

Co-Vergärung von festen und flüssigen Substraten

Studie im Auftrag des
Nationalen Energieforschungsfonds, NEFF
und des
Kantons Bern

durchgeführt durch:



Arbeitsgemeinschaft Bioenergie
Maschwanden

in Zusammenarbeit mit
AVAG
AG für Abfallverwertung, Jaberg

Diese Studie kann bezogen werden bei:

Arbeitsgemeinschaft Bioenergie
CH-8933 Maschwanden
Tel: #49 /(0)1 /767'18'19
Fax: #49 /(0)1 /767'16'01
E-Mail: 101457.2127@compuserve.com

Co-Vergärung von festen und flüssigen Substraten

Inhaltsübersicht

Dank	3
Zusammenfassung	4
Summary	6
1 Einleitung	7
1.1 Umschreibung der Co-Vergärung	7
1.2 Der vorliegende Bericht als Resultat eines Forschungsprojekts	7
1.3 Ausgangslage des Forschungsprojekts	8
2 Co-Vergärung auf der ARA Frutigen	9
3 Die Aufbereitung von Abfällen	11
3.1 Aufgaben der Verfahrenstechnik	11
3.2 Prinzipiell mögliche Aufbereitungsverfahren	12
3.3 Auswahl und Beurteilung verschiedener Lösungen	14
3.4 Beschreibung der Aufbereitungsanlage Frutigen	16
4 Der Versuchsbetrieb in Frutigen	19
4.1 Verwendete Abfälle	19
4.2 Versuchsprogramm	20
4.3 Messprogramm	21
4.4 Versuchsüberwachung und Analysenmethoden	23
5 Resultate	25
5.1 Aufbereitung der Abfälle	25
5.2 Einfluss der Abfälle auf den Praxisbetrieb der Kläranlage	27
5.3 Einfluss der Abfälle auf die Biologie der Faulung	30
5.4 Gas- und Stromproduktion	31
5.5 Einfluss der Abfälle auf die Qualität des Klärschlamm	33
- Hygiene (Enterobakteriaceen)	33
- Überlebensfähigkeit von Tomatensamen	34
- Nährstoffe	34
- Schwermetalle	35
6 Energetische Betrachtungen: Frutigen	37
6.1 Strombedarf zur Aufbereitung	37
6.2 Wärmebedarf	38
6.3 Energieertrag	38
6.4 Energiebilanz	39
7 Oekonomische Betrachtungen: Frutigen	41
7.1 Investitionskosten	41
7.2 Betriebskosten	41
7.3 Vergleich zur Verwertung als Tierfutter	43

8	Schlussfolgerungen für Praxisanlagen	45
8.1	Eignung der eingesetzten Apparaturen	45
8.2	Energieproduktion der Co-Vergärung	46
8.3	Allgemeine Überlegungen zur Hygiene des Gärprodukts	47
8.4	Die Qualität von co-vergorenem Material	49
9	Machbarkeit der Co-Vergärung auf Kläranlagen	51
9.1	Übertragbarkeit der Erfahrungen von Frutigen	51
9.2	Auswahlkriterien für geeignete Kläranlagen	51
9.3	Kurzfristig realisierbare Standorte	53
9.4	Die Situation in den einzelnen Kantonen	56
-	Kantone mit relativ hohem Potential für die kommunale Co-Vergärung	57
-	Kantone mit beschränktem Co-Vergärungs-Potential	58
-	Kantone, die für die kommunale Co-Vergärung kaum in Frage kommen	59
9.5	Potential der Co-Vergärung auf Kläranlagen	61
9.6	Ökonomie und Zukunftsperspektiven der Co-Vergärung	62
10	Co-Vergärung in der Landwirtschaft	67
10.1	Die Problematik der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung	67
10.2	Ökonomie der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung	69
11	Praxisbeispiele	73
11.1	K. Günthardt, Dällikon	73
11.2	Gebrüder K. und U. Wittwer, Süderen	76
11.3	Gemeinschaftsanlage Burgdorfer, Büchi und Rohner, Frauenfeld	78
11.4	Abfallaufbereitung auf der ARA Baden-Baden, Deutschland	80
11.5	Gemeinschaftsbiogasanlage Fangel, Dänemark	83
11.6	Kommunale Co-Vergärung in der Schweiz	85
12	Philosophische Schlussbetrachtung	87
13	Literurnachweis	90
14	Anhang	92
-	Glossar	92
-	Veröffentlichungen innerhalb der Projektdauer mit Bezug zum Projekt	93
-	Adressen der Verfasser	93

Verantwortliche Redaktion:

Werner Edelmann
 Hans Engeli



Arbeitsgemeinschaft Bioenergie
 CH-8933 Maschwanden



Dank:

Unser Dank gebührt dem Nationalen Energie-Forschungs-Fonds, NEFF, und dem Kanton Bern für die Finanzierung der Arbeiten, welche zur vorliegenden Studie geführt haben.

Ein spezieller Dank geht an Prof. H. Gränicher, welcher sich als unser Projektpate stets mit grossem Engagement im NEFF für das Projekt eingesetzt hat.

Ganz herzlich danken wir dem Klärwart der ARA Frutigen, Herrn M. Geissbühler, für seine stets große Hilfsbereitschaft und für sein Verständnis für unsere Aktivitäten.

Ebenfalls danken möchten wir der Gemeinde Frutigen, insbesondere Herrn B. Lombriser, sowie all jenen Firmen, welche uns Material gratis oder zu besonderes günstigen Bedingungen zur Verfügung stellten. Speziell erwähnt seien: COOP, MIGROS und GOURMADOR, OTTO (Hub-Kipp-Vorrichtung), HYBAG (Anlagenbau), WÄLCHLI (Mixer) sowie BACHMANN (Mixport). Last, but not least, seien all jene erwähnt, welche uns in verschiedenen Projektphasen und auf verschiedenen Ebenen mit Rat und Tat zur Seite standen, insbsondere H. Straubhaar, (AVAG), B. Baneter (GSA Bern), verschiedene Vertreter von kantonalen Ämtern sowie die Projektmitarbeiter, welche oft zu "unchristlichen" Zeiten und unter unwirtlichen Bedingungen ihren Dienst versahen.

An dieser Studie haben mitgewirkt:

Werner Edelmann, Dr.sc.nat. ETH, Projektleiter

Hans Engeli, dipl.sc.nat. ETH, Machbarkeit, Verfahrenstechnik

Christian Moser, dipl.masch.ing.ETH, (Fma. AVAG), Koordination Bau & Versuche

Marco Gradenecker, dipl.natw.ETH, Versuchsauswertung, Machbarkeit

Johannes Müller, dipl.masch.ing.ETH, Mess-, Regeltechnik

Monika Ilg und Karin Rottermann, Labor

Thomas Kull, dipl.natw.ETH, Versuchsüberwachung

Patrick Plüss, dipl.natw.ETH, Versuchsauswertung, Machbarkeit

Zusammenfassung

Unter "Co-Vergärung" versteht man die gemeinsame Vergärung von festen biogenen Abfällen (z.B. Speisereste und Rüstabfälle aus Grossküchen, gewerbliche Lebensmittelabfälle etc.) zusammen mit flüssigen Substraten wie Klärschlamm oder Gülle. Für die Co-Vergärung geeignet sind - unter den hier zu diskutierenden Voraussetzungen - bereits bestehende Faultürme von Kläranlagen oder grössere landwirtschaftliche Biogasanlagen. Die Co-Vergärung stellt eine interessante Möglichkeit zur kostengünstigen dezentralen Verwertung von festen Abfällen und zur Energiegewinnung aus Biomasse dar. Die vorliegende Kurzfassung fasst Resultate und Erkenntnisse zusammen, welche im Rahmen einer Studie gewonnen wurden, welche durch den Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) und durch den Kanton Bern finanziert wurde.

Auf der ARA Frutigen (Kt. Bern) wurde die technische Machbarkeit der Co-Vergärung überprüft. Regional eingesammelte Gewerbeabfälle wurden auf dem ARA-Gelände mit einer zweistufigen Zerkleinerung aufbereitet, in einem Misch- und Lagertank gestapelt und via die Hygienisierungsstufe dem Faulturm zugeführt. Während rund 14 Monaten wurde die Kläranlage eingehend in verschiedenen Betriebszuständen ausgemessen. Die nach umfangreichen Vorabklärungen entwickelte Aufbereitungsanlage erfüllte folgende Zielsetzungen: Annahme, Stapelung, Vorzerkleinerung, Abtrennung von Störstoffen und Feinzerkleinerung. Der Praxisbetrieb der ARA wurde durch die Co-Vergärung nicht negativ beeinflusst. Die Faulraumbelastung mit organischem Material konnte ohne nennenswerte Störungen um 20 % gesteigert werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Faulraum auch mit 1 m³ Abfallzugabe pro Tag noch deutlich unter seiner Belastungsgrenze gefahren wurde. Die erhobenen Daten sprechen stark dafür, dass die Vergärung (sowohl Abbaukinetik als auch Abbaugrad) durch die Zugabe der Abfälle insgesamt verbessert wurde. Die Klärschlammqualität veränderte sich in bezug auf den Nährstoffgehalt nicht signifikant. Die Schwermetallwerte verbesserten sich jedoch leicht, da die Abfälle deutlich weniger belastet sind und damit eine Senkung der Gesamtkonzentration im Schlamm bewirkten.

Feste Abfälle, d.h. Substrate wie rohe Gemüse, welche im Vergleich zu Speiseabfällen einen "trockenen" Eindruck hinterlassen, brauchen eine zweistufige Aufbereitung mit Grob- und Feinzerkleinerung. Pro Tonne Abfälle ist für den zweistufigen Aufschluss, die Hygienisierung/Aufwärmung und andere zusätzliche Energieaufwendungen ein spezifischer Strombedarf von ca. 35 kWh sowie rund 50 kWh Wärme erforderlich, wobei die Hälfte des Stroms auf die eigentliche Grob- und Feinzerkleinerung zurückzuführen ist. Bei der anaeroben Verwertung sind pro Tonne dieser rohen Gemüseabfälle nach Abzug der Umwandlungsverluste netto rund 65 kWh elektrische Energie und 166 kWh Wärme als frei verfügbarer Überschuss freigesetzt worden, wobei bei optimierter Fahrweise und/oder bei Verwendung einstufig aufarbeitbarer Küchenabfälle der Ertrag noch spürbar vergrössert werden dürfte. Wenn pro angeschlossenem Einwohner im Durchschnitt rund 50 kg Abfall pro Jahr den Faultürmen zugeführt wird, kann bis zu über 10% des Elektrizitätsbedarfs der ARA durch zusätzliche Eigenproduktion gedeckt werden. Für die Hygienisierung musste rund 20% des Strombedarfs der Aufbereitung eingesetzt werden. Praktische Messungen im Verlauf der Versuche, Untersuchungen zur Abtötung von Tomatensamen im Faulturm wie auch theoretische Überlegungen legen jedoch nahe, zumindest im Fall von Reaktorkaskaden auf eine Hygienisierung von nicht speziell belasteten Co-Substraten zu verzichten.

Bei der Berechnung der Kosten wurden alle zusätzlich zur normalen Infrastruktur der ARA notwendigen Einrichtungen sowie die sonstigen Zusatzkosten (Personal, Versicherungen, etc.) berücksichtigt. Es wurde jedoch davon ausgegangen, dass das Land (rund 100 m²) und die bereits vorhandenen Komponenten zur freien Verfügung stehen. Bei der Verarbeitung von 500 bis 1'000 t pro Jahr bewegen sich die spezifischen Kosten für die in Frutigen verwendete Abfallart zwischen Fr. 56.- und 82.- pro Tonne. Die spezifischen Kosten für die Verarbeitung von (Gross-)Küchenabfällen und Speiseresten liegen tendenziell tiefer, da in diesem Fall die Zerkleinerung einstufig erfolgen kann. Die Kosten der Kompostierung in professionellen Anlagen liegen vergleichsweise zwischen 80.- Fr./t bis zu über 200.- Fr./t.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde abgeklärt, welche schweizerischen Kläranlagen bereits heute ohne grosse bauliche Änderungen für die Co-Vergärung in Frage kommen. Es wurden zunächst eingehende Auswertungen von Datenbanken zu schweizerischen Kläranlagen durchgeführt. Es zeigte sich, dass die notwendigen Informationen nur sehr bruchstückhaft vorhanden waren. Die Kriterien wurden daher zunächst auf die vier Parameter "Grösse", "Vorhandensein Faulturm mit bestehender Gasverwertung", "Vorhandensein Hygienisierungsstufe" und "Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft" eingeschränkt. Unter diesen vier Einschränkungen reduziert sich die Zahl der für die Co-Vergärung kurzfristig in Frage kommenden Anlagen von 1020 auf 47. Da bei der Grösse nur ARA's der Klassen 1-3, d.h. mit Behandlung von mehr als je 10'000 Einwohnergleichwerten, berücksichtigt wurden, reinigen diese verbleibenden 47 Anlagen immer noch rund einen Fünftel des schweizerischen Abwassers.

Bei einer direkten Befragung der Kantone zur Möglichkeit der Co-Vergärung zeigte sich, dass auch aus diesem Blickwinkel die Anzahl der zur kurzfristigen Umsetzung geeigneten Anlagen im Bereich von 50 Anlagen liegt. Detailliertere Angaben zur Situation in den einzelnen Kantonen werden vorgestellt. Das Potential der kurzfristig realisierbaren Co-Vergärung liegt bei der Behandlung von rund 120'000 t Abfall pro Jahr, was der Kapazität von rund einem Dutzend KOMPO-GAS-Anlagen entspricht. Es zeigte sich jedoch, dass mittelfristig die einschränkenden Kriterien voraussichtlich an Gewicht verlieren. Es wird der Vorschlag gemacht, auch kleinere Anlagen in die Co-Vergärung einzubeziehen, indem die Aufbereitungsanlage mobil auf einem LKW montiert wird, welcher im Turnus mehrere Faultürme mit aufbereitetem Substrat versorgt. Diese Lösung hat den Vorteil, dass biogene Abfälle gerade auch im dezentralen Raum, wo der Klärschlamm einfacher wieder in die ökologischen Kreisläufe zurückgeführt werden kann, kostengünstig vergoren werden können. In der philosophischen Schlussbetrachtung wird die Hypothese aufgeworfen, dass die Co-Vergärung primär durch den fehlenden Dialog der verschiedenen involvierten Parteien behindert wird.

Ein riesiges Biogaspotential liegt in der Landwirtschaft. Auch grosse landwirtschaftliche Biogasanlagen können jedoch beim heutigen, aus ökologischer Sicht unsinnig tiefen Ölpreisniveau kaum Rentabilität erreichen. Anhand einer detaillierten Betriebsanalyse wird nachgewiesen, dass die Co-Vergärung die Ökonomie einer Landwirtschaftsanlage ganz grundlegend verändert und dass weitere Synergien genutzt werden können. In Zukunft wird daher die landwirtschaftliche Co-Vergärung stark an Bedeutung gewinnen. Um die Praxisrelevanz der Co-Vergärung zu dokumentieren, werden verschiedene Praxisbeispiele aus der Schweiz und aus dem Ausland mit detaillierten Angaben zur ökonomischen und energetischen Situation vorgestellt.

Summary

Co-digestion of solid organic wastes and waste waters

In already existing biogas plants, co-digestion of solid organic wastes together with (thin) waste waters shows economic advantages in comparison to separate treatments. Financed by "Swiss Energy Research Foundation, NEFF" and by the canton of Bern, a study about the feasibility to co-digest wet, solid organic wastes together with primary sludges of sewage treatment plants (STP) has been carried out. In the practical part of the study, a plant to pre-treat the solid wastes was designed and constructed at the STP of Frutigen (BE). Up to one cubic meter of wastes provided by local super markets was added every day to the already existing fermenter of the STP. Data collected during 14 months of practical works showed that for the raw fruit and vegetable wastes a two step pretreatment is necessary. First the wastes were chopped and afterwards reduced to a size of 1-2 milimeters, in order to get a homogeneous suspension together with the primary sludge of the STP. The vegetable wastes used so far showed excellent digestibility. In addition, they seem to accelerate the digestion process as well as to increase the degree of the anaerobic degradation of the primary sludge. The energy demand for the pretreatment and digestion of the wastes was 85 kWh/ton of fresh wastes. 20% of the energy was needed for the hygienization, a step which does not seem to be necessary for this kind of waste in most of the cases, however. After using the gas for energy conversion, a net yield of 65 kWh/ton of electricity and 166 kWh/ton of heat was measured. Treating cooked kitchen wastes, the net energy production will be higher, because in this case a one step pre-treatment will be sufficient.

The costs for co-digestion on STP were calculated to be in the range of 82.- sFr/ton treating half a ton per day and 56.- sFr./ton treating one ton, respectively. These costs include all the pretreatment and treatment costs, but exclude the investment costs for the digestor as well as for the gas utilization equipment, which were assumed to be already on site.

A theoretical feasibility study showed that in Switzerland there is a short term potential for the co-digestion of about 120'000 tons of biogenic wastes on STP's per year. This potential can be realized without big investments on the evaluated STP's: these already are equipped with digestor, with gas utilization as well as with hygienization. They are also large enough to treat such amounts of wastes, that the costs for the pretreatment get relatively low. The sludge, which is very precious from an ecological point of view, is mainly used for agricultural purposes on the chosen STP's. Different new ideas are presented to increase the potential of co-digestion on Swiss STP's.

Economic studies about co-digestion on agricultural biogas plants showed that the co-digestion is a must at the current energy prices, which seem to be very much too low: biogas production does not bring financial profit in agriculture except if the farmer can receive some additional income by treating external wastes.

In 29 tables and 12 figures a lot of data is given on the process technology of co-digestion (on STP's and in agriculture), on the running parameters of the plants and on the quality of the products. Several existing plants are described including information on running parameters, costs and technologies in order to show the advantages of co-digestion.

1 Einleitung

1.1 Umschreibung der Co-Vergärung

Unter "Co-Vergärung" versteht man die gemeinsame Vergärung von festen biogenen Abfällen (z.B. Speisereste und Rüstabfälle aus Grossküchen, gewerbliche Lebensmittelabfälle etc.) zusammen mit flüssigen Substraten wie Klärschlamm oder Gülle. Für die Co-Vergärung geeignet sind - unter hier zu diskutierenden Voraussetzungen - bereits bestehende Faultürme von Kläranlagen oder grössere landwirtschaftliche Biogasanlagen. Die Co-Vergärung stellt eine interessante Möglichkeit zur kostengünstigen dezentralen Verwertung von festen Abfällen und zur Energiegewinnung aus Biomasse dar.

Die Co-Vergärung macht sich die Tatsache zunutze, dass in konventionellen Vergärungsanlagen oft relativ dünne Substrate mit einem hohen Wassergehalt vergoren werden. Dies ist energetisch und ökonomisch nicht interessant, weil überdurchschnittlich viel Wasser (93-97 %) auf Gärtemperatur aufgeheizt werden muss und weil der Fermenter im Verhältnis zur verarbeiteten organischen Substanz und damit zur Biogasproduktion sehr gross dimensioniert werden muss.

Wenn nun entsprechend fein zerkleinerte, feste biogene Abfälle (TS 10-25 %) einem dünnen flüssigen Substrat (Schlamm oder Gülle, TS 3-7 %) zugegeben werden, erhöht sich die hydraulische Belastung des Fermenters nur unwesentlich. Hingegen wird die Faulraumbelastung mit organischem Material erhöht, was zu einer Steigerung der raumspezifischen Biogasproduktion führt. Die bestehenden Infrastrukturen (Gärtank, Gasverwertung, Pumpen etc.) können in der Regel ohne große Modifikationen beibehalten werden. Durch die Erhöhung der Raumauslastung wird über die Gasproduktion die Rentabilität einer solchen Biogasanlage verbessert. In der Regel kann der Trockensubstanzgehalt in einem konventionellen Faulraum ohne weiteres von unter 5 % bis auf 8-10 % erhöht werden, ohne dass grosse bauliche Änderungen am Fermenter vorgenommen werden müssen.

1.2 Der vorliegende Bericht als Resultat eines Forschungsprojekts

Der vorliegende Bericht fasst Resultate und Erkenntnisse zusammen, welche im Rahmen einer Studie gewonnen wurden, welche durch den Nationalen Energie-Forschungs-Fonds (NEFF) und durch den Kanton Bern finanziert wurde. Mit der Studie wurden verschiedene Ziele verfolgt:

- **Abklärung der technischen Machbarkeit der Co-Vergärung in einem Faulturm einer schweizerischen Kläranlage mittlerer Grösse im Praxismassstab:** Dazu war es notwendig, eine Anlage zur Aufbereitung der Abfälle zu entwickeln und an einem geeigneten Standort aufzubauen. Im Versuchsbetrieb war zu untersuchen, ob die Co-Vergärung von Klärschlamm zusammen mit festen organischen Abfällen technisch machbar ist, bzw. welche Komponenten einer ARA den Einsatz einer Co-Vergärung eventuell einschränken. (Kapitel 2 bis 4)

- Gleichzeitig sollten im Rahmen des Versuchsbetriebs die **Auswirkungen der Co-Vergärung auf den Betrieb** einer Abwasserreinigungsanlage (ARA) abgegrenzt werden: Unter diesen Punkt fielen neben dem Sammeln von Erfahrungen mit der geeigneten Aufarbeitung der biogenen Abfälle auch die Konsequenzen für den Alltag des Klärwärts und die Auswirkungen der Co-Vergärung auf die Energiebilanz und die Ökonomie der ARA. (Kapitel 5 bis 7)
- Arbeiten zur **theoretischen Machbarkeit**: Abgeleitet von den Erfahrungen aus dem Praxisbetrieb sollte mit statistischen Daten und mit Umfragen die Möglichkeit der Co-Vergärung auf schweizerischen Kläranlagen abgegrenzt werden. Dabei waren die relevanten Auswahlkriterien für Standorte zu umschreiben und das Energiepotential grob abzuschätzen. (Kapitel 8 bis 9)

Im Verlauf der Arbeiten zeigte sich, dass speziell auch die **landwirtschaftliche Co-Vergärung** in Zukunft an Bedeutung gewinnen wird. Daher wird in Kapitel 10 der vorliegenden Broschüre auch kurz auf die Co-Vergärung auf Landwirtschaftsbetrieben eingegangen.

Eine Reihe von **Praxisbeispielen** mit Kenndaten soll dokumentieren, wo die Co-Vergärung heute steht, bzw. wo ein Interessent bereits realisierte Anlagen besichtigen kann, um sich ein praxisnahes Bild der Co-Vergärung zu verschaffen (Kapitel 11).

1.3 Ausgangslage des Forschungsprojekts

Es wurde von der Annahme ausgegangen, dass die Co-Vergärung folgende **Vorteile gegenüber anderen Entsorgungswegen**, bzw. dem Erstellen von neuen Gäranlagen, bietet:

- Es können bereits bestehende Faulraumkapazitäten besser genutzt werden.
- Weil die Infrastrukturen bestehender Anlagen (Fermenter, Verrohrung und Förderung, Gasverwertung, etc.) besser ausgelastet werden können, verbessert sich die Rentabilität einer solchen Anlage.
- Durch die erhöhte Gasproduktion verbessert sich auch die Energiebilanz der Gärانlage (energetische Amortisation der grauen Energie).
- Zusätzlich zur Erzeugung von Alternativenergie wird das Recycling von organischen Abfällen gefördert: Für biogene Nassabfälle (beispielsweise aus Gastronomie oder Gewerbe) wird neben der Verwertung als Tierfutter ein zusätzlicher, dezentraler Entsorgungsweg geschaffen. Dies ist speziell in Regionen wichtig, wo nicht genügend Abfälle anfallen, um eine Grossanlage ausschliesslich mit festen biogenen Abfällen zu betreiben.
- Die Kompostieranlagen werden von ungeeigneten Substraten entlastet (Nassabfälle).
- Bei der Co-Vergärung können sich Synergien ergeben, indem ein für sich allein schlecht gärbarer Abfall in Kontakt mit einem zweiten Substrat besseren Abbau zeigt.

Zu Beginn der oben erwähnten Studie waren verschiedenerorts schon diverse **Versuche zur Co-Vergärung** im Pilotmassstab durchgeführt worden:

- In Hildesheim wurde eine 50m³ Pilotanlage betrieben. Es wurde im mesophilen Temperaturbereich Rohschlamm zusammen mit zerkleinerten Bioabfällen vergoren. Die Anlage wurde mit täglichen Raumbelastungen von bis zu 2,5 kg organischer Trockensubstanz pro

Kubikmeter Reaktorvolumen (kg OS/m³.d) mit Gaserträgen bis zu 550 l/kg OS gefahren [6,7,8,35].

- In einer Gäranlage (50 m³) in Giessen (BRD) wurden Grossküchenabfälle zusammen mit Altfett vergoren. Die Abfälle wurden mit Hilfe eines Wirbelmixers zerkleinert und durchmischt (zu Projektbeginn noch keine Veröffentlichung, Besichtigung der Anlage 1993).
- Das Institut Fresenius in Taunusstein führte von 1985-87 Versuche in einer 1,2 m³ grossen Pilotanlage durch. Es wurden dabei ebenfalls Mischungen von Klärschlamm und gehäckselten organischen Abfällen verwendet [33].
- Langjährige Erfahrung mit der Co-Vergärung hatte ebenfalls die Gruppe um Prof. Cecchi in Venedig. In den Versuchsanlagen (3 m³) in Terni bzw. Treviso (It) wurden Primär- oder Sekundärschlamm in verschiedenen Verhältnissen zusammen mit der organischen Fraktion des Haushmülls vergoren [10,11,12,13,14].
- Versuche zur Co-Vergärung mit festen und flüssigen Substraten aus der Landwirtschaft beschrieb auch Wong [38,39].

Im Praxismassstab waren aber noch kaum Anlagen verwirklicht. Bekannt waren zwei Grossanlagen in **Italien** zur Co-Vergärung von Faulschlamm mit nachträglich separiertem Gesamtmüll aus dem Haushalt: In Bellaria wird aus dem Gesamthaushmüll maschinell die organische Fraktion aussortiert. Diese aufbereitete Fraktion wird anschliessend dem Faulturm einer Kläranlage zugeführt (Fma. ITALBA) [28]. Dasselbe Abfallkonzept wird in Bergamo angewendet (Fma. SNAMPROGETTI). Die nachträgliche Abtrennung der organischen Fraktion aus Gesamtmüll steht in der Schweiz allerdings heute nicht mehr zur Diskussion, da bei dieser Methode erfahrungsgemäss die organischen Komponenten unnötig mit Schadstoffen belastet werden (Schwermetalle etc.).

In Vegger in **Dänemark** wurde auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen (200m³ Volumen) Kuhgülle zusammen mit verschiedenen industriellen Substraten und/oder mit organischen Haushaltsabfällen vergoren [1,31].

2 Co-Vergärung auf der ARA Frutigen

Zunächst ging es darum, für die oben erwähnte Abklärung der technischen Machbarkeit eine geeignete Abwasserreinigungsanlage (ARA) zu finden. Es wurde eine **Kläranlage mittlerer Grösse** (Grössenklasse 3 = >10'000 Einwohnergleichwerte) ausgewählt. In Frutigen, im Berner Oberland, wurde eine ARA gefunden, welche auf 11'250 EW_{bio} (biologische Einwohnergleichwerte), bzw. 8'000 EW_{hydrologisch} ausgelegt worden war (Planungsdaten) und den gewählten Vorgaben voll entsprach. Die ARA Frutigen liegt im touristisch orientierten Kandertal des Berner Oberlands und ist somit umgeben von Tourismusorten mit relativ viel Hotelgewerbe. Der Standort wurde im Hinblick auf das ursprüngliche Konzept der Co-Vergärung ausgewählt, bei welchem vor allem Abfälle aus der Hotellerie verwertet werden sollten (siehe Kapitel 4.1.).

Nachdem sich Kanton Bern und die Gemeinde Frutigen dem Projekt wohlwollend gegenüberstellten, wurde der **Bau der Anlage** geplant. Die Abbildungen 2 und 3 (Seite 17 und 18) zeigen die



Blick über die Becken der ARA Frutigen zum Betriebsgebäude und Vorfaulraum (im Zentrum neben dem Betriebsgebäude)

(ca. 10-14 Chargen à ca. 1m³ pro Tag). Der hygienisierte Frischschlamm gelangt zunächst in den Vorfaulraum (240m³), wo die Vergärung hauptsächlich erfolgt. Nach durchschnittlich rund 20 Tagen Aufenthaltszeit wird der Inhalt des Vorfaulraums durch zwei Leitungen in den Nachfaulraum gepumpt (ebenfalls 240m³).

Es kann in Frutigen vom unteren Teil (Bezeichnung Schlamm) oder vom oberen Teil (Bezeichnung Trübwasser) Flüssigkeit vom Vorfaulraum in den Nachfaulraum gepumpt werden. Die Wahl des Pumprhythmus und die Auswahl der Leitung (unten oder oben) liegen im Ermessen des Klärwärts. Der Nachfaulraum kann ebenfalls über zwei Leitungen entleert werden. Der obere Strom ("Trübwasser") kann in die biologische, aerobe Stufe der ARA zurück gepumpt werden, während der untere, feststoffreiche Strom ("Schlamm") ins Schlammstapelbecken gelangt. Da der Betrieb der ARA in vielen Punkten durch Ermessensentscheide auf Grund der Praxiserfahrung des Klärwärts und durch momentan jeweils vorhandene Situationen (Wochenende, Personalsituation etc.) beeinflusst wird, war der Versuchsbetrieb mit dieser für Praxisanlagen wahrscheinlich typischen Voraussetzung konfrontiert.

Die Kläranlage war zumindest zur Zeit der Projektformulierung weniger stark belastet, als in den Planungsdaten angenommen worden war, und besaß somit eine genügend grosse Kapazität für eine Zugabe von Abfällen. Die Aufenthaltszeit in den beiden Faulräumen betrug durchschnittlich insgesamt rund 40 Tage. Die ARA Frutigen ist ausgerüstet für die Hygienisierung des Schlammes, und das entstehende Gas kann auf der ARA mittels Blockheizkraftwerk in elektrische und thermische Energie umgewandelt und verwertet werden.

Die **Kläranlage Frutigen** war damit sowohl in bezug auf ihre Lage, als auch auf ihre Grösse und technischen Ausrüstung prinzipiell **für die Co-Vergärung geeignet**.

Anlageteile einer ARA, welche durch die Co-Vergärung beeinflusst wurden. Die Schnittstelle zwischen der Aufbereitungsanlage der Abfälle und der Kläranlage war in Frutigen der Frischschlammraum.

Die biogenen Abfälle durchliefen folgendes **Verfahren**: Die Abfälle wurden zerkleinert und in einem Mischtank zwischengelagert. Von hier aus wurden sie dem Frischschlammraum zugeführt, wo ihre Vermischung mit dem Frischschlamm erfolgte. Die Hygienisierungsstufe (ATS: Aerobe Thermophile Schlammhygienisierung) wird in Frutigen vom Frischschlammraum aus chargeweise beschickt

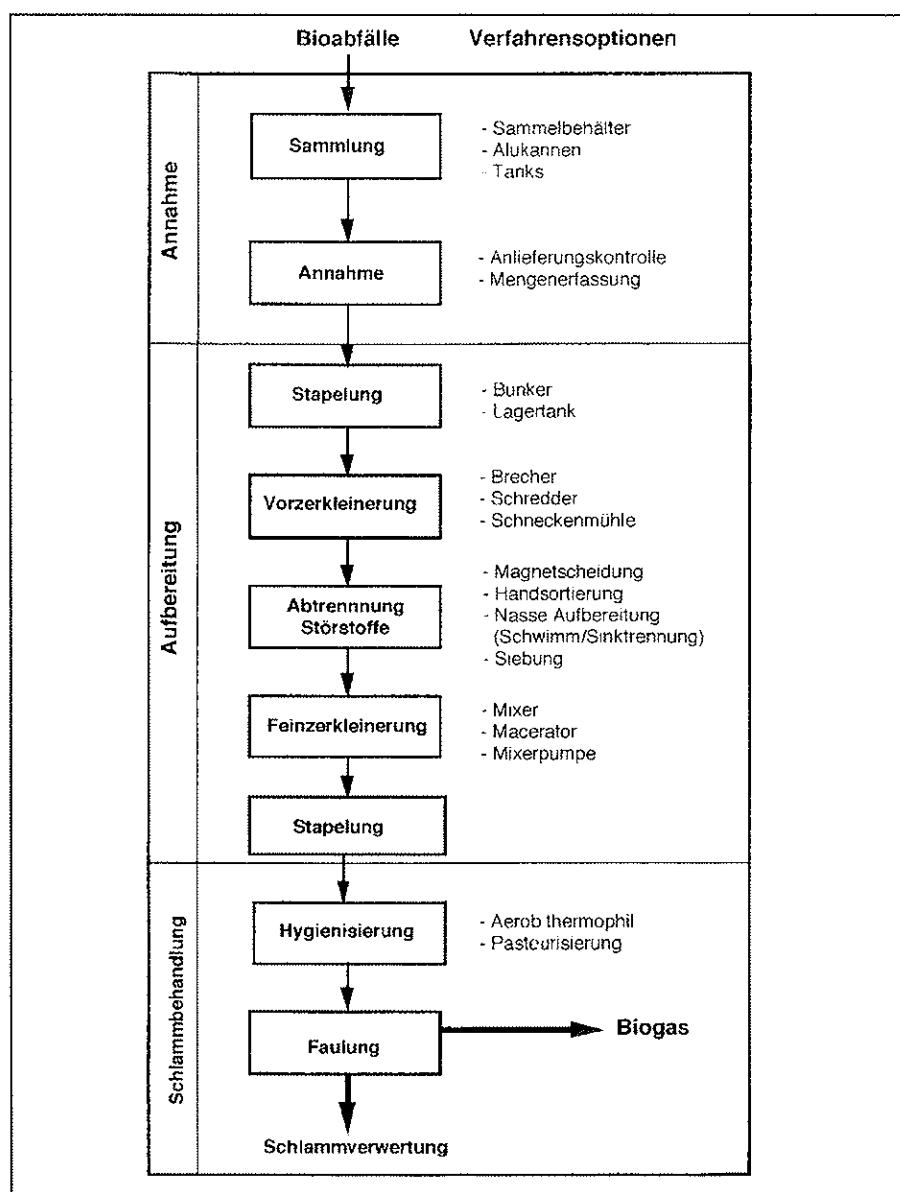
3 Die Aufbereitung von Abfällen

3.1 Aufgaben der Verfahrenstechnik

Zunächst galt es, die Aufgaben der Verfahrenstechnik in bezug auf die Abfallaufbereitung zu definieren. Das Flussdiagramm in Abbildung 1 zeigt einige Optionen für die verschiedenen Aufbereitungsschritte.

Abb. 1: (rechts)

Verfahrensschritte der Co-Vergärung



Bei der Co-Vergärung sind im wesentlichen folgende verfahrenstechnische Aufgaben zu lösen:

- Annahme und allfällige Zwischenlagerung von festen und/oder dickflüssigen Abfällen
- Gewichts- oder Mengenerfassung
- Abtrennen von Störstoffen im angelieferten Substrat
- Zerkleinern, Anmaischen und Durchmischen der Abfälle
- Stapeln der aufbereiteten Abfälle und Beschicken der Co-Vergärungsanlage (in den Schlamm- oder Güllerraum, die Hygienisierungsstufe oder direkt in den Faulturm).

In der Regel erfolgt die **Sammlung** von Restaurationsabfällen in **geschlossenen Gebinden**. Auf der Kläranlage muss deshalb eine Infrastruktur zum Leeren der Gebinde und zur Stapelung der gereinigten Abfallgebinde bereitgestellt werden (Normbehälter, Aluminiumkannen mit Deckel etc.). Zur Minimierung störender Geruchsemisionen werden die Abfälle mit Vorteil in einem voll geschlossenen Vorratsbehälter gestapelt.

Die **Mengenerfassung** erfolgt in der Regel über das Gewicht mit Hilfe einer Waage. Die gewogenen Mengen können somit als Basis zur Erhebung der Gebühren herangezogen werden. Bei flüssigen Abfällen kommt auch die Volumenerfassung beim Abpumpen in Frage (Füllstand, Durchflussmesser).

Eine der wichtigsten Aufgaben besteht in der **Abtrennung unerwünschter Stoffe**. Es muss verhindert werden, dass Fremdstoffe wie Metall- und Hartkunststoffteile sowie Plastikfetzen in den Schlamm gelangen. Neben einer unerwünschten Verschmutzung des Klärschlammes könnten dadurch auch betriebliche Probleme (Beeinträchtigung von Pumpen und anderen Aggregaten) verursacht werden.

Der **Zerkleinerung der Abfälle** kommt eine grosse Bedeutung zu. Die Abfälle müssen so aufbereitet werden, dass sie sich ohne Probleme mit dem Schlamm mischen lassen. Die Fließeigenschaften und die Größenverteilung der Partikel (> 2mm) müssen mit denjenigen des Schlammes vergleichbar sein. Um Schwimmdecken- und Sedimentbildung zu verhindern, ist auf eine gute Durchmischung zu achten. Ein allfälliger Stapeltank ist deshalb mit einem geeigneten Rührwerk auszurüsten. Eine möglichst kleine Partikelgröße beschleunigt zudem den Abbau, da die Oberfläche, an welcher die Bakterien die Feststoffe angreifen können, stark vergrössert wird.

3.2 Prinzipiell mögliche Aufbereitungsverfahren

Die angelieferten Abfälle können - sofern sie in genügend fester Form vorliegen - allenfalls über eine kurze Zeit auf einem entsprechend eingerichteten Platz gebunkert werden. Nach einer Anmaischung mit Klärschlamm kommen auch tankartige Behälter zur Zwischenlagerung in Frage. In diesem Fall ist es jedoch zur Reduktion von Geruchsemisionen vorteilhaft, die Abfälle **unmittelbar nach der Anlieferung aufzubereiten**, d.h. zu zerkleinern, von Störstoffen zu befreien, falls notwendig mit Schlamm zu vermischen und in einen Stapeltank zu pumpen. Zur Stapelung kommen daher zum Einsatz:

- Bunker (vorteilhaft geschlossen), eventuell in Kombination mit Förderbändern
- Tanks für pumpfähige flüssige Abfälle

Es ist von Vorteil, wenn die Bunker so gebaut sind, dass eine **Sichtkontrolle** möglich ist, um grobe, auffällige Störstoffe möglichst frühzeitig zu entfernen.

Falls die Aufbereitung ohne Zusatz von Schlamm erfolgt, d.h. bei einer sogenannten **Trockenaufbereitung**, ist eine Sortierstrecke mit einem Metallabscheider vorzusehen, wo sich beispielsweise Kaffeelöffel und andere Störstoffe magnetisch abtrennen lassen. Nichtmagnetische Stoffe müssen allerdings von Hand aussortiert werden. Zur trockenen Störstoffabtrennung kommen folgende Geräte in Frage:

- langsam laufende Förderbänder zur Sichtkontrolle und manuellen Sortierung
- Überbandmagnete zum Abscheiden von ferromagnetischen Metallen

Neben der oben beschriebenen Trockenaufbereitung kommt auch die **Nassaufbereitung** mit integrierter Schwimm-/Sinktrennung in Frage. Bei der Nassaufbereitung werden die Abfälle zuerst zerkleinert und anschliessend mit genügend Prozessflüssigkeit in einem Behälter suspendiert. Es ist dabei zu achten, dass nicht zusätzlich zugeführtes Wasser, sondern Medium aus der Gärlinie (Frischschlamm, Gülle etc.) zur Verdünnung eingesetzt wird. Durch das Anmaischen wird ermöglicht, dass sich Schwerteile (Metalle, Glas, Keramik, Steine etc.) absetzen und unten im Behälter durch eine Schwerstoffschleuse abgezogen werden können. Die Leichtfraktion, vorwiegend bestehend aus verschiedenen Kunststoffen und allenfalls holzigem Material, schwimmt in der Regel oben auf und kann dort beispielsweise mit Rechenvorrichtungen abgezogen werden. Normalerweise wird die Suspension mit einem in die Flüssigkeit eintauchenden Saugrohr auf mittlerer Behälterhöhe abgepumpt. Dadurch wird verhindert, dass Schwer- oder Leichtteile mit der Suspension abgezogen werden und in der Faulung oder in der Schlammpasteurisierung Störungen verursachen. Aus der Praxis bekannt sind in diesem Zusammenhang modifizierte Pulper der Papierindustrie, wie sie zuerst von BTA (München) eingesetzt wurden (vgl. das Beispiel Baden-Baden, Kap.11).

Weitere Möglichkeiten der **Abtrennung von Störstoffen** aus der Flüssigphase (Nassaufbereitung) sind modifizierte Rechengutwäscher oder Wirbelwäscher. Unter gewissen Voraussetzungen kommt auch eine sogenannte Strainpress in Frage (Schneckenpresse mit Siebmantel), wie sie zur Schlammsiebung verwendet wird. In diesem Fall muss jedoch bereits eine "Suppe" vorliegen. Andernfalls ist mit einem zu hohen Anteil an noch vergärbarem Siebrest zu rechnen. Zusammenfassend lassen sich zur Störstoffabtrennung in der Nassphase folgende Geräte einsetzen:

- Schwimm- /Sinktrennung in einem Rührbehälter ("Pulper")
- Rechengutwäscher und -presse
- Wirbelwäscher
- Strainpress

Je nach Art der Abfälle erfolgt die **Zerkleinerung** ein- oder zweistufig. Feste Abfälle werden in der Regel zuerst **grob vorzerkleinert**, da beispielsweise ein Mazerator nicht mit ganzen Gemüsestücken oder Früchten (ev. sogar Kokosnüssen!) beschickt werden kann. Dabei werden allfällige Störstoffe, wie Plastiksäcke, bei geeigneter Apparatewahl nicht allzu stark zerkleinert und können gegebenenfalls auch nach der Grobzerkleinerung noch von Hand ausgeschieden werden. Für die Vor- oder Grobzerkleinerung kommen folgende Geräte in Frage:

- Brecher
- Shredder
- Schnecken- oder Schraubenmühlen, Mixporter
- Scheibenmühlen

Vom Einsatz von sogenannt biologisch abbaubaren Säcken zu Einsammeln der Abfälle wird dringend abgeraten, da diese - soweit eigene und fremde Untersuchungsergebnisse bekannt sind - bei der mesophilen Vergärung nicht oder nur unbedeutend abgebaut werden, und da erfahrungsgemäss der Gehalt an anderen Störstoffen spürbar steigt, sobald in (geschlossenen) Säcken angeliefert werden darf.

Die **Feinzerkleinerung** erfolgt bei vorgängiger Grobzerkleinerung erst in einem zweiten Schritt. Bei der Verarbeitung von bereits vorgekochten und daher weichen Speiseresten reicht hingegen normalerweise eine Feinzerkleinerung. Durch die Feinzerkleinerung werden die Abfälle in eine suppenartige Suspension überführt, welche sich problemlos pumpen lässt. Die Feinzerkleinerung erfolgt normalerweise im **Umlaufverfahren** in einem Tank oder im **Durchlaufverfahren** mittels eines in eine Rohrleitung eingebauten Zerkleinerers. Häufig wird die Feinzerkleinerung in Kombination mit einer Schwimm-/Sinktrennung zum Abtrennen von Leicht- und Schwerstoffen eingesetzt. Dazu können folgende Geräte eingesetzt werden:

- Mazeratoren
- Futtermixer zur Schweinfutteraufbereitung
- Mixerpumpen
- Obstmühlen und Muser

Eine **Speicherung** der aufbereiteten Abfälle ist dann sinnvoll, wenn unregelmässig angeliefert wird und der Faulturm trotzdem regelmässig belastet werden soll. Die Speicherung der Suppe erfolgt in der Regel in einem Tank. Von diesem Tank aus kann der Faulturm (allenfalls über die Schlamphygienisierung) mit den entsprechenden Tageschargen beschickt werden. Zur Mengenerfassung werden in der Regel Durchflussmesser mit Totalisatoren eingesetzt. Dadurch können die Tageschargen exakt vorgewählt bzw. erfasst werden.

3.3 Auswahl und Beurteilung verschiedener Lösungen

Wie oben dargelegt, kommen für die Annahme, die Aufbereitung und Stapelung der Abfälle verschiedene Lösungen in Frage. In diesem Abschnitt werden die **Vor- und Nachteile** der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten kurz kommentiert. Nicht zuletzt hängt die Wahl der Verfahrenstechnik auch von den zu verarbeitenden Mengen ab. Der in bezug auf Steuerung und Automatisierung nötige Aufwand wird beispielsweise bei kleineren Mengen entsprechend geringer ausfallen, da weitgehend manuell gesteuert wird. Tabelle 1 listet Vor- und Nachteile der möglichen Komponenten auf, wie sie aus der Praxis bekannt sind.

Der Entscheid zugunsten einer Nass- oder Trockenaufbereitung hängt in erster Linie von der Art der zu verarbeitenden Abfälle ab. Werden hauptsächlich Speisereste verarbeitet, so wird mit Vorteil eine Nassaufbereitung vorgesehen. In der nachfolgenden Tabelle 2 wird eine grobe Bewertung der verschiedenen Aufbereitungsschritte bezüglich ihrer Eignung zur Behandlung von festen Abfällen (z.B. von Früchte- und Gemüseabfällen aus dem Handel) beziehungsweise von Nassabfällen (Speiseresten) vorgenommen. Die Bewertung in Tabelle 2 erfolgt auf Grund von Erfahrungen, die im Verlaufe dieses Projektes bzw. in andern Projekten gemacht worden sind.

Option Beurteilung

Stapelung

Bunker	Zur Stapelung von festen Abfällen geeignet, nicht aber für "nasse" Abfälle wie Speisereste. Verbreitet sind Flachbunker. Geschlossene Lagerung wegen Geruchemissionen vorteilhaft.
Lagertank	Zur Stapelung von flüssigen, pumpbaren Abfällen geeignet. Feste Abfälle müssen vorgängig zerkleinert und angemaischt (verflüssigt) werden.

Vorzerkleinerung

Brecher	Geeignet zur Vorzerkleinerung von festen, d.h. "trockenen" Abfällen. Allfällige Störstoffe werden nicht zu stark zerkleinert. Eine nachträgliche Auslese / Abscheidung von Störstoffen ist in der Regel noch möglich.
Shredder	Geeignet zur Vorzerkleinerung von reinen festen, nicht verschmutzten Abfällen. Eine nachträgliche Abtrennung von Störstoffen ist schwierig.
Mixporter	Schneckenmischer mit Schneidwerkzeugen. Geeignet zur Homogenisierung und Zerkleinerung von festen Abfällen. Eine Auslese von Störstoffen ist in der Regel möglich.
Schneckenmühle	Geeignet zur Vorzerkleinerung bzw. zum Aufschliessen von festen Abfällen. Eine Auslese von Störstoffen ist in der Regel möglich.
Scheibenmühle	Geeignet zur Vorzerkleinerung/Kalibrierung von festen Abfällen. Allfällige Störstoffe werden nicht zu stark zerkleinert. Eine Auslese/Abscheidung ist in der Regel möglich. Ist allerdings recht teuer und anfällig auf metallische Störstoffe.

Abtrennung Störstoffe

Magnetscheidung	Vollautomatischer Einsatz nach einer Vorzerkleinerung in Kombination mit einer Sortierstrecke oder nach Vorzerkleinerung mit Hilfe eines Sortierbandes möglich.
Handsortierung	Bei geeigneter Ausgestaltung des Arbeitsplatzes sinnvoll bei festen Abfällen, jedoch kaum geeignet für nasse, pumpbare Abfälle bzw. Speisereste.
Wäscher	Der Einsatz von Rechengutwäsichern und Wirbelwäsichern ist nur sinnvoll, falls die Inhaltstoffe der Suspension genügend zerkleinert und verdünnt worden sind. Andernfalls ist damit zu rechnen, dass ein hoher Anteil ungenügend zerkleinerter organischer Abfälle ausgeschieden wird.
Strainpress	Erfordert eine genügende Zerkleinerung und Homogenisierung der Abfälle. Andernfalls ist mit einem zu grossen Siebrückstand zu rechnen. Ausschliesslich für Speisereste geeignet.
Schwimm- /Sink-	Für sehr nasse oder aber angemaischte Abfälle möglich. Suspension muss trennungsdünne genug sein, damit Flotation und Sedimentation genügend gut abläuft.

Feinzerkleinerung

Mazerator	Gut geeignet für Abfälle ohne Störstoffe, andernfalls sind Probleme zu erwarten. Muss in eine Rohrleitung eingebaut werden. Betrieb im Umlauf über eine Schlaufe.
Mixer	Batchbetrieb in einem Behälter. Keine Probleme bei geringem Störstoffanteil. Kombination mit Schwimm- /Sinktrennung möglich.
Obstmühle	Prinzipiell für Früchte- und Gemüseabfälle geeignet. Probleme bei metallischen Störstoffen sind zu erwarten.
Muser	Für Früchte- und Gemüseabfälle sowie Speisereste geeignet.
Mixerpumpe	Gleichzeitige Zerkleinerung und Förderung möglich. Geeignet für Abfälle ohne Störstoffe. Kostengünstige Lösung.

Tab.1: Mögliche verfahrenstechnische Komponenten zur Aufbereitung von biogenen Abfällen

Verfahrensoptionen	Trockenaufbereitung		Nassaufbereitung Speisereste
	Feste Abfälle		
Stapelung			
Bunker	+++		-
Lagertank	-		+++
Vorzerkleinerung			
Brecher	++		+/-
Shredder	++		+/-
Schneckenmühle	++		+
Störstoffabtrennung			
Magnetabscheidung	++		+/-
Handsortierung	++		-
Schwimm- /Sinktrennung	+		+++
Feinzerkleinerung			
Mazerator	+/-		+++
Mixer	+/-		+++
Mixerpumpe	+/-		++
Pulper	++		++

Tab. 2: Grobe Bewertung verschiedener Verfahrenskomponenten für die Trocken- bzw. Nassaufbereitung von biogenen Abfällen

+++: sehr gut geeignet, ++: gut geeignet, +: geeignet, -: ungeeignet, +/-: mit Vorbehalt geeignet

3.4 Beschreibung der Aufbereitungsanlage Frutigen

Abbildung 3 gibt einen Überblick über die eingesetzten Anlagekomponenten. Die Wahl der Verfahrenstechnik erfolgte auf der Basis von verschiedenen Vorversuchen und Erfahrungen aus der Schweinfutteraufbereitung. Die Schnittstelle der Aufbereitungsschritte für Bioabfälle mit der bestehenden Kläranlage war im Fall Frutigen der Stapelbehälter für Frischschlamm ("Frischschlammvorlage"), aus welchem eine Hygienisierungsstufe in Chargen beschickt wird. Die Bioabfälle wurden über die folgenden Schritte aufbereitet:



Mixport: Sicht auf die Rückseite mit Auswurf-Trichter und (hier offenem, nach hinten ausgefahrenem) abschliessbarem Deckel

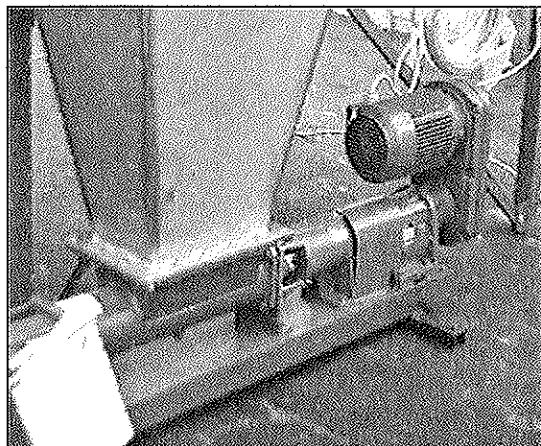
■ Mixport

Dieses Gerät wird normalerweise zur Aufbereitung von Viehfutter eingesetzt. Zwei gegenläufige, messerbestückte Schrauben zerkleinern und durchmischen die Füllung. Beschickt wurde der Mixport direkt über eine hydraulische Kammschüttung für Norm-Müllgrossbehälter.

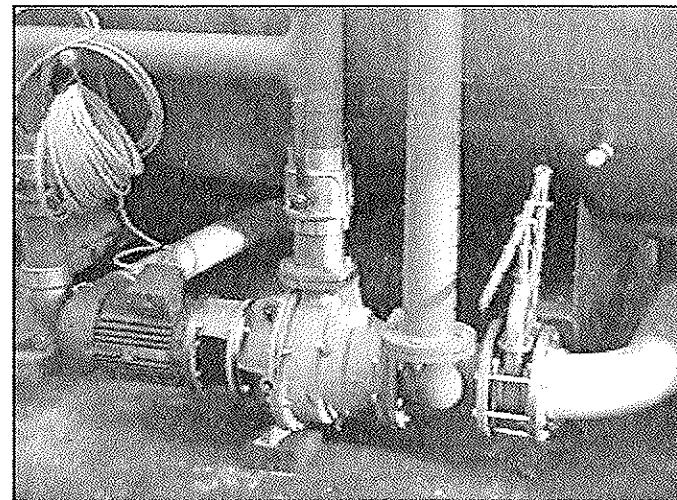
■ Mazerator

Das vorzerkleinerte Material wurde über eine Schneckenpum-

pe einem Mazerator zugeführt. Der anschliessende Lagertank fasste 7 m³ und diente zum Ausgleich der Schwankungen in Anlieferung und Zufuhr. Der Inhalt des Tanks konnte bei Bedarf über den Mazerator umgewälzt und dadurch weiter zerkleinert werden.



Scheckenpumpe unter dem Auswurfschacht des Mixports



Neben dem Lagertank in Zulaufrohr installierter Mazerator mit handgesteuert Umpumpmöglichkeit

Der "Bioabfall-Brei" wurde täglich via Durchflusssmesser in den Frischschlamm-Stapelraum gepumpt und dort mit dem Frischschlamm durchmischt.

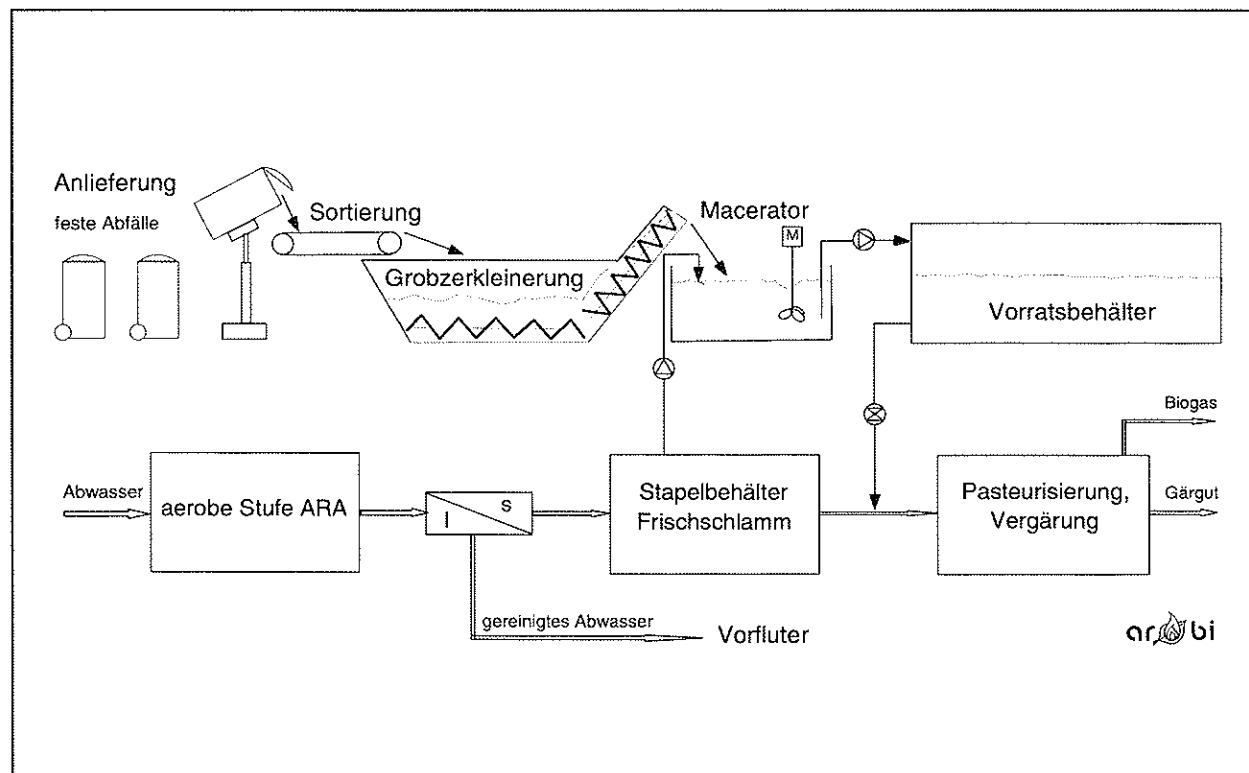
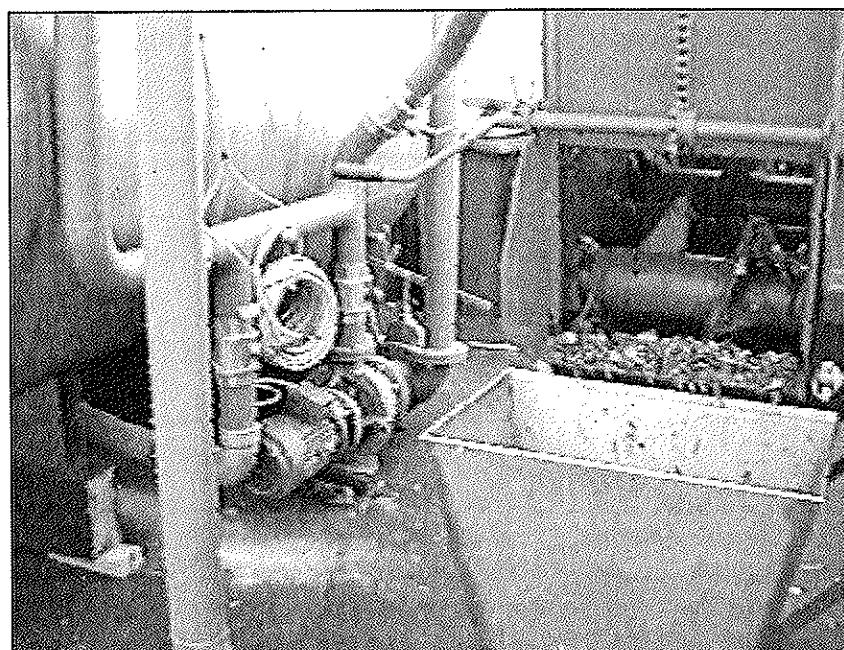
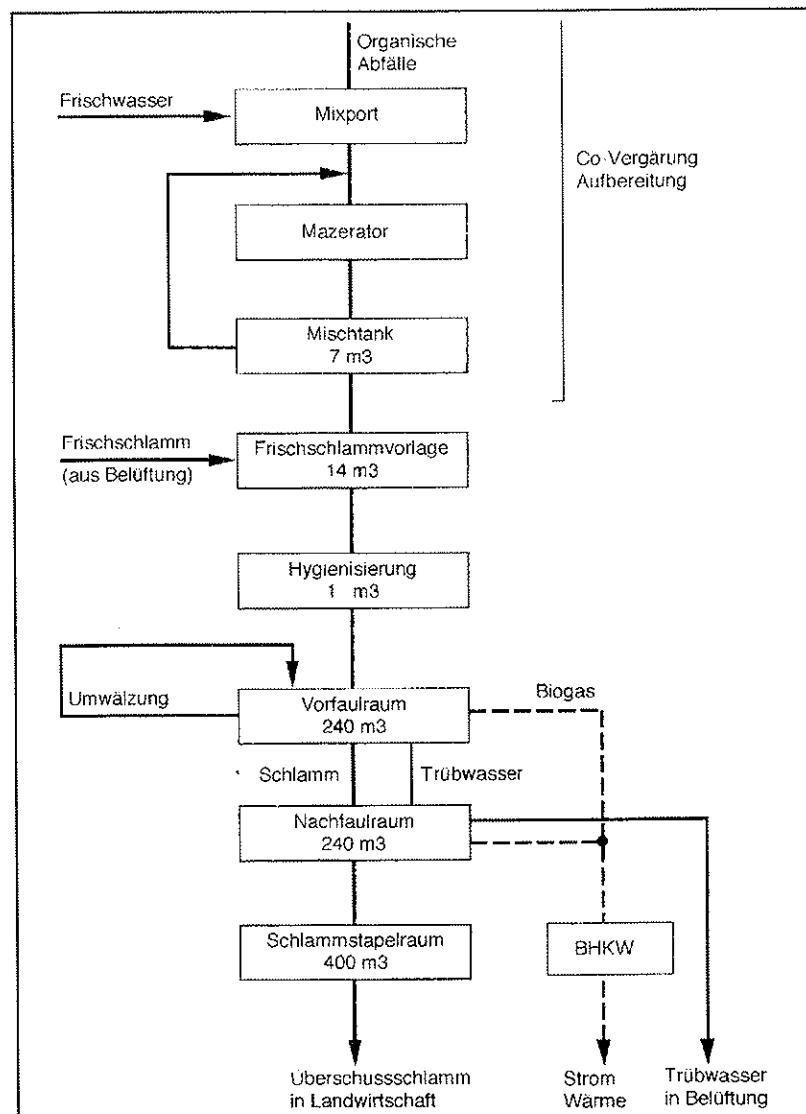


Abb. 2: Fließschema einer möglichen Anordnung einer zweistufigen Aufbereitungsanlage mit Grob- und Feinzerkleinerung für feste biogene Abfälle auf einer Kläranlage.

In Frutigen erfolgte die Bewässerung in der Grobzerkleinerung. Der Mazerator war daher in die Leitung zum Vorratsbehälter eingebaut. Der Abfluss des Vorratsbehälters konnte wieder über den Mazerator in den Tank rezirkuliert werden.

Abb.3: (rechts)

Blockdiagramm der Aufbereitungsanlage Frutigen



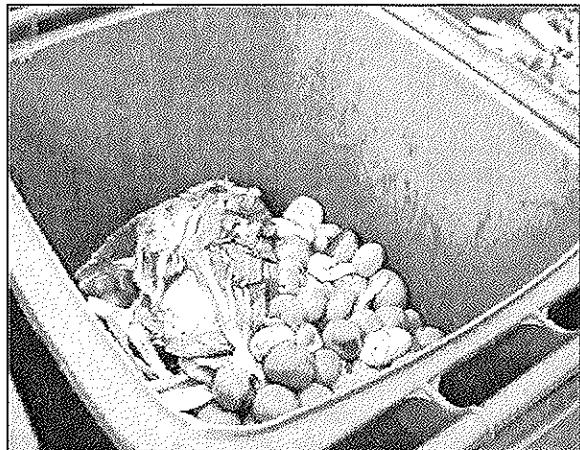
Rechts im Bild: Auswurftür des Mixports vor geöffnetem Auswurfschacht. Innen ist eine der beiden Schrauben zur Grobzerkleinerung erkennbar.

Links im Bild: Lagertank mit dem vorgeschalteten Mazerator und der Verrohrung.

4 Der Versuchsbetrieb in Frutigen

4.1 Verwendete Abfälle

Beim ursprünglichen Versuchskonzept war vorgesehen, vorwiegend **Hotellerieabfälle** zu verwenden. Dieses Konzept musste aufgegeben werden, weil die Hotelleriebetriebe - entgegen ursprünglichen Zusagen - nicht bereit waren, ihren Abnehmern von Abfällen (z.B. Schweinemästereien) für einen befristeten Versuchsbetrieb kein Material mehr zu liefern: Sie befürchteten, Gefahr zu laufen, nach Abschluss der Versuche ihre Abfälle nicht mehr über die gegenwärtig noch funktio-



nierenden Entsorgungswege verwerten zu können. Somit mussten andere organische Abfälle verwendet werden: Hauptlieferanten von Abfällen für die Versuche in Frutigen waren **Grossverteiler von Lebensmitteln**, d.h. Filialen von COOP aus dem Raum Thun/Spiez sowie die Verteilzentrale der MIGROS in Schönbühl. Während der Versuchsphase 2 (s. unten) wurden auch von der Firma Gourmador, einem Gemüseverarbeitungsbetrieb in Zollikofen, Abfälle zur Verfügung gestellt.

Folgende Abfallmengen wurden während den beiden Versuchsphasen V1 und V2 geliefert:

Lieferanten	V1 [kg]	V2 [kg]
COOP	14570	4280
Migros	10950	16120
Gourmador		4750
Total	25520	25150

Tab 3: Lieferanten und verwendete Abfallmengen in Kilogramm während den beiden Versuchsphasen V1 und V2.

Die Abfälle bestanden vorwiegend aus Salaten, Gemüsen und Früchten, umfassten aber auch z.T. Blumen und Erdreste, kurz: Material, wie es bei schlechtem Verkaufsgang von Nahrungsmittelver-

teilern regelmässig anfällt. Das Material enthielt teilweise Hartteile und andere **Störstoffe** (Kunststoffnetzchen von Früchten, andere Verpackungsmaterialien, Stützdrähte von zerbrechlichen Blumen, Kokosnüsse etc.), die manuell aussortiert werden mussten.

Zur Bestimmung der **organischen Fracht der Abfälle** wurden von jeder Mischtankfüllung der Trockensubstanzgehalt (TS) und der Gehalt an organischer Substanz (OS) bestimmt. Die Volumina der zerkleinerten und angemaischten Abfälle wurden mit einem Durchflussmessgerät bestimmt. Die Abfälle können wie folgt umschrieben werden:

Lieferant	TS (%FS)	OS (%TS)	Messungen
Migros	11,1 +/-4,1	92,4 +/-2,6	3
Coop	9,5	94,4	1
Gourmador	9,2 +/-1,2	93,2 +/-1,2	4

Tab. 4: TS/OS-Gehalte der unverdünnten Bioabfälle (Durchschnitt und Standardabweichung)

Den Abfällen musste etwas **Flüssigkeit zugeführt** werden, damit sie besser pumpbar wurden. Zur Verdünnung wurde aus praktischen Gründen Wasser verwendet. Bei einer definitiven Installation einer Co-Vergärungsanlage wird dazu vorteilhaft Frischschlamm eingesetzt, um so die hydraulische Belastung des Faulturms nicht unnötig zu erhöhen. Die zum Frischschlammraum zugeführten Abfälle aus dem Mischtank hatten im Durchschnitt einen TS-Gehalt von 6,4% +/- 1,1, bzw. einen OS-Gehalt von 91,0% +/- 2,1 (Versuchphase 2, Anzahl Proben =28).

Zur weiteren Umschreibung der in den Versuchen verwendeten Abfälle wurden zwei **Gesamtanalysen** (Nährstoffe und Schwermetalle) sowie **Hygieneuntersuchungen** (Anzahl Enterobakteriaceen) durchgeführt. Daten sind in den Unterkapiteln des Kapitels 5.5 zusammengefasst. Alle Schwermetallwerte lagen deutlich unterhalb der Grenzwerte für Klärschlämme (Stoffverordnung 1994). Die Anzahl Enterobakteriaceen schwankte im aufbereiteten Substrat um den Grenzwert von 100 /g Frischmasse (Werte zwischen 10 - max.10'000 Enterobakterien/g).

4.2 Versuchsprogramm

Auf der Kläranlage in Frutigen wurden während 14 Monaten (Nov. 1993 - Feb. 1995) Daten für die Co-Vergärung erhoben. Zusätzlich wurden für die Auswertungen Daten, die für das Gewässerschutzamt des Kantons Bern regelmässig erfasst werden, bis anfangs 1991 zurückverfolgt und teilweise ebenfalls berücksichtigt.

Die Messdatenerfassung auf der Kläranlage hatte zwei Hauptziele:

- Erfassen des **normalen Betriebszustands** der Kläranlage, sowie
- Vergleich dieses **Betriebszustands mit Versuchphasen**, bei welchen dem Frischschlamm aufbereitete organische Abfälle beigemischt wurden.

Insbesondere sollten die Messdaten und die praktischen Erfahrungen die Klärung der folgenden **Teilfragestellungen** ermöglichen:

- Erfüllt die gewählte Aufbereitungsanlage und Betriebsweise die gewünschten Funktionen? (Zerkleinerung, Mischung der Abfälle mit Frischschlamm, Störstoffabtrennung)
- Welchen Einfluss haben die zugeführten Abfälle auf den praktischen Betrieb der Kläranlage? (Zeitaufwand für Aufbereitung der Abfälle, Sedimentation oder Schwimmdeckenbildung in den Faultürmen, Funktionstüchtigkeit der Schlammhygienisierung, Beeinträchtigung von Pumpen etc.)
- Welchen Einfluss haben die zugeführten Abfälle auf die Biologie der Kläranlage, insbesondere auf die Gärung in den Faultürmen?
- Um wieviel kann die Gas- und Stromproduktion durch die Zufuhr von Abfällen erhöht werden, bzw. wie weit wird die Energiebilanz der Kläranlage durch die Co-Vergärung verbessert?
- Welchen Einfluss haben die zugegebenen Abfälle auf die Qualität des Endprodukts Klärschlamm?

4.3 Messprogramm

Die Messparameter, Probenahmestellen und Messintervalle, wie auch die erhobenen Daten selbst werden hier aus Platzgründen nicht im Detail publiziert, können jedoch auf Wunsch bei "arbi" eingesehen werden.

In erster Linie wurden folgende Parameter gemessen:

- Massen- und Volumenströme (Frischschlammzufuhr, Abfallmengen, Durchlaufmengen durch die Hygienisierungsstufe und die beiden Faultürme)
- Gasproduktion und -zusammensetzung (Vorfaulraum und Nachfaulraum)
- Stromproduktion (total)
- Hygieneparameter (Enterobakteriaceen, Überlebensfähigkeit von Tomatensamen)
- Schwermetalle und Nährstoffe vom Input der Faultürme (Frischschlamm und Abfälle) sowie vom Klärschlamm

Zeitlich wurde das Messprogramm wie folgt gestaffelt: Vom 22. Nov. 1993 bis zum 11. Feb. 1995 wurden täglich Daten auf der Kläranlage erhoben. Organische Abfälle wurden während zwei Versuchsphasen aufbereitet und zusammen mit Frischschlamm der Hygienisierungsstufe zugeführt. Die Daten wurden mit denjenigen von zwei Kontrollphasen verglichen.

Versuchsphase 1:	"V1":	31. Jan. 1994 bis 10. Mai 1994
Versuchsphase 2:	"V2":	16. Nov. 1994 bis 15. Dez. 1994
Kontrollphase 1:	"K1":	1. Feb. 1992 bis 31. Jan. 1993
Kontrollphase 2:	"K2":	15. Juni 1994 bis 23. Sep. 1994

Auf der Kläranlage traten sowohl im normalen **Betriebszustand** als auch während den Versuchsphasen mit Abfallzugabe **starke Schwankungen** der Messgrößen auf, welche wahrscheinlich auch auf die bereits erwähnte manuelle Steuerung zurückzuführen sind (vgl. Abb. 4). Da die Anlage mehrmals aufgrund von technischen Pannen (Probleme mit der Steuerung der Hygienisierung, Probleme mit dem Blockheizkraftwerk oder Revisionsarbeiten) nicht voll belastet werden konnte,

wurden nicht alle Daten im Detail ausgewertet. Die Versuchs- und Kontrollphasen wurden so ausgewählt, dass während einer möglichst langen Zeitspanne die Gasproduktion auf einem hohen Niveau mehr oder weniger konstant war und in dieser Zeit keine technischen Probleme auf der ARA auftraten.

Periode	OS total (kg OS/d)	Abfallanteil (% der OS)
K1	310	-
K2	315	-
V1	378	3,7
V2	404	17,1

Tab.4: Faulraumbelastung während den Kontrollphasen (K) und Versuchsphasen (V): Die totale OS setzt sich zusammen aus Frischlamm plus allfälliger Abfallzugabe (OS total = Frischschlamm plus Abfälle = 100%)

Bei der Versuchsphase **V1** wurde während rund 15 Wochen durchschnittlich nur knapp vier Prozent der organischen Substanz des Frischschlamms zugegeben, da zunächst die **technischen Aspekte** der Aufbereitung und der Zugabe im Vordergrund standen. Die zugegebenen Mengen waren im Verhältnis zum Frischschlamm, welcher in Menge und TS-Gehalt stark streute, kaum eindeutig nachweisbar.

In der Versuchsphase **V2** hingegen wurden dann erheblich mehr Abfälle eingespeist (vgl. Tab.5). Während eines Monats wurden täglich zu den rund 11m³ Frischschlamm (335 kg OS) noch ca. 1,2 m³ zerkleinerte und verdünnte Abfälle hinzugefügt (68,8kg OS/d). Diese Menge entspricht rund 20 % der OS des Frischschlammeintrags oder etwa der halben Menge an gärbarem organischen Abfall, wie er aus den Haushalten im Einzugsgebiet der ARA erwartet werden könnte¹⁾. Bei V2 wurde somit die **Raumbelastung** der Faultürme mit OS um rund **20 % erhöht**.

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Gasproduktion im Jahr 1994. Die Schwankungen der Gasproduktion korrelieren mehr oder weniger mit den zugeführten Mengen an organischer Substanz (liniert: Frischschlamm plus Abfälle). Eingezeichnet sind auch die Mengen an organischer Substanz der zugeführten Abfälle (schwarze Fläche).

1) Dies entspricht rund 250 Jahrestonnen oder bei 8'000 Einwohnern rund 35 kg/E.a. Pro Person fallen vergleichsweise jährlich im Haushalt bis zu 200 kg biogene Abfälle an, wovon jedoch nur knapp die Hälfte gärbar ist. Für die Co-Vergärung kommen primär Abfälle aus Grossküchen und Gewerbe in Frage (vgl. Diskussion).

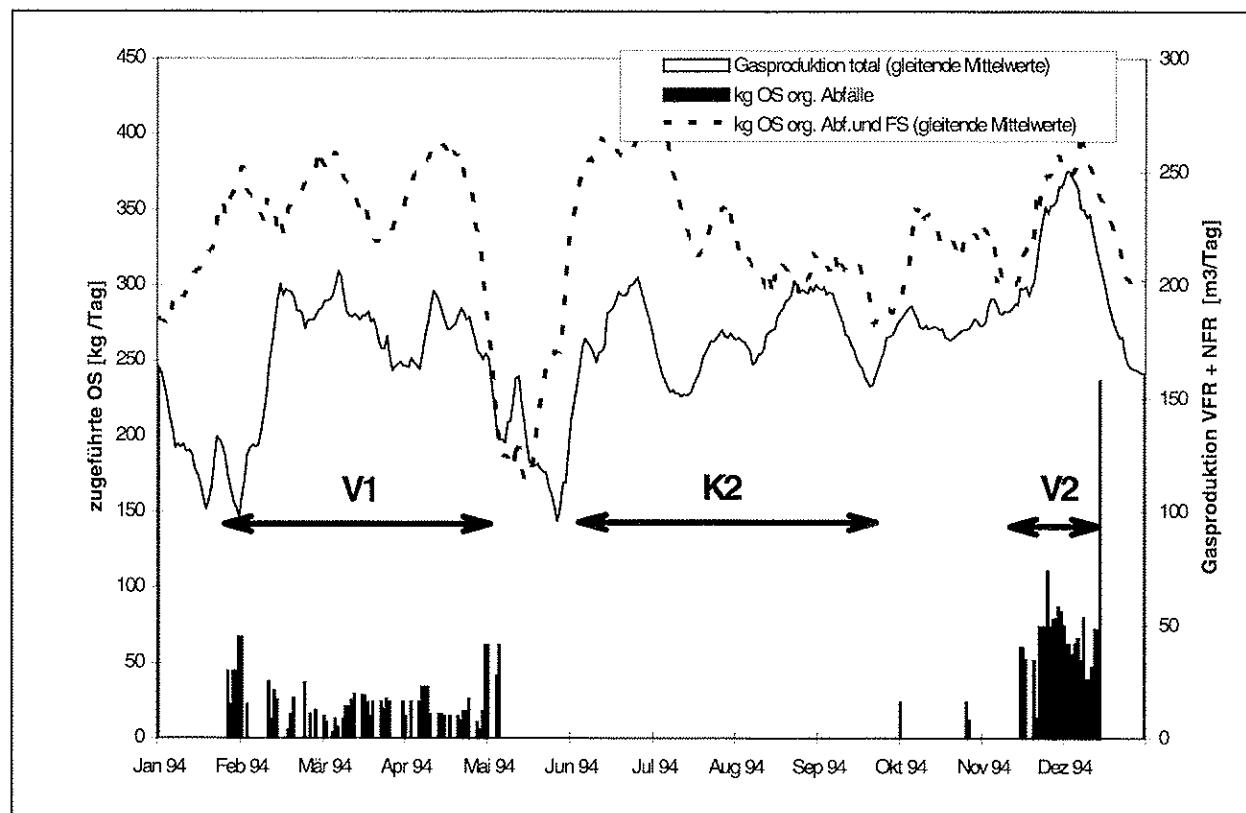


Abb. 4: Gasproduktion in Funktion der zugegebenen Mengen OS durch Frischschlamm und Abfälle
 Abkürzungen: OS=Organische Substanz; VFR=Vorfaulraum; NFR = Nachfaulraum; FS=Frischschlamm;
 Abf.= Abfälle; gleitende Mittelwerte über jeweils 15 Tage

4.4 Versuchsüberwachung und Analysenmethoden

Der grösste Teil der **Arbeiten auf der Kläranlage** (Probenahme, Ablesen der Messparameter) und ein Teil der **Analytik** (Trockensubstanzgehalt und Gehalt an organischer Substanz) wurden aus praktischen und finanziellen Erwägungen vom Klärwart ausgeführt. Während der intensiveren zweiten Versuchsphase wurde der Versuch von einem Mitarbeiter der arbi vor Ort betreut.

Die **Analysen für Nährstoffe und Schwermetalle** wurden vom Labor der arbi sowie teilweise von einem externen Labor durchgeführt. Für die Bestimmung der Anzahl Enterobakteriaceen im Schlamm wurde ein Labor in Bern zugezogen, nachdem bei einem Labor aus der Region beim Frischschlamm und wahrscheinlich auch beim Klärschlamm offensichtlich unzutreffende Resultate ermittelt worden waren.

Folgende Analysenmethoden kamen zur Anwendung: **CSB und Ammonium**: photometrisch nach Hach; **Flüchtige Fettsäuren**: Gaschromatographie; **Faseranteil**: 1 Liter Medium wurde durch ein Sieb mit Maschenweite 4 mm filtriert. Vom Rückstand wurde der Trockensubstanzgehalt gemessen; **Gaszusammensetzung**: Gasanalyse mittels Gaschromatographie, bzw. vor Ort: CO_2 -Bestimmung durch Ausschütteln in KOH.

Die **Überlebensfähigkeit von Tomatensamen** im Faulraum wurde durch Zugabe von je 5 g Tomatensamen (Berner Rosen, Lieferant: Samen-Mauser) in Nylonnetzchen ermittelt: jeweils drei Nylonnetzchen wurden beschwert und in die Flüssigkeit des Vorfaulraums gehängt, wo der intensive Schritt der Gärung stattfindet. Die Säckchen wurden nach 7, 15 und 35 Tagen dem Faulraum entnommen. Je 200 Samen gelangten in Petrischalen zusammen mit derselben Anzahl unbehandelter Kontrollsamen in einer Klimakammer zur Aussaat (25°C; 12h Licht/12h Dunkelheit). Die Kontrollen wurden nach 8 Tagen ausgewertet. Die Keimraten betrugen bei den Kontrollen zwischen 95 und 98%. Als positiv wurden jene Samen gewertet, welche eine Keimwurzel > 3mm entwickelt hatten. Bei den Kontrollsamen waren bei normierter Behandlung im Mittel nach 8 Tagen eine Keimwurzel von ca. 2 cm, ein Stengel von ca. 1 cm und Keimblätter entwickelt. Die Samen aus dem Vorfaulraum wurden nach 8, 15 und 25 Tagen beurteilt, um allenfalls auch eine Keimverzögerung feststellen zu können.

5 Resultate

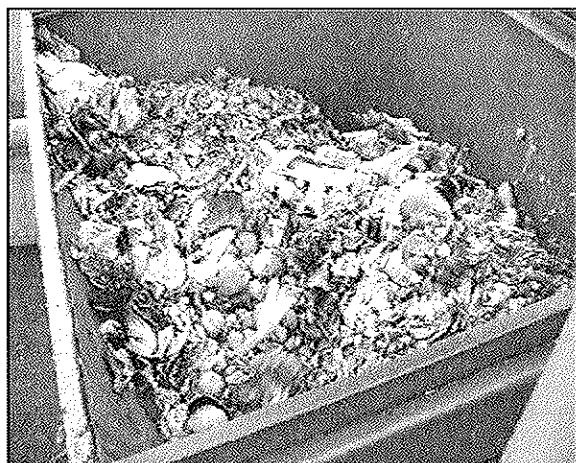
5.1 Aufbereitung der Abfälle

Die auf der Kläranlage Frutigen eingesetzten **Anlageteile** zur Aufbereitung der Abfälle erfüllten die **folgenden Funktionen**:

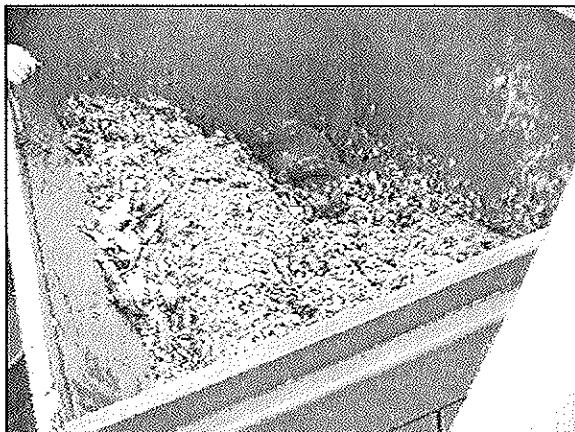
- Durch den "Mixport" (Grobzerkleinerung) und den Mazerator (Feinzerkleinerung) wurden die Abfälle soweit **zerkleinert**, dass sie mit Zugabe von etwas Wasser bei Korngrößen im Millimeterbereich pumpfähig wurden und problemlos dem Frischschlamm beigemischt werden konnten.
- Durch den Einsatz des 7 m³ Misch- und Stapeltanks konnten **Anlieferungsschwankungen** der Abfälle **ausgeglichen** und die Zudosierung nach Bedarf variiert werden.



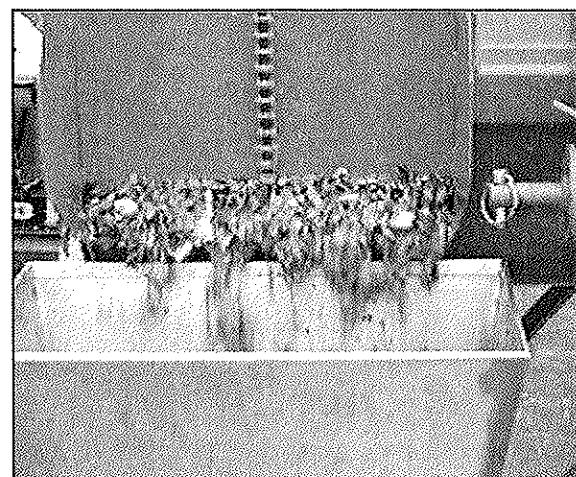
Frisch in den 'Mixport' eingefüllte Abfälle



Nach erster Durchmischung



Nach abgeschlossener Grobzerkleinerung (nach rund 20 Minuten Betrieb der Schrauben; eine Schraube ist nun in der hinteren Ecke erkennbar)



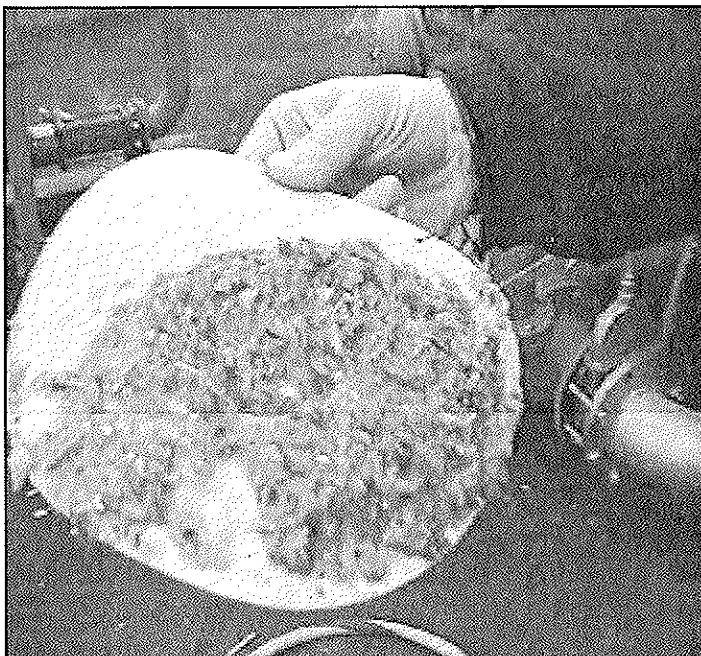
Austrag in den Auswurfrichter

Wegen folgender **Störungen** mussten Gegenmassnahmen ergriffen werden:

- Im **Mischtank** bildete sich bei Versuchsbeginn eine **Schwimmdecke**, welche durch Umpumpen nicht zum Verschwinden gebracht werden konnte. Mit einem nachträglich eingebauten Rührwerk konnte die Schwimmdeckenbildung unterdrückt werden.
- Die Bioabfälle waren nicht frei von **Störstoffen**. Blumendrähte und Plastikverpackungen von Gemüse, aber auch pflanzliche, z.T. verholzte Hartteile, beeinträchtigten die Funktion der Aufbereitungsapparaturen (Pumpen, Mazerator). Eine manuelle Aussortierung dieser Stoffe war unumgänglich.

Beim Aufbereiten der Abfälle konnten folgende **Erkenntnisse** gewonnen werden:

- Um ein pumpfähiges Material zu erhalten, muss festes Substrat, wie es in Frutigen mehrheitlich verwendet wurde, mit dünnflüssigem Frischschlamm **angemaischt** werden (dies geschah im Versuchsbetrieb mit Frischwasser).
- **Feste Abfälle**, d.h. Substrate wie Gemüse, welche im Vergleich zu Speiseabfällen einen "trockenen" Eindruck hinterlassen, brauchen eine **zweistufige Aufbereitung**.
- Das Material muss mehrmals im Kreislauf über den Mazerator geführt werden, um die gewünschte **homogene Zerkleinerung** zu erreichen. Dieser Schritt ist energieintensiv.
- Während V2 waren pro Monat der Mixport 35 h, die Schneckenpumpe 23 h und der Mazerator 63 h im Einsatz. Zusätzlich bestand noch ein Energieaufwand für Anlageteile, wie für die Hub-/Kippvorrichtung zum Einkippen der Abfallbehälter in die Grobzerkleinerung. Dieser Energieanteil war allerdings geringer. Die Anlagenteile benötigten während dieser Zeit **rund 600 kWh Betriebsenergie**. Die Energiebilanz der Anlage wird in Kapitel 6 vertieft behandelt.



Auf eine Korngrösse im Millimeter-Bereich mazerierte Abfälle

Die **Funktionen der Aufbereitung** wurden insgesamt **erfüllt**, waren aber durch die manuelle Aussortierung von Störstoffen und die Behinderung der Pumpen durch Hartteile relativ zeit- bzw. arbeitsintensiv. Hier sind noch Verbesserungen denkbar, welche die Störstoffauslese bei einer Trockenaufbereitung vereinfachen. (Eine Nassaufbereitung wäre diesbezüglich einfacher zu automatisieren; vgl. oben).

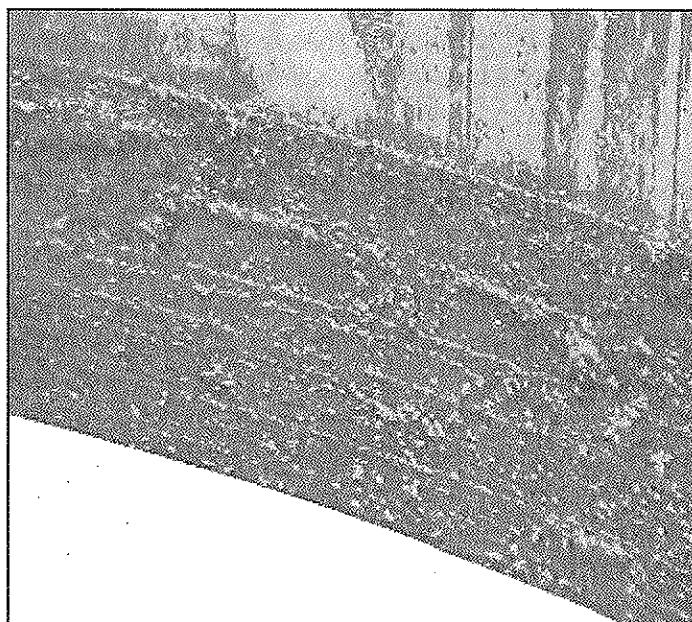
5.2 Einfluss der Abfälle auf den Praxisbetrieb der Kläranlage

Auf der Kläranlage Frutigen gab es während der gesamten Versuchsperiode immer wieder Probleme mit der **Hygienisierungsstufe** (Aerobe Thermophile Schlammhypgienisierung, ATS). Unter anderem war die Hygienisierungsstufe infolge von unvorhergesehenen Umbauarbeiten an der Belüftungsstufe und dadurch grösserem Schlammaufkommen an ihre Kapazitätsgrenze gelangt, bzw. überschritt diese. Dadurch konnten die zur werden. Der Hygienisierung nötigen Temperaturen nicht mehr in nützlicher Frist erreicht werden. Um die Versuche durchführen zu können, musste teilweise Schlammm in eine andere ARA abtransportiert Luft-Injektor der ATS verstopfte mehrmals. Diese Störung trat allerdings auch im Normalbetrieb, d.h. ohne die Zugabe von Abfällen immer wieder auf. Die Störstoffe (z.B. Binden) stammten vorwiegend aus dem Frischschlammm und nicht aus den biogenen Abfällen. Die Rechenanlage der ARA Frutigen wies gemäss Aussagen des Klärwärts eine ungenügende Reinigungsleistung auf.

Ob die **kleine Dimensionierung der Schlammhypgienisierung** in Frutigen (auf Grund eingeschränkter Platzverhältnisse) ein Einzelfall ist, oder ob generell die Hygienisierungsstufe der Kläranlagen für die Co-Vergärung eine Kapazitätsgrenze darstellt, konnte noch nicht beantwortet werden. Es stellt sich in diesem Zusammenhang natürlich gleichzeitig die Frage, ob eine Hygienisierung der z.T. sehr sortenreinen, kaum kontaminierten Abfälle überhaupt notwendig ist.

Nach Beendigung von V1 (Mai 1994) war auf der **Aussenseite des Gasdomes** des Nachfaulraumes in jener Zone, welche zeitweise in das Gärget eintaucht, eine maximal 2-3 cm dicke **Ablagerung** feststellbar (Mischung aus Pflanzenfasern, Tannennadeln, Haaren, Samen und anderen Bestandteilen). Gemäss Aussagen des Klärwärts war ihm dies in den letzten 20 Betriebsjahren noch nie in diesem Ausmass aufgefallen. Es wird vermutet, dass Faseranteile der Bioabfälle mit zu diesem Schichtaufbau beigetragen haben, indem sie als Textur die Anlagerung von Klärschlamm ermöglichten. Dieser Schichtaufbau wird durch periodisches Eintauchen und Abtrocknen des Gasdomes gefördert. Die Ablagerungen im Gasdombereich führten zum Verkleben der Kabelzüge der Füllstandsmessung. Dadurch wurde die Mobilität des Schwimmkörpers beeinträchtigt. In kleinerem Ausmass wurden auch Ablagerungen im periodisch nicht benetzten, oberen Bereich der Betonwandung des Vorfaulraumes festgestellt.

Vor Beginn von V2 wurden die Ablagerungen entfernt. Die Ablagerungen wurden dabei in den Nachfaulraum zurückgespült. Im Verlauf der Versuchsperiode 2 wurde ein **geringfügiger Wiederaufbau** der Schicht am Gasdom festgestellt. Teilweise handelte es sich dabei vermutlich um die gleichen, abgespülten Ablagerungen.



Ablagerung am Beton der Fermenterinnenwand. Die helle Fläche unten im Vordergrund ist der hier sehr tief abgetauchte Gasdom

Ob Teile der Bioabfälle in den Faulräumen zu **Sedimentationen und Schwimmdecken** führten, lässt sich nur schwerlich nachprüfen. Optisch konnte durch die Bullaugen keine Schwimmdeckenbildung festgestellt werden. Durch die Abfallzugabe bewirkte Veränderungen in den Faultürmen wurde mittels den Parametern TS (Trockensubstanzgehalt) und dem Faseranteil (>4mm) ermittelt. Die beiden Parameter wurden an verschiedenen Probenahmestellen des Vor- und Nachfaulraums gemessen, um Kenntnis zu gewinnen, ob die Zugabe von Abfällen stellenweise zu einer Akkumulation von Feststoffen führen kann.

Probenahmestelle	Kontrollphase 2 TS (% FS)	Versuchphase 2 TS (% FS)
Auslauf VFR: Schlamm	4,9 +/- 1,5	3,3 +/- 0,2
Auslauf VFR: Trübwasser	3,5 +/- 1,0	3,6 +/- 0,5
Umwälzung VFR	keine Messung	3,3 +/- 0,2
Auslauf NFR: Schlamm	8,1 +/- 0,6	5,9 +/- 0,1
Auslauf NFR: Trübwasser	1,4 +/- 1,1	2,3 +/- 0,8

Tab. 6: Trockensubstanzgehalte in den Faulräumen, Durchschnittswerte und Standardabweichungen von Kontroll- und Versuchphasen (mit Abfallzugabe)

Schlamm = Probenentnahme im unteren Teil des Faulraums; Trübwasser = Probenentnahme im oberen Teil des Faulraums

Die TS-Werte in Tabelle 6 zeigen, dass durch das (nicht systematische) Umpumpen von Material zwischen den beiden Faulräumen sowie durch Schwankungen im TS-Gehalt des Frischschlamms **recht grosse Streuungen** entstehen können, welche in mehreren Fällen die durch die Abfallzugabe bewirkte TS-Änderung als statistisch nicht signifikant erscheinen lassen.

Die TS des Schlamms war jedoch während V2 trotz Abfallzugabe im Auslauf der beiden Faulräume durchschnittlich deutlich tiefer als in der Kontrollphase. Die Werte sprechen dafür, dass die Abfallzugabe zu einem **verbesserten Abbau des Schlamms** führt. Erklärbar ist dieses Phänomen mit einem verbesserten Angebot von Stoffen, welche für die abbauenden Bakterien wichtig sind. Andere Indizien (s.Kap.5.4) stützen diese Hypothese.

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des **Faseranteils** unmittelbar vor, während und nach V2. Die Daten zeigen, dass im Vorfaulraum der Faseranteil gleichzeitig mit der Abfallzugabe um ca. einen Faktor 3 **anstieg** und auch längerfristig (2 Monate nach Versuchsende) erhöht blieb. Diese längerfristige Erhöhung ist allerdings im Zusammenhang mit der Abfallzugabe schlecht erklärbar, da die pflanzlichen Fasern einerseits weitgehend anaerob abbaubar sind und da andererseits ja ständig Material vom Vorfaulraum zum Nachfaulraum abgeführt wird, was zu einer Ausdünnung der mit den Abfällen zugeführten Fasern führen müsste. Der Anteil sank jedoch nach Abschluss der Versuche nicht wie erwartet ab, so dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass noch weitere, zur Zeit nicht bekannte Faktoren für die Erhöhung des Anteils verantwortlich sind (neue Komponente im Abwasser, etc.). Im Nachfaulraum ist der Faseranteil generell geringer als im Vorfaulraum. Auch hier wurde im Verlauf der Abfallzugabe eine (allerdings nur kurzfristige) Erhöhung des Faseranteils beobachtet.

Bei den aus pflanzlichem Material stammenden (Zellulose-)Fasern ist zu erwarten, dass sich infolge ihres Abbaus in den Faultürmen ein **Gleichgewicht zwischen Zufuhr und Abbau** einstellt. Ob daher solche, vorwiegend rohe Gemüseabfälle langfristig zu betrieblichen Schwierigkeiten durch Freisetzung von Fasern führen könnten, ist höchst fraglich. Während und anschliessend an die Versuche waren in Frutigen - mit Ausnahme der erwähnten Reinigungsarbeit im Bereich des Gasdoms - keine betrieblichen Einschränkungen feststellbar.

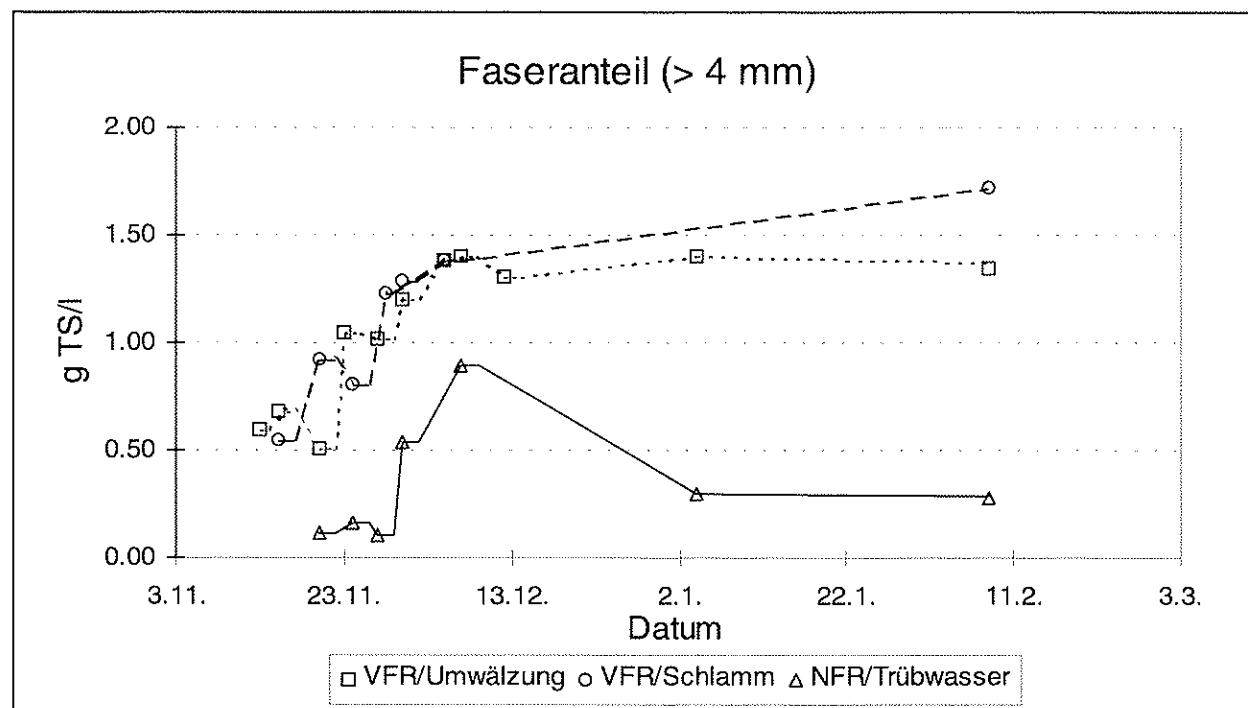


Abb. 5: Verlauf des Faseranteils im Vorfaulraum und Nachfaulraum während und im Anschluss an die Versuchsphase 2 (16.11.-15.12.95)

Im Februar 1995 wurde die **Hygienisierungsstufe** geöffnet und nach allfälligen Ablagerungen durch die Abfälle untersucht. Es wurden dabei keine zusätzlichen Ablagerungen festgestellt. Ebenfalls wurden nie Beeinträchtigung der Pumpen durch die Zugabe von Abfällen beobachtet.

Die Co-Vergärung bringt natürlich in Abhängigkeit der verwerteten Abfallqualität und der eingesetzten Technologie eine zusätzliche **Arbeitsbelastung** für den Klärwart mit sich. Im normalen Praxisbetrieb, d.h. mit einer den jeweiligen Abfällen optimal angepassten Behandlungstechnologie zur Zerkleinerung und zur Störstoffabtrennung, dürfte dieser Mehraufwand jedoch unter dem Aufwand für eine separate Behandlung der Abfälle (beispielsweise auf einem Kompostwerk) liegen. Der **Praxisbetrieb** der ARA wird durch die Zugabe von Abfällen **nicht nennenswert gestört**, unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Komponenten der ARA genügend grosse Reserven aufweisen. Um einen störungsfreien Betrieb der Kläranlage zu garantieren, ist eine manuelle oder maschinelle Abtrennung der im Substrat eventuell vorhandenen Störstoffe allerdings Voraussetzung.

5.3 Einfluss der Abfälle auf die Biologie der Faulung

Bei einer **Störung des Faulungsprozesses** nimmt meistens die Gasproduktion ab, der CO₂-Gehalt nimmt zu bzw. der Methangehalt ab, und es werden Fettsäuren im Faulraum angehäuft. Insbesondere die Zunahme des Propionsäuregehaltes ist ein geeignetes Mass, um eine Überlastung festzustellen. Parallel zu einer Erhöhung der Fettsäuren nehmen bei einer Störung auch andere gelöste organische Bestandteile zu. Der gelöste chemische Sauerstoffbedarf (CSB) ist ein Mass für den Gehalt an gelösten, vorwiegend organischen Bestandteilen. Der Abbau der partikulären organischen Substanzen im Faulraum kann durch die Beobachtung des OS-Gehalts überwacht werden.

Im folgenden soll der Verlauf dieser Messparameter während V2 besprochen werden:

- Die **Gasproduktion** wurde durch die Abfallzugabe während V2 stark erhöht. Die Zunahme entspricht der erhöhten organischen Belastung (vgl. Kapitel 5.4).
- Eine signifikante Veränderung der **Gaszusammensetzung** wurde nicht festgestellt. Der CO₂-Gehalt sank während des Versuchs tendenziell, während der Methangehalt leicht zunahm.
- Die niederen **Fettsäuren** (C2-C6) wurden während diesem Versuch viermal im (umgewälzten) Vorfaulraum gemessen. Bei allen 4 Messungen konnten keine Fettsäuren in grösseren Konzentrationen nachgewiesen werden. Dies deutet darauf hin, dass der Abbau- prozess bzw. die Methanisierung ungehindert und vollständig abgelaufen ist, und dass die **Belastungsgrenze** des Faulturms **nicht erreicht** worden ist, bzw. dass noch grosse zusätzliche Kapazitäten vorhanden gewesen wären.
- Der **CSB** wurde während der V2 rund zwanzigmal im Vorfaulraum (Zufuhr und Auslauf), im Frischschlamm und im Nachfaulraum gemessen. Während im Zulauf zum Vorfaulraum (Ausgang Hygienisierung) im Durchschnitt 6820mg CSB/l gemessen wurden, lagen die Werte im Vorfaulraum (Umwälzung und Schlammauslauf) nur noch bei durchschnittlich 430mg/l. Der gelöste CSB wurde damit zu fast 95% im Vorfaulraum abgebaut, was ebenfalls für eine noch sehr tiefe Belastung spricht. Die Werte nahmen im Verlauf des Versuchs nicht markant zu. Die Daten sprechen dafür, dass die Faulung optimal ablief und **keine Störungen durch die Abfälle verursacht wurden**. Auch im Nachfaulraum waren die CSB-Werte mit ca. 400mg/l tief.

Die Hygienisierungsstufe hatte einen Aufschluss und Lösung von organischen Komponenten zur Folge (daneben fand natürlich auch ein Abbau statt). Der **gelöste CSB** wurde in der **Hygienisierungsstufe erhöht** von durchschnittlich 2110mg/l im Zulauf auf 6820 mg/l im Ablauf.

Beim Vergleich der Durchschnittswerte des **Trockensubstanzgehalts** und dessen Gehalts an **organischer Substanz** in den Kontroll- und Versuchphasen K2 und V2 fällt auf, dass im Vorfaulraum sowohl im Schlamm (unten) als auch im Trübwater (oben) praktisch die gleichen OS- Anteile in der TS gemessen wurden. Alle Durchschnittswerte lagen zwischen 49,4 und 52 % der TS. Im Nachfaulraum lagen die OS-Werte in V2 mit 47% etwas über den Resultaten der Kontroll- phase (36-39%), was auf eine etwas verzögerte Hydrolyse der rohen Gemüseabfälle hinweist. Gleichzeitig streuten aber auch die TS-Werte zwischen der unteren und oberen Probenahmestelle unterschiedlich, was wahrscheinlich auf den nicht automatisierten Umpumpbetrieb, d.h. auf die unregelmässigen, manuell gesteuerten Pumpintervalle zurückzuführen ist (vgl. oben). Die OS- Gehalte des Frischschlamms sind in beiden Phasen ausgeglichen (Versuch 2,8% bzw. Kontrolle

2,9%). Einzig die Werte der OS-Gehalte des Trübwassers sind in der Versuchsphase mit 1.1% etwas höher als bei der Kontrolle (0,6%). Eine OS-Massenbilanz konnte auf Grund der zu ungenauen Füllstandsmessung der Faultürme nicht erstellt werden.

Das **Ammonium** wurde gemessen, um festzustellen, ob im Hinblick auf die Nitrifizierungs Kapazität der Aerobie eine höhere Ammoniumfracht mit dem Trübwasser aus dem Nachfaulraum in die Belebung zurückgeführt wird. Eine **Zunahme der Ammoniumkonzentration** ist im Trübwasser während V2 nicht feststellbar. Die Werte bewegen sich ca. 9% um den Mittelwert von 1410mg/l. Solange keine sehr proteinreichen Abfälle (Fleischabfälle, Hühnermist etc.) co-vergoren werden, ist daher nicht mit einer starken Erhöhung der Stickstofffracht für eine allfällige Nitrifizierung /Denitrifizierung zu rechnen.

5.4 Gas- und Stromproduktion

Wie in Kapitel 4 dargestellt worden ist, wurden aufgrund von betrieblich bedingten Schwankungen nur bestimmte Perioden mit mehr oder weniger konstantem Verlauf der Gasproduktion (K1,K2,V1,V2) zur Auswertung herangezogen. Eine Auswahl der wichtigsten Erkenntnisse ist in der Folge dargestellt.

	Abfälle [m ³ /d]	Frischschlamm [m ³ /d]	Abfälle [kg OS/d]	Frischschlamm [kg OS/d]	Total [kg OS/d]
Kontrolle 1	-	...	-	310	310
Kontrolle 2	-	10,6	-	315	315
Versuchsphase 1	0,33	12,3	14,1	364	378
Versuchsphase 2	1,19	11,0	68,8	336	404

Tab. 7: Abfall- und Frischschlamm-Mengen während den vier Kontroll- und Versuchsphasen

Tabelle 7 zeigt die Verhältnisse der zugegebenen Mengen an Frischschlamm und Abfällen. Während bei der Versuchsphase 1 die OS von Abfällen im Verhältnis zum Frischschlamm nur 3,9 % ausmachte, betrug während V2 der **Anteil der Abfall-OS** immerhin 20,5%. Die zugegebenen Mengen an Frischschlamm waren bei beiden Versuchsphasen durchschnittlich etwas höher als bei den Kontrollphasen, so dass die Phasen nicht direkt miteinander verglichen werden können.

In K1 fehlen die Werte der täglichen **Gasproduktion**. Vorhanden ist aber die totale Gasproduktion bzw. ein Mittelwert für die tägliche Gasproduktion. Die Gasproduktion von K1 musste auf Grund nachträglicher Kalibrierungen der Gasmessung zudem etwas korrigiert werden. Von den beiden Kontrollphasen wurde die spezifische Gasproduktion für den Frischschlamm abgeleitet und bei rund 550 Liter Biogas pro kg zugegebene OS eingegrenzt. Da die zugegebene Menge an Frischschlamm der Versuchsphasen bekannt ist, kann daraus die Gasausbeute des Frischschlamms, und somit auch diejenige der Abfälle in den Versuchsphasen bestimmt werden. Diese Berechnung gilt allerdings nur unter den Annahmen, dass sich die Frischschlammqualität im Verlauf der Zeit nicht wesentlich verändere und sich der Frischschlamm bei Anwesenheit von Inhaltstoffen des biogenen Abfalls in bezug auf den Abbau ähnlich verhalte (diese zweite Annahme darf nur mit Vorbehalten angewendet werden).

Bezeichnung	Gasproduktionsraten (Durchschnitt und Standardabweichung.)			Spezifische Gasproduktion [l/kg OS _{tot.}]
	Vorfaulraum [m ³ /Tag]	Nachfaulraum [m ³ /Tag]	Total [m ³ /Tag]	
Kontrolle 1			159,5	514
Versuchphase 1	166,7 +/- 45,7	9,3	175,8 +/- 51,9	460
Kontrolle 2	162,5 +/- 30,3	16,4	178,9 +/- 29,7	561
Versuchphase 2	219,1 +/- 25,4	9,4	227,0 +/- 39,4	568

Tab. 8: Durchschnittliche Gasproduktionen bei den vier Kontroll- und Versuchphasen

Für V1 lässt sich auf Grund der im Verhältnis zur statistischen Schwankung kleinen Zugabemenge und der nachträglich festgestellten Messfehler bei der Gasmessung keine Rechnung anstellen. Für V2, wo viel besser abgesicherte und statistisch aussagekräftige Daten vorhanden sind, ergibt sich mit der oben dargelegten Rechnung eine zusätzliche Gasproduktion der Abfälle von total 1310m³ bzw. von 45m³ pro Tag. Die Gasproduktion wurde dabei im Vergleich zum Erwartungswert des Frischschlamms um 24,5% gesteigert. Diese Zunahme der Gasproduktion korreliert mit der Steigerung an OS (20,5%), wenn man berücksichtigt, dass die spezifische Gasproduktion der organischen Abfälle pro kg OS wahrscheinlich eher grösser ist als diejenige des Frischschlamms. Der für die Abfälle unter der Annahme von 550 l/kg OS_{Schlamm} rechnerisch ermittelte Wert würde bei sehr hohen 655 l/kg OS liegen, was dafür spricht, dass wahrscheinlich der Schlamm bei der Abfallzugabe eine höhere Gasausbeute aufwies.

Bei beiden Versuchphasen war die Gasproduktion im Nachfaulraum geringer als bei den Kontrollen. Dies deutet darauf hin, dass die Gärung auch bei Zugabe von Abfällen hauptsächlich im Vorfaulraum abläuft, und dass der Abbau an organischer Substanz bei Abfallzugabe im Vorfaulraum besser ablief. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Zugabe von frischen biogenen Abfällen den **Abbauprozess verbesserte**, indem allenfalls gewisse gärungsfördernde Stoffe freigesetzt bzw. Synergien genutzt wurden (vgl. oben, Tabelle 6 in Kap. 5.2 sowie Nährstoffe in Kap.5.5).

	K1	K2	V1	V2
Mittlere Leistung (kW)	10,66	11,59	11,99	15,14
Schwankungsbreite	-	2,05	-	2,67

Tab. 9: Erzeugte durchschnittliche elektrische Leistung während den Kontroll- und Versuchphasen

Die **mittlere elektrische Leistung** der Wärme-Kraft-Kopplung war in beiden Versuchphasen bei Zugabe von Abfall durchschnittlich **höher** als in den Kontrollphasen. Da die Frischschlammzufuhr in Menge und Konzentration jedoch schwankte - was sich auch in der Schwankungsbreite der Elektrizitätsproduktion ausdrückt -, kann keine eindeutige Interpretation zum Einfluss der Abfallzugabe gegeben werden. Die besser dokumentierte Versuchphase 2 ist in Abbildung 6 dargestellt.

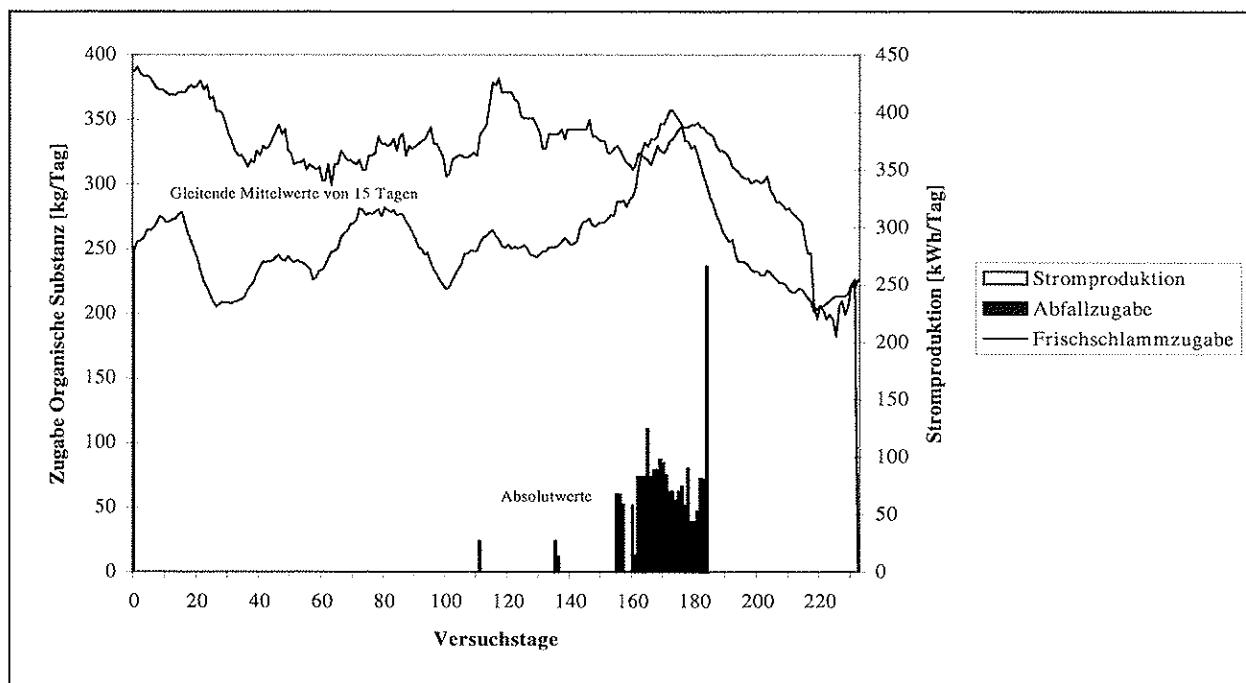


Abb. 6: Erhöhung der Stromproduktion durch die Zugabe von Abfällen (V2)

5.5 Einfluss der Abfälle auf die Qualität des Klärschlams

■ Hygiene (Enterobakteriaceen)

Gemäss Anhang 4.5 der eidgenössischen Stoffverordnung gilt ein flüssiger Klärschlamm als hygienisiert, wenn er nicht mehr als 100 Enterobakteriaceen pro Gramm Frischmasse und keine ansteckungsfähigen Wurmeier enthält. Bei allen Messungen des Klärschlams vor den Versuchen hier beschriebenen Versuchen mit Abfällen (1991-1994, 2 Messungen pro Jahr) wurden weniger als 100 Enterobakteriaceen/gFS gemessen.

Bei Messungen des Inputmaterials zum Faulturm zeigte sich, dass die noch nicht mit Frischschlamm durchmischten organischen Abfälle für sich allein im Bereich des Grenzwertes liegen (drei Messungen von zerkleinerten und homogenisierten Proben aus dem Mischtank zeigten Werte von 10, 100 und <10'000 Enterobak./Gramm). Der unhygienisierte Frischschlamm dagegen enthielt weitaus mehr Enterobakteriaceen pro g Frischmasse (3 Messungen: 330'000, 100'000, 10Mio/g FS). Da die Hygienisierung des Frischschlamms bei intakter Hygienisierungsstufe problemlos abläuft und die Abfälle bezüglich Volumen nur einen kleinen Teil des Frischschlamms ausmachen (in der Praxis voraussichtlich unter 20%), kann angenommen werden, dass die Zugabe von organischen Abfällen, wie sie in Frutigen vorlagen, auch **ohne spezielle Hygienisierung** der Abfallfraktion zu **keiner signifikanten Verschlechterung** der Hygiene des Klärschlams führen wird.

Hygieneuntersuchungen an zwei Proben des **Schlammauslaufs** des Nachfaulraums im Anschluss an die Versuchsphase 2 zeigten in beiden Fällen eine **erhöhte Anzahl Enterobakteriaceen**, welche deutlich über dem Grenzwert von 100 /gFS lag (2'000 bzw. 70'000 /g FS; 5.Jan. bzw. 9.Feb. 95). Sofern diese erstaunlichen Resultate nicht mit unsauberer Arbeit des externen Labors erklärt werden können, bedeutet dies, dass die Hygienisierung an sich fragwürdig ist.

■ Überlebensfähigkeit von Tomatensamen

Der Absatz des Klärschlams an die Landwirtschaft könnte gefährdet werden, wenn zu viele keimfähige Pflanzen- bzw. Unkrautsamen darin enthalten sind. Da Tomatensamen als sehr resistent gelten, kann bei deren Absterben in der Kläranlage angenommen werden, dass auch andere Pflanzensamen abgetötet werden. Um die Abtötungsrate von Pflanzensamen in der anaeroben Stufe der Kläranlage zu testen, wurden portionenweise abgefüllte **Tomatensamen in den Vorfaulraum gehängt**. Nach 7, 15 und 35 Tagen wurden die Samen herausgenommen und im Gewächshaus angesät (Methodik siehe Kapitel 4.4).

Verweildauer im VFR	Inkubationszeit im Gewächshaus			
	0 Tage, (Kontrolle)	7 Tage	15 Tage	35 Tage
8 Tage	95-98 %	1 %	0 %	0 %
15 Tage	n.b.	56 %	0 %	0 %
25 Tage	n.b.	n.b.	n.b.	0 %

Tab. 10: Keimraten von Tomatensamen nach 7, 15 und 35 Tagen Aufenthaltszeit im Vorfaulraum

Die Tomatensamen, welche nur eine Woche im Vorfaulraum verweilten, wurden nur teilweise abgetötet. Die anaerobe Behandlung führte zunächst zu einer **Keimverzögerung**. Bei längeren Aufenthaltszeiten im Vorfaulraum wurden alle Tomatensamen abgetötet. Die untersuchten Samen wurden *nicht* durch die Hygienisierungsstufe geführt. Bei durchschnittlichen Aufenthaltszeiten von je 20 Tagen in den beiden Faulräumen und/oder bei einer zusätzlichen Behandlung in einer Hygienisierungsstufe stellen Pflanzensamen im Endprodukt Klärschlamm daher kein Problem dar. In Frutigen liegt - wie in vielen Fällen andernorts - eine Rührkessel-Kaskade von Vorfaulraum und Nachfaulraum mit durchschnittlichen Aufenthaltszeiten von je rund 20 Tagen vor. Damit ist zwingendermassen eine genügend lange Aufenthaltszeit garantiert, welche das **Überleben von Unkrautsamen verunmöglicht**.

■ Nährstoffe

Im nicht veröffentlichten Anhang sind sämtliche Nährstoff- und Schwermetallanalysen aufgeführt (Durchschnittswerte und Standardabweichungen). Tabelle 10 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Daten. Die Nährstoffwerte des Klärschlams lagen während der Versuche mit Ausnahme von Calcium und Magnesium tendenziell leicht höher als im normalen Klärschlamm, wobei die Standardabweichungen aller Parameter sich überschneiden. In erster Näherung **verändert sich** damit der **Nährstoffgehalt des Klärschlams nicht signifikant**.

Anzahl Proben	Klärschlamm		Frischschlamm		Abfälle	
	Kontrolle n = 9	Versuchsphase n = 3	n = 3	n = 2		
Ntot	32,6 +/- 9,6	45,5 +/- 6,0	43,4 +/- 3,7	26,0 +/- 4,1		
N-NH ₄	11,6 +/- 6,9	18,6 +/- 4,9	11,8 +/- 3,4	4,0 +/- 2,8		
P ₂ O ₅	64,8 +/- 13,2	71,1 +/- 3,2	61,1 +/- 16,2	7,1 +/- 3,0		
K ₂ O	2,8 +/- 1,0	4,2 +/- 1,1	4,0 +/- 0,8	31,6 +/- 13,9		
Ca	82,5 +/- 9,8	68,3 +/- 7,2	45,6 +/- 4,1	7,0 +/- 2,1		
Mg	3,7 +/- 0,5	3,0 +/- 1,0	2,7 +/- 0,0	1,9 +/- 0,3		

Tab. 11: Nährstoffe im Klärschlamm, im Frischschlamm und in den biogenen Abfällen
(Durchschnitt und Standardabweichung; Angaben in % der TS-Masse)

Der Nährstoffgehalt des Klärschlamm ist - bezogen auf die TS - natürlich infolge der Aufkonzentrierung von anorganischen Komponenten höher als derjenige des Ausgangsmaterials, was hier allerdings infolge von Streuung der Messungen bei der relativ kleinen Anzahl von Analysen nicht immer zum Ausdruck kommt. Die TS-bezogenen Werte der Versuchsphase müssten eigentlich tendenziell tiefer sein als die Kontrolle. Die allerdings stark schwankenden Werte weisen jedoch eher eine gegenteilige Tendenz auf. Sofern der Trend stimmt, wäre dies ein weiterer Hinweis auf verbesserten Abbau des Schlamm bei Abfallzugabe. Die in Frutigen verwendeten, im Vergleich zu Fäkalien und Speiseresten allgemein salzärmeren Gemüseabfälle weisen nur beim **Kalium** einen signifikant höheren Wert auf als der Frischschlamm, was sich auch entsprechend beim Kali-Gehalt des Klärschlamm während der Versuchsphase auswirkt.

Der **Stickstoff- und der Ammoniumgehalt** des Schlammes ist in der Versuchsphase gegenüber der Kontrolle tendenziell höher. Die Standardabweichungen der Messungen überschreiden sich allerdings. Im Vergleich zu kommunalem Abwasser sind Gemüseabfälle stickstoffarm. Sofern der beobachtete Trend tatsächlich vorhanden ist, spricht dies dafür, dass sich der Stickstoff vom Gemüse zum grossen Teil in der Biomasse und im Schlamm wiederfindet. Für diese These spricht auch die Tatsache, dass im Trübwasser aus dem Nachfaulraum keine signifikante Zunahme des Stickstoffgehalts bei Abfallzugabe beobachtet werden konnte. Diese Situation würde sich wahrscheinlich bei Zugabe von stickstoffreichen Speiseresten etwas anders präsentieren. Dort müsste auch mit einer Erhöhung der Stickstofffracht aus dem Trübwasser an die Nitrifizierung/Denitrifizierung gerechnet werden.

■ Schwermetalle

Alle gemessenen Schwermetallwerte im Klärschlamm, im Frischschlamm und in den organischen Abfällen **liegen unterhalb den Grenzwerten** der Stoffverordnung. Beim Klärschlamm der ARA Frutigen (Kontrolle) wurden bisher keine bedenklichen Schwermetallwerte gemessen. Es ist in diesem Zusammenhang wichtig, nicht zu vergessen, dass die Grenzwerte für Klärschlamm gegenüber jenen für Kompost sowohl in der BRD als auch in der Schweiz deutlich höher liegen; gleichzeitig bestehen bei einzelnen Parametern Unterschiede zwischen den Ländern [20].

Die Zugabe von **Abfällen** führte zu einer tendenziellen **Reduktion der Schwermetallwerte** im Klärschlamm, da die biogenen Abfälle zum Teil deutlich tiefere Schwermetallgehalte aufweisen als der Frischschlamm. Insbesondere die auf die Trockensubstanz bezogenen Konzentrationen von Blei und vom (in kommunalen Abwässern stets reichlich vorhandenen) Zink werden durch die Abfallzugabe günstig beeinflusst. Es darf allerdings nicht vergessen werden, dass die im Ausgangsmaterial vorhandenen Frachten nach wie vor bestehen bleiben.

Anzahl Proben	Klärschlamm		Frischschlamm		Abfälle	Grenzwert
	Kontrolle	Versuchsphase	n = 3	n = 3		
Mo	3,9 +/- 0,6	5,6 +/- 3,8	10 +/- 0	10		20
Cd	1,6 +/- 0,5	1,1 +/- 0,1	1,8 +/- 1,5	0,5		5
Co	4,3 +/- 0,7	6,5 +/- 3,1	10 +/- 0	10		60
Ni	26,3 +/- 3,4	26 +/- 1,7	36,0 +/- 41,1	10		80
Cr	47,8 +/- 5,7	38 +/- 7	22,5 +/- 4,4	10		500
Cu	365,4 +/- 48,2	345 +/- 36,8	204,7 +/- 37,2	27,5		600
Pb	123,8 +/- 22,7	96 +/- 7,2	566,0 +/- 6,2	20		500
Zn	1230 +/- 180	1001 +/- 322	793,7 +/- 76,4	45		2000
Hg	3,3 +/- 0,7	3,1 +/- 0,2	2,8 +/- 0,6	0,4		5

Tab. 12: Schwermetallwerte in der TS von Klärschlamm, Frischschlamm und biogenen Abfällen.

Durchschnittswerte und Standardabweichungen; Angaben in ppm bezogen auf die Trockensubstanz; Grenzwerte gemäss Stoffverordnung 1994

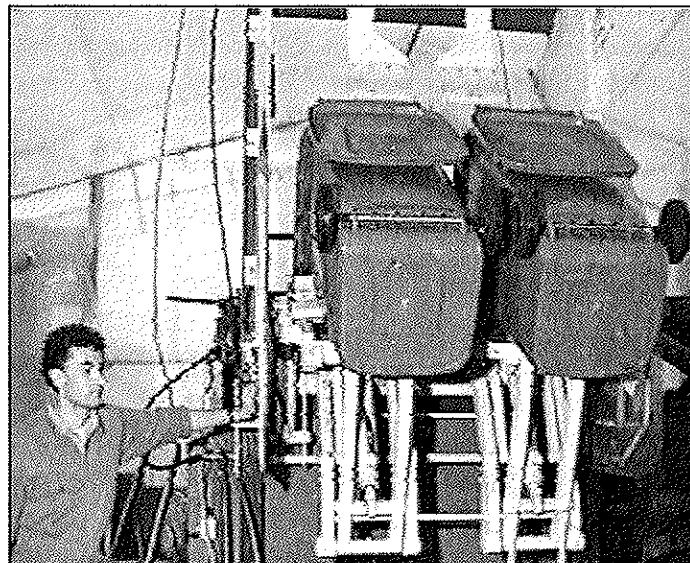
6 Energetische Betrachtungen Frutigen

Im folgenden wird für die **Versuchsphase 2** eine **Energiebilanz** erstellt. Dazu werden der Gesamtenergieverbrauch sowie die Energieverbrauchswerte der einzelnen Aggregate herangezogen. Abschliessend wird die Energiebilanz pro Tonne behandelter Abfälle dargestellt.

6.1 Strombedarf zur Aufbereitung

Die folgende Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Betriebsstunden und den Stromverbrauch der Hauptstromverbraucher während der Versuchsphase 2. Zu den erwähnten Verbrauchern müsste der Vollständigkeit halber noch der **Strombedarf der Hub/Kippvorrichtung** addiert werden. Dieser ist jedoch im Vergleich zu den in Tabelle 12 aufgelisteten Verbrauchern vernachlässigbar und wird deshalb nicht weiter berücksichtigt.

Gemäss den Erfahrungen und Angaben des Herstellers der **Schlamm-Hygienisierungsanlage** müssen für die Belüftung bei der Hygienisierung pro m^3 Schlamm ca. 5 kWh Strom aufgewendet werden. Daraus errechnet sich für die Versuchsperiode ein Bedarf von rund 175 kWh. Dies entspricht rund 20% des totalen Energieaufwands. Ein Wegfall dieses Betrags würde die Netto-Energieausbeute in Form von Elektrizität spürbar verbessern. Die Erwärmung des Gärguts könnte auch mit (in Überfluss vorhandener) Abwärme der Wärme-Kraft-Kopplungsanlage erfolgen.



Entleeren von zwei Anliefer-Gebinden mit der Hub-Kipp-Vorrichtung in den 'Mixport'

	Laufzeit [h]	Bedarf [kWh]	Anteil [%]
Mixporter	35	192.5	21.76
Mazerator	63	252	28.49
Pumpe	23	50.6	5.72
Rührwerk Stapeltank	63	94.5	10.68
Schlammhygienisierung	-	175	19.78
Röhren und Pumpen ARA	-	120	13.57
Total:		884.6	100.00

Tab. 13: Bedarf an elektrischer Energie zur Aufbereitung der biogenen Abfälle in V2

Wie weiter oben dargelegt worden ist, wurden während der Versuchsphase 2 täglich rund 1.2 m³ Abfälle zu den rund 11 m³ Frischschlamm hinzugefügt. Es wurden in 29 Tagen rund 35 m³ Abfälle mit einem Gewicht von 25 Tonnen (gemäss Anlieferstatistik) verarbeitet. Insgesamt wurden während der Versuchsphase 2 von der Aufbereitung, der Schlammhygienisierung und dem eigentlichen Gärprozess rund 885 kWh Strom eingesetzt. Der spezifische Strombedarf für die Verarbeitung der Abfälle betrug

rund 35 kWh Elektrizität pro Tonne Abfall.

Zu beachten ist dabei allerdings, dass - bedingt durch den Versuchsbetrieb - deutlich mehr Strom benötigt wurde, als dies in einer Praxisanlage der Fall wäre. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Abfälle in dieser Versuchsperiode vorwiegend roh, d.h. oft hart waren und damit einen viel grösseren Energieaufwand zur Zerkleinerung bedingten, als dies beispielsweise bei hohen Anteilen von Speiserestanteilen notwendig wäre. Bei einer energetisch optimierten Anlage kann daher zur Aufbereitung von Abfällen mit höheren Anteilen an leicht zerkleinerbaren Komponenten von einem **deutlich kleineren Energiebedarf** pro Tonne ausgegangen werden.

6.2 Wärmebedarf

Zur Bereitstellung der Abfälle für die Vergärung ist neben Strom auch Wärme erforderlich. Für die Schlammhygienisierung bzw. zum **Aufheizen** des Schlammgemisches auf rund 65°C während einer Stunde sind pro m³ rund 35 kWh thermische Energie erforderlich. Weitere rund 15 kWh sind für die Deckung der **Wärmeverluste** während der Faulung nötig. Insgesamt besteht ein Wärmebedarf von

ca. 50 kWh Wärme pro Tonne verarbeitete Abfälle.

Selbst, wenn aus dem heißen, frisch hygienisierten Schlamm Wärme zurückgewonnen wird, würde die Aufheizung auf die Gärtemperatur von nur 35°C natürlich spürbar weniger Energie benötigen, als die (kurzfristige) Erwärmung in den thermophilen Temperaturbereich. Ein Verzicht auf die Hygienisierung verbessert die Energiebilanz deutlich.

6.3 Energieertrag

Während V2 wurden ca. 9'730 kg OS in Form von Frischschlamm zugeführt und total ca. 6'660 m³ Gas erzeugt. Setzt man für den Frischschlamm einen Gaserwartungswert von 550 l/ kg OS ein (= Erfahrungswert der Kontrollphasen), so wurden rechnerisch durch die zugeführten Abfälle rund 1'310 m³ Gas zusätzlich erzeugt. Dieser Wert liegt in der Grösse des maximalen Erwartungswert für die Art der verwendeten Abfälle, insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass in der aerob/thermophilen Schlammstabilisierung zusätzlich ein gewisser Abbau von Biomasse erfolgte. Aus den 1'310 m³ Biogas lassen sich im Durchschnitt rund 2'100 kWh Strom erzeugen (Erfahrungswerte Frutigen). Dies entspricht einer rechnerisch ermittelten **Stromproduktion** von durchschnittlich **rund 72 kWh pro Tag**. Gleichzeitig wird etwa die doppelte Energiemenge in Form von Abwärme des Aggregats nutzbar.

6.4 Energiebilanz

Bei den in Frutigen verwendeten Abfällen lässt sich aus Kapitel 4.1 und 5.4 der **Biogasertrag pro Tonne Frischmaterial** errechnen. Die sehr gut gärbaren Abfälle (spezifischer Gasertrag rund 650 l/kg zugeführte OS) liefern pro Tonne Frischsubstanz - trotz ihres relativ hohen Wassergehalts - rund 60 Nm³ Biogas. Es wird von folgenden Berechnungsgrundlagen ausgegangen:

Biogasertrag	60 Nm ³ /t Bioabfall
Energieinhalt	6.0 kWh/Nm ³ Biogas (Methangehalt rund 60%)
Energiegewinn Vergärung	
Gesamt (thermisch)	360
Nach Umwandlung in WKK:	
Elektrisch (28%)	100
Wärme (60%)	216
Verlust (12%)	44

Tab. 14: Thermische und elektrische Brutto-Energieausbeute pro Tonne Frischmaterial in der Wärme-Kraft-Kopplung

Tabelle 15 zeigt die Energiebilanz. Pro Tonne dieser rohen Gemüseabfälle sind bei zweistufigem Aufschluss und mit Hygienisierung netto rund **65 kWh elektrische Energie** und rund **166 kWh Wärme** als frei verfügbarer Überschuss freigesetzt worden, wobei bei optimierter Fahrweise der Überschuss noch spürbar vergrössert werden kann. Bei einstufiger Aufbereitung von vorgekochten Abfällen sieht die Energiebilanz ebenfalls noch besser aus.

Bilanz Co-Vergärung	Elektrizität [kWh/t]	Wärme [kWh/t]
Energieproduktion	100	216
Strombedarf		
Mixport, Mazerator, Pumpen, Röhren, Hygienisierung	35	
Wärmebedarf		
Schlammhygienisierung, Heizung, Faulturm		50
Überschuss	65	166

Tab. 15: Energiebilanz für die Co-Vergärung im Fall Frutigen

Nicht berücksichtigt sind in der Bilanz die Energieaufwendungen für die **Einsammlung und den Transport** der Abfälle sowie den Abtransport und das Ausbringen des Klärschlammes. Unter der Annahme, dass pro Sammelfahrt rund 8 t eingesammelt werden und dabei eine Strecke von 80 km zurückgelegt wird, müssen bei einem Treibstoffverbrauch von 25 l Diesel auf 100 km pro Tonne Abfall rund 26 kWh aufgewendet werden. Dies entspricht maximal 7.5 % der freigesetzten Energiemenge und verringert folglich die Überschüsse entsprechend. Unter Einbezug des Transportaufwandes wären pro Tonne eingesammelte und verarbeitete, rohe biogene Abfälle etwa 57 kWh Elektrizität und 150 kWh Wärme Überschuss zu erwarten. Es ist allerdings höchst fraglich, wie weit der Transportaufwand in die Rechnung einbezogen werden darf, da auch bei alternativen Entsorgungswegen Transport notwendig ist (Eigenkompostierung von Küchenabfällen sei einmal ausgenommen; diese ist jedoch nur sinnvoll, sofern zumindest ein spürbarer Teil der Nahrung aus dem eigenen Garten stammt [19]).

Bei der Zufuhr von **1 Tonne Bioabfall pro Tag** kann für die Kläranlage Frutigen bei dieser Auslegung der Aufbereitungsapparaturen mit einer Überschlagsrechnung eine **jährliche Nettoenergiemenge von ca. 23'000 kWh** erwartet werden. Im Vergleich dazu hat die Kläranlage Frutigen einen Energiebedarf pro Jahr von rund 300'000 kWh, d.h., dass durch die Co-Vergärung mit der hier verwendeten Art der Abfälle pro Tagestonne rund 7.5 % des Energiebedarfs der ARA abgedeckt werden kann. Dies bedeutet, dass mit der Co-Vergärung bei optimierter Verfahrenstechnik und Betriebsweise ein spürbarer Beitrag an die Deckung des Energiebedarfs einer Kläranlage geleistet werden kann.

7 Ökonomische Betrachtung Frutigen

7.1 Investitionskosten

Als wichtigste Kenngrössen zur ökonomischen Beurteilung von Verwertungsvarianten gelten der Investitionsbedarf und die spezifischen Betriebskosten pro Tonne behandelter Abfall. Die Kosten einer Anlage werden natürlich stark von **standortspezifischen Bedingungen** und Anforderungen bestimmt. Es sind dies im wesentlichen:

- Art und Menge der zu behandelnden Abfälle
- Störstoffanteil und -art in den Abfällen
- bereits vorhandene Infrastruktur
- Schlammverwertung

Zusätzliche Kosten für Erweiterungen der bestehenden Infrastruktur (Ausbau der Schlammhygenisierung, etc.) oder zusätzliche Massnahmen zur Emissionsverminderung im Annahmebereich der Abfälle²⁾, welche u.U. nicht zu vernachlässigende Mehrkosten mit sich bringen können, werden in der Folge nicht berücksichtigt. Die Investitions- und Betriebskosten, wie sie für eine Aufbereitungslinie wie in Frutigen auflaufen können, sind in Tabelle 16 dargestellt.

Die in Tabelle 16 dargestellten Investitionskosten gelten für eine einfache, zweistufige Aufbereitungslinie für weitgehend sortenreine, nasse und vorwiegend ungekochte Abfälle. Es wurden in Frutigen ausschliesslich kostengünstige, **auf dem Markt erhältliche Komponenten** ohne teure Spezialanfertigungen eingesetzt. Für eine einstufige Aufbereitung oder wenn einzelne Komponenten, wie ein Speichertank, bereits vorliegen, ergeben sich tiefere Kosten.

7.2 Betriebskosten

Während der Dauer des Versuches 2 wurden in Frutigen durchschnittlich **1,2 m³ pro Tag verarbeitet**, was einem Jahresdurchsatz von etwas weniger als 500 t entspricht. Dabei zeigte sich, dass die Kapazität der verschiedenen Komponenten ohne weiteres ausreichen würde, um rund 3-4 m³ pro Tag (oder sogar noch beträchtlich mehr) zu verarbeiten, was einer Gesamtmenge von rund 1'000 t pro Jahr oder mehr entsprechen würde. Die Tabelle 16 zeigt exemplarisch neben den Investitionen die Betriebskosten für die Verarbeitung von 500 bzw. 1'000 Jahrestonnen im Fall von feuchten, ungekochten biogenen Abfällen. Bei höheren Durchsätzen oder einstufiger Aufbereitung sinken die Kosten entsprechend. Allerdings ist zu bedenken, dass bei allzu grossen Verarbeitungsmengen das Einzugsgebiet in der Regel recht gross wird und auch für die Verwertung des Gärprodukts die Transportdistanzen etwas ansteigen.

2) In Frutigen wurde die Grobzerkleinerung ("Mixport") mit einem über eine Kurbel abschliessbaren Deckel versehen (in Investitionskosten inbegriffen), um so die bei der Grobzerkleinerung entstehenden Emissionen zu reduzieren. Die ganze Aufbereitung erfolgte in einem isolierten und beheizbaren (Fest-) Zelt, welches für die Versuchsdauer gemietet wurde (in Investitionskosten nicht inbegriffen).

Durchsatz [t/a]:	500	1'000	Bemerkungen	
INVESTITIONEN				
	Fr.	%	Fr.	%
Bauteil		0		0 (gemietetes Festzelt)
Aufgabeeinheit/Hub-Kippvorrichtung	10'000	10	10'000	10
Zerkleinerung/Mixporter	11'000	11	11'000	11 inkl. Geruchsabdeckung
Exzenterorschneckenpumpe	8'000	8	8'000	8
Mazerator	6'000	6	6'000	6
Speichertank	10'000	10	10'000	10
Rührwerk	6'000	6	6'000	6
Durchflussmesser	4'000	4	4'000	4
Rohrleitungen/Armaturen	15'000	16	15'000	16
Magnetabscheider	4'000	4	4'000	4
Sortierband	7'000	7	7'000	7
Steuerung	15'000	16	15'000	16
Gesamtinvestitionen	96'000	100	96'000	100
BETRIEBSKOSTEN				
	Fr./a	%	Fr./a	%
Kapitalkosten				
Bauteil	0	0	0	0 s.o.
Anlageteil	11'136	24	13'056	20 5.5%, 10 Jahre
Wartung und Unterhalt				
Bauteil	0	0	0	0 s.o.
Anlageteil	2'880	6	2'880	4 3% v. Invest
Energie	0	0	0	0
Personal	25'000	54	40'000	61 Hilfskraft
Sonstiges				
Versicherung	960	2	960	1 1% v. Invest
Verwaltung	3'000	7	4'000	6
Qualitätsüberwachung	2'000	4	3'000	5
Entsorgung Reststoffe	1'000	2	2'000	3 1%, 200 Fr./t
Brutto Betriebskosten	45'976	100	65'896	100
Erlöse				
Elektrizität (0.15 Fr./kWh)	4'875		9'750	Überschuss: 65 kWh/t
Wärme (kaum externer Bedarf)	-		-	Überschuss: 166 kWh/t
Gärgut (Annahme: Gratisabgabe)	-		-	
Netto Betriebskosten	41'101		56'146	
SPEZIFISCHE KOSTEN				
	Fr./t		Fr./t	
	82.-		56.-	ohne Landerwerb

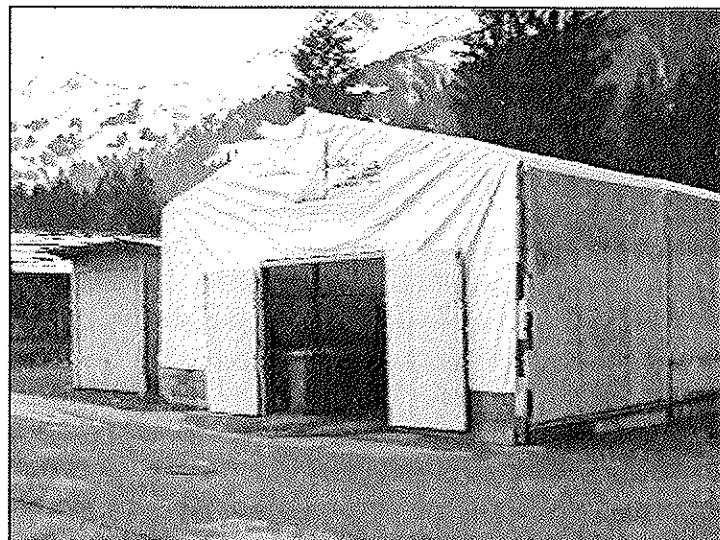
Tab. 16: Investitions- und Betriebskosten von Aufbereitungslinien "Frutigen"

Die Kosten beziehen sich auf die zur Zeit der Versuche eingesetzten Apparaturen. Es wurden sämtliche in Betracht kommenden Kosten berücksichtigt, außer der Schlammanlieferungsgebühren, die jeweils ausgehandelt werden müssen.

Bei den Investitionskosten, bzw. den spezifischen Behandlungskosten wurde davon ausgegangen, dass das für die Aufbereitung **nötige Land** auf dem Gelände einer Kläranlage bereits vorhanden sei und daher nicht kostenaktiv werde. Eine Abfallaufbereitung inklusive Lagerraum für Abfallgebinde lässt sich auf rund 100 m² unterbringen. Dies war auch etwa die Fläche, welche das Festzelt in Frutigen belegte.

Die **spezifischen Kosten** verringern sich in der Betriebskostenrechnung entsprechend, wenn in der Nähe ein Abnehmer für Überschusswärme vorhanden ist und/oder wenn für das Gär- gut ein Preis erzielt werden kann. Die Investitionskosten schliessen die Montage der Anlage ein. Kostenanpassungen auf Grund von neuen Erkenntnissen, anderen Technologien, vereinfachter Planung und grösserer Stückzahlen sowie von anderen örtlichen Voraussetzungen bleiben vorbehalten.

Bei der Verarbeitung von 500 bis 1'000 t pro Jahr bewegen sich die spezifischen Kosten für die in Frutigen verwendete Abfallart **zwischen Fr. 56.- und 82.- pro Tonne**. Bei einer Verdoppelung des Durchsatzes verringern sich die spezifischen Betriebskosten trotz einem erhöhten Personalbedarf um rund 30 %. Es ist anzunehmen, dass die spezifischen Kosten für die Verarbeitung von (Gross-) Küchenabfällen und Speiseresten tendenziell tiefer liegen, da in diesem Fall die Zerkleinerung einstufig erfolgen kann.



Das beheizbare Festzelt, in welchem die Aufbereitungsanlage untergebracht war.

7.3 Vergleich zur Verwertung als Tierfutter

...vergänglich...
...nur wichtige Entscheide gefällt:
• Gräpfer-Professor: Die Ge-
sundheitsdirektion startet erneut
ein Aufsichtsverfahren gegen Pro-
...kurse geg.
von Ernst Pin
halb weiterhin plat...
...nur mit männlichen Patienten!

Schweinemäster: Saukübel-Boykott?

ZÜRICH - Fleisch-Krise: Die Schweinemäster erwägen einen Saukübel-Boykott!
Die Preise für Schlacht-Schweine sind im Keller. Viele Master kämpfen mit dem Pleitegeier (es stand im BLICK!)
Aus der Patsche helfen könnten ihnen die Getreideproduzenten, die Metzger und die Grossverteiler.
Kommt kein Kompromiss zu-
stande, werden die Schweinemä-
ster nicht mehr nur mit Worten kämpfen.
Swisspores-Präsident Ueli Nik-
laus zu BLICK: «Je nach Entwick-
lung werden wir unpopuläre Mass-
nahmen ergreifen: zum Beispiel all
unsere Entsorgungsleistungen vor-
übergehend sistieren.»
Konkret: Es droht ein Saukübel-Boykott!
Die Mäster entsorgen heute nicht nur die Speisereste der Restaurants. Sie übernehmen auch Schot- te sowie Abfallprodukte aus der Gemüseverarbeitung und den Schlachthöfen.
Könne es zum Saukübel-Boykott geben: es grosse Entsorgungsprobleme. Vor allem würde die Abfallver-
wertung gemäss Niklaus viel mehr kosten! Urs Holziger

Bllick, Auf. August 98

Die **Verfütterung** von biogenen Abfällen in **Schweinemastbetrieben** ist nach wie vor ein sinnvoller Verwertungsweg, da auf diese Weise viel Energie, welche zur Produktion von Futtermitteln notwendig wäre, substituiert bzw. eingespart werden kann. (Die Schweine wie auch deren Gülle können zudem nachträglich immer noch auf dem Teller bzw. in einer Biogasanlage energetisch genutzt werden).

Durch gesetzliche Auflagen bezüglich der Hygiene ist die **Verfütterung** von organischen Reststoffen jedoch speziell in kleineren Betrieben in jüngster Vergangenheit stark **eingeschränkt** worden. Zudem können heute Speisereste nur noch beschränkt verfüttert werden, da sich ihr über-

durchschnittlich hoher Polyen-Säuregehalt nachteilig auf die Fleischqualität auswirkt. Heute bezahlen die Abfallproduzenten für die Abgabe von verwertbaren Abfällen an die Tierproduktion rund fünf Franken pro 80-Liter-Behälter. Je nach Schüttgewicht der Abfälle (welches bei nassen Speiseresten praktisch 1 kg/l beträgt, während z.B. Salatabfälle kaum auf die Hälfte komprimiert werden können), ergeben sich Kosten von Fr. 60.- bis 120.- pro Tonne. Rein ökonomisch betrachtet wäre die Co-Vergärung unter diesen Voraussetzungen in den meisten Fällen vorteilhaft. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass die Schweinemäster die Annahmegebühren in Konkurrenz zur Co-Vergärung noch nach unten anpassen könnten.

Vergleicht man die Kosten der Co-Vergärung mit den Annahmegebühren von Kompostieranlagen oder grossen Feststoffgäranlagen, welche sich in der Schweiz zwischen Fr. 80.- und Fr. 200.- pro Tonne bewegen, so ist die **Co-Vergärung finanziell sehr vorteilhaft**. Im dünn besiedelten Raum, wo Flächen zur Ausbringung des Schlammes vorhanden sind, bietet die Co-Vergärung daher eine kostengünstige Möglichkeit zur energetischen Nutzung nasser Afälle, welche vorteilhafter ist, als Lösungen, die speziell für Ballungsgebiete geeignet sind: Im letzteren Fall ist es wichtig, in speziellen und entsprechend teuren Grossanlagen zur Feststoffvergärung ein möglichst wasserarmes Produkt zu gewinnen, welches bei möglichst kleinem Energieaufwand zu den meist relativ weit entfernten Anbaugebieten transportiert werden kann. Bei Co-Vergärung ausserhalb von Ballungsgebieten ist es hingegen möglich, auf eine fest/flüssig-Trennung des Gärkuts und auf die dann eventuell notwendige Presswasserbehandlung zu verzichten, was mit zu kostengünstigeren Lösungen führt.

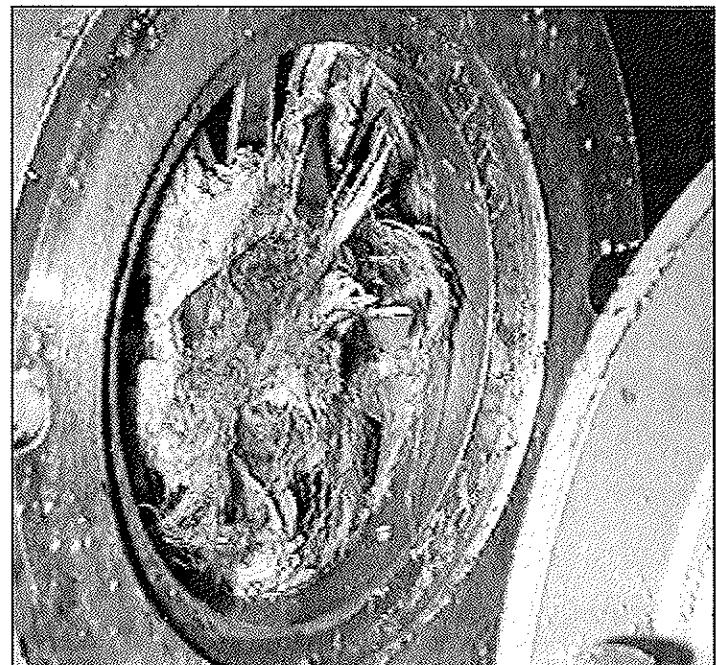
8 Schlussfolgerungen für Praxisanlagen

8.1 Eignung der eingesetzten Apparaturen

Ursprünglich war geplant, die Versuche in Frutigen mit vorwiegend vorgekochten Abfällen aus dem Gastgewerbe durchzuführen. Da dies aus erwähnten Gründen nicht möglich war, wurden mehrheitlich rohe, d.h. **ungekochte biogene Abfälle** von Grossverteilern eingesetzt. Diese Abfälle sind von der Aufbereitungstechnik her **anspruchsvoller** als bereits vorgekochte Stoffe, da sie im Extremfall grobe Feststoffe enthalten können, welche eine robuste zweistufige Aufbereitung erfordern.

Der **Verfahrensablauf** mit den ausgewählten Aufbereitungsmaschinen hat sich für die verwendeten, relativ sortenreinen Abfälle im Praxisbetrieb **bewährt**. Die Benutzerfreundlichkeit der Anlage war ebenso zufriedenstellend wie die allgemeine Funktionsweise. Verbesserungen sind natürlich noch in vielen Bereichen möglich: so sollte beispielsweise die Reinigungsmöglichkeit in der Grobzerkleinerung verbessert werden oder der Stapeltank mit einem entsprechend angepassten Rührwerk versehen sein, um Phasentrennungen - wie sie bei tieferen TS-Gehalten bzw. höheren Verdünnungen auftreten können - wirksam zu verhindern. Eine stehende Anordnung des zylindrischen Stapeltanks wäre zur einfacheren Durchmischung des Substrats von Vorteil. Ebenfalls vorteilhaft wäre eine bessere Infrastruktur zur Störstoffauslese, beispielsweise durch ein Sortierband mit Magnetabscheider (ist in den Kosten von Tabelle 15 bereits berücksichtigt).

Fremdstoffe, wie Stützdrähte von Blumen, Netze von Zitrusfrüchten und andere Gegenstände aus Metall oder Kunststoff, können zu Störungen führen: Sie wurden nach Möglichkeit bereits bei der Zugabe in den Mixport erfasst, so dass bei der Aufbereitung nur sehr sporadisch Störfälle auftraten. Die praktischen Erfahrungen zeigten, dass eine manuelle Aussortierung der Störstoffe durchaus möglich ist, wobei allerdings ein höherer Zeitaufwand für den Anlagebetreuer verursacht wird, da die Sichtkontrolle und Handauslese Präsenz verlangt. Je nach Gründlichkeit der Störstoffabtrennung kann wahrscheinlich nie ganz verhindert werden, dass gelegentlich Störungen an der Fördereinrichtung oder Zerkleinerung auftreten, welche einen gewissen Revisionsaufwand erfordern (z.B. Entfernen von aufgewickelten Zitrusfruchtnetzen oder Beheben von Beschädigungen durch Hartteile an Statoren von Pumpen oder Mazeratoren etc.). Hier gilt auf jeden Fall mit erster Priorität die Devise, regelmäßig und intensiv auf die Abfalllieferanten einzuwirken, damit **an der Quelle schon möglichst gut getrennt** wird und ein guter Separierungsgrad möglichst unterbruchsfrei erhalten bleibt.



Netzchen von Zitrusfrüchten, welche sich in einer zusätzlich getesteten Feinzerkleinerungsapparatur verfangen haben.

Maschinelle Möglichkeiten zur **Aussortierung** wurden im Kapitel 3.2 aufgezeigt. Die Nassaufbereitung hätte den Vorteil, dass Sink- und Schwimmstoffe relativ leicht von der Flüssigkeit getrennt werden können. Es scheint in diesem Fall zudem möglich zu sein, durch verfahrenstechnische Weiterentwicklung von kostengünstigen, handelsüblichen Produkten - wie sie beispielsweise aus der Tierernährung (Schweinefutteraufbereitung) bekannt sind - noch kostengünstigere Apparate zu entwerfen, welche auf einfache Art den Anforderungen der Co-Vergärung zu genügen vermögen.

Es darf davon ausgegangen werden, dass zusätzlich zu einer vereinfachten Fremdstoffauslese bei einer definitiv installierten Praxisanlage noch einige **weitere Arbeitsschritte vereinfacht** und/oder automatisiert, bzw. automatisch überwacht werden können. Dies gilt beispielsweise für das Beschickungsregime. Für den Versuchsbetrieb war ein hoher Automatisierungsgrad der Arbeitsabläufe noch nicht sinnvoll.

8.2 Energieproduktion der Co-Vergärung

Wie in Kapitel 6 dargelegt ist, wurden die in Frutigen verwendeten Abfälle in den Faultürmen sehr gut abgebaut. Der Biogasertrag von rund 600 Liter pro kg OS_{zugeführt} (Kap. 5.4) ist sehr gut und entspricht - trotz aerober Vorbehandlung in der Hygienisierung³⁾ - Spaltenwerten, wie sie bei leicht abbaubaren, feuchten biogenen Abfällen erreicht werden können.

Die Faulung der Kläranlage Frutigen kann als eine Rührkesselkaskade bezeichnet werden, in welcher die beiden Gärbehälter "Vorfaulraum" und "Nachfaulraum" in Serie geschaltet sind. Die Rückführung von bakterienreichem Schlamm aus dem Nachfaulraum in den Vorfaulraum erhöht die aktive Biomasse im Vorfaulraum (ähnlich wie beim Kontakt-Prozess) und verbessert so die Abbaugeschwindigkeit. Bereits im Vorfaulraum wurde der gelöste CSB zu beinahe 95% abgebaut, und die niederen Fettsäuren wurden praktisch vollständig metabolisiert. Dies spricht dafür, dass die Fermenter **noch lange nicht an ihre Belastungsgrenze gelangt** sind; vor einer Überlastung wäre zu erwarten, dass zunächst die Stoffe im Vorfaulraum weniger gut metabolisiert werden und ein grösserer Teil der Gärung in den Nachfaulraum verlagert wird. Dies spricht dafür, dass - zumindest im Fall Frutigen - die Faulraumkapazität für die Abfälle aus einer weiteren Umgebung der ARA ausreichen würde, bzw. dass wirklich restlos alle gärbaren Abfälle des ARA-Einzuggebiets aus Haushalt, Gastgewerbe und Grossverteilern den Faultürmen beigefügt werden könnten⁴⁾.

Eine ganze Reihe von Indizien (z.B. Kap. 5.2: TS-Gehalt Schlamm VFR/NFR; Kap. 5.4, Gasproduktion im Nachfaulraum; Kap.5.5: Nährstoffgehalte, etc.) sprechen in ihrer Gesamtheit stark dafür, dass die **Gärung insgesamt durch die Zugabe der Abfälle verbessert** wurde. Allerdings wären zur statistischen Untermauerung dieses Befundes noch zusätzliche Versuche bei möglichst linearem Versuchsbetrieb notwendig. Der **Energiebilanz** (Kap.6.4) kann entnommen werden, dass

3) In der aerob thermophilen Schlammstabilisierung werden sicher organische Substanzen abgebaut, welche nachher bei der Biogasproduktion fehlen. Andererseits scheinen die biogenen Abfälle den Abbau des Schlammes zu verbessern. Es ist jedoch nicht genau ermittelbar, welche Gasanteile aus den biogenen Abfällen und welche zusätzlich aus dem Schlamm stammen.

4) D.h. dass etwa von 100-150 kg/Einwohner.Jahr ausgegangen werden könnte.

im Fall Frutigen pro Tonne Frischmaterial rund 65 kWh Elektrizität und 166 kWh Wärme als Überschuss produziert werden. Wenn einem Klärwerk pro angeschlossenem Einwohner im Durchschnitt rund 50 kg Abfall pro Jahr den Faultürmen zugeführt wird, kann daraus ohne weiteres mehr als **10% des Elektrizitätsbedarfs der ARA** gedeckt werden. Bei Abfällen des Gastgewerbes, wo eine einstufige Zerkleinerung ausreicht, dürfte bei gleichen Mengen der Energiegewinn in Form von Elektrizität auf spürbar über 10% des Energiebedarfs der ARA ansteigen. Daneben fallen grössere Mengen an Überschusswärme an, welche für Heizzwecke auf der ARA oder anderweitig eingesetzt werden können.

Wenn man bedenkt, dass die Schlammhygienisierung rund 20% des Strombedarfs zur Aufbereitung und Behandlung der Abfälle bewirkt (Tab.13, Kap.6.1), wird die Energiebilanz im Fall eines **Verzichts** auf diese Art von **Hygienisierung** der frischen Abfälle noch einmal spürbar besser. Insbesondere wäre es auch möglich, mit der reichlich vorhandenen Abwärme der Stromproduktion die Abfälle rein thermisch zu hygienisieren.

8.3 Allgemeine Überlegungen zur Hygiene des Gärprodukts

Die **Hygienisierungswirkung** einer Biogasanlage ist primär abhängig von der Aufenthaltszeit des Substrates, der Betriebstemperatur und den physikalisch-chemischen Bedingungen. Diesbezüglich sind voll durchmischte Reaktoren nicht optimal, da dort die Möglichkeit besteht, dass ein Teil des Frischmaterials sogleich wieder ausgetragen wird. Dadurch wird es möglich, dass ein Teil von besonders resistenten Keimen (Bandwurmeier, bestimmte Viren etc.) zuwenig lang in der Anlage verbleibt, um abgetötet zu werden. Im Fall der ARA Frutigen liegt eine Reaktorkaskade vor, welche einen "Kurzschluss" zwischen Eintrag und Austrag verunmöglicht.

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 etc.) abtötend oder zumindest stark hemmend auf Pathogene zu wirken. Speziell hygienisierend wirken anscheinend die Bedingungen der Hydrolyse mit leicht saurem pH-Wert bei gleichzeitig hohen Konzentrationen an Exoenzymen, bei welchen pathogenen Keime und Unkrautsamen effizient angegriffen werden.

Humanpathogene Mikroorganismen und Parasiten weisen zumeist ein Temperaturoptimum im mesophilen Bereich (35°C, d.h. Körpertemperatur) auf. Trotzdem ist im anaeroben Milieu und in Funktion der Dauer der Behandlung im mesophilen Temperaturbereich mit Wachstumhemmung und Absterben der Pathogenen zu rechnen. Thermophile Temperaturen beschleunigen die Absterberate. Bakterien werden in der Regel mesophil innerhalb von wenigen Tagen um 90% dezimiert (*Salmonella typhimurium*: T-90 = 2,4d, *E. Coli*: 1,8d, *Staphylococcus aureus*: 0,9d etc.). Thermophil beträgt die Elimination um 90% höchstens wenige Stunden [in 4]. Bakterien, wie Salmonellen, können im Rührkessel nach einer Vergärung bei 35°C und durchschnittlich 20 Tagen Verweilzeit jedoch trotzdem noch zu rund 10% vorgefunden werden. Bei einer Reaktorkaskade ist die Reduktion bereits 99% [in 4], was dafür spricht, dass die unvollständige Zerstörung nur auf die ungünstige Aufenthaltszeit-Verteilung im Rührkessel zurückzuführen ist. Das Infektionspotential von verschiedenen Wurmeiern und -larven (Spul-, Rund-, Faden- und Gastrointestinalwürmer, etc.) wird ebenfalls mesophil bereits innerhalb von wenigen Tagen, thermophil innerhalb von wenigen Stunden zerstört. (Schweine-) Bandwurmeier (*Ascaris sp.*) hingegen können einer mesophilen

Einstufenvergärung im Extremfall bis zu über drei Wochen standhalten [in 4]. Humanpathogene Erreger kommen normalerweise in separat eingesammelten Haushaltsabfällen nicht in grösserer Menge vor, so dass eine spezielle Hygienisierung höchstens in Ausnahmefällen wirklich notwendig ist.

Bei der Vergärung 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. Verschiedene eigene Untersuchungen zeigten sowohl an Versuchs- wie auch an Praxisanlagen, dass Hirse-, Tomaten- und Rumexsamen das anaerobe Milieu, insbesondere die hydrolytischen Bedingungen, nicht gut vertragen. In mesophilen einstufigen Anlagen kommt es innerhalb einiger Tage zu einer Keimverzögerung und dann innerhalb der durchschnittlichen Aufenthaltszeit eines konventionellen Fermenters zu einem Absterben der Samen. In thermophilen Anlagen sowie unter den hydrolytischen Bedingungen im Zweistufenprozess erfolgt das Absterben noch rascher.

Viren, welche beispielsweise für Erkrankungen bei Tieren verantwortlich sind, werden in der Regel mesophil innerhalb von weniger als 24 Stunden inaktiviert (Schweine-Grippe, Maul- und Klauenseuche, übertragbare Gastroenteritis, etc.). Im thermophilen Bereich ist die Resistenz normalerweise auf deutlich weniger als eine Stunde beschränkt. Ausnahme ist der sehr kleine, äusserst resistente *Parvovirus*, welcher bei Schweinen zu Fehlgeburten führen kann: Es sind hier anscheinend bei mesophiler Vergärung mehrere Monate und im thermophilen Bereich 8 Tage für die vollständige Zerstörung notwendig [in 4].

Ein besonderes Augenmerk muss auf **phytopathogene Erreger** gerichtet werden, da sonst Pflanzenkrankheiten mit dem Gärget wieder auf Landwirtschaftsland verbreitet werden. Diesbezüglich wurden eigene Untersuchungen über das Verhalten des ausgesprochen resistenten Erregers der Kohl-Hernie (*Plasmodiophora brassicae*, Indikatororganismus) bei der Vergärung in Laborfermentern durchgeführt. Bei der einstufigen Vergärung bei 35°C über 14 Tage wurde keine signifikante Abtötung der Erreger beobachtet (Zugabe von 10% angesteckten Wurzeln zu 60% Gemüseabfällen und 30% Impfmaterial); die vergorenen Wurzeln zeigten immer noch praktisch 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 [25]. Der Einfluss der Bedingungen der anaeroben Hydrolyse (Exoenzyme bei reduziertem pH-Wert) wurde nicht untersucht. Der *Bakteriophage f2* (ammoniumresistenter Vertreter der Gruppe der *Leviviren*, Indikator für Enteroviren) wurde hingegen im thermophilen Einstufenprozess innerhalb von zwei Tagen vollständig abgetötet [37].

Verfahrenstechnisch sind **hinsichtlich der Hygiene Pfropfstromprozesse oder Reaktorkaskaden vorzuziehen**, da dort die Gewähr besteht, dass alles Gärget genügend lang den hygienisierenden Bedingungen ausgesetzt ist. In einem einstufigen Reaktor mit gutem Pfropfstromverhalten, bzw. in Serie geschalteten Reaktoren (vgl. Frutigen mit Vorfaulraum und Nachfaulraum) ist auch bei mesophiler Temperatur eine weitestgehende Hygienisierung erreichbar, wobei höchstens bei sehr wenigen, speziell resistenten Erregern gewisse Einschränkungen gemacht werden müssen. Wenn hingegen nur ein einziger, voll durchmischter Reaktor vorhanden ist, wird ein Teil der pathogenen Keime sogleich wieder ausgetragen und verbleibt damit nicht genügend lang unter den anaeroben, hygienisierenden Bedingungen. In diesem Fall müsste man bei hygienisch bedenklichen Abfällen eine Hygienisierung vorsehen, wie dies in der Literatur beschrieben ist [42].

8.4 Die Qualität von co-vergorenem Material

Bei Hygieneauflagen geht es primär darum, keine (human-)pathogene Keime in den Nahrungsmittelkreislauf zurückzubringen. Das verwendete Co-Substrat ist bezüglich der **Hygiene** natürlich deutlich **weniger problematisch, als kommunales Abwasser**, welches mit Exkrementen belastet ist. Zusätzlich enthält Abwasser Fäkalien mit Keimen von Kranken und andere Fraktionen, welche pathogene Keime enthalten können. Daher erstaunt nicht, dass die Enterobacteriaceen-Werte der aufbereiteten Abfälle um mehr als einen Faktor 1'000 unter jenen des Frischschlamms liegen.

Erstaunlicherweise wurden in Frutigen zweimal (bei gut funktionierender Hygienisierung) erhöhte Enterobacteriaceen-Werte im Schlamm des Nachfaulraums gemessen (Kap.5.5). Sofern diese Ablaufwerte stimmen, würde dies den **Sinn einer Schlammhygienisierung vor der Gärung** grundsätzlich in Frage stellen. (An sich wäre es durchaus denkbar, dass gewisse pathogene Intestinalbakterien, welche an das körpertemperaturwarme und nährstoffreiche, weitgehend anaerobe Darmmilieu angepasst sind, sich in oder unmittelbar nach den Fermentern vermehren). Sofern die Daten nicht durch Zufall zustande gekommen sind, ist dies ein Grund mehr, feste Abfälle nicht zu hygienisieren, solange nicht auf Grund von Herkunft/Vorgeschichte ein Verdacht auf schwere Kontamination besteht. Dieser Verzicht hätte neben einer verbesserten Energiebilanz und Kosten-einsparungen den weiteren Vorteil einer grösseren Unabhängigkeit von der Kapazität der Schlammhygienisierungsstufe.

Ein Problem der Vergärung von Pflanzenresten in einem voll durchmischten Fermenter ist die **Verbreitung von Unkrautsamen**. Es konnte gezeigt werden, dass die sehr resistenten Tomaten-samen nach genügend langem Aufenthalt im mesophilen anaeroben Milieu vollständig abgetötet werden (Kap.5.5). In Frutigen, wo - wie in vielen anderen schweizerischen Kläranlagen - zwei Fermenter in Serie geschaltet sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass Unkrautsamen genügend schnell die Anaerobie durchwandern und (allenfalls mit Verzögerung) noch auskeimen, vernachlässigbar. Eine Schlammstabilisierung drängt sich daher auch aus der Optik der Abtötung von Unkrautsamen nicht auf.

Die Zusammensetzung des Klärschlams ändert sich insofern, als durch die deutlich weniger stark belasteten biogenen Abfälle die - auf die TS bezogene - **Schwermetallmenge** im Klärschlamm tendenziell reduziert wird (Kap. 5.5). Die Abfälle führen jedoch eher zu einer tendenziellen Erhöhung der **Nährstoffkonzentrationen** (Kap. 5.5). Dies muss auf verbesserten Abbau des Schlams zurückzuführen sein: Die Abfälle weisen - mit Ausnahme von K - einen generell tieferen Nährstoffgehalt auf als der Frischschlamm (Tab.11) und kommen somit für eine direkte Erhöhung nicht in Frage. Da die Nährstoffkonzentration auf die TS bezogen ist, muss von einem höheren TS Abbau ausgegangen werden.

Bei der Zugabe von grossen Mengen an sehr eiweissreichen Küchenabfällen könnte es allenfalls zu einer Erhöhung des **Ammoniumgehalts** im Trübwasser kommen, was eine zusätzliche Belastung für die Nitrifizierung/Denitrifizierung der ARA bewirken könnte. Unter durchschnittlichen Bedingungen sind jedoch keine grossen Veränderungen des Stickstoffgehalts im Schlamm zu erwarten. Der Ammoniumgehalt ist im nicht veröffentlichten Anhang 5 dargestellt. Es konnten durch die Abfallzugabe keine signifikanten Änderungen nachgewiesen werden. Eine Zunahme des Ammoniumgehalts im Trübwasser um rund die Hälfte wurde bei der Co-Vergärung von Abfällen aus Hühner- und Schweinemastbetrieben beobachtet [41].

Ebenfalls wird die **Schlammmenge** nicht wesentlich beeinflusst, da der Sinn der Co-Vergärung ja ist, möglichst viel organisches Material mit möglichst wenig Flüssigkeit in den Faulraum einzubringen⁵⁾. Sofern die Tendenz der TS-Messungen (vgl.5.2, Tab.6), bzw. die Hypothese eines verbesserten Abbaus stimmt, kann sogar davon ausgegangen werden, dass die Fracht an organischem Material im Schlamm durch die Co-Vergärung eher abgenommen, bzw. sicher weniger stark zugenommen hat, als zu erwarten war. Die totale Nährstofffracht nimmt hingegen durch die Abfallzugabe zwingendermassen etwas zu. Dies ist für den Landwirt jedoch nicht von Nachteil, da er so für eine gegebene Nährstoffmenge weniger oft mit dem Druckfass fahren muss.

5) In zukünftigen Praxisanlagen sollte zum Anmaischen der Abfälle Frischschlamm verwendet werden, sodass nicht unnötig zusätzliches Wasser in den Faulturm gelangt.

9 Machbarkeit der Co-Vergärung auf ARA's

9.1 Übertragbarkeit der Erfahrungen von Frutigen

Bei der Wahl von Frutigen war - neben der Nähe zur Firma AVAG - von Bedeutung, dass es sich um eine Kläranlage einer kleinen bis mittleren **Grösse** handelt, wie sie in ländlichen Gebieten der Schweiz oft anzutreffen ist (mit etwas über 10'000 EGW: Klasse 3).

Für eine saubere Auswertung der Versuche war nachteilig, dass sehr viele **Abläufe** auf dieser ARA **nicht automatisch** ablaufen (z.B. Abziehen des Frischschlamms aus der Belüftung, Umpumpen von Gängut zwischen VFR und NFR etc.), sondern dass die Anlage mit der Erfahrung und dem Fingerspitzengefühl des Klärwärts betrieben wird. Dies hatte zur Folge, dass auch beim normalen Dauerbetrieb je nach momentanen Voraussetzungen starke Schwankungen im TS/OS-Gehalt des Frischschlamms und auch in der Gasproduktion auftreten konnten, welche die zusätzliche Produktion durch die biogenen Abfälle teilweise verdeckten. Diese für Versuche nicht optimalen Voraussetzungen sind jedoch wahrscheinlich auf den meisten anderen schweizerischen Kläranlagen ebenfalls gegeben. Die Resultate von V2, wo mit höheren Chargen gearbeitet wurde, sind jedenfalls trotz den erwähnten Einschränkungen aussagekräftig und stimmen auch gut mit den erwarteten Werten überein.

Stark erschwerend war in Frutigen der während der Projektdauer erfolgte **Umbau der Belüftungsstufe**, welcher zu einer neuen Frischschlammqualität und -menge führte, sowie die damit verbundene Überlastung der **Hygienisierungsstufe**, welche zeitweise die Abfuhr von Schlamm in andere Kläranlagen notwendig machte. Diese Tatsache deckte mit Nachdruck auf, dass bei der Übertragung der Resultate der jeweils vorhandenen Hygienisierungsstufe eine besondere Beachtung geschenkt werden muss - sofern man nicht zum Schluss kommt, auf eine Hygienisierung ganz zu verzichten und die Abfälle direkt, d.h. ohne den Umweg über die Hygienisierungsstufe, in den Faulturm zu speisen. Obwohl der Faulraum in Frutigen trotz Abfallzugabe noch deutlich unter der Belastungsgrenze mit organischem Material lag, war die Kläranlage wegen der - an sich fragwürdigen - Hygienisierung an ihre Kapazitätsgrenze gelangt. Die Probleme, welche in Frutigen im Zusammenhang mit der ATS (aerob thermophile Schlammstabilisierung) beobachtet wurden, traten auch in jenen Phasen auf, wo keine Abfälle zugegeben wurden.

9.2 Auswahlkriterien für geeignete Kläranlagen

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie galt es zunächst einmal, die Auswahlkriterien zur Selektion geeigneter Kläranlagen zu definieren. Dieses Unterfangen war nicht einfach, da viele Grössen die Auswahl beeinflussen:

Grösse der Kläranlage:

Gewisse Kläranlagen sind zu klein für den Einsatz der Co-Vergärung, wie sie in Frutigen betrieben wurde, da die Investitionskosten im Verhältnis zur aufbereiteten Menge zu hoch sind.

Faulturm:

Zumindest für eine kurzfristige Realisierung sollte ein Faulturm bereits vorhanden sein. Zudem muss dieser freie Kapazität für zusätzliche organische und hydraulische Belastung aufweisen.

Landreserven und Logistik:

Es dürfte in der Regel nicht problematisch sein, eine Aufbereitung auch für grössere Mengen auf einer Fläche von rund 100 m² zu realisieren (vgl. Frutigen). Es muss hingegen beachtet werden, dass die Zufahrt zur ARA für die Abfallanlieferung geeignet ist.

Gasverwertung:

Wenn noch keine Gasverwertung vorhanden ist, sind Zusatzinvestitionen notwendig, welche u.U. Entscheide der Stimmbürger erfordern. Da - speziell bei vergrösserter Gasproduktion - sich eine Gasnutzung aufdrängt und auch ökonomisch tragbar ist, schliesst eine noch fehlende Gasnutzung höchstens kurzfristig die Realisierung von Anlagen aus. Von Vorteil ist, wenn in der Nähe der ARA auch im Sommer ein zusätzlicher Wärmebedarf besteht.

Klärschlammverwertung:

Wenn eine ARA den Klärschlamm nicht in die Landwirtschaft abgeben kann, macht es aus ökologischer Sicht wenig Sinn, die für die Erhaltung des Bodens wertvollen Bioabfälle dem Klärschlamm zuzumischen.

Abwasser- bzw. Klärschlammqualität:

Unter Umständen ist die Abwasserqualität zu schlecht, um die kaum belasteten Bioabfälle mit dem Frischschlamm zu durchmischen. Ein qualitativ einwandfreier Klärschlamm ist Voraussetzung für dessen Rückführung in die natürlichen Stoffkreisläufe. Anlagen, wo schadstoffbelasteter Schlamm entwässert und anschliessend verbrannt werden muss, würden allerdings durch Co-Vergärung zusätzliche Energie an das grosse Energiedefizit erhalten.

Hygienisierungsstufe:

Sofern Abfälle über eine (bereits vorhandene) Hygienisierungsstufe geleitet werden sollen, muss sie genügend gross dimensioniert sein, um den zusätzlichen Massenfluss zu bewältigen.

Andere Komponenten der ARA:

Allenfalls müssen noch weitere Komponenten der ARA mit in die Betrachtung einbezogen werden. Es wäre beispielsweise möglich, dass die Kapazität der Nitrifizierung/Denitrifizierung an ihre Grenzen gelangt, wenn die (an sich kleine) zusätzliche Stickstofffracht mit dem Trübwasser rückgeführt wird. Stickstofffrachten dürfen speziell dann nicht vergessen werden, wenn viel eiweissreiche Abfälle (Fleisch etc.) co-vergoren werden.

Einzugsgebiet für die Bioabfälle:

Im Hinblick auf die Minimierung von Transporten sollten in der näheren Umgebung Bioabfälle in genügender Menge vorhanden sein (z.B.: Hotellerie, Lebensmittelindustrie, Lebensmittelgewerbe)

Regionale Voraussetzungen, Akzeptanz:

Das Gespräch zwischen Abfallproduzenten und Gemeinde bzw. Zweckverband muss gefunden werden. Die Betreiber der ARA müssen Bereitschaft zeigen, Zusatzaufgaben zu übernehmen, und es muss ein politischer Konsens (Verteilschlüssel für die Kosten, etc.) gefunden werden.

In Kontakt mit Bund und Kantonen wurde das Konzept der Co-Vergärung diskutiert. Bei dieser ersten Kontaktaufnahme wurde festgestellt, dass sowohl die Kantone als auch der Bund über Datenmaterial von Kläranlagen verfügen. Die vorhandenen Daten sind aber **zu wenig ausführlich**, um alle oben genannten Themenkreise beantworten zu können. Von den vorhandenen Daten erwiesen sich zwei Datenbanken des BUWAL als recht brauchbar. Die eine Datei enthält die Planungsdaten der schweizerischen Kläranlagen. Die Angaben sind aber nur zum Teil aktualisiert, und einige Kantone liefern keine Daten. Die zweite Datei des BUWAL basiert auf einer Umfrage mit Fragebogen und gibt v.a. Auskunft über die Klärschlammverwertung und über die Energiebilanz der Kläranlagen. Da die Rücklaufrate der Fragebogen nur ca. 25 % betrug, sind in dieser Datei weniger als 250 Kläranlagen aufgeführt. Die aktuellste Umfrage stammt aus dem Jahr 1992. Die beiden erwähnten Dateien wurden auf PC installiert und mit dem Programm 'filemaker' bearbeitet.

9.3 Kurzfristig realisierbare Standorte

Um die Machbarkeit der Co-Vergärung auf Kläranlagen zunächst einmal grob abzuschätzen, wurden die Auswahlkriterien auf vier Größen eingeengt, welche für eine kurzfristige Realisierung als besonders wichtig erachtet wurden. Es sind dies die Kriterien:

- *Grösse der Kläranlage:* Die Kläranlage weist eine Grösse auf, bei welcher ein Co-Vergärungskonzept, wie es in Frutigen realisiert wurde, ökonomisch sinnvoll erscheint.
- *Faulturm und Gasverwertung:* Die Anlage verfügt bereits über einen Faulturm und das entstehende Biogas wird bereits jetzt auf der Kläranlage verwertet.
- *Klärschlammverwertung:* Eine Abgabe des Klärschlammes an die Landwirtschaft ist möglich.
- *Hygienisierung:* Die Kläranlage verfügt über eine Hygienisierungsstufe

Obwohl die Erfahrungen von Frutigen und prinzipielle Überlegungen (siehe oben) eine Hygienisierung nicht als zwingend erscheinen lassen, wurde die Hygienisierung als kurzfristig wichtig eingestuft, da die rechtliche Situation noch nicht eindeutig geklärt ist. Die BUWAL-Daten wurden im folgenden nach diesen vier Kriterien befragt. Es ergab sich folgendes Bild:

Grösse der Kläranlage: Die Kläranlagen werden in 5 Grössenklassen unterteilt (Klasse 1: >100'000 Einwohnergleichwerte [EGW], Klasse 2: > 50'000 EGW, Klasse 3: > 10'000, Klasse 4: >2'000, Klasse 5: > 30 EGW; EG-Norm). Es gibt in der Schweiz eine grosse Anzahl sehr kleiner ARA's. Beinahe 70% aller ARA's weisen eine Ausbaugrösse von weniger als 10'000 EGW auf. 30 % der schweizerischen ARA's rangieren in den Grössenklassen 1-3 und behandeln 90 % des kommunalen Abwassers (Umwelt-Materialien Nr. 22, BUWAL, Stand 1.5.93). Das heisst, dass in bezug auf die Abwassermengen die Klassen 4 und 5 eine untergeordnete Rolle spielen. In der BUWAL-Datei sind in der Klasse 5 (zwischen 30 und 2'000 EGW) 428 Anlagen aufgeführt. Diese kommen sehr wahrscheinlich aufgrund ihrer Grösse (Kapazität, technische Ausrüstung) für die Co-Vergärung nicht in Frage. Im Grenzbereich bezüglich Grösse liegen die ARA's der Klasse 4 (2'000-10'000 EGW). In dieser Klasse sind 262 Anlagen aufgeführt. Schliesst man die beiden Grössenklassen 4 und 5 für die Co-Vergärung aus, so kommen nur noch 277 Kläranlagen in Frage.

Faulturm und Gasverwertung: Nach Angaben des BUWAL besitzen 149 ARA's einen Gasmotor mit Generator. Hinzu kommen 9 Anlagen, die einen Gasmotor mit Gebläse installiert haben, und 2 Kläranlagen mit Gasturbine. Somit waren zur Zeit der Erhebung durch das BUWAL total 160 Kläranlagen mit einer Gasnutzung ausgerüstet.

Klärschlammverwertung: Zur Klärschlammverwertung sind nur wenig Daten vorhanden: Die eine Datei (Planungsdaten) enthält nur die Information, ob die Landwirtschaft mit Klärschlamm beliefert wird oder nicht. Hierzu kann gesagt werden, dass die meisten Kläranlagen zumindest einen Teil ihres Klärschlammes an die Landwirtschaft abgeben. Quantitative Angaben liefert die zweite Datei, in welcher aber nur ein relativ kleiner Teil der Kläranlagen aufgeführt ist. Die Auswahl an Kläranlagen ist allerdings insofern repräsentativ, als die Grössenverteilung ziemlich genau dem schweizerischen Durchschnitt entspricht.

Die Auswertung dieser zweiten BUWAL-Datei (B4 1992) liefert folgendes Bild: Die kleineren Kläranlagen (Klassen 4 und 5) sind in der Lage, sämtlichen Klärschlamm an die Landwirtschaft abzugeben. Die ARA's in Klasse 3 geben bezogen auf auf die Trockensubstanz 93%, in Klasse 2

44% und in Klasse 1 69% des Klärschlamm an die Landwirtschaft ab. Insgesamt kann die Landwirtschaft 74% des Klärschlamm (TS) dieser zufällig ausgewählten 220 Kläranlagen verwerten (vgl. Tab.17).

Klasse	Anzahl ARA's	Schlammfall [tTS]	Nutzung in Landwirtschaft [%]
1	13	27'630	69
2	14	85'96	44
3	60	13'153	93
4	83	3'451	100
5	48	184	100
Total	218	53'014	73

Tab. 17: Schlammfall und Anteil der landwirtschaftlichen Verwertung bei schweizerischen Kläranlagen verschiedener Grösse (Datei B41992)

Hygienisierung: Von den rund 1020 in der BUWAL-Datei aufgeführten Kläranlagen in der Schweiz wurde bis zum 31. Dezember 1993 auf 104 ARA's eine Hygienisierungsstufe gebaut. In diesen 104 Anlagen werden 3,1 Mio EGW_{hyd} bzw. 4,8 Mio EGW_{bio} (60gBSB₅/d) bearbeitet. Dies entspricht 25% der EGW-Ausbaugrösse (BUWAL, Stand Mai 1993). Die Zahl der Klärschlammhygienisierungsanlagen ist seit der Inkrafttretung der Klärschlammverordnung (1981) stark zunehmend. Innerhalb des Zeitraums 1987-93 wurde die Zahl der Anlagen mehr als verdreifacht (Ausbaugrösse Faktor 2,5). Es ist anzunehmen, dass die Anzahl Hygienisierungsanlagen auf ARA's noch weiter zunehmen wird.

Werden die beiden **Kriterien 'Faulurm/Gasverwertung' und 'Hygienisierung' kombiniert**, so stellt man fest, dass nur noch 63 Kläranlagen in Frage kommen. In diesen 63 Anlagen werden 3,87 Mio EGW_{biologisch} behandelt. Dieser Wert entspricht 21% der schweizerischen Ausbaugrösse von 1993. Die Grösseverteilung dieser 63 Anlagen ist in Tabelle 18 dargestellt.

Die Zahlen dokumentieren, dass die Kläranlagen der Klasse 5 - immer unter den hier gewählten Randbedingungen - für die Co-Vergärung nicht in Frage kommen. Die ARA's der Klasse 4 und 5 sind jedoch auch in bezug auf die behandelten Abwassermengen und damit auf das Co-Vergärungspotential nur von untergeordneter Bedeutung.

Klasse	Anzahl Anlagen	EGW _{bio} *10 ³	EGW _{bio} [%]
1	10	2540	65,6
2	7	484	12,5
3	30	738	19,1
4	16	113	2,9
5	0	0	0
Total	63	3874	100

Tab. 18: Anlagen der Schweiz, die sowohl eine Hygienisierungstufe als auch eine Gasverwertung aufweisen.

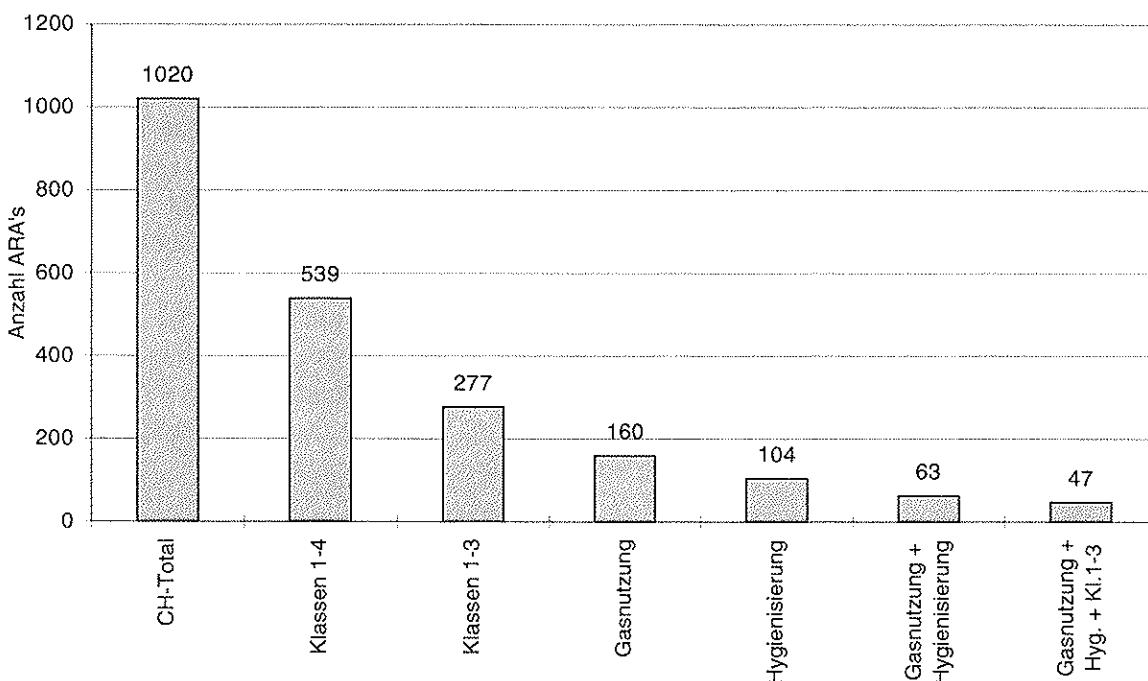


Abb. 7: Anzahl der für Co-Vergärung geeigneten schweizerischen ARA's in Abhängigkeit von verschiedenen Auswahlkriterien (Stand 1993)

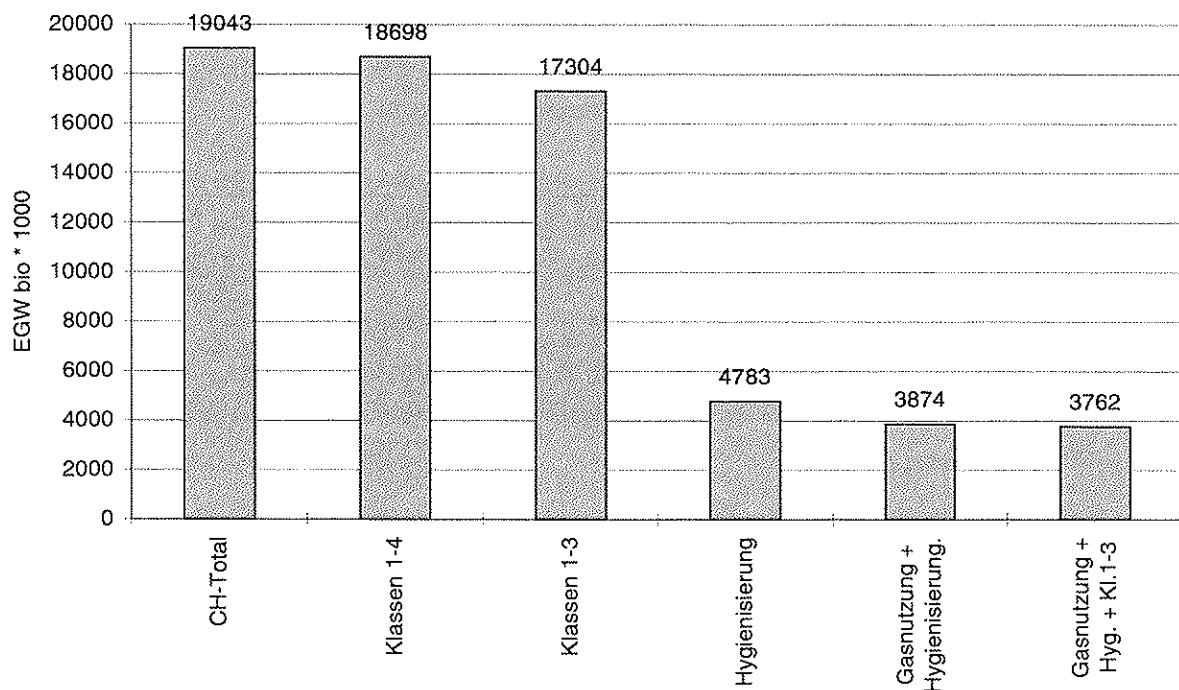


Abb. 8: Anzahl der in der Schweiz angeschlossenen Einwohnergleichwerte (biologisch; in Tausender-Skalierung) an Anlagen, welche für die Co-Vergärung in Abhängigkeit von verschiedenen Auswahlkriterien in Frage kommen (Stand 1993)

Von den in Tabelle 18 verbliebenen 63 Anlagen verarbeiten 10 ARA's rund 66% des Abwassers. Um abschliessend zu beurteilen, ob die verbliebenen Anlagen in der Lage sind, den anfallenden Klärschlamm an die Landwirtschaft abgeben zu können, fehlen die Daten. Einige Daten zu dieser Frage sind in der Datei B4 des BUWAL enthalten. Die meisten hier aufgeführten Anlagen geben an, den grössten Anteil bzw. bis zu 100% des Klärschlamm abgeben zu können. Da die Schlammqualität durch die Zugabe von biogenen Abfällen tendenziell verbessert wird (vgl. oben), ist anzunehmen, dass eine Co-Vergärung die jetzige Situation zumindest nicht verschlechtert.

In der Schweiz sind heute bereits über 90 % der Bevölkerung an eine Kläranlage angeschlossen. Die Grafiken in den Abbildungen 7 und 8 dokumentieren, dass durch das Kriterium 'Grösse der Anlage' zwar die Anzahl möglicher Kläranlagen für das Abfallkonzept 'Co-Vergärung' drastisch reduziert wird, dass sich aber die Menge an behandeltem Abwasser in den gut ausgerüsteten, d.h. technisch überdurchschnittlich gut geeigneten Grossanlagen konzentriert. Bei Einschränkung auf die Grössenklassen 1-3 steht immer noch 91% der schweizerischen Anlagenkapazität zur Verfügung. Aus Abbildung 8 kann entnommen werden, dass **ein Fünftel** der schweizerischen **Einwohnergleichwerte** an eine grosse ARA der Klasse 1-3 mit Hygienisierungsstufe und Gasnutzung angeschlossen ist.

9.4 Die Situation in den einzelnen Kantonen

Da die verfügbaren Datenbanken - wie bereits oben erwähnt - nur ungenügend Informationen zur umfassenden Beurteilung der Möglichkeiten der Co-Vergärung lieferten, wurden in einem zweiten Arbeitsgang die **Gewässerschutzämter der Kantone einzeln direkt angeschrieben**. Neben Informationen zur Co-Vergärung und zu den Auswahlkriterien wurde ein Fragebogen versandt. Insbesondere wurde auch gebeten, Gründe anzugeben, welche gegen eine Co-Vergärung sprechen könnten, um so zusätzliche Informationen zur Akzeptanz zu erhalten.

Die deutschsprachigen Kantone antworteten praktisch ausnahmslos (mit zum Teil sehr ausführlichen Angaben), während der Rücklauf aus der Romandie und dem Tessin nur höchst bruchstückhaft war. Mit knapp 700 Anlagen wurden rund zwei Drittel der schweizerischen Kläranlagen durch die kantonalen Behörden eingestuft.

Bezüglich der Zahl der geeigneten Anlagen zeigte sich ein ähnliches Bild, wie bei der Auswertung der Datenbanken: Von diesen knapp 700 Anlagen werden rund **50 als für die Co-Vergärung geeignet bezeichnet**.

Diese Zahl deckt sich etwa mit der Zahl von Abbildung 7. Es sind jedoch nicht immer dieselben Anlagen, da je nach kantonalen Voraussetzungen und Einschätzungen zum Teil andere Anlagen ausgewählt wurden. In der Folge wird die Einschätzung der Kantone kurz zusammengefasst (Detailangaben können z.T. aus Datenschutzgründen nicht publiziert werden):

- **Kantone mit einem relativ hohen Potential für die kommunale Co-Vergärung**
(mindestens 10 % der ARA's kommen für die Co-Vergärung in Frage)

Bern: Mit 112 ARA's hat der Kanton Bern prinzipiell ein sehr grosses Potential für die Co-Vergärung. 59 Anlagen gehören zu den Grössenklassen 1-4. Mindestens 15 Kläranlagen erfüllen die technischen Voraussetzungen für die Co-Vergärung und geben gleichzeitig den grössten Teil des Klärschlams an die Landwirtschaft ab. Die Situation ist im Kanton momentan gut in Bezug auf die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung. Mittel- und langfristig soll die Landwirtschaft als Hauptabnehmer des Klärschlams beibehalten werden. Durch die Umstellung vieler Bauern auf IP (Produktion mit limitiertem Dünger- und Pestizideinsatz) könnte eine geringfügige Reduktion der Abnahmemengen erfolgen. Das Gewässerschutzamt ist jedoch zuversichtlich, dass auch langfristig der Klärschlamm über die Landwirtschaft verwertet werden kann. Beim Berner Oberland ist für die Co-Vergärung ungünstig, dass aus diesem Gebiet bereits Klärschlamm ins Mittelland exportiert werden muss.

Zürich: Der Kanton Zürich betreibt 118 ARA's, hat also prinzipiell ein hohes Potential für die Co-Vergärung. Nach Angaben des Gewässerschutzamtes kommen 18 Anlagen für eine Co-Vergärung in Frage. Diese 18 Anlagen haben die technisch nötige Ausstattung (ev. noch keine Hygienisierung), freie Verarbeitungskapazitäten in der Faulung und können den grössten Teil ihres Klärschlams an die Landwirtschaft abgeben. Insgesamt wird allerdings im Kanton nur rund 50% des Klärschlams über die Landwirtschaft verwertet. Ein grosser Teil des Klärschlams, d.h. rund ein Drittel, stammt aus der Kläranlage Werdhölzli, bei welcher der Absatz an die Landwirtschaft schlecht ist (zu wenig Bedarf im Einzugsgebiet). Aufgrund der Umstellung vieler Bauern auf integrierte Produktion (IP) wird die Verwertung über die Landwirtschaft vermutlich eher rückläufig werden.

Schwyz: Im ganzen Kanton werden 14 Kläranlagen betrieben. Von diesen ARA's kommen aber immerhin die drei grössten Anlagen prinzipiell für eine Co-Vergärung in Frage: Die ARA's "Schwyz", "Höfe" und "Untermarch". Diese Anlagen weisen sowohl eine Hygienisierung als auch eine Gasverwertung auf. Die ARA's "Schwyz" und "Untermarch" haben im Gegensatz zur ARA "Höfe" noch recht grosse freie Kapazitäten. Alle drei ARA's sind in der Lage, den grössten Teil des anfallenden Klärschlams an die Landwirtschaft abzugeben. Im Jahr 1993 wurden im Kanton von den insgesamt 2'876 t TS Klärschlamm 2'408 t TS (knapp 85%) landwirtschaftlich verwertet. Der Rest wurde deponiert. Es ist allerdings ein starker Umbruch in der Landwirtschaft durch die Umstellung auf IP zu beobachten. Der Bedarf an zusätzlichen Entsorgungswegen für problematische Nassabfälle wurde noch nicht untersucht.

Appenzell AR: Von den 17 Kläranlagen im Kanton kommen nur zwei für eine Co-Vergärung eventuell in Frage (ARA Speicher und Teufen). Diese decken jedoch mit 18'750 EGW einen wesentlichen Teil der EGW im Kanton ab. Beide Kläranlagen besitzen eine Gasverwertung und eine Hygienisierungsstufe. Die ARA Speicher ist überdimensioniert, die ARA Teufen hat nur noch wenig freie Kapazitäten. Die ARA Teufen gibt den Klärschlamm vollständig an die Landwirtschaft ab, bei der ARA Speicher wird ein Teil des Klärschlams verbrannt. In Teufen werden bereits Fettabscheiderabfälle mitvergoren. Die restlichen Kläranlagen sind zu klein oder besitzen (noch) keine Faulung (z.B. Herisau).

Uri: Bezuglich der Grösse kommen nur drei Anlagen im Kanton für die Co-Vergärung in Frage: die ARA's von Altdorf, Erstfeld und Andermatt. Die neun restlichen Kläranlagen sind zu klein. Die ARA Andermatt besitzt keine Faulung und scheidet daher (zumindest vorerst) aus. Die ARA

Erstfeld mit 10'000 EGW besitzt eine Hygienisierung, eine Gasverwertung und hat auch noch freie Kapazitäten. Der Klärschlamm wird nach Altdorf zur Kompostierung transportiert. Die ARA Altdorf mit 56'000 EGW besitzt ebenfalls freie Kapazitäten. Eine Gasverwertung ist im Gegensatz zur Hygienisierungsstufe vorhanden. Der Klärschlamm wird kompostiert und erfährt so bei dieser Gelegenheit eine nachträgliche Hygienisierung. Der kompostierte Klärschlamm von Altdorf und Erstfeld gelangt nicht in die Landwirtschaft, sondern wird für Rekultivierungen v.a. im Strassenbau eingesetzt. Die Kläranlagen Altdorf und Erstfeld decken den grössten Teil der EGW des Kantons ab und bieten deshalb in Bezug auf die Kantonsgrösse ein relativ hohes Potential für die Co-Vergärung. Der Absatz von Klärschlamm an die Landwirtschaft beträgt im gesamten Kanton weniger als 5%. Da aber der Klärschlamm für Kultivierungen eingesetzt wird, kann die Co-Vergärung für nasse organische Abfälle trotzdem ein sinnvoller Entsorgungsweg sein.

■ Kantone mit beschränktem Co-Vergärungspotential

Basel-Land: Der Kanton Basel-Land ist stark industrialisiert und besitzt nur wenig landwirtschaftliche Betriebe. Viele Kläranlagen besitzen keine Faulung. Aus technischer Sicht wurden vom Gewässerschutzamt nur 2 mögliche Anlagen für die Co-Vergärung genannt: ARA Ergolz 1 und ARA Laufental. Bei der ARA Ergolz 1 ist allerdings die Hygienisierungsstufe kaum mehr höher belastbar und nur knapp die Hälfte der anfallenden 400-500 t TS Flüssigschlamm können im Moment an die Landwirtschaft abgegeben werden. Bei der ARA Laufental hingegen wird der grösste Teil des Klärschlamm - bei allerdings sinkender Tendenz - landwirtschaftlich verwertet. Im Jahre 1994 wurden von 7'300 t TS rund 2'000 t TS als ungefaultes Granulat und nur 154 t TS vergorener Flüssigschlamm an die Landwirtschaft abgegeben (dies entspricht mehr oder weniger Ergolz 1); 3'000t wurden verbrannt und der Rest deponiert.

Solothurn: Das Gewässerschutzamt lieferte eine Vorwahl mit 7 geeigneten ARA's. Die spezifischen Daten müssen bei den ARA's eingeholt werden. 1994 wurden von den rund 7'000t TS Klärschlamm ca. 60-70% an die Landwirtschaft abgegeben (Tendenz eher sinkend). Der Rest wurde verbrannt.

Aargau: Im Kanton Aargau werden 89 Kläranlagen betrieben, davon gehören 58 zu den für die Co-Vergärung interessanten Klassen 1-4. Aufgrund einer rein technischen Begutachtung besitzt der Kanton ein grosses Potential für die Co-Vergärung. Über 15 Kläranlagen weisen eine Hygienisierungsstufe, eine Gasverwertung und gleichzeitig genügend freie Kapazitäten auf. Diese Anlagen haben zusammen eine Grösse von über 300'000 EGW. Lässt man das Kriterium 'Hygienisierungsstufe' weg, steigt die Kapazität für die Co-Vergärung nochmals stark an. Das limitierende Kriterium im Kanton ist die landwirtschaftliche Verwertung: Im Moment werden von den rund 15'000 t TS Klärschlamm ca. 2/3 an die Landwirtschaft abgegeben. Durch die Umstellung vieler Bauern auf IP könnte dieser Anteil noch sinken. Das Gewässerschutzamt stellt sich auf den Standpunkt, dass die Klärschlammmeute nicht noch steigen darf und gibt somit der Co-Vergärung nur eine geringe Chance. Trotzdem kommen einzelne Anlagen mittelfristig für die Co-Vergärung in Frage. Es kann angenommen werden, dass von den technisch nutzbaren Anlagen rund ein Drittel, d.h. Anlagen mit einem Einzugsgebiet von 100'000 EGW, sinnvoll eingesetzt werden können.

Neuenburg: Im Kanton Neuenburg werden bis zum Jahr 2003 die wichtigsten Kläranlagen vergrössert, so dass sich eine neue Ausgangslage ergeben wird. Während die Anlagen in La Chaux-de-Fonds und Neuenburg voraussichtlich wegen der Schlammqualität und beschränkten Absatzmöglichkeiten zwar mit Faulung, aber ohne Hygienisierung ausgebaut werden, werden die Anlagen

von Chézard (Ausbau auf 18'700 EGW) und Le Landeron (14'000 EGW) aus technischer Sicht volumnfänglich für Co-Vergärung in Frage kommen. In Marin wird die Kapazität - allerdings ebenfalls ohne Hygienisierung - auf 33'000 EGW vergrössert. Le Locle (Klasse 4) besitzt nur eine kalte Faulung. In Colombier hingegen sind die Voraussetzungen gut: Die Anlage, deren Kapazität 1998 auf 33'000 EGW verdoppelt wird, verwertet das Biogas, und der Klärschlamm wird nach einer Entwässerung kompostiert. Der Absatz für Klärschlamm dürfte im Kanton mit viel Weinbau weniger problematisch sein, als in einem Kanton mit viel Viehwirtschaft.

■ Kantone, die für die kommunale Co-Vergärung kaum in Frage kommen

Basel-Stadt: Im Kanton Basel-Stadt wird derzeit nur eine einzige kommunale Kläranlage betrieben, die ARA von Basel. Der Klärschlamm dieser Anlage ist für eine landwirtschaftliche Verwertung ungeeignet. Die Beseitigung erfolgt ohne dazwischengeschaltete Faulung thermisch zusammen mit dem Schlamm der ARA Novartis.

Luzern: Im Kanton Luzern ist der Tier- und speziell der Schweinebestand derart hoch, dass in der Landwirtschaft fast kein Klärschlamm mehr zusätzlich zur Gülle eingesetzt wird. Der Klärschlamm wird deshalb verbrannt. Die Co-Vergärung dürfte daher im Kanton Luzern kaum sinnvoll sein. Die Tierfütterung kann andererseits hier ein möglicher Entsorgungsweg für nasse organische Abfälle sein, wobei allenfalls ein Teil der Energie der Abfälle durch Vergärung von Gülle zurückgewonnen werden kann. Die technische Machbarkeit bei den Kläranlagen wurde nicht näher untersucht.

Glarus: Bezuglich der Grösse kommen im Kanton Glarus von den total 6 Kläranlagen nur die ARA's von Bilten und vom Sernftal für die Co-Vergärung in Frage. Diese haben aber beide einen ungenügenden Absatz des Klärschlammes an die Landwirtschaft. Die ARA Sernftal besitzt ausserdem keine Hygienisierungsstufe.

Zug: Von den sieben Kläranlagen kommen bezüglich Grösse eigentlich nur die ARA in Friesen- cham und eventuell die ARA Hünenberg für die Co-Vergärung in Frage, die restlichen Anlagen zählen alle zur Grössenklasse 5. Die ARA Cham hat sowohl eine Hygienisierungsstufe als auch eine Gasverwertung. In dieser ARA wird bereits Co-Vergärung betrieben, indem Schlempen von Zuger Kirsch-Brennereien direkt in den Faulturm gespeist werden. Es kann aber nur ca. 1/4 des Klärschlammes an die Landwirtschaft abgegeben werden. Die ARA Hünenberg ist von der Grösse sehr limitiert (< 5000 EGW), hat keine Hygienisierungsstufe und weist ebenfalls eine landwirtschaftliche Schlammnutzung von nur rund 50% auf. Generell ist im Kanton der Bedarf an Klärschlamm gering, da bei hohem Anteil an Viehwirtschaft der Eintrag von Nährstoffen in den Zugersee reduziert werden muss.

Nidwalden: Von den sieben Kläranlagen des Kantons kommen bezüglich Grösse nur drei in Frage: die ARA's von Buochs, Stans und Hergiswil. Die restlichen Kläranlagen zählen zur Grössenklasse 5. Die Kläranlagen Buochs und Stans haben keine Hygienisierungsstufe, und der Klärschlamm kann nicht an die Landwirtschaft abgegeben werden. Die Kläranlage Hergiswil besitzt zwar eine Hygienisierungsstufe, entsorgt aber auch nur 20% des Klärschlamm - bei sinkender Tendenz - über die Landwirtschaft.

Obwalden: Im Kanton Obwalden werden nur drei Kläranlagen betrieben: Alpnach, Engelberg und Kerns. Die ARA Kerns hat keine Faulung. Die ARA Engelberg (25'000EGW) hat keine Hygienierungstufe und keine landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlamm vor Ort (über 1000 m.ü.M.

darf kein Klärschlamm ausgebracht werden). Der Klärschlamm wird gepresst und anschliessend deponiert. Sonst wäre diese Kläranlage technisch geeignet. Die Kläranlage Alpnach (25'000 EGW) hat ebenfalls keine Hygienisierungsstufe, weil keine direkte landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes erfolgt: Der Klärschlamm wird gepresst, 2/3 davon werden deponiert. Ein Drittel wird kompostiert und gelangt in die Landwirtschaft bzw. in den Gartenbau. Die Landwirtschaftsbetriebe betreiben schwergewichtig Viehwirtschaft und fast keinen Ackerbau; somit ist generell der Bedarf an Klärschlamm zur Düngung und Bodenverbesserung gering.

Appenzell IR: Aufgrund des sehr hohen Tierbestandes im Kanton kann die Landwirtschaft keinen Klärschlamm entgegennehmen. 100% des Klärschlammes im Kanton werden verbrannt. Aufgrund der Grösse käme sowieso nur die Kläranlage Appenzell in Frage. Die restlichen sieben Anlagen zählen zur Klasse 5.

St. Gallen: Mit 50 Kläranlagen der Klassen 1-4 hätte der Kanton St.Gallen prinzipiell ein hohes technisches Potential für die Co-Vergärung. Viele Regionen des Kantons (Rorschach, St.Gallen, Gossau, Wil, Obertoggenburg) haben aber unter den heutigen landwirtschaftlichen Voraussetzungen überhaupt keinen Bedarf an Klärschlamm. Der Kanton hat generell einen sehr hohen Tierbestand und einen verhältnismässig kleinen Anteil an Ackerflächen. In einigen Regionen kann zumindest ein Teil des Klärschlammes an die Landwirtschaft abgegeben werden. Im Rheintal beispielsweise sind es rund 50%; in dieser Region wurde allerdings die Kompostierung sehr stark gefördert und die Nachfrage nach einem zusätzlichen Verwertungsweg ist relativ gering. Im Kanton fallen rund 12'000 t TS Trockenschlamm an. Rund 7'000 t TS werden in Altenrhein getrocknet. Weitere Entsorgungswege für Klärschlämme sind die Kehrichtverbrennungsanlagen in Buchs, Bazenheid und St. Gallen. Dieser Verwertungsweg ist sehr teuer und ist für ein Co-Substrat kaum ein sinnvoller Weg, da das wertvolle organische Material für die Bodenbewirtschaftung verloren geht. Die Zahl der Bauern mit integrierter Produktion ist stark zunehmend. Dieser Umstand könnte den Klärschlammabsatz zusätzlich erschweren.

Graubünden: Aufgrund der sinkenden Zahlen der landwirtschaftlichen Verwertung des Klärschlammes ist das Amt für Umweltschutz des Kantons an einer Co-Vergärung nicht interessiert. Daher wurde die technische Machbarkeit der Co-Vergärung nicht untersucht (Daten fehlen). 1994 wurden von den anfallenden 6'000 t TS Klärschlamm rund 40 % als Düngemittel an die Landwirtschaft abgegeben. 2 % wurden getrocknet und als Brennstoffersatz in einer Zementfabrik eingesetzt. Der Rest wurde teilweise deponiert und teilweise durch Kompostierung aufgewertet und als Abdeckungsmaterial eingesetzt. Langfristig rechnet der Kanton mit der Reduktion der Verwertungswege Landwirtschaft, Deponie und Kompostierung und setzt auf die Verbrennung. Interesse besteht allerdings bei der ARA Davos für die Co-Vergärung von Abfällen aus dem Landwassertal.

Schaffhausen: Es kommen im Kanton Schaffhausen bezüglich ihrer Grösse nur vier Kläranlagen für eine Co-Vergärung in Frage: Neuhausen, Ramsen, Stein am Rhein und Hallau. Gemäss Aussagen des Kantons besteht dank bereits bestehender Verwertungswege für biogene Abfälle (Kompostieranlage in Schaffhausen) kaum ein grosser Bedarf. Die ARA Neuhausen hat keine freien Kapazitäten. Die Kläranlagen Ramsen und Hallau sind im Moment im Umbau und können technisch noch nicht beurteilt werden. Am ehesten kämen aus technischer Sicht die Kläranlagen Hallau und Stein a.R. in Frage: beide besitzen eine Gasverwertung, eine Hygienisierungsstufe und können zur Zeit fast 100% des Klärschlammes an die Landwirtschaft abgeben. Leider fallen in diesen Gebieten aber nur wenig Abfälle an. Auch die Kläranlage Ramsen kann im Moment fast den gesamten Klärschlamm an die Landwirtschaft abgeben. Der Klärschlamm der ARA Neuhausen wird kompostiert und anschliessend - bei einem kleinen Anteil landwirtschaftlicher Verwertung - deponiert.

9.5 Potential der Co-Vergärung auf Kläranlagen

Sowohl die Resultate der Auswertung von statistischen Daten, wie auch die Umfrage bei den Kantonen haben gezeigt, dass schon **kurzfristig** mit relativ kleinem Aufwand 10-15 % der schweizerischen Faulraumkapazität auf Kläranlagen für eine kostengünstige Verwertung biogener Abfälle nutzbar gemacht werden könnte.

Für eine erste, sehr grobe **Abschätzung** des Energiegewinns und möglicher Abfallmengen, die durch Co-Vergärung bearbeitet werden können, müssen diverse Annahmen getroffen werden: Es wurde angenommen, dass

- die in Frutigen erhobenen Daten relevant sind (netto verfügbare Energie: rund 65 kWh/t elektrisch und 165 kWh/t thermisch),
- für die Co-Vergärung nur ARA's der Klassen 1-3 in Frage kommen, welche eine Gasverwertung und eine Hygienisierungsstufe aufweisen,
- die Anlagenkapazität der geeigneten Kategorie in Abb. 8 unterdessen um knapp 10% auf rund 4 Mio EGW_{bio} gestiegen ist,
- die Abfallmengen mit den Einwohnergleichwerten korrelieren und dass
- jährlich rund 30 kg biogener Abfall pro EGW verwertet wird (d.h. kleinere Menge als V2).

Somit können für die Schweiz folgende Daten abgeschätzt werden: Durch die Co-Vergärung auf Kläranlagen könnten kurzfristig ohne grossen, ARA-seitigen Mehraufwand zusätzlich **pro Jahr** rund **120'000 t organische Abfälle**, bzw. rund 200'000 m³ biogener Abfall anaerob behandelt werden. Dabei werden rund 7 Mio m³ Biogas frei. Die so zusätzlich gewonnene Energie würde jährlich in der Grössenordnung von 40-45 GWh liegen. Nach Abzug der Energie für die Aufbereitung könnten netto knapp 10 GWh Elektrizität und gut 20 GWh Wärme pro Jahr erwartet werden. Nasse biogene Abfälle, welche in konventionellen Kompostierungs- oder Verbrennungsanlagen mit grossem Fremdenergieaufwand entsorgt werden, liefern damit netto erneuerbare Energie als Deckungsbeitrag an den Energieaufwand der Abwasserreinigung.

Diese erste Schätzung lässt grob Grössenordnungen erahnen: Eine grosse KOMPOGAS-Anlage verwertet vergleichsweise 10'000 Jahrestonnen. Das Potential der Co-Vergärung liegt damit - unter all den erwähnten Vorbehalten - bei eher konservativen Anliefermengen in der **Grössenordnung der Kapazität von einem Dutzend KOMPOGAS-Anlagen**. Der große Vorteil der Co-Vergärung ist, dass auch Gebiete abgedeckt werden können, wo das Abfallaufkommen für Grossgäranlagen zu klein ist.

Zur Erinnerung sei nochmals festgehalten, dass als Ausgangsmaterialien für die Co-Vergärung Abfälle in Frage kommen, die ohne große Mengen von Strukturmaterial und ohne grossen Fremdenergieaufwand nicht kompostiert werden können, und die bei Kompostierung oder Verbrennung zu sehr hohen Entsorgungskosten führen. Es sind dies:

- Nassabfälle, wie **Speisereste** aus dem Gastgewerbe, welche infolge einschneidender Hygienerichtlinien oder wegen Fehlens geeigneter Abnehmer nicht als Futtermittel verwendet werden können, sowie Überschüsse aus der Futtermittelproduktion,
- **relativ störstoffarme Chargen**, wie Gemüse- und Pflanzenabfälle von Grossverteilern oder Monochargen aus der lebensmittelverarbeitenden Industrie und dem Gewerbe,
- andere, eventuell stärker verunreinigte Stoffe, wie Küchenabfälle aus den **Haushaltungen**.

Die Co-Vergärung liefert daher nicht nur netto erneuerbare Energie, sondern spart auch ganz beträchtliche Mengen an (fossiler) Energie ein, welche zur Kompostierung notwendig wären: Pro Tonne biogene Nassabfälle werden in einem Kompostwerk ohne weiteres 50 bis deutlich über 100 kWh nicht erneuerbare, hochwertige Endenergie pro Tonne verarbeitetes Material benötigt [9]. Sofern die Elektrizität thermisch gewonnen wird, kann der Primärenergieaufwand drei- bis viermal höher liegen. Unter dem Strich verbleibt daher ein **Energiegewinn, der ohne weiteres das Doppelte der in Form von Biogas netto erzeugten Energiemenge ausmacht**. Zusätzlich darf in diesem Zusammenhang die sehr positive Auswirkung auf die Reduktion des Treibhauseffekts und auf die Reduktion von Ozonkiller-Substanzen nicht vergessen werden (vgl. Kap.12, philosophische Schlussbetrachtung).

Sofern der Klärschlamm landwirtschaftlich genutzt wird, kann durch die Substitution von Bodenverbesserern und Kunstdüngern gegenüber der (energetisch defizitären) Verbrennung ein zusätzlicher Energiegewinn resultieren.

9.6 Ökonomie und Zukunftsperspektiven der Co-Vergärung

Aufbereitungsapparaturen müssen dem Substrat angepasste Förder- und Zerkleinerungseinrichtungen aufweisen. Das heisst, dass die Apparate eine gewisse Grösse aufweisen müssen, bei welcher sie problemlos auch grössere Mengen, das heisst mehrere Kubikmeter pro Tag, aufbereiten können. Die **Investitionskosten** sind damit - zumindest auf ARA's kleiner und mittlerer Grösse - praktisch von der **Verarbeitungsmenge unabhängig** (vgl. Tab.16).

Im Vergleich zu anderen Entsorgungswegen für feste biogene Abfälle stellt die Co-Vergärung einen **kostengünstigen Entsorgungsweg** dar, sofern gewisse Mindestmengen vorhanden sind, welche die Erstellung einer Aufbereitungsapparatur lohnenswert erscheinen lassen. Die teurere zweistufige Aufbereitung lässt sich bei 1'000 Jahrestonnen auf einer Anlage wie Frutigen für Fr. 56.-/t bewerkstelligen. Bei grösseren Verarbeitungsmengen und/oder einstufiger Aufbereitung von nassen, grösstenteils vorgekochten Speiseresten sinken die spezifischen Kosten bis unter Fr. 50.-/t. Die Kompostierung der gärbaren Abfälle ist vergleichsweise teuer (spezifische Kosten von minimal Fr. 80.-/t bis zu über Fr. 200.-/t in neuen, voll geschlossenen Anlagen) [18] und gleichzeitig problematisch (Geruchsemmissionen, Behinderung des Rotteprozesses) beziehungsweise gar nicht möglich (Nassabfälle aus der Küche ohne Strukturmateriel). Die Gärung in speziellen Feststoffgäranlagen kostet bei Anlagegrössen mit einer Jahreskapazität von 10'000 Jahrestonnen zwischen Fr. 150.- und Fr. 200.-/t [18]. Die Verbrennung oder Deponie von biogenen Abfällen ist teuer, ökologisch unsinnig und gemäss TVA nicht mehr erwünscht. Da auch die Verwertung von Abfällen als Futtermittel nicht kostenlos erfolgt, sprechen ökonomische Überlegungen für die Co-Vergärung.

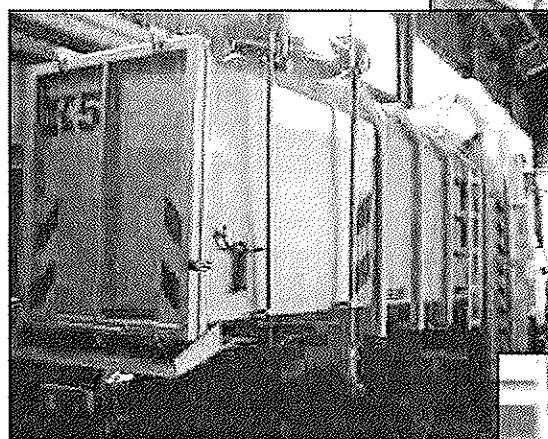
Wenn biogene Abfälle aus Haushalten co-vergoren werden, können allerdings Zusatzkosten für eine relativ aufwendige Fremdstoffabtrennung auflaufen, da erfahrungsgemäss Abfälle aus **privaten Haushaltungen stärker mit Störstoffen belastet** sind; bei Gewerbe- und Industrieabfällen ist es in der Regel einfacher, durch geeignete Information des Abfallerzeugers zu einer hohen Trenndisziplin zu motivieren. Insbesondere ist bei biogenen Haushaltsabfällen auch mit verholzten Anteilen zu rechnen, welche nach Möglichkeit nicht in den Faulturm gelangen sollten.

Ein Nachteil des hier diskutierten Konzepts ist, dass aus ökonomischen Überlegungen nur grössere Kläranlagen in Frage kommen. Normalerweise sind jedoch Gebiete, wo Ackerbau betrieben wird und damit ein guter Absatz für Klärschlamm vorhanden ist, relativ dünn besiedelt. Es ist anzunehmen, dass in diesen Gebieten viele der Kläranlagen kleine Kapazitäten aufweisen und aus ihrem Einzugsgebiet nicht genügend Abfall erhalten, wie dies für eine ökonomisch rentable Anlage nötig wäre.

In diesem Fall gilt zu überdenken, ob nicht eine **mobile Aufbereitungsanlage** vorteilhaft wäre, d.h. ein Sammelfahrzeug mit integrierter Zerkleinerung, mit Stapeltank, Behälterreinigungsdüse und Abpumpvorrichtung. Erste solche Fahrzeuge sind bereits heute in der Schweiz von Schweinemast-Grossbetrieben zur Einsammlung von Speiseresten importiert bzw. entwickelt worden.

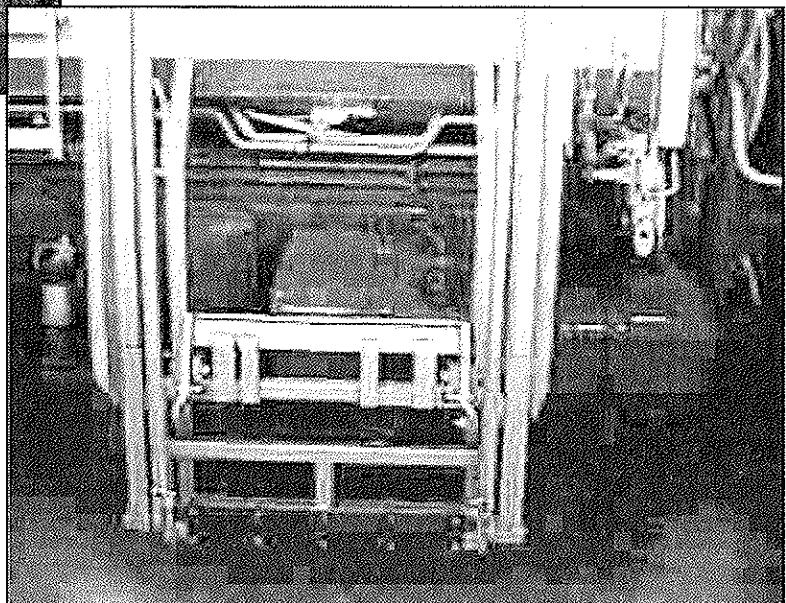


Mobile Aufbereitung für biogene Abfälle auf einem Lastkraftwagen

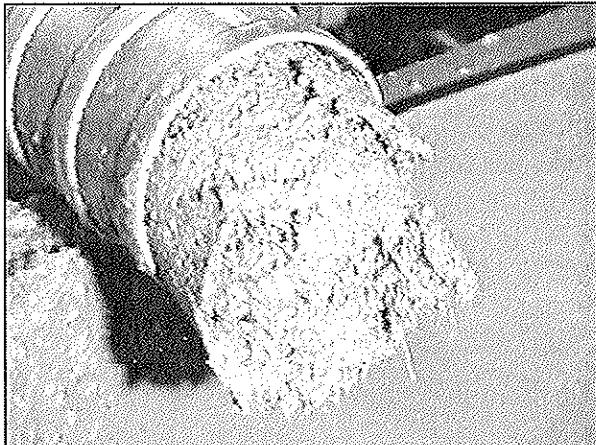


Ansicht von hinten

Diese Fahrzeuge könnten im Turnus ein grosses Gebiet abdecken und die aufbereiteten Abfälle abwechselungsweise in verschiedene, kleine Faultürme oder auch landwirtschaftliche Biogasanlagen pumpen. Durch eine mobile Aufbereitung wird das Potential der Co-Vergärung stark vergrössert, da auch in zersiedeltem Gebiet mit kleinen Kläranlagen, bzw. relativ hoher Dichte an landwirtschaftlichen Anlagen, Co-Vergärung in vielen Fällen möglich wird.



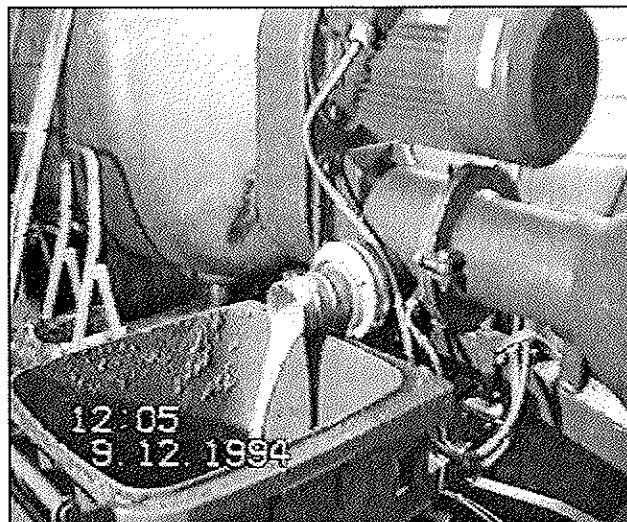
Am Aufbereitungsfahrzeug seitlich angebrachte Hub-Kipp-Vorrichtung für Sammelbehälter. Eine Schleuse zur Einspeisung von Kleinmengen ist ebenfalls vorhanden..



AUTOFERTIL: Mazerierte, relativ trockene Blumenabfälle

Golfplätzen entwickelt wurde. Die Anlage weist Grob- und Feinzerkleinerung auf und ist sehr kompakt. Sie verarbeitet sowohl nasse, weiche, wie auch trockene, härtere Abfälle zu einem homogenen Brei bzw. zu einer halbfesten Paste (vgl. Fotos). Man könnte sich vorstellen, dass ähnliche Apparaturen zusammen mit einem Lagertank auf einem Lastwagen installiert werden.

Im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojekts wurden zusätzlich zu den in Frutigen fest installierten **Aufbereitungsapparaturen** verschiedene weitere Vorrichtungen untersucht. Unter anderem wurde die AUTOFERTIL-Apparatur getestet, welche ursprünglich zur Homogenisierung und Versprühung von Rasenschnitt auf



AUTOFERTIL: Macerierter Brei von Nassabfällen, wie sie in Frutigen verarbeitet wurden

Durch solche Neuentwicklungen eröffnen sich für die Co-Vergärung ganz **neue Perspektiven**. Das Beispiel der mobilen Aufbereitungsanlage zeigt, dass die in diesem Kapitel zur Machbarkeit **getroffenen Annahmen nur sehr beschränkt gelten**: Nicht nur die Anlagengrösse, sondern auch die anderen Kriterien sind - zumindest mittel- und längerfristig - in Frage zu stellen:

Eine sinnvolle **Gasnutzung** wurde beispielsweise als Voraussetzung für die Co-Vergärung bezeichnet. Allerdings ist dieses Kriterium nicht *à priori* einschränkend, da davon ausgegangen werden muss, dass in Zukunft Kläranlagen sowohl mit Faulräumen als auch mit Gasverwertungs-Installationen nachgerüstet werden müssen. Diese Nachrüstung könnte unter der Perspektive des höheren Biogasertrags und der besseren Auslastung wahrscheinlich in den meisten Fällen durch die Zugabe eines Co-Substrats unterstützt werden. Der heute von verschiedenen Kantonen beabsichtigte Ausbau von Anlagen kann sich daher bei rechtzeitiger Berücksichtigung in der Planung zu einer **Chance** sowohl für die Co-Vergärung als auch für die Abwasserreinigung entwickeln, da so im Interesse des Steuerzahlers Synergien genutzt werden können.

Ende 1993 waren nur 104 Kläranlagen mit einer **Hygienisierungsstufe** ausgerüstet. Die Zahl steigt stetig. Viele dieser Hygienisierungsstufen sind nicht dimensioniert für eine Erhöhung der Stoffströme. Wie bereits weiter oben diskutiert wurde, muss eine Hygienisierungsstufe - zumindest beim grössten Teil der Gewerbeabfälle - nicht zwingend vorhanden sein. Hier gilt es, mittelfristig schlecht fundierte Vorurteile abzubauen und, wo nötig, die rechtlichen Grundlagen an die Realitäten anzupassen. Wenn die zerkleinerten Abfälle direkt in den Faulturm gespeist werden können, weitet sich der Kreis möglicher Anlagen natürlich aus.

Wenn eine mangelhafte **Qualität des Klärschlamm**s gegen eine Co-Vergärung spricht, bestehen heute Möglichkeiten, biogene Abfälle neben dem Faulturm rasch und ohne direkten Kontakt mit dem kommunalen Schlamm zu hydrolysieren [24]. Die säurenreiche, flüssige Phase, welche bei der Hydrolyse entsteht, wird unter Nutzung des Biogases im Faulturm vergoren und die festen, nicht kontaminierten Rückstände der Hydrolyse in die Landwirtschaft zurückgeführt.

Problematischer als die technischen Parameter ist die Frage nach der **Verwertung des Klärschlamm**s. 1991 wurden noch rund 70% des Klärschlamm an die Landwirtschaft als Düngemittel abgegeben [29]. Dieser Anteil verringert sich aufgrund der verschärften Gesetzgebung (Klärschlammverordnung 1981, Gewässerschutzgesetz 1991, Stoffverordnung 1986) stetig. Die Landwirtschaftspolitik ist im Umbruch: Viele Landwirte beabsichtigen, auf integrierte Produktion oder ökologischen Landbau umzustellen. Die Folge der Entwicklung ist schwer abschätzbar und ist von Kanton zu Kanton sehr verschieden. Selbst innerhalb eines Kantons können große regionale Unterschiede vorhanden sein: Im Berner Oberland beispielsweise muss Klärschlamm exportiert werden, während im Unterland der Klärschlamm mehr oder weniger vollständig von der Landwirtschaft übernommen werden kann. Die wichtigsten Parameter für diese regionalen Schwankungen sind Größen wie Viehbestand pro Flächeneinheit, Flächenanteil des Ackerbaus, Höhenlage über Meer und Anteil der Gewässerschutz- und Grundwasserschutzzonen.

Die Umfrage bei den Kantonen hat gezeigt, dass oft die Voraussetzungen ungünstig sind, indem in jenen Kantonen, wo die technische Machbarkeit einfach zu realisieren wäre, wenig Landwirtschaftsland oder viel Viehzucht (mit entsprechend hohem Gülleanfall) vorhanden ist. Andererseits haben Kantone mit viel Ackerbau (wie beispielsweise Schaffhausen) bereits die Problematik der biogenen Abfälle erkannt und haben neue Entsorgungswege erschlossen, so dass der Bedarf an Entsorgungsmöglichkeiten weniger dringend ist.

Man kann sich natürlich auf den Standpunkt stellen, dass die Rückführung des Klärschlamm auf das Feld nicht zwingend sei und dass bei Co-Vergärung wenigstens **zusätzliche Energie für die Klärschlammtröcknung** vor der Verbrennung nutzbar gemacht werde. Zumindest kurzfristig wird bei dieser Perspektive der Kreis möglicher Anlagen ebenfalls sehr stark ausgeweitet. Es stellt sich aber die Frage, ob es sich die Menschheit unter der Perspektive des Treibhauseffekts langfristig leisten kann, mit knapper werdender fossiler Fremdenergie Klärschlamm einzutrocknen und biologische Nähr- und Wertstoffe dem natürlichen Kreislauf zu entziehen. Wenn der Klärschlamm schon eingedickt wird, müssten zumindest Konzepte diskutiert werden, den Schlamm als Granulat in jene Anbaugebiete zu transportieren, wo heute ein beängstigend grosser Humusverlust beobachtet wird. Transport lässt sich bei den heutigen Siedlungs- und Handelsstrukturen, wo die Nahrungsproduktion sehr weit weg von den Verbraucherzentren stattfindet, nicht vermeiden.

10 Co-Vergärung in der Landwirtschaft

10.1 Die Problematik der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung

In der Landwirtschaft, wo Biomasse aufwächst und tierische Exkremeante anfallen, steckt ein sehr grosses Potential zur Biogasgewinnung. Das theoretische Potential wird auf 8-9 PJ/a geschätzt. Leider wird dieses Potential nur sehr beschränkt ausgeschöpft, obwohl die Vergärung für die Gülle im Vergleich zur Verwendung ohne Behandlung verschiedene gewichtige Vorteile bringt. In Tabelle 19 sind die Vorteile vergorener Gülle aufgelistet:

Problemkreis	Wirkung	Problemkreis	Wirkung
Geruchsemmission	++	Entmischung	+
Verätzung bei Pflanzen	++	Stickstoffverfügbarkeit	+
hygienische (Un-)Bedenklichkeit	++	Unkrautsamen	+(+)
Nitratauswaschung	++	Ammoniakausgasung	+/-
Futterqualität Grünland	+	Methanausgasung	++
Gülleüberschuss	+	Lachgasfreisetzung	++
Absatzchancen	+(+)	Homogenität beim Ausbringen	++

Tab.19: Vorteile der anaerob vergorenen landwirtschaftlichen Gülle gegenüber konventionell gelagerter Gülle (nach [20]; modifiziert)

Beim Betrachten der Tabelle 19 fällt auf, dass die **Vorteile** verschiedener Faktoren **schwer monetär quantifizierbar** sind. Zudem fallen verschiedene Punkte betriebswirtschaftlich nicht ins Gewicht, wären hingegen volkswirtschaftlich sehr wichtig: Reduktion der Treibhausgase, erneuerbare Energiegewinnung oder Reduktion der Nitratbelastung des Grundwassers.

Einige Kantone haben diesen Vorteilen Rechnung getragen, indem sie die landwirtschaftliche Biogasgewinnung bis zu einem gewissen Mass finanziell unterstützen. Trotzdem ist die **landwirtschaftliche Biogasproduktion** in den letzten Jahren bei jährlich rund 15 GWh **praktisch konstant** geblieben [3]. Die Anlagenzahl hat wegen der Stilllegungen von alten Kleinanlagen sogar abgenommen. Die Zahl industrieller und gewerblicher Biogasanlagen hat hingegen andererseits von 1990-95 von 7 auf 20 zugenommen.

Diese Fakten umschreiben die Problematik der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung deutlich: Bei der **landwirtschaftlichen Biogasgewinnung** muss die Anlage “rentieren”, d.h. **selbsttragend** sein. Die einzigen monetär exakt quantifizierbaren Vorteile sind die Einnahmen aus der Substitution von Energie. Der Betreiber muss daher mit dem produzierten Biogas die Anlage amortisieren und deren Betrieb finanzieren. Dies ist beim heutigen Ölpreis - welcher in den letzten beiden Jahrzehnten real stark gefallen ist - nicht möglich, da die Landwirtschaftsanlagen in der Regel relativ klein sind. Zudem kann oft im Sommer die Wärme nur sehr beschränkt genutzt werden. Es erstaunt nicht, dass Betreiber landwirtschaftlicher Biogasanlagen in der Regel Idealisten sind, welche auch für nicht quantifizierbare Werte und für Werte, welche der Allgemeinheit zugute kommen, einen Wert einsetzen.

Anders ist die Situation bei **Industrie- und Gewerbebetrieben**, sowie bei der öffentlichen Hand: Hier darf die Biogasgewinnung etwas kosten; sie muss nur billiger sein, als andere Verwertungswege für biogenen Abfall oder organisch belastete Abwässer. Die Biogasgewinnung steht in Konkurrenz zu aeroben biotechnologischen Verfahren, welche vergleichbare Investitionen, aber deutlich höhere Betriebskosten (Energieaufwand) erfordern.

Im Rahmen von *Energie2000* wurden in jüngerer Zeit die Möglichkeiten der Biogasgewinnung in der Landwirtschaft neu untersucht. Während in den frühen 80-er Jahren der Schwerpunkt auf kleineren und mittelgrossen Betrieben lag, geht es heute darum, zumindest jenen Teil des sehr grossen landwirtschaftlichen Biogaspotentials auszuschöpfen, welcher auf **grösseren Betrieben** anfällt. Ziel des Projekts war, geeignete Betriebe zu suchen und dort - unter Umständen mit Hilfe von neuen Finanzierungsmodellen - den Bau von Anlagen zu unterstützen. Zielgruppe waren Betriebe mit mindestens 60 Grossvieheinheiten (GVE). Die Möglichkeit von Anlagen für Gemeinschaftsbetriebe oder von Gemeinschaftsanlagen für lokal nahe beisammen liegende getrennte Betriebe mit einer genügend grossen GVE-Zahl war mit zu berücksichtigen [22].

Zunächst erstaunte das grosse Interesse, welches die Inhaber grösserer Betriebe der Biogasgewinnung entgegenbringen. Fast jeder zwanzigste Betrieb hat sich beispielsweise aus eigenem Antrieb auf Grund eines kleinen Artikels in einer Fachzeitschrift gemeldet. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass heute praktisch ausschliesslich nur noch grössere Betriebe Anlagen installieren (vgl. oben: stagnierende Produktion bei abnehmender Anlagenzahl). In einem Auswahlverfahren wurden im Rahmen des erwähnten Projekts besonders interessante Standorte ausgewählt und besucht. Bei den besuchten Standorten zeigte sich, dass diese Betriebe praktisch ausnahmslos von **innovativen Inhabern** geführt werden, welche entweder auf der Energie- oder auf der Substratseite bereits neue Wege gehen oder zu gehen beabsichtigen. Die Interessenten sind praktisch ausnahmslos aktive Leute mit unternehmerischem Denken, welche die sich verändernden landwirtschaftlichen Rahmenbedingungen als Herausforderung verstehen, offen sind für Diversifizierung und dieses Denken auch in anderen Bereichen schon umgesetzt haben. Gleich mehrere Interessenten verarbeiten bereits jetzt Abfälle von Grossverteilern oder von Gemeinden, welche später über die anaerobe Linie verwertet werden können.

Ein wichtiges Resultat - wenn nicht das wichtigste - des erwähnten Projekts ist, dass die **Co-Vergärung für die landwirtschaftliche Biogasgewinnung praktisch zwingende Voraussetzung** ist. Es kann gesagt werden, dass auch bei den heutigen, sehr tiefen Energiepreisen die landwirtschaftliche Vergärung auf grösseren Betrieben nur dann spürbare ökonomische Vorteile aufzeigen kann, wenn der Betrieb im Sommer gute Verwertungsmöglichkeiten für die Energie aufweist und/oder die Möglichkeit besitzt, durch finanziell abgegoltene Annahme von betriebsfremden Substraten die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu verbessern. Daneben sprechen natürlich in ökonomisch weniger eindeutigen Situationen weitere, monetär schlecht quantifizierbare Vorteile zusätzlich für die Einführung von Biogas.

Um die Bedeutung der Co-Vergärung in der Landwirtschaft zu dokumentieren, wird in der Folge ein typisches Fallbeispiel dargestellt, welches im Rahmen einer Betriebsanalyse umfassend durchgerechnet wurde. Dem Beispiel kommt durchaus ein allgemeingültiger Charakter zu. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass neuerdings eine **Windows-Software zur Dimensionierung von Biogasanlagen** entwickelt wurde. Mit dem Programm ist es einfach möglich, Co-Vergärungsanlagen auszulegen und verschiedene ökonomische Varianten zu rechnen mit verschiedenen Annahmen für Teuerungsraten, Annuitäten, RWU-Sätzen, Prioritäten der Energiesubstitution und Substratzusammensetzung [40].

10.2 Ökonomie der landwirtschaftlichen Co-Vergärung

Der hier dokumentierte Betrieb ist in der Gruppe >60 GVE ein eher kleiner Grossbetrieb. Er liegt an einem Osthang eines Hügelzugs des schweizerischen Mittellands. Die Familie besitzt rund 80 GVE Braunvieh, welches sich praktisch immer im Stall befindet (Ausnahme: rund 30 GVE Milchvieh im Sommer 2h/d Weide).

Speziell am Betrieb ist, dass eine Anlage zum Dörren von Obst vorhanden ist. Der Wärmebedarf wird über gratis gelieferte und anschliessend geschnetzelte Einwegpaletten (80-85%) sowie über Holz aus dem eigenen Wald (15-20%) gedeckt. Das heisst, dass zur Deckung des Wärmebedarfs vor allem Eigenleistung eingesetzt wird. Strombedarf besteht zum Kühlen der Birnen vom August bis März, zum Kühlen der Milch auf 4,5° (170-180'000 Lit/a), für die Stalllüftung, Pumpen etc. sowie zur Warmwasseraufbereitung für Hof und Stöckli in jenen Sommermonaten, in welchen weder gedörrt noch geheizt wird. Die Stromkosten belaufen sich pro Jahr auf Fr.10-12'000.-, was 60-70'000 kWh entspricht.

In knapp 10 km Distanz befindet sich ein Betrieb zur Verarbeitung von Salaten und Gemüsen, welcher vorgewaschene Salate an Grossverteiler liefert und feste biogene Abfälle zur Zeit relativ teuer über Kompostierung entsorgt (Kosten > 100.- Fr/t). Ein kleiner Weiler in der Nachbarschaft mit rund 500 Einwohnern führt die separate Einsammlung von Küchenabfällen mit Traktor und Anhänger ein. Eventuell bestünde die Möglichkeit, diese **Abfälle mit zu verwerten**. Es wurden in einer ersten, groben Betriebsanalyse daher vier Varianten gerechnet: 'Mit und ohne Bioabfallzugabe' (1m³/d) kombiniert mit 'mit oder ohne Gasverwertung über eine Wärme-Kraft-Kopplung' (WKK).

Eine relativ detaillierte Kostenschätzung ergab ein **Investitionsvolumen** für die gesamte Anlage inkl. Nebenkosten von Fr. 168'370.-, bzw. von Fr. 213'570 bei Gasnutzung über eine Wärme-Kraft-Kopplung. Der hier vorgeschlagene Fermenter ist mit 155 m³ für reinen Güllebetrieb eher überdimensioniert. Die Kosten steigen dadurch jedoch nicht stark an, da das zusätzliche Fermentervolumen nur unwesentlich zu Buche schlägt. Dafür besteht die Möglichkeit, bei gleichbleibender Fermentergrösse/Investition ohne weiteres bis zu täglich 2 Tonnen (bzw. je nach Schüttgewicht 3-4 m³) biogene Abfälle mitzuvergären. Falls gewisse Komponenten bereits auf dem Hof vorhanden sind, reduzieren sich die Kosten entsprechend. Weitere Kostenreduktionen sind aufgrund von Eigenleistungen beim Bau möglich.

In Tabelle 20 wird die energetische Grobanalyse des Betriebs dargestellt. Bei der Wärme des produzierten Biogases wird nach Bruttomenge und praktisch nutzbarer Menge unterschieden. Dies trägt der Tatsache Rechnung, dass im Sommer (wenn nicht gedörrt und nicht geheizt wird) Überschusswärme produziert wird. Das heisst, dass in dieser Zahl die unterschiedliche monatliche Struktur von Energieangebot und Energienachfrage berücksichtigt ist.

In Tabelle 21 sind die Erträge aus der Energienutzung dargestellt, während Tabelle 22 die fixen und variablen Kosten unter definierten Vorgaben auflistet. Tabelle 23 fasst dann die gesamten Erlöse inkl. allfälliger Einnahmen aus der Abfallentsorgung zusammen, was in Gegenüberstellung zu Tabelle 22 eine Kosten-Nutzen-Überlegung erlaubt.

Gülle-/Abfallmengen	[m3/d]	[kg OS/d]	Biogas [m3/d]
Gülle	4.8	350	84
Biogene Abfälle (Variante mit)	1	61	24.5
Total	5.8	411	108.5

Auslegung Biogasanlage		Nur Gülle	Gülle + Bioabfall
Fermentergrösse	[m ³]	155	155
Verweilzeit	[Tage]	29	24
Biogasertrag	[m ³ /d]	84	108.5
Bruttogasproduktion	[m ³ /Jahr]	30'624	39'559
Prozessenergie	[m ³ /Jahr]	13'537	13'537
Biogasüberschuss	[m³/Jahr]	17'087	26'022

Einsparung von Heizöl/Elektrizität		Nur Gülle	Gülle + Bioabfall
Verwertung im Heizkessel:			
Verfügbare Wärmemenge (netto)	[kg Oel/Jahr]	8'600	13'100
Verwertung in der WKK:			
Produzierter Strom	[kWh/Jahr]	45'900	59'400
Verfügbare Wärmemenge (netto)	[kg Oel/Jahr]	3'200	6'100
% vom Energiebedarf Elektrizität	[%]	ca. 70	ca. 90
% vom Energiebedarf Wärme: theoretisch	[%]	62	102
% vom Energiebedarf Wärme: praktisch	[%]	47	88

Tab. 20: Energetische Grobanalyse eines grösseren Landwirtschaftsbetriebs im schweizerischen Mittelland unter Berücksichtigung der lokalen Klimadaten. Unter "praktisch" wird der praktisch nutzbare Anteil am Wärmebedarf verstanden.

Verwertung in der WKK:		Nur Gülle	Gülle + Bioabfall
Strom brutto (16 Rp pro kWh)	Fr./Jahr	7'350	9'500
Wärme theoretisch (35.- Fr./100 kg)	Fr./Jahr	1'120	2'150
Wärme praktisch (35.- Fr./100 kg)	Fr./Jahr	800	1'800
Total praktisch	Fr./Jahr	9'270	13'450
Verwertung im Heizkessel			
Wärme theoretisch (35.- Fr./100 kg)	Fr./Jahr	3'000	4'600
Wärme praktisch (35.- Fr./100 kg)	Fr./Jahr	2'000	3'000

Tab 21: Erträge bei den verschiedenen Planungsvarianten mit und ohne Bioabfall kombiniert mit oder ohne Nutzung des Gases in einer Wärme-Kraft-Kopplung

Fixe und variable Kosten	Heizkessel	mit WKK
Annuität Anlage (15 Jahre, 6%: 10.3%)	16'164	20'503
Anlagenunterhalt (0.5% von Invest)	842	1'068
Unterhalt WKK (8 Rp./kWh; Vollservice)		3'675
Personalkosten (Fr.35.- /h)	6'388	6'388
Versicherungen (1%)	1'684	2'136
Total Betriebskosten	25'077	33'769

Tab 22: Betriebskostenschätzung für die Anlage mit Heizkessel bzw. mit Wärme-Kraft-Kopplung

Verwertung	Nur Gülle	Nur Gülle	Bioabfall	Bioabfall
	ohne WKK	mit WKK	ohne WKK	mit WKK
Elektrizität (16 Rp pro kWh)	-	7'350	-	9'500
Wärme (Fr. 35.- /100 kg Heizöl)	2'000	800	3'000	1'800
Erlös aus Bioabfall (1 t/d, Fr.60.-/t)	-	-	21'900	21'900
Total Erlöse	2'000	8'150	24'900	33'200
Total Betriebskosten (Tab.22)	25'077	33'769	25'077	33'769
Verlust (Fr./a)	23'077	27'619	177	569

Tab. 23: Rentabilitätsrechnung für vier Varianten einer landwirtschaftlichen Biogasanlage

Aus der Rentabilitätsrechnung, die in der Aussage als durchaus typisch für Landwirtschaftsbetriebe angesehen werden darf, wird klar, dass ein **Anlagenbau ohne Co-Vergärung nicht sinnvoll** ist. Die zusätzliche Vergärung von Bioabfällen ist aus energetischer Sicht interessant und in Bezug auf die Ökonomie ein Muss: Einerseits kann dadurch der Erlös aus der Energiesubstitution gesteigert werden, und andererseits wird erst durch den Kostendeckungsbeitrag aus der Annahme von Bioabfällen der Bau und Betrieb einer Biogasanlage wirtschaftlich möglich.

Die obige Auswertung zeigt, dass **Rentabilität** bereits erreicht werden kann, wenn pro Tag 1 Tonne Bioabfälle für eine Entsorgungsgebühr von Fr. 60.- pro Tonne mitvergoren werden kann. (Dies ist weniger als die Hälfte der aktuell bezahlten Gebühren). Wenn Eigenleistungen günstiger als Fr. 35.- eingesetzt werden oder Servicearbeiten an der WKK selbst durchgeführt werden, wird Rentabilität entsprechend früher erreicht. Desgleichen beeinflussen tiefere Zinsen, als im Beispiel angenommen, oder steigende Energiepreise die Rentabilität positiv. Zusätzlich sind natürlich die in Tabelle 19 erwähnten, monetär nicht exakt quantifizierbaren Vorteile der Vergärung nicht zu vergessen. Bei zwei Tonnen externer Abfälle, bzw. bei höheren Annahmegebühren, kann ein spürbarer Überschuss erwirtschaftet werden. Bei grösseren Annahmemengen muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Nährstoffbilanz des Betriebs immer noch ausgeglichen ist.

Im vorliegenden Fall ist die Verwertung in einer **Wärme-Kraft-Kopplung** sicher **sinnvoller** als ein Einsatz zur reinen Wärmeerzeugung: Eine Rechnung der Energiebilanz nach Monaten unter Berücksichtigung des lokalen Temperatur-Jahresganges zeigte, dass der Wärmebedarf zum Dörren leider weitgehend mit dem Wärmebedarf zur Raumheizung zusammenfällt. Im Sommer (April bis September) entstehen dadurch bei rein thermischer Verwertung große Überkapazitäten an Wärme

(rund 140'000 MJ/a). Trotzdem fehlen im Winter an besonders kalten Tagen rund 5000 MJ. Im Fall der WKK entsteht bei der Verstromung immer noch rund 60% Abwärme auf einem Niveau von 75 - 78 °C. Diese Wärme kann die Holzheizung (bzw. den dazu notwendigen Arbeitsaufwand) sehr stark entlasten. Gleichzeitig kann zur Sommerszeit die Warmwasseraufbereitung über die Motorabwärme erfolgen.

Bei den **Annahmegebühren** für Bioabfall wird der Tatsache Rechnung getragen, dass der Gemüsebetrieb einfach verwertbaren, weitestgehend störstofffreien Abfall liefert. Im Fall der mit Störstoffen belasteten Haushaltsabfälle müsste auf jeden Fall ein deutlich höherer Tonnen-Preis eingesetzt werden. Diese Mehreinnahmen würden jedoch durch die zusätzlich notwendige Fremdstoffauslese neutralisiert.

Landwirtschaftliche Co-Vergärung wird vor allem in Dänemark praktiziert, wo auch entsprechend fortschrittliche Gesetze erlassen wurden. Aber auch in Deutschland und in der Schweiz sind schon einige Anlagen in Betrieb. Um die Co-Vergärung zum Abschluss etwas praxisnaher zu umschreiben, wird im folgenden Kapitel eine Auswahl realisierter Praxisbeispiele aus Landwirtschaft und Kommunalbereich vorgestellt.

11 Praxisbeispiele

11.1 K. Günthardt, Dällikon

Ausgangslage

Kaspar Günthardt bewirtschaftet im Zürcher Furttal einen Bio-Landwirtschaftsbetrieb mit Tierhaltung. Dabei fallen pro Tag rund 2.5 m^3 Gülle an. In unmittelbarer Nähe zu seinem Hof befindet sich ein Rüstbetrieb, der Salate und Gemüse von den umliegenden Gemüsebauern zu rüstfertigen Produkten aufbereitet. Bei der Gemüseverarbeitung entstehen pro Tag rund 12 m^3 Rüstabfälle. Vor rund drei Jahren entschied sich Kaspar Günthardt für den Bau einer Biogasanlage zur Vergärung von Gülle und Rüstabfällen. Verschiedene ähnliche Projekte wurden in der Zwischenzeit realisiert oder befinden sich in Planung.

Konzept

Die Gemüserückstände werden "püriert" in einem Tankwagen angeliefert und in der Vorgrube mit der Gülle vermischt. Zur Durchmischung in der Vorgrube dient eine Rühr-/Mixpumpe. Eine Drehkolbenpumpe fördert das Substrat in den stehenden Fermenter mit einem Volumen von 260 m^3 , wo die Vergärung bei Temperaturen zwischen 33°C und 35°C stattfindet. Zur Durchmischung und Verhinderung eines Schwimmdeckenaufbaus ist im Fermenter ein langsam laufendes Haspelrührwerk eingebaut, welches intervallmäßig betrieben wird. Das Biogas wird entschwefelt, in einem Gasspeicher aufgefangen und den zwei BHKW (Blockheizkraftwerken; hier Fiat/TOTEM) zur Erzeugung von Strom und Wärme zugeführt. Die installierten Leistungen betragen je 13 kW elektrisch und 35 kW thermisch. Die ausgegorene Gülle fliesst über einen speziellen Überlauf im Fermenter in den nachgeschalteten Güllelagerbehälter.

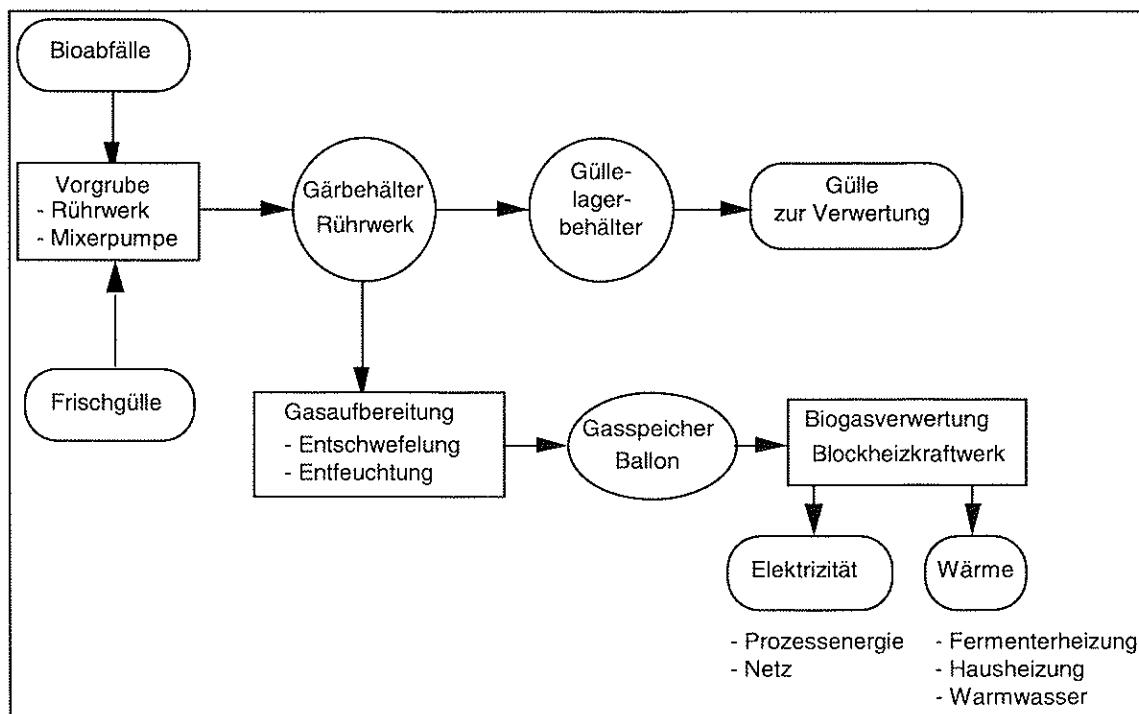


Abb.9: Fließbild der Co-Vergärungsanlage Brüederhof Dällikon [21]

Betriebsdaten und Erfahrungen

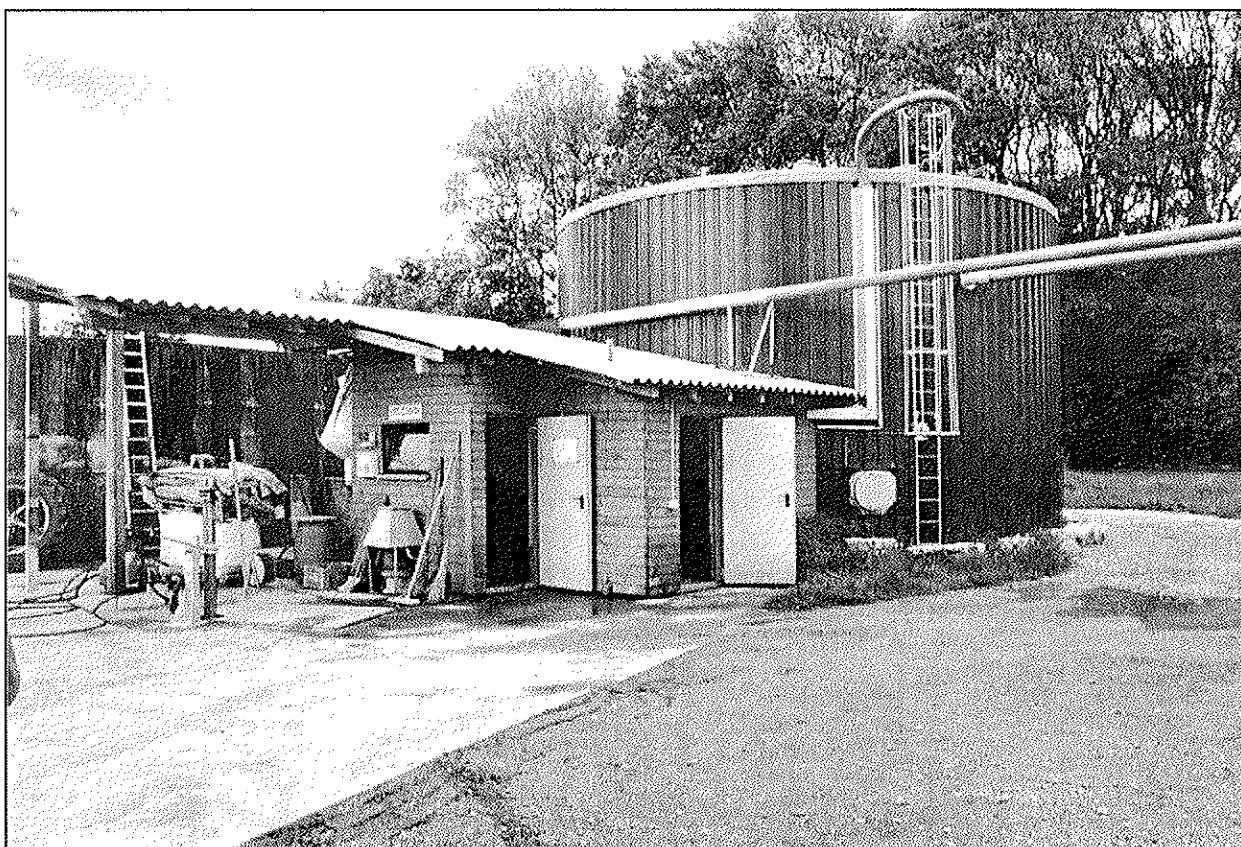
Der gesamte Wärmebedarf des Landwirtschaftsbetriebes beträgt etwa 200 MWh. Die beiden Blockheizkraftwerke produzieren bei jährlich je 5'000 Betriebsstunden zusammen rund 350 MWh Wärme. Die Fermenterheizung benötigt während dem ganzen Jahr knapp einen Drittelpart der erzeugten Wärme. Vor allem in den Sommermonaten besteht ein Wärmeüberschuss, da nur noch die Warmwasseraufbereitung zusätzliche Energie benötigt. Steigt die Temperatur im Wärmespeicher über 80°C, muss die überschüssige Wärme über einen Heizlüfter abgeführt werden. Ein Teil der Abwärme wird zum Früchteabtrocknen genutzt, und daneben plant Kaspar Günthardt den Bau von Treibhäusern als weitere Energiebezüger. Im Winter wird auch bei extremer Kälte keine Zusatzheizung benötigt.

Gärsubstrate	
Gülle von 50 Grossviecheinheiten (GVE)	2-3 m ³ /Tag
Co-Substrate	8-10 m ³ /Tag
Total	10-13 m ³ /Tag
Volumina	
Vorgrube	60 m ³
Fermenter	260 m ³
Gasspeicher	150m ³
Behälter für vergorene Gülle	570 m ³
Vergärung	
Verweilzeit der Biomasse im Fermenter	20-25 Tage
Temperatur	33 °C
Gasproduktion pro Tag	240 m ³
Blockheizkraftwerk	
Elektrische Leistung	2 x 13 kW
Thermische Leistung	2 x 35 kW
Gesamtenergiemenge pro Jahr	
Elektrizitätsproduktion	130'000 kWh
Wärmeproduktion	350'000 kWh
Wärmebedarf (ganzer Betrieb)	200'000 kWh

Tab.24: Anlage- und Betriebsdaten der Anlage Brüederhof

Nebst der Wärme produzieren die beiden BHKW 130 MWh elektrische Energie pro Jahr. Knapp 15% beträgt der Eigenstrombedarf der Biogasanlage. Etwa ein Drittel des erzeugten Stroms wird im landwirtschaftlichen Betrieb verwertet, und rund die Hälfte speist Günthardt ins Netz zurück. Die BHKW's funktionieren problemlos.

Die verarbeiteten Rüstabfälle haben die Tendenz, sehr schnell eine Schwimmdecke zu bilden. Deshalb muss zukünftig die Rührwirkung im Fermenter verbessert oder ein zusätzliches Rührwerk eingebaut werden. Im Bereich des Fermenterablaufs kam es zeitweise zur Bildung eines Ppropfens. 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 Gölleigenschaften erreicht, wie sie in Kapitel 10.1 beschrieben wurde.



Ansicht des Fermenters und des Betriebsgebäudes der Anlage Günthardt, Dällikon. Links vor dem Gebäude ist die Vorgrube, wo die externen Abfälle eingespeist und durchmischt werden.

Kosten

Die Investitionskosten der Anlage betrugen Fr. 560'000.-. Bei einer Amortisationsdauer von 15 Jahren und einem Zins von 6% betragen die Betriebskosten einschliesslich Anlageunterhalt, Wartung, Personalkosten und Versicherung rund Fr. 100'000.-. Die Erlöse vom Verkauf von Strom (16 Rp./kWh) und der Substitution von Heizoel (Fr. 35.- pro 100 kg) betragen rund Fr. 35'000.-. Rechnet man den Ertrag aus der Verarbeitung der Salat- und Gemüserüstabfälle von rund Fr. 70'000.- pro Jahr dazu, so lässt sich die Biogasanlage kostendeckend, bzw. je nach Abgeltung der Eigenleistung (Unterhalt) sogar mit einem Gewinn betreiben.



Geöffnete Vorgrube mit der Rühr-/Mixpumpe

11.2 Gebrüder K. und U. Wittwer, Süderen

Ausgangslage

Der Hof der Gebrüder Klaus und Urs Wittwer liegt auf 1000 m.ü.M., ausserhalb der Ortschaft Süderen auf dem Schallenberg im Emmental. Er umfasst eine Fläche von 5,5 Hektaren. Haupteinnehmerquellen sind Eierverkauf, Kükenaufzucht und die Schweinemast. Der Tierbestand setzt sich zusammen aus 3000 Legehennen und 3000 Aufzuchtküken, 280 Mastschweinen sowie 6 Kühen und 4 Rindern. Die Beheizung der Hühnerställe benötigt viel Energie. Mit dem Bau der Anlage wurde im Frühling 1994 begonnen, und sie wurde im Sommer 1995 in Betrieb genommen.

Konzept

Beim alleinigen Betrieb mit hofeigenen Substraten (Gülle, Mist) kann die bestehende Biogasanlage nicht wirtschaftlich betrieben werden. Deshalb suchten die Brüder Wittwer nach Möglichkeiten, um das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Biogasanlage zu verbessern. Die Co-Vergärung von betriebsfremden biogenen Stoffen ist für die Gebrüder Wittwer ein energetisch und auch wirtschaftlich interessantes Konzept, da sie sich als "Entsorger" neue Verdienstquellen erschliessen können.

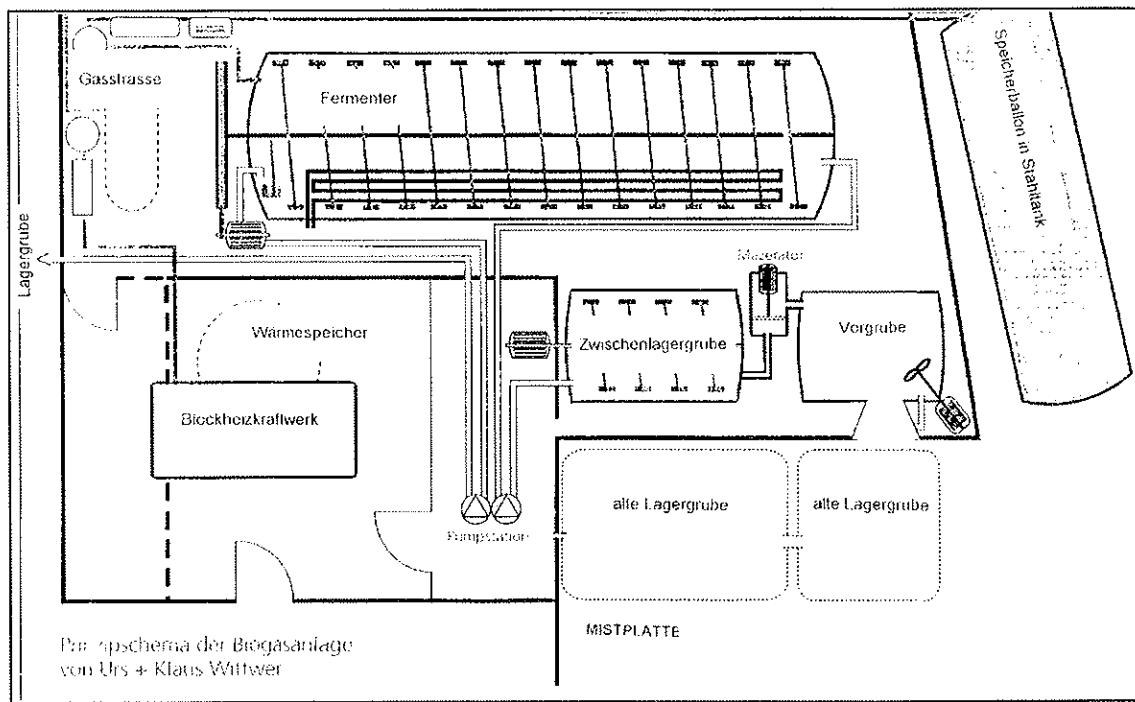


Abb.10: Prinzipschema der Anlage Wittwer, Süderen [2]

In der 30 m³ fassenden Vorgrube werden Co-Substrate und Gülle mit einem Tauchrührwerk vermischt. Nach dem Durchlaufen eines nachgeschalteten Mazerators, in welchem die Feststoffe püriert werden, gelangt das Substratgemisch in die Zwischenlagergrube. Das Substrat in der Zwischenlagergrube wird durch die heissen Auspuffgase des BHKW's vorgewärmt. Von der ebenfalls 30 m³ fassenden Zwischenlagergrube wird die Suspension mittels Kolbenpumpen in den liegenden Fermenter mit einem Nutzvolumen von 130 m³ gepumpt. Der Fermenter arbeitet nach dem Propfstromprinzip. Ein langsam laufendes Haspelrührwerk verhindert die Schwimmdecken- oder Sedimentbildung. Je nach Substratqualität und -menge wird ein unterschiedliches Beschickungsintervall gewählt (z.B. stündlich, alle 15 Minuten etc.). An der Fermenterwand sind Heizrohre

angebracht, welche mit Heisswasser aus dem Blockheizkraftwerk durchflossen werden. Die Gärtemperatur beträgt 32-34°C. Die Verweilzeit liegt zwischen 25 und 30 Tagen. Das Biogas wird in einem Gasballon von 85 m³ aufgefangen und mit Hilfe eines Druckerhöhungsgebläses dem BHKW zugeführt. Der produzierte Strom wird ins Netz eingespeist und die Wärme in einem 5'500 l Warmwassertank gespeichert. Die ausgegorene Gülle fliesst über einen Überlauf im Fermenter in die nachfolgende Lagergrube.



Gasspeicher aus Occasionsmaterialien, Süderen

muss über einen Heizlüfter abgeführt werden. Ein Teil des produzierten Stroms wird auf dem Hof verwertet, der Überschuss wird ins Netz eingespeist.

Betriebsdaten und Erfahrungen

Die Anlage wurde bisher mit Gülle, Kuhmist und Panseninhalt betrieben. Die täglich zugeführte Gülle- und Feststoffmenge beträgt ca. 5 m³. Der Trockensubstanzgehalt des Gemisches liegt zwischen 8 und 12 %. Die Vergärung von weiteren sogenannten Co-Substraten ist vorgesehen. Durch die Biogasverwertung im Blockheizkraftwerk werden jährlich 70 MWh Strom und 155 MWh Wärme produziert. Rund 100 MWh pro Jahr werden als Wärme zum Heizen von Gärprozess, Stall und Wohnhaus verwertet. Der Überschuss von rund 55 MWh, insbesondere während der Sommermonate,

Gärsubstrate	
Flüssige Substrate:	
Betriebseigene Schweinegülle	280 Mastschweine
Betriebseigene Rindergülle	6 Kühe, 4 Rinder
Bisher verwendete Co-Substrate:	
Betriebseigener Hühnermist	3000 Legehennen
Panseninhalt	
Total	ca. 5m ³ /Tag
Volumina	
Vorgrube	30 m ³
Zwischengrube	30 m ³
Fermenter	150 m ³
Gasspeicher	85 m ³
Vergärung	
Verweilzeit im Fermenter	26 Tage
Gärtemperatur:	36 °C
Gasproduktion pro Tag	150 m ³
Blockheizkraftwerk	
Marke/Typ	DIMAG GM 226B-6
Installierte Leistung thermisch:	65 kWh
Installierte Leistung elektrisch:	30 kWh
Gesamtenergiemenge pro Jahr	
Elektrizitätsproduktion	70'000 kWh
Wärmeproduktion	155'000 kWh
genutzte Wärme	100'000 kWh

Tab. 25: Anlage- und Betriebsdaten der Anlage Wittwer, Süderen [2]

Der bisher als Co-Substrat verarbeitete Panseninhalt neigt stark zur Schwimmdeckenbildung. Deshalb ist neben dem Röhren im Fermenter die Aufbereitung besonders wichtig. Der Panseninhalt wird vorzugsweise mit einem Mazerator püriert. Damit können die Schwimmdeckenbildung und allfällige Verstopfungen des Ablaufs weitgehend verhindert werden. Die Gasverwertung im BHKW ist problemlos. Die ausgegorene Gülle wird wie bisher als Hofdünger verwertet. Der Kanton Bern überwacht in Zusammenarbeit mit den Gebrüdern Wittwer die Ausbringmengen, um Überdüngung zu verhindern.

Kosten

Die Investitionskosten der Anlage betragen Fr. 380'000.-. Der Bau der Co-Vergärungs-Biogasanlage wurde vom Bundesamt für Energiewirtschaft, BEW, vom kantonalen Energiewirtschaftsamt und der Schweizerischen Berghilfe mit einem Gesamtbetrag von Fr. 121'000.- finanziell unterstützt. Für rund Fr. 100'000.- wurden Eigenleistungen erbracht, so dass die Eigenfinanzierung schliesslich nur Fr. 159'000.- betrug.

Bei einer Amortisationsdauer von 15 Jahren und einem Zins von 5 % betragen die Betriebskosten (gerechnet auf die vollen Kosten) einschliesslich Anlageunterhalt, Personalkosten und Versicherung rund Fr. 56'000.-. Die Erlöse vom Verkauf von Strom (16 Rp./kWh), der Annahme von Bioabfall (Fr. 12'500.-) sowie der Substitution von Heizoel (Fr. 35.- pro 100 kg) betragen im ersten Betriebsjahr rund Fr. 28'000.-. Um einen Betrieb zu ermöglichen, bei welchem die gesamten Anlagekosten abgedeckt werden können, müssten zukünftig vermehrt Co-Substrate angenommen und verarbeitet werden. Da besonders bei der Verwertung von Panseninhalt heute verschiedenerorts Engpässe bestehen, ist davon auszugehen, dass ein kostendeckender Betrieb möglich sein wird, falls gerechte, marktübliche Preise erzielt werden können.

11.3 Gemeinschaftsanlage Burgdorfer, Büchi und Rohner, Frauenfeld

Ausgangslage

Die Zusammenarbeit zwischen den drei benachbarten landwirtschaftlichen Betrieben hat eine lange Tradition. Das Motiv für das bislang jüngste Projekt, die Verbund-Biogasanlage, war der gemeinsame Wunsch, den eigenen Energiebedarf grösstenteils selber zu decken und darüber hinaus Elektrizität ins öffentliche Stromnetz einzuspeisen. Die drei Höfe liegen entlang einer Zufahrtsstrasse in einem Abstand von je rund 300 m. Rund 70 ha mit 104 Grossvieheinheiten werden von den Bauern nach den Grundsätzen der Integrierten Produktion (IP) bewirtschaftet.

Konzept

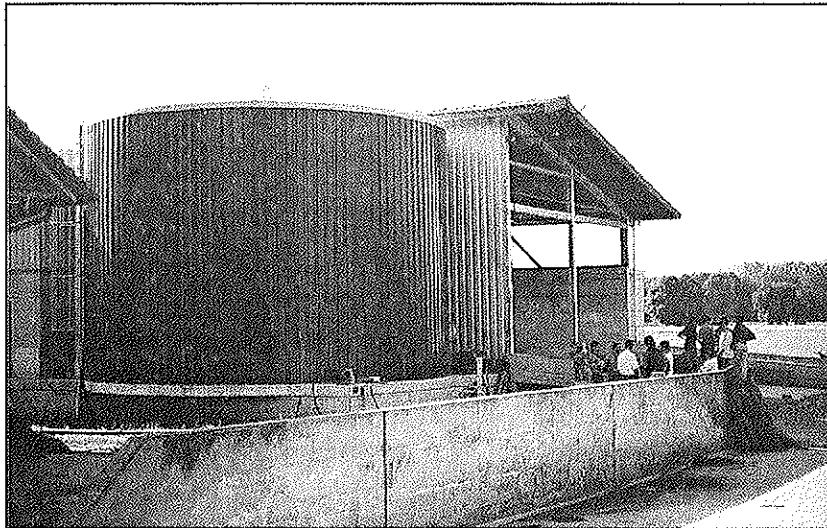
Die Biogasanlage steht auf dem Steinacherhof der Familie Burgdorfer, der über eine unterirdische Gülleleitung mit den Höfen der Familien Rohner und Büchi verbunden ist. Der Standort auf dem Steinacherhof ist aufgrund des deutlich höheren Gülleanfalls gewählt worden. Die Frischgülle aller drei Betriebe fliesst in die Vorgrube, in welcher sie mit Co-Substraten wie Gemüse-, Obst- und Speiseresten vermischt wird. Die homogenisierte Mischung lagert dort und wird nach Bedarf mittels einer Pumpe in den 280 m³ grossen Fermenter gefördert. Die Vorgrube schafft einen Ausgleich im stark schwankenden Anfall an Gülle und Co-Substraten und garantiert damit einen kontinuierlichen Betrieb des Fermenters und der nachgeschalteten Aggregate. Im Fermenter bildet sich Biogas bei einer Temperatur von rund 35°C. Ein Rührwerk dient der Durchmischung des Fermenterinhals und unterstützt die Gasbildung. Das gewonnene Biogas wird in einem Gas-

speicher aufgefangen und dem BHKW zur Strom- und Wärmeproduktion zugeführt. Die Wärme wird für die Fermenter- und die Raumbeheizung sowie für die Wassererwärmung verwendet, während der Strom ins Netz eingespeist wird. Die vergorene Gülle kommt vor dem Austrag in einen Lagerbehälter mit einem Fassungsvermögen von 570 m³.

Betriebsdaten und Erfahrungen

"Durchweg positiv" sind die Erfahrungen der drei Betriebsleiter mit der Gemeinschaftsbiosanlage. Sogar die anfänglichen Schwierigkeiten zur Beschaffung von Co-Substraten sind heute weitgehend behoben. Speisereste, Gemüseabfälle und Panseninhalte werden zusehends seltener an Mastschweine verfüttert, was die Nachfrage nach oekologischen Entsorgungswegen erhöht. Diese

Änderung der Marktlage könnte der Schlüssel für einen kostendeckenden Betrieb der Biogasanlage sein. Speziell interessant an diesem Beispiel ist die Tatsache, dass auf den drei Höfen nach IP-Methoden gewirtschaftet wird. Anders, als bei der kommunalen Co-Vergärung, wo IP-Produzenten dem Klärschlamm unter Umständen nicht vorbehaltlos gegenüberstehen, ist die landwirtschaftliche Co-Vergärung bezüglich der Qualität des Gärkuchens unproblematisch.



Gesamtansicht des Fermenters mit Vorplatz (links), wo Abfälle abgelagert werden.

Gärsubstrate	
Gülle von 50 Grossviecheinheiten (GVE)	2-3 m ³
Co-Substrate	8-10 m ³
Total	10-13 m ³
Volumina	
Vorgrube	60 m ³
Fermenter	260 m ³
Gasbehälter	150 m ³
Behälter für vergorene Gülle	570 m ³
Vergärung	
Verweilzeit der Biomasse im Fermenter	20-25 Tage
Temperatur	33 °C
Gasproduktion pro Tag	240 m ³
Blockheizkraftwerk	
Elektrische Leistung	2 x 13 kW
Thermische Leistung	2 x 35 kW
Gesamtenergiemenge pro Jahr	
Elektrizitätsproduktion	130'000 kWh
Wärmeleistung	350'000 kWh
Wärmebedarf (ganzer Betrieb)	200'000 kWh

Tab. 26: Anlage- und Betriebsdaten der Gemeinschaftsanlage Frauenfeld

Kosten

Mit Investitionskosten von rund 450'000 Franken kann die Anlage zum heutigen Zeitpunkt nicht nach üblichen Wirtschaftlichkeitskriterien betrieben werden. Die Anlage ermöglicht im ersten Betriebsjahr Erträge von insgesamt 30'000 Franken, wovon 22'000 Franken aus dem Verkauf von Strom und der Nutzung von Wärme und 8'400 Franken aus der Übernahme von Gemüse-, Obst- und Speiseresten stammen (Entsorgungsgebühren). Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit wird in Zukunft ein angemessener, marktüblicher Übernahmepreis für betriebsfremde Co-Substrate angestrebt. Wenn die Entsorgungsentgelte für Co-Substrate im marktüblichen Rahmen lägen, würden sie zusammen mit dem Ertrag aus dem Verkauf von Strom und Wärme den Betriebskosten (Amortisation, Arbeitsaufwand etc.) entsprechen und die Anlage auf dem Steinacherhof wäre finanziell rentabel.

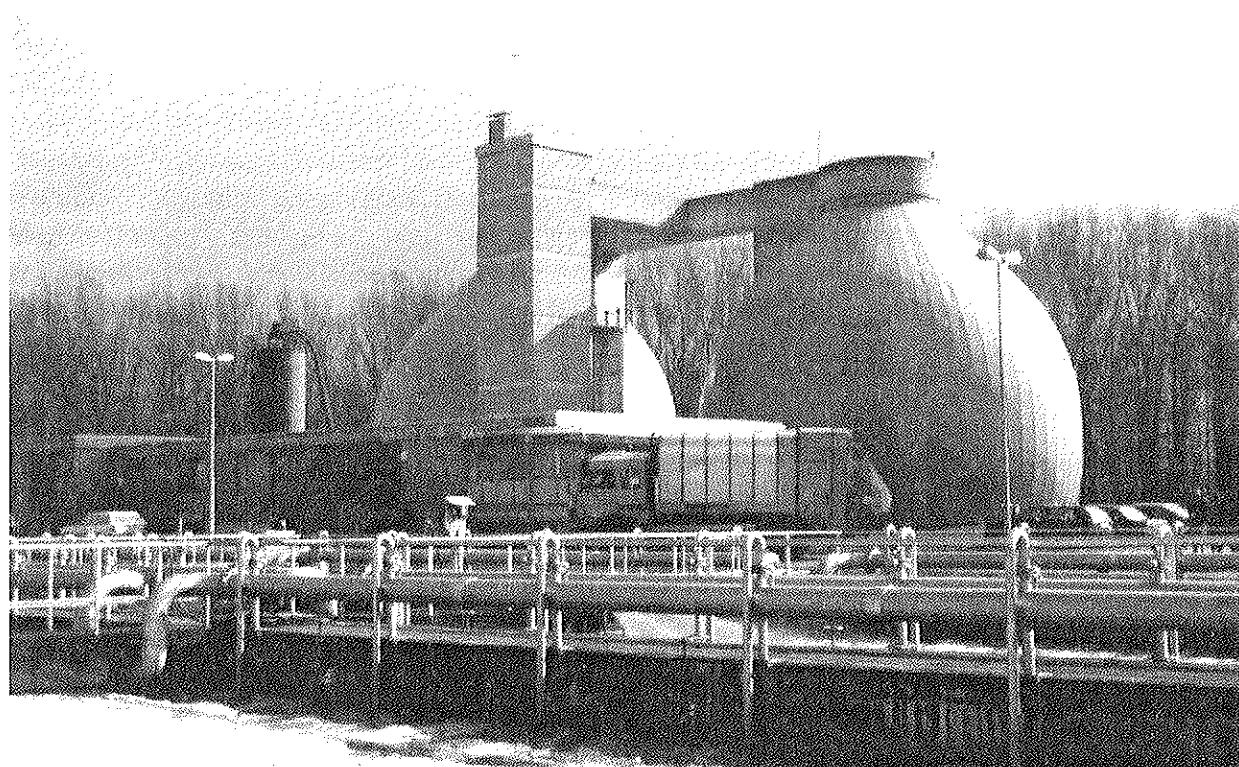
11.4 Abfallaufbereitung auf der ARA Baden-Baden, Deutschland

Ausgangslage

Auf der Grundlage gesetzlicher Vorgaben, die neben der Abfallvermeidung vor allem auch eine weitestmögliche Verwertung von Abfällen vorsieht, wurde 1990 ein neues abfallwirtschaftliches Konzept für die Stadt Baden-Baden erarbeitet, in welchem u.a. die getrennte Erfassung und Verwertung von Bioabfall vorgesehen war. Verschiedene Verfahren der Bioabfallverwertung wurden untersucht und dabei das für die lokalen Verhältnisse beste Verfahren aus Vergärung und nachfolgender Kompostierung ausgewählt. Bei der Auswahl des Verfahrens wurde darauf geachtet, dass die für die Kompostierung problematischen Bioabfälle (Küchenabfälle, Essensreste und Rasenschnitt) vergoren und die Gartenabfälle kompostiert werden können. Im Frühjahr 1992 wurde mit dem Bau der Anlage begonnen und ein Jahr später der Betrieb aufgenommen.

Konzept

Der Bioabfall wird mit speziell abgedichteten Müllfahrzeugen in den Müllbunker (1, Abb. 11) angeliefert und von dort mittels Radlader in den Sackaufreisser (2) geworfen. Ein Förderband (3) transportiert den Abfall in den Auflösebehälter (4). Der Sackaufreisser ist erforderlich, um die angelieferten Abfälle zu portionieren und den Stofflöser vor zu sperrigen Teilen zu schützen. Im Stofflöser (ähnlich einem Pulper der Papierindustrie) wird durch Zugabe von Kammerfilterpresswasser (5) aus dem Bioabfall unter starkem Rühren eine pumpfähige Suspension erzeugt. Nach dem Abpumpen der Suspension in den Suspensionsspeicher (6) und anschliessendem erneutem Befüllen des Stofflösers mit Prozesswasser werden aufschwimmende Störstoffe, wie Holz und Kunststoffe, durch einen eintauchenden Rechen (7) abgefischt, während abgesunkene Schwerstoffe (Glas, Knochen, Steine, Metalle) am Boden des Behälters durch eine Schwerstoffschleuse (8) abgezogen werden. Alle Störstoffe werden gemeinsam in einem Container erfasst und zur Deponie gebracht. Die Suspension wird aus dem Suspensionsspeicher einer Zentrifuge (10) zugeführt und auf einen Feststoffgehalt von 35 - 40 % entwässert. Die aus der Fest-Flüssig-Trennung gewonnene, organisch hoch angereicherte Flüssigkeit wird in einem Pufferbehälter gesammelt und dem Faulturm der Kläranlage zur Erzeugung von Biogas zugeführt. Das gewonnene Biogas wird im Blockheizkraftwerk der Kläranlage verstromt.



Sicht über ein Belüftungsbecken der ARA Baden-Baden (D) auf die beiden eierförmigen Faultürme. Zwischen den Fermentern im Vordergrund ein Müllfahrzeug, welches kommunale biogene Abfälle anliefert.

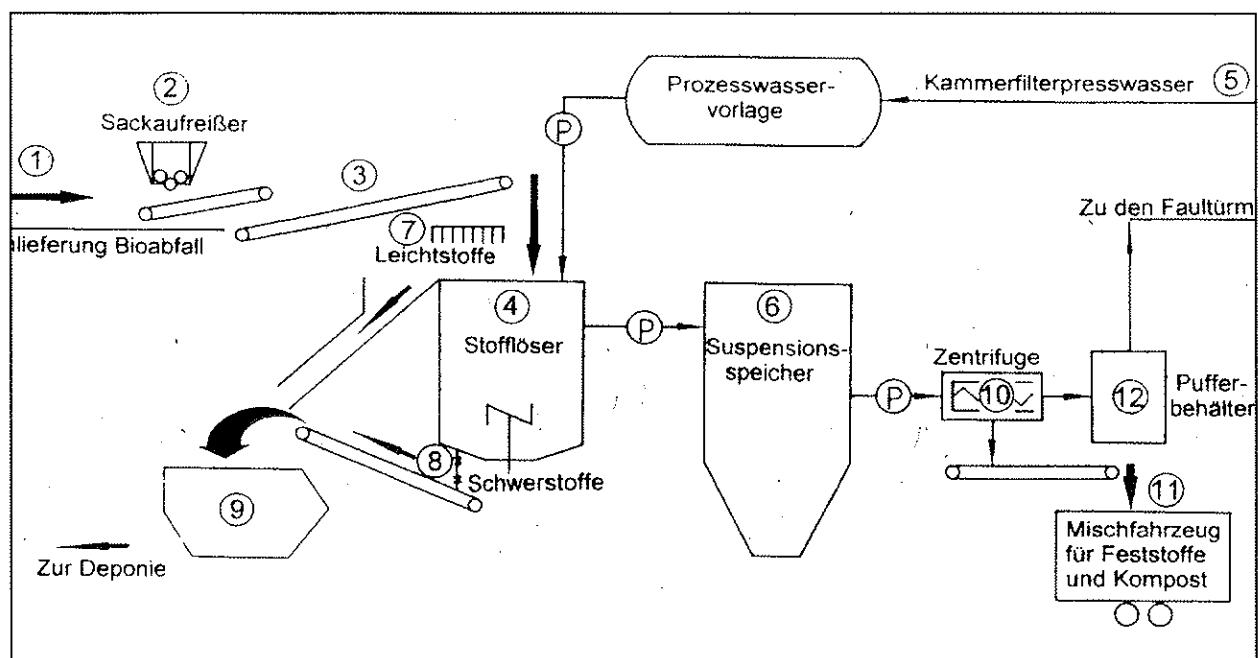


Abb. 11: Verfahrensschema der Behandlungsanlage für leicht abbaubare biogene Abfälle der Stadt Baden-Baden (D)

Durch die Auflösung des Bioabfalls (mit Abscheidung von Fremdstoffen, Abzug der "weichen" Komponenten in der Suspension und Entwässerung) kann der Kompostierung ein ideales Ausgangsmaterial zugeführt werden. Störstoffe und ein erheblicher Anteil an potentiell im Bioabfall vorhandenen Schadstoffen gelangen nicht in das kompostierbare Material. Durch die Abtrennung der "weichen", leicht abbaubaren Stoffe treten Geruchsprobleme im nachfolgenden Kompostierprozess nur in geringem Ausmass auf. Die gewonnenen Feststoffe weisen eine homogene, krümelige Struktur auf. Wegen des noch hohen Anteils an organischer Substanz beginnt unmittelbar nach der Entwässerung die Heissrottephase des Kompostierungsprozesses. Dieser wird unterstützt, indem in einem eigens für diese Anlage angefertigten Mischwagen (11) die Feststoffe mit angerottetem Material vermischt werden [17,34].

Betriebsdaten und Erfahrung

Ein speziell abgedichtetes Müllfahrzeug sammelt die Bioabfälle im Modellgebiet wöchentlich ein. Die ersten Erfahrungen mit der Biotonne sind ausserordentlich positiv. Der Störstoffanteil im Bioabfall war ausgesprochen gering, was die Verarbeitung stark erleichterte. Bei vollem Betrieb hat die Anlage bei Einschichtbetrieb einen täglichen Durchsatz von ca. 20 t (5'000 t/Jahr), die einem Anschluß von 50'000 Einwohnern entsprechen. Dabei werden im Jahr ca. 250'000 m³ Biogas erzeugt.

Gärsubstrate	
Küchenabfälle, Essensreste, Rasenschnitt, Laub	20 t/Tag \approx 5'000 t/Jahr
Volumina	
Prozesswasservorlage	50 m ³
Pufferspeicher	3 m ³
Suspensionspuffer	80 m ³
Fermenter/Faulräume der ARA Baden-Baden	bestehend
Gasspeicher	bestehend
Vergärung	
Verweilzeit im Fermenter	nicht bekannt
Gärtemperatur	mesophil
Gasproduktion pro Tag	230 m ³
Gesamtenergiemenge pro Jahr	
Blockheizkraftwerk	bestehend
Elektrizitätsüberschuss	175'000 kWh
Wärmeüberschuss	750'000 kWh

Tab. 27: Anlage- und Betriebsdaten der Co-Vergärung auf der ARA Baden-Baden

Anlageteil	Leistung	el. Anschluß
Sackaufreisser	15 m ³ /h	22 KW
Stofflöser	20 t/Tag	160 KW
Zentrifuge	7 t/h	37 KW
Steuerung	SPSS und manuell	
Mischfahrzeug	12 m ³	
Förderbänder		
- zum Stofflöser	20 t/Tag	9,2 KW
- Schwerstoffaustrag		0,75 KW
- Krananlage	2 t	?

Tab. 28: Technische Angaben zur Stoffaufbereitung der Co-Vergärung in Baden-Baden

Kosten

Die Gesamtkosten für den Bau der Anlage beliefen sich auf ca. DM 5.2 Mio. Das Bundesumweltministerium bewilligte für die Errichtung der BTA-Anlage einen Zinszuschuss von rund DM 400'000.-. Die Verarbeitungskosten pro Tonne Bioabfall belaufen sich auf ca. DM 120.-.

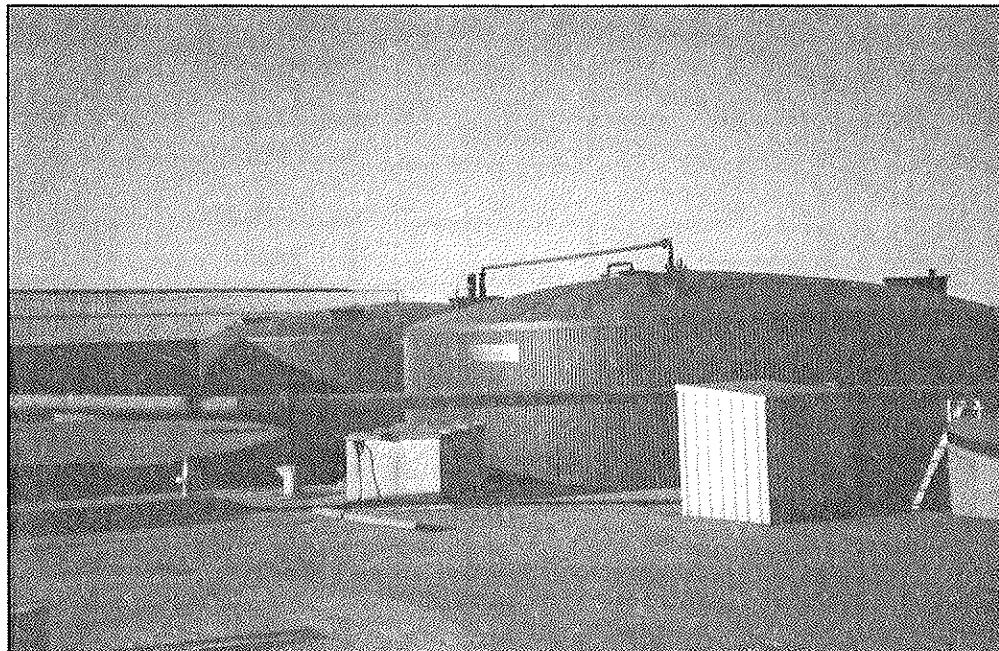
11.5 Gemeinschaftsbiogasanlage Fangel, Dänemark

Ausgangslage

Bei diesem Betrieb handelt es sich um eine Gemeinschaftsbiogasanlage, wie sie in Dänemark heute bereits häufig anzutreffen ist. Besitzer sind die 28 Bauern und Tierhalter der Gegend, die sich in der Fangel Miljø- og Energiselskab A.m.b.a. zusammengeschlossen haben. Die Gesellschaft hat sich zum Ziel gesetzt, eine wirtschaftliche und umweltverträgliche Gesamtlösung für die Verwertung von Mist, Gülle und biogenen Abfällen in diesem Gebiet zu entwickeln. Die Biogasanlage in Fangel in der Gemeinde Odense wurde 1988/89 gebaut und im Februar 1989 in Betrieb genommen.

Konzept

Bei der Anlage handelt es sich um eine mesophile Anlage mit thermophiler Vorbehandlung. Die Gülle der angeschlossenen Betriebe im Umkreis von 7-8 km wird mit Tanklastwagen gesammelt und zusammen mit in Containern angelieferten Magen- und Darminhalten aus Schlachthöfen in einem Vortank gestapelt. Der Inhalt dieses Vortanks wird über einen Hygienisierungstank (55°C) dem Vergärungsreaktor zugeführt. Andere organische Abfälle werden in einem separaten Vortank angenommen und ohne Hygienisierung in den Fermenter eingebracht. Nach dem Vergären wird die Biomasse mit einer Zentrifuge in eine faserige (feste) und eine flüssige Fraktion getrennt. Die faserige Fraktion wird zu Kompost aufgearbeitet, die flüssige Fraktion wird in 23 dezentralen Behältern gelagert und hauptsächlich im Frühjahr von den Landwirten als Dünger auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht. Die Transportwege der Gülle betragen durchschnittlich 7 bis 8 km. Integraler Bestandteil der Gemeinschaftsanlage ist die Nährstoff-Bewirtschaftung im angeschlossenen Gebiet.



Gesamtansicht der Gemeinschafts-Biogasanlage Fangel, DK

Betriebsdaten und Erfahrungen

Mit dem Betrieb der Anlage wurden überwiegend gute Erfahrungen gemacht. Die erwartete Gasproduktion wurde schnell erreicht und überschritten, einige Startschwierigkeiten konnten relativ schnell überwunden werden. Mit einzelnen Komponenten gab es allerdings in den ersten zwei Betriebsjahren gewisse Probleme: neben Pumpen mussten schnell drehende, schwer zugänglich Tauchmotorührwerke durch zentrisch montierte Paddelührwerke mit aussenliegendem Antrieb ersetzt werden.

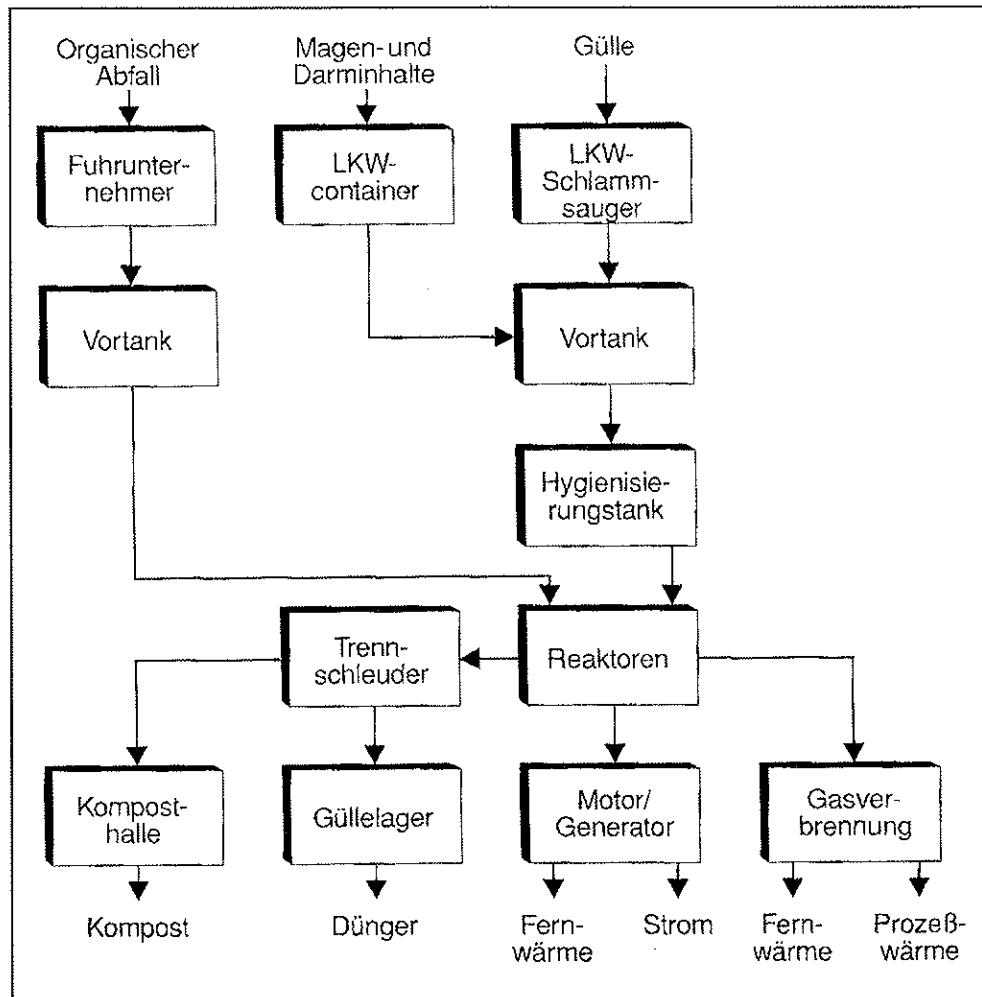


Abb. 12: Flussdiagramm der Gemeinschaftsanlage mit Co-Vergärung in Fangel (DK)

Kosten

Die Gesamtkosten für den Bau der Anlage betrugen ca. Fr. 6 Mio. Der staatliche Zuschuss betrug rund Fr. 2.5 Mio. Das begleitende Untersuchungs- und Entwicklungsprogramm zeigte, dass die angeschlossenen Landwirte bei diesem Gemeinschaftskonzept im Vergleich zum individuellen Bau von Güllelagerkapazität zwischen Fr. 1'000.- und Fr. 2'000.- pro Jahr und Betrieb einsparen konnten. Schwieriger quantifizierbar sind Einsparungen die mit der Reduktion der Umweltbelastung (CO₂-Ausstoss, Nitratbelastung) einhergehen. Weitere Einsparungen sind durch eine optimierte Gülleverwertung und dem damit verbundenen geringeren Einsatz von Mineraldüngern möglich.

Gärsubstrate		
Gülle von 28 Betrieben	129 t/d	
Co-Substrate von Gewerbe und Gemeinden	32 t/d	
Total	161 t/d	
Volumina		
Vorlagerbehälter	m ³	
Fermentervolumen total	3'650 m ³	
Hygienisierungsbehälter	m ³	
25 Lagertanks für vergorene Gülle	Total 25'000 m ³	
Vergärung		
Verweilzeit der Biomasse	21 Tage	
Hygienisierungstemperatur	55 °C	
Vergärungstemperatur	37 °C	
Gasproduktion pro Tag	3'650 m ³	
Gasverwertung		
Blockheizkraftwerk	nach Bedarf	
Verbrennung (Fernwärme)	nach Bedarf	
Gesamtenergiemenge pro Jahr		
Biogasproduktion	ca 1.8 Mio m ³	
Energie thermisch	ca.7.9 Mio kWh	

Tab. 29: Technische Daten der Gemeinschaftsanlage Fangel, Dänemark (1994)

Allgemeine Bemerkung zur Co-Vergärung in Dänemark

Dänemark kommt eine Pionierrolle bei der Co-Vergärung in Gemeinschaftsanlagen zu [15,27]. Bereits 1994 waren in Dänemark dank konsequenter Förderung durch die Regierung über ein Dutzend grosse, landwirtschaftliche Gemeinschaftsanlagen in Betrieb. Ausführliche Betriebsdaten und detaillierte Angaben zur Ökonomie finden sich in [16]. Heute werden es bald über 20 Anlagen sein, welche teils Abfälle aus Industrie und Gewerbe und/oder vorsortierte Haushaltsabfälle als Co-Substrat verarbeiten. In mehreren Fällen wird die Wärme in einem Fernwärmeverbund genutzt.

11.6 Kommunale Co-Vergärung in der Schweiz

Auf der ARA Scuol (GR) wurden nach Angaben des Klärwerts Hotelabfälle in 30 und 60 Liter-Gebinden angeliefert und mit einem Rührwerk zerkleinert. Da keine Fremdstoffabtrennung vorgesehen worden war (Schwerstoffschieleuse, ev. Flotation von Kunststoffen, etc.), traten jedoch immer wieder Probleme mit Pumpen auf, und auch der "Schnetzler" verkleimte oft mit Besteck, welches mit den Speiseresten angeliefert wurde. Da sich Schläuche der Gaseinpressung zur Durchmischung des Fermenters gelöst hatten und dadurch die Durchmischung des Fermenterinhalts nicht mehr richtig funktionierte, sammelten sich Knochen und andere Sedimente im Faulraum an. Dies führte zu einer Verkleinerung des aktiven Fermentervolumens, was die an sich schon relativ kurze HRT zusätzlich verkleinerte. In der Hochsaison mit viel Hotelübernachtungen wurden rund 1 m³/d eingespeist, was zu einer deutlich spürbaren Verbesserung der Gasproduktion führte. Der Klärwart äusserte sich grundsätzlich positiv zur Co-Vergärung, möchte jedoch vor der Annahme weiterer Abfälle auf seiner ARA eine einfache Lösung für die Fremdstoffabtrennung realisieren.

Von mehreren Abwasserreinigungsanlagen ist bekannt, dass **Brennschlempe** von umliegenden Brennereien angenommen und direkt im Faulturm vergoren worden ist. Es sind dies die ARA's von Friesenham (ZG), Martigny (VS), Lyss (BE) und Thun (BE). Es ist durchaus möglich, dass in noch weiteren Kläranlagen biogene Abfälle direkt angenommen worden sind, bzw. werden. Die Schlempe weist einen sehr hohen CSB und ein grosses Versauerungspotential auf. Bei Einleitung über die Kanalisation in die aerobe Stufe der ARA kann es - speziell zu Beginn der Brennsaison - zu empfindlichen Störungen in der biologischen Stufe kommen. Die Co-Vergärung ist in diesen Fällen daher wahrscheinlich nicht primär aus energetischen Überlegungen, sondern aus Gründen der Betriebssicherheit eingeführt worden.

Zur Schlempevergärung ist kaum Infrastruktur notwendig: In der Regel wird die Schlempe in einem Tankwagen angeliefert und in einen Vorlagebehälter gepumpt. Die Beschickung der Faulanlage erfolgt dann zusammen mit dem Schlamm. Durch die Steigerung der Zufuhr organischer Substanz erhöht sich die Gasproduktion und der Eigenversorgungsgrad mit Energie der betreffenden ARA signifikant. Probleme sind in der Regel keine zu erwarten, falls das Verhältnis von Schlempe zu Schlamm nicht zu hoch gewählt wird, da sonst die Gefahr einer Übersäuerung des Fermenters bestehen würde.

12 Philosophische Schlussbetrachtung

Für den biotechnologischen Abbau von biogenen Stoffen bieten sich zwei prinzipiell verschiedene Abbauwege an: der **aerobe** und der **anaerobe Abbauweg**. Beim aeroben Abbau sind die drei Phasen nötig: fest (abzubauende Biomasse), flüssig (Wasserfilm auf dem festen Abfallstoff als Lebensraum für die Mikroorganismen) und gasig (Luftsauerstoff, welcher im Wasserfilm gelöst wird). Dies ist kein Problem, solange der Abbau dezentral erfolgt, da Luft und Feuchtigkeit bei kleinen Schichtdicken problemlos Zutritt zum abgestorbenen Material haben. Der aerobe Abbauweg läuft daher in der Natur immer dezentral ab: Das Laub sammelt sich in kleinen Schichtdicken unter dem Baum; die Biomasse verrottet am Ort ihres Sterbens mit der Feuchte des Regens und dem Sauerstoff der reichlich vorhandenen Luft.

Sobald Biomasse verfrachtet wird und sich lokal zu Haufen stapelt (in Geländesenken oder am Grund von Waldweiichern, etc.), kommt zwingend der - für die Mikroorganismen energetisch ungünstigere - anaerobe Abbau zum Zug, wo als Edukte nur zwei Phasen nötig sind: fest (Biomasse) und flüssig (Lebensraum der Mikroorganismen); das Gas ist Ausscheidungsprodukt und damit für den Abbau nicht limitierend. Bei grossen abzubauenden Biomasseansammlungen ist der Sauerstoff- und Feuchtigkeitszutritt für eine biologische Verbrennung nicht mehr ausreichend gewährleistet. Aus Sicht der Natur ist schon der Komposthaufen hinter dem Haus eine "zentrale Angelegenheit", wo automatisch anaerobe Prozesse aktuell werden. Um so grösser ist daher die Vergewaltigung der Natur, wenn man in Grossanlagen der hoch aufgestapelten Biomasse oder den organisch hoch belasteten Abwässern aerobe Abbauwege aufzwingt. Dieser **Zwang braucht Energie**. Um eine Tonne Biomasse "aerob" zu kompostieren, benötigt man in professionellen Anlagen bis zu über 100 kWh an Fremdenergie. Beim Abwasser verhält es sich ähnlich.

Diese Energie haben wir heute im Überfluss. Der heutige, "**fossile**" Mensch hat sich das Know-How angeeignet, am richtigen Ort Löcher zu graben und Öl zu pumpen. Die fossile Energie erlaubt, das Leben, unsere Umwelt und unseren Planeten nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ grundlegend zu verändern. Heute hat jeder Durchschnittsbürger in jeder Steckdose Tausende von Aladins zu seiner Verfügung, welche er sich mit Elektrowerkzeugen für ein Butterbrot dienstbar machen kann. Hinter jedem Gaskochherd steckt ein Gaswerk und eine Pipeline, welche mehr Wärme zu liefern vermag, als alle Lagerfeuer der Heere von Cäsar und von Alexander dem Grossen zusammen. Wir haben heute eine Krise von viel zu viel, viel zu billiger und dementsprechend falsch eingesetzter Energie. Diese Energiekrise erlaubt uns, uns entgegen der Prinzipien der Natur [23] zu verhalten. Die über Hunderte von Jahrmillionen angesammelten fossilen Energie- und Rohstoffreserven werden heute in einem - erdgeschichtlich gesehen - winzigen Augenblick un wiederbringlich verschleudert.

So sicher, wie das Amen in der Kirche kommt, wird erdgeschichtlich sehr rasch die heute ablaufende, mit fossiler Energie unterstützte Geburt einer bewussteren⁶⁾ Menschheit vorüber sein und der

6) Die nicht erneuerbaren Energieträger erlauben uns heute (zumindest in der sogenannt "ersten" Welt) die Bedürfnisse des existentiellen Habens [26] mit sehr wenig Zeitaufwand zu decken und schenken uns jenen Freiraum, der für die Gewinnung neuer Erkenntnisse notwendig ist. Neues Wissen und neues Bewusstsein sind für die post-fossilen Zeiträume notwendig. Zur Zeit verdoppelt sich das Wissen jeweils innerhalb weniger Jahre. Leider zeichnet sich die heutige Phase dadurch aus, dass wir den an sich segensreichen Freiraum vor allem dazu nutzen, Wissen über die Materie anzuhäufen und damit in einem immer grösseren Feuerwerk in immer kürzerer Zeit mit immer grösserer, energetisch gespeister Automatisierung immer noch mehr materielle Güter herzustellen

“post-fossile” Mensch das Licht der Welt erblicken. Der **“post-fossile” Mitteleuropäer** wird (sofern er nicht zum Leitfossil der heutigen Zeit geworden sein wird...) voraussichtlich nicht mehr in der Lage sein, bei Fruchtsaft aus Zentralamerika und bei Wein aus Südafrika frische Crevetten aus Malaysia sowie Lammfleisch aus Neuseeland mit Dörrbohnen aus China zu verspeisen. Er wird es sich aber auch nicht mehr leisten können, sehr viel hochwertige Fremdenergie aufzuwenden, um energetisch hochwertige chemische Bindungen zu zerstören, wie sie dank der Energie der Sonne in der Biomasse vorliegen. Der post-fossile Mensch wird als “Neugeborener” seine materielle und geistige Umwelt zwar bereits viel wacher, tiefer und mit in Vergleich zu heute viel grösserem und ganzheitlicherem Wissen erleben; er wird sich jedoch voraussichtlich über sehr lange Zeiträume mit sehr viel kleinerem und ökonomischerem Energieumsatz von der Geburt erholen müssen, da er sich voll auf erneuerbare Energieträger abstützen werden muss. Daher wird er sich **weder Kompostierung noch Abwasserbelüftung** im heutigen Ausmass **leisten können**; er wird darauf angewiesen sein, die hochwertige Energie der chemischen Bindungen von organischem Material nicht zu verlieren, sondern sie für Zwecke mit hoher Priorität nutzbar zu machen und einzusetzen.

Um die Energie von nasser, heterogen zusammengesetzter Biomasse nutzbar zu machen, ist die anaerobe Gärung mit Biogasgewinnung der energetisch sinnvollste Weg, welcher gleichzeitig als einziger Verwertungsweg auch den ökologischen Prinzipien voll Rechnung trägt [23]:

- Es wird **hochwertige, erneuerbare Energie** freigesetzt.
- Eigene Modellrechnungen haben gezeigt, dass unter Berücksichtigung der notwendigen Primärenergie der aerobe Abbauweg im Vergleich zur Vergärung eine **Differenz** von bis zu 100 m³ **fossilem CO₂** pro Tonne verarbeitetem Abfall aufweist. Die Vergärung von biogenem Material leistet damit einen Beitrag an die Reduktion des **Treibhauseffekts**, indem einerseits CO₂-neutrale, erneuerbare Energie freigesetzt, bzw. treibhausaktive Energie substituiert wird, und andererseits treibhausaktive, fossile Primärenergie eingespart wird, die zum Betrieb der konkurrenzierenden Entsorgungswege notwendig wäre.
- Das **Kreislaufprinzip** bleibt gewahrt: Schwer abbaubare Verbindungen, welche einen grossen Anteil an der organischen Substanz des Bodens ausmachen, bleiben beim biotechnologischen Abbau erhalten. Dies gilt ebenfalls für den überwiegenden Teil der Nährstoffe. Bei der biotechnologischen Verwertung entsteht ein wertvoller Rückstand, dessen schwer abbaubare organische Komponenten und anorganische Nährstoffe beim Rückführen auf die Felder zur langfristigen Erhaltung des Bodens beitragen und den Humusaufbau fördern.
- Nach anaerobem Abbauweg und nach Austrag auf das Feld wird **Lachgas**, ein Ozonkiller und rund 150 mal wirksameres Treibhausgas als CO₂ [5], im Boden als Nebenprodukt der Denitrifizierung rund viermal weniger stark freigesetzt, als nach konventionellen Abbauwegen [32].
- Die Biogasgewinnung zeigt verschiedene **weitere Vorteile**, wie sie z.B. in Tabelle 18 dargestellt wurden.

Das Potential zur energetischen Nutzung von Biomasse wie Gülle, Exkreme, feste biogene Abfallstoffe und organisch belastete Abwässer ist naturgemäß riesig. Die Ausschöpfung dieser ständig vorhandenen Energiequelle ist allerdings von der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Anlage abhängig. Und genau hier kann die **Co-Vergärung** einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung des Potentials leisten: Die Co-Vergärung beruht auf dem **Prinzip der Synergie**, des Zusammenlegens von Aktivitäten zum gegenseitigen Vorteil. Dadurch können sowohl Kosten spürbar gesenkt, als

und in Umlauf zu setzen. Die zweite, mindestens ebenso wichtige Option, nämlich uns jetzt die Freiheit zu nehmen, uns auf unsere inneren Werte zu besinnen und den Sinn unseres Da-Seins zu hinterfragen, nutzen wir leider - wenn überhaupt - viel zu wenig.

auch die zur Herstellung von Anlagen nötige graue Energie reduziert werden. Die Vergärung wird so auch bei den heutigen, aus ökologischer Sicht verantwortungslos tiefen Energiepreisen an verschiedenen Standorten in Gemeinden und in der Landwirtschaft wieder interessant. Als grosser Vorteil ist zu werten, dass die Co-Vergärung eine dezentrale Nutzung des Biomasse-Potentials ermöglicht.

Es sind in diesem Bericht verschiedene Gründe diskutiert worden, welche das Potential der Co-Vergärung einschränken könnten (Vorhandensein einer Hygienisierungsstufe, Grösse der Anlage, Gasverwertung etc.). Die meisten dieser **Vorbehalte** stellten sich jedoch als weniger gewichtig heraus, als ursprünglich angenommen worden war (vgl. Kapitel 9.6). Bei näherem Hinsehen könnte man durchaus zum Schluss kommen, dass die Co-Vergärung nicht primär durch technische oder ökonomische Grössen eingeschränkt wird, sondern dass der Hauptgrund für die bis jetzt nur sehr zaghafte Umsetzung im fehlenden Dialog zwischen den beteiligten Parteien liegt. Man könnte durchaus einen altbekannten Slogan abändern in:

“Co-Vergärung beginnt im Kopf !”

Co-Vergärung setzt den **Dialog** und die **Zusammenarbeit** voraus zwischen Parteien, welche normalerweise wenig Kontakt zueinander haben: die Planer und Betreiber von Kläranlagen, kommunale, gewerbliche und industrielle Abfallerzeuger, Bauern, verschiedenste Ämter auf verschiedenen Ebenen, Abfallentsorger etc. müssen miteinander das Gespräch finden und lokal angepasste, vernetzte und interdisziplinäre Lösungen finden. Diese Art zu Denken und Probleme anzugehen, ist bei uns heute in vielen Fällen noch nicht sehr weit verbreitet.

Gemeinsames und interdisziplinäres Denken tut heute jedoch Not: Es gilt jetzt mit der Natur als Vorbild jene Entscheide zu fällen, welche mittelfristig jene Kursänderung nicht behindern, die für das Überleben der Menschheit *imperativ* notwendig ist. Wenn die vorliegende Broschüre auch Gedankenanstösse in diesem Zusammenhang vermitteln konnte, hat sie ihren Zweck erfüllt.

13 Literaturnachweis

- [1] AHRING B.K., JOHANSEN K., (1992): anaerobic digestion of source-sorted household solid waste together with manure and organic industrial waste. Proceedings of the international symposium on anaerobic digestion of solid waste, Venedig 1992.
- [2] BASERGA U., (1996): Co-Vergärung-Biogas-Pilotanlage von Klaus und Urs Wittwer, Infoenergie, Tänikon.
- [3] BASERGA U. (1996): Schweizerische Statistik erneuerbarer Energieträger, Teilstatistik Biogasanlagen 1990-1995, BEW, CH 3003 Bern
- [4] BENDIXEN J., AMMENDRUP S. (1992): Safeguards against pathogens in biogas plants, ministry of agriculture, danish veterinary service, Copenhagen (47 Seiten)
- [5] BOUWMANN A.F. (1991): Land use related sources of CH_4 and NO_x . In: Deutscher Bundestag, Enquête-Kommission "Schutz der Erdatmophäre", Kommissionsdrucksache 12/1-a, 14.11.91
- [6] BRÖKER E., SCHULZ W., (1989): Erfahrungen mit der gemeinsamen Vergärung von Klärschlamm und organischem Haushaltsabfall. ANS Info-band Heft 16.
- [7] BRÖKER E., (1991): Gemeinsame Vergärung von Klärschlamm und organischen Abfällen - Ergebnisse aus halbtechnischen Versuchen in Hildesheim. Korrespondenz Abwasser, 8/91, S.1068-1073.
- [8] BRÖKER E., DOEDENS H., (1990): Gemeinsame Vergärung von Klärschlamm und Bioabfall - Ergebnisse des Pilotprojektes in Hildesheim. In: Biologische Verfahren der Abfallbehandlung. Berlin. EF-Verlag für Energie und Umwelttechnik.
- [9] BROTSCHI H., BÜTTIKOFER R., EDELMANN W., JOSS A. (1997): Regionale Vergär- und Kompostieranlage, Allmig, Baar; Jahresbericht 1996, in: Jahresberichte 1996, Forschungsprogramm Biomasse, BEW, CH-3003 Bern
- [10] CECCHI F. et al. (1989): Autonomia energetica di impianti di depurazione via codigestione anaerobica di fanghi e frazione organica di R.S.U - studio di un caso, RS = Rifiuti Solidi, 3, Nr. 4, Juli/August 89, pp.1-5
- [11] CECCHI F. et al., (1988): comparison of co-composting performance of two differently collected organic fractions of municipal solid waste with sewage sludges. Environmental Technology Letters, vol 9, pp. 391-400.
- [12] CECCHI F., TRAVERSO P.G., (1988): state of the art of R and D in the anaerobic digestion process of municipal solid waste in europe. Biomass 16, 257-284.
- [13] CECCHI F., TRAVERSO P.G., (1986): biogas from organic fraction of municipal solid waste and primary sludge. quaderni dell ingegnere chimico italiano no.79.
- [14] CECCHI F. et al., (1989): co-composting research in italy. BioCycle july 1989.
- [15] DÄNISCHE ENERGIEBEHÖRDE. (1992): Statusbericht - Biogas Grossanlagen. Biomassegruppen, DK-1114 København.
- [16] DANISH ENERGY AGENCY.(1995): Progress Report on the Economy of Centralized Biogas Plants. The Biomass Section of the Danish Energy Agency, DK-1119 Copenhagen.
- [17] DRESEL R., (1995): Baden-Badener Anaerobvariante - Ergebnisse aus dem 1. Betriebsjahr. ANS Heft 30, 51. Info Baden-Baden.
- [18] EDELMANN W., ENGELI H., MEMBREZ Y. et.al. (1993): Vergärung von häuslichen Abfällen und Industrieabwässern, Bundesamt für Konjunkturfragen, PACER, # 724.230d, Bern
- [19] EDELMANN W. (1995): Integration der Anaerobtechnik in Gesamtkonzepte der biologischen Abfallbehandlung, in: Wiemer K., Kern M.. (Ed.) Abfall-Wirtschaft, Proceedings des 7.Kasseler Abfallforums: Biologische Abfallbehandlung, 25.-27.4.95, Kassel, Baeza Verlag, Witzenhausen, pp 541-570.
- [20] EDELMANN W. (1994): Co-Vergärung, Müll-Handbuch 5930, Lieferung 5/94, Erich-Schmidt Verlag, Berlin.
- [21] EDELMANN W., ENGELI H., (1996): Biogas aus festen Abfällen und Industrieabwässern - Eckdaten für PlanerInnen. Bundesamt für Konjunkturfragen, PACER, # 724.231 D, Bern.

- [22] EDELMANN W., EGGER K., ENGELI H., MEMBREZ Y. (1996): Biogasgewinnung auf Landwirtschaftsbetrieben und in der Intensivtierhaltung, Schlussbericht E2000, BEW/ENET, CH 3003 Bern
- [23] EDELMANN W. (1996): Energie, Materie, Umwelt - Konsequenzen für die Behandlung biogener Abfälle, in: DGAW (Hrsg.): Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Novellierung der TA Siedlungsabfall? Erich Schmidt Verlag Berlin, S.90-105, ISBN 3-503-03939-2.
- [24] EDELMANN W., JOSS A., ENGELI H. et.al. (1996): Zweiseitige Vergärung von festen biogenen Abfallstoffen, Schlussbericht des gleichnamigen Forschungsprojekts, Forschungsprogramm Biomasse, BEW, 3003 Bern. (44 S.)
- [25] ENGELI H., EDELMANN W., GRADENECKER M.; ROTTERMANN K. (1992): Survival of plant pathogens and seeds of weeds during anaerobic digestion, in: F.Cecchi (ed.) Proceedings of International Symposium on anaerobic Digestion of solid Waste, p.107-117, Venedig, 14.-17.4.92
- [26] FROMM E. (1979): Haben oder Sein - die seelischen Grundlagen einer neuen Gesellschaft, dtv, ISBN 3-423-10048-5
- [27] HOLM-NIELSEN J. (1994): Update on centralized biogas plants, Institute of Biomass Utilization and Biorefinery, South Jutland University Centre, Esbjerg, 1/12 94
- [28] ITALBA (1988): Solidigest: A system for conversion of refuses into biogas, Firmenunterlagen Italba SA, via Mauro Macchi,26, Milano
- [29] KANTON ZÜRICH (1991): Oberflächengewässer und Kläranlage; Direktion der öffentl. Bauten des Kt. Zürichs, Zürich.
- [30] KUHN E. (1995): Kofermentation, KTBL, Arbeitspapier 219, KTBL, Darmstadt
- [31] MATHRANI I.M., JOHANSEN K., AHRING B.K. (1994): Experiences with the anaerobic thermophilic digestion of manure, organic industrial and household waste at the large scale biogas plant in Vegger (Denmark), in: Seventh International Symposium on Anaerobic Digestion, oral paper preprints, Cape Town, South Africa, 23.-27.1.94, pp.365-375.
- [32] ORTENBLAD H., HVELBLUND E., HENRIKSEN K. (1991): Düngewirkung und Stickstoffverlust von gewöhnlicher und abgegaster Viehgülle, Beratungscenter der Landwirtschaft, Arhus, Dänemark.
- [33] RUMP H. et al. (1987): Halbtechnische Biogasgewinnung durch gemeinsame anaerobe Faulung von Hausmüll und Klärschlamm, Umweltforschungsplan des Bundesministers des Inneren, Bericht 14302720, UBA Berlin.
- [34] SCHÄFER B., (1995): Das Bioabfallkonzept des Stadtkreises Baden-Baden. ANS Heft 30, 51. Info Baden-Baden.
- [35] SCHULZ W., (1988): Die Vergärung von organischem Hausmüll mit Klärschlamm. Biogas Information Nr. 29.
- [36] UMWELTAMT BADEN-BADEN, (1993): Biotechnische Abfallaufbereitung im Stadtkreis Baden-Baden. Schrift zur Einweihung der Aufbereitungsanlage am 25.6.1993.
- [37] WELLINGER A., WYDER K., METZLER A. (1993): Kompogas - a new system for the anaerobic treatment of source separated Waste, Wat.Sci.Tech., 27, #2, pp. 193-198
- [38] WONG M.H., (1990): anaerobic digestion of pig manure mixed with sewage sludge. biological wastes 31. pp. 223-230.
- [39] WONG M.H. , CHEUNG Y.H., (1989): anaerobic digestion of pig manure with different agro-industrial wastes. biological wastes 28. pp.143-155.
- [40] SOFTPLUS/ARBI, (1997): Biogas!, Windows-Software zur Auslegung und Kostenschätzung von Biogasanlagen, Gratis Demoversion von: SOFTplus Entwicklungen GmbH, CH 8933 Maschwanden oder: E-Mail: Softplus@access.ch
- [41] BRAUN R., STEFFEN R., STEINLECHNER K., STEYSKAL F. (1996): Verwertung biogener Abfälle in Schlammfaultrümmen von Kläranlagen, in: R.Braun (ed.):Internationale Erfahrungen mit der Verwertung biogener Abfälle zur Biogasproduktion, Tagungsberichte Vol. 14, A-Tulln.
- [42] STRAUCH D. (1996): Hygieneaspekte bei der Cofermentation, in: R.Braun (ed.):Internationale Erfahrungen mit der Verwertung biogener Abfälle zur Biogasproduktion, Tagungsberichte Vol. 14, A-Tulln.

14 Anhang

■ Glossar, Abkürzungen:

aerob: Unter Beteiligung von Sauerstoff

anaerob: Unter Sauerstoffausschluss

ARA: Abwasserreinigungsanlage, Klärwerk

ATS: Aerob thermophile Schlammbestabilisierung. Methode, bei welcher unter Erhitzung auf thermophile Temperatur (rund 60°C) der Schlammb hygienisiert wird.

Belastung: Fracht, welche einem Fermenter zugeführt wird. Kann sich z.B. auf das Reaktorvolumen beziehen (z.B. kg CSB/m³.d)

BHKW: Block-Heiz-Kraftwerk. Verbrennungsmotor mit Abwärmenutzung und angeschlossenem Stromgenerator (s. auch WKK).

BSB: Biologischer Sauerstoffbedarf: Menge an Sauerstoff, welche eine aerobe Biozönose benötigt, um die biologisch abbaubaren Verbindungen abzubauen. Der BSB ist äußerst beschränkt aussagekräftig über die anaerobe Abbaubarkeit, da er mit aeroben Mikroorganismen ermittelt wird. Er ist gleichzeitig relativ schlecht reproduzierbar.

CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf. Menge an Sauerstoff, welcher bei vollständigem Aufschluss einer Probe zur vollständigen Oxidation der chemischen Komponenten gebraucht wird. Der CSB gibt einen Anhaltspunkt über die organische Belastung der Probe, sagt aber nichts aus über die biologische Abbaubarkeit der Komponenten. Der CSB ist als Maximalwert immer größer als der BSB.

EWG: Einwohnergleichwert. Masseinheit zur Charakterisierung der Fracht eines Abwassers. Der EGW-Wert ist nicht nur abhängig von der Einwohnerzahl im Einzugsgebiet der ARA, sondern auch von weiteren Abwasserquellen, wie Abwässern aus Industrie und Gewerbe.

Exoenzyme: Nach aussen abgegebene Enzyme. Mikroorganismen leben in der Flüssigkeit, bzw. mindestens in einem Flüssigkeitsfilm. Wenn sie Feststoffe hydrolysieren, geben sie Enzyme in die umgebende Flüssigkeit ab. Diese greifen dann den Feststoff an und zerleinern die Makromoleküle so, dass kleine, wasserlösliche Verbindungen entstehen. Diese Verbindungen werden anschließend von den Mikroorganismen als Nahrung aufgenommen.

Fermenter: Behälter, in welchem ein biotechnologischer Abbau stattfindet. Hier anderes Wort für Biogasanlage oder Faulturm,

Flüchtige Fettsäuren (niedere Fettsäuren): Kurzkettige Alkansäuren, welche als Zwischenprodukt beim biologischen Abbau auftreten. Deren relative und absolute Mengen geben Auskunft über den Gärprozess (v.a. Essig-, Propion-, Butter- und Valeriansäure)

Fracht: Menge. Errechnet sich aus Volumenstrom mal Konzentration.

Frischschlamm: vorwiegend organische Stoffe, welche in der Kläranlage durch Sedimentation abgetrennt werden, sowie Überschusschlamm der Belüftungsstufe. Hat (noch) keine anaerobe Behandlung durchlaufen.

GVE: Grossviecheinheit. Kuh à rund 550 kg. Die anderen Haftiere (Kälber, Hühner, Mastschweine etc.) werden anhand von Umrechnungsfaktoren in GVE umgerechnet.

Hydrolyse: Erster Schritt eines biologischen Abbaus. Spaltung von Bindungen mit Hilfe von Wasser. Bei der Hydrolyse werden die großen chemischen Verbindungen in ihre "Bestandteile" zerlegt (Monomere, diverse kleine Verbindungen wie Alkohole, Säuren etc.).

Klärschlamm: Von der ARA abgegebener Schlamm. (Muss nicht zwingendermassen anaerob behandelt sein.)

NFR: Nachfaulraum. Zweiter Fermenter, sofern die Gärung in zwei in Serie geschalteten Fermentern abläuft.

OS: **Organische Substanz.** Wird gleichgesetzt mit dem Glühverlust, d.h. mit denjenigen Anteilen der Trockensubstanz, welche beim Glühen bei 550°C sich verflüchtigen.

phytopathogen: Krankheit bei Pflanzen hervorrufend

PJ: Peta-Joule = 10¹⁵ Joule bzw. Wattsekunden = 10³ Terra-Joule

Trübwasser: Flüssigkeit aus dem mittleren Bereich eines Fermenters, wenn das Rührwerk abgestellt wird, damit Feststoffe sedimentieren, bzw. aufrahmen können. Ist weniger stark organisch belastet, als dies dem Mittelwert des Fermenterinhals entsprechen würde (weniger suspendierte Feststoffe). Kann zur weiteren Reinigung in die aerobe Stufe der ARA zurückgeführt werden, was eine Eindickung des Fermenterinhals zur Folge hat.

- TS:** Trockensubstanz, welche bei Trocknung einer Probe bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz zurückbleibt
- VFR:** Vorfaulraum. Erster Fermenter, sofern die Gärung in zwei in Serie geschalteten Fermentern abläuft.
- WKK:** Wärme-Kraft-Kopplung. Verbrennungsmotor mit Abwärmenutzung und angeschlossenem Stromgenerator (s. auch BHKW).

■ Publikationen innerhalb der Projektdauer mit Bezug zum Projekt

- EDELMANN W. (1995): Concepts for the treatment of organic solid wastes, in Symposium: Biological Waste Management - a wasted Chance?, Oelde 1995
- EDELMANN W. (1995): Möglichkeiten und Grenzen der Anaerobtechnik aus der Sicht des Wissenschafters, in: ANS Hrsg. : Anaerobe Abfallbehandlung in der Praxis, Kurz & Co, Stuttgart, ISBN 3-924618-29-1, pp.45-53
- ENGELI H., GRADENECKER M., EDELMANN W., KULL T., (1995): Co-Vergärung von Klärschlamm und Bioabfall - Erfahrungen und Perspektiven, in: Abfall-Wirtschaft, Proceedings des 7. Kasseler Abfallforums: Biologische Abfallbehandlung, 25.-27.4.95, Universität Kassel
- EDELMANN W. (1995): Integration der Anaerobtechnik in Gesamtkonzepte der biologischen Abfallbehandlung, in: Abfall-Wirtschaft, Proceedings des 7.Kasseler Abfallforums: Biologische Abfallbehandlung, 25.-27.4.95, Universität Kassel
- EDELMANN W. (1995): Integrasjon av anaerobteknikken i en helhetlig løsning, Seminar Kildesortering, 17.11.95, Oslo (oversatt til norsk av Arne Tronstad)
- EDELMANN W., ENGELI H., GRADENECKER M., MOSER C. (1995): Untersuchungen zur Co-Vergärung auf der Kläranlage Frutigen, BE, Bericht z.Hd. des Kanton Bern, GSA Bern
- EDELMANN W. (1994): Co-Vergärung, Müll-Handbuch 5930, Lieferung 5/94, Erich-Schmidt Verlag, Berlin.
- EDELMANN W., ENGELI H., (1996): Biogas aus festen Abfällen und Industrieabwässern - Eckdaten für PlanerInnen. Bundesamt für Konjunkturfragen, PACER, # 724.231 D, Bern.
- EDELMANNW., EGGER K., ENGELI H., MEMBREZ Y. (1996): Biogasgewinnung auf Landwirtschaftsbetrieben und in der Intensivtierhaltung, Schlussbericht E2000, BEW/ENET, CH 3003 Bern
- EDELMANN W. (1996): Energie, Materie, Umwelt - Konsequenzen für die Behandlung biogener Abfälle, in: Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Hrgs.DGAW, Novellierung der TA Siedlungsabfall? Erich Schmidt Verlag Berlin, S.90-105, ISDN 3-503-03939-2.

■ Adressen der Verfasser:

Werner Edelmann, arbi, CH-8933 Maschwanden
 Tel. 0041-1-767'18'19 Fax: 0041-1-767'16'01 E-Mail: 101457.2127@compuserve.com

Hans Engeli, engeli engineering, Hohmattstr.1, 8173 Neerach
 Tel./Fax: 0041-1-858'30'20 E-Mail: 100650.576@compuserve.com