen Eiern riecht. Kritische Bereiche sollten daher in diesen Fällen abgedichtet werden, flüchtige Stoffe (wie z.B. Ammoniak) allenfalls durch Strippen extrahiert und Abluft allgemein abgezogen und gereinigt werden. Zur Reinigung kann die Abluft über Aktivkohlefilter, Waschkolonnen oder (Kompost-)Biofilter gereinigt werden (Strömungsgeschwindigkeiten in Waschkolonnen und Biofiltern: rund ein Meter pro Sekunde). Es ist zu

berücksichtigen, dass in der Abluft unter besonderen Voraussetzungen Spuren von Methangas vorhanden sein können, welche unter ungünstigen Bedingungen zu einem explosiven Gemisch führen könnten.

Die Nachbehandlung **fester Abfälle** betrifft sowohl den festen Gärrückstand als auch das Presswasser aus der Fest/Flüssig-Trennung.

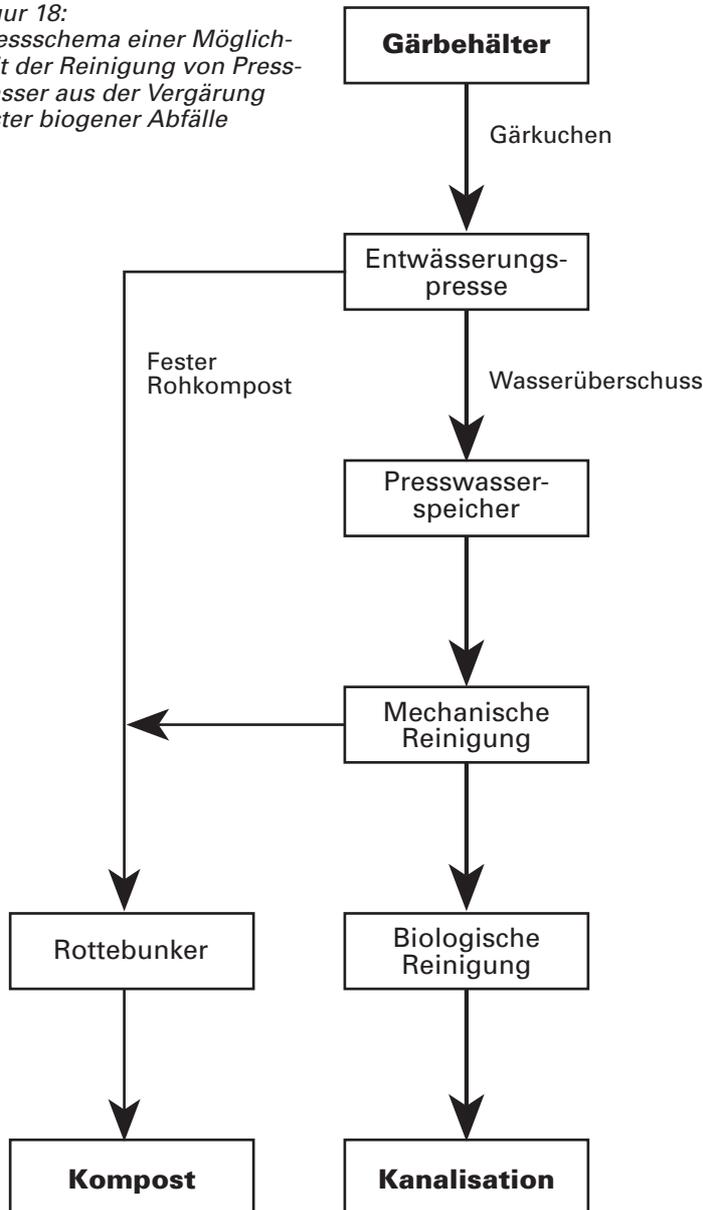
Das noch feuchte **Gärgut** muss – sofern es nicht als dicker Flüssigdünger direkt auf das Feld ausgebracht wird – auf eine Trockensubstanz von rund 40% eingedickt werden (Zentrifugen, evtl. Schneckenpressen usw.). Mit einer **Nachkompostierung** kann Lignozellulose angegriffen, Ammonium in Nitrat umgewandelt und eine zusätzliche Hygienisierung erreicht werden (Hygienisierung speziell beim mesophilen Einstufenprozess wertvoll).

Diese Nachkompostierung zur Verbesserung der Produktqualität dauert normalerweise nur 7 bis 14 Tage. Die Temperatur steigt in der Regel nicht mehr über 50 °C, da leicht abbaubares Material bereits abgebaut ist. Allenfalls besteht die Möglichkeit, das Gärgut der Endphase einer parallel betriebenen Strauchschnittkompostierung zuzuführen.

Das bei der Fest/Flüssig-Trennung anfallende **Presswasser** wird sinnvollerweise vor Ort behandelt, sofern es nicht zur Mietenbewässerung einer Kompostierung oder zur direkten landwirtschaftlichen Verwendung eingesetzt wird. Die Presswasserbehandlung kann weitere Schritte beinhalten, wie Zentrifugation zur zusätzlichen Feststoffabtrennung, Flockung mit Flockungsmitteln, Nitrifizierung/Denitrifizierung und intensive Belüftung. Eine Möglichkeit ist in Figur 18 dargestellt.

Geruchsbelastete **Abluft** entsteht vor allem beim Annahmehunker und allenfalls im Bereich des Austrags von vergorenem Material. Die Methoden zur Abluftbehandlung wurden bereits bei den Abwässern erwähnt.

Figur 18:  
Fließschema einer Möglichkeit der Reinigung von Presswasser aus der Vergärung fester biogener Abfälle



## 2.8 Inbetriebnahme

Da die anaeroben Bakterien sich langsam vermehren und Populationen, welche an das jeweilige Substrat angepasst sind, sich zuerst entwickeln müssen, ist die **Inbetriebnahme eines Reaktors** sehr oft ein recht heikles Unterfangen. In der Folge läuft der Prozess hingegen meist problemlos ab.

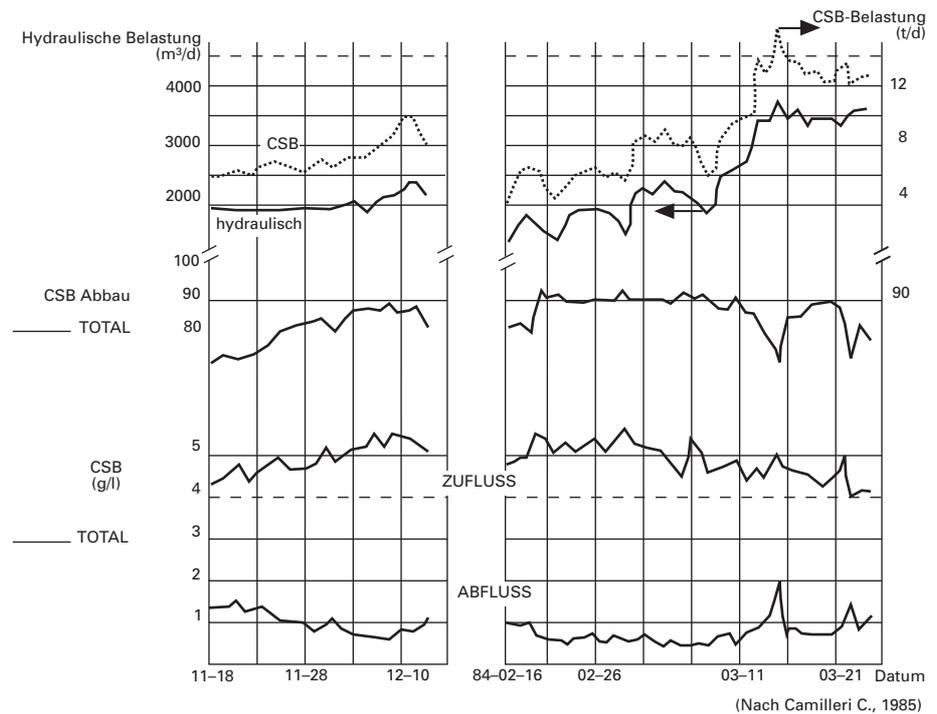
Im Substrat ursprünglich vorhandener Sauerstoff spielt insofern keine grosse Rolle, als er von (semi)aeroben Bakterien sehr rasch aufgezehrt wird. Danach werden zunächst sauerstoffhaltige Verbindungen wie Nitrate und Sulphate oder dreiwertiges Eisen reduziert, bevor es zur eigentlichen Methanbildung kommt. Voraussetzung für die Biogasproduktion ist eine **genügend grosse Bakterienpopulation**. Während methanogene Bakterien in Substraten wie Gülle von Wiederkäuern oder im Klärschlamm in grosser Anzahl vorhanden sind, sind in industriellen Abwässern – speziell wenn diese sehr heiss anfallen – kaum Bakterien anzutreffen. In diesem Fall ist es notwendig, den Fermenter mit **Impfmaterial anzufahren**. Das Impfmaterial ist vergorenes Material aus einer Anlage, welche mit einem möglichst vergleichbaren Substrat betrieben wird. Allenfalls kann der Fermenter sogar mit Material aus mehreren verschiedenen Anlagen gefüllt werden, damit eine möglichst hohe Diversität der Biozönose gewährleistet ist und somit die Wahrscheinlichkeit steigt, dass das Impfmaterial für den Abbau geeignete Bakterien enthält.

Während des **Anfahrens** wird der Reaktor generell mit einer **deutlich kleineren Faulraumbelastung** beschickt, als dies für den Normalbetrieb vorgesehen ist. Je nach Reaktortyp und Substrat kann es recht lange dauern, bis eine optimal an das Abwasser adaptierte Bakterienpopulation sich entwickelt hat (im Extremfall mehrere Monate bis zu einem Jahr). Wenn die Population einmal angepasst ist, läuft ein Reaktor normalerweise steuerungsfrei ohne weitere Impfmassnahmen.

Im Fall von **UASB-Reaktoren** ist die Impfung insofern einfach, als überschüssiges Granulat von einem Reaktor mit ähnlichem Substrat übernommen werden kann. Im günstigen Fall kann schon nach wenigen Tagen die Belastung gesteigert werden, wobei darauf zu achten ist, dass der pH im Fermenter im Neutralbereich liegt.

Im Fall von **Anaerobfiltern** hingegen dauert das Anfahren in der Regel deutlich länger: Die zunächst im Impfschlamm vorhandenen Bakterien müssen die Trägermaterialien besiedeln und sich dort festsetzen. Aus diesem Grund ist der Filter zunächst nur mit einer sehr kleinen Belastung zu beschicken; die hydraulische Belastung darf diejenige eines voll durchmischten Rührkessels nicht überschreiten, da sich zunächst der grösste Teil der Biomasse in Suspension befindet. Sobald gute Abbauwerte im Ausfluss beobachtet werden, kann die Belastung schrittweise erhöht werden. Neben Gasproduktion und Gaszusammensetzung geben auch die Säurewerte einen guten Anhaltspunkt über das Funktionieren des Fermenters; sie sollten im Ausfluss Konzentrationen von 10 bis 20 meq/Liter nicht überschreiten. Bevor die Faulraumbelastung erhöht (maximal: verdoppelt) wird, sollte mindestens während 10 Tagen ein «steady state»-Zustand erreicht werden. Anfahrzeiten von rund einem halben Jahr sind für Anaerobfilter die Regel. Allerdings besteht nachher der Vorteil, dass ein Anaerobfilter sehr stabil ist und eine Biozönose mit hoher Diversität aufweisen kann (was beim UASB weniger der Fall ist).

Bei Industriebetrieben, wo Abwässer saisonal anfallen, ist unter Umständen zu Beginn einer Kampagne jährlich jeweils ein **Wiederanfahren** des Fermenters notwendig. In Figur 19 ist beispielhaft das Wiederanfahren eines Fermenters in der Zuckerindustrie dargestellt. Mitte Dezember wurde eine erste Kampagne beendet und der Filter stillgelegt. Mitte Februar begann die zweite Kampagne, wobei – dank der bereits festsitzenden Biomasse – die Reinigungsleistung des Filters sogleich die ursprünglichen, hohen Werte annahm.



Figur 19:  
Wiederanfahren eines  
Anaerobfilters zur Vergärung  
von Abwässern der Zucker-  
industrie (Quelle: Camilleri)

Anaerobfilter sind in der Regel weniger problematisch zum Wiederanfahren als Schlammbedreaktoren oder konventionelle Rührkessel. In diesen letzteren Fällen ist es unter Umständen sinnvoll, auch während abwasserarmen Zeiten ständig eine kleine Menge organischen Materials zur Fütterung der Bakterien in den Reaktor zu führen.

## 2.9 Überwachung des Gärprozesses

Um den Gärprozess stets optimieren und an allfällige Substratschwankungen anpassen zu können, ist es notwendig, diejenigen Prozessparameter, welche den Gärprozess beschreiben, zu kennen und möglichst regelmässig zu erfassen.

Naheliegende Parameter sind die **Biogasproduktion** und die **Gaszusammensetzung**. Je nach Substratzusammensetzung ist eine bestimmte Gasausbeute und Gaszusammensetzung zu erwarten. Treten plötzlich grössere Abweichungen vom Erfahrungswert auf und steigt insbesondere der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Biogas, deutet dies auf eine Störung hin (z.B. verursacht durch irrtümliche Zugabe von gewissen Desinfektionsmitteln oder anderen Hemmstoffen). Biogasproduktion und -zusammensetzung können mit relativ billigen Messgeräten einfach gemessen werden (z.B. Messung des CO<sub>2</sub>-Anteils durch Absorption in KOH).

Die **Abbauleistung** des Fermenters, gemessen beispielsweise **als CSB-Reduktion**, gibt ebenfalls eine gute Auskunft über den Zustand der Biozönose. Bei der CSB-Messung ist zu berücksichtigen, dass CSB sowohl gelöst, als auch in Form suspendierter Feststoffpartikel vorhanden sein kann. Unter Umständen besteht sogar die Möglichkeit, die Abbauleistung anhand einer Kohlenstoffbilanz zu bestimmen (Zufluss, Abfluss, Biogas).

Da die methanogenen Bakterien nur in einem kleinen «thermodynamischen Fenster» bei neutralen pH-Werten Biogas bilden können, ist der **pH-Wert** ebenfalls ein guter Indikator für das Funktionieren des Fermenters. Wenn der pH-Wert in den Bereich von 6.5 und darunter sinkt, ist höchste Vorsicht geboten. Die Beschickung ist – nach Möglichkeit mit Hilfe von einem Bypass – einzustellen oder zumindest zu reduzieren, damit sich nicht noch zusätzliche Säuren akkumulieren und in einem Aufschaukelungsprozess die Gärung zum Erliegen bringen (sonst wäre u.U. ein Neuanfahren des Fermenters notwendig).

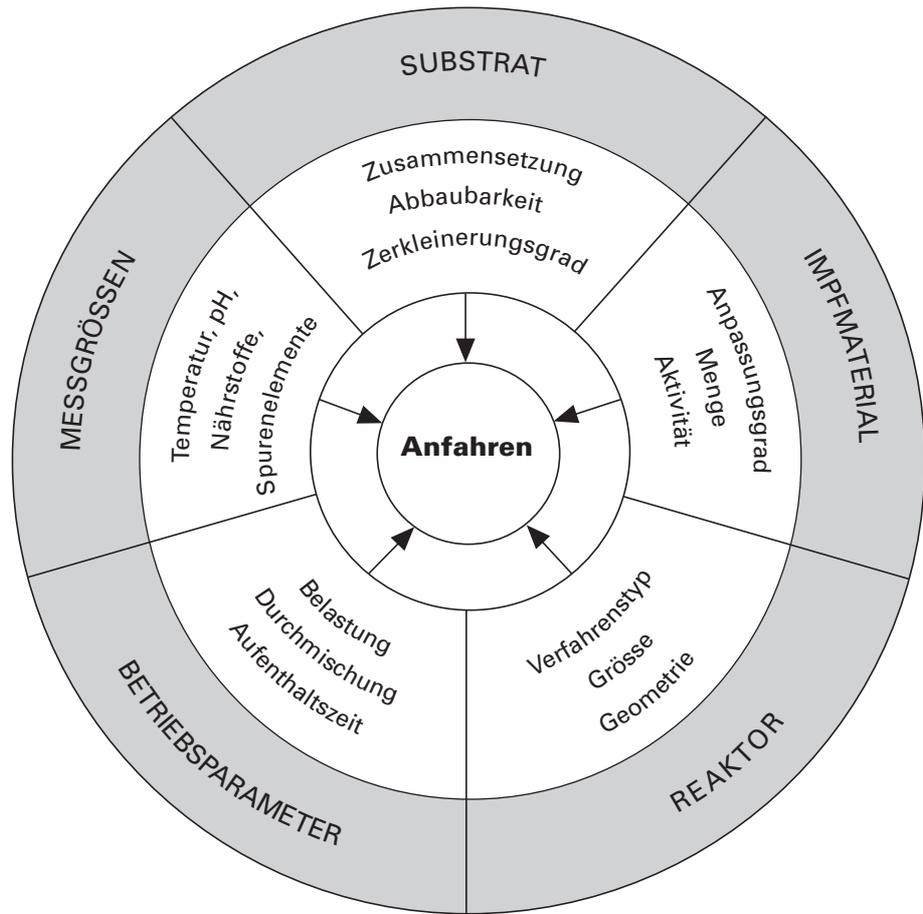
Die **Alkalinität** gibt die Pufferkapazität des Mediums an, d.h. sie zeigt an, wie viele Säuren neutralisiert werden können, ohne dass sich der pH stark verändert. Gut funktionierende Fermenter sind normalerweise durch das Gleichgewicht zwischen Kohlensäure, Hydrogencarbonat und Carbonat gut gepuffert, so dass der pH automatisch im für die Gärung günstigen Bereich liegt. Die Alkalinität sollte idealerweise etwa im Bereich von 1 g Hydrogencarbonat pro Liter liegen.

Zur Einstellung des pHs und der Alkalinität eignet sich Kalk besonders gut, da Kalk nicht nur basisch wirkt, sondern auch die im Fall eines pH-Absinkens verlorene **Pufferkapazität** wieder herstellt. Gleichzeitig ist Kalk kostengünstig. Allerdings sollte, wenn immer möglich, ohne Zusatzstoffe auskommen werden, indem durch geeignete Wahl der Betriebsparameter ein selbstregulierender Zustand herbeigeführt wird.

Die **flüchtigen Fettsäuren** spielen eine äusserst wichtige Rolle bei der Fermentersteuerung, da rund  $\frac{3}{4}$  des Methans aus der Essigsäure stammen. Wie bereits mehrfach erwähnt, nimmt bei einer Störung die Propion- und Buttersäurekonzentration zu. Die Beobachtung von Bildung und Abbau der Propionsäure ist wahrscheinlich der sensibelste Parameter, um den Gärprozess optimal regulieren zu können. Allerdings setzt die Analytik breite Erfahrung im Umgang mit einem Gaschromatographen voraus.

Die **Gärtemperatur** beeinflusst die Kinetik und Stabilität des Abbaus, die Qualität des Endprodukts wie auch die Energiebilanz der Anlage. Für die Stabilität des Prozesses ist es sehr vorteilhaft, wenn der Betrieb mit möglichst wenig **Temperaturschwankungen** aufrechterhalten werden kann. Die Funktion eines Fermenters kann – speziell im thermophilen Bereich – schon durch ständige Schwankungen um ein bis zwei Grad spürbar beeinträchtigt werden. Allgemein scheint es für den Prozess vorteilhafter zu sein, ein bis zwei Grad tiefer zu fahren und dafür die Temperatur möglichst stabil zu regulieren.

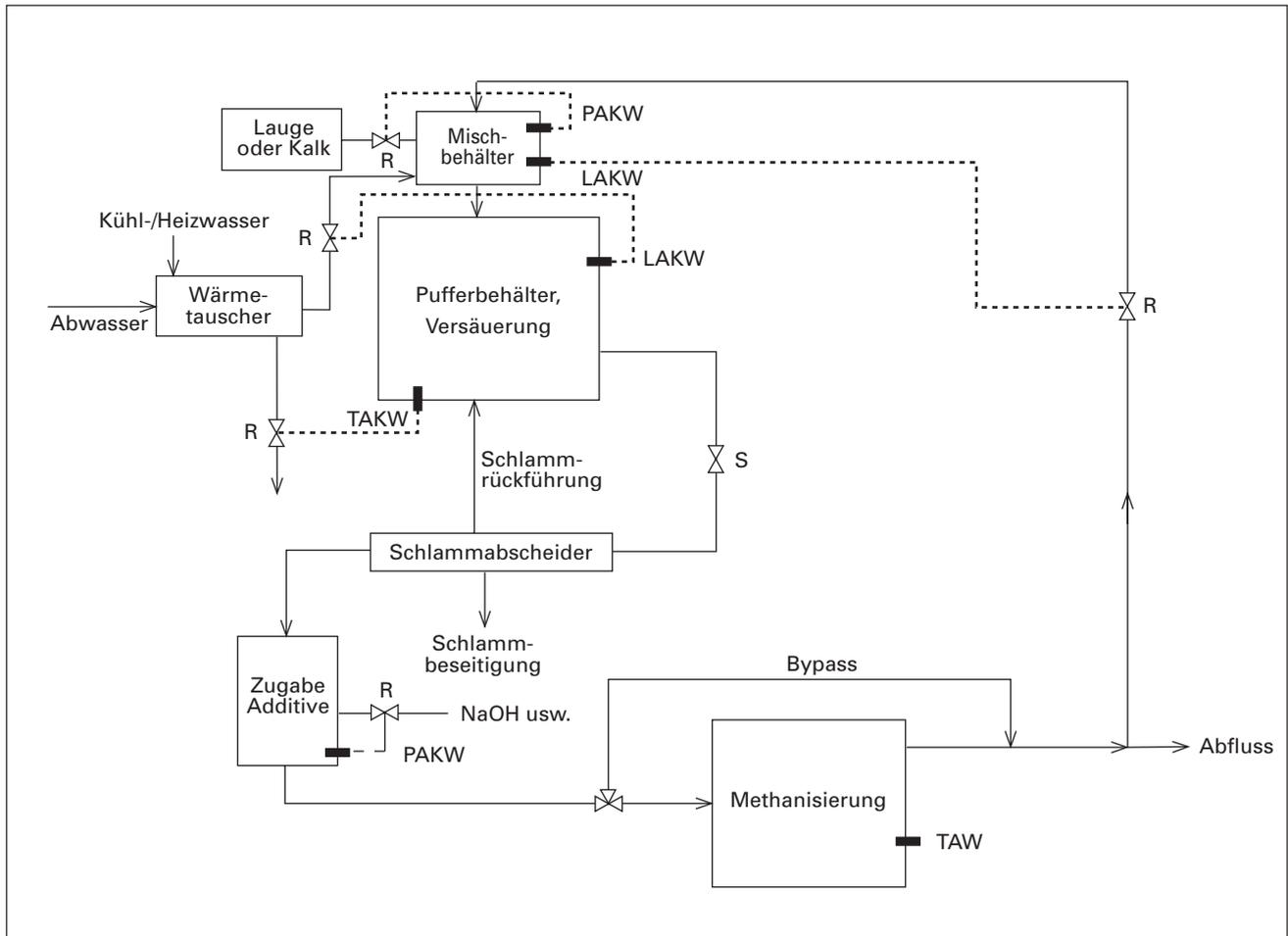
Figur 20:  
Einflussgrößen auf das  
Anfahren und den Betrieb  
eines Fermenters



In Figur 20 ist die Palette der Faktoren, welche das Anfahren und den Betrieb des Fermenters beeinflussen, noch einmal zusammengefasst. Die **Zuverlässigkeit des Abbaus** ist abhängig von der **Instrumentierung** der Anlage (Gaszähler, Instrumente zur Messung von Gaszusammensetzung, Leitfähigkeit, Temperatur, pH, Belastung usw.), der **regelmässigen Auswertung** der erhaltenen Daten sowie den **Eingriffsmöglichkeiten**. Während Grössen wie Temperatur, pH, eventuell Gasproduktion usw. normalerweise on-line erfasst werden, werden andere Grössen wie CSB, eventuell Säurezusammensetzung usw. off-line erfasst, d.h. es werden je nach Bedarf in grösseren oder kleineren Abständen Proben genommen und im Labor analysiert.

Wie aufwendig die eingesetzte **Mess- und Regeltechnik** ist, hängt von Substrateigenschaften und vom gewählten Reaktortyp ab. Aufwendigere Einrichtungen sind dort sinnvoll, wo die Substratzusammensetzung stark schwanken kann und/oder die Aufenthaltszeit im Fermenter sehr kurz ist, so dass rasch reagiert werden muss, falls eine Störung auftreten sollte. Es ist

darauf zu achten, dass möglichst Grössen erfasst werden, welche mit relativ wenig Aufwand gemessen werden können. Messen von Enzymaktivitäten, Auszählen von Bakterien, Messen des Gehaltes an Nukleinsäuren oder Proteinen ist für Praxisanlagen zu aufwendig.



Figur 21:  
RI-Schema einer Anlage zur Flüssigvergärung  
R: Regelventil  
S: Schliessventil  
L: Füllstand  
P: pH  
T: Temperatur  
A: Anzeige  
K: Kontrolle  
W: Warnung

Aus thermodynamischen Gründen ist es nicht möglich, den Prozess der Methanisierung – welcher sich über Hunderte von Jahrmillionen entwickelt hat – noch weiter zu optimieren. Das Entwickeln von gentechnologisch veränderten Bakterien mit verbesserten Abbauleistungen ist – wie schon einmal erwähnt – daher praktisch mit Sicherheit auszuschliessen. Hingegen könnte es möglich sein, dass in Zukunft **Enzymmischungen** auf den Markt kommen, welche als Exoenzyme die Hydrolyse entsprechend beschleunigen. Vom Kauf von liophilisierten Bakterien wird dringend abgeraten, da Erfahrungen bis jetzt gezeigt haben, dass kaum dauerhafte Effekte erzielt werden und sich die Kosten im Vergleich zum Nutzen kaum lohnen.

Figur 21 zeigt ein mögliches RI-Schema für die **Instrumentierung** einer Anlage. Wie bereits erwähnt, kann in einzelnen Fällen je nach der jeweiligen Voraussetzung die tatsächlich getroffene Lösung vom hier gezeigten Schema abweichen. Im Beispiel sind vor dem Versauerungsreaktor Temperatur, pH und Volumenströme geregelt. Eine zweite Möglichkeit, die Substrateigenschaften zu verändern, besteht unmittelbar vor dem Methanreaktor: Mit dem Bypass kann im Fall einer allfälligen Störung der Methanreaktor (teilweise) überbrückt werden und so die Möglichkeit geschaffen werden,

dass sich die Bakterien wieder erholen. Die hier dargestellte Lösung kann allerdings nur realisiert werden, sofern es möglich ist, im Störfall das unvergorene Abwasser der ARA zuzuführen. Andernfalls wäre für den Notfall ein Stapelbehälter und/oder eine Nachbelüftung vorzusehen.

Ein Teil des vergorenen Materials kann als Impfmateriale wieder an den Anfang des Verfahrens rückgeführt werden. Mit einer Regelung, wie sie hier dargestellt ist, kann ein Prozess einfach kontrolliert werden, so dass die häufigsten Ursachen für Störungen (pH-Schwankungen, Temperaturschwankungen, hydraulische Überlastung, Änderungen in der Substratzusammensetzung usw.) weitgehend ausgeschlossen werden können.

## 3 Verfahrenswahl

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>3.1</b> | <b>Einsatzbereiche einzelner Verfahren</b> | <b>55</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Eventuell nötige Vorabklärungen</b>     | <b>57</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Massenbilanz</b>                        | <b>61</b> |



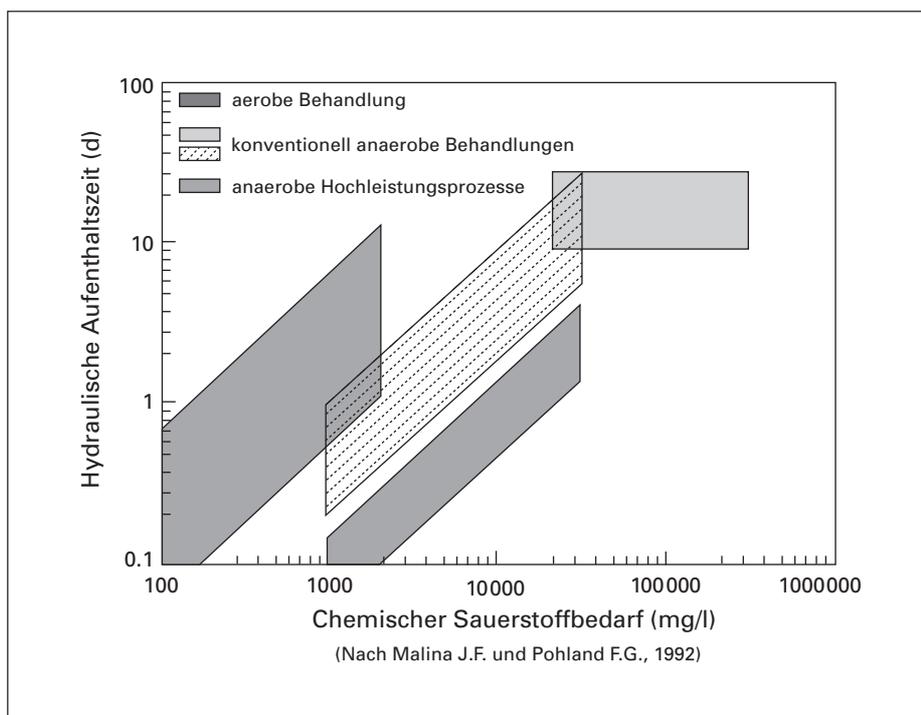
In diesem Kapitel werden die notwendigen **Grundlagen** für die Ausarbeitung einer **groben technischen Machbarkeitsstudie** vorgestellt. Zunächst gilt es einmal, sich Gedanken zu machen, welches System in einem speziellen Fall am sinnvollsten eingesetzt wird. Im folgenden Kapitel 4 wird dann gezeigt, wie die Produkte verwertet werden können; die sinnvolle Verwertung der Produkte beeinflusst natürlich ebenfalls das Resultat einer Machbarkeitsstudie.

Wie bereits weiter oben festgehalten, verfolgt man mit der Methanisierung je nach Situation mit unterschiedlicher Gewichtung **zwei Ziele**:

- Einerseits die Reduktion der organischen Belastung in einem Abfall oder einem Abwasser und
- andererseits die Produktion von erneuerbarer Energie.

### 3.1 Einsatzbereiche einzelner Verfahren

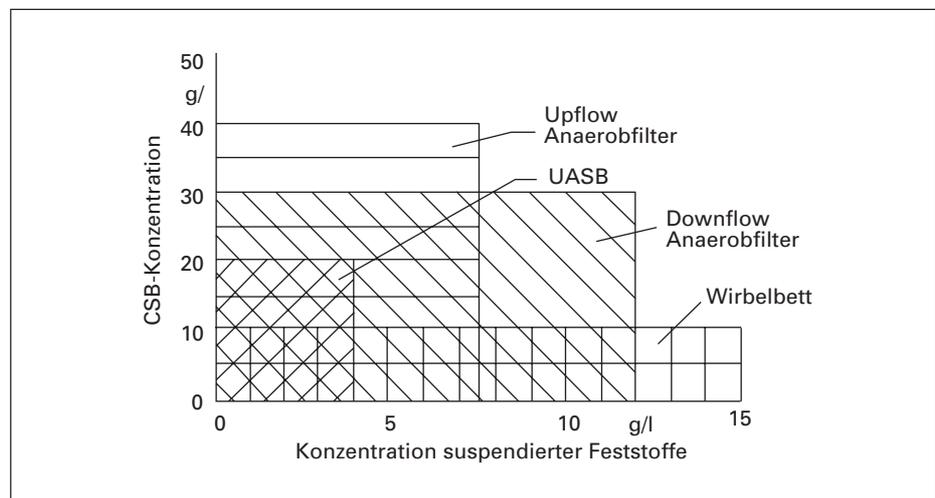
Wie ebenfalls bereits erwähnt, beeinflussen die Substrateigenschaften wie auch die Wahl der Gärtechnologie den Abbau. In Figur 22 sind die **Einsatzbereiche von aeroben und anaeroben Verfahren** grob als Funktion des CSB-Gehalts im Ausgangsmaterial dargestellt. Unterhalb eines CSB von rund 2g/l ist die anaerobe Gärung nicht geeignet, da die Energiebilanz negativ wird und der Abbaugrad unbefriedigend ist (es ist so wenig Substrat vorhanden, dass ein spürbar weitergehender Abbau für die – energetisch nicht auf Rosen gebetteten – anaeroben Bakterien verhältnismäßig zu energieaufwendig ist). Die konventionellen anaeroben Abbauverfahren sind unterteilt in den Kontaktprozess (diagonal, schraffiert) und den konventionellen Fermenter, wie er als Rührkessel oder Pflopfstromreaktor für feststoffreiche flüssige sowie feste Substrate zum Einsatz kommt (horizontal, nicht ausgefüllt).



Figur 22:  
Schematische Darstellung der Einsatzbereiche verschiedener aerober und anaerober Verfahren in Abhängigkeit der CSB-Belastung des Ausgangsmaterials  
(Quelle: Malina und Pohland)

In Figur 23 sind Anhaltspunkte für die Einsatzbereiche von verschiedenen Hochleistungssystemen für die Behandlung von Abwässern schematisch dargestellt. Die Belastungen im CSB und bezüglich der suspendierten Feststoffe sind natürlich meist grobe Durchschnittswerte; es kann in einer Praxisanlage durchaus vorkommen, dass die Substratzusammensetzung innert kurzer Zeit relativ stark schwankt und dass bei einem bestimmten Reaktortyp Spitzenbelastungen erreicht werden, welche deutlich über der maximalen durchschnittlichen Belastung liegen. Mit einer recht hohen Wahrscheinlichkeit wird ein gut eingefahrener Reaktor solche kurzfristigen Spitzen ohne weiteres überstehen, ohne dass die Abbauleistung signifikant zusammenbricht. Wenn jedoch Spitzenwerte über längere Zeiträume vorkommen können, ist dies bei der Reaktorwahl zu berücksichtigen (dies gilt auch für Abweichungen nach unten, wie sie ausgeprägt bei Kampagne-Betrieben vorkommen).

Figur 23:  
Schematische Darstellung der Einsatzbereiche verschiedener Reaktortypen in Abhängigkeit vom gelösten und partikulären CSB (Quelle: Weiland und Rozzi)



Natürlich beeinflussen nicht nur der gelöste und der partikuläre CSB die Wahl des Fermentertyps. Eine ganze Reihe von weiteren Einflussgrößen kann die Wahl zusätzlich beeinflussen. Einige Beispiele sind in der Tabelle 8 aufgeführt:

| Auswahlkriterium                         | Rührkessel | Kontakt | UASB | Anaerobfilter | Wirbelbett |
|--|------------|---------|------|---------------|------------|
| Anfahren des Fermenters                  | ++         | +       | - *) | -             | -          |
| Anreicherung von Biomasse                | -          | +       | ++   | +(+)          | ++         |
| Pfropfstromverhalten                     | -          | (+)     | +    | ++            | -          |
| Stabilität gegen hydraulischen Schock    | +          | -       | -    | ++            | ++         |
| Stabilität gegen organische Belastung    | -          | -       | +    | +             | +          |
| Verträglichkeit: suspendierte Feststoffe | ++         | +       | -    | +             | ++         |
| Verträglichkeit: gegenüber Verstopfung   | ++         | +       | ++   | -             | ++         |
| Überwachungsaufwand                      | ++         | +       | +    | +             | -          |

Tabelle 8:  
Einsatzbereiche von verschiedenen Reaktortypen in Abhängigkeit verschiedener Auswahlkriterien

- : unvorteilhaft, + : vorteilhaft, ++: sehr vorteilhaft (Quelle: Weiland und Rozzi, modifiziert)

### 3.2 Eventuell nötige Vorabklärungen

Selbstverständlich ist ein gutes Funktionieren der Anlage Voraussetzung für einen guten Gärprozess. **Störungen** können auftreten nicht nur infolge schlechter Reaktorwahl oder falscher Dimensionierung, sondern beispielsweise auch wegen schlechter Temperaturkontrolle, Undichtigkeiten im Fermenter, ungenügender Durchmischung (was zu Sedimentation oder Schwimmdeckenbildung führen kann) sowie als Folge von Verstopfungen durch Feststoffpartikel, Fette oder Carbonatausfällungen. Im Rahmen der europäischen Gemeinschaft werden verschiedene Reaktoren regelmässig überwacht und deren Daten erfasst. In der folgenden Tabelle 9 sind einige Systeme mit ihren wichtigsten Abbauwerten dargestellt.

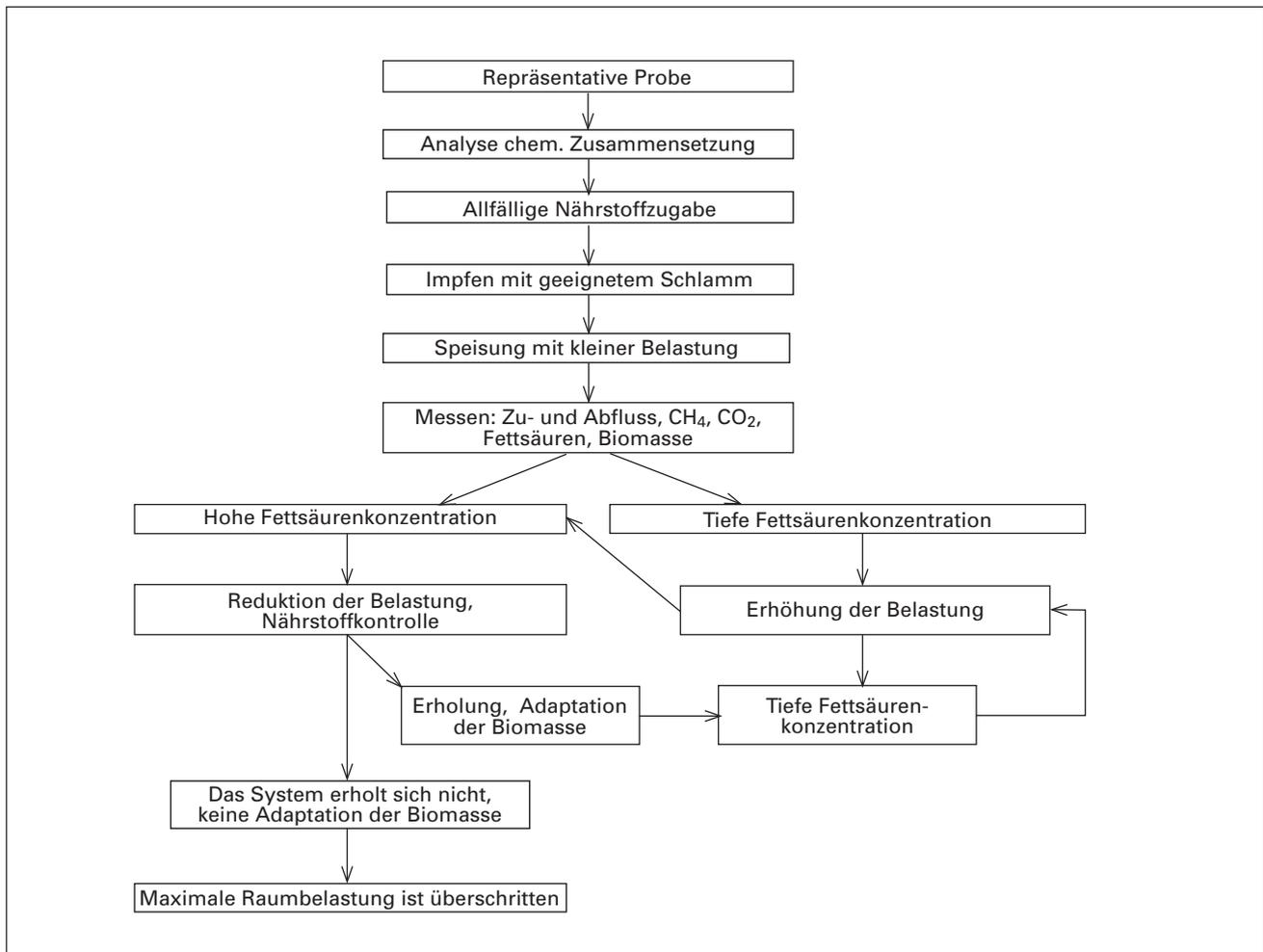
Die Angaben in Tabelle 9 geben einen ersten Anhaltspunkt, mit welchen Abbauleistungen bei einem bestimmten Substrat ungefähr gerechnet werden kann. Sofern man jedoch bei einem bestimmten Abfall oder Abwasser noch keine Angaben aus der Praxis besitzt, müssen zuerst die **Betriebsparameter** im Labor und/oder im Pilotmassstab **optimiert** werden. Es lohnt sich, in eine Vorstudie zu investieren, da damit anschliessend in den meisten Fällen viel Geld gespart werden kann. In Figur 24 ist das Vorgehen schematisch dargestellt, welches im Lauf einer solchen Vorabklärung notwendig ist.

In einem ersten Schritt gilt es eine **repräsentative Probe** des Abfalls oder Abwassers zu erhalten, was in der Regel gar nicht so einfach ist, da viele Industrieabwässer in ihrer Zusammensetzung und auch in der Menge täglich, wöchentlich oder saisonal stark schwanken können. So können etwa Abwässer aus der Papierindustrie nicht nur in ihrem CSB-Gehalt, sondern auch beispielsweise im Sulphatgehalt je nach jeweils produzierter Papierqualität und Ausgangsmaterial stark schwanken. In einem solchen Fall ist darauf zu achten, Muster zu behandeln, welche eher auf der problematischen Seite der Schwankungsbreite sind, da nachher die Anlage auch mit diesen Situationen fertig werden muss.

| Gärsystem          | Substrat                               | HRT (d) | Belastung (kg CSB/m <sup>3</sup> x d) | Methanprod. (m <sup>3</sup> /kg CSB) | Abbauleistung 1-(CSB <sub>aus</sub> /CSB <sub>ein</sub> ) |
|--------------------|--|---------|---------------------------------------|--------------------------------------|---|
| voll durchmischt   | Brennereiabwässer                      | 17      | 1,60                                  | 0,20                                 | 0,57  |
|                    | Keltereien                             | 15      | 2,50                                  | 0,31                                 | 0,81  |
|                    | Papierabwässer                         | 10      | 1,75                                  | 0,29                                 | 0,97  |
|                    | Zuckerindustrie                        | 5       | 2,14                                  | 0,23                                 | 0,97  |
| Kontakt            | Pektinherstellung                      | 3,8     | 2,38                                  | 0,21                                 | 0,72  |
|                    | Brennereiabwässer                      | 8       | 2,75                                  | 1,74                                 | 0,84  |
|                    | Fruchtkonserven                        | 9,52    | 1,37                                  | 0,30                                 | 0,85  |
|                    | Brauereien                             | 4,8     | 13,50                                 | 0,25                                 | 0,80  |
| Anaerobfilter      | Zuckerindustrie                        | 0,55    | 8,18                                  | 0,29                                 | 0,87  |
|                    | Enzymherstellung                       | 2,3     | 6,40                                  | 0,29                                 | 0,78  |
|                    | Hefeproduktion                         | 0,5     | 10,00                                 | 1,21                                 | 0,77  |
|                    | Brennereiabwässer                      | 7,2     | 6,60                                  | 0,26                                 | 0,77  |
|                    | Käsereiabwässer                        | 5,6     | 8,00                                  | 0,30                                 | 0,85  |
| UASB               | Stärkeherstellung                      | 0,8     | 12,00                                 | 0,33                                 | 0,95  |
|                    | Zuckerindustrie                        | 0,75    | 6,90                                  | 0,28                                 | 0,90  |
|                    | Schlachthöfe                           | 0,6     | 6,00                                  | 0,19                                 | 0,65  |
|                    | chemische Industrie                    | 5,0     | 5,50                                  | 0,33                                 | 0,95  |
|                    | Brauereien                             | 0,45    | 6,00                                  | 0,37                                 | 0,85  |
|                    | Papierindustrie                        | 0,2     | 7,00                                  | 0,24                                 | 0,70  |
|                    | Kartoffelverarbeitung                  | 0,33    | 6,00                                  | 0,28                                 | 0,80  |
| Wirbelbett         | Hefeherstellung                        | 0,12    | 29,00                                 | 0,30                                 | 0,75  |
|                    | Zuckerindustrie                        | 0,10    | 40,00                                 | 0,31                                 | 0,90  |
| trocken, einstufig | nachträglich getrennte Haushaltabfälle | 18–25   | 7,5–9,0                               | 0,21–0,24                            | 50  |
|                    | separat erfasste Haushaltabfälle       | 15      | 9,0–10,0                              | 0,22                                 | 55  |
| Co-Vergärung       | Haushaltabfälle und Klärschlamm        | 15–25   | 7,0                                   |                                      | 65–70   |

*Tabelle 9:  
Daten zu den Abbauleistungen von Praxisfermentern zur Vergärung flüssiger und fester Substrate.  
Bei den festen Abfällen bezieht sich die Belastung und die Methanproduktion auf kg OS anstelle von kg CSB.*

In einem zweiten Schritt werden von dieser Probe nun die wichtigen chemischen Parameter erfasst (CSB, eventuell BSB, Kjeldahl-Stickstoff, Gehalt an suspendierten Feststoffen, OS-Gehalt, Nährstoffe usw.). Speziell bei Abwässern, von denen man weiss, dass sie chemisch einseitig zusammengesetzt sind, lohnt es sich, eine **chemische Totalanalyse** durchzuführen und so abzuklären, ob allenfalls die Zugabe von Nährstoffen notwendig ist. Sicher wäre auch interessant zu wissen, welche organischen Verbindungen im Abwasser oder Abfall vorkommen. Allerdings besteht hier noch kein Standardverfahren zur Bestimmung der jeweiligen Inhaltsstoffe; es muss daher von Fall zu Fall entschieden werden, mit welchen analytischen Methoden man weitere Informationen erhalten will (z.B. Verhältnis von Poly- zu Monosacchariden, MS- oder GC-Analytik usw.).



Figur 24:  
Vorgehen bei der Evaluation der Betriebsparameter zur Vergärung eines noch unbekanntes Substrats

In einem nächsten Schritt werden die repräsentativen Muster **beimpft**, eventuell mit Nährstoffen versehen und/oder verdünnt. Vorzugsweise wird Impfmateriale aus einer Anlage mit ähnlichem Ausgangsmateriale eingesetzt. Sofern dies nicht möglich ist, ist darauf zu achten, dass ein Impfmateriale mit einer möglichst grossen Bakteriendiversität verwendet wird. Sofern im Substrat Hemmstoffe vorkommen, muss mit einer entsprechend langen Adaptationszeit gerechnet werden und allenfalls Proben mit unterschiedlichem Verdünnungsgrad angesetzt werden. Dies gilt speziell auch für Batchvergärungen im Labormassstab.

Sofern im kontinuierlichen Betrieb pilotiert wird, ist es sinnvoll, den Fermenter mit viel aktiver Biomasse anzuimpfen (1 bis 5 kg OS/m<sup>3</sup> in Form von Biomasse). Vom Abwasser wird zunächst nur sehr wenig (0,5 bis 1 kg CSB/m<sup>3</sup>.d) zudosiert. Um die maximale Faulraumbelastung, den erzielbaren Abbaugrad, die optimale Verweilzeit wie auch Gasausbeute zu bestimmen, wird anschliessend die **Faulraumbelastung stufenweise erhöht**. Bei der Steigerung der Belastung ist allerdings ganz strikt darauf zu achten, dass jeweils vor einer weiteren Erhöhung der Belastung die Gärung stabil verläuft. Zu diesem Zweck sind die relevanten Parameter, wie CSB-Abbau, Gasproduktion und -zusammensetzung, der Gehalt an organischen Säuren (sofern möglich) usw., regelmässig zu erfassen. Die Belastung darf erst jeweils dann erhöht werden, wenn der **Abbaugrad** einen **stabilen**, mög-

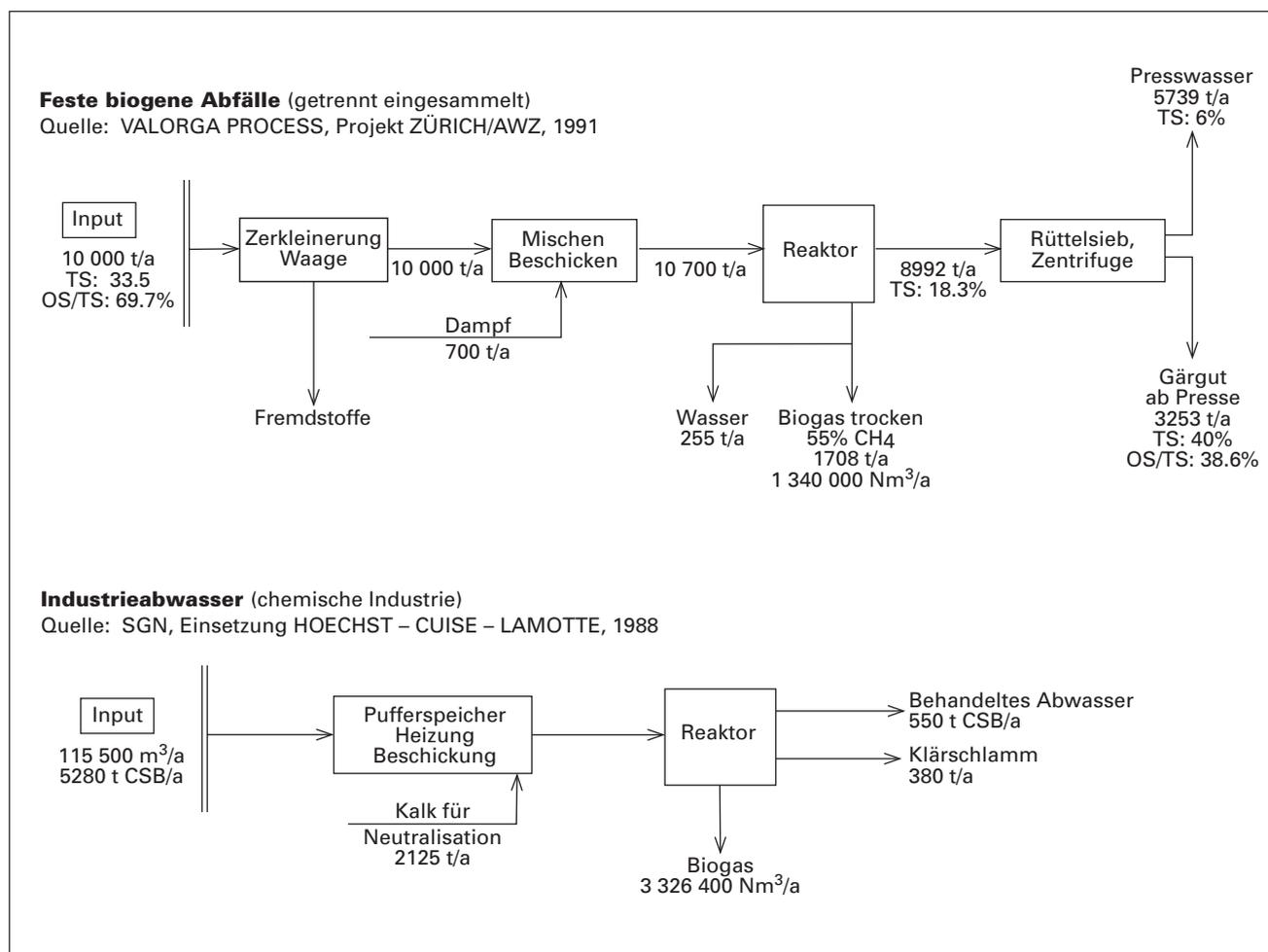
lichst hohen Wert angenommen hat und die **Säurekonzentration im Abfluss tief** ist (im Bereich von rund 0.1 g Fettsäuren/Liter). Wenn aus Zeitdruck die Faulraumbelastung zu rasch erhöht wird, ist dies fast immer kontraproduktiv, weil dann die Bakterienpopulation sich nicht genügend stabilisieren kann und der Prozess schliesslich zum Erliegen kommt, was dann zu einem gesamthaft deutlich längeren Zeitaufwand führt.

Wenn eine **Belastungsgrenze erreicht** wird, was sich in erhöhten Konzentrationen von organischen Komponenten und Säuren im Abfluss manifestiert, muss die Belastung wieder etwas reduziert werden, um so dem Fermenter die Möglichkeit zu geben, sich zu erholen. Es stellt sich dann die Frage, ob die Belastungsgrenze infolge von Nährstoffmangel, Akkumulation von Hemmstoffen oder schlicht wegen noch ungenügend aufgebauter Biomasse erreicht wurde. Es ist nach einer Erholungsphase möglich – unter Umständen mit geeigneten Gegenmassnahmen –, die Belastung ein weiteres Mal zu erhöhen und so schliesslich die maximale Belastungsgrenze zu bestimmen.

Nachdem nun so die mit einer bestimmten Technologie erreichbaren Abbauwerte bestimmt worden sind, kann die **Praxisanlage** geplant werden. Jetzt gilt es, den für den jeweiligen Standort **optimalen Kompromiss** zu schliessen, d.h., es muss festgelegt werden, welchen Abbaugrad man erreichen möchte unter Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse wie örtliche Gegebenheiten, Finanzen, Möglichkeiten der Energienutzung usw. Die schliesslich realisierte Lösung wird in den meisten Fällen ein Kompromiss zwischen dem technisch/wissenschaftlich Machbaren und den im jeweiligen Fall vorgegebenen Sachzwängen sein.

### 3.3 Massenbilanz

Die Abbauleistung des Reaktors sowie die Eigenschaften der Abfälle und Abwässer beeinflussen die Massenbilanz der Vergärung. Sobald die Betriebsparameter und Abbauleistungen bekannt sind, kann die Anlage ausgelegt werden. Dies ermöglicht das Aufstellen einer **Massenbilanz**. Die beiden Fließbilder in Figur 25 zeigen die Größen, welche in einer Massenbilanz Einzug finden können.



Figur 25:  
Massenflüsse von Anlagen zur  
Vergärung fester und flüssiger  
Substrate  
(Quellen: Valorga, Hoechst)

Die Massenbilanz erlaubt, die Anlage in ein Gesamtkonzept einzubinden: Eventuell können vor Ort (z.B. bei einem Industriebetrieb) Medien bezogen werden (Abwärme, Dampf für die Heizung des Fermenters; ein Abwasser, welches zum Anmischen eingesetzt werden kann usw.). Andererseits erlauben die jetzt vorhandenen Daten auch, die **Verwertung der Produkte** zu planen (auf den Massenfluss des Gases abgestimmte Verwertungskonzepte und -einrichtungen; Verwertungskonzepte für das Gärgut usw.). Die Verwertung (oder allfällige Entsorgung) der verschiedenen aus der Vergärung stammenden Produkte wird in den beiden Kapiteln 4 und 5 erläutert.



## 4 Das Produkt Biogas

---

|            |                                 |           |
|------------|---------------------------------|-----------|
| <b>4.1</b> | <b>Eigenschaften von Biogas</b> | <b>65</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Biogasreinigung</b>          | <b>71</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Gasspeicherung</b>           | <b>73</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Verwertung von Biogas</b>    | <b>75</b> |

---



### 4.1 Eigenschaften von Biogas

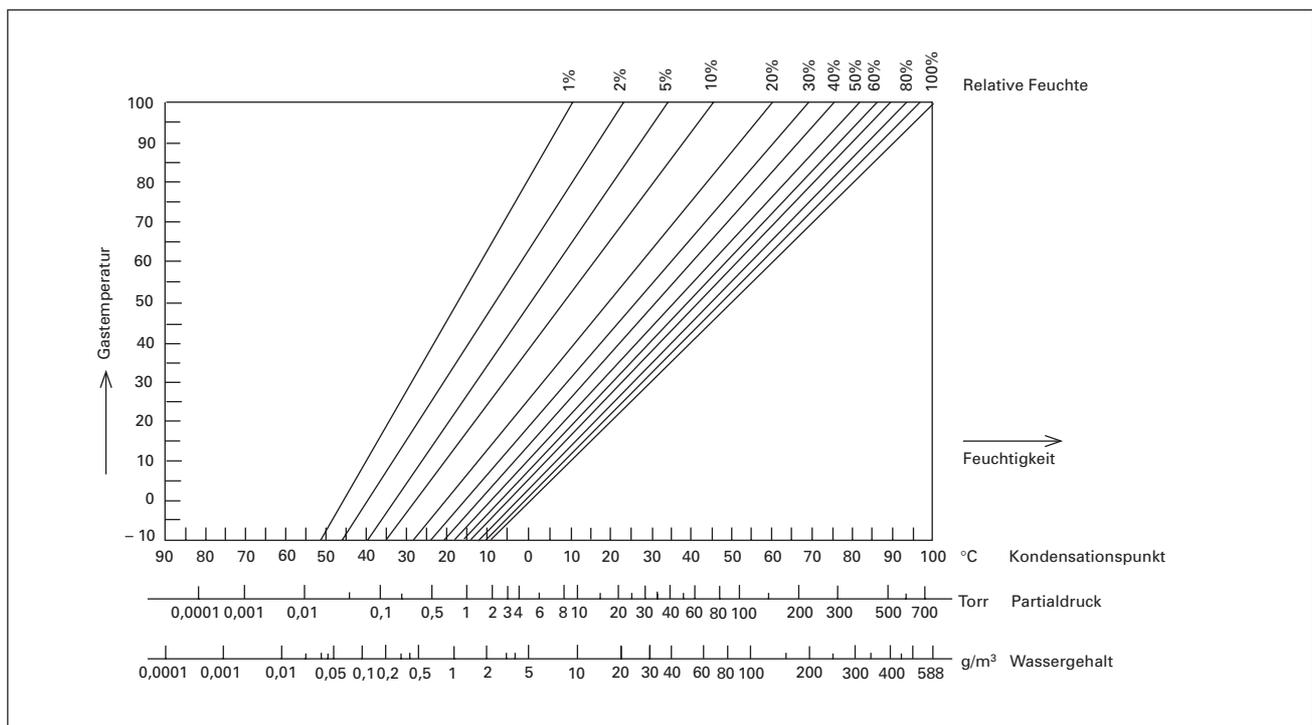
Biogas ist ein Gasgemisch, welches ätzende oder störende Bestandteile enthält, deren Elimination eine breitere und eventuell auch wirtschaftlichere Anwendung erlaubt (vgl. Tabelle 10). Die störenden Bestandteile, welche eliminiert werden können, sind Wasser, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und Kohlendioxid.

| Bestandteile        |                  | Konzentration [Vol. %] |
|---------------------|------------------|------------------------|
| Methan              | CH <sub>4</sub>  | 50–75 (80)*            |
| Kohlendioxid        | CO <sub>2</sub>  | 25–45                  |
| Wasser              | H <sub>2</sub> O | 2 (20 °C) – 7 (40 °C)  |
| Schwefelwasserstoff | H <sub>2</sub> S | 20–20 000 ppm (2%)     |
| Stickstoff          | N <sub>2</sub>   | < 2                    |
| Sauerstoff          | O <sub>2</sub>   | < 2                    |
| Wasserstoff         | H <sub>2</sub>   | < 1                    |

Tabelle 10: Inhaltsstoffe von Biogas. Speziell bei warmem Gas kann der Wasserdampfgehalt einen spürbaren Volumenanteil ausmachen.

\*) z.B. bei einem separaten Nassgasometer, wo das Wasser ständig durchfließt (Verhindern des Einfrierens), kann CO<sub>2</sub> ausgetragen werden, was zu Werten von bis zu über 80% CH<sub>4</sub> führen kann.

Wasser ist ein beträchtlicher Bestandteil des Biogases und fällt in Form von **Wasserdampf** an. Die folgende Figur zeigt den (nicht zu vernachlässigenden) Wassergehalt des Gases bei verschiedenen Temperaturen:



Figur 26: Wassergehalt von Biogas in Abhängigkeit der Temperatur

Die Problematik des Wasserdampfes liegt in der Ansammlung von **Kondensat in den Leitungen**, welches Verstopfungen verursachen kann und die Korrosion fördert. Um dies zu verhindern, werden die Leitungen mit Vorteil mit Gefälle in Richtung von Kondensatabscheidern verlegt. Der

verbleibende Wasserdampf beeinträchtigt die meisten Verwendungsmöglichkeiten nicht. Man stellt lediglich fest, dass der Heizwert infolge von Wasserdampf niedriger ist, als aufgrund des Methangehaltes erwartet würde. Die Kondensatmenge erhöht sich, falls man das Gas komprimiert; die Kondensate sind umso aggressiver, je höher der Druck steigt.

**Schwefelwasserstoff** ist die unangenehmste Verunreinigung im Biogas. Bei geringem Gehalt (0–2000 ppm) wirkt H<sub>2</sub>S schon sehr ätzend auf Kupfer und Kupferverbindungen. Zur Ableitung können verzinkte Stahlleitungen verwendet werden. Deshalb muss bei der Verwendung von Biogas als Brennstoff für den Kaminbau rostfreier Stahl verwendet werden. Die Verbrennung von Biogas mit hohen Schwefelwasserstoffgehalten ist in bewohnten und schlecht durchlüfteten Gebäuden aufgrund der störenden SO<sub>2</sub>-Bildung im Abgas unerwünscht.

Für höhere Gehalte, welche bei stark schwefelhaltigem Ausgangsmaterial Werte von über 2% erreichen können, ist eine Korrosion aller nicht rostfreien, metallischen Teile voraussehbar. Gleichzeitig wird das zufällige Einatmen von Biogas gefährlich, da ein Gehalt von 1000 ppm H<sub>2</sub>S schnell tödlich sein kann. Die Toxizität von Schwefelwasserstoff ist in der folgenden Tabelle 11 dargestellt.

| Konzentration [ppm] | Wirkung  |
|---------------------|--|
| 10                  | Grenzwert  |
| 5– 40               | Geruchsschwelle  |
| 20–100              | Leichte Kopfschmerzen  |
| 100–200             | Migräne  |
| 500                 | Beeinträchtigung des Nervensystems                                     |
| 1000                | Bewusstlosigkeit, Tod durch Ersticken durch Aspiration von Erbrochenem |

*Tabelle 11:  
Wirkungen von Schwefelwasserstoff auf die menschliche Gesundheit*

**Ammoniak** entsteht bei der Vergärung in unterschiedlichen Mengen je nach Ausgangsmaterial: Im reduktiven Milieu einer Biogasanlage werden beim bakteriellen Abbau aus Eiweissen oder Nucleinsäuren freigesetzte Stickstoffverbindungen zu Ammoniumionen umgewandelt. Diese stehen in Abhängigkeit vom pH-Wert in einem Gleichgewicht mit Ammoniak. Das Gleichgewicht ist im Bereich von 7– 7,6 (wo die Biogasbildung vorzugsweise abläuft) sehr sensibel auf pH-Änderungen. Schon die Erhöhung des pH um wenige Zehnteinheiten lässt den Ammoniakanteil (und damit den Ammoniakgehalt im Gas) spürbar ansteigen. Sofern Ammoniak im Gas vorkommt, muss bei der Verbrennung durch die Bildung von Stickstoffoxiden mit der Korrosion von Kupfer sowie mit auf die Gesundheit schädlichen bzw. reizenden Einwirkungen gerechnet werden; gleichzeitig sind Stickoxide umweltbelastend.

**Kohlendioxid** ist ein inerter Bestandteil von Biogas. Durch dessen Auflösung im Kondensat und die Bildung von Kohlensäure kann zwar eine Lösung mit (schwach) korrosiven Eigenschaften entstehen. Für eine thermische Verwertung des Biogases ist jedoch keine CO<sub>2</sub>-Elimination erforderlich. In einigen Fällen hingegen (Treibstoff für Automobile, Einspeisung als Gemisch ins Erdgasnetz) muss das Kohlendioxid zur Qualitätssicherung bzw. Volumenreduktion entfernt werden.

Die Tabelle 10 zeigt den unterschiedlichen Gehalt an verschiedenen Bestandteilen von Biogas. Der dort aufgeführte **Stickstoff** kann in Form von Luft als Bestandteil des Ausgangsmaterials in die Anlage gelangt sein. Der Sauerstoff wird in diesem Fall sogleich von semianaeroben Organismen aufgezehrt. Das Vorkommen von Stickstoff zusammen mit Sauerstoff deutet andererseits auf (Falsch-)Luft hin, welche in irgendeiner Form in den Gasraum der Anlage oder in die Gasstrasse gelangte.

Die **Dichte** eines Gases hängt von dessen Bestandteilen und deren relativer Konzentration ab. Tabelle 12 zeigt die Dichte von Biogas in Abhängigkeit vom Methangehalt: Es wird ersichtlich, dass Biogas in der Regel leichter ist als Luft und sich somit beim Ausfließen nicht am Boden ansammelt, wie beispielsweise Propan oder reines Kohlendioxid.

| Gehalt an Methan (Vol.%)            | 50   | 60    | 80    | 90    |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| Relative Dichte verglichen mit Luft | 1.04 | 0.942 | 0.745 | 0.625 |

Tabelle 12:  
Dichten von verschiedenen Biogasmischungen im Vergleich zu Luft

Die **kritische Temperatur** von Methan liegt unabhängig vom Druck bei 82.5 °C; oberhalb dieser Temperatur ist es auch bei sehr hohen Drücken nicht möglich, Biogas zu verflüssigen. Dies ist wahrscheinlich die Haupteinschränkung bei der Biogasverwertung, weil eine Verflüssigung zur langfristigen Lagermöglichkeit für spätere Anwendungen von Biogas nur bei unwirtschaftlich tiefer Temperatur möglich ist.

Der **untere Heizwert** stellt die bei der Verbrennung freiwerdende Menge an Energie in bezug auf die Masse bzw. das Volumen eines Brennstoffs dar. Gemessen wird bei einem Druck von 1 atm und bei einer Temperatur von 0 °C, in der Annahme, dass das produzierte Wasser in Form von Dampf bestehen bleibt, bzw. die aufgewendete Kondensationswärme nicht wieder zurückgewonnen wird. Der untere Heizwert  $H_U$  wird durch den Methangehalt bestimmt. Die beiden folgenden Tabellen 13 und 14 zeigen die unteren Heizwerte von Biogas und einiger anderer Brennstoffe bezogen auf Masse oder Volumen bei gasförmigen Brennstoffen.

| Brennstoffe      | MJ/kg | MJ/m <sup>3</sup>      |
|------------------|-------|------------------------|
| Methan           | 50    | 35.9                   |
| Biogas gereinigt | 45    | 32.2                   |
| Biogas mittel    | 30    | 21.5                   |
| Erdgas           | 48.7  | 36.1                   |
| Butan            | 45.7  | 118.5                  |
| Propan           | 46.4  | 90.9                   |
| Methanol         | 19.9  | 15.9 * 10 <sup>3</sup> |
| Aethanol         | 26.9  | 21.4 * 10 <sup>3</sup> |
| Benzin           | 45    | 33.3 * 10 <sup>3</sup> |
| Diesel           | 42.1  | 34.5 * 10 <sup>3</sup> |

Tabelle 13:  
Untere Heizwerte von gasigen und flüssigen Brennstoffen

Tabelle 14:  
Vergleich des Energieinhalts von einem Kubikmeter Biogas mit dem energetisch ebenbürtigen Volumen von gasigen und flüssigen Brennstoffen

| Biogas (1 m <sup>3</sup> ) | Butan (m <sup>3</sup> ) | Propan (m <sup>3</sup> ) | Methanol (l) | Aethanol (l) | Benzin (l) | Diesel (l) | Erdgas (m <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------|--------------|------------|------------|--------------------------|
| Mittel                     |                         |                          |              |              |            |            |                          |
| 60% CH <sub>4</sub>        | 0.18                    | 0.24                     | 1.35         | 1.01         | 0.65       | 0.62       | 0.60                     |
| Gereinigt                  |                         |                          |              |              |            |            |                          |
| 90% CH <sub>4</sub>        | 0.27                    | 0.36                     | 2.03         | 1.51         | 0.97       | 0.94       | 0.89                     |

Der **theoretische Luftbedarf** ist eine dimensionslose Zahl, welche das Verhältnis ausdrückt zwischen dem für die stöchiometrische Verbrennung benötigten Luftvolumen und einer gegebenen Gasmenge unter Normalbedingungen (0 °C, 1 atm). Einige dieser Verhältniszahlen von Luft/Brennstoff-Gemischen werden in Tabelle 15 dargestellt. Um den schwankenden Zusammensetzungen des Luft/Gas-Gemisches Rechnung zu tragen und um unverbrannte Gase zu vermeiden, sind die Luftmengen, welche in der Praxis gebraucht werden, in der Regel allerdings deutlich höher als die stöchiometrisch notwendigen Mengen.

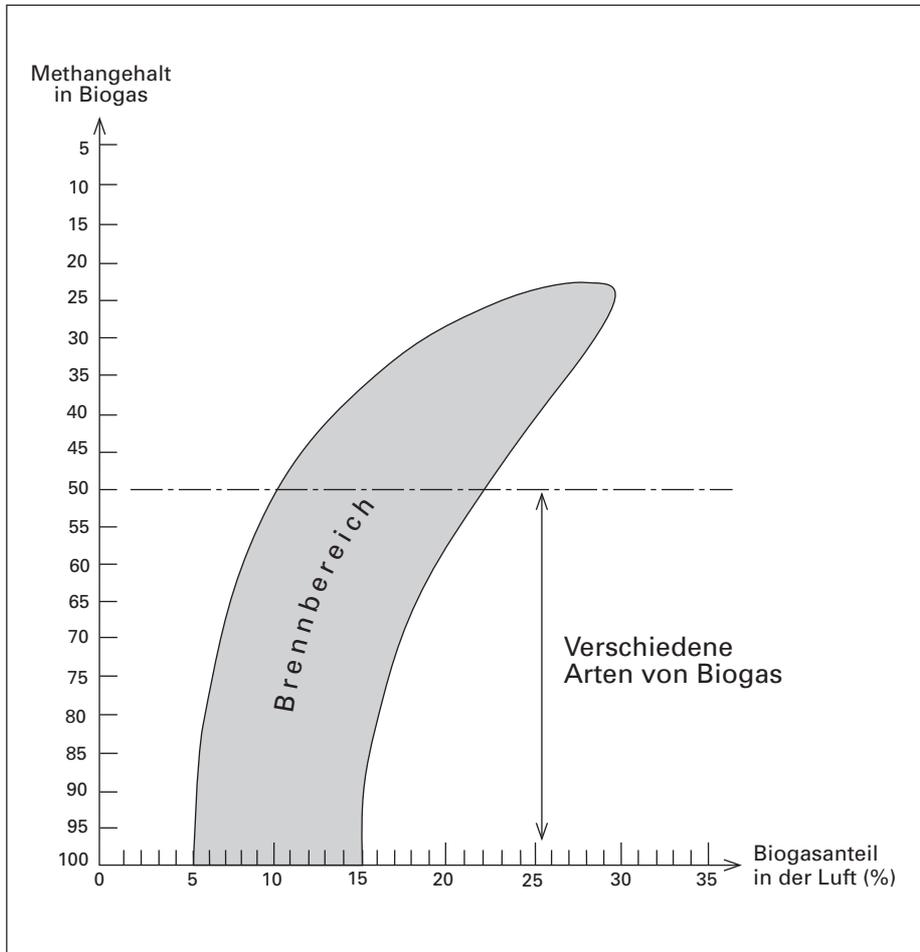
Tabelle 15:  
Theoretischer Luftbedarf zur stöchiometrischen Verbrennung von brennbaren Gasen

| Brennstoff                              | m <sup>3</sup> Luft / m <sup>3</sup> Gas |
|---|--|
| Methan                                  | 9.52                                     |
| Biogas mittel (60% CH <sub>4</sub> )    | 5.71                                     |
| Biogas gereinigt (90% CH <sub>4</sub> ) | 8.57                                     |
| Propan                                  | 23.87                                    |
| Butan                                   | 30.97                                    |

Wenn man sich mit einem brennenden Zündholz der äusseren Öffnung einer Röhre nähert, welche ein brennbares Gasgemisch enthält, sieht man, wie sich eine Flamme bildet, welche sofort in die Röhre zurück«wandert». Die Flamme breitet sich im Innern der Röhre mit einer gewissen Geschwindigkeit aus, welche man **Flammengeschwindigkeit** (Flammenwanderungsgeschwindigkeit) nennt. Damit die Verbrennung eines Gases normal abläuft, ist es nötig, dass die Austrittsgeschwindigkeit des brennbaren Gemisches an der Düsenöffnung mit der Flammengeschwindigkeit übereinstimmt. Ist die Austrittsgeschwindigkeit zu tief, breitet sich die Verbrennung in Richtung der Düse bzw. der Zuleitung aus. Bei zu hoher Gasaustrittsgeschwindigkeit kommt es zum Flammenabheben und schliesslich zum Auslöschen der Flamme.

Bei Biogas, welches 60% Methan und 40% Kohlendioxid enthält, beträgt die maximale Flammengeschwindigkeit 0.25 m/s. Die Flammengeschwindigkeit hängt noch vom Verhältnis Luft/Gas ab und erreicht ihr Maximum bei einem «angereicherten» Gemisch.

Ein Gasgemisch entzündet sich nur, wenn die Anteile an brennbarem Gas in der Mischung Brennstoff/Luft zwischen den zwei **Zündgrenzen** liegen; die untere Grenze entspricht der eines «mageren», die obere Grenze der eines «reichen» Brennstoffgemisches. Die Zündgrenzen eines zusammengesetzten Gases wie das Biogas, mit einem brennbaren Anteil (CH<sub>4</sub>) und einem inerten Anteil (CO<sub>2</sub>), können nur experimentell bestimmt werden. Das Diagramm in Figur 27 zeigt die Zündgrenzen von Biogas. Man beachte, dass bei weniger als 23% Methangehalt ein Biogas nicht entzündbar ist.



Figur 27:  
Brennbarer Bereich von  
verschiedenen Biogas/Luft-  
Gemischen

Eine **Explosionsgefahr** besteht, falls ein explosionsfähiges Biogas/Luft-Gemisch und eine Zündquelle vorhanden ist. Die reine Methan/Luft-Mischung ist explosiv bei einem Methananteil zwischen 5 und 15 Vol.%; bei einem CO<sub>2</sub>-Anteil von 35% verengen sich diese Grenzen auf 7–12 Vol.%. Als Zündquellen kommen offene Flammen, Funken von elektrischen Schaltern, Blitzschläge und sehr heiße Oberflächen in Frage. Explosionsgefahr besteht insbesondere in geschlossenen und schlecht durchlüfteten Räumen, in welche Biogas ausströmen kann.

Zwei Gase sind vollkommen miteinander austauschbar, wenn sie dieselben **Austauschzahlen** besitzen. Die relevanten Parameter sind die Wobbezahl und die Verbrennungszahl: Die Wobbezahl (W) errechnet sich:  $W = H_o / \sqrt{d_o}$  [kWh/m<sup>3</sup>], wobei H<sub>o</sub> = oberer Heizwert und d<sub>o</sub> = Dichte bei Normalbedingungen ist. Im Fall der Mischung von Methan mit Kohlendioxid muss die Wobbezahl für den Einfluss der Viskosität der Gasmischung auf den Brenner und des Sauerstoff-, Kohlenmonoxid- und -dioxidgehalts auf die Verbrennung korrigiert werden. Es ergibt sich für die Wobbezahl folgender Ausdruck:

$$W'_{\text{Biogas}} = 1 + 0.026 * \text{CO}_2\% * W.$$

Die Verbrennungszahl B, welche die Austauschbarkeit definiert, errechnet sich:  $B = V_a / \sqrt{d_o}$  mit  $V_a = H_2 + 0.7 \text{ CO} + 0.3 \text{ CH}_4 + a \text{ C}_n \text{ H}_m$ , wobei H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>n</sub> und C<sub>m</sub> die prozentualen Anteile im Gemisch bezeichnen. 0.3, 0.7 und a sind die spezifischen Koeffizienten der verschiedenen Anteile.

Im Fall der Methan/Kohlendioxid-Mischung reduziert sich die Verbrennungszahl wie folgt:

$$B_{\text{Biogas}} = 0.3 \text{ CH}_4\% / \sqrt{d_o}$$

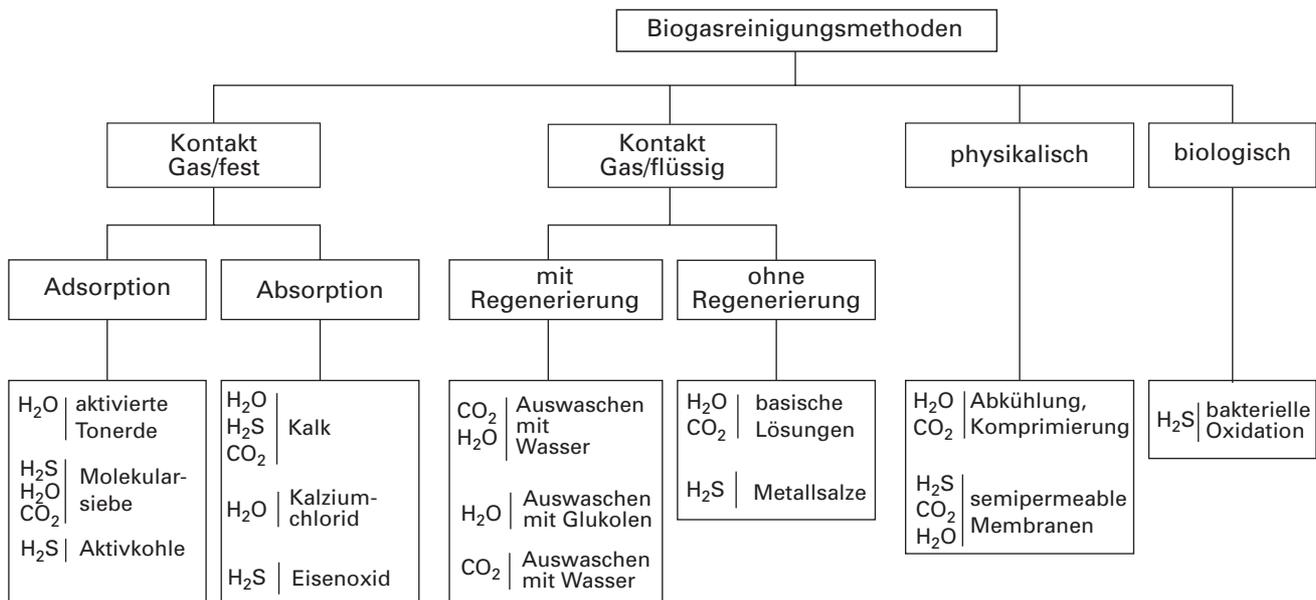
Die folgende Tabelle 16 gibt einige Austauschzahlen für Biogasmische wieder:

| Biogaszusammensetzung |                 | W'                    | B    |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|------|
| CH <sub>4</sub>       | CO <sub>2</sub> | [kWh/m <sup>3</sup> ] | [-]  |
| 50                    | 50              | 6.126                 | 14.7 |
| 60                    | 40              | 7.56                  | 18.5 |
| 70                    | 30              | 9.055                 | 22.8 |

*Tabelle 16:  
Austauschzahlen für  
Biogasmischungen*

## 4.2 Biogasreinigung

Nicht jeder Verwendungszweck von Biogas verlangt denselben Reinheitsgrad. Schwefelwasserstoff wird praktisch immer mit Vorteil entfernt, während dies für CO<sub>2</sub> nur beim Einspeisen in ein Erdgasnetz oder bei der Verwendung als Fahrzeugtreibstoff sinnvoll ist. Die verschiedenen Reinigungsmethoden sind in der folgenden Figur 28 dargestellt:



Figur 28:  
Möglichkeiten der Gasreinigung von Biogas  
(Quelle: Perret)

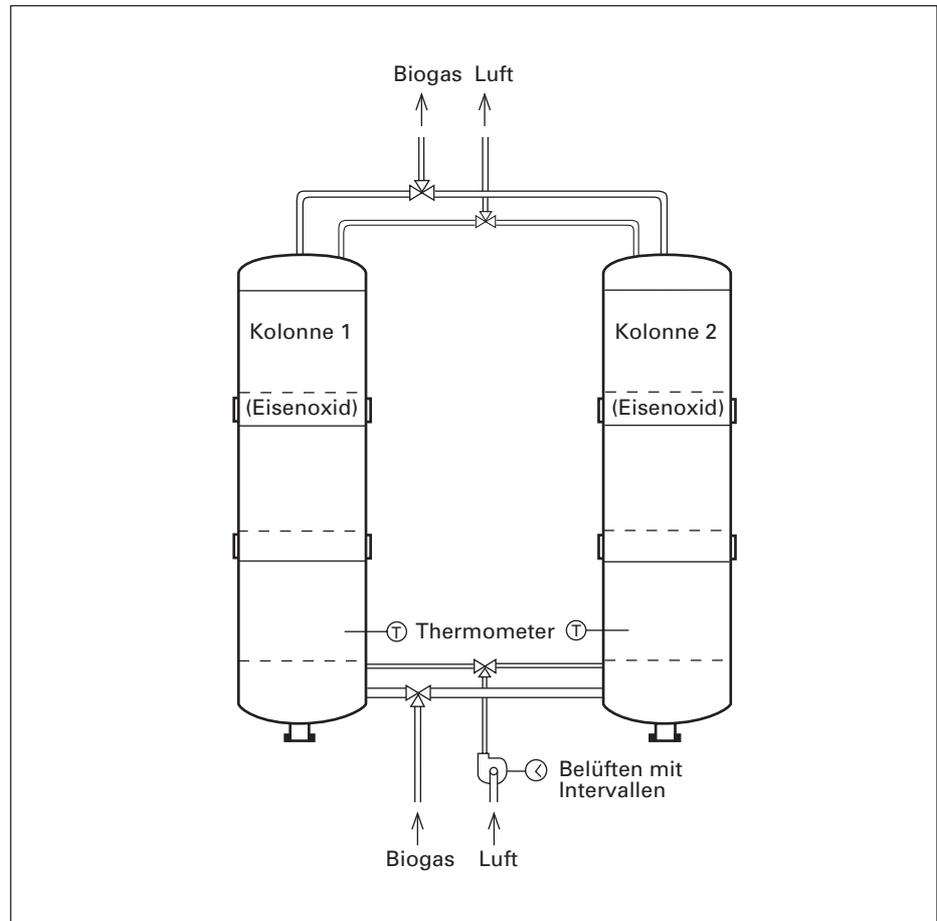
Zur Reinigung macht man sich verschiedene physikalisch-chemische Prinzipien zunutze. Am einfachsten ist die **Trockenreinigung** unter Verwendung von Adsorptions- oder Absorptionsmitteln. Bei der Adsorption handelt es sich um einen reversiblen Prozess, während bei der Absorption das sogenannte Absorptionsmittel verbraucht wird. Die Adsorption arbeitet mit zwei Kolonnen. Die eine dient der Adsorption und die andere der Desorption oder Regeneration mit Hilfe von Druckumkehr, Temperaturerhöhung oder durch «Stripping» mit einem Inertgas (vgl. Fig. 29). Bei der Absorption werden mit Wasser reagierende Stoffe verwendet, welche kostengünstig und einfach zu entsorgen sind.

Bei der **Nassreinigung** (Kontakt Gas/Flüssigkeit) durchströmt das Biogas beispielsweise unter Druck im Gegenstrom zur Waschflüssigkeit eine Kolonne, wo z.B. CO<sub>2</sub> adsorbiert wird. Durch Druckentspannung oder Wärmezufuhr wird die Waschflüssigkeit regeneriert.

Die physikalischen Verfahren bedienen sich der **Kompression** und der **Kühlung** des Biogases. In der Praxis wird das Gas bis zum Taupunkt abgekühlt und der Wasserdampf zur Kondensation gebracht. Eine andere Möglichkeit ist das gleichzeitige Kühlen und Komprimieren zur Verflüssigung des Wasserdampfes.

Eine weitere Möglichkeit ist die Anwendung von **Membrantrennprozessen** zur Gasreinigung. Diese Methode basiert auf dem Prinzip der selektiven Durchlässigkeit der Membrane: Jedes Gas besitzt eine membranabhängige, spezifische Diffusionsgeschwindigkeit. Unter Ausnutzung dieser Unterschiede lassen sich unerwünschte Gaskomponenten abtrennen.

Zuletzt sei noch die **biologische Reinigung** erwähnt, bei welcher Mikroorganismen den Schwefelwasserstoff zu elementarem Schwefel oxidieren. Dies kann in speziellen Biofiltern oder -wäschern stattfinden. Neuseeländische Forscher haben vor einigen Jahren zuerst darauf hingewiesen, dass die Zugabe von ganz kleinen Luftmengen zum Biogas den Schwefelwasserstoffgehalt drastisch senkt oder gar zum Verschwinden bringt. Unterdessen wird das Einpumpen von (sehr wenig; Explosionsgefahr!) Luft in den Gasraum mit einem sehr kleinen Gebläse bei verschiedenen Landwirtschaftsanlagen mit Erfolg praktiziert.



Figur 29:  
Beispiel einer Gasreinigungs-  
anlage auf dem Absorptions-  
prinzip

Tabelle 17 fasst zusammen, in welchen Fällen eine Entfernung welcher Komponenten notwendig erscheint.

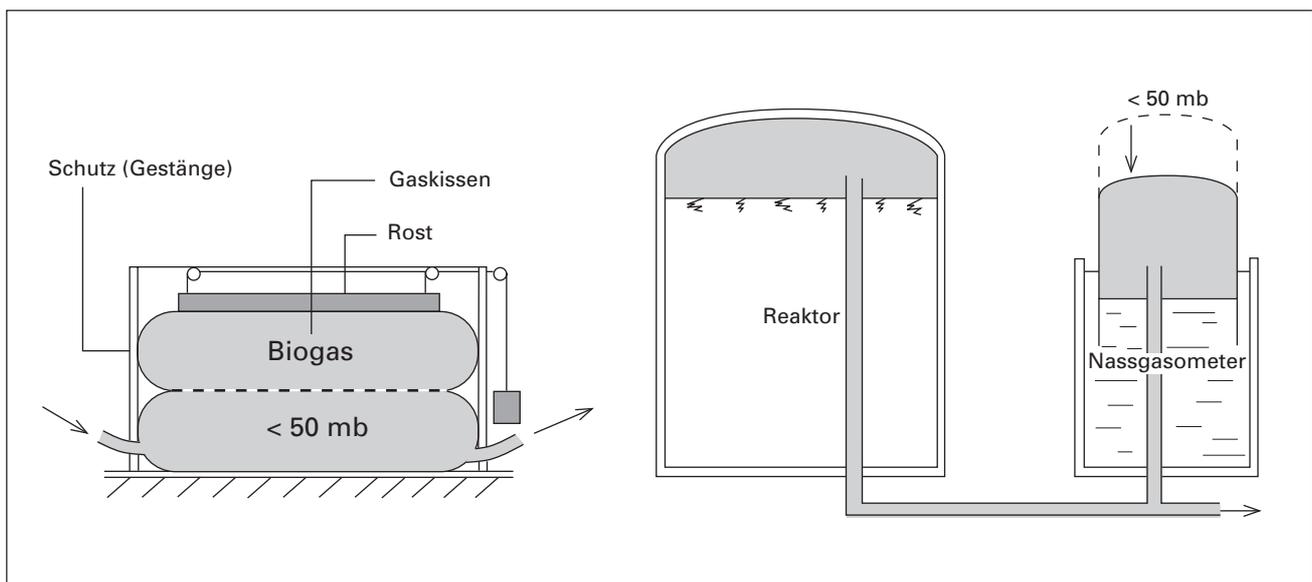
|                                   | H <sub>2</sub> S | H <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| Gasbrenner                        | > 0.1%           | nein             | nein            |
| Wärme-Kraft-Kopplung              | > 0.05%          | nein             | nein            |
| Autogas (Verdichtung in Flaschen) | ja               | ja               | ja              |
| (öffentliches) Gasnetz            | ja               | ja               | ja              |
| Fackel                            | nein             | nein             | nein            |

Tabelle 17:  
Reinigung von Biogas in  
Abhängigkeit des  
Verwendungszwecks

### 4.3 Gasspeicherung

In der Regel verfügt eine Biogasanlage über einen **Gasspeicher** zum Ausgleich von Unterschieden zwischen Produktion und Verbrauch. Weil Biogas eine niedrige Energiedichte besitzt, wird aus Kostengründen die Speicherkapazität so gewählt, dass allfällige Spitzen innerhalb von einem Tag ausgeglichen werden können. Drei verschiedene Speichersysteme werden in der Praxis angewendet:

**Foliengasometer:** Diese weit verbreiteten, kostengünstigen Gasometer werden aus (praktisch) gasundurchlässigen Materialien hergestellt. Sie sind beispielsweise an einem Bügel aufgehängt oder mittels einer speziellen Vorrichtung am Boden befestigt. Zur Druckerhöhung können sie mit Gewichten belastet werden. Der Maximaldruck beträgt je nach Ausführung und Grösse zwischen 25 und 50 mbar und variiert mit dem Füllgrad (zwischen 20 und 80% Füllung) nur unwesentlich. Wenn der Gasometer nicht genügend beschwert werden kann, um den vom Verbraucher benötigten Druck zu erreichen, muss ein Gebläse installiert werden. Die Speichervolumen von Foliengasometern liegen zwischen 1 und 500, maximal 1000 m<sup>3</sup>. Zwei verschiedene Ausführungen von Gasometern sind in Figur 30 dargestellt; der Nassgasometer könnte auch als Folie ausgestaltet sein, welche das Gärgut abdeckt und seitlich durch Eintauchen unter die Oberfläche die Gasdichtigkeit gewährt.



Figur 30:  
Mögliche Ausgestaltung von  
Folien- und Nassgasometern

**Nassgasometer mit Glocke** kennt man von den Gaswerken. Dabei bewegt sich eine umgekehrte Glocke in einem mit Flüssigkeit gefüllten Behälter. Damit sich die Glocke ungehindert vertikal bewegen kann, sind spezielle Führungen notwendig. Durch eine entsprechende Belastung der Glocke kann der notwendige Betriebsdruck eingestellt werden. Derartige aus Stahl gefertigte Gasometer müssen periodisch unterhalten und vor Korrosion geschützt werden. Das Innere der Glocke ist dem korrosiv wirkenden Schwefelwasserstoff ausgesetzt, und aussen ist Metall speziell im Grenzbereich Gärgut/Luft stark korrosionsgefährdet. Es ist auch möglich, Nassgasometer aus hartem, beispielsweise glasfaserverstärktem, Kunststoff zu fertigen.

Die Gasglocke kann direkt auf dem Fermenter angeordnet sein: die auf dem Gärgut schwimmende Glocke fängt dann das entstehende Biogas direkt auf. Nachteilig dabei sind allfällige Wärme- und Gasverluste, weil eine Isolation des in die Flüssigkeit eintauchenden zylindrischen Teils der Glocke schwierig ist, und weil Gasverluste im Randbereich zwischen Glocke und Behälter auftreten. Dieser Nachteil kann umgangen werden, wenn anstelle einer festen Gasglocke ein **Kunststoff-Foliengasometer** direkt auf der Oberfläche des Substrats montiert wird (Folie, welche eventuell sogar geführt ist und an den Fermenterwänden ins Substrat eintaucht). Separate Nassgasometer kommen aus Kostengründen kaum in Frage. Zusätzlich ist zu beachten, dass solche separaten Systeme im Winter vor dem Einfrieren geschützt werden müssen. Die Speicherkapazitäten solcher Systeme liegen zwischen 50 und 500 m<sup>3</sup>.

Speicherung in **Speichertanks und -flaschen** ist nötig, falls das Biogas komprimiert und zum Betrieb von Fahrzeugen verwendet wird. Bei einem idealen Gas halbiert sich das Volumen bei der Verdoppelung des Druckes. Bis zu einem Druck von 400 mbar verhält sich Biogas mit 67% CH<sub>4</sub> und 33% CO<sub>2</sub> noch vorteilhafter. Bei einem Druck zwischen 160 und 200 mbar beträgt das Volumen nur gerade zwei Drittel des Volumens eines idealen Gases unter gleichen Bedingungen. Mit andern Worten, ein gegebenes Volumen enthält im Vergleich zu einem idealen Gas die 1.5fache Menge Biogas. Dieses Verhältnis verringert sich mit steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration.

Aus Kostengründen und um das Gewicht von Stahlspeichern (Flaschen) in Grenzen zu halten, überschreiten die Drücke 10 bis 20 bar in der Regel nicht. Die Hochdruckspeicherung (200 bis 300 bar) für den Fahrzeugbetrieb in 30- oder 50-l-Flaschen erfordert spezielle, kostenintensive Einrichtungen zur Komprimierung und gleichzeitigen Gasreinigung.

## 4.4 Verwertung von Biogas

### Rein thermische Verwertung

Biogas kann in den meisten **Industriefeuerungsanlagen** verwendet werden. Apparate, welche für Biogasbetrieb geeignet sind, funktionieren über einen weiten Bereich der Biogaszusammensetzung ohne Probleme. Bei Ölbrennern muss lediglich der Brenner auf Zweistoffbetrieb umgerüstet werden.

Für das Aufheizen der Abwässer oder Abfälle und das Einhalten der gewünschten Prozesstemperatur ist Prozessenergie notwendig, welche gegebenenfalls mit einem kleinen, biogasbetriebenen **Heizkessel** bereitgestellt wird. Falls eine WKK (Wärme-Kraft-Kopplung, vgl. unten) vorhanden ist, kann dazu die Abwärme verwendet werden. Im andern Fall muss ein Teil des gewonnenen Biogases dafür aufgewendet werden.

Die für die Verwertung von Biogas vorgesehenen **Apparate** sind mit Brennern und Brennkammern ausgerüstet, welche verschiedene Gaszusammensetzungen verbrennen können. Ursprünglich für andere Brennstoffe vorgesehene Apparate können fast immer ohne Schwierigkeiten an Biogas angepasst werden. Diese Modifikationen betreffen in der Regel die Brenner. Ihr Wirkungsgrad wird fast immer durch die Reduktion der Überschussluft und durch eine Verringerung der Rauchgastemperatur verbessert. Die mit einer Anpassung an Biogas verbundenen spezifischen Probleme bezüglich Druck, Gaszusammensetzung und Schwefelwasserstoff werden nachfolgend erörtert.

Für eine Verwendung von Brennern ist es notwendig, den **Druck** in einem Bereich von  $\pm 10\%$  des Sollwertes zu regeln. Falls diese Bedingungen nicht erfüllt werden, ist eine Druckerhöhung mit entsprechenden Reduktionen vor den Gasverbrauchern vorzusehen.

Die unterschiedliche, u.U. schwankende **Biogaszusammensetzung** stellt verschiedene Anforderungen an die Verwertung. In Anwesenheit von höheren Schwefelwasserstoff-Konzentrationen müssen verschiedene, aus Messing gefertigte Bestandteile des Brenners durch solche aus rostfreiem Stahl ersetzt werden. Besonders zu erwähnen ist auch der  $\text{CO}_2$ -Gehalt, welcher die Zündgeschwindigkeit und den Heizwert beeinflusst. Diese Streuungen können zu folgenden Konsequenzen führen:

- Schwierigkeiten beim Zünden des Brenners
- Auslöschen der Flamme, verursacht durch Rückziehen der Flamme in die Düse
- Geringerer Wirkungsgrad bei schlechter Regelung

Für industrielle Feuerungen ist es unter Verwendung einer kontinuierlichen Heizwertmessung möglich, die Zuluft zu regeln, um eine optimale Verbrennung sicherzustellen. In der Praxis treten bei einem stabilen Betrieb des Gärreaktors jedoch nur in Ausnahmefällen grössere Schwankungen in der Biogaszusammensetzung auf, und man stellt daher den Verbraucher so ein, dass auch bei einer extremen Zusammensetzung ein sicherer Betrieb gewährleistet wird.

**Verwertung in Verbrennungsmotoren**

Biogas kann sowohl in stationären als auch mobilen Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Vorteilhaft ist dabei, dass bei dieser Nutzungsart die hochwertige Biogasenergie in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Bei den am meisten verwendeten Motoren mit **Fremdzündung** (Benzinmotoren) wird das zündfähige Gemisch mit einem Funken gezündet. Bei den **Selbstzündungsmotoren** (Dieselmotoren) verwendet man einen Brennstoff mit niedriger Zündtemperatur, um die Entzündung des Gas/Luft-Gemisches auszulösen. Bei Diesel-Gas-Motoren handelt es sich um sogenannte Zweibrennstoff-Motoren (dual fuel). Das Luft/Gas-Gemisch wird vom Motor angesogen, verdichtet und durch Einspritzen von (relativ wenig) Diesel-Treibstoff entzündet. Folgende Parameter kennzeichnen den Betrieb von biogasbetriebenen Motoren:

Wichtig ist, dass ein Gasgemisch, welches in einem Gasmotor gebraucht wird, **klopffest** ist. Im Gegensatz zum Dieselmotor, welcher nur Luft ansaugt, braucht der Gasmotor ein Luft/Gas-Gemisch. Dieses wird komprimiert, darf aber nicht durch Selbstentzündung explodieren, da es sonst zum unerwünschten «Klopfen» kommt. Einen «klopfenden» Motor erkennt man leicht am charakteristischen Geräusch, begleitet von Vibrationen; er muss sofort abgeschaltet werden, um schwere mechanische Schäden zu verhindern. Das «Klopfen» kann verhindert werden durch:

- Verkleinern der Wellenleistung, d.h. durch Teillastbetrieb
- ein kälteres Luft/Gas-Gemisch
- die Wahl eines klopfesteren Gases
- Druckverminderung und Wirkungsgradreduktion

Die Klopfestigkeit eines Gases wird durch die **Methanzahl** angegeben. Verschiedene Versuche haben zu einer einfachen Methode zur Bestimmung des Methanindex von Gasgemischen geführt. Um den hohen technischen Anforderungen der heutigen Gasmotoren gerecht zu werden, speziell den mit «reichem» Gemisch arbeitenden Motoren, und um ein reibungsloses Funktionieren zu garantieren sowie eine ökonomisch interessante Lösung zu finden, muss ein Gasgemisch mit einer möglichst hohen Methanzahl verwendet werden. Die meisten Erdgase und auch Biogas weisen eine Methanzahl zwischen 78 und 98 auf und können deshalb ohne Einschränkungen verwendet werden. Dies gilt nicht für Erdölgase (Propan oder Butan), welche aufgrund ihrer oft schwankenden, tiefen Methanzahl nur sehr beschränkt verwendbar sind und bei Beimischung in gewisse Gasnetze zu einem sofortigen Absinken der Methanzahl mit entsprechenden Problemen bei der Nutzung führen.

Durch **Schwefelwasserstoff** im Biogas kann sich bei der Verbrennung im Motor schweflige Säure bilden und je nach Menge die Funktion des Motors beeinträchtigen oder ihn sogar beschädigen. Dies illustrieren die Vorschriften zu den maximal zulässigen Konzentrationen von zwei wichtigen Herstellern von Gasmotoren:

|                           |                     |  |
|---------------------------|---------------------|--|
| Deutz-MWM                 | Schwefel total      | < 2200mg/Nm <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> |
|                           | Schwefelwasserstoff | < 0.15Vol.%                              |
| Fiat-Saurer Thermotechnik | Schwefelwasserstoff | < 0.1Vol.%                               |

Geringere Mengen von Schwefel und Schwefelwasserstoff, welche nach der Verbrennung gasförmig vorliegen, sollten keine negativen Auswirkungen haben, es sei denn, die Konzentrationen würden im Bereich der

angegebenen Höchstwerte liegen. In diesem Falle müsste das Motorenöl häufiger gewechselt werden. Falls die Grenzwerte überschritten werden, erlischt die Garantie der Motorenhersteller.

Der **«Lambda»-Wert** ( $\lambda$ ) eines Gasgemisches ist der wichtigste Wert im Zusammenhang mit der Verbrennung. Dieser Wert beschreibt das Verhältnis des Luft/Gas-Gemisches, d.h., ob das Gas mit einem Mangel ( $\lambda < 1$ ) oder einem Überschuss ( $\lambda > 1$ ) an Luft verbrannt wird, und ob das entsprechende Luft/Gas-Gemisch noch innerhalb der Zündgrenzen liegt.

Bei **tiefen Methangehalten** und einem mageren Gemisch ( $\lambda = 1.4$ ) kann die Verbrennung durch den  $\text{CO}_2$ -Gehalt beeinflusst werden. Prinzipiell verhindert das  $\text{CO}_2$  das unerwünschte «Klopfen» (Klopfbremse). Hingegen wird gleichzeitig die Verbrennungsgeschwindigkeit reduziert, das Ende der Verbrennung verzögert und die Zylindertemperatur erhöht, was letztendlich den Wirkungsgrad des Motors verringert. Um eine Überhitzung des Motors zu verhindern, muss bei höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen die Leistung reduziert werden.

Gleichzeitig mit der Reduktion des unteren Heizwertes des Biogases verringert sich auch die Leistung des Motors, sofern diese Reduktion nicht durch eine erhöhte Gaszufuhr kompensiert werden kann. Beim Betrieb eines Motors mit einem  $\lambda$ -1-Gemisch reduziert sich die Leistung proportional, und der spezifische Verbrauch erhöht sich aufgrund des Teillastbetriebs.

Um eine unerwünschte Kondensatbildung während der Kaltstartphase des Motors auszuschliessen, sollte der **Wasserdampfgehalt im Biogas** möglichst gering gehalten werden. Von Fall zu Fall tolerieren die Motorenhersteller unter bestimmten Bedingungen höhere Wasserdampfkonzentrationen. Um Störungen und Schäden an den Motoren zu verhindern, sollte gleichzeitig der Staubgehalt möglichst tief sein. Das Biogas ist deshalb mit Hilfe von Filtern von **Staub** zu reinigen.

Für die am meisten verbreiteten Viertakt-Gasmotoren existieren zurzeit verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion der Schadstoffe im Abgas auf das von der **Luftreinhalteverordnung** (LRV 92) geforderte Niveau:

Durch den **Magerbetrieb** (Betrieb mit Luftüberschuss) von Mager-Motoren mit oder ohne Aufladung sinken die Verbrennungstemperaturen und die Stickoxidemissionen. Der Magerbetrieb äussert sich in einer Reduktion der Motorenleistung. Durch den Einsatz von Abgasturboladern kann diese Reduktion jedoch mehr als ausgeglichen werden. Bei Verwendung eines **Abgasturboladers** ist kein Gebläse zur Druckerhöhung notwendig, wie bei Saugmotoren. Der Betrieb im Luftüberschuss (Magerbetrieb) verzögert die Verbrennung und erleichtert das Entstehen von Kohlenmonoxid, unverbrannten Kohlenwasserstoffen und von Fehlzündungen. Es ist daher eine ausgeklügelte Regelung des Luft/Gas-Gemisches erforderlich, um Fehlzündungen zu verhindern und die Grenzwerte der Stickoxide einzuhalten.

Die niedrigsten Abgaswerte werden beim Betrieb von  $\lambda$ -1-Gasmotoren mit geringem Luftüberschuss und einem **Dreiwegkatalysator** erzielt. Durch die nichtselektive katalytische Reduktion (NSCR) liegen die erreichbaren Werte für  $\text{NO}_x$  bei  $<10 \text{ mg/m}^3$ , für CO bei  $<60 \text{ mg/m}^3$  und für HC bei  $<10 \text{ mg/m}^3$ . Diese Technik kann als ausgereift bezeichnet werden. Bei entsprechender Überwachung und Wartung der Anlagen lassen sich Katalysatorstandzeiten bei tiefen Schadstoffwerten im Abgas von über 20 000 Stunden erreichen. Es ist jedoch zu beachten, dass selbst bei

geringen Mengen von Schwefel, Phosphor, Zink, Arsen sowie Chlor und Fluor der Katalysator zerstört werden kann. Im Zusammenhang mit der Vergärung industrieller Abwässer oder von biogenen Abfällen muss je nach Zusammensetzung mit der Anwesenheit von Schwefelwasserstoff gerechnet werden. Um eine Zerstörung des Katalysators zu verhindern, ist in diesen Fällen eine möglichst vollständige Entschwefelung des Biogases vorzusehen.

Stationäre Gasmotoren können Generatoren und auch **andere Geräte**, wie Kompressoren einer Wärmepumpe oder einer Kühlanlage oder Gebläse zur Belüftung von Abwasser, antreiben.

**Verwertung in einer Wärme-Kraft-Kopplung**

Eine Wärme-Kraft-Kopplung (**WKK**) produziert gleichzeitig Wärme und Kraft zur Stromerzeugung: In diesem Fall treibt der Gasmotor einen elektrischen Generator an. Als **Blockheizkraftwerk** (BHKW) wird die kompakte Bauart einer WKK bezeichnet. Als Antrieb werden neben Gas-Ottomotoren auch Gas-Dieselmotoren und im Leistungsbereich von 1–10 MW Gasturbinen eingesetzt. Der produzierte Strom wird vor Ort verbraucht oder ins öffentliche Netz eingespeisen. Die Motoren- und die Abgasabwärme wird mittels Wärmetauscher abgeführt und kann zum Heizen von Gebäuden oder Prozessen verwendet werden.

Dieser Weg der Biogasverwertung ist für industrielle Anlagen am interessantesten, weil die **elektrische Energie** in das bestehende **Netz eingespeisen** werden kann. Diese Nutzungsart ermöglicht gleichzeitig, die (Überschuss-)Energie des Biogases vom Sommer in kältere Jahreszeiten zu übertragen, indem im Sommer weniger Wasser aus den Stauseen zur Produktion von Hydroenergie bezogen werden muss.

Die folgende Darstellung und Tabelle 18 geben einen Überblick über die Palette und Leistungsbereiche von einigen Wärme-Kraft-Kopplungen:

- Industriegasmotoren (Otto, Fremdzündung)
  - 20 bis 1000 kW elektrisch
  - > 100 000 Betriebsstunden
  - $\lambda = 1.0$  mit 3-Weg-Katalysator:  $\text{NO}_x < 10 \text{ mg/l}$
  - $\lambda = 1.6\text{--}1.8$  (Magermotor):  $\text{NO}_x \text{ ca. } 400 \text{ mg/m}^3$
- Fahrzeug-Benzinmotoren (Otto, Fremdzündung)
  - 5 bis 20 kW elektrisch
  - < 20'000 Betriebsstunden
  - $\lambda = 1.0$  mit 3-Weg-Katalysator:  $\text{NO}_x < 10 \text{ mg/l}$
  - $\lambda = 1.2\text{--}1.3$  (ungeregelt):  $\text{NO}_x \text{ ca. } 400 \text{ mg/m}^3$
- Dieselmotor (Zündstrahl, dual fuel)
  - > 5% Diesel
  - Selbstentzündung
  - $\lambda = \text{ca. } 1.5$ :  $\text{NO}_x \text{ ca. } 400 \text{ mg/m}^3$ ; Entstickung durch SCR-Katalysator möglich
  - Dieselpartikel, krebserregende KW's

Die **Dimensionierung** einer WKK ist wesentlich für die Rentabilität der

| Marke        | Modell<br>[kW] | elektr. Leistung<br>[kW] | therm. Leistung<br>[kW] | Biogasverbrauch<br>[m <sup>3</sup> /h] |
|--------------|----------------|--------------------------|-------------------------|--|
| TOTEM (Fiat) | Standard       | 15                       | 39                      | 8.4 (60% CH <sub>4</sub> )             |
| DIMAG AG     | 1BM            | 15                       | 33                      | 8.5 (65% CH <sub>4</sub> )             |
|              | 2BM            | 20                       | 44                      | 11.3                                   |
|              | 3BM            | 30                       | 66                      | 16.9                                   |
|              | 6M             | 60                       | 114                     | 31.5                                   |
|              | 8M             | 80                       | 152                     | 41.5                                   |
|              | 3 STBG         | von 60 bis 1461          | von 105 bis 2556        | von 30.8                               |
| MAN          | BHKW E-2566    | 831                      | 133                     | 40.1                                   |

Tabelle 18:  
Leistungsdaten einiger  
Wärme-Kraft-Kopplungs-  
anlagen

Anlage: Bei zu gross dimensionierten Anlagen mit niedrigen Betriebsstundenzahlen und geringer Stromproduktion ist eine wirtschaftliche Abschreibungsdauer unmöglich. Bei Vergärungsanlagen richtet sich die Auslegung einer Wärme-Kraft-Kopplung nach der Gasproduktion. Aus ökonomischen Gründen achtet man darauf, dass möglichst viel Strom während den Hochtarifzeiten produziert werden kann. Der **Motortyp** sollte daher der Gasproduktion und Qualität angepasst sein und die Grenzwerte der LRV 92 erfüllen. Bei den meisten grösseren WKK wird ein entsprechend angepasster Dieselmotor verwendet. Gewisse Anbieter verwenden besonders niedertourige, robuste, speziell für den Stationärbetrieb gebaute Motoren.

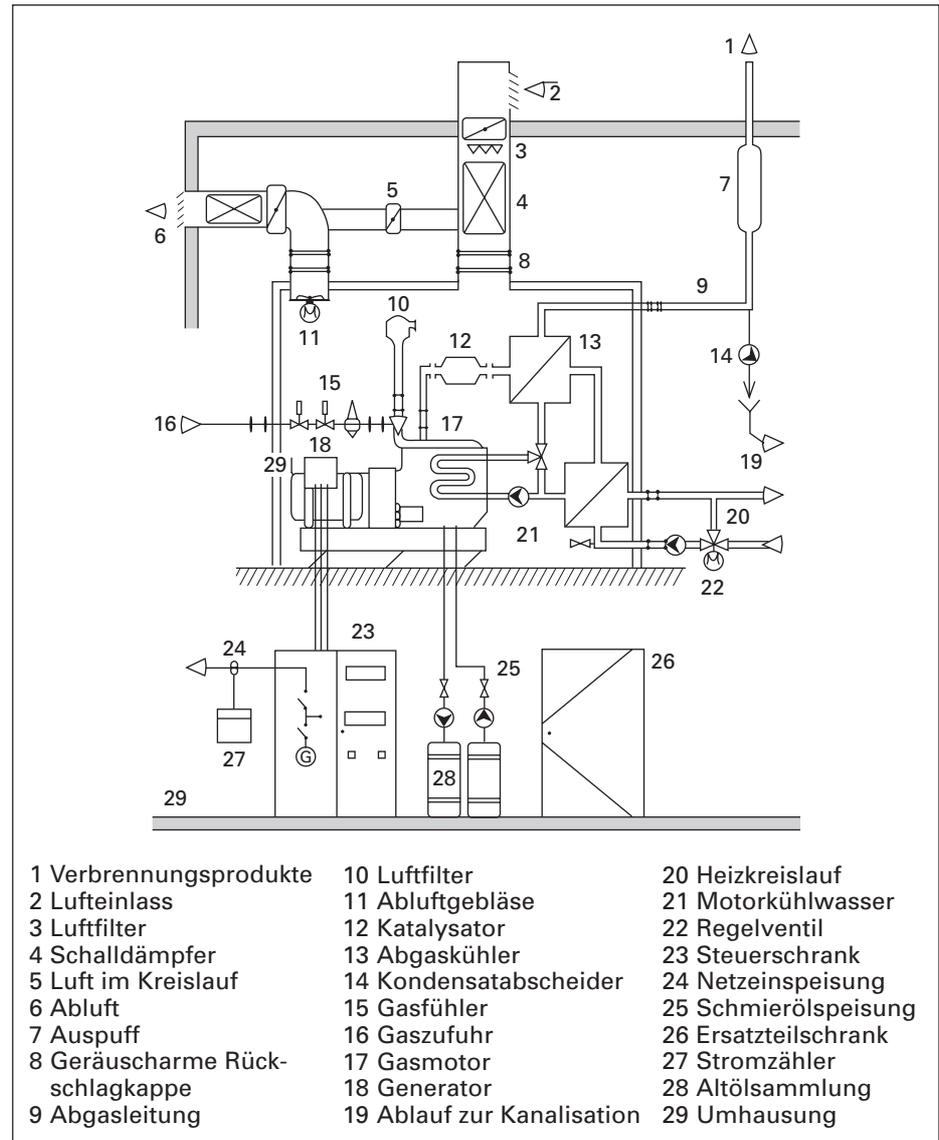
Bei der Wahl des Strom produzierenden **Generators** muss zuerst entschieden werden, ob die Anlage nur für den netzparallelen Betrieb oder auch als Notstromanlage bei Netzausfall oder sogar für reinen Inselbetrieb ohne Anschluss an das öffentliche Netz vorgesehen ist. Der rein netzparallele Betrieb stellt für die Stromerzeugung aus Biogas den Normalfall dar. Bei kleinen Anlagen werden dabei aus Kostengründen immer **Asynchron-Generatoren** eingesetzt. Diese sind begrenzt auch an einen Inselbetrieb anpassbar; allerdings sind dazu spezielle Regeleinrichtungen notwendig. Bei höheren Ansprüchen, bei grösseren Notstromanlagen und in reinen Inselnetzen kommen jedoch nur **Synchron-Generatoren** zum Einsatz. Spannung, Frequenz und Blindleistung können bei diesem Maschinentyp über eine entsprechende Regelung eingestellt werden. Die Vereinigung der Schweizerischen Elektrizitätswerke empfiehlt ihren Mitgliedern, für dezentral aus erneuerbaren Quellen produzierten und ins Netz eingespeisten Strom 16 Rp./kWh zu bezahlen.

Zum **Starten** des Antriebsmotors kann bei Anlagen mit Asynchron-Generatoren die als Motor betriebene Asynchronmaschine verwendet werden. Um den Anlaufstrom zu reduzieren, ist dazu eine Stern-Dreieck-Umschaltung notwendig. Eine weitere Reduktion der Netzbelastung ist durch die Verwendung eines separaten Anlassers möglich. Notwendig sind Anlasser im Inselbetrieb und bei allen Anlagen mit Synchron-Generatoren.

Zur **Wärmegewinnung** kommen Wärmetauscher im Motorkühlkreislauf und Wärmetauscher im Abgaskühlkreislauf in Frage. Über einen Kühlwasserkreislauf wird die Motorenabwärme über Wasser/Wasser-Wärmetauscher abgeführt. Der damit mögliche Heizungsverlauf wird 85 °C kaum überschreiten, während der Rücklauf zwischen 55 und 70 °C liegen dürfte.

Falls höhere Vorlauftemperaturen notwendig sind oder falls die Heizleistung nicht genügt, kann zusätzlich ein Heizkessel mit der WKK in Serie geschaltet werden. Die Figur 31 zeigt das Prinzip des Kühlkreislaufs und der Wärmerückgewinnung.

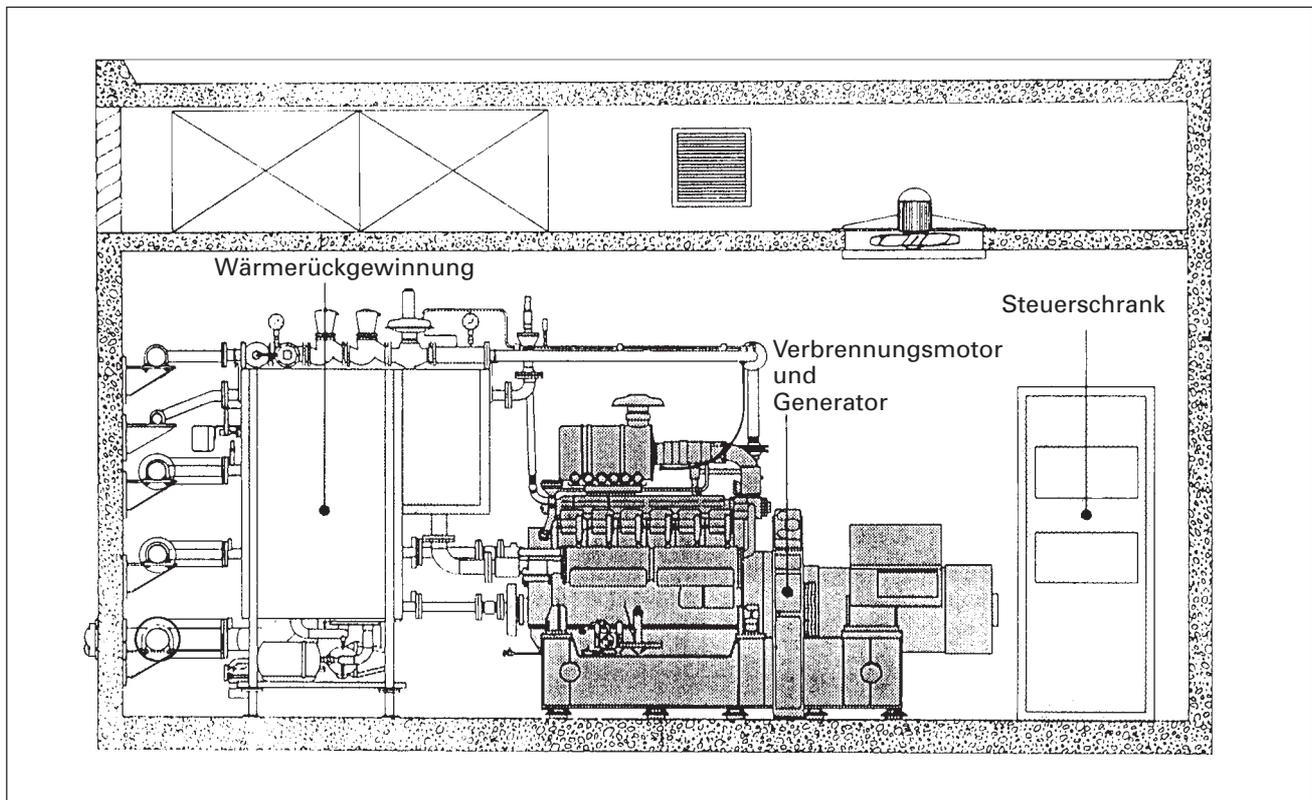
Trotz Isolation strahlen der Gasmotor, der Generator, die Wärmetauscher



Figur 31:  
Wärmerückgewinnung in  
einer Wärme-Kraft-Kopplung

und auch die Wasserleitungen eine gewisse Menge an **Strahlungswärme** ab, welche mit einem speziellen Austauscherkreislauf oder mit einer Wärmepumpe zurückgewonnen werden kann oder durch Belüftung abgeführt werden muss.

In der Regel ist die WKK in einem **schalldämpfenden Gehäuse** untergebracht, welches den Lärm auf ca. 70 bis 75 dBA beschränkt. Diese Gehäuse verfügen normalerweise über mehrere abschliessbare Öffnungen, damit die Wartung der Maschine problemlos möglich ist. Je nach Aufstellung müssen besondere Vorkehrungen zur Reduktion des Lüftungs- und des Auspufflärms getroffen werden. Die Figur 32 zeigt den Aufbau eines WKK-Moduls.



Figur 32:  
Beispiel eines eingehausten  
WKK-Moduls

### Verwertung als Autogas

Bereits vor der Energiekrise, aber auch neuerdings wieder in der Gegenwart, wird Biogas als **Autogas zum Antrieb von Motorfahrzeugen** eingesetzt: Die in Grossserien hergestellten Fahrzeugmotoren sind primär für den Betrieb mit Diesel oder Benzin bestimmt. Es ist jedoch möglich, einen Benzinmotor so umzurüsten, dass er entweder mit Benzin oder mit Biogas betrieben werden kann. Die Umbaukosten betragen gemäss neuesten Angaben je nach Fahrzeugmodell rund Fr. 3500.– bis 4000.–. Allerdings muss beim Gasbetrieb eine Leistungseinbusse von 5 bis 10% in Kauf genommen werden. Da das komprimierte Biogas nur rund die Hälfte von besteuertem Benzin kostet, sind die Investitionen nach rund 50 000 km amortisiert. Um einen akzeptablen Aktionsradius zu erhalten, muss das Biogas auf rund 200 bar komprimiert werden. Dazu kommt, dass parallel zur Komprimierung eine weitgehende Reinigung notwendig ist; Kohlendioxid und Wasserdampf müssen ebenso entfernt werden wie der Schwefelwasserstoff.

Speziell interessant ist der Gasbetrieb für **Entsorgungsfahrzeuge**, welche beim Entladen immer wieder eine Vergärungsanlage anfahren, wo sie gleich betankt werden können. Angeschlossen an die Kompogas-Anlagen in Bachenbülach und in Rümlang sind Biogas-Tankstellen, wo beispielsweise neben Ford-Personen- und -Lieferwagen auch ein grosser Truck mit Treibstoff versorgt wird. Als Vorteil der Verwertung von Biogas als Treibstoff sind einerseits die tiefen Abgasemissionen beim Gasbetrieb zu nennen, andererseits kann bei fehlender Wärmeverwertung eine gesamthaft bessere Ausnutzung der Energie erreicht werden, als wenn ohne Abwärmenutzung verstromt würde.

### Weitere Verwertungsmöglichkeiten

Unter bestimmten Voraussetzungen kann es sinnvoll sein, das Biogas in ein vorhandenes **Erdgasnetz** einzuspeisen. Beispielsweise ist dies der Fall, wenn vor Ort keine Wärmebezüge vorhanden sind, welche die grosse Menge an Abwärme (rund 60% des Energieinhalts des Gases bei Verstromung) übernehmen können. Wenn das Biogas in ein Verteilungsnetz eingespeisen und mit Erdgas vermischt werden soll, ist eine Gasreinigung zur Entfernung von Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid sowie eine Trocknung unerlässlich.

Biogas lässt sich auch zum **Beleuchten, Kochen** und zum **Kühlen** einsetzen. Diese Nutzungsmöglichkeiten sind jedoch hauptsächlich bei Kleinanlagen in Entwicklungsländern in Betracht zu ziehen. Bei der Verwendung in einer geschlossenen Küche ist das Gas unbedingt zu entschwefeln.

Weil Methan ein rund 25- bis 30mal wirkungsvolleres Treibhausgas als Kohlendioxid ist, darf kein Biogas an die Atmosphäre abgegeben werden. Zur Verbrennung des Biogases im Falle von Pannen und/oder bei Betriebsunterbrüchen der Gasverwertung sowie aus Sicherheitsgründen ist es notwendig, eine **Gasfackel** zu installieren. Gasfackeln sind aus mehreren Brennern mit Windschutz und Zündautomatik aufgebaut und müssen im Notfall sofort in Betrieb genommen werden können.

Während man bei einer thermischen Nutzung oder bei der Einspeisung ins Gasnetz nur ein **Erlös** von rund 17 Rp./m<sup>3</sup> Gas (60% Methan, H<sub>u</sub>: 6 kWh) erzielen kann, gewinnt man bei einer WKK rund 41 Rp./m<sup>3</sup> (Elektrizität: 16 Rp./kWh, Wärme 3 Rp./kWh) und im Fall von Autogas sogar 40 bis 80 Rp./m<sup>3</sup>.

## **5 Verwertung der Gärprodukte**

---

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>5.1</b> | <b>Feste biogene Abfälle</b>           | <b>85</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Anaerob behandelte Abwässer</b>     | <b>86</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Qualität des Gärguts als Dünger</b> | <b>87</b> |

---



## 5.1 Feste biogene Abfälle

Das ausgegorene, den Reaktor verlassende **Gärprodukt aus einer Feststoffvergärungsanlage** ist weitgehend stabilisiert. Je nach Verwendungszweck ist nach der Entwässerung eine kurze aerobe Nachbehandlung (Kompostierung) notwendig. Das unbehandelte Gärgut kann je nach Zusammensetzung des Ausgangsmaterials und Abbaugrad etwas nach Ammoniak oder nach niederen Fettsäuren riechen. Die Eigenschaften des Gärprodukts sind nach einer aeroben Reifephase (d.h. kurze Nachrotte von rund 10 Tagen, bei welcher die Temperatur des Gärguts noch einmal auf ca. 50 °C steigt und Ammonium in Nitrat umgewandelt wird) mit denjenigen eines guten Kompostes vergleichbar. Auf Grund der vorliegenden Ergebnisse scheint sich eine obligatorische Nachkompostierung der anaerob behandelten Abfälle zur Erreichung der Pflanzenverträglichkeit jedoch nicht zwingend aufzudrängen; das frisch austretende Gärgut ist einem Frischkompost mindestens ebenbürtig, beziehungsweise einem Stallmist zumindest bezüglich Hygiene deutlich überlegen. Die Anwendung richtet sich bei Einsatz in Landwirtschaft und Gartenbau einerseits nach den Bedürfnissen der Kulturpflanzen; andererseits ist zu beachten, dass die eidgenössische Stoffverordnung (StoV) die Anwendung von Kompost auf 25 t Trockensubstanz pro ha und 3 Jahre beschränkt .

Die festen biogenen Abfälle der Grünabfuhr enthalten in der Regel unerwünschte **Störstoffe** wie Glas, Plastik, Eisenmetalle, Aluminium, Batterien u.a.m., welche mit Vorteil vor der Zerkleinerung abgetrennt werden. Diese Stoffe werden entweder wiederverwertet oder in einer Kehrichtverbrennungsanlage verbrannt.

Bei der Entwässerung des ausgegorenen Materials fällt **Presswasser** an. Ein Teil des Presswassers wird je nach Verfahren prozessintern zur Befeuchtung oder Rückimpfung des frischen Ausgangsmaterials verwendet. Der Überschuss muss kanalisations- oder vorflutergerecht aufbereitet werden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwertung des Überschusswassers als Flüssigdünger in der Landwirtschaft dar. Diese Variante setzt jedoch voraus, dass genügend Ausbringflächen bei tiefen Tierbeständen vorhanden sind. Die folgende Tabelle 19 gibt einige Anhaltspunkte zur Zusammensetzung dieser Presswässer:

| Menge | BSB5  | CSB   | Zn     | Pb     | Cu     | Cr     | Ni     | Cd     | Sn     | NH <sub>4</sub> | P      | SO <sub>4</sub> |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| [l/t] | [g/l] | [g/l] | [mg/l]          | [mg/l] | [mg/l]          |
| 500   | 2.29  | 10.8  | 7.66   | 0.54   | 2.51   | 0.83   | 0.41   | <0.025 | <0.013 | 614             | 116    | 298             |

Tabelle 19:  
Zusammensetzung und  
Menge des Presswassers von  
Feststoffvergärung biogener  
Haushaltabfälle  
(Quelle: BTA; Oetjen, Kavelage)

## 5.2 Anaerob behandelte Abwässer

Die Verordnung über Abwassereinleitungen und subsidiär die Kantone legen die Anforderungen an die **Einleitung von Abwässern** in eine Kanalisation fest. Einige Parameter sind in der Verordnung begrenzt. Bei den zurzeit noch nicht begrenzten Parametern kann der Kanton Grenzwerte festlegen. Je nach Herkunft des vergorenen Abwassers ist eine aerobe Nachbehandlung – allenfalls mit Nitrifizierung/Denitrifizierung – unerlässlich, um die Einleitungsanforderungen zu erfüllen. Diese Nachbehandlung wird entweder direkt der Vergärung nachgeschaltet, oder die Abwässer werden in eine öffentliche Kläranlage geleitet, wo sie gemeinsam mit den häuslichen Abwässern behandelt werden.

Der bei der Vergärung entstehende **Überschussschlamm** besteht aus nicht abbaubaren oder noch unvergorenen festen und flüssigen Stoffen. Mengenmässig kann im Vergleich zu vollständig aeroben Prozessen bei der Vergärung mit einem 3- bis 10fach geringeren Schlammaufkommen gerechnet werden. Bei industriellen Abwässern wird pro kg abgebautem CSB mit ca. 0.05 bis 0.15 kg Schlamm-TS gerechnet. Nach einer Eindickung können diese Schlämme als Dünger in der Landwirtschaft verwertet werden, sofern keine toxischen Komponenten wie Schwermetalle oder gewisse organische Verbindungen im Schlamm vorliegen. Falls ein Düngereinsatz nicht möglich ist, muss eine (energetisch allerdings nicht sinnvolle) Trocknung mit anschliessender Verbrennung in Betracht gezogen werden.

### 5.3 Qualität des Gärguts als Dünger

Damit vergorene biogene Abfälle wie auch nährstoffreiche, organisch belastete Abwässer in den ökologischen Kreislauf rückgeführt werden können, gilt für die Vergärung – wie auch für die Kompostierung – die Forderung nach einer hohen Qualität des Endproduktes. Nur so wird die Akzeptanz seitens der Verbraucher erreicht und damit der Absatz gesichert. Zu den **Qualitätsforderungen** zählen nebst verschiedenen chemischen und physikalisch-chemischen Parametern auch Freiheit von keimfähigen (Unkraut-)Samen, Pflanzenverträglichkeit für die Kulturen und seuchenhygienische Unbedenklichkeit aus human- und phytopathologischer Sicht.

#### Pflanzenverträglichkeit

Bezüglich des **Nährstoffgehalts** und der **Belastung mit Schwermetallen** gilt, dass sowohl bei der Kompostierung wie auch bei der Vergärung die Inhaltsstoffe des erzeugten aeroben bzw. anaeroben Produkts strikt mit der **Zusammensetzung des Ausgangsmaterials verknüpft** sind: Die anorganischen Nährstoffe gehen während der Vergärung nicht verloren, da die Gärung in einem dichten Behälter stattfindet, und da mit dem Gas (mit Ausnahme von Schwefel in Form von Schwefelwasserstoff und kleinen Mengen an Stickstoff) keine Nährstoffe entweichen können. Anaerobe und aerobe Komposte, welche aus Küchenabfällen und Speiseresten gewonnen werden, weisen beispielsweise gegenüber Komposten aus rein pflanzlichen Materialien (Rasenschnitte, Gartenabfälle) einen entsprechend höheren Salzgehalt auf. Leicht lösliche und biologisch nicht gebundene Salze, wie sie in Küchenabfällen in z.T. spürbaren Mengen vorliegen (Kochsalz), können nach der fest/flüssig-Trennung allerdings in der Flüssigphase vorliegen.

Wenn beispielsweise in einem Industrieabwasser **Schwermetalle** vorliegen, werden sie – bezogen auf die TS – während der Gärung sogar noch etwas aufkonzentriert, da ein Teil des Kohlenstoffs das System in Form von Biogas verlässt. Komposte von separat erfassten biogenen Abfällen wie auch Abwässer aus der Lebensmittelindustrie liegen allerdings praktisch ausnahmslos bezüglich aller Schwermetalle ganz deutlich unter den Grenzwerten für Kompost. (Die Grenzwerte für Kompost liegen in der Schweiz und der BRD ihrerseits um durchschnittlich einen Faktor 5 unter jenen für Klärschlämme.)

Wenn anaerober Kompost oder vergorenes Abwasser an heissen Tagen und bei eher basischen pH-Werten unmittelbar nach der Vergärung grossflächig ausgebracht wird, kann es zu **Stickstoffverlust** infolge von Verdunsten von Ammoniak kommen. Dieser Stickstoffverlust ist in der Regel jedoch kleiner als der Verlust bei der aeroben Behandlung. Wenn das anaerob behandelte Gärgut nach der Gärung noch gelagert oder sogar kurz nachkompostiert wird, findet sogleich eine Umlagerung von freiem Ammonium in Nitrat statt.

Die für das Pflanzenwachstum nicht erwünschten hohen Konzentrationen an **organischen Säuren** sind nach einer Vergärung nicht mehr vorhanden, da die Säuren zu Biogas umgesetzt werden. Die für den Humusaufbau wichtigen, schwer abbaubaren Kohlenstoffverbindungen bleiben hingegen erhalten.

Bei der aeroben Kompostierung wird **Holz** durch Pilze (langsam) abgebaut oder zumindest angegriffen. Im Gegensatz dazu wird bei der Gärung der Holzbestandteil Lignin nicht abgebaut. Im Ausgangsmaterial vorkommende Holzbestandteile werden daher bei der Passage durch eine Gäranlage kaum verändert. Sofern sie nicht als Strukturmaterial im Produkt erwünscht sind, müssen sie aus dem Gärgut ausgesiebt werden.

### Hygieneaspekte

Die **Hygienisierungswirkung** einer Biogasanlage ist primär **abhängig von der Aufenthaltszeit** des Substrates und der Betriebstemperatur. Diesbezüglich sind voll durchmischte Reaktoren nicht optimal, da dort die Möglichkeit besteht, dass ein kleiner Teil des Frischmaterials sogleich wieder ausgetragen wird. Dadurch ist es möglich, dass ein Teil gewisser besonders resistenter Erregergruppen (Bandwurmeier usw.) zuwenig lang in der Anlage verbleibt, um abgetötet zu werden.

**Humanpathogene Mikroorganismen** weisen zumeist ein Temperatur-optimum im mesophilen Bereich (35 °C, d.h. Körpertemperatur) auf. Trotzdem ist – speziell bei höheren Temperaturen – im anaeroben Milieu und in Funktion der Dauer der Behandlung mit Wachstumshemmung und/oder Absterben der Pathogenen zu rechnen. Das Fehlen von Sauerstoff (Anaerobie) selbst scheint nur untergeordnete Bedeutung für die Hygienisierungswirkung zu haben. Hingegen scheint das allgemeine Milieu bei der anaeroben Gärung (Exoenzyme, Säuregehalt, Redoxpotential usw.) abtötend oder zumindest hemmend auf Pathogene zu wirken. Humanpathogene Erreger kommen normalerweise in Industrieabwässern und in separat eingesammelten Haushaltabfällen nicht in grosser Menge vor, so dass eine spezielle Hygienisierung nur in Ausnahmefällen notwendig erscheint.

Bei der Vergärung und Kompostierung von Grünabfällen (Haushalt, Garten, Kommune) ist davon auszugehen, dass die Rohstoffe einen hohen Gehalt keimfähiger **Unkrautsamen** aufweisen. Diese können bei ungeeigneter Behandlung zu einer zusätzlichen Verunkrautung der Kulturflächen führen. Eigene Untersuchungen an Versuchs- und Praxisanlagen zeigten, dass Tomaten- und Rumexsamen das anaerobe Milieu, insbesondere die hydrolytischen Bedingungen, nicht gut vertragen. In mesophilen Anlagen kommt es rasch zu einer Keimverzögerung und dann innerhalb der durchschnittlichen Aufenthaltszeit eines konventionellen Fermenters zu einem Absterben der Samen. In thermophilen Anlagen erfolgt das Absterben entsprechend rascher.

Ein besonderes Augenmerk muss auf **phytopathogene Erreger** gerichtet werden, da sonst Pflanzenkrankheiten mit dem Gärgut wieder auf Landwirtschaftsland verbreitet werden. Diesbezüglich wurden eigene Untersuchungen über das Verhalten von Kohl-Hernie (*Plasmodiophora brassicae*, *Indikatororganismus*) zur thermophilen Vergärung in Laborfermentern durchgeführt. Bei Vergärung bei 35 °C über 14 Tage wurde keine Abtötung der Erreger beobachtet (Zugabe von 10% angesteckten Wurzeln zu 60% Gemüseabfällen und 30% Impfmateriale); die vergorenen Wurzeln zeigten immer noch dasselbe Infektionspotential wie das kühl gelagerte Ausgangsmaterial (Nullwert). Bei thermophiler Vergärung hingegen wurde *Plasmodiophora* sowohl nach 14 wie auch nach 7 Tagen entweder vollständig abgetötet oder im Infektionspotential auf unter 1% des Ausgangsmaterials reduziert.

## **6 Ausarbeitung eines Projekts**

---

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>6.1</b> | <b>Die Vergärung als Glied der Reststoffbehandlung</b> | <b>91</b>  |
| <b>6.2</b> | <b>Umweltaspekte</b>                                   | <b>96</b>  |
| <b>6.3</b> | <b>Kosten und Nebenkosten</b>                          | <b>97</b>  |
| <b>6.4</b> | <b>Rechtliche Aspekte</b>                              | <b>101</b> |

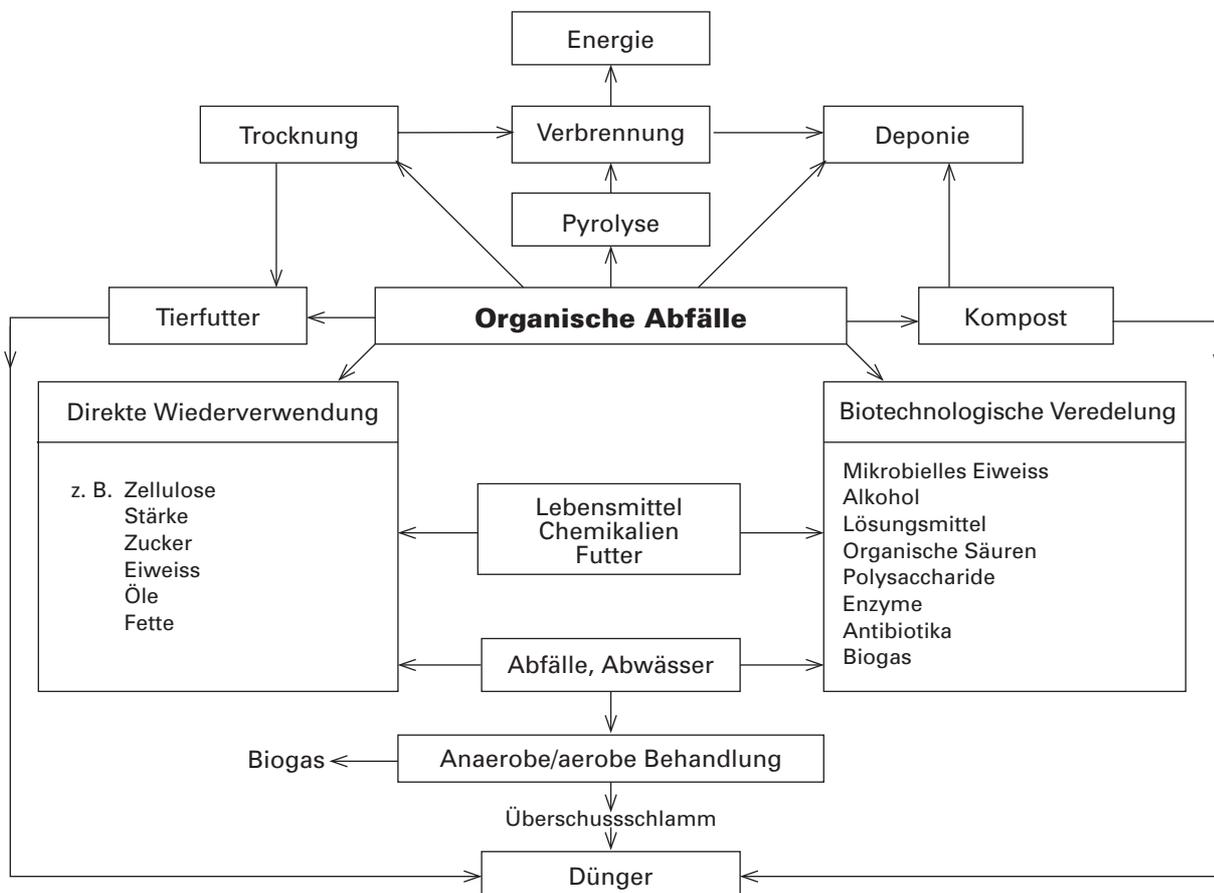
---



In diesem Kapitel werden die für die Bearbeitung eines Vergärungsprojektes notwendigen Kenntnisse zusammengefasst. Es geht darum, die Vergärung unter den verschiedenen Verfahren zur Behandlung fester und flüssiger Abfälle in bezug auf die Konkurrenzverfahren und Umweltverträglichkeit richtig einzuordnen. Weiter werden einige ökonomische Aspekte der Vergärung behandelt. In einem besonderen Abschnitt wird auf die gesetzlichen Grundlagen im Zusammenhang mit dem Bau einer Anlage zur Abfallverwertung eingegangen.

## 6.1 Die Vergärung als Glied der Reststoffbehandlung

Die folgende Graphik erlaubt die Vergärung innerhalb der verschiedenen, in einem konkreten Fall auch zu betrachtenden Verwertungs- und **Entsorgungsverfahren einzuordnen**:



Figur 33:  
Der Stellenwert der Vergärung  
in den Verwertungswegen von  
Abfällen und Abwässern

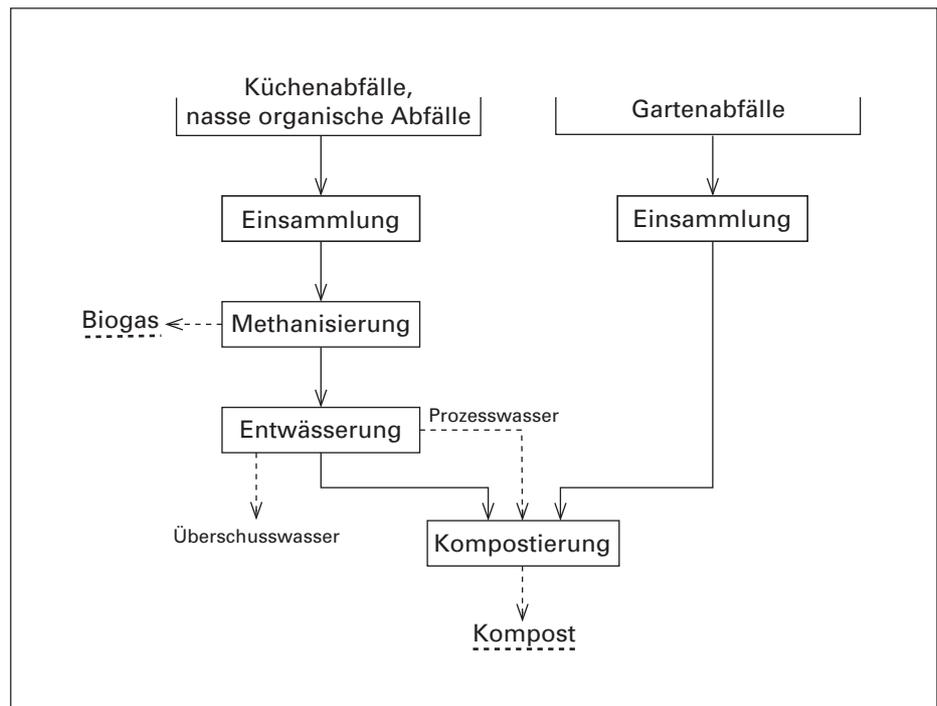
Die in der Folge beschriebenen verschiedenen Verfahren **konkurrenzieren die Vergärung** unter bestimmten Bedingungen und lassen sich bezüglich der Eignung für verschiedene Abfälle wie folgt abgrenzen:

**Bioabfälle aus Haushalt und Küche**

Infolge des durch den hohen Wassergehalt verursachten niedrigen Heizwerts sind diese Abfälle für die **Verbrennung schlecht geeignet**. Durch die Einführung der separaten Bioabfallsammlung (Grünabfuhr) werden bereits heute deutlich weniger Bioabfälle in Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt, was dazu geführt hat, dass der Heizwert des Restmülls signifikant angestiegen ist.

Beim Vergleich der Behandlungskosten schneiden die biologischen Verfahren günstiger ab. Während bei der Verbrennung heute (1996) mit totalen Kosten um Fr. 400.– pro Tonne gerechnet werden muss, liegen die Kosten der Vergärung durchschnittlich spürbar unter Fr. 200.– pro Tonne.

Die **Kompostierung** ist nicht in jedem Fall als Konkurrenz zur Vergärung anzusehen. Es ist zu beachten, dass in der Schweiz derzeit rund 350 000 Tonnen biogene Abfälle pro Jahr in privaten und öffentlichen Kompostieranlagen verarbeitet werden (dies entspricht etwa einem Siebtel der total vorhandenen biogenen Abfälle). Anlagen, wo der nasse, leicht abbaubare (Küchen-)Abfall einen immer grösseren Anteil ausmacht, kämpfen mit Geruchs- und Qualitätsproblemen. Speziell in Agglomerationsgebieten müssen daher beinahe zwangsweise in absehbarer Zukunft Vergärungsanlagen gebaut werden. Bezogen auf die Eigenschaften der verschiedenen biogenen Abfälle ergänzen sich Kompostierung und Vergärung in vielen Fällen. Während die Kompostierung sich gut für die ligninhaltigen, verholzten, strauchigen Abfälle aus Garten und von öffentlichem Grund eignet, ist die Vergärung besonders für strukturarme, feuchte Abfälle aus Haushalt und Industrie sowie zur Behandlung von Rasenschnitten zu bevorzugen. Anzufügen ist, dass die holzig/strauchigen Abfälle besser – anstatt kompostiert – zu Holzschnitzeln aufbereitet und energetisch genutzt würden. Das folgende Schema zeigt diese Möglichkeiten auf:



Figur 34: Konzept zur Verwertung biogener fester Abfälle (nicht eingezeichnet: Verbrennung von Holzschnitzeln oder Schnitzelproduktion für die Spanplattenindustrie als Alternative zur Kompostierung verholzten Materials)

Der **entscheidende** und offensichtliche **Unterschied** zwischen Vergärung und Kompostierung liegt auf der **Energieseite**. Während mit Hilfe der Vergärung Energieüberschüsse erzeugt werden können, weist die Kompostierung eine stark negative Energiebilanz auf. Die folgende Tabelle vergleicht verschiedene Systeme auf energetischer Ebene:

| System            | Kompostierung |             |        | Vergärung        |                  |                |
|-------------------|---------------|-------------|--------|------------------|------------------|----------------|
|                   | Container     | geschlossen | Tunnel | thermophil, fest | thermophil, fest | mesophil, fest |
| Hersteller        | BIOCON        | BÜHLER      | BAV    | KOMPOGAS         | DRANCO           | VALORGA        |
| Kapazität         | 50 000        | 40 000      | 50 000 | 10 000           | 50 000           | 52 000         |
| Verbrauch [kWh/t] | 20            | 35          | 25     | 35               | 33               | 75             |
| Gewinn [kWh/t]    | -20           | -35         | -25    | +75              | +79              | +78            |

Tabelle 20:  
Vergleich der Energiebilanz verschiedener Gär- und Kompostiersysteme  
(Quellen: Jumelet, Van der Knijff, Haskoning, Bühler/ Kompogas)

### Industrielle Abfälle

Im Gemüsebau werden die Produktions- und Rüstabfälle häufig **direkt** auf die Felder **ausgebracht**. Dieser Weg kommt für andere Abfälle kaum in Frage. Die Kompostierung kann prinzipiell mit der Kompostierung von Küchenabfällen kombiniert werden. Häufig sind die Abfälle jedoch zu nass und verursachen Schwierigkeiten und/oder Geruchsprobleme bei der Kompostierung.

In der Zucker- und Stärkeindustrie kommt u.U. die **Gewinnung von Ethanol** zum Einsatz, um Alkohol für verschiedene Verwendungszwecke herzustellen. Aus wirtschaftlichen Gründen kommen aber nur sehr grosse Betriebe dazu in Frage.

Die **Verfütterung von Abfällen** und Nebenprodukten aus der Lebensmittelverarbeitenden Industrie ist eine weit verbreitete und unter gewissen Voraussetzungen sinnvolle Praxis (u.a. Aufwerten des Energieinhalts der Abfälle durch Umwandlung in Nahrungsmittel). Aufgrund landwirtschaftspolitischer Erwägungen, insbesondere was die Tierbestände, die Hygieneanforderungen und die Hofdüngerproduktion angeht, ist aber damit zu rechnen, dass in Zukunft die Mengen zurückgehen werden.

Die Tabelle 21 gibt einen Eindruck über die Nährwerte dieser Abfälle bzw. Nebenprodukte:

Tabelle 21:  
Daten zu einigen industriellen Abfällen beim Einsatz in der Tierernährung

| Nebenprodukt | Nettoenergie für die Laktation [MJ/kg] | Nettoenergie für Fleischproduktion [MJ/kg] | Absorbierbare Proteine [g/kg] | Trocken-substanz [%] |
|--------------|--|--|-------------------------------|----------------------|
| Lactoserum   | 7.9                                    | 8.7  | 107                           | 97                   |
| Fischmehl    | 6.0                                    | 6.2  | 288                           | 90                   |
| Blutmehl     | 6.6                                    | 6.7  | 483                           | 90                   |
| Fett         | 22.8                                   | 26.8                                       | 0                             | 99                   |

### Industrielle Abwässer

Die Reinigung industrieller Abwässer erfolgt in der Regel nach dem Belebtschlammverfahren oder mit Systemen mit festsitzender Biomasse wie Tropfkörper oder Scheiben-Tauchtropfkörper im Rahmen einer **aeroben Reinigung**. Im Rahmen der Bearbeitung eines Projektes sind daher sowohl die Investitions- als auch die Betriebskosten zu vergleichen. Neben den Kapital-, Energie-, Personal- und Unterhaltskosten sind auch die Kosten für eine allfällig notwendige Schlammabeseitigung mit einzubeziehen. Das folgende Beispiel in Tabelle 22 zeigt einen solchen Vergleich.

Das unbehandelte, **direkte Ausbringen** auf landwirtschaftliche Nutzflächen macht sich die Reinigungskraft der Böden (Filtration, Absorption von Kolloiden und biologischer Abbau) und die Aufnahme durch die Pflanzen zu Nutze. Dieser Weg, der nur in ländlichen Gegenden in Frage kommt, verlangt präzise Kenntnisse der Schad- und Nährstoffgehalte der Reststoffe, damit allfällige Risiken der Grundwasserverschmutzung abgeschätzt werden können.

Bestimmte flüssige Nebenprodukte der Lebensmittelherstellung können als Viehfutter oder als Nahrungsmittelzusätze in der **menschlichen und tierischen Ernährung** wiederverwendet werden. Das ist zum Beispiel bei der Molke der Fall. In der Regel wird die Molke zur Fütterung in der Schweinezucht verwendet. Daneben wird auch Molkepulver hergestellt, welches zur Herstellung von Biscuits, Glacés, Süssgetränken u.a.m. Verwendung findet.

**Abwassereigenschaften**

Industriezweig: Papierindustrie, Herstellung von Sulfitpulle in ALRED, D

|                 |                |                        |
|-----------------|----------------|------------------------|
| Abwasser:       | Menge          | 1600 m <sup>3</sup> /d |
|                 | CSB-Fracht     | 9600 kg/d              |
|                 | BSB5           | 4800 kg/d              |
| Reinigungsziel: | 70% CSB Abbau  |                        |
|                 | 90% BSB5 Abbau |                        |

| <b>Aerob<br/>Belebung</b>       |                                  | <b>Anaerob<br/>Kontaktprozess</b> |  |
|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>Investitionen</b>            |                                  | <b>Investitionen</b>              |  |
| Belüftungsbecken                | 5000 m <sup>3</sup>              | Gärreaktor                        | 2200 m <sup>3</sup>                              |
| Nachklärbecken                  | Ø 12 m                           | Abscheider                        | 25 m <sup>3</sup>                                |
| Eindicker                       | Ø 9 m                            |                                   |  |
| Entwässerung                    | Filterbandpresse                 | Entwässerung                      | Filterbandpresse                                 |
| Kosten Total                    | 1.56 Mio SFr.                    | Kosten Total                      | 1.43 Mio SFr.                                    |
| <b>Betriebskosten</b>           |                                  | <b>Betriebskosten</b>             |  |
| Energiebedarf                   | 0.6 kWh/kg CSB el.<br>4302 kWh/d | Energiebedarf                     | 0.1 kWh/kg CSB el.<br>680 kWh/d                  |
| Biogasproduktion                | 0                                | Biogasproduktion                  | 3360 m <sup>3</sup> /d<br>7800 kWh Netto pro Tag |
| Schlammbehandlung<br>Produktion | 1350 kg TS/d                     | Schlammbehandlung<br>Produktion   | 475 kg TS/d                                      |
| Energie Entwässerung            | 70 kWh/d                         | Energie Entwässerung              | 25 kWh/d   |
| Flockungshilfsmittel            | 645 SFr./d                       | Flockungshilfsmittel              | 235 SFr./d                                       |
| Entsorgung                      | 845 SFr./d                       | Entsorgung                        | 30 SFr./d  |
| Energiebilanz                   | -4100 kWh/d                      | Energiebilanz                     | +7800 kWh/d                                      |
| <b>Spezifische Kosten</b>       | <b>148 SFr./d</b>                | <b>Kosten</b>                     | <b>53 SFr./d</b>                                 |

*Tabelle 22:  
Vergleich einer aeroben mit  
einer anaeroben Behandlung  
von Abwasser der Papier-  
industrie (Quelle: Degremont)*

## 6.2 Umweltaspekte

Die anaerobe Vergärung ist **ausgesprochen umweltfreundlich**: Essentiell ist, dass – unter Voraussetzung, dass das Gärprodukt in der Landwirtschaft eingesetzt wird – **sämtliche** ökologischen **Kreisläufe geschlossen** werden. Insbesondere sind dies

- **Nährstoffkreisläufe:** Wie bereits oben erwähnt, bleiben die anorganischen Nährstoffe praktisch vollkommen im Gärgut erhalten. Sie führen, wenn sie auf das Feld ausgebracht werden, zu einer Reduktion der Umweltbelastung und Einsparung bei der Kunstdüngerproduktion.
- Kreislauf der **schwer abbaubaren Kohlenstoffverbindungen:** Diese spielen eine wichtige Rolle beim Humusaufbau und als Lebensgrundlage für die Mikroflora des Bodens. Wenn das Gärgut ausgetragen wird, sind diese schwer abbaubaren Verbindungen mindestens ebenso wichtig wie die Nährstoffe, da sie einen Beitrag zur Kompensation des enorm grossen Humusdefizits der modernen Landwirtschaft beitragen können.
- **Kohlenstoffkreislauf:** Die Biogaserzeugung und -nutzung ist CO<sub>2</sub>-neutral, da Kohlenstoff in Methan umgewandelt wird, welcher nicht fossilen Ursprungs ist, sondern aus der heutigen Biomasse stammt. Bei der Verbrennung des Biogases wird dieses CO<sub>2</sub> wiederum frei und kann von den nachwachsenden Pflanzen für einen neuen Kreislauf wieder assimiliert werden.

Dieser letzte Punkt ist in Zusammenhang mit dem **Treibhauseffekt** besonders wichtig und bei der Entscheidungsfindung gebührend zu berücksichtigen: Bei der Biogasgewinnung wird erneuerbare Energie frei, was erlaubt, weniger fossile Energie zur Wärme- und Elektrizitätserzeugung zu verbrennen. Bei aeroben Prozessen hingegen muss für Luftzufuhr und Durchmischung viel treibhausaktive Fremdenergie aufgewendet werden.

Wenn man beispielsweise für die Vergärung bzw. Kompostierung von festen biogenen Abfällen eine **CO<sub>2</sub>-Bilanz** aufstellt, kommt man zum Schluss, dass bei der **Kompostierung** unter dem Strich **bis zu 100 m<sup>3</sup> mehr fossiles CO<sub>2</sub> pro Tonne** verarbeitetes Material freigesetzt wird. (Produktion von 100 m<sup>3</sup> Biogas/t brutto; Einbezug einerseits der Netto-Energie und andererseits des Fremdenergieaufwands für die Kompostierung; Annahme: zusätzliche elektrische Energie werde aus fossilen Energieträgern in thermischen Kraftwerken bereitgestellt. Verluste infolge Umwandlung und Transport zwischen Kohleförderung und Strom an der Klemme im Kompostwerk: <sup>3</sup>/<sub>4</sub>.)

Wenn man sämtliche Umweltaspekte ganzheitlich betrachtet, liegt die Vermutung nahe, dass eine zukünftige Menschheit es sich ökologisch gar nicht mehr leisten kann, ökologisch deutlich schlechtere Verwertungswege weiter zu fördern.

## 6.3 Kosten und Nebenkosten

Die **ökonomischen Aspekte** der Gewinnung von Biogas aus festen und flüssigen Abfällen unterliegen nicht nur verschiedenen verfahrenstechnischen Faktoren, sondern auch den **lokalen Gegebenheiten**. Diese Faktoren beinhalten unter anderem die Grösse der Anlage, die Verwertung der Produkte, die umweltpolitischen Einschränkungen, die Gegebenheiten des Marktes, die tarifären und politischen Rahmenbedingungen sowie die Kosten für die Bereitstellung von Geldern für den Bau. Zur Beurteilung der Rentabilität eines Projektes ist es unabdingbar, sämtliche dieser Parameter unter geeigneter Gewichtung in Betracht zu ziehen.

Aufgrund der Tatsache, dass viele verschiedene Faktoren die ökonomische Analyse eines Projektes beeinflussen, ist es nicht möglich, generelle ökonomische Rahmenbedingungen zu formulieren. Jedes Projekt muss einer **individuellen**, minutiösen **Analyse** unterzogen werden. Die Tabelle 23 gibt eine Übersicht über die bei einer ökonomischen Betrachtung einer Vergärungsanlage systematisch zu untersuchenden Positionen:

---

### INVESTITIONSKOSTEN

Fermenter, Ausrüstung und Installation, vor- und nachgeschaltete Komponenten, Land, Umgebungsarbeiten, Inbetriebsetzung

---

### BETRIEBSKOSTEN

|                        |   |
|------------------------|---|
| Personal:              | Überwachung, Wartung und Unterhalt                      |
| Betriebsmittel:        | Rohstoffe, Chemikalien, Hilfsstoffe, Nährstoffe, Wasser |
| Energie:               | Eigenverbrauch Elektrizität, Brenn- und Treibstoffe     |
| Material:              | Ersatzteile   |
| Nachbehandlung:        | Produktverwertung, Abwasserreinigung                    |
| Analytik:              | Qualitätskontrolle im Labor                             |
| Versicherung und Taxen |   |

*Tabelle 23:  
Faktoren, welche die  
Ökonomie einer Biogasanlage  
beeinflussen*

Eine Vergärungsanlage besteht aus vier mehr oder weniger kostenintensiven Bereichen, welche nachfolgend im Detail beschrieben sind:

1. Substrataufbereitung
2. Vergärung
3. Aufbereitung und Verwertung des Biogases
4. Lagerung, Nachbehandlung, Entsorgung/Verwertung des ausgegorenen Materials

Der Bereich der **Aufbereitung** umfasst normalerweise Einrichtungen zur Dekompaktierung und zur Zerkleinerung der festen Abfälle. Bei den flüssigen Substraten sind allenfalls Pufferbehälter und Einrichtungen zum Einstellen der für die Vergärung günstigen Bedingungen nötig. Daneben können Vorrichtungen zur Abtrennung von unerwünschten oder toxischen Stoffen vorhanden sein. Fördereinrichtungen dienen dem Materialtransport von einem Behandlungsschritt zum nächsten. Es handelt sich normalerweise um Förderbänder, Spiralförderer oder Pumpen. Die Aufbereitung des Substrates dient dem Aufschluss des lignocellulosehaltigen Materials und beschleunigt durch die Oberflächenvergrößerung den Abbau fester und suspendierter Stoffe. Der Grad der Aufbereitung und Vorbehandlung beeinflusst die Investitions- und Betriebskosten spürbar.

Die Wahl des **Gärverfahrens** richtet sich in der Regel nach der Charakteristik des zu vergärenden Materials. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Einflüsse der Verweilzeit, der Raumbelastung sowie des Trokensubstanzgehaltes im Reaktor auf die Dimensionierung des Fermenters und in der Folge auf die Investitionskosten zu kennen. Besonders zu beachten sind die Investitionskosten der folgenden Anlageteile:

- Vergärungsreaktor (Einbauten, Gasabscheider, Substratabzug/-austrag)
- Mischer
- Pumpen, Fördereinrichtungen
- Absetzbecken, Dekanterzentrifuge, Membranfiltration
- Heizsystem, Wärmetauscher
- Messen, Steuern, Regeln
- Gebäude

Der **Energiebedarf** zum Aufheizen und zur Deckung der Wärmeverluste ist zu ermitteln. Dabei ist der Wärmeverlust den Isolationskosten gegenüberzustellen. Möglichkeiten des Wärmeaustausches zwischen ausgegorenem und frischem Substrat sind vor allem bei Abwässern mit (sehr) kleinem Anteil an suspendierten Feststoffen zu prüfen. Der Heizenergiebedarf kann je nach gewählter Betriebstemperatur und Temperatur des Ausgangsmaterials zwischen 10 und über 50% (sehr dünne Abwässer) der erzeugten Energie in Form von Biogas ausmachen. Die Kunst des planenden Ingenieurs besteht darin, den optimalen Kompromiss zwischen Einfachheit des Systems, hoher Abbauleistung und einer guten Energiebilanz zu finden.

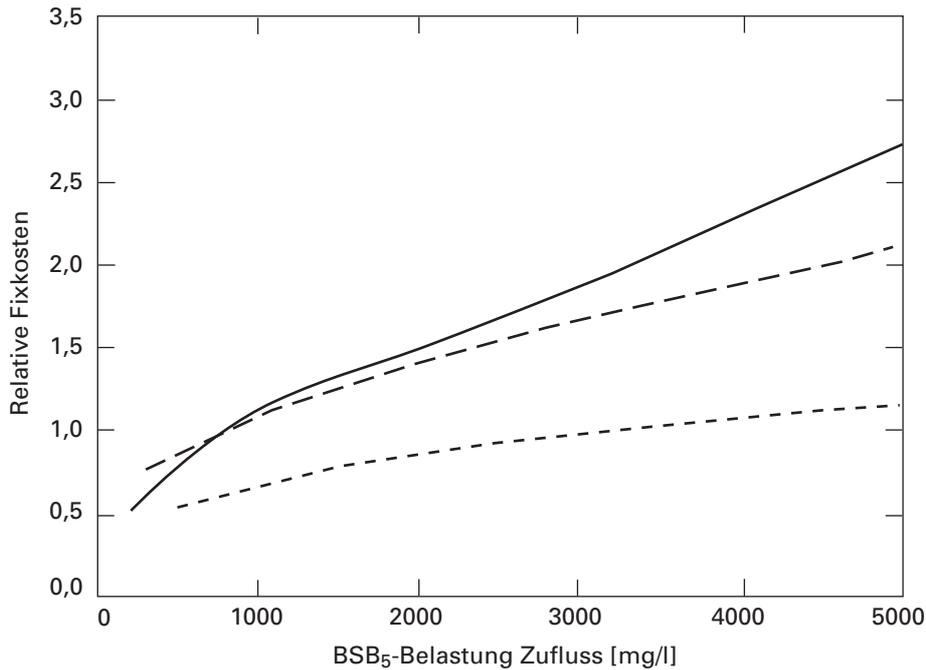
Die **Aufbereitung** (Reinigung) und **Konditionierung des Biogases** (Kompression) wird in der Regel durch die Verwendung des Biogases bestimmt. Meistens müssen für die Gasverwertung Gasspeichersysteme installiert werden. Häufig werden Foliengasometer verwendet, welche zur Erzeugung des für die Verbraucher notwendigen Drucks beschwert werden können. Die Leistung einer Wärme-Kraft-Koppelung richtet sich nach der Biogasproduktion. Der produzierte Strom wird in der Regel ins öffentliche Netz eingespielen.

Beim Bau von Vergärungsanlagen muss sowohl die **Behandlung des Ablaufs** wie auch die Weiterbehandlung des ausgegorenen Materials untersucht und gelöst werden. Bei der Flüssigvergärung handelt es sich dabei beispielsweise um eine – nun natürlich deutlich vereinfachte – aerobe Nachbehandlung des Ablaufs in einer öffentlichen oder firmeneigenen Kläranlage. Bei der Feststoffvergärung muss das Gärgut je nach Verwendung noch kurz nachkompostiert werden. Auf jeden Fall müssen die Kosten der aeroben Nachbehandlung mitberücksichtigt werden.

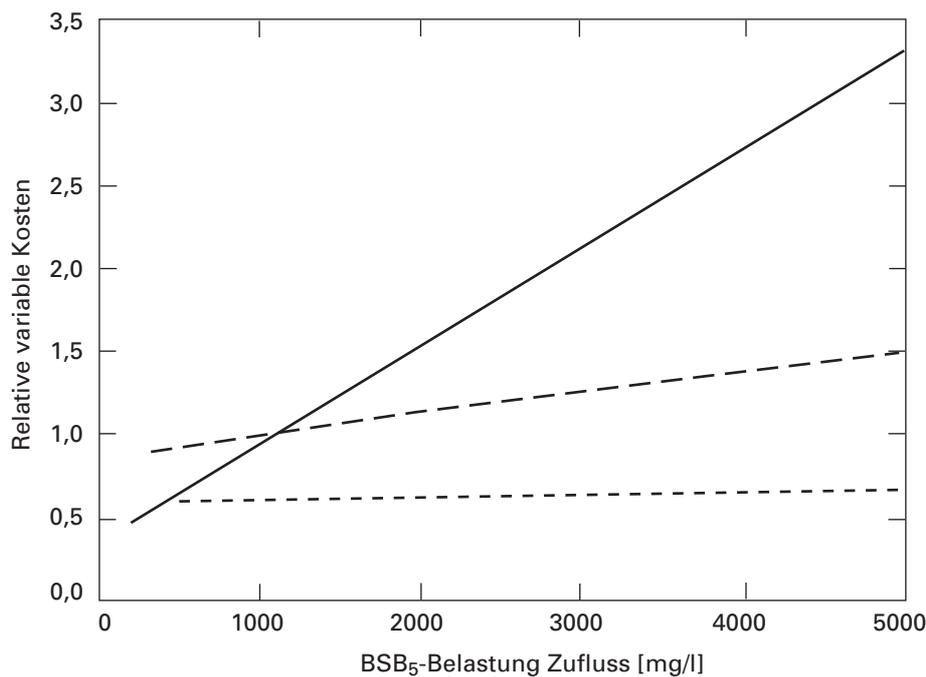
Die folgenden Diagramme in Figur 35 zeigen den Trendverlauf für Kosten von aeroben, anaeroben und kombinierten Systemen. Wesentlich ist, dass anaerobe Verfahren bei BSB<sub>5</sub> Belastungen ab rund 1 g/l (bzw. CSB von rund 2 g/l) gegenüber aeroben Verfahren sowohl bei den Investitionen als besonders auch bei den Betriebskosten vorteilhaft sind. Ein Beispiel eines Kostenvergleichs wurde bereits in Tabelle 22 gegeben. Weitere detaillierte **ökonomische Daten** für flüssige und feste Substrate sind in der eingangs erwähnten PACER-Publikation «Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern» vorhanden, welche 1993 durch das Bundesamt für Konjunkturfragen bei der EDMZ in Bern publiziert wurde. Wenn auch seit der damaligen Datenerhebung einige Zeit verstrichen ist, sind die Daten trotzdem noch aussagekräftig, da einerseits die Teuerung im Bausektor nicht gross war und andererseits sich die Kostenentwicklung bei Kompostie-

rung und Vergärung nicht signifikant unterschieden hat. Auch dort ist man zum Schluss gekommen, dass die Vergärung – vorausgesetzt, es sei eine genügend hohe Belastung vorhanden – gegenüber aeroben Verfahren vorteilhaft ist.

### Vergleich der Fixkosten



### Vergleich der variablen Kosten



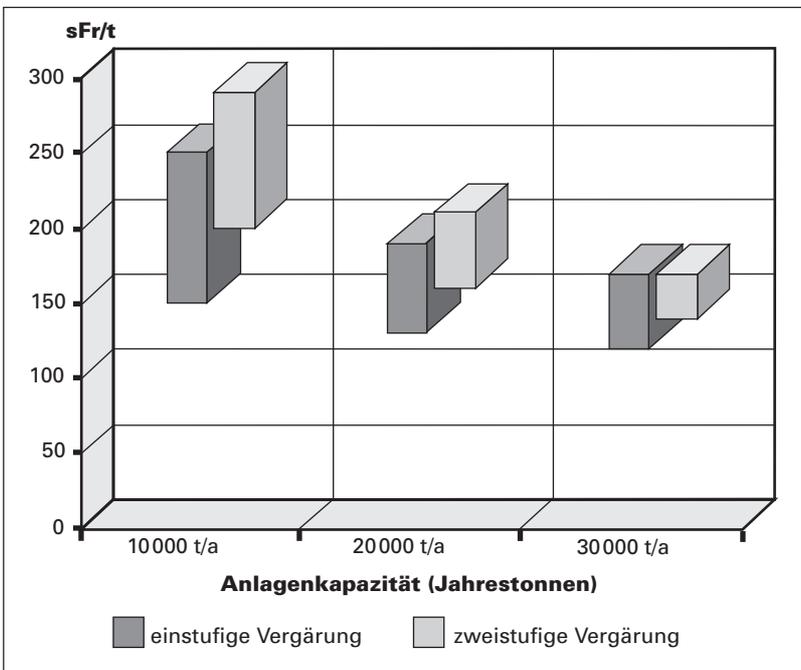
- ausschliesslich aerob
- - - anaerobe Vorbehandlung vor ARA
- · - anaerobe Vorbehandlung Nachbelüftung  
(Amortisationszeit: 10 a; Zinssatz: 10%.)

Figur 35:  
Verlauf der festen und  
variablen Kosten für aerobe,  
anaerobe und kombinierte  
Systeme  
(Quelle: Eckenfelder)

Bei den **festen Abfällen** müssen zusätzlich zu den obigen prinzipiellen Betrachtungen, die sowohl für Abwässer als auch für feste Abfälle gültig sind, verschiedene kostenwirksame Besonderheiten berücksichtigt werden: Feste biogene Abfälle aus separater Sammlung neigen zur Freisetzung von Gerüchen. Dies erfordert die gezielte Fassung geruchsbelasteter Luft und eine Desodorierung in einem **Biofilter**. Für das Abtrennen von Störstoffen kommen Magnetabscheider, Siebmaschinen oder Handauslese in Frage. Eine Handauslese verursacht zusätzliche Personalkosten. Zur Aufbereitung gehört eine genügende, eventuell mehrstufige Zerkleinerung oder Kalibrierung der festen Abfälle.

Je nach System ist pro Tonne mit 250 bis 600 l **Überschusswasser** zu rechnen. Dieses «Wasser» kann entweder in der Landwirtschaft wie Flüssigdünger verwertet oder einer Abwasserreinigung zugeführt werden.

Die Figur 36 zeigt die Gesamtkosten verschiedener Gärverfahren für feste biogene Abfälle. Die Kosten liegen zwischen Fr. 150.– und 250.– pro Tonne verarbeitetes Material. Generell kann gesagt werden, dass **grössere Anlagen spürbar tiefere spezifische Kosten** aufweisen als kleinere, da die Investitions- und Betriebskosten für weite Bereiche mit zunehmender Grösse nur unwesentlich ansteigen (z.B. Fermenter, Gasersfassung und Verwertung, Personal usw.).



Figur 36: Bandbreiten der spezifischen Behandlungskosten pro Tonne Abfall in Abhängigkeit der Verarbeitungskapazität von ein- und zweistufigen Gärverfahren (Quellen: Thomé-Kozmiensky [1995] und arbi)

Im Bereich der festen Abfälle gilt es bezüglich der **Anlagegrösse** ein Optimum zu finden, bei welchem auch die ökologischen Fragen bezüglich des

Transports von Frischmaterial berücksichtigt werden. Spezielle Feststoffgäranlagen weisen daher sinnvollerweise Kapazitäten um 10 000 t/a auf. Dies entspricht einem Einzugsgebiet von rund 100 000 Einwohnern, welche in Agglomerationen innerhalb eines relativ kleinen Radius wohnhaft sein können. Anlagen von 20 000 t/a und mehr dürften nur in Ausnahmefällen unter ganzheitlicher Betrachtung sinnvoll sein.

Eigene Untersuchungen zur **Co-Vergärung** auf der ARA Frutigen haben gezeigt, dass die Co-Vergärung zu Kosten von deutlich unter Fr. 100.–/t realisiert werden kann, sofern auf bereits vorhandene Infrastruktur zurückgegriffen werden darf. Ebenfalls dürften Annahmepreise in landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlagen spürbar unter Fr. 100.– liegen, sofern nicht ein grosser Aufwand für die Fremdstoffabtrennung betrieben werden muss. Diese Voraussetzung ist beispielsweise bei organischen Abfällen von Lebensmittelverteilern in der Regel gegeben.

## 6.4 Rechtliche Aspekte

Der Bau einer Biogasanlage unterliegt verschiedenen gesetzlichen Bestimmungen. In diesem Kapitel werden die massgebenden Gesetze und Verordnungen vorgestellt, wobei folgende Bereiche abgedeckt werden müssen:

- Beim Bau einer Anlage zur Behandlung von Abwässern oder zur Verwertung von Abfällen muss der **Standort konform** mit der Zonenordnung sowie der Bauordnung sein.
- Eine Anlage zur Vergärung von festen biogenen Abfällen steht mit der **Umwelt** in verschiedenen Wechselwirkungen, welche die Umwelt beeinträchtigen können. Sie unterliegt daher der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV) vom 19. Okt. 1988.
- Bezüglich der Beeinträchtigung von Boden, Wasser und Luft durch **Immissionen** gelten die Verordnungen des Umweltschutzgesetzes wie die Luftreinhalteverordnung (LRV 92), die Lärmschutzverordnung (LSV) und die Verordnung über den Schutz der Gewässer.
- Betreffend die Gefahren im Zusammenhang mit Biogas gelten die **Sicherheitsvorschriften** der kantonalen Feuerversicherungen, der SUVA sowie der Schweizerischen Vereinigung der Gas- und Wasserfachleute (SVGW). Diese Normen haben ausschliesslich technischen Charakter und dienen der Verhinderung von Störfällen. Falls das gewonnene Biogas in ein öffentliches Gasnetz eingespiesen oder komprimiert und transportiert werden soll, kommen weitere Vorschriften zur Anwendung.

### Umweltverträglichkeitsbericht

Eine Vergärungsanlage muss unter bestimmten Bedingungen einer **Umweltverträglichkeitsprüfung** unterzogen werden, im Sinne von Art. 9 des Bundesgesetzes vom 7. Oktober 1983 zum Schutze der Umwelt (USG) und der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV) vom 19. Oktober 1988. Dieser Artikel verlangt eine entsprechende Prüfung für Anlagen mit einer Kapazität von mehr als 1000 Tonnen pro Jahr, für Normaldruckgasspeicher mit einem Volumen von mehr als 50 000 m<sup>3</sup> und für Abwasserreinigungsanlagen für mehr als 20 000 Einwohnergleichwerte. Ebenfalls in diese Kategorie fallen Lager- und Umladestationen für flüssige und gasförmige Brenn- und Treibstoffe.

Selbst wenn eine solche Studie durch das Bundesgesetz nicht vorgeschrieben ist (kleinere Anlagen), kann der Kanton im Sinne des Umweltschutzes einen entsprechenden Bericht verlangen.

### Raumplanung und Zonenordnung, Abfallrichtplan

Aufgrund der mit dem Betrieb von Vergärungsanlagen verbundenen Beeinträchtigungen der Umgebung kommen als **Standort** ausschliesslich Gewerbe- und Industriezonen in Frage (sofern es sich nicht um Co-Vergärungsanlagen handelt). In diesem Zusammenhang ist der Artikel 20 der TVA (Technische Verordnung Abfälle) zu nennen, welcher die Kantone verpflichtet, die verschiedenen Bewilligungsverfahren für den Bau und Betrieb von Abfallbehandlungsanlagen zu koordinieren.

In der **kantonalen Abfallplanung** werden Standorte von Vergärungsanlagen im Rahmen der kantonalen **Abfallrichtpläne** untersucht. Dabei wird zwischen privaten und öffentlichen Anlagen unterschieden. Die TVA verpflichtet die Kantone, einen Abfallrichtplan auszuarbeiten und Zonen mit Standorten für entsprechende Behandlungsanlagen auszuscheiden. Diese Planung betrifft in erster Linie die Siedlungsabfälle. Sie kann aber, falls notwendig, auch auf andere Arten von Abfällen erweitert werden, um eine umweltverträgliche Behandlung zu ermöglichen. Dieses Vorgehen ermöglicht den Kantonen, in ihrer Abfallplanung eine oder mehrere Vergärungsanlagen zur Verarbeitung biogener Abfälle aufzunehmen.

Was die **privaten Anlagen** betrifft, so fallen diese unter Art. 12 (Verwertungspflicht) der TVA. Industrielle und gewerbliche Betreiber sind verpflichtet, sicherzustellen, dass die Verwertung von Endprodukten wie Kompost gesichert ist. Weiter ist nachzuweisen, ob durch den Bau einer derartigen Anlage der Ausgangszustand in bezug auf die Umweltbelastung verbessert wird. Schliesslich muss die Verwertung wirtschaftlich tragbar sein.

Nachfolgend sind einige **kantonale Bestimmungen** im Zusammenhang mit der Abfallverwertung/-entsorgung exemplarisch vorgestellt; die meisten dieser Gesetze und Verordnungen verlangen für den Bau und den Betrieb von privaten und öffentlichen Anlagen zur Behandlung von Abfällen spezielle Bewilligungen.

---

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>Waadt</b>     | Gesetz über die Beseitigung von Abfällen vom 13. Dezember 1989  |
| <b>Bern</b>      | Abfallgesetz vom 7. Dezember 1980<br>Ausführungsbestimmungen vom 16. Juli 1980 über das Gesetz zur Behandlung fester Abfälle vom 11. Oktober 1972   |
| <b>Freiburg</b>  | Gesetz vom 22. Mai 1974 über die Anwendung des Bundesgesetzes zum Schutze der Gewässer vom 8. Oktober 1971, dessen Kapitel V Art. 36 ff. die Behandlung fester Abfälle regelt<br>Verordnung vom 3. Dezember 1973 über die Entsorgung von Haushalt- und Industrieabfällen. |
| <b>Genf</b>      | Gesetz über die Abfallentsorgung vom 16. Dezember 1966 und die Ausführungsbestimmungen vom 5. März 197  |
| <b>Jura</b>      | Verordnung zum Gewässerschutz vom 6. Dezember 1978  |
| <b>Neuenburg</b> | Gesetz über die Abfallbehandlung vom 13. Oktober 1980   |
| <b>Wallis</b>    | Gesetz vom 16. November 1978 betreffend die Anwendung des Bundesgesetzes zum Gewässerschutz vom 8. Oktober 1971<br>Dekret vom 21. Juni 1990 betreffend die Anwendung des Umweltschutzgesetzes   |
| <b>Zürich</b>    | Kantonales Abfallgesetz vom September 1994  |

---

*Tabelle 24:  
Beispiele von kantonalen  
Gesetzen und Verordnungen  
zur Behandlung fester  
(biogener) Abfälle*

## Abfalltrennung an der Quelle

Die Vergärung von festen biogenen Abfällen verlangt nach möglichst **sortenreinem, homogenem Material**. Abfälle aus der Produktion und Verarbeitung oder Verteilung von Lebensmitteln stellen in dieser Hinsicht in der Regel kein Problem dar. Die Trennung an der Quelle verhindert, dass unerwünschte Stoffe wie Schwermetalle, welche die Kompostqualität negativ beeinflussen, in grösseren Mengen in den Prozess gelangen. Die TVA verpflichtet die Kantone zur Einführung einer Grünabfuhr für diejenigen, welche keine Möglichkeit zur Eigenkompostierung haben. Die Kantone verfügen also über die rechtliche Grundlage zur Einführung der Abfalltrennung an der Quelle.

## Abwassereinleitungen

Die revidierte Verordnung über Abwassereinleitungen vom 8. Dez. 1975 legt **Grenzwerte** für die Einleitung von Abwässern in die öffentliche Kanalisation oder in Seen oder Fliessgewässer fest. Die im Zusammenhang mit der Vergärung wichtigsten Punkte sind die chemisch-physikalischen Parameter. In der sich in Vorbereitung befindenden Revision werden mit grösster Wahrscheinlichkeit strengere Grenzwerte für Temperatur, Durchsichtigkeit, Farbe, pH, BSB<sub>5</sub>, DOC, TOC und eventuell CSB gefordert werden. Alle diese Parameter sind relativ einfach zu bestimmen und werden von den kantonalen Instanzen regelmässig überprüft. Der Kanton Zürich verlangt bei Kompostier- und Vergärungsanlagen zum Beispiel eine monatliche Bestimmung von Durchsichtigkeit, Farbe, pH, Leitfähigkeit, Ammonium, Nitrat, Sulfat, TOC und BSB<sub>5</sub>.

Eine strengere Untersuchung der Abwasserzusammensetzung dürfte nur bei Verdacht auf toxische Substanzen verlangt werden. Bedingt durch die mögliche Hemmung des Gärprozesses sind toxische Substanzen in höheren Konzentrationen praktisch auszuschliessen.

## Verwertung von Schlämmen und Vergärungsrückständen

Die **Stoffverordnung**, mit dem revidierten Anhang 4.5 vom 16. September 1992, ist für die Verwertung des Gärrückstandes massgebend. In dieser Verordnung sind die minimalen Qualitätsanforderungen an Klärschlamm und Kompost für die Anwendung in der Landwirtschaft festgehalten. Insbesondere werden die Grenzwerte für Schwermetalle im Kompost und Klärschlamm definiert. Früher waren diese Grenzwerte in der Klärschlammverordnung geregelt, welche nun aufgehoben und in die Stoffverordnung integriert wurde.

Die Stoffverordnung unterscheidet **zwei Kategorien** von Stoffen: Die festen organischen Stoffe wie **Kompost** und Stoffe wie **Klärschlamm**. In beiden Fällen werden die Schwermetalle sowie organische und mikrobielle Verunreinigungen (*Enterobacteriaceen*) begrenzt. Für das Ausbringen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen müssen Klärschlämme hygienisiert werden. Zusätzlich begrenzt die Stoffverordnung die Ausbringmenge von Klärschlamm auf 5 t TS und diejenige von Kompost auf 25 t TS pro ha und 3 Jahre. Im weiteren müssen die in den Boden gelangenden Nährstoffe in der Nährstoffbilanz berücksichtigt werden. Es ist deshalb eine parzellenbezogene Buchhaltung über das Ausbringen von Klärschlamm und Kompost zu führen.

Die Tabelle 25 gibt die in der Stoffverordnung festgehaltenen Schadstoff-Grenzwerte für Klärschlamm und Kompost wieder:

| <b>Schwermetalle</b>                                 |     | <b>Kompost</b> | <b>Klärschlamm</b> |
|--|-----|----------------|--------------------|
| Cadmium  | Cd  | 1              | 5                  |
| Chrom  | Cr  | 100            | 500                |
| Kobalt   | Co  | –              | 60                 |
| Kupfer   | Cu  | 100            | 600                |
| Quecksilber  | Hg  | 1              | 5                  |
| Molybdän   | Mo  | –              | 20                 |
| Nickel   | Ni  | 30             | 80                 |
| Blei   | Pb  | 120            | 500                |
| Zink   | Zn  | 400            | 2000               |
| Absorbierbare halogenierte Verbindungen (Richtwert!) | AOX | –              | 500                |

Tabelle 25:  
Schadstoffgrenzwerte für  
Klärschlamm und Kompost

**Transport, Behandlung und Lagerung von Sonderabfällen**

Die Verordnung über den **Verkehr mit Sonderabfällen** vom 12. November 1983 (VVS) wie auch die Änderung in der Stoffverordnung regelt den Umgang mit Sonderabfällen. In den Fällen, wo die festen und flüssigen Abfälle nicht den Vorschriften der Stoffverordnung entsprechen, jedoch die Kriterien der VVS erfüllen, müssen diese Abfälle den Sonderabfällen zugeordnet werden. Folglich unterliegt die Entsorgung speziellen Bedingungen der VVS, und bereits der Verkehr mit diesen Abfällen verlangt besondere Dokumente.

Die Technische Verordnung Abfälle (TVA) vom 10. Dezember 1990 regelt die Belange im Zusammenhang mit dem **Deponieren** von Abfällen. Die Verordnung unterscheidet drei verschiedene Deponietypen:

- Inertstoffdeponien (mineralische Abfälle)
- Reststoffdeponien (inerte toxische Abfälle)
- Reaktordeponien (organische Stoffe enthaltende Abfälle)

Falls nicht genügend Verbrennungskapazität vorhanden ist, dürfen Klärschlämme und Komposte, welche aufgrund ihrer Eigenschaften nicht landwirtschaftlich verwertet werden können, nur auf einer Reaktordeponie abgelagert werden. Gemäss TVA muss u.U. die Stabilisierung der organischen Abfälle vor der Deponierung nachgewiesen werden.

**Lärmschutz und Luftreinhaltung**

Die **Lärmschutzverordnung** (LSV) vom 15. Dezember 1986 nimmt eine Einteilung in Empfindlichkeitsstufen mit entsprechenden Grenzwerten vor. Innerhalb der Empfindlichkeitsstufen werden Planungswerte sowie Grenzwerte für Tag und Nacht unterschieden. Eine Vergärungsanlage verursacht in der Regel keine übermässigen Lärmemissionen.

Die am 20. November 1991 revidierte **Luftreinhalteverordnung** (LRV 92) vom 16. Dezember 1985 ist massgebend bezüglich der erlaubten Emissionen von Verbrennungsmotoren, von flüchtigen Kohlenwasserstoffen und von Gerüchen. In diesem Zusammenhang sind beim Einsatz von Wärme-Kraft-Kopplungen die entsprechenden Grenzwerte für Stickoxide, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe von Bedeutung. Weiter ist zu beachten, dass Methangas nicht einfach in die Atmosphäre abgegeben werden darf, sondern LRV-konform abgefackelt werden muss.

## Sicherheit

Die Eidgenössische **Störfallverordnung** vom 27. Februar 1991 regelt die Vorkehrungen zum Schutz vor Störfällen: Bei einer Vergärungsanlage sind die Brenn- und die Explosionsfähigkeit des Biogas/Luft-Gemisches von Bedeutung. In den Richtlinien des Brand-Verhütungs-Dienstes für Industrie und Gewerbe (BVD) ist Methan in die Klasse F1A eingeteilt. Dieses Kriterium unterstellt die Lagerung von mehr als 20 000 kg Methan der Störfallverordnung. Unter der Annahme, dass im Biogas rund 50% Methan und 50% (schwereres) CO<sub>2</sub> enthalten sind, beträgt die Grenze rund 75 t Biogas. Selbst für industrielle Grossanlagen sind kaum derart grosse Gasspeicher notwendig. Aus diesem Grund sind Biogasanlagen nicht der Störfallverordnung unterstellt.

Die Reduktion der **Brand- und Explosionsrisiken** verlangt vom Ersteller und Betreiber von Biogasanlagen verschiedene Vorkehrungen. Die Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen, VKF, hat in diesem Zusammenhang 1979 eine Wegleitung mit dem Titel «Richtlinien für den Bau und Betrieb von Biogasanlagen» veröffentlicht. Im September 1993 wurde von der SUVA die Wegleitung «Sichere Biogas-Anlagen» herausgegeben. In diesem Papier sind die wichtigsten Massnahmen und Vorschriften im Zusammenhang mit dem Bau und Betrieb von Biogasanlagen enthalten. Während sich die erstgenannte Publikation in erster Linie an die Ersteller und Betreiber von landwirtschaftlichen Biogasanlagen wendet, sind die in der SUVA-Publikation enthaltenen Massnahmen und Richtlinien für gewerbliche und industrielle Anlagen ebenso gültig.

Im Zusammenhang mit der Erstellung und dem Betrieb von Gasinstallationen bestehen verschiedene weitere Bestimmungen und Fachunterlagen. In der Folge wird eine Übersicht über die wichtigsten Richtlinien gegeben:

- Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches SVGW
  - Gasleitsätze
  - Richtlinien für Gasheizungen
  - Richtlinien für Gasinstallationen; Aufstellen von Gasapparate-Richtlinien für den Bau, Unterhalt und Betrieb von Gasverdichteranlagen mit einem Betriebsdruck bis 1 bar
  - Richtlinien für den Bau, Unterhalt und Betrieb von Gasleitungen mit Betriebsdruck bis 5 bar
- Schweizerischer Elektrotechnischer Verein SEV
  - Hausinstallationsvorschriften
  - Leitsätze für Blitzschutzanlagen
  - Explosionszoneneinteilung
  - Vorschriften für Betriebsmittel in explosionsgefährdeten Bereichen
- Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen VKF
  - Brandschutznorm

Von den Erstellern von Biogasanlagen müssen die von der Schweizerischen Unfallversicherungsanstalt (SUVA) geforderten technischen Vorkehrungen bezüglich Arbeitsschutz beachtet werden. In diesem Zusammenhang sind von der SUVA verschiedene Richtlinien veröffentlicht worden.

Von Bedeutung für den **Bau von Apparaten**, für die Einrichtungen zur Verwertung von Gas sowie für den **Betrieb und Unterhalt** dieser Einrichtungen sind folgende Richtlinien und Wegleitungen:

- Allgemeine Richtlinien über den Bau, Ausrüstung, Aufstellung, Betrieb und Unterhalt von Maschinen (SUVA-Form. 1593.d)
- Richtlinie über Bau und Anordnung von Schaltvorrichtungen (SUVA-Form. 1594.d)
- Richtlinie betreffend Arbeiten in Behältern und engen Räumen (SUVA-Form. 1416.d)
- Merkblatt «Grundsatz des Explosionsschutzes mit Beispielsammlung Ex-Zonen» (SUVA-Form. 2153.d)
- Richtlinie über Abwasseranlagen (SUVA-Form. 1781.d)
- Sichere Kläranlagen (SUVA 44050.d)

# Literaturhinweise

arbi/probag (1991):

**Vergärung biogener Abfälle aus Haushalt, Industrie und Landschaftspflege**

Schriftenreihe BEW # 47, 108 Seiten, überarbeitete Version 1993; zu beziehen bei: arbi, CH-8933 Maschwanden (100 Seiten)

Diese leicht verständliche Studie gibt verschiedene zusätzliche Informationen zu den PACER-Publikationen, insbesondere im Bereich Potentialabschätzung. Ein Literaturverzeichnis mit 75 Literaturstellen hilft demjenigen weiter, welcher sich in einzelne Fragen vertiefen möchte.

Edelmann W., Engeli H. et.al. (1993):

**Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern**

PACER-Dokumentation zur gleichnamigen Tagung, ISBN 3-905232-19-7, Bundesamt für Konjunkturfragen, 3003 Bern, Bestell-Nr. 724.230 d (auch französisch: 724.230 f, 66 Seiten)

Die «Schwestern-Broschüre» zur vorliegenden Publikation mit vertieften Angaben zur Ökonomie, zum Potential und mit weiteren Praxis-Beispielen. Weniger detailliert in Fragen der Verfahrenstechnik.

Böhnke B. et.al. (1993):

**Anaerobtechnik**

Springer-Verlag, Berlin, 837 Seiten, ISBN 3-540-56410-1

Sehr gutes, umfassendes Nachschlagewerk zur Verfahrenstechnik mit Schwerpunkt Flüssigvergärung. Biologische Grundlagen, Anwendungsbeispiele in Industrie- und Landwirtschaft, Finanzierungsmodelle sowie Angaben zur Sekundärliteratur.

Wellinger A., Baserga U., Edelmann W., Egger K., Seiler B.  
(1992; überarbeitete Neuauflage):

**Biogashandbuch: Grundlagen, Planung, Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen**

Verlag Wirz Aarau, 178 Seiten, ISBN 3-85983-035-X  
oder arbi, CH-8933 Maschwanden.

Obwohl der Schwerpunkt bei der Gärtechnologie von landwirtschaftlicher Biogasgewinnung liegt, werden sehr viele auch im vorliegenden Zusammenhang wertvolle Informationen, Tabellen und Daten präsentiert, wie beispielsweise Angaben zur Materialwahl und Korrosion, zu Heizung, Gasspeicherung, Sicherheitsaspekten oder Dimensionierung von Leitungen.

Thomé-Kotzmiensky K. (1989) (Hrsg.):

**Biogas – Anaerobtechnik in der Abfallwirtschaft**

EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, 358 Seiten,  
ISBN 3-924511-33-0

Sehr vielseitiges Buch, welches verschiedene Referate zur Vergärung, Aufbereitung, Störstoffabtrennung von Abwässern und Abfällen sowie zu Entsorgungskonzepten enthält.

Kern M., Wiemer K. (1995) (Hrsg.): Biologische Abfallbehandlung II:

**Kompostierung – Anaerobtechnik – kalte Vorbehandlung – Klärschlammverwertung**

Proceedings Kasseler Abfalltage, Baeza Verlag Witzenhausen, 720 Seiten,  
ISBN 3-928673-15-7,

dazu gehörend: Kern M., Wiemer K. (1995) (Hrsg.):

**Herstellerforum Bioabfall**

450 Seiten, ISBN 3-928673-14-9

Sehr umfassend mit Schwerpunkt feste Abfälle inkl. neuen Ansätzen zu Entsorgungskonzepten. In Herstellerforum: Darstellung aller zur Zeit auf dem Markt angebotenen Feststoffverfahren.

**Adressen der Autoren:**

Dr. Werner Edelmann  
arbi, Arbeitsgemeinschaft Bioenergie GmbH  
CH-8933 Maschwanden  
++41/+1/767 18 19

Hans Engeli  
engeli engineering  
Hohmatrainstr. 1  
8173 Neerach  
++41/+1/858 30 20

# Beispiele

Die Daten bei den Fallbeispielen beruhen auf Angaben der Anlagenbetreiber.

|                   |   |            |
|-------------------|---|------------|
| <b>Beispiel 1</b> | <b>Industrieabwässer: Obstsaft</b>      | <b>111</b> |
| <b>Beispiel 2</b> | <b>Industrieabwässer: Papier</b>        | <b>115</b> |
| <b>Beispiel 3</b> | <b>Industrieabwässer: Zucker</b>        | <b>118</b> |
| <b>Beispiel 4</b> | <b>Industrieabwässer: Kartoffeln</b>    | <b>120</b> |
| <b>Beispiel 5</b> | <b>Feste Bioabfälle: Kombianlage</b>    | <b>123</b> |
| <b>Beispiel 6</b> | <b>Feste Bioabfälle: Gäranlage</b>      | <b>128</b> |
| <b>Beispiel 7</b> | <b>Landwirtschaftliche Co-Vergärung</b> | <b>132</b> |



## Anlage zur Reinigung von Abwässern aus der Obstsaft- und Konzentratherstellung der OVA Produkte AG, Affoltern am Albis

### Beispiel 1 Industrieabwässer

#### Ausgangslage

Die OVA-Produkte AG in Affoltern a.A. produziert Obstsaft- und -konzentrate sowie Spirituosen. Bei der Produktion entstehen täglich ca. 1000 m<sup>3</sup> Abwasser, zusammengesetzt aus verschiedenen Teilströmen unterschiedlicher organischer Belastung. Durch den ausgeprägten Kampagnebetrieb unterliegt der Abwasseranfall im Jahreslauf, aber auch im Tagesgang, grösseren Schwankungen.

#### Konzept

Bei der Kläranlage der OVA handelt es sich um eine der ersten in der Schweiz erstellten Gäranlagen (1981) für organisch hoch belastetes Abwasser. Schwach belastete Ströme werden direkt via Kanalisation in die kommunale Kläranlage geleitet. Das **ANAMET**-Verfahren besteht aus einer Gärstufe nach dem **Kontaktverfahren** (PURAC) mit **nachgeschalteter Belüftung** zur Elimination der Restbelastung. Ein Konzept zur Biogasverwertung mit einer Erweiterung der bestehenden Anlage wird zurzeit im Zusammenhang mit einer Erweiterung der bestehenden Anlage studiert.

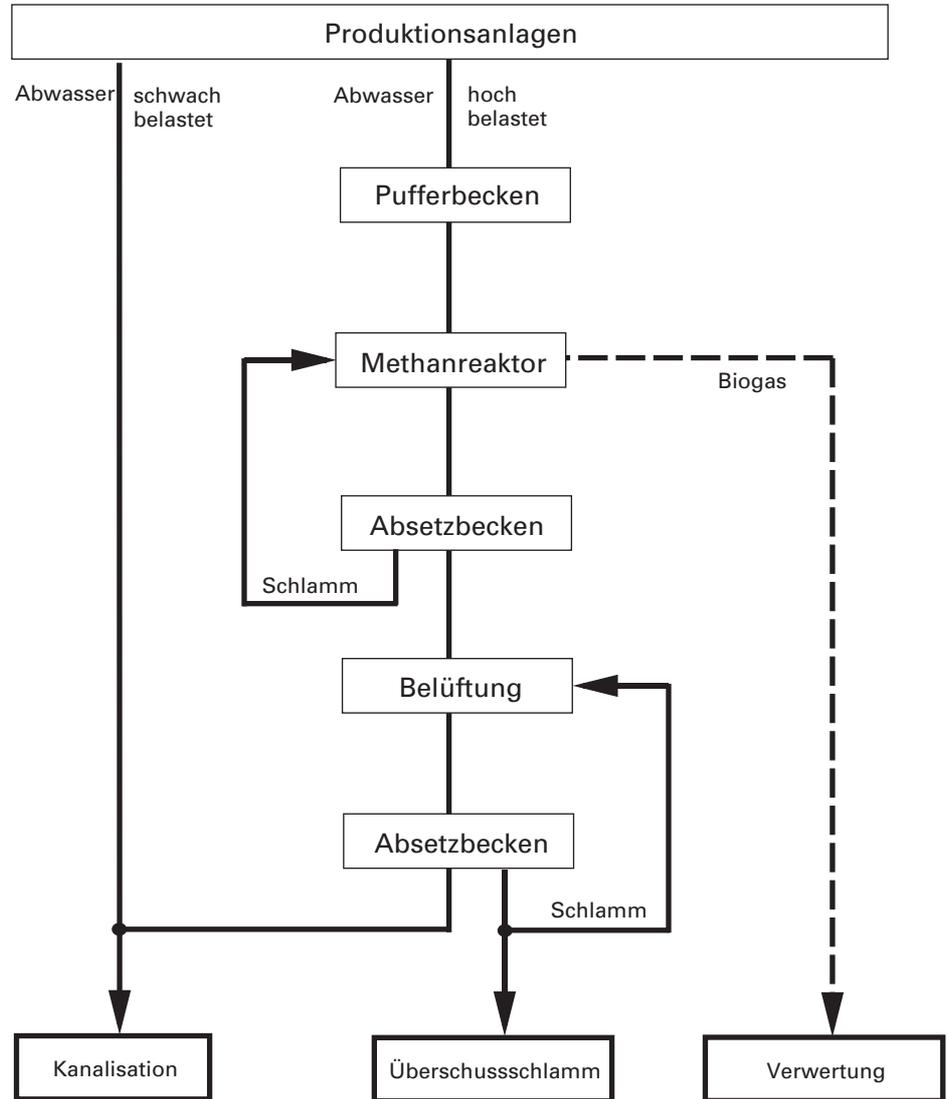


Abb. 1:  
Fließbild der Anlage der  
OVA-Produkte AG,  
Affoltern a. Albis



Abb. 2:  
Gasleitungen auf dem OVA-  
Fermenter: Kondenswasser-  
entleerung aus einer vorüber-  
gehend montierten Gasuhr

Eine zur Diskussion stehende Möglichkeit des Ausbaus, bei welcher eine zweistufige aerobe Biologie nachgeschaltet wird, ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

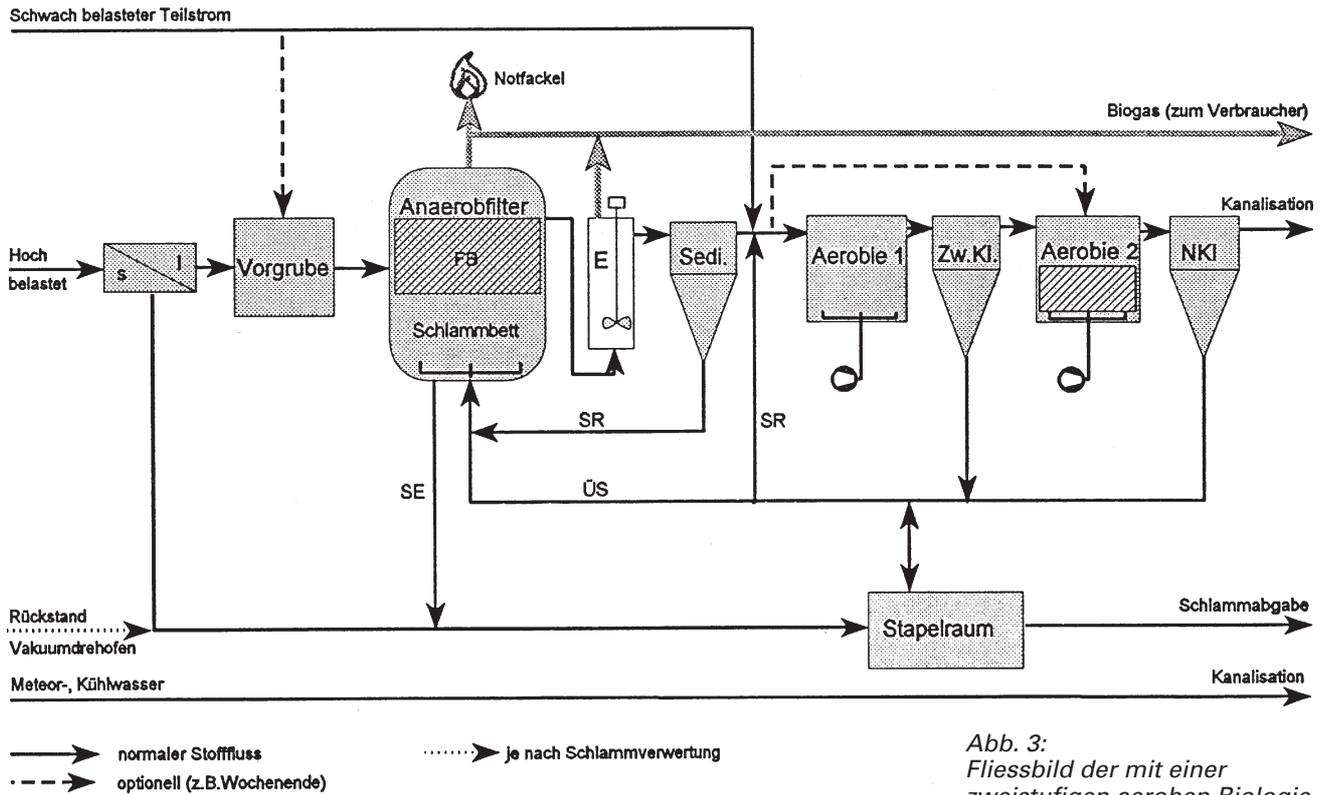


Abb. 3: Fließbild der mit einer zweistufigen aeroben Biologie erweiterten Anlage



Abb. 4: Ansicht der bestehenden Anlage nach dem Kontaktverfahren: v.l.n.r. Fermenter, Sedimentation, Belüftung

**Betriebserfahrungen**

Der Kampagnenbetrieb (ca. 10 Wochen pro Jahr) führt zu starken Belastungswechseln der Gäranlage. Eine Schockbelastung nach längerem Stillstand kann zu einer Versäuerung führen, weshalb die Anfahrphase besondere Beachtung verdient.

In einer 1990 durchgeführten Studie wurde die zusätzliche Annahme von Fremdsubstraten vorgeschlagen, um einerseits diese Schwankungen auszugleichen und andererseits den überdimensionierten Gärraum besser auszulasten und damit eine Gasnutzung zu ermöglichen.

Das Obstwaschwasser, die Abläufe aus den Pressen, der Zentrifugenauswurf, das Vorweichwasser aus der Flaschenwaschmaschine sowie Brenneischlempen gelangen über ein Pufferbecken in die Gäranlage. Während einer Beobachtungsperiode der Kampagne Herbst 1989 wurden Abwasser- und Betriebswerte ermittelt.

| Parameter                 | Einheit              | Mittelwerte |
|---------------------------|----------------------|-------------|
| Abwassermenge             | m <sup>3</sup> /d    | 33          |
| CSB                       | gO <sub>2</sub> /l   | 15          |
| CSB Fracht                | kg/d                 | 500         |
| pH                        | –                    | 6.5         |
| Volumen Methanreaktor     | m <sup>3</sup>       | 800         |
| Gasproduktion             | m <sup>3</sup> /d    | 80          |
| Methangehalt des Biogases | %                    | 60          |
| Heizöläquivalent          | kg/d                 | 42          |
| CSB Abbau                 | %                    | 80–85       |
| Raumbelastung             | kg/m <sup>3</sup> *d | 0.6         |
| Verweilzeit               | d                    | 37          |
| Temperatur                | °C                   | 34          |

**Kosten**

Die Investitionskosten für die ANAMET-Anlage (Vergärung und Belüftung) beliefen sich 1980 auf insgesamt Fr. 964 000.–, wovon Fr. 865 000.– für den Anlagenteil verwendet wurden. Angaben über die aktuellen Betriebskosten sind nicht erhältlich.

## Anlage zur Reinigung von Abwässern aus der Wellkarton-Rohpapierherstellung der Model AG, Weinfelden

### Beispiel 2 Industrieabwässer

#### Ausgangslage

Die Model AG in Weinfelden produziert pro Jahr rund 104 000 Tonnen Wellkarton und Rohpapier aus 100% Altpapier. Das bei der Rohpapierherstellung anfallende Abwasser wird über verschiedene Verfahrensstufen gereinigt und wieder in den Prozesswasserkreislauf zurückgeführt.

#### Konzept

Das Abwasser aus der Produktion wird über zwei Filtrations- und Sedimentationsstufen vorgereinigt. Das Filtrat der zweiten Stufe wird über die Vorversäuerung in den **BIOTHANE** Reaktor, einen **UASB-Reaktor** (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), geführt. Das erzeugte Biogas wird abgezogen, in einem **Gasspeicher** aufgefangen und zur **Dampferzeugung** einem Brenner im Kesselhaus zugeführt. Ist das Kesselhaus nicht in Betrieb, so wird das Gas über eine Notfackel abgefackelt.

**Model AG, Weinfelden**

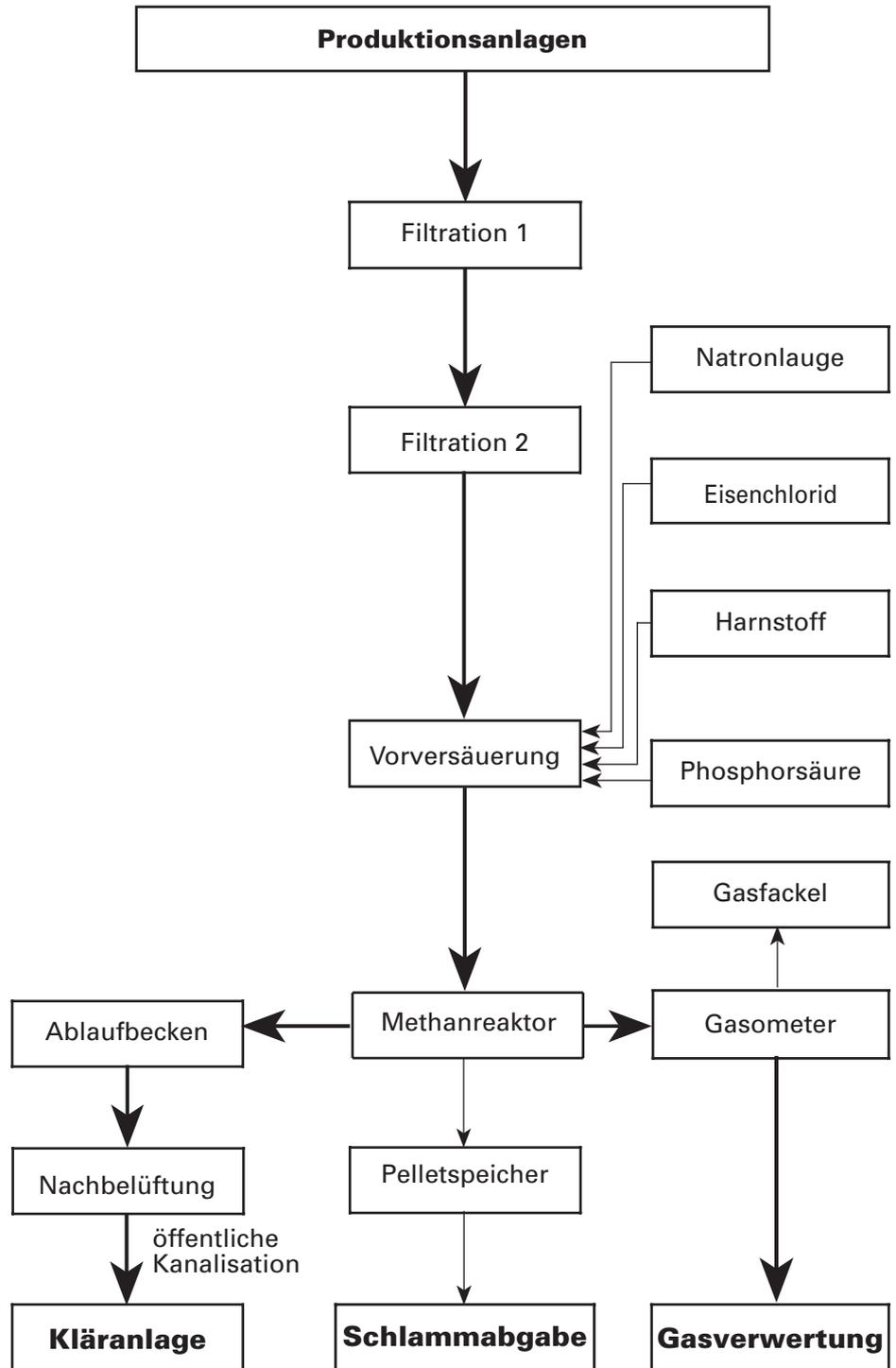


Abb. 5:  
Fließbild der Anlage  
Model AG, Weinfelden

## Betriebserfahrungen

Die Erfahrungen seit der Inbetriebnahme der Anlage sind weitgehend positiv. Zeitweise kam es zu Geruchsbelästigungen ( $H_2S$ ) aus dem Ablauf in die Kanalisation. Zur Behebung dieser Geruchsbelästigung wurde die Belüftung im Ablaufbecken intensiviert, die Abluft gefasst und über einen Biofilter geführt.

| Parameter                 | Einheit              | Mittel      |
|---------------------------|----------------------|-------------|
| Abwassermenge             | m <sup>3</sup> /d    | 1200        |
| CSB                       | mgO <sub>2</sub> /l  | 6000        |
| CSB Fracht                | kg/d                 | 7200        |
| Absetzbare Stoffe         | mg/l                 | 50          |
| pH                        | –                    | 6.5         |
| Temperatur                | °C                   | 37          |
| Vorversäuerung            | m <sup>3</sup>       | 547         |
| Volumen Methanreaktor     | m <sup>3</sup>       | 647         |
| Gasproduktion             | m <sup>3</sup> /d    | 15 00–2 000 |
| Methangehalt des Biogases | %                    | 70–80       |
| Heizöläquivalent          | kg/d                 | 800–1000    |
| CSB Abbau                 | %                    | 80–85       |
| Raubelastung              | kg/m <sup>3</sup> *d | 11          |
| Verweilzeit               | h                    | 13          |

## Kosten

Die Investitionskosten für die ESMIL-Anlage (Vergärung und Belüftung) beliefen sich 1988 auf insgesamt Fr. 2 000 000.–, wovon der Anlagenteil rund Fr. 1 000 000.– ausmachte. Detaillierte Betriebskosten sind keine erhältlich. Aufgrund der tiefen Preise fossiler Energie kann durch Einsparungen auf der Energieseite nur ein bescheidener Teil der Betriebskosten gedeckt werden.

**Beispiel 3**  
Industrieabwässer

Anlage zur Reinigung von Abwässern aus der Zuckergewinnung der Zuckerfabrik AG, Frauenfeld

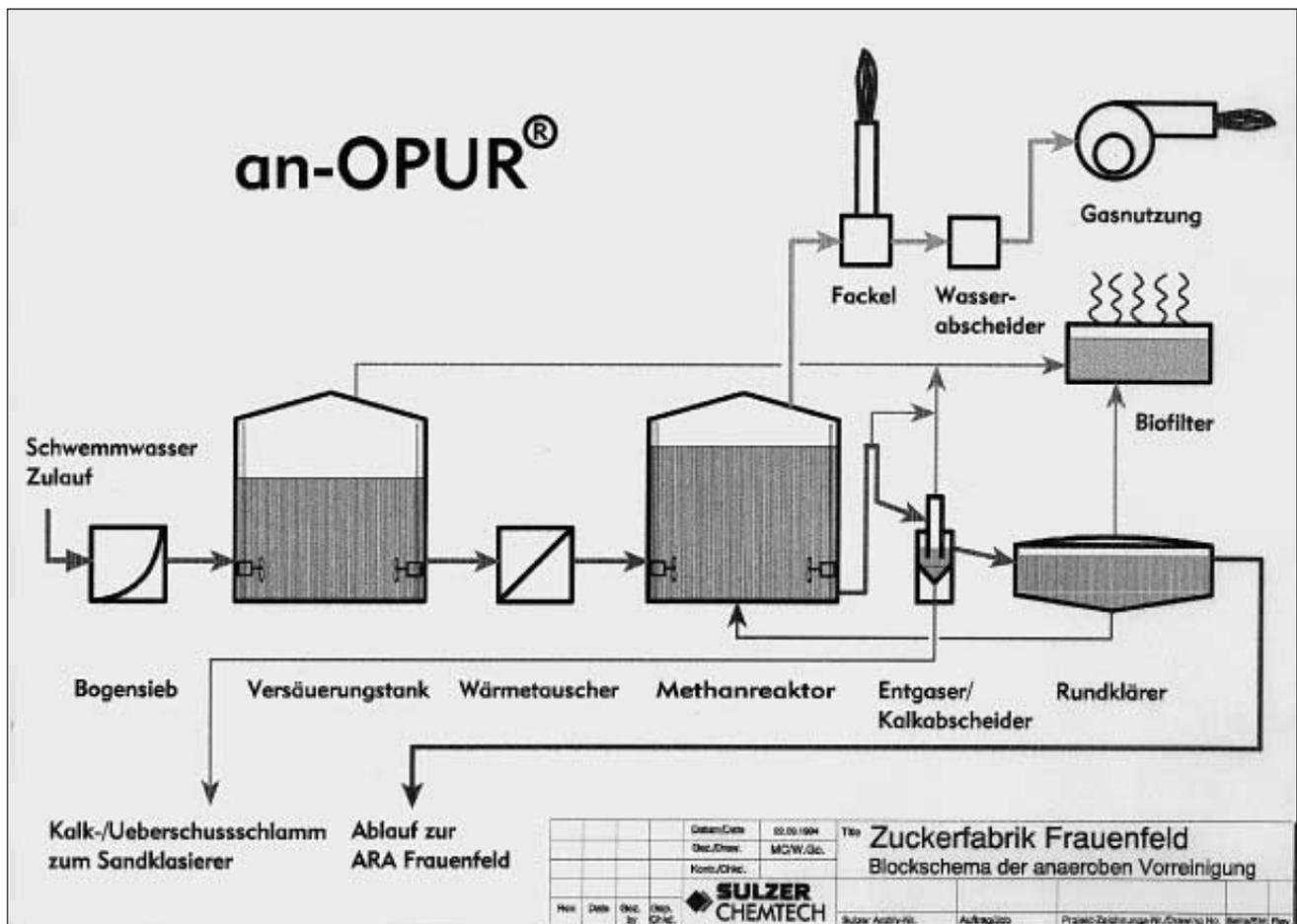
**Ausgangslage**

In der Zuckerfabrik Frauenfeld werden jährlich im Mittel 400 000 t Zuckerrüben verarbeitet. Dabei fallen während des jährlichen Kampagnebetriebs von rund 60–90 Tagen täglich rund 1700 m<sup>3</sup> Abwasser mit einem CSB von rund 20 000 mg/l an. Zur Entlastung der kommunalen Kläranlage Frauenfeld wurde deshalb ein Projekt zur anaeroben Vorreinigung der Abwässer aus der Rübenverarbeitung ausgearbeitet und realisiert. Die an-OPUR-Anlage wurde in der Kampagne Herbst 1994 in Betrieb genommen.

**Konzept**

Beim gewählten Verfahren **an-OPUR** handelt es sich um einen zweistufigen Kontaktprozess. Das Schwemmwasser gelangt über ein **Bogensieb**, zur Entfernung der gröbereren Feststoffpartikel, in den **Versäuerungstank**. In diesem Tank werden die ungelösten Stoffe hydrolysiert und in Fettsäuren umgewandelt. Der Ablauf aus der Versäuerung wird über einen **Wärme-**

Abb. 6:  
Fließbild der Anlage  
Zuckerfabrik Frauenfeld AG,  
Frauenfeld



**tauscher** in den Methanreaktor geführt. Im **Methanreaktor** findet die Umsetzung der Produkte aus der Vorversäuerung zu Methan statt. Der Ablauf aus dem Methanreaktor gelangt über eine **Entgasung** in ein **Rundklärbecken** zur Schlammabtrennung. Der abgetrennte Biomasse-schlamm wird in den Methanreaktor zurückgeführt. Zusätzlich kann über einen Hydrozyklon überschüssiger Kalk abgetrennt und ausgeschleust werden.

### Betriebserfahrungen

Die bisherigen, aus 2 Kampagnen stammenden Erfahrungen entsprechen den Erwartungen. Einzig die Rührwerkleistung musste zur Verhinderung von Kalkablagerungen in den Reaktoren erhöht werden. Da zurzeit der Drucklegung noch nicht genügend ausgewertete Erfahrungsdaten zur Verfügung standen, werden nachfolgend die Planungsdaten vorgestellt.

| Parameter                 | Einheit              | Auslegungsdaten |
|---------------------------|----------------------|-----------------|
| Abwassermenge             | m <sup>3</sup> /d    | 1728            |
| CSB                       | mgO <sub>2</sub> /l  | 11 600          |
| CSB Fracht                | kg/d                 | 20 000          |
| Absetzbare Stoffe         | mg/l                 | 250             |
| pH                        | –                    | 6–7             |
| Temperatur                | °C                   | 2–17            |
| Vorversäuerung            | m <sup>3</sup>       | 5000            |
| Volumen Methanreaktor     | m <sup>3</sup>       | 3000            |
| Gasproduktion             | m <sup>3</sup> /d    | 9200            |
| Methangehalt des Biogases | %                    | 70              |
| Heizöläquivalent          | kg/d                 | 5520            |
| CSB Abbau                 | %                    | 90              |
| Raubelastung gesamt       | kg/m <sup>3</sup> *d | 2.5             |
| Verweilzeit gesamt        | d                    | 4.7             |

### Kosten

Die Investitionskosten der an-OPUR-Anlage betragen 1994 rund Fr. 6 500 000.–. Betriebskosten sind keine erhältlich. Bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren und einem Zinssatz von 8% betragen alleine die Kapitalkosten Fr. 650 000.– pro Jahr. Während der Kampagne lässt sich für rund Fr. 170 000.– Heizöl einsparen. Die kurze Dauer einer Kampagne von jeweils nur ca. 90 Tagen wirkt sich entsprechend negativ auf die Betriebskostenrechnung aus. Die Anlage steht während rund 250 Tagen leer und liefert keinen Deckungsbeitrag an die Fixkosten.

**Beispiel 4**  
Industrieabwässer

Anlage zur Reinigung von Abwässern aus der  
Kartoffelverarbeitung der Zweifel Pomy Chips AG,  
Spreitenbach

**Ausgangslage**

Die Firma Zweifel Pomy Chips verarbeitet pro Jahr 16 000 Tonnen Kartoffeln zu Pommes chips. Dabei fallen in der Produktion, insbesondere beim Waschen, Schälen und Schneiden, maximal 160 m<sup>3</sup> Abwasser pro Tag an.

**Konzept**

Die Anlage besteht aus den Stufen Pumpstation, Siebanlage, Pufferbecken, Flockung mit Flotation, Vergärung mit Gasverwertung und Abluftbehandlung. Die Vergärung erfolgt in einem nach dem UASB-Prinzip arbeitenden **BIOPAQ-Reaktor**. Die in der Siebanlage abgetrennten, festen Rückstände werden mit Hilfe einer Siebbandpresse entwässert und als Futtermittel verwertet.

**Betriebserfahrungen**

Anfänglich traten verschiedene Probleme auf. Am gravierendsten war, dass die Biomassepellets im UASB-Reaktor zerstört wurden. Dazu kam es zu Kalkablagerungen und entsprechenden Folgeschäden in Pumpen, Rohrleitungen und Wärmetauschern. Schliesslich führten diverse Modifikationen und Anpassungen, welche jedoch nicht die eigentliche Gärstufe betrafen, zu einem befriedigenden Ergebnis.

## Zweifel Pomy Chips

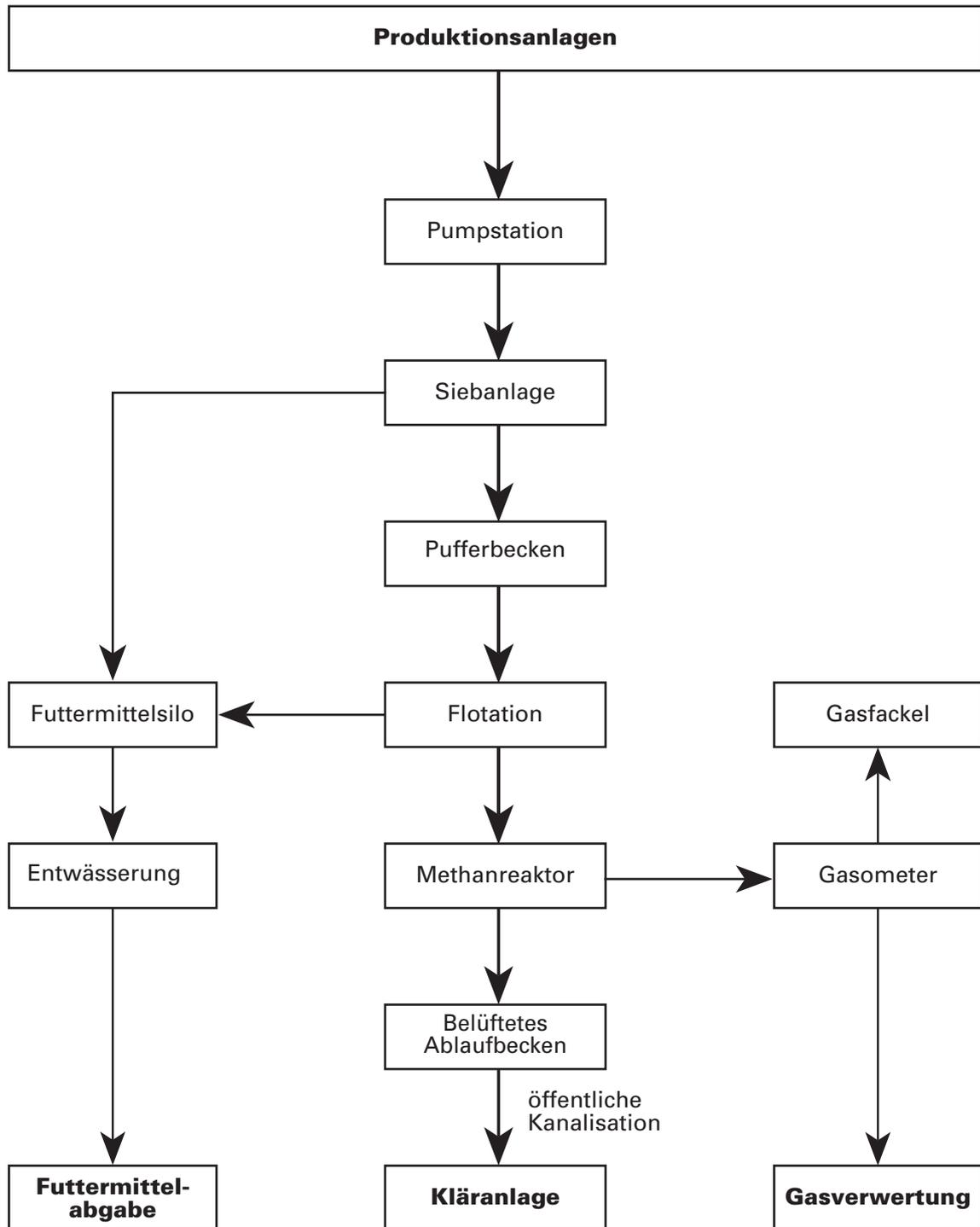


Abb. 7:  
Fließbild der Anlage Zweifel  
Pomy-Chips, Spreitenbach

| Parameter                 | Einheit              | Mittelwerte |
|---------------------------|----------------------|-------------|
| Abwassermenge             | m <sup>3</sup> /d    | max. 360    |
| CSB                       | mgO <sub>2</sub> /l  | 4500        |
| CSB Fracht                | kg/d                 | 1200        |
| pH                        | –                    | 5.5–9.5     |
| Temperatur                | °C                   | 25          |
| Pufferbecken              | m <sup>3</sup>       | 2 * 160     |
| Volumen Methanreaktor     | m <sup>3</sup>       | 100         |
| Gasproduktion             | m <sup>3</sup> /d    | < 300       |
| Methangehalt des Biogases | %                    | 78          |
| Heizöläquivalent          | kg/d                 | < 200       |
| CSB Abbau                 | %                    | 80          |
| Raumbelastung gesamt      | kg/m <sup>3</sup> *d | < 8         |
| Verweilzeit gesamt        | h                    | min 6.5     |

### Kosten

Die Investitionskosten für die BIOPAQ-Anlage beliefen sich 1991 auf insgesamt Fr. 3 200 000.–, wovon der Anlagenteil rund Fr. 1 600 000.– ausmachte. Die Gesamtbetriebskosten betragen nach groben Schätzungen rund Fr. 580 000.–. Daraus errechnen sich spezifische Behandlungskosten von rund 8 Fr./m<sup>3</sup>.

## Anlage zur Vergärung von Bioabfällen der Alfred Müller AG, Baar

### Beispiel 5 Feste Bioabfälle

#### Ausgangslage

Die Alfred Müller AG betreibt seit 1987 die Kompostieranlage «Allmig» bei Baar. Im Jahr 1993 wurden knapp 18 000 Tonnen Bioabfälle aus der Region Zug verarbeitet. Seit der Einführung der Sackgebühr und einer flächendeckenden Grünabfuhr haben die nassen Bioabfälle ständig zugenommen. Mit dem seither bedeutend grösseren Anteil an schwierig kompostierbaren Küchenabfällen wurden bereits zuvor gelegentlich auftretende Geruchsemissionen gravierend und führten zu Beschwerden aus der Nachbarschaft. Die Alfred Müller AG hat sich deshalb entschlossen, eine geschlossene, kombinierte Kompostierungs- und Vergärungsanlage zu bauen. Mit zum Konzept gehört die Fassung der geruchsbelasteten Abluft und deren Desodorierung in einer biologischen Reinigungsstufe.

#### Konzept

Das auf der «Allmig» realisierte Konzept beinhaltet eine **Kombination** des **einstufig thermophilen BRV-Verfahrens** mit der umgebauten **Kompostierungsanlage**. Die strukturreichen Abfälle (12 000 t/a) werden weiterhin kompostiert, während die nassen, strukturlosen Abfälle (6000 t/a) der Vergärung zugeführt werden. Das ausgegorene Material wird nicht wie bei andern Verfahren entwässert, sondern nach dem Austrag aus dem Fermenter mit vorgerottetem Kompostiergut vermischt, einer Rottebox zugeführt



Abb. 8:  
Rotteboxen à 180 m<sup>3</sup> mit  
Fördertechnik: Das Material  
wird über einen Kratzboden  
ausgetragen und mittels  
Spiralförderer transportiert.

und nachkompostiert. Bei diesem Konzept wird von der Annahme ausgegangen, dass das Überschusswasser im ausgegorenen Material vollständig zur Feuchthaltung des Materials in den Rotteboxen notwendig ist. Ob dies bilanzmässig aufgeht, wird die Erfahrung zeigen.



Abb. 9:  
Ansicht der kombinierten  
Kompostier- und Gäranlage  
«Allmig»

Legende zu Abb. 10, Seite 125:  
Fließbild der kombinierten  
Kompostier- und Gäranlage  
«Allmig»

Bei der Einfahrt wird das Material auf einer Lastwagenwaage **[1]** gewogen. Die Daten gelangen direkt in das Betriebsbüro **[2]**, wo über Computer ein Lieferschein ausgestellt wird. Bei der Annahmestelle **[3]** wird das Grüngut gekippt und grob auf Fremdstoffe untersucht. Der stationäre Greifkran **[4]** führt das Material den Dosier-/Förderanlagen **[5]** zu, wo von Hand das Fremdgut aussortiert wird. Danach gelangt das Gut in die Shredderanlage **[6]**. Das Hackgut wird auf ein Zwischendepot **[7]** befördert, wo nochmals von Hand Fremdstoffe herausgelesen werden. Nun übernimmt ein Pneu-lader das Gut und führt dieses zum Aufgabebunker **[8]**. Von hier gelangt das stark holzhaltige Material über ein Fördersystem direkt in die Intensivrotteboxen **[9]** und das Nassgut in die Vorrotteboxen **[10]**. Ausgetragen wird das Nassgut über einen Nachzerkleinerer **[11]**. Danach wird es in den Vergärtank **[12]** gepumpt. Das beim Gärverfahren gewonnene Biogas wird zuerst gereinigt **[13]** und danach in Behältern **[14]** zwischengelagert. Im gasbetriebenen Blockheizkraftwerk **[15]** wird Elektrizität erzeugt. Mit der entstehenden Abwärme wird der Speicher

**[16]** geheizt und damit der gesamte Wärmebedarf abgedeckt. Das vergorene Material wird über das Fördersystem **[17]** dem holzhaltigen Material in den Boxen beigemischt. Die geschlossene Rottehalle wird mit erwärmter Frischluft **[18]** versorgt. Dabei wird verdunstendes Wasser aufgenommen und zusammen mit der mit Geruchspartikeln beladenen Luft abgesaugt **[19]** und den Biofiltertürmen **[20]** zugeführt. Das besonders in den Vorrotteboxen **[10]** anfallende Sickerwasser wird für den biologischen Abluftreinigungsprozess benötigt, resp. das überschüssige Wasser wird zur Bewässerung wieder zurückgeführt **[21]**. Der Kompost wird über das Fördersystem ausgetragen **[22]** und danach unter Dach gelagert **[23]**.

Das auf dem Zwischenlager **[A]** deponierte Altholz wird über eine separate Linie verarbeitet. Der stationäre Greifkran beschickt den Rütteldosierer **[B]**, der das Holz einem Shredder **[C]** zuführt. Über einen Magnet-Metallaus-scheider **[D]** gelangen die Schnitzel in ein Rüttelsieb **[E]** und von dort über eine Förderanlage **[F]** auf grosse, über-dachte Zwischenlager **[G]**.





Abb. 11:  
Blockheizkraftwerk zur  
Erzeugung von Strom und  
Wärme vor dem Einbau

### **Betriebserfahrungen**

Die kombinierte Anlage wurde im Herbst 1994 in Betrieb genommen. Da sich die Anlage 1995 noch in der Anfahrphase befunden hat, war zurzeit der Drucklegung noch nicht genügend ausgewertetes Datenmaterial verfügbar.

Im folgenden werden deshalb die Planungsdaten vorgestellt. Sämtliche Angaben basieren auf der Annahme, dass pro Tag rund 17 Tonnen Bioabfall der Vergärung zugeführt werden und dass pro Tonne rund 100 m<sup>3</sup> Biogas gewonnen wird. Für die Abschätzung des Energiebedarfs der Kompostierung wird von einer Verarbeitungsmenge von ca. 33 Tonnen pro Tag ausgegangen.

|                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| Kapazität der Gesamtanlage | 18 000 t/a bzw. ca. 50 t/d |
| Davon Kompostierung        | 12 000 t/a bzw. ca. 33 t/d |
| Davon Vergärung            | 6000 t/a bzw. ca. 17 t/d   |

| <b>Energiebilanz</b>             | <b>Wärme</b><br>kWh/Jahr | <b>Elektrizität</b><br>kWh/Jahr |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| <b>Energieertrag:</b>            |                          |                                 |
| Wärme brutto                     | 1 750 000                |                                 |
| Elektrizität brutto              |                          | 1 100 000                       |
| <b>Energiebedarf</b>             |                          |                                 |
| Aufbereitung                     |                          |                                 |
| Wärme:                           | 200 000                  |                                 |
| Elektrizität:                    |                          | 300 000                         |
| Vergärung 6000 t/a               |                          |                                 |
| Wärme:                           | 450 000                  |                                 |
| Elektrizität:                    |                          | 200 000                         |
| Kompostierung 12 000 t/a         |                          |                                 |
| Wärme:                           | 800 000                  |                                 |
| Elektrizität:                    |                          | 400 000                         |
| Gesamtenergiebedarf Wärme        | 1 450 000                |                                 |
| Gesamtenergiebedarf Elektrizität |                          | 900 000                         |
| <b>Energieüberschüsse</b>        |                          |                                 |
| Wärme                            | 300 000                  |                                 |
| Elektrizität                     |                          | 200 000                         |

### Kosten

Die Investitionskosten für den Anlageteil Vergärung mit einer Kapazität von 6000 t/a, bestehend aus Zerkleinerung/Kalibrierung, Beschickung Fermenter, Entnahme Fermenter, Gasspeicher, Gasverwertung, Anteil Abluft, Anteil Bunker, jedoch ohne Gebäude und ohne Land betragen rund Fr. 3 000 000.–. Nicht in diesen Kosten enthalten ist eine Entwässerung des Gärgutes sowie eine Abwasserbehandlung. Die Annahmepreise für Bioabfall lagen im Jahr 1995 zwischen 158.– und 180.– Fr./t, exkl. Mehrwertsteuer. Ermässigungen werden in Abhängigkeit der Vertragsdauer und bei sortenreinen Abfällen gewährt.

**Beispiel 6**  
Feste Bioabfälle

**KOMPOGAS-Anlage zur Vergärung von Bioabfällen der W. Schmid AG, Glattbrugg**

**Ausgangslage**

Die **KOMPOGAS-Anlage** wurde für eine ökologische Verwertung von Garten-, Küchen- und anderen biogenen Abfällen durch die **W. Schmid AG** entwickelt. Eine erste Anlage mit einer Jahreskapazität von 5000 Tonnen nahm im Januar 1992 in Rümlang den Betrieb auf. Im Januar 1994 wurde die vom Lizenznehmer Bühler AG für die W. Schmid AG gebaute Anlage mit einer Kapazität von 10 000 Jahrestonnen Bioabfall in Bachenbülach in Betrieb genommen. Seither wurden KOMPOGAS-Anlagen in Samstagn (Kt. ZH) und in Immenstadt (D) in Betrieb genommen. Weitere befinden sich im Bau (Otelfingen, Kt. ZH) oder in Planung (Basel, Luzern, Volketswil, Opfikon-Glattbrugg und andere mehr in Deutschland).

**Konzept**

Beim **KOMPOGAS-Verfahren** handelt es sich um einen **thermophilen Einstufenprozess** (55 °C) im liegenden Fermenter. Die Abfälle werden in einem Tiefbunker angenommen und mittels eines Greifers der Vorzerkleinerung zugeführt. Anschliessend werden allfällige Fremdstoffe von Hand bzw. durch Magnetabscheidung abgetrennt. Nach einer zweiten Zerkleinerungsstufe gelangt das Material in einen Zwischenbunker. Vom Zwischen-

Abb. 12:  
Fließbild einer  
KOMPOGAS-Anlage

**2 Grobaufbereitung**

- 21 Tiefbunker mit Krananlage
- 22 Schneckenmühle
- 23 Störstoffauslese
- 24 Zerkleinerung

**3 Fermentation**

- 31 Zwischenbunker
- 32 Vorlagebehälter mit Pumpe
- 33 Substratwärmetauscher
- 34 Fermenter
- 35 Austrag
- 36 Presse mit Vorlagebehälter
- 37 Presswassertanks
- 38 Presswasser-Wärmetauscher

**4 Rottebunker**

- 41 Rottebunker
- 42 Nachkompostierung

**5 Abwasserreinigung**

- 51 Dekanter
- 52 Biol. Abwasserreinigung

**6 Biogasverwertung**

- 61 Biogasaufbereitung
- 62 Folienspeicher
- 63 BHKW
- 64 Notfackel
- 65 Wärmeverteilung
- 66 Netzverteilung

**7 Abluftreinigung**

- 71 Aspiration
- 72 Biofilter



bunker aus wird das Substrat über einen Wärmetauscher in den oder die beiden Fermenter gepumpt. Im liegenden Fermenter findet während 15–20 Tagen die Vergärung statt. Die Pfropfenströmung durch den Fermenter garantiert eine definierte Verweilzeit und folglich eine ausreichende Hygienisierung des Bioabfalls. Nach der Entnahme aus dem Fermenter wird das ausgegorene Material einer Entwässerungsstufe zugeführt. Dabei entstehen Presswasser und ein Feststoff mit rund 50% TS. Der Feststoff wird in einen Rottebunker eingetragen und während 5–10 Tagen gerottet. Der nun vorliegende Kompost eignet sich für die meisten Anwendungen in der Landwirtschaft. Das bei der Entwässerung entstehende Abwasser wird über eine mechanisch/biologische Abwasserreinigung gereinigt oder in der Landwirtschaft als Flüssigdünger eingesetzt. Die Anlage ist vollständig gekapselt und steht unter Unterdruck. Dadurch wird verhindert, dass geruchsbeladene Abluft an die Umgebung nach aussen entweichen kann. Die gefasste Abluft wird über einen Biofilter geführt und von Geruchsstoffen befreit.



Abb. 13:  
Ansicht mit Anlieferbunker  
und Greiferkran



Abb. 14:  
Handauslese von  
Fremdstoffen

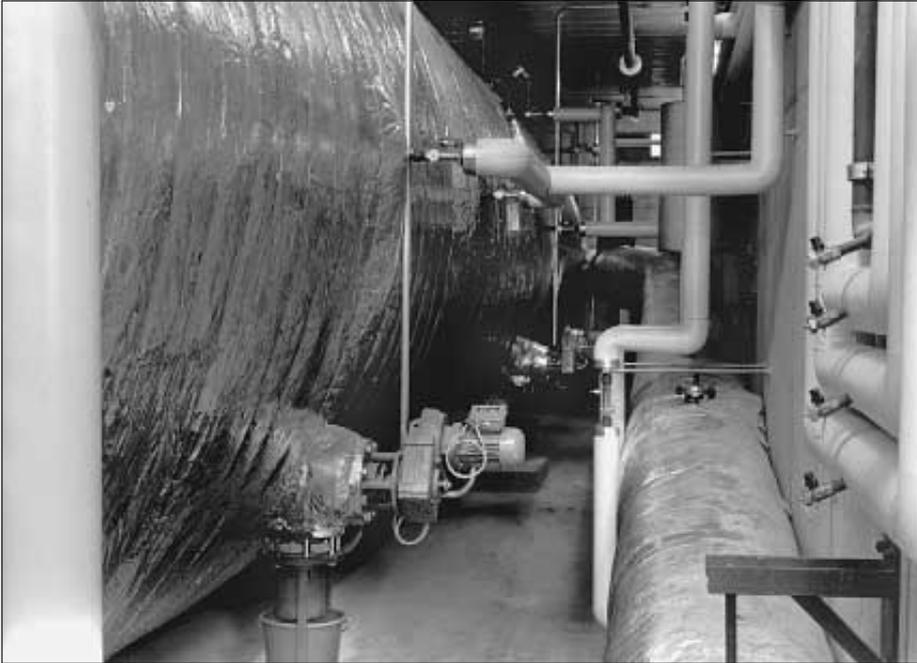


Abb. 15:  
Liegender, thermophiler  
Propfstromreaktor



Abb. 16:  
Biogastankstelle

### Betriebserfahrungen

Die nun seit 4 Jahren vorliegenden Betriebserfahrungen aus Rümlang, Bachenbülach und Samstagern sind durchwegs positiv. Saisonale Schwankungen in den Abfallmengen wie auch in der -zusammensetzung beeinträchtigen den Prozess nicht.

|                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| Jahreskapazität der Anlage      | 10 000 t              |
| Täglich verarbeitete Menge      | 26 t                  |
| Täglich gewonnenes Biogas       | 2600 m <sup>3</sup>   |
| Täglich erzeugter Kompost       | ca. 14 m <sup>3</sup> |
| Täglich erzeugte Menge Abwasser | 8–12 m <sup>3</sup>   |

| <b>Energiebilanz pro Tag</b> | <b>Wärme<br/>kWh</b> | <b>Elektrizität<br/>kWh</b> |
|------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| Wärme, brutto                | 9000                 |                             |
| Elektrizität, brutto         |                      | 4800                        |
| Energiebedarf Wärme          | 2000                 |                             |
| Energiebedarf Elektrizität   |                      | 1700                        |
| <b>Energieüberschüsse</b>    |                      |                             |
| Wärme                        | 7000                 |                             |
| Elektrizität                 |                      | 3100                        |

### Kosten

Die Investitionskosten für die Anlage Bachenbülach mit einer Kapazität von 10 000 t/a betragen rund Fr. 9 000 000.–. Die Nettobetriebskosten betragen rund Fr. 1 600 000.– pro Jahr. Die Annahmepreise für Bioabfall lagen im Jahr 1995 zwischen 120 und 162 Fr./t, exkl. Mehrwertsteuer. Die Preise richten sich nach Vertragsdauer, Menge und Fremdstoffanteil. In den Genuss von Ermässigungen kommen Anlieferer während den mengenmässig eher schwachen Wintermonaten.

## Anlage zur Vergärung von Bioabfällen mit Gülle von K. Günthardt, Brüederhof Dällikon

### Beispiel 7 Landwirtschaftliche Co-Vergärung

#### Ausgangslage

In den frühen achtziger Jahren wurden relativ viele **Biogasanlagen** zur **Güllevergärung** auf kleineren und mittleren Landwirtschaftsbetrieben gebaut. Danach ist der Anlagenbau infolge des tiefen Ölpreises weitgehend ins Stocken geraten. In der Zwischenzeit wurde die Verfahrenstechnik weiterentwickelt, und das Interesse an der Biogastechnik hat wieder zugenommen. In den letzten Jahren wurden Konzepte zur **Vergärung** von Bioabfall in **landwirtschaftlichen Biogasanlagen** entwickelt, was aus ökologischer und energetischer Sicht sinnvoller ist als die Kompostierung in Anlagen oder am Feldrand, wo bei maschineller Verarbeitung der Abfälle fossiles CO<sub>2</sub> freigesetzt wird.

#### Projekte

Bereits sind landwirtschaftliche Biogasanlagen mit mehr als ca. 60 Grossvieheinheiten in Betrieb, in denen Bioabfälle gemeinsam mit Gülle vergoren werden. Besonders gut geeignet für die Vergärung in Biogasanlagen sind zum Beispiel nasse Gemüserüstabfälle. Verschiedene ähnliche Projekte befinden sich zurzeit in der Planungsphase.

#### Konzept und Verfahrensablauf

Eine landwirtschaftliche Biogasanlage besteht im wesentlichen aus den folgenden Funktionsbereichen:

1. Vorgrube mit Rührwerk und Pumpe zum Speichern und Aufbereiten der Substrate sowie zum Beschicken des Gärbehälters.
2. Fermenter (Gärbehälter) aus Holz, Beton oder Stahl mit Röhreinrichtung, Heizsystem und fallweise mit einem integrierten Gasspeicher.
3. Güllelagerbehälter zur Lagerung der ausgegorenen Gülle bis zum Ausbringen auf die Felder.
4. Gasverwertung, bestehend aus Gasaufbereitung, Gasspeicher und Gasheizkessel zur Wärmeerzeugung oder Blockheizkraftwerk zur Erzeugung von Strom und Wärme.

Für die gemeinsame Vergärung von Bioabfall mit Gülle muss eine Biogasanlage um die Bereiche Annahme, Zerkleinerung und allenfalls Stapelung erweitert werden.

Die Anlage auf dem Betrieb Brüederhof in Dällikon wurde nach diesem Konzept gebaut. Folgende Darstellung gibt grob den Verfahrensablauf wieder:

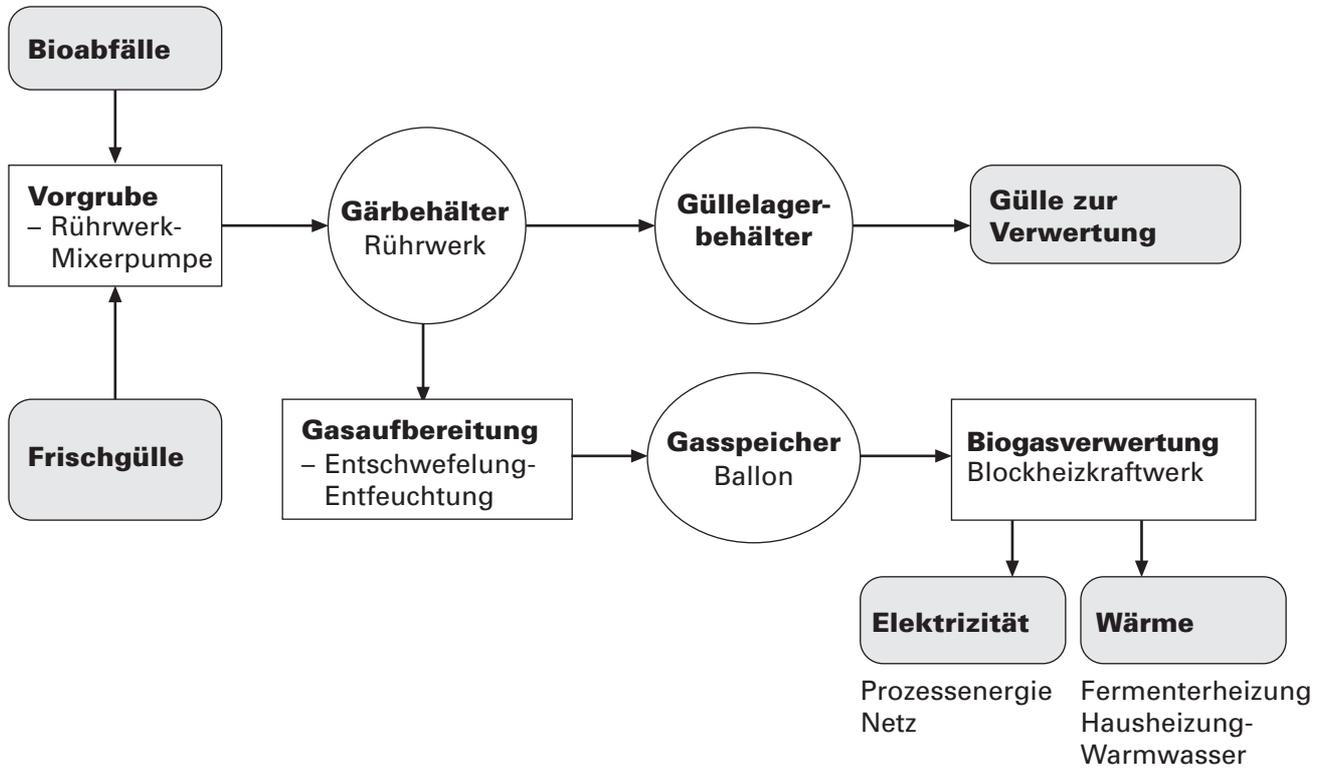


Abb. 17:  
Fließbild einer landwirt-  
schaftlichen Biogasanlage  
zur Vergärung von Gülle mit  
Bioabfall



Abb. 18:  
Betriebsgebäude mit  
Gärbehälter

## Betriebserfahrungen und Daten

In der Anlage Brüederhof ist vorgesehen, zusätzlich zur Gülle Rüstabfälle aus der Herstellung und Verpackung von Fertigmischsalaten zu vergären. Diese Abfälle werden in pürierter Form in einem Tank angeliefert und in der Vorgrube mit Gülle vermischt. Die bisher vorliegenden betrieblichen Erfahrungen sind sehr gut.

|  |  |
|--|--|
| Gülemenge                              | zurzeit 0 m <sup>3</sup> /d, geplant 2.5 m <sup>3</sup> /d |
| – TS 7–8%, 75% OS                      |  |
| Biogene Abfälle                        | 8–10 m <sup>3</sup> /d                                     |
| – TS 3–4%, 80% OS                      | 280 kg OS/d  |
| Volumen Vorgrube                       | 60 m <sup>3</sup>  |
| Volumen Fermenter                      | 260 m <sup>3</sup>   |
| Volumen Lagerbehälter                  | 570 m <sup>3</sup>   |
| Volumen Gasspeicher                    | 150 m <sup>3</sup>   |
| Gärtemperatur                          | 33 °C  |
| Verweilzeit                            | 20–25 d  |
| Gasproduktion                          | 240 m <sup>3</sup> /d                                      |
| – spez. Gasproduktion/Bioabfall        | 30 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Bioabfall                |
| – spez. Gasproduktion/OS               | 0.8 m <sup>3</sup> /kg OS                                  |
| Gasnutzung in der Wärme-Kraft-Kopplung |  |
| – Wärme brutto                         | 790 kWh/d  |
| – Elektrizität brutto                  | 360 kWh/d  |
| Prozessenergiebedarf                   | 10–20 % der erzeugten Energie                              |

## Ausgegorene Gülle bzw. Rückstand der Vergärung

Als Rückstand der Vergärung bleibt die ausgegorene Gülle zurück, welche infolge der Zugabe fester Abfälle einen etwas höheren Trockensubstanzgehalt aufweist. Durch die Vergärung wird eine Verbesserung der Güleeigenschaften in folgender Hinsicht erreicht:

- Reduktion geruchsverursachender Substanzen
- Stabilisierung und Teilhygienisierung
- Erhöhung der Pflanzenverträglichkeit durch Abbau niederer Fettsäuren

## Kosten

Die Investitionskosten der Anlage betragen Fr. 560 000.–. Bei einer Amortisationsdauer von 15 Jahren und einem Zins von 6% betragen die Betriebskosten einschliesslich Anlagenunterhalt und Wartung, Personalkosten und Versicherung rund Fr. 100 000.–. Die Erlöse vom Verkauf von Strom (16 Rp./kWh) und der Substitution von Heizöl (Fr. 35.– pro 100 kg) betragen rund Fr. 35 000.–. Rechnet man den Ertrag aus der Verarbeitung der Salat- und Gemüserüstabfälle dazu, so lässt sich eine landwirtschaftliche Biogasanlage kostendeckend bzw. unter Umständen sogar mit einem Gewinn betreiben.