

Sigrid Kusch

**Methanisierung stapelbarer Biomassen
in diskontinuierlich betriebenen
Feststofffermentationsanlagen**



Herbert Utz Verlag · München

Umweltschutz

D100

Zugl.: Diss., Hohenheim, Univ., 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2007

ISBN 978-3-8316-0723-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Abstract: Methanisation of stacked biomass in discontinuously operated solid-phase digestion systems

Methanogenesis from solid substrates in simple, discontinuously operated digestion systems was researched. Due to associated benefits, e.g. robust techniques, high flexibility and applicability when no liquid manure is available, solid-phase digestion is of increasing interest in agriculture. More and more box type fermenters with percolation (sprinkling of process water over the stacked biomass) are built in Germany and as a result this process type was studied in detail.

Experiments in laboratory-scale batch reactors and at a full-scale farm plant were conducted. Based on the experimental findings, suitable fields of application for the solid-phase digestion in this simple reactor type were identified, as were appropriate process conditions and problematic aspects. This may allow for more sustainable decisions in support of, or against, the use of such a process type during the planning of new biogas plants in the future. Moreover, possibilities to optimize process operation are discussed.

The experimental results show that, if process conditions are optimal, digestion of solid substrates in discontinuous solid-phase systems with percolation can achieve substrate specific methane yields that are comparable to those in common, slurry-based liquid-phase digestion installations. A higher risk of inactive zones with inhibited biodegradation was, however, observed at farm-scale. This may be explained as result of lack of mixing during fermentation and due to inhomogeneous conditions over the substrate stack height.

Homogeneous decomposition of stacked solids requires optimally preconditioned substrate. In order to avoid digester failure resulting from acidification by accumulation of volatile fatty acids, the microbial community should contain sufficient levels of methanogens during start-up. Therefore, in the percolation process fresh material should be mixed with solid inoculum (already digested substrate). The appropriate ratio of inoculum highly depends on the specific substrate characteristics and varies considerably. A proportion of around 20 % (w/w on a TS-basis) solid inoculum was sufficient for materials with slow degradability, such as municipal green cut or horse dung with straw. But easily degradable substrates such as ensiled maize or ensiled grass required up to 70 % inoculum. Further experimental results demonstrate that fractions should be carefully mixed prior to being filled in the reactor. A high degree of homogeneity within the stacked substrate body minimizes the risk of inactive zones. This not only ensures high methane yields, but it also prevents discharge of material that has only partly degraded.

The successful implementation of processes with percolation necessitates that liquid actually trickles through the whole substrate stack. Therefore, process water with low viscosity must be used as should substrate with sufficient structure. Materials with poor structure should be mixed with structure material, e.g. straw or green cut. Liquid manure (slurry) is not suitable for percolation, as it will not ensure a leachate flow through solid biomass.

Choosing one process type among several alternative systems should depend on the specific characteristics of the available materials. Easily hydrolysable biomasses with

high energy density, e.g. ensiled maize or grass, are especially suitable for continuous digestion. For discontinuous digestion with percolation, structure-rich biomass, e.g. green cut or solid dung, is especially advantageous choice when considering process technology. Fibrous material, which in general is regarded as unsuitable for running a continuous digestion at elevated TS-contents, does not cause any problem in batch-operated solid-phase digestion with percolation. On the other hand, biogas production with such substrates is rather low. In order to maximize gas production per reactor volume, mixtures of fractions with high energy content and structure-rich fractions are advisable. Possible mixtures are maize with municipal green cut or with solid dung containing straw.

If biogas generation is envisaged exclusively with energy crops, continuously operated process alternatives should be given special consideration. Discontinuous digestion with percolation is not the optimal choice for such substrates due to their poor structure and the high inoculum proportion required. Especially for materials such as energy crops with high costs for cultivation and conservation, incomplete degradation may have critical effects on the profitability of a biogas plant. Therefore, compared to digestion of waste materials, special care should be taken so as to avoid inactive zones with inhibited degradation. Based on the experiments conducted, a mixture of 25 % (v/v) ensiled maize, 15 % green cut with woody components and 60 % solid inoculum is recommended for six-week cycles. This achieves a mean methane generation of around $0.45 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 / (\text{m}^3_{\text{RV,netto}} \cdot \text{d})$ [norm cubic meters of methane per usable reactor volume and day]. Using ensiled grass, a mixture of 50 % (v/v) silage, 10 % green cut with woody components and 40 % solid inoculum is advisable for six-week cycles and results in slightly lower methane generation than the abovementioned mixture with ensiled maize. With grass however, ammonia will accumulate in the recycled process water and will reach inhibitory levels quite quickly; therefore process water must be partly exchanged with fresh water.

In systems with several solid-phase digesters that are functionally coupled through the recirculated liquid phase (leachate collected from all reactors and reused for percolation of all reactors), gas production from one fermenter cannot be assessed with precision. Organic material is partly washed out from the substrate stack and metabolized either in the liquid tank or in other solid-phase digesters. Only part of the total methane production actually occurs in the substrate itself. Moreover, liquefied organic matter from other fermenters is poured in with the recirculated process water and mineralized in the biomass bed. Especially with easily degradable substrate, significant proportions of the total organic matter will be washed out from the stacked biomass. In experiments with ensiled maize, up to 2/3 of the total methane production occurred outside the actual substrate stack (in the percolate tank and in other solid-phase digesters).

Gas from the percolate tank must be collected. Particularly when easily hydrolysable substrate is used, gas production in the process water tank can be considerably high. In experiments, > 10 % of the total methane production was measured in the exterior process water tank. Increasing the maize proportion in the substrate resulted in higher methane generation in the exterior percolate tank of up to 21 % of the total methane production.

The intensity of percolation influences methanisation in the biomass bed. Discontinuous process water recirculation encourages biogas production in the biomass bed

itself. If a sufficient ratio of solid inoculum is added, intensified percolation will not achieve any advantage. Continuous percolation will rather enhance hydrolysis and acid generation, but it will not accelerate the development of the methanogenic population.

Compared to percolated systems, flooding the solid substrate with process water can both reduce and increase the risk of acidification, depending on individual substrate characteristics. Flooding seems to encourage hydrolysis and acid generation rather than methanogenesis, which might increase acidification risk for easily hydrolysable material. Since generated acids are diluted due to the higher ratio of liquid volume to solid material, the risk of acidification can also decrease. With slowly degradable substrate (horse dung, municipal green cut) no addition of solid inoculum was necessary in the flooded process. Therefore, methane production per reactor volume was higher compared to the percolated process, although methane generation from the fresh material itself was not enhanced by flooding. Nevertheless, the flooded process is technically more sophisticated and also more time consuming. During digestion, floating of solid material must be controlled by appropriate technical equipment. Prior to discharging the reactor, phase-separation (liquid/solid phase) is necessary. The digestion residue can become pasty and handling is more difficult during and after discharge.

Discontinuous systems are more appropriate with smaller throughputs. In contrast to continuous systems, no process automation is possible. Moreover, the amount of effort and labour required is constantly increasing with higher numbers of digestion boxes. For each load around 5 to 6 hours are required to charge the fermenter. The volume of one reactor is limited; therefore for higher throughputs high numbers of digestion boxes would be necessary.

Although planned, no thermophilic process was possible at the full-scale farm plant. Even in the mesophilic range marked temperature fluctuations were observed. It may be assumed that compared to flooded digesters, thermal energy transport is more difficult as pores inside the substrate stack are partly filled with gas and not with liquid. Therefore, a mesophilic process should be implemented with this type of digestion system rather than a thermophilic process.

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
TABELLENVERZEICHNIS	IX
VERZEICHNIS WICHTIGER ABKÜRZUNGEN, WIEDERKEHRENDER SYMBOLE UND EINHEITEN	XI
1 EINLEITUNG UND BEGRIFFSBESTIMMUNGEN.....	1
1.1 Einführung in die Thematik.....	1
1.2 Erläuterung und Abgrenzung zentraler Begriffe	2
2 ZIELSETZUNG DER FORSCHUNGSARBEIT.....	4
3 GRUNDLAGEN	5
3.1 Biochemischer Abbau organischer Substanz durch Mikroorganismen	5
3.2 Grundlagen zur Biogasproduktion.....	6
3.2.1 Grundprozess der Methangärung	6
3.2.2 Voraussetzungen für eine ungehemmte Methangärung: Nährstoffversorgung und Umweltmilieu	8
3.2.3 Biogasmenge und Qualität	11
3.2.4 Ein- und mehrstufige Verfahrensführung	12
3.2.5 Biogasproduktion im Batch-Betrieb	12
3.2.5.1 Grundprinzipien des kontinuierlichen sowie des Batch- und Fed-Batch-Betriebs.....	12
3.2.5.2 Abbaukinetik im Batch-Prozess.....	15
3.2.5.3 Selektive Optimierung der Bakterienpopulation.....	16
3.3 Grundlagen zu berieselten Feststoffschüttungen.....	17
4 KENNTNISSTAND ZUR VERGÄRUNG VON FESTSTOFFEN	19
4.1 Verfahrensalternativen zur Vergärung von biogenen Feststoffen	19
4.2 Laborversuche zur Feststoffvergärung bei hohen TS-Gehalten	22
4.3 Vergärung in Feststofffermentern im Pilot- und Praxismaßstab.....	23
4.3.1 Kontinuierliche Anlagen.....	23
4.3.2 Praxisanlagen zur absatzweisen Feststofffermentation.....	26
4.4 Bewertung bisheriger Erfahrungen zur Vergärung bei hohen TS- Gehalten	32
5 MATERIAL UND METHODIK DER EXPERIMENTELLEN UNTERSUCHUNGEN	35
5.1 Beschreibung der Laboranlagen und der durchgeführten Laborversuche.....	35
5.1.1 Aufbau und Betriebsweise.....	35

5.1.2	Messeinrichtungen und Analytik	36
5.1.3	Ansatz und Durchführung von Versuchen	37
5.1.3.1	Grundsätzliches Vorgehen	37
5.1.3.2	Versuchsplan Laborversuche (LV0 bis LV10b)	38
5.1.3.3	Ergänzende Erläuterungen zur Zugabe von Kalk zu versäuerten Fermentern (LV7b).....	40
5.1.3.4	Ergänzende Angaben zur Kopplung von Fermentern über die Flüssigphase (LV10)	40
5.2	Praxisanlage: Boxenfermenter mit Perkolation.....	41
5.2.1	Beschreibung von Bau- und Prozesstechnik sowie Betriebsweise	41
5.2.2	Messtechnik.....	43
5.2.3	Probenahme vor, während und nach der Vergärung.....	44
5.2.4	Durchführung von Versuchen, Versuchsplan ausgewählter Praxisversuche (PV1 bis PV6)	45
5.3	Hinweise zur Auswertung der experimentellen Daten.....	46
5.3.1	Auswertung von Gaserträgen in den Versuchsansätzen.....	46
5.3.1.1	Bestimmung von Normmethanertrag und -produktionsrate, Bezugsgrößen.....	46
5.3.1.2	Ermittlung des Gasertrags von Einzelkomponenten in Materialmischungen	47
5.3.1.3	Restgasmenge innerhalb und außerhalb der Feststoffschüttung im Fermenter	48
5.3.2	Anwendung statistischer Methoden, Darstellung von Messwerten, Umgang mit offensichtlich fehlerbehafteten Messdaten	50
6	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE VON VERSUCHEN IM LABORMAßSTAB.....	53
6.1	Vergärung von Pferdemist	53
6.1.1	Pferdemist mit hohem Exkrementanteil im Laboranlagen-Prototyp (LV0).....	53
6.1.2	Erforderlicher Altmaterialanteil bei Mist mit hohem Strohanteil bei Perkolation (LV1a) sowie Flutung (LV1b).....	54
6.1.3	Vergleich Perkolation und Einstau mit Prozess- oder Leitungswasser (LV2a)...	56
6.1.4	Vorbehandlung durch Vorzerkleinerung (LV2b) sowie Vorbelüftung (LV2c)	58
6.1.5	Gasertrag der Komponente Pferdemist in den Versuchen LV1 und LV2.....	59
6.2	Rinderfestmist	60
6.2.1	Notwendigkeit der Altmaterialzugabe, Einfluss von Strukturmaterial (LV3a).....	60
6.2.2	Vergleich Flutung und Perkolation (LV3b)	63
6.3	Grünschnitt	64
6.3.1	Unterschiedliche Mischungen mit Altmaterial im Perkolationsverfahren (LV5a)	64
6.3.2	Vergleich Flutung und Perkolation (LV4 und LV5b) sowie Gasertrag aus Grünschnitt in LV4 und LV5	67
6.4	Grassilage (LV6).....	70
6.5	Vergärung von Maissilage.....	73
6.5.1	Variation des Anteils an festem Impfmateriale (LV7a)	73
6.5.2	Stabilisierung versauerter Testzellen durch Kalkzugabe (LV7b)	76
6.5.3	Einfluss des Durchmischungsgrades der Einzelkomponenten (LV9b).....	78
6.5.4	Variation der Prozesswasserführung im Perkulationsbetrieb (LV8a, LV9a).....	79
6.5.5	Vergleich Perkolation und Flutung (LV8b)	82

6.5.6	Verteilung von Gärsäuren auf Fermenter in unterschiedlichen Gärphasen bei in sich gärfähiger Mischung (LV10a).....	84
6.5.7	Einsatz reiner Maissilage in Fermenterverbund mit Mischberieselung (LV10b).	87
6.5.8	In der zirkulierenden Flüssigphase gebildeter Methananteil (LV10a, LV10b)	90
6.6	Nicht aus Fermenter ausgetragene Gasmengen.....	91
6.7	Aufrechterhaltung der Zieltemperatur	93
7	DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE AUS DEN PRAXISVERSUCHEN	95
7.1	Vergärung von Rinderfestmist (PV1a und PV1b) mit Vergleich zu parallelem Laborversuch.....	95
7.2	Vergärung von Grünschnitt (PV2a und PV2b) mit Vergleich zu parallelem Laborversuch.....	97
7.3	Gärfähige Mischung mit Grassilage (PV3)	101
7.4	Maissilage in optimiertem Versuchsansatz (PV4)	103
7.4.1	Allgemeine Beobachtungen, Gärtemperatur sowie Prozesswasseranalysen..	103
7.4.2	Homogenität der Vergärung und Vergleich zu parallelem Laborversuch.....	104
7.5	Vergärung einer Mischung aus Gras und Pferdemit unter Verzicht auf Altmaterial.....	107
7.5.1	Auswirkung einer Störung in der Berieselung (PV5).....	107
7.5.2	Homogenität des Gärprozesses bei ungestörter Berieselung (PV6).....	108
7.6	Beobachtungen in weiteren Versuchsdurchläufen.....	111
8	DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	113
8.1	Beurteilung der eingesetzten Methodik.....	113
8.2	Diskussion der experimentellen Daten aus den Laborversuchen.....	117
8.2.1	Verfahrenstechnik.....	117
8.2.1.1	Substratkonditionierung	117
8.2.1.2	Prozesswassereigenschaften und Perkolationsrate.....	121
8.2.1.3	Vergleich zwischen Perkolationsverfahren und geflutetem Verfahren	124
8.2.1.4	Zugabe von Kalk zu versäuerten Fermentern	127
8.2.2	Biogaserträge	128
8.2.2.1	Substratspezifische Methanerträge.....	128
8.2.2.2	Einfluss des Altmaterialtyps.....	130
8.2.2.3	Gaserträge von Mischungen bei einer Gärdauer von sechs Wochen pro Charge	132
8.2.2.4	Gasproduktion in der zirkulierenden Flüssigphase im Vergleich zum Festbett.....	133
8.2.3	Substratmischungen mit ungenügendem Gärrestanfall zur Deckung des Impfmateri­albedarfs der neuen Charge	133
8.2.4	Optimierung der Gärdauer pro Charge	135
8.3	Übertragbarkeit von Laborergebnissen in den Praxismaßstab.....	139

9	ABSCHÄTZUNG DER AUFKONZENTRIERUNG VON STOFFKOMPONENTEN IM PERKOLATTANK AUF DER BASIS EINES THEORETISCHEN MODELLS	143
9.1	Entwicklung des Modells	143
9.1.1	Annahmen und Zieldefinition.....	143
9.1.2	Veränderung der Prozesswassermenge.....	143
9.1.3	Mobilisierung von Inhaltsstoffen aus dem Feststoff	146
9.1.4	Formulierung des Modells	147
9.2	Ausgewählte Ergebnisse.....	150
10	RELEVANZ DER ERGEBNISSE FÜR DIE FESTSTOFFVERGÄRUNG IN BERIESELTEN BOXENFERMENTERN IM PRAXISMAßSTAB	153
10.1	Auswahl des Prozesstyps nach Eigenschaften des Substrates	153
10.2	Planung und Betrieb von Anlagen	155
10.2.1	Anlagendimensionierung und Abschätzung der Methanerträge.....	155
10.2.2	Arbeitszeitaufwand	159
10.2.3	Verfahrenstechnische Grundausstattung.....	160
10.2.4	Inbetriebnahme (erste Gärcharge).....	162
10.2.5	Prozessbetrieb.....	162
10.3	Identifikation des weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfs.....	164
11	ZUSAMMENFASSUNG	167
12	LITERATURVERZEICHNIS	171
13	ANHANG.....	180
Anhang 1:	Laboranalytik (Prozesswasser- und Feststoffproben) und Analyse der Gasphase	180
Anhang 2:	Laborreaktoren – fotografische Aufnahmen.....	183
Anhang 3:	Laborversuche – weitergehende Erläuterungen zur Durchführung.....	185
Anhang 4:	Praxisanlage – fotografische Aufnahmen	190
Anhang 5:	Praxisanlage – Messdatenerfassung	192
Anhang 6:	Praxisversuche – weitergehende Erläuterungen zur Durchführung	194
Anhang 7:	Laborversuche – Darstellung weiterer Ergebnisse	196
Anhang 8:	Praxisversuche – Darstellung weiterer Ergebnisse	217
Anhang 9:	Abschätzung des Strukturmaterialbedarfs zur Sicherung eines ausreichenden Gärrestanfalls bei Substraten mit hoher Setzungsneigung sowie Berechnung des Altmaterialbedarfs bei gezielter Zumischung von Strukturmaterial.....	220
ABSTRACT:	METHANISATION OF STACKED BIOMASS IN DISCONTINUOUSLY OPERATED SOLID-PHASE DIGESTION SYSTEMS.....	224

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 3-1	Grundprozesse der Biogasentstehung durch bakterielle Methanogenese /Janke, 2002, verändert/.....	7
Abbildung 3-2	Anteil $\text{NH}_3\text{-N}$ am gesamten $\text{NH}_4\text{-N}$ mit Detailangabe bei 35 °C	11
Abbildung 3-3	Grundprinzipien kontinuierlicher und diskontinuierlicher Verfahren.....	13
Abbildung 3-4	Wachstumskurve einer Bakterienkultur /nach Schlegel, 1985/	15
Abbildung 4-1	Übersicht zu Verfahrensalternativen zur Feststoffvergärung mit Angabe von Beispielen zu entwickelten oder am Markt angebotenen Verfahren	20
Abbildung 4-2	Verfahrensalternativen bei der Nutzung berieselter Feststoffschüttungen	22
Abbildung 4-3	Verfahrensfließbild DRANCO (Vergärung von Bioabfall) /Schön, 1994/.....	24
Abbildung 4-4	Verfahrensfließbild KOMPOGAS-Prozess zur Vergärung von Bioabfall	25
Abbildung 4-5	Segmentweiser Einbau von Reaktionsgut im 3A-Verfahren.....	27
Abbildung 4-6	Praxisanlage zur Vergärung von Pferdemit in gefluteten Fermentern (nicht mehr in Betrieb).....	31
Abbildung 5-1	Laborreaktor – schematische Darstellung.....	35
Abbildung 5-2	Praxisanlage mit vier berieselten Boxenfermentern (links: geschlossene Fermenter; rechts: ein offener Fermenter bei Vorbereitung der neuen Charge)	42
Abbildung 5-3	Fließschema der Praxisanlage mit Spezifikation der automatisiert erfassten Messstellen	43
Abbildung 5-4	Darstellung statistischer Kennwerte mittels Box-Whisker-Plot	51
Abbildung 6-1	Methanproduktion und Methanproduktionsrate in LV0 (frischer Pferdemit).....	53
Abbildung 6-2	pH-Werte im Prozesswasser der perkolierten Testzellen im Versuchsverlauf LV1a mit Pferdemit.....	54
Abbildung 6-3	Methanertrag von Versuchsmischungen mit Pferdemit in LV1a und LV1b.....	55
Abbildung 6-4	pH-Wert der Prozessflüssigkeit bei der Vergärung von Pferdemit ohne Altmaterial im perkolierten und im gefluteten Verfahren LV1b.....	56
Abbildung 6-5	pH-Werte und Fettsäurekonzentrationen im Prozesswasser der Fermenter mit perkoliertem sowie geflutetem Pferdemit.....	56
Abbildung 6-6	Methanproduktion sowie zugehöriger Methangehalt im Biogas bei Vergärung von Pferdemit in perkolierten und gefluteten Fermentern (LV2a).....	57
Abbildung 6-7	Methanproduktion der Testzellen mit Pferdemit ohne Vorbehandlung sowie gehäckselt und vorbelüftet, jeweils geflutet mit Prozesswasser	59
Abbildung 6-8	pH-Werte und Gesamtfettsäuregehalte im Prozesswasser bei der Vergärung von Rinderfestmist in verschiedenen Varianten (LV3).....	61
Abbildung 6-9	oTS-bezogene Methanerträge und CH_4 -Konzentrationen bei der Vergärung von Rinderfestmist im Perkolationsverfahren (LV3a).....	61
Abbildung 6-10	Konzentrationen an Stickstoff, CSB und oTS im Prozesswasser von Versuchsansätzen mit Rinderfestmist (LV3)	63
Abbildung 6-11	oTS-bezogene Methanerträge und CH_4 -Konzentrationen bei der Vergärung einer Mischung mit Rindermist im perkolierten und gefluteten Verfahren	64
Abbildung 6-12	pH-Werte und Gesamtkonzentrationen an leichtflüchtigen Fettsäuren in LV5a (perkolierte Reaktoren mit Grünschnitt).....	65
Abbildung 6-13	Konzentrationen an Stickstoff, CSB und oTS im Prozesswasser von LV5a (Reaktoren mit perkoliertem Grünschnitt).....	65
Abbildung 6-14	oTS-bezogene CH_4 -Erträge und CH_4 -Produktionsraten in LV5a (perkolierter Grünschnitt)	66
Abbildung 6-15	Volumenbezogene CH_4 -Erträge sowie CH_4 -Produktionsraten von Fermentern mit perkoliertem Grünschnitt	67
Abbildung 6-16	pH-Werte und Gesamtfettsäuregehalte in Flüssigphasen von LV4 und LV5b (perkolierter und gefluteter Grünschnitt)	68
Abbildung 6-17	oTS-bezogene CH_4 -Erträge und CH_4 -Produktionsraten in LV4 und LV5b (perkolierter und gefluteter Grünschnitt)	68
Abbildung 6-18	pH-Werte sowie Fettsäurekonzentrationen im Prozesswasser von Mischungen aus Grassilage und Altmaterial im Perkolationsverfahren (LV6).....	70

Abbildung 6-19	Stickstoffkonzentrationen im Prozesswasser von LV6 (perkolierte Grassilage-mischungen).....	71
Abbildung 6-20	oTS-bezogene Methanerträge sowie Methanproduktionsraten der perkolierten Mischungen mit Grassilage (LV6).....	72
Abbildung 6-21	pH-Werte sowie Fettsäurekonzentrationen im Prozesswasser von perkolierten Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen Maissilage.....	73
Abbildung 6-22	Fettsäurespektrum im Prozesswasser in LV7a (perkolierte Maissilageansätze).....	74
Abbildung 6-23	oTS-bezogene Methanproduktion und Produktionsrate von perkolierten Mischungen mit verschiedenen Anteilen Maissilage und Altmaterial.....	74
Abbildung 6-24	Volumenbezogene Methanerträge sowie Methanproduktionsraten in LV7a (perkolierte Mischungen aus Maissilage und Altmaterial).....	75
Abbildung 6-25	pH-Werte, Fettsäurekonzentrationen, CH ₄ -Erträge sowie Produktionsraten in LV7a nach unterschiedlichen Zugaben von Kalk zu versäuerten Fermentern mit Maissilage	77
Abbildung 6-26	Einfluss des Durchmischungsgrades von Einzelkomponenten auf den Methanertrag einer perkolierten Mischung mit 15 Gew.-% TS Maissilage	78
Abbildung 6-27	pH-Werte und Fettsäuregehalte im Prozesswasser bei durchmischtem und geschichtetem Substrat in LV9b (perkolierte Mischung mit 15 Gew.-% TS Maissilage).....	79
Abbildung 6-28	pH-Werte und Fettsäuregehalte in LV8a (Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage) bei unterschiedlicher Perkolation	80
Abbildung 6-29	oTS-bezogene Methanerträge und Produktionsraten in LV8a (Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage) bei unterschiedlicher Perkolation	80
Abbildung 6-30	pH und Fettsäuregehalte in LV9a (Mischungen mit 15 Gew.-% TS Maissilage) bei unterschiedlicher Perkolation	81
Abbildung 6-31	oTS-bezogene Methanerträge und Produktionsraten in LV9a (Mischungen mit 15 Gew.-% TS Maissilage) bei unterschiedlicher Perkolation	81
Abbildung 6-32	pH und Fettsäuregehalte der gefluteten und perkolierten Fermenter jeweils mit Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage.....	83
Abbildung 6-33	oTS-bezogene Methanerträge und Methanproduktionsraten der perkolierten und gefluteten Fermenter mit 25 Gew.-% TS Maissilage	83
Abbildung 6-34	pH-Werte in LV10a (Mischungen mit 20 Gew.-% TS Maissilage) bei eigen- und mischperkolierten Fermentern (weitere Entwicklung vgl. Abbildung 13-35)	85
Abbildung 6-35	Methanertrag in LV10a (Mischungen mit 20 Gew.-% TS Maissilage) bei eigen- und mischperkolierten Fermentern	86
Abbildung 6-36	Fettsäuregehalte im Prozesswasser LV10b bei Zuschaltung von reiner Maissilage zu Fermenterverbund mit Mischperkolation (rechts) im Vergleich zu eigenperkolierten Reaktoren mit gärfähiger Mischung (20 % Maissilage) (links)	87
Abbildung 6-37	Methanproduktionsraten der Einzelfermenter in Fermenterverbund LV10b bei Zuschaltung von Reaktoren mit reiner Maissilage	88
Abbildung 6-38	oTS-bezogene CH ₄ -Erträge in LV10b bei eigenperkolierten Reaktoren und im mischperkolierten Fermenterverbund.....	89
Abbildung 6-39	Substrattemperatur in perkolierten und gefluteten Fermentern in LV1 bis LV10.....	93
Abbildung 7-1	Temperatur im Gärsubstrat sowie im Perkolattank im Verlauf von PV1 bei der Vergärung von Rinderfestmist	96
Abbildung 7-2	Temperatur im Gärsubstrat sowie im Perkolattank im Verlauf von PV2 (Versuchsansätze mit Grünschnitt).....	98
Abbildung 7-3	Prozesswasseranalysen im Verlauf von PV2a (Mischung aus 75 Vol.-% Grünschnitt und 25 Vol.-% Altmaterial).....	99
Abbildung 7-4	Prozesswasseranalysen im Verlauf von PV2b (100 % Grünschnitt).....	99
Abbildung 7-5	Gemessener Methanertrag sowie Methangehalt im Biogas der Mischung mit 75 Vol.-% Grünschnitt im Praxis- und im Laborversuch (PV2a, LV4)	100
Abbildung 7-6	Temperatur in der Feststoffschüttung und im Perkolattank im Verlauf von PV3 (Substratmischung aus 38 Vol.-% Grassilage und 62 Vol.-% Altmaterial).....	101
Abbildung 7-7	Prozesswasseranalysen im Verlauf von PV3 (Mischung mit 38 Vol.-% Grassilage)..	102
Abbildung 7-8	Prozesswasseranalysen im Verlauf von PV4 (Mischung aus 25 Gew.-% TS Maissilage und Altmaterial)	104

Abbildung 7-9	TS- und oTS-Gehalte im Gärrest aus PV4 (gärfähige Substratmischung mit 25 Gew.-% TS Maissilage) über die Höhe und Breite der Feststoffschüttung in drei verschiedenen Fermentertiefen	105
Abbildung 7-10	TS- und oTS-Gehalte im Gärrest des Praxis- und des Laborversuchs mit 25 Gew.-% TS Maissilage	106
Abbildung 7-11	CH ₄ -Ertrag sowie CH ₄ -Gehalt im Biogas in PV4 im Vergleich zu korrespondierenden Versuchsansätzen im Labor (LV8a)	106
Abbildung 7-12	Prozesswasseranalysen im Verlauf von PV5 (Substratmischung aus 60 Vol.-% Gras und 40 Vol.-% Pferdemist)	107
Abbildung 7-13	Prozesswasseranalysen im Verlauf von PV6 (Mischung aus 60 Vol.-% Gras und 40 Vol.-% Pferdemist).....	109
Abbildung 7-14	Niveau und Schwankungsbreite an TS, oTS, pH-Wert, Gesamtfettsäuren sowie Propionsäure im dreidimensionalen Profil des Gärrestes aus PV6 (Substratmischung aus 60 Vol.-% Gras und 40 Vol.-% Pferdemist)	110
Abbildung 7-15	pH-Werte und Gesamtfettsäuregehalte im Gärrest aus PV6 (Substratmischung mit 60 Vol.-% Gras und 40 Vol.-% Pferdemist) über die Höhe und Breite der Feststoffschüttung in drei verschiedenen Fermentertiefen	111
Abbildung 8-1	CH ₄ -Produktivität und Substratdurchsatz in Abhängigkeit der Verweilzeit einer Charge im Fermenter bei Substraten ohne Altmaterialzugabe (Laborversuche)	136
Abbildung 8-2	Relative substratspezifische Methanausbeute bei verkürzter Chargendauer sowie Gärrestanfall bei Substraten ohne Altmaterialzugabe (Laborversuche)	137
Abbildung 9-1	Unterteilung der für einen Konzentrationsausgleich in der Flüssigphase verfügbaren Einzelfractionen mit Veränderung der Gesamtflüssigvolumina über eine Gärcharge n sowie Definition substratspezifischer Kennwerte	144
Abbildung 9-2	Änderung der Prozesswasserkonzentration über einen Durchlauf n sowie Endwert bei unendlicher Gärzyklenanzahl (System mit Wasserverbrauch).....	148
Abbildung 9-3	Leitfaden zur Prognose der resultierenden Gleichgewichtskonzentration (c _{GG}) im Prozesswasser auf der Basis einfacher Gärtests	150
Abbildung 9-4	Gleichgewichtskonzentration c _{GG} sowie maximale Zwischenkonzentrationen c _{ZW,max} am Beispiel zweier Perkolattankvolumina V _P für unterschiedliche Substrate (Säulen: Mittelwerte der Doppelansätze; Strecken: Einzelwerte).....	152
Abbildung 9-5	Prozesswasserkonzentration c _P ⁿ über Anzahl an Gärzyklen in Abhängigkeit des Verhältnisses der Volumina Prozesswassertank V _P und Feststofffermenter V _{FM} bei Gärmischung mit 23 Gew.-% TS Grassilage	152
Abbildung 10-1	Eignung organischer Fraktionen zur energetischen Nutzung durch Fest- oder Flüssigvergärung	154
Abbildung 13-1	Laborreaktor – fotografische Aufnahmen mit Detailerläuterungen.....	183
Abbildung 13-2	Feststoffvergärungslabor mit zehn Fermentern (links) und Zugabe Prozesswasser zu gefülltem Fermenter (rechts).....	183
Abbildung 13-3	Gefüllter und leerer Fermenter (links); Lochblechboden mit Feinsieb zur Materialauflage (rechts oben); Berieselungskreuz an Deckel (rechts unten)	184
Abbildung 13-4	Schematische Darstellung der temperierten Lagerungseinrichtung für Prozesswasser zwischen zwei Laborversuchsreihen.....	185
Abbildung 13-5	Herstellung einer auf Gew.-% TS bezogenen Materialmischung aus drei Einzelkomponenten (A, B, C) bei vorgegebenem Sollvolumen.....	189
Abbildung 13-6	Verschließen befüllter Fermenter (links) nach Abstützen Füllschüttung mit Holzbohlen (rechts)	190
Abbildung 13-7	Vorrichtungen für Verrieselung von Prozesswasser durch perforiertes PVC-Rohr an Fermenterdecke (linkes Bild) sowie Anschlussvorrichtungen für Spülluft-Gebläse an Gebäuderückseite (rechtes Bild).....	190
Abbildung 13-8	Aufsetzen Substratmiete auf Kompostplatte am Beispiel Maismischung und Durchmischen mit Gerät nach Abbildung 13-9	191
Abbildung 13-9	Mietenumsetzgerät zur Durchmischung von Substratmieten	191
Abbildung 13-10	Schema der Messdatenerfassung (außer Gasqualitätsanalyse) mittels Sensor-Computer-Interfaces ICPCON	193
Abbildung 13-11	Gasqualitätsanalyse-System der Praxisanlage.....	193

Abbildung 13-12	Konzentrationen an Gesamtfettsäuren, Propionsäure und CSB sowie pH-Werte in Prozesswasserproben von LV2 (Vergärung von Pferdemist)	197
Abbildung 13-13	Bestimmung des theoretischen Methanbildungspotenzials ($G_{CH_4,pot}$) von Pferdemist durch Extrapolation von Versuchsdaten in optimiertem Batchtest (fein gemahlene Versuchsgut, HBT, 37 °C, 3 Wiederholungen).....	197
Abbildung 13-14	Volumenbezogene Methanerträge sowie Biogasproduktionsraten in LV3 (Vergärung von Rinderfestmist)	198
Abbildung 13-15	Methankonzentrationen sowie Biogasproduktionsraten in LV5 (Vergärung von Grünschnitt)	198
Abbildung 13-16	Konzentrationen an Stickstoff, CSB und oTS in den Flüssigphasen von LV4 und LV5b (Vergärung von Grünschnitt)	199
Abbildung 13-17	Volumenbezogene CH_4 -Erträge sowie CH_4 -Produktionsraten in LV4 und LV5b (perklierter und gefluteter Grünschnitt)	199
Abbildung 13-18	CH_4 -Konzentrationen sowie Biogasproduktionsraten in LV4 und LV5b (perklierter und gefluteter Grünschnitt).....	200
Abbildung 13-19	CSB-Konzentrationen, oTS-Gehalte sowie Leitfähigkeiten und Salinitäten im Prozesswasser in LV6 (perklierter Mischungen aus Grassilage und Altmaterial).....	200
Abbildung 13-20	Volumenbezogene Methanerträge und Methanproduktionsraten in LV6 (perklierter Mischungen mit Grassilage).....	201
Abbildung 13-21	Methankonzentrationen sowie Biogasproduktionsraten in LV6 (perklierter Reaktoren mit Grassilagemischungen)	201
Abbildung 13-22	Methanertrag der Komponente Grassilage in LV6 (Perkolation).....	202
Abbildung 13-23	Methankonzentrationen sowie Biogasproduktionsraten in LV7a (perklierter Mischungen aus Maissilage und Altmaterial)	202
Abbildung 13-24	Methanertrag der Komponente Maissilage in LV7a (Perkolation).....	202
Abbildung 13-25	Konzentrationen an CSB, NH_4 -N, TKN sowie oTS im Prozesswasser LV7a (perklierter Mischungen aus Maissilage und Altmaterial).....	203
Abbildung 13-26	Fettsäurespektrum im Prozesswasser LV8 (Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage).....	203
Abbildung 13-27	Konzentrationen an Stickstoff, CSB und oTS im Prozesswasser von LV8 (Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage)	204
Abbildung 13-28	Volumenbezogene Methanerträge sowie Methanproduktionsraten in LV8 (Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage)	204
Abbildung 13-29	Biogasqualität und Biogasproduktionsraten in LV8 (Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage).....	205
Abbildung 13-30	Fettsäurespektrum im Prozesswasser von LV9 (Mischungen mit 15 Gew.-% TS Maissilage).....	205
Abbildung 13-31	Konzentrationen an Stickstoff, CSB und oTS im Prozesswasser von LV9 (Mischungen mit 15 Gew.-% TS Maissilage)	206
Abbildung 13-32	Volumenbezogene Methanerträge und Methanproduktionsraten in LV9 (Mischungen mit 15 Gew.-% TS Maissilage)	206
Abbildung 13-33	Methankonzentrationen im Biogas und Biogasproduktionsraten in LV9 (Mischungen mit 15 Gew.-% TS Maissilage)	207
Abbildung 13-34	CH_4 -Produktionsraten in LV10a (Mischungen mit 20 Gew.-% TS Maissilage) bei eigen- und mischperklierter Fermentern.....	207
Abbildung 13-35	pH-Werte im Prozesswasser LV10b (Fermenter mit Eigen- und Mischperkolation) ..	208
Abbildung 13-36	NH_4 -N-Konzentrationen im Prozesswasser LV10 (eigen- und mischperklierter Reaktoren)	208
Abbildung 13-37	oTS-Gehalte im Prozesswasser LV10 (eigen- und mischperklierter Reaktoren)	209
Abbildung 13-38	CSB-Konzentrationen im Prozesswasser von LV10 (eigen- und mischperklierter Fermenter)	209
Abbildung 13-39	Auf Volumen der Reaktorfüllungen bezogene Ergebnisse zu Abbildung 6-38.....	210
Abbildung 13-40	CH_4 -Produktionsraten in LV10 (Detail zu rechtem Bild siehe Abbildung 13-41).....	210
Abbildung 13-41	oTS-bezogene CH_4 -Produktionsraten der einzelnen Feststofffermenter in LV10b bei Zuschaltung von Fermentern mit reiner Maissilage	211
Abbildung 13-42	Substrattemperaturen in LV1 (Vergärung von Pferdemist).....	211

Abbildung 13-43	Substrattemperaturen in LV2 (Vergärung von Pferdemist).....	212
Abbildung 13-44	Substrattemperaturen in LV3 (Vergärung von Rinderfestmist).....	212
Abbildung 13-45	Substrattemperaturen in LV4 (Vergärung von Grünschnitt)	213
Abbildung 13-46	Substrattemperaturen in LV5 (Vergärung von Grünschnitt)	213
Abbildung 13-47	Substrattemperaturen in LV6 (Vergärung von Grassilage).....	214
Abbildung 13-48	Substrattemperaturen in LV7 (Vergärung von Maissilage).....	214
Abbildung 13-49	Substrattemperaturen in LV8 (Mischungen mit 25 Gew.-% TS Maissilage	215
Abbildung 13-50	Substrattemperaturen in LV9 (Mischungen mit 15 Gew.-% TS Maissilage).....	215
Abbildung 13-51	Substrattemperaturen in LV10 (eigen- und mischperkolierte Fermenter)	216
Abbildung 13-52	Substrattemperatur in den zehn Einzelreaktoren in allen perkolierten Versuchsansätzen LV1 bis LV10.....	216
Abbildung 13-53	Gemessener Methanertrag sowie Methangehalt im Biogas in PV3 (Mischung aus 38 Vol.-% Grassilage und 62 Vol.-% Altmaterial).....	217
Abbildung 13-54	Temperatur in der Feststoffschüttung und im Perkolattank im Verlauf von PV4 (Substratmischung mit 25 Gew.-% TS Maissilage).....	218
Abbildung 13-55	TS- und oTS-Gehalte im Gärrest aus PV6 (Substratmischung aus 60 Vol.-% Gras und 40 Vol.-% Pferdemist, ohne Zugabe von Altmaterial) über die Höhe und Breite der Feststoffschüttung in drei verschiedenen Fermentertiefen.....	218
Abbildung 13-56	Konzentrationen an Essig- und Propionsäure im Gärrest aus PV6 (60 Vol.-% Gras + 40 Vol.-% Pferdemist) über die Höhe und Breite der Feststoffschüttung	219
Abbildung 13-57	Konzentrationen an n-Buttersäure und Capronsäure im Gärrest PV6 (60 Vol.-% Gras + 40 Vol.-% Pferdemist) über die Höhe und Breite der Schüttung	219

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1	Hauptgruppen von Bakterien des chemotrophen Stoffwechsels.....	6
Tabelle 3-2	Vor- und Nachteile kontinuierliche und diskontinuierliche Prozessführung.....	14
Tabelle 4-1	Biogaserträge verschiedener Feststoffe bei Fermentation bei höheren TS- Gehalten in Pilot- und Praxisanlagen	33
Tabelle 5-1	Versuchsplan Laborversuche (FrM: Frischmaterial; AM: Altmaterial; PW: Prozesswasser; LW: Leitungswasser).....	39
Tabelle 5-2	Versuchsplan Praxisversuche (FrM: Frischmaterial; AM: Altmaterial)	45
Tabelle 6-1	Methanertrag der Komponente Pferdemist nach unterschiedlichen Gärzeiten (FrM: Frischmaterial)	60
Tabelle 6-2	Methanertrag der Komponente Rinderfestmist (RM) in LV3 sowie mittlere Biogasqualität in sechs Wochen (StM: Strukturmaterial; AM: Altmaterial).....	62
Tabelle 6-3	Methanertrag der Komponente Grünschnitt sowie mittlere Biogasqualität (Gesamtfermenter) innerhalb von sechs Wochen bei gefluteten und perkolierten Ansätzen (LV4 und LV5)	69
Tabelle 6-4	Methanertrag der Komponente Grassilage in den Mischungen LV6 sowie mittlere Biogasqualität (Gesamtfermenter) innerhalb von sechs Wochen	72
Tabelle 6-5	Methanertrag der Komponente Maissilage in den Mischungen LV7a sowie mittlere Biogasqualität (Gesamtfermenter) innerhalb von sechs Wochen	76
Tabelle 6-6	Methanertrag der Komponente Maissilage in LV7, LV8 und LV9 bei unterschiedlichem Altmaterialtyp, unterschiedlicher Gärdauer und Variation der Prozesswasserführung.....	82
Tabelle 6-7	Anteil des in der freien Flüssigphase produzierten Methans am Gesamtertrag	91
Tabelle 6-8	Im Fermenter verbliebener Anteil des gesamten Methanertrags, LV1 bis LV10, nur perkolierte Ansätze	92
Tabelle 7-1	TS- und oTS-Gehalte im Feststoff vor und nach der Vergärung im Praxis- und im Labormaßstab für die Versuchsansätze mit Rindermist	97
Tabelle 7-2	TS- und oTS-Gehalte im Feststoff vor und nach der Vergärung im Praxis- und im Labormaßstab für die Versuchsansätze mit Grünschnitt.....	100

Tabelle 7-3	Analysen des Gärrestes in PV5 (Substratmischung aus 60 Vol.-% Gras und 40 Vol.-% Pferdemit) im vorderen und hinteren Fermenterbereich nach Ausfall der Berieselung im vorderen Teil	108
Tabelle 8-1	Erforderlicher Mindestanteil an festem Impfmateriel sowie Organikdichte in gärfähigen Mischungen im Perkulationsverfahren (FrM: Frischmateriel).....	118
Tabelle 8-2	Berieselungsintensität von Laborversuchsansätzen mit gutem Gärerfolg bei einer Berieselungshäufigkeit von 2 x 15min/d (FrM: Frischmateriel).....	122
Tabelle 8-3	Maximale substratspezifische Methanerträge im Perkulationsverfahren bei einer Gärdauer von 6 Wochen	129
Tabelle 8-4	oTS- und volumenbezogene CH ₄ -Erträge von perkolierten Versuchsansätzen (Labormaßstab) bei einer Gärzeit von 6 Wochen (FrM: Frischmateriel)	132
Tabelle 8-5	Anfall von überschüssigem Gärrest bei Mischungen mit maximalem Gasertrag in Laboruntersuchungen (GR: Gärrest; RV,netto: genutztes Reaktorvolumen)	134
Tabelle 8-6	Schüttgewicht und Organikdichte in parallelen Praxis- und Laborversuchen	140
Tabelle 9-1	Berechnete Modellparameter sowie Modellergebnisse zur Gleichgewichtskonzentration (c _{GG}) im Prozesswasser für ausgewählte Substratmischungen.....	151
Tabelle 10-1	Zum Einsatz in diskontinuierlich betriebenen Feststofffermentern geeignete Substratmischungen mit Abschätzung der unter Praxisbedingungen erzielbaren Raum-Zeit-Ausbeute	157
Tabelle 10-2	Abschätzung der erforderlichen BHKW-Nennleistung sowie der Energieerzeugung in diskontinuierlich betriebenen Feststofffermentern beim Einsatz von geeigneten Substratmischungen.....	158
Tabelle 10-3	Arbeitszeitaufwand an der untersuchten Praxisanlage bei einer Gärdauer von 6 Wochen pro Charge	160
Tabelle 13-1	Beschreibung ausgewählter Analyseparameter in Fest- und Flüssigproben.....	180
Tabelle 13-2	Probenmengen und Angaben zu Entnahme und gegebenenfalls Transport von flüssigen und festen Proben bis zur Weiterverarbeitung nach Tabelle 13-3.....	180
Tabelle 13-3	Übersicht zu Lagerung und Konservierung von Proben vor der Analyse	181
Tabelle 13-4	Analysenverfahren für die Untersuchung von Prozesswasserproben	181
Tabelle 13-5	Analysenverfahren für die Untersuchung von Feststoffproben	182
Tabelle 13-6	Messverfahren zur qualitativen und quantitativen Analyse der Gasproduktion	182
Tabelle 13-7	Detailangaben zur Behandlung des Prozesswassers zwischen Versuchsreihen	185
Tabelle 13-8	Detaillierte Beschreibung der Versuchsansätze im Labormaßstab in Ergänzung zu Tabelle 5-1 (FrM: Frischmateriel; AM: Altmateriel; PW: Prozesswasser; LW: Leitungswasser).....	185
Tabelle 13-9	In Laborversuchen eingesetzte Substrate (PW: Prozesswasser; LW: Leitungswasser).....	187
Tabelle 13-10	Zugesetzte Flüssigkeitsvolumina in Laborversuchen (FrM: Frischmateriel; AM: Altmateriel)	188
Tabelle 13-11	Messstellenkennung der Praxisanlage	192
Tabelle 13-12	Automatisiert erfasste Messparameter mit Geräte- und Messsignalespezifizierung (Praxisanlage).....	192
Tabelle 13-13	Detaillierte Beschreibung der Versuchsansätze im Praxismaßstab in Ergänzung zu Tabelle 5-2 (AM: Altmateriel).....	194
Tabelle 13-14	In Praxisversuchen eingesetzte Substrate	195
Tabelle 13-15	Organikgehalte und Schüttdichten in Laborversuchen mit unterschiedlichen Mischungen aus Frischmateriel (FrM) und Altmateriel	196
Tabelle 13-16	Organikgehalte und Schüttdichten in LV3 (RM: Rinderfestmist; StM: Strukturmateriel; AM: Altmateriel)	196
Tabelle 13-17	Anteil von Einzelkomponenten in Praxisversuchen in Vol.-% sowie Gew.-%.....	217
Tabelle 13-18	Parameter der berechneten gärfähigen Mischungen aus Silage, Grünschnitt und Altmateriel mit ausreichend Gärrestanfall.....	222

1 Einleitung und Begriffsbestimmungen

1.1 Einführung in die Thematik

Mit dem im Jahr 2004 novellierten Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) /N.N., 2004/ wurde unter anderem das Ziel verankert, den Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung in Deutschland bis zum Jahr 2010 auf mindestens 12,5 % und bis zum Jahr 2020 auf mindestens 20 % zu erhöhen. Im Rahmen einer nachhaltigen Energieversorgung hat Biomasse das Potenzial, zukünftig einen deutlich größeren Beitrag zur Deckung der Energieversorgung zu leisten. Der Energiegehalt der Biomasse kann durch eine Vielzahl von Verfahren nutzbar gemacht werden /Kaltschmitt & Merten, 2001/Kaltschmitt & Vogel, 2004/Thrän et al., 2005/, darunter durch die anaerobe Fermentation zu energiereichem Biogas.

Das novellierte EEG ermöglicht durch angepasste Vergütungsregelungen für die Einspeisung von Strom aus Biomasse einen wirtschaftlichen Betrieb von Biogasanlagen. Eine erhöhte Grundvergütung bis zu einer Leistungsgröße von 150 kW_{el} schafft günstige Rahmenbedingungen auch für den Betrieb kleinerer Anlagen, wie sie in der landwirtschaftlichen Praxis häufig attraktiv sind. Zusätzlich können verschiedene Extravergütungen in Anspruch genommen werden: der NaWaRo-Bonus bei ausschließlicher Verwendung naturbelassener Biomasse (Energiepflanzen, Mist, Landschaftspflegematerial), der Kraft-Wärme-Kopplungs-Bonus sowie bei Anlagen < 5 MW_{el} ein Technologie-Bonus für den Einsatz innovativer Verfahren. Dieser berücksichtigt, dass die Anwendung von innovativen Technologien in der Praxis regelmäßig mit höheren Investitionskosten verbunden ist. Zu den begünstigten Verfahrenskonzepten, die im Gesetzestext ausdrücklich als innovative Prozesse aufgelistet sind, zählt auch die „Trockenfermentation“ (Feststoffvergärung). Insbesondere durch die Kombinierbarkeit von NaWaRo-Bonus und Technologie-Bonus entstand ein wachsendes Interesse in der Landwirtschaft, nachwachsende Rohstoffe in entsprechenden Anlagen zur Biogaserzeugung einzusetzen /Dreher, 2006/.

Die ersten Verfahren zur Feststoffvergärung wurden in den 1940er Jahren in Frankreich und Deutschland entwickelt. Es waren diskontinuierliche Systeme, die entweder ohne Wasserüberschuss oder mit Berieselung betrieben wurden (Kapitel 4.3.2). Nach dem Ende des zweiten Weltkriegs war das Interesse an Biogas zunächst groß. In Deutschland wurden verschiedene, hauptsächlich kontinuierliche Anlagensysteme entwickelt und gebaut /Schulz, 1996/. Doch die günstige Preissituation für Energie und für Mineräldünger brachte gegen Ende der 1950er Jahre die Aktivitäten in Forschung und Entwicklung im Biogasbereich zum Erliegen und führte zur Stilllegung bereits bestehender Anlagen /Kloss, 1986/. Viele der damals gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse gingen verloren, da sie nicht immer schriftlich niedergelegt wurden /Kloss, 1986/.

Nach der Ölkrise 1973 nahm das Interesse an der Biogastechnologie wieder zu /Schulz, 1996/. In der Landwirtschaft konzentrierten sich die Forschung und die Entwicklung auf die Vergärung von Flüssigmist, da dies das dominante potenzielle Einsatzsubstrat war. Es entstanden zahlreiche Anlagen zur Flüssigvergärung. Im Gegensatz zur Landwirtschaft fielen im kommunalen Verantwortungsbereich mit getrennt eingesammelten Bioabfällen sowie mit Restabfällen zur Verwertung von Beginn an Materialien mit hohen TS-Gehalten an. Die Einführung von technischen

Verfahren, die gezielt diese Stoffgruppen verarbeiten konnten, war eine logische Entwicklung. Daher ist die Vergärung bei hohen Gehalten an Trockensubstanz (TS) im kommunalen Bereich Stand der Technik. Seit 1993 sind in Europa mehr Feststoff- als Flüssigfermenter errichtet worden /Bolzonella et al., 2003/. Es sind überwiegend kontinuierlich betriebene Anlagensysteme und einige diskontinuierlich betriebene Verfahren in Betrieb (Kapitel 4.3).

Insbesondere da nach dem derzeitigen EEG der Einsatz von Energiepflanzen besonders gefördert wird und die Rahmenbedingungen für die Biogasgewinnung insgesamt attraktiver geworden sind, ist in der Landwirtschaft ein gestiegenes Interesse an der Vergärung auch dann festzustellen, wenn hauptsächlich Feststoffe und kein oder wenig Flüssigmist vorhanden sind. Für die im kommunalen Bereich etablierten Anlagenbauer ist eine Realisierung nur ab einer bestimmten Jahresdurchsatzleistung wirtschaftlich umsetzbar. Für den dezentralen landwirtschaftlichen Bereich, aber auch im kommunalen Umfeld in Fällen, in denen wenig potenziell vergärbare Stoffströme anfallen, aber die dezentrale Behandlungsstruktur unter Nutzung der Vergärungstechnologie trotzdem aufrecht erhalten oder aufgebaut werden soll, sind alternative Anlagenkonzepte erforderlich.

Eine Möglichkeit zur Nutzung stapelbarer Feststoffe ist die Vergärung in garagenartigen Boxenfermentern im Batch-Betrieb. Hierbei wird die Substratcharge im Fermenter aufgestapelt und ohne Durchmischung unter Berieselung über mehrere Wochen vergoren. Bisher ist dieses Verfahren im landwirtschaftlichen Bereich erst wenig erforscht. Der Mangel an Erfahrungen erschwert den Praxiseinsatz.

1.2 Erläuterung und Abgrenzung zentraler Begriffe

Bisher existiert keine abgesicherte Definition der Begriffe *Trockenfermentation* und *Nassfermentation*. Das EEG selbst enthält keine Begriffsbestimmung. Die amtliche Begründung zum EEG /Deutscher Bundestag, 2004/ führt aus, dass bei Trockenfermentationsverfahren im Gegensatz zu Nassvergärungsverfahren keine pumpfähigen, sondern stapelbare Substrate eingesetzt werden, wobei die organischen Stoffe dabei in der Regel einen Wassergehalt $< 70\%$ haben. Die Abgrenzung zwischen Trocken- und Nassvergärungsverfahren ist entscheidend für die Gewährung des Technologie-Bonus. Aufgrund der zurzeit nicht eindeutigen Regelung durch den Gesetzgeber bestehen jedoch Zweifel, welche Verfahren tatsächlich bonusberechtig sind. Für einen behördlichen Vollzug der Vergütungsregelung bietet das EEG keine Rechtsgrundlage. Es begründet ein privatrechtliches Verhältnis zwischen einem Anlagenbetreiber und dem Netzbetreiber, so dass Streitigkeiten um die Auslegung des EEG nur durch ein Gericht verbindlich zu klären sind /Dreher, 2006/. In der Praxis erhalten in der Landwirtschaft zurzeit häufig auch kontinuierlich betriebene Verfahren, die mit weitgehend der Flüssigvergärung entsprechender gängiger Technologie in Abhängigkeit der eingesetzten (ursprünglich stapelbaren) Substrate, auch unter Verzicht der Zugabe von Fremdflüssigkeit vergären, den Technologiebonus /Schüsseler, 2006/. Ein Wassergehalt $< 70\%$ wird dabei nicht unbedingt eingehalten.

Neben rechtlichen Unklarheiten bei der Begriffsabgrenzung besteht auch keine klare natur- oder ingenieurwissenschaftliche Definition. Im Allgemeinen wird jedoch bei Feststoffgehalten bis zu 15% Trockensubstanz von Nassfermentation gesprochen, bei höheren Feststoffgehalten von Trockenfermentation /Bilitewski et al., 2004/. Die

Übergänge sind jedoch fließend. Teilweise wird bei der Vergärung mit erhöhten TS-Gehalten noch weiter unterschieden zwischen semitrockenen und trockenen Verfahren. Grundsätzlich können diese Bezeichnungen irreführend sein, da für einen biologischen Abbau der Organik stets ein gewisser Wassergehalt erforderlich ist. In dieser Arbeit werden stattdessen die Begriffe *Flüssigfermentation* bzw. Flüssigvergärung sowie *Feststofffermentation* oder Feststoffvergärung verwendet. Die Begriffe Trocken- und Nassfermentation werden nur bei direkten Zitaten aus der Literatur eingesetzt.

Soweit sich aus dem Kontext nicht eine erweiterte Bedeutung ergibt (insbesondere Abschnitt 4: alle Verfahren mit erhöhten TS-Gehalte im Fermenter), werden in dieser Arbeit mit dem Begriff Feststofffermentation oder Feststoffvergärung Verfahren beschrieben, bei denen Feststoffe in stapelfähiger Form in den Fermenter eingebracht werden. In der Regel handelt es sich hierbei um Verfahren mit einem im Vergleich zur Flüssigvergärung niedrigen Wassergehalt, jedoch wird für die Abgrenzung des Begriffs hier nicht ein bestimmter Wassergehalt herangezogen. Vielmehr werden alle Verfahren berücksichtigt, bei denen der stapelfähige Feststoff mit hohem TS-Gehalt in den Reaktionsraum eingebracht wird, unabhängig davon, wie hoch der Wassergehalt während der Reaktion eingestellt wird. Diese erweiterte Definition schließt beispielsweise Verfahren mit ein, in denen der Feststoff mit Flüssigkeit geflutet wird (Kapitel 4.3.2).

Bei landwirtschaftlichen *Perkolationsverfahren* wird der zu vergärende Substratstapel im Fermenter über die Dauer des Gärzyklus in regelmäßigen Zeitabständen mit Flüssigkeit übersprüht. Die Berieselung zur Unterstützung der mikrobiellen Aktivität im Feststoff wird als Perkolation bezeichnet, wobei dies nicht der Begrifflichkeit entspricht, die bei der Vergärung von Bio- und Restabfall verwendet wird. Dort bezeichnet Perkolation eine Extraktion der Organik durch eine intensivierte aerobe oder anaerobe Hydrolyse, gegebenenfalls auch in Kombination mit Versäuerung und anschließender Weiterverarbeitung der angereicherten Lösung z.B. in einer Hochleistungsflüssigvergärung. In der Chemietechnik bezeichnet Perkolation (von lat.: percolare = durchsehen, durchsickern lassen) ein Verfahren zur Gewinnung von Auszügen, d.h. zur Extraktion von Wirkstoffen wie Alkaloiden aus zerkleinerten Substanzen mit Hilfe von langsam hindurch fließenden Lösungsmitteln wie Wasser und Alkohol /Neumüller, 1974/. Im landwirtschaftlichen Bereich etabliert sich der Begriff Bioleaching zur Charakterisierung von Verfahren, die darauf abzielen, Organik gezielt in einer Hydrolyse- und Versäuerungsstufe aus dem Feststoff zu extrahieren, um die angereicherte Flüssigphase in einer getrennten Stufe zu vergären.

Der Begriff *Kreuzberieselung* kennzeichnet Verfahren, bei denen räumlich getrennte Feststoffschüttungen über den gegenseitigen Austausch der freien Flüssigphasen in Beziehung gesetzt werden, siehe Kapitel 4.1. In einem System können dabei sowohl kreuzberieselte als auch Fermenter mit *Eigenberieselung* (Rezirkulation der freien Flüssigphase innerhalb desselben Fermenters) vorhanden sein. Im Gegensatz dazu führen andere Verfahren die Flüssigphasen aller Feststofffermenter in einem getrennten Flüssigkeitstank zusammen und verteilen die Mischflüssigkeit erneut über alle Feststoffschüttungen. Für diesen Verfahrenstyp wird in dieser Arbeit der Begriff *Mischberieselung* verwendet.

2 Zielsetzung der Forschungsarbeit

In der vorliegenden Arbeit wird die Vergärung von Feststoffen in einfachen, diskontinuierlich betriebenen Fermentern untersucht. Ausgangspunkt der Betrachtungen ist die Frage, wie die Produktion von Biogas im landwirtschaftlichen Bereich, basierend auf der zunehmenden Verwendung von Festsubstraten, technisch sinnvoll und ökonomisch attraktiv ausgestaltet werden könnte. Da in Deutschland in der landwirtschaftlichen Praxis zunehmend diskontinuierlich betriebene Boxenfermenter mit Berieselung gebaut werden, wird speziell dieser Verfahrensgrundtyp näher betrachtet.

Zur systematischen Analyse von Forschungsfragen wurde an der Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen bzw. am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim ein Labor zur Feststoffvergärung aufgebaut. Die durchgeführten Untersuchungen mit verschiedenen Einsatzsubstraten wie Festmist oder Energiepflanzen bilden eine Bewertungsgrundlage zur grundsätzlichen Eignung verschiedener Substrate sowie zur sinnvollen Einstellung der Prozessbedingungen. Neben der Bestimmung von erforderlichen Impfmaterialeanteilen beruht der Erkenntnisgewinn auf verfahrenstechnischen Untersuchungen, wie beispielsweise zur Variation der Prozesswasserführung, sowie auf Versuche zur Substratkonditionierung vor der Vergärung.

Versuche an einer landwirtschaftlichen Feststoffvergärungsanlage ergänzen die experimentellen Arbeiten mit dem Hauptziel, die Gültigkeit von Ergebnissen aus dem Labormaßstab unter Praxisbedingungen zu verifizieren und zusätzliche Erfahrungen beim Einsatz des Verfahrens in der Praxis zu sammeln.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen in der landwirtschaftlichen Praxis die Entscheidungsfindung für oder gegen den Bau einer entsprechenden Anlage unterstützen. Darüber hinaus sollen Möglichkeiten einer Optimierung im Prozessbetrieb aufgezeigt werden.

11 Zusammenfassung

Im Gegensatz zur kommunalen Abfallbehandlung ist in der Landwirtschaft die Biogasproduktion auf Feststoffbasis (ohne Zugabe von Flüssigmist) noch in der Entwicklung. Eine mögliche Verfahrensvariante sind diskontinuierlich betriebene Boxenfermenter mit Berieselung. Neben der Einsatzfähigkeit auch in Betrieben, in denen kein Flüssigmist anfällt, sind Hauptvorteile dieses Systems die sehr einfache, robuste und damit wartungsarme Technik, der flexible Betrieb sowie die relativ geringen Gärrestmengen. Es können auch Substrate verarbeitet werden, die in einer Flüssigvergärung ausgeschlossen werden müssten, z.B. weil sie einen höheren Anteil verholzter Biomasse oder Steine enthalten, wie es unter anderem für Grünschnitt aus kommunaler Sammlung typisch ist. Aufgrund der assoziierten Vorteile besitzt das Verfahren hohe Attraktivität in der landwirtschaftlichen Praxis, so dass zu erwarten ist, dass weitere Anlagen entstehen werden. Aufbauend auf Ergebnissen von Labor- und Praxisversuchen zeigt die vorliegende Arbeit mögliche sinnvolle Einsatzbereiche des Verfahrens, geeignete verfahrenstechnische Randbedingungen sowie problematische Aspekte auf.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen belegen, dass bei der Vergärung von Feststoffen in diskontinuierlich betriebenen Boxenfermentern mit Berieselung substratspezifische Methanerträge erzielt werden können, die auf dem Niveau der Flüssigvergärung liegen (vgl. Kapitel 8.2.2). Grundsätzlich besteht jedoch unter Praxisbedingungen aufgrund der fehlenden Durchmischung während der Vergärung und der über die Höhe der Festkörperschüttung variierenden Bedingungen eine erhöhte Gefahr der Ausbildung von Totzonen und somit eines ungleichmäßigen Gärprozesses (vgl. insbesondere Kapitel 7.5.2).

In Verfahren mit berieselten Feststoffschüttungen muss sichergestellt sein, dass die Durchrieselbarkeit des Feststoffs tatsächlich gegeben ist. Hierzu muss das Prozesswasser niedrigviskos und der Feststoff durchrieselbarer sein. Bei der Vergärung von Rinderfestmist erwies sich im Laborversuch die verdichtete, klumpenerhaltende Struktur im Perkolationsverfahren negativ (vgl. Diskussion in Kapitel 8.2.1.1), was unter Praxisbedingungen zu niedrigeren Mineralisierungsgraden führte (Kapitel 7.1). Da sich der Strukturgehalt entscheidend auf den Prozesserfolg auswirken kann (vgl. auch Kapitel 10.1), sollte beim Einsatz von strukturarmen Substraten gezielt strukturreiches Material (z.B. Stroh, Grünschnitt) zugemischt werden.

Unter Praxisbedingungen wurde eine gleichmäßige und hochwertige Vergärung erreicht, indem optimal vorkonditioniertes Substrat bereitgestellt wurde, das auch in der kleinräumigen Struktur gärfähig war (vgl. Kapitel 7.4). Dies erforderte die Zugabe einer entsprechend hohen Menge an festem Impfmateriale und eine sorgfältige Durchmischung der Einzelkomponenten. Im Laborversuch führte ein Einbau in Schichten zu einer signifikant niedrigeren Methanproduktion innerhalb von sechs Wochen (Kapitel 6.5.3). Ein hoher Homogenisierungsgrad des eingebrachten Gärgutes verringert die Gefahr von Totzonen im Gärstapel und sichert nicht nur die Methanausbeute, sondern vermeidet auch den Austrag von nicht oder nur teilweise vergorenem Material. Eine gleichmäßige Mineralisierung ist sowohl unter ökologischen als auch unter ökonomischen Gesichtspunkten anzustreben.

Bei der Vergärung von NaWaRos mussten hohe Mengen (bis zu 70 Gew.-% bezogen auf TS) Gärrest als festes Impfmateriale zurückgemischt werden. Daher büßt das Verfahren für diese Einsatzstoffe an Attraktivität ein. Soll eine Anlage hauptsächlich oder ausschließlich mit NaWaRos betrieben werden, so sollte darüber hinaus der Strukturgehalt des Einsatzsubstrates bedacht werden. Kontinuierlich betriebene Prozessalternativen sollten gerade für NaWaRos besonders in Erwägung gezogen werden.

Bei der Auswahl des Prozesstyps innerhalb möglicher Verfahrensalternativen sollten die spezifischen Substrateigenschaften der verfügbaren Materialien berücksichtigt werden. Während leicht hydrolysierbare, energiereiche Stoffe mit wenig Struktur, wie Mais- oder Grassilage, sich besonders gut für eine kontinuierliche Vergärung eignen, sind für diskontinuierlich betriebene Fermenter mit berieselten Feststoffschüttungen insbesondere strukturreiche Materialien wie Grünschnitt oder Festmist mit hohem Strohanteil unter verfahrenstechnischen Gesichtspunkten vorteilhaft (Kapitel 10.1). Jedoch ist die Energieausbeute hierbei eher gering. Im Hinblick auf die Erhöhung der Gasausbeute bei gegebenem Reaktorvolumen erscheint ein gezieltes Mischen energiereicher und strukturreicher Fraktionen positiv. Die Zugabe von energiereichen Co-substraten kann die Raum-Zeit-Ausbeute deutlich erhöhen. So sind Mischungen aus Maissilage und Grünschnitt mit hohem Holzanteil aus kommunaler Sammlung oder Maissilage und Strohmist als mögliche Kombinationen denkbar.

Auf der Basis der durchgeführten Arbeiten kann eine Mischung aus 25 Vol.-% Maissilage, 15 Vol.-% Grünschnitt und 60 Vol.-% festem Impfmateriale bei einer Gärdauer von sechs Wochen empfohlen werden (Kapitel 8.2.3 in Verbindung mit Kapitel 8.2.4). Hierbei kann eine mittlere Raum-Zeit-Ausbeute um $0,45 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 / (\text{m}^3_{\text{RV,netto}} \cdot \text{d})$ erzielt werden (Kapitel 10.2.1). Auch Grassilage kann als energiereiches Substrat eingesetzt werden. Da das Schüttgewicht und die Energiedichte von Grassilage im Vergleich zu Maissilage niedriger sind, kann ein höherer volumenbezogener Frischmaterialanteil verwirklicht werden, wobei die erzielbare Raum-Zeit-Ausbeute eher niedriger ist. Eine Mischung aus 50 Vol.-% Grassilage, 10 Vol.-% Grünschnitt sowie 40 Vol.-% Altmaterial könnte bei einer Gärdauer von sechs Wochen durchschnittlich ca. $0,4 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 / (\text{m}^3_{\text{RV,netto}} \cdot \text{d})$ produzieren. Jedoch entstehen beim Einsatz von Grassilage im rezirkulierten Prozesswasser schnell Ammoniumkonzentrationen, die den biologischen Prozess inhibieren können (Kapitel 9), so dass eine Verdünnung durch gezielten Austausch von Prozesswasser mit Frischwasser erforderlich sein kann.

Die Gasproduktion im Perkolattank muss gefasst werden. Sie kann insbesondere bei der Vergärung von leicht hydrolysierbarem Substrat beträchtlich sein. Im Rahmen dieser Arbeit entstanden in Einzelversuchen in der zirkulierenden Flüssigphase > 10 % des gesamten Methans, wobei eine Erhöhung des Maisanteils im System den Anteil der Methanproduktion in der Flüssigphase auf bis zu 21 % steigerte (Kapitel 6.5.8).

In einem Fermenterverbund mit mehreren Feststofffermentern, die über die zirkulierende Flüssigphase funktionell gekoppelt sind, ist die Methanproduktion aus einem Einzelfermenter nicht sinnvoll messbar bzw. interpretierbar. Neben der Abführung von Organik mit Gasbildung im Perkolattank wird Organik in andere Feststofffermenter eingetragen und dort metabolisiert, so dass nur ein Teil des Methans in der eigentlichen Feststoffschüttung entsteht. Auf der anderen Seite wird Fremdorganik eingespült und in Biogas umgewandelt. Insbesondere bei leicht hydrolysierbaren

Materialien werden signifikante Organikanteile aus dem Festbett abgeführt. Bei der Vergärung von Maissilage wurden im Rahmen dieser Arbeit bis zu zwei Drittel des Methans außerhalb der eigentlichen Feststoffschüttung, also im Perkolattank sowie in älteren Feststofffermentern, gebildet (Kapitel 6.5.7).

Die Intensität der Perkolation hat einen Einfluss auf die Methanisierung im Festbett. Eine diskontinuierliche Berieselung fördert die Biogasbildung im Festbett selber. Substratmischungen, die ausreichend Impfmateriale enthalten, erzielen durch eine intensivierte Berieselung keine Vorteile. Diese fördert eher eine verstärkte Hydrolyse und gegebenenfalls auch Versäuerung, unterstützt jedoch nicht die Ausbildung einer methanogenen Population (Kapitel 8.2.1.2). Das Prozesswasser muss niedrigviskos sein, damit es tatsächlich durch den Substratstapel durchsickern kann. Flüssigmist ist zur Berieselung nicht geeignet.

Bei nicht homogenem Gärkörper im Fermenter geben Prozesswasserproben im Praxismaßstab nur unzureichende Hinweise auf eine partiell unvollständige Vergärung (Kapitel 7.5.2), da Komponenten aus Bereichen mit gehemmter Methanisierung unter Umständen nicht aus den entsprechenden Zonen ausgetragen werden oder beim Durchtritt durch den Substratstapel in Zonen mit fortgeschrittener Vergärung zurückgehalten oder abgebaut werden.

Geflutete Prozessvarianten, bei denen der Feststoff mit Flüssigkeit überstaut wird, gelten als mögliche Alternativen zu Verfahren mit Berieselung. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Auswirkungen einer Flutung auf die Prozesskinetik substratspezifisch sind. Die Versäuerungsneigung kann reduziert oder erhöht sein (Kapitel 8.2.1.3). Die Flutung scheint eher die Hydrolyse und Säurebildung zu beschleunigen und weniger die Methanisierung. Insbesondere bei leicht hydrolysierbarem Versuchsgut wäre dann eine verstärkte Versäuerung möglich. Da jedoch die anfallenden Säuren durch das höhere Verhältnis von Flüssigkeit zu Feststoff stärker verdünnt werden, kann die Versäuerungsgefahr auch niedriger sein. Bei schwerer abbaubarem Substrat (Pferdemist, Grünschnitt) konnte im gefluteten Verfahren vollständig auf die Zugabe von festem Impfmateriale verzichtet werden. Dadurch können im Vergleich zum Perkulationsbetrieb höhere volumenbezogene Methanerträge erzielt werden. Der Anlagenbetrieb ist jedoch anspruchsvoller und zeitaufwändiger. Während der Vergärung muss ein Aufschwimmen des Feststoffs durch technische Einrichtungen verhindert werden. Vor der Entleerung ist eine Phasentrennung (fest/flüssig) erforderlich. Der Gärrest kann eine pastöse Konsistenz annehmen und ist in seiner Handhabung anspruchsvoller.

Die diskontinuierliche Prozessführung eignet sich eher für geringe Jahresdurchsatzmengen. Im Gegensatz zu kontinuierlichen Verfahren kann bei höheren Durchsätzen keine Automatisierung erfolgen. Darüber hinaus steigt der Arbeitsaufwand mit zunehmender Anzahl an Boxen stark an. Nach Kapitel 10.2.2 sind für den eigentlichen Befüllvorgang ca. 5 - 6 h pro Charge erforderlich. Die Größe der Einzelbox ist begrenzt, so dass bei höherem Jahresdurchsatz entsprechend viele Reaktoren erforderlich wären.

Im landwirtschaftlichen Bereich sind neben Entwicklungen hin zu kontinuierlich betriebenen Feststoffvergärungsverfahren Forschungsansätze vorhanden, die erforderliche Impfmaterialemenge bei der diskontinuierlichen Vergärung auch für NaWaRos zu verringern, indem entstehende Säuren gezielt abgeleitet werden (Kapitel 4.1). Diese

können einer getrennten Flüssigvergärung zugeführt, über ältere Feststofffermenter verrieselt oder zunächst einem gemeinsamen Tank zugeleitet und nach partieller Vergärung über alle Fermenter verrieselt werden. Jedoch sollten entsprechende Verfahrenskonzepte auf Effizienz für verschiedene Substrate sowie unter Praxisbedingungen überprüft werden (vgl. Kapitel 10.3). In größerem Maße als bei der Vergärung von Abfallstoffen und landwirtschaftlichen Reststoffen ist beim Einsatz von Energiepflanzen das Auftreten von Totzonen zu vermeiden. Daher sollten alternative Verfahrenskonzepte im Hinblick auf die Gleichmäßigkeit und Vollständigkeit des Organikabbaus insbesondere unter Praxisbedingungen überprüft werden. Auf der Basis der Versuchsergebnisse dieser Arbeit leitet sich die Empfehlung ab, bei Boxenfermentern mit Berieselung, in denen das Gärgut während der Methanisierung nicht durchmischt wird, nicht auf die Zumischung einer ausreichenden Impfmateriale Menge zu verzichten.

Im kommunalen Bereich haben diskontinuierliche Vergärungsanlagen insbesondere dann ein Einsatzpotenzial, wenn eine dezentrale Abfallbehandlungsstruktur erhalten oder aufgebaut werden soll, d.h. wenn relativ geringe Jahresmengen an organischen Abfällen anfallen und somit kontinuierliche Verfahren zu teuer wären. Eine Ansiedlung im Bereich von Deponien bietet die Möglichkeit, einen Teil der bestehenden Infrastruktur mit zu nutzen und gegebenenfalls die gemeinsame Gasverwertung zu optimieren.

Aufgrund der Gefahr der Ausbildung von Totzonen sowie der ungenügenden Kontrolle bzw. Beeinflussbarkeit der Gärraumtemperatur in Fermentern mit undurchmischten Feststoffschüttungen sollten hygienisch bedenkliche Materialien diesem Anlagentyp nicht zugeführt werden, falls die Hygienisierung nicht durch eine externe Einrichtung gewährleistet wird.

Ein thermophiler Betrieb konnte bei der untersuchten Praxisanlage mit berieselten Boxenfermentern nicht verwirklicht werden (Kapitel 8.3). Auch im mesophilen Bereich traten ausgeprägte Temperaturschwankungen auf (Abschnitt 7, z.B. Kapitel 7.3). Der Wärmedurchtritt durch eine Feststoffschüttung, deren Porenräume teilweise mit Gas gefüllt sind, ist im Vergleich zu einer Feststoffmatrix, deren Poren vollständig mit Flüssigkeit gefüllt sind, behindert (Kapitel 8.2.1.3). Daher sollte bei diesem Anlagentyp keine thermophile, sondern eine mesophile Betriebsweise geplant und eingehalten werden.

12 Literaturverzeichnis

- Anand, V.; Chanakya, H.N.; Rajan, M.G.C.: Solid phase fermentation of leaf biomass to biogas. In: Resources, Conservation and Recycling 6, 1991, S. 23-33
- Andreas, L.: Langzeitemissionsverhalten von Deponien für Siedlungsabfälle in den neuen Bundesländern. Beiträge zur Abfallwirtschaft, Band 14, Technische Universität Dresden, Pirna, 2000
- Aschmann, V.; Mitterleitner, H.: Trocken vergären: Es geht auch ohne Gülle! In: Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse. top agrar FACHBUCH, 2002, S. 22-25
- Barlaz, M.A.; Ham, R.K.; Schaefer, D.M.: Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics. In: CRC Critical Reviews in Environmental Control 19, 1990, S. 557-584
- Barlaz, M.A.; Ham, R.K.; Schaefer, D.M.: Microbial, chemical and methane production characteristics of anaerobically decomposed refuse with and without leachate recycling. In: Waste Manage. Res. 10, 1992, S. 257-267
- Baserga, U.: Biogas aus Festmist. In: Energy and Agriculture. Tagungsband 19. Konferenz CIGR IV, Stuttgart-Hohenheim am 25.-28.09.1995, paper 21
- Baserga, U.: Vergärung von Extensogras-Silage in einer Feststoff-Pilotanlage und einer landwirtschaftlichen Co-Vergärungs-Biogasanlage. Schlussbericht im Forschungsprogramm Biomasse des Bundesamtes für Energie (Schweiz), Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, 1998
- Baumann, T.: Gärbioogie bei Bioabfällen und Speiseresten – Praxisbericht aus Tirol. In: Tagungsband „Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft“. 11. Jahrestagung des IBBK in Rot am See am 05./06.12.2002, S. 117-126
- Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel/Taschenbuch für den Maschinenbau. 14. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980
- Bensmann, M.: Porree heizt Ferkeln ein. In: Neue Energie, 9/2003, S. 86-88
- Bever, J.; Stein, A.; Teichmann, H.: Weitergehende Abwasserreinigung. 3. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, 1995
- Bidlingmaier, W. (Hrsg.): Biologische Abfallverwertung. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 2000
- Bilitewski, B.; Dornack, C.; Gehring, M.: Die Bedeutung der anaeroben Verfahren in Deutschland. In: Bilitewski, B.; Werner, P.; Rettenberger, G.; Stegmann, R.; Faulstich, M. (Hrsg.): 4. Fortschrittsbericht Anaerobe biologische Abfallbehandlung – Neue Entwicklungen. Istitut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden, Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 32, 2004, S. 1-10
- Bioferm (Fa.): Selbstdarstellung der Firma Bioferm im Internet, URL www.bioferm.de, Datum des Zugriffs: 29.03.2004
- Bitsadze, A.; Bitsadze, D.: Development of low temperature resistant bio-digester for subcontinental and cold climatic zones. In: FAO, JTI, FAL (Hrsg.): The future of biogas for sustainable energy production in Europe. Tagungsband 7th (8th) FAO/SREN-Workshop in Uppsala, Schweden, am 30.11.-2.12.2005
- Bleisteiner, N.: Arbeitswirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Planung einer Biogasanlage – Trockenfermentation im Batch-Verfahren. Materialien zur Tagung „Biogas – Mobilisierung der Energiereserve aus der Landwirtschaft“ in Schwäbisch Hall am 1./2.12.2000, S. 53-61
- Bolzonella, D.; Innocenti, L.; Pavan, P.; Traverso, P.; Cecchi, F.: Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase. In: Bioresource Technology 86, 2003, S. 123-129
- Braun, R.: Prinzipien und Systeme von Vergärungsanlagen für biogene Kommunalabfälle. IFA Tulln, Abteilung Umweltbiotechnologie, URL www.wien.gv.at, Datum des Zugriffs: 11.03.2004
- Chan, G.Y.S.; Chu, L.M.; Wong, M.H.: Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediment. In: Environmental Pollution 118, 2002, S. 393-399
- Chanakya, H.N.; Borgaonkar, S.; Meena, G.; Jagadish, K.S.: Solid-phase biogas production with garbage or water hyacinth. In: Bioresource Technology 46, 1993, S. 227-231
- Chanakya, H.N.; Borgaonkar, S.; Rajan, M.G.C.; Wahi, M.: Two-phase anaerobic digestion of water hyacinth or urban garbage. In: Bioresource Technology 42, 1992, S. 123-131
- Chanakya, H.N.; Ganguli, N.K.; Anand, V.; Jagadish, K.S.: Performance characteristics of a solid-phase biogas fermentor. In: Energy for Sustainable Development, Vol. I, 6/1995, S. 43-46
- Chanakya, H.N.; Venkatsubramaniam, R.; Modak, J.: Fermentation and methanogenic characteristics of leafy biomass feedstocks in a solid phase biogas fermentor. In: Bioresource Technology 62, 1997, S. 71-78
- Chen, T.-H.; Chynoweth, D.P.: Hydraulic conductivity of compacted municipal solid waste. In: Bioresource Technology 51, 1995, S. 205-212

- Chen, T.-H.; Hashimoto, A.G.: Effects of pH and substrate:inoculum ratio on batch methane fermentation. In: *Bioresource Technology* 56, 1996, S. 179-186
- Cho, J.K.; Park, S.C.; Chang, H.N.: Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. In: *Bioresource Technology* 52, 1995, S. 245-253
- Christ, O.: Leistungscharakteristik der ein- und zweistufigen thermophilen und mesophilen Vergärung von Bioabfällen. Technische Universität München, Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Heft 148, 1999
- Christ, O.; Wilderer, P.A.; Angerhöfer, R.; Faulstich, M.: Mathematical modeling of the hydrolysis of anaerobic processes. In: *Water Science & Technology* 41, 3/2000, S. 61-65
- Chugh, S.; Chynoweth, D.P.; Clarke, W.; Pullammanappallil, P.; Rudolph, V.: Degradation of unsorted municipal solid waste by a leach-bed process. In: *Bioresource Technology* 69, 1999, S. 103-115
- Chynoweth, D.P.; Owens, J.; O'Keefe, D.; Earle, J.F.K.; Bosch, G.; Legrand, R.: Sequential batch anaerobic composting of the organic fraction of municipal solid waste. In: *Water Science & Technology* 25, 7/1992, S. 327-339
- De Baere, L.: Anaerobic digestion of solid waste: state of the art. In: *Water Science & Technology* 41, 3/2000, S. 283-290
- Deutscher Bundestag: Amtliche Begründung zum EEG. Drucksache 15/2864 des Deutschen Bundestags, 2004 – hier zitiert nach Dreher /2006/
- Dirar, H.A.; El Amin, H.B.: Methane fermentation of water hyacinth: effect of solids concentration and inoculum source. In: *Mircen Journal* 4, 1988, S. 299-312
- Dreher, B.: Stellung der Trockenfermentation im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). In: FNR (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006, S. 15-21
- Elsinga, W.: Praxis-Erfahrungen mit dem Trockenfermentation (Biocel Vergärungsprozeß) seit 1997. Materialien zur 10. Jahrestagung „Biogas in der Landwirtschaft“ in Schwäbisch Hall am 12.-14.12.2001
- FNR Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung. Gülzow, Leipzig, 2005
- Franken, M.: Energie-Bauer als Pionier. In: *Neue Energie*, 11/2003, S. 52-54
- Ghanem, I.I.; Gu Guowei; Zhu Jinfu: Leachate production and disposal of kitchen food solid waste by dry fermentation for biogas generation. In: *Renewable Energy* 23, 2001, S. 673-684
- Ghosh, S.; Klass, D.L.: Two-phase anaerobic digestion. In: *Process Biochemistry* 13, 1978, S. 15-24
- Ghosh, S.; Henry, M.P.; Sajjad, A.; Mensinger, M.C.; Arora, J.L.: Pilot-scale gasification of municipal solid wastes by high-rate and two-phase anaerobic digestion (TPAD). In: *Water Science & Technology* 41, 3/2000, S. 101-110
- Götz, G.: Die Biogaserzeugung ohne Schwimmdecke "System München". In: Liebmann, H. (Hrsg.): Gewinnung und Verwertung von Methan aus Klärschlamm und Mist. Münchner Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie, Band 3, Verlag R. Oldenbourg, München, 1956, S. 269-278
- Griffin, M.E.; McMahon, K.D.; Mackie, R.I.; Raskin, L.: Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids. In: *Biotechnology and Bioengineering* 57, 1998, S. 342-355
- Gronauer, A.: Möglichkeiten und Grenzen des Batch-Verfahrens „Bioferm“. In: FNR (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006, S. 103-111
- Gronauer, A.; Aschmann, V.: Wissenschaftliche Begleitung einer Pilotanlage zur Feststoffvergärung von landwirtschaftlichen Gütern. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Gelbes Heft Nr. 77, München, 2004
- Grundmann, J.: Das DBA-WABIO-Verfahren zur Vergärung von Bioabfällen. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 99-111
- Gunaseelan, V.N.: Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review. In: *Biomass and Bioenergy* 13, 1997, S. 83-114
- Hack, P.; Suppinger, B.; Morks, P.: Anaerobe Abfallbehandlung am Beispiel des Prethane-Rudad-Verfahrens. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 177-187
- Hartmann, H.; Angelidaki, I.; Ahring, B.K.: Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. In: *Water Science & Technology* 41, 3/2000, S. 145-153
- Heiermann, M.; Linke, B.; Kessler, U.; Loock, R.: Biogas aus NaWaRos durch Trockenfermentation. In: *Landtechnik* 62, 1/2007, S. 14-15
- Held, T.: Mikrobiologische Sanierungsverfahren. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), Materialien zur Altlastenbehandlung 2000, Dresden, 2000
- Helffrich, D.; Oechsner, H.: Hohenheimer Biogasertragstest. Vergleich verschiedener Laborverfahren zur Vergärung von Biomasse. In: *Agrartechnische Forschung* 9, 3/2003, S. 27-30

- Hermann, T.; Karsten, N.; Pant, R.; Plickert, S.; Thrän, D. et al.: Einführung in die Abfallwirtschaft. Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt am Main, 1995
- Heyer, K.-U.; Andreas, L.; Brinkmann, U.: Beprobung von Abfallstoffen in Deponiesimulationsreaktoren (DSR). In: Umweltbundesamt (Hrsg.): Verbundvorhaben Deponiekörper. Tagungsband zum 2. Statusseminar in Wuppertal am 4./5.02.1997, S. 345-358
- Hoffmann, M.: Trockene Fermentation – Neue Konzepte –. In: Medenbach M.C. (Hrsg.): Erneuerbare Energie in der Land(wirt)schaft 2000. Verlag für land(wirt)schaftliche Publikationen, Zeven, 2000, S. 160-162
- Houssin: Bioabfallvergärung mit dem VALORGA-Verfahren in Tilburg/NL. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 221-229
- Janke, H.D.: Umweltbiotechnik. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 2002
- Jewell, W.J.: Energy from cornstalks – local crop residues as a substitute for imported oil. In: Cornell Engineering Quarterly 17, 1982, S. 27-34
- Jewell, W.J.; Cummings, R.J.; Richards, B.K.: Methane fermentation of energy crops: Maximum conversion kinetics and in situ biogas purification. In: Biomass and Bioenergy 5, 1993, S. 261-278
- Jewell, W.J.; Dell'orto, S.; Fanfoni, K.; Fast, S.J.; Gotting, E.J.; Jackson, D.A.; Kabrick, R.M.: Agricultural and high strength wastes. In: Hughes, D.E.; Stafford, D.A.; Wheatley, B.I.; Baader, W.; Lettinga, G.; Nyns, E.J.; Verstraete, W.; Wentworth, R.L. (Hrsg.): Anaerobic digestion 1981 (Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion, held in Travemünde, Germany, 6.-11. September, 1981), Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, New York, Oxford, 1982, S. 151-168
- Jungbluth, T.; Büscher, W.; Krause, M.: Technik Tierhaltung – Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, 2005
- Kabbe, G.: Gezielte Infiltration von Wasser in einen Deponiekörper zur Reduzierung des Emissionspotentials. Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Materialien Nr. 54, Essen, 1999
- Kaendler, C.; Niewel, A.: Die Kombination von anaerober Vergärung mit aerober Rotte ist machbar. In: Kommunale Entsorgung, Jg. 1999, S. 16-18
- Kaiser, F.; Diepolder, M.; Eder, J.; Hartmann, S.; Prestele, H.; Gerlach, R.; Ziehfrend, G.; Gronauer, A.: Biogas yields from various renewable raw materials. In: Landtechnik 59, 4/2004 (englische Version), S. 224-225
- Kaiser, F.; Aschmann, V.; Effenberger, M.; Gronauer, A.: Dry fermentation of agricultural substrates. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers ASABE (Hrsg.): Ninth international animal, agricultural and food processing wastes. Tagungsband Symposium in Research Triangle Park, North Carolina/USA am 12.-15.10.2003, S. 325-332
- Kalia, A.K.; Singh, S.P.: Effect of Mixing Digested Slurry on the Rate of Biogas Production from Dairy Manure in Batch Fermenter. In: Energy Sources 23, 2001, S. 711-715
- Kalia, A.K.; Singh, S.P.: Horse dung as a partial substitute for cattle dung for operating family-size biogas plants in a hilly region. In: Bioresource Technology 64, 1998, S. 63-66
- Kaltenbrunner, W.: Biologische in-situ-Sanierung mit Hilfe des Bio-Puster-Verfahrens am Fallbeispiel Feldbach. Diplomarbeit am Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik der Montanuniversität Leoben, Österreich, 1999
- Kaltschmitt, M.; Vogel, A.: Stand und Perspektiven der Energiegewinnung aus Biomasse – Welchen Optionen gehört die Zukunft? –. In: Fricke, K.; Kosak, G.; Wallmann, R.; Fischer, J.; Vogtmann, H. (Hrsg.): EEG und Emissionshandel – Neue Chancen für Biomassenutzung und Abfallwirtschaft. Tagungsband zum 65. Informationsgespräch des ANS in Braunschweig am 06./07.12.2004, S. 51-67
- Kaltschmitt, M.; Merten, D.: Biogas als regenerative Energie im Energiesystem. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven. Tagung in Hannover 19./20.06.2001, VDI-Berichte Nr. 1620, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001, S. 1-18
- Kausch, J. (Fa. Kausch Consult, Stuttgart): persönliche Mitteilungen, 2005
- Kausch, J.; Fischer, K.: Vergärung von Silage in befahrbaren Boxenfermentern. In: Landtechnik 61, 1/2006, S. 28-29
- Kausch, J.; Kreidl, A.; Fischer, K.: Vergärung stapelbarer Biomasse in Feststofffermentern. In: Wasser und Abfall 7, 12/2005, S. 43-46
- Kayhanian, M.; Tchobanoglous, G.: Innovative two-stage process for the recovery of energy and compost from the organic fraction of municipal solid waste (MSW). In: Water Science & Technology 27, 2/1993, S. 133-143
- Kayhanian, M.; Tchobanoglous, G.; Mata-Alvarez, J.: Development of a mathematical model for the simulation of the biodegradation of organic substrates in a high-solids anaerobic digestion process. In: J. Chem. Tech. Biotechnol. 66, 1996, S. 312-322
- Kern, M.; Müller, C.; Wiemer, K.: Vergleichende Darstellung und Bewertung von Vergärungsverfahren. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 27-47

- Kloss, R.: Planung von Biogasanlagen. R. Oldenbourg Verlag, München, 1986
- Komilis, D.P.; Ham, R.K.; Stegmann, R. (1999a): The effect of landfill design and operation practices on waste degradation behavior: a review. In: Waste Management & Research 17, 1999, S. 20-26
- Komilis, D.P.; Ham, R.K.; Stegmann, R. (1999b): The effect of municipal solid waste pretreatment on landfill behavior: a literature review. In: Waste Management & Research 17, 1999, S. 10-19
- Kompogas (Fa.): Selbstdarstellung der Firma Kompogas, URL www.kompogas.ch, Datum des Zugriffs: 27.02.2004
- Korz, D.J.; Frick, B.: Verfahrenskonzepte zur Bioabfall-Behandlung. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 159-175
- Köttner, M.: Dry Fermentation – A new method for biological treatment in ecological sanitation systems (ECOSAN) for biogas and fertilizer production from stackable biomass suitable for semiarid climates. Materialien zur CEMSA-Konferenz, Johannesburg/Südafrika, 2002 (pdf-Datei zu finden auf der Homepage der GTZ unter www.gtz.de, Datum des Zugriffs: 11.07.03)
- Kraft, E. (Bauhaus-Universität Weimar): Angaben im Vortrag, in der Diskussion zum Vortrag und im persönlichen Gespräch anlässlich des „Fachgesprächs Trockenfermentation“ bei der FNR in Gülzow am 15.02.2006
- Kraft, E.; Haupt, T.; Tscherpel, B.: Ergebnisse zum Einfluss physikalischer Feststoffparameter auf die Trockenfermentation von nachwachsenden Rohstoffen. In: FNR (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006, S. 80-94
- Kranert, M.: Freisetzung und Nutzung von thermischer Energie bei der Schlammkompostierung. Stuttgarter Berichte zur Abfallwirtschaft, Band 33, Erich Schmidt Verlag, Bielefeld, 1989
- Kranert, M.; Sihler, A.: Vergärung von Bioabfällen in landwirtschaftlichen Co-Vergärungsanlagen – technische Anforderungen, Probleme und Chancen. In: Bilitewski, B.; Werner, P.; Rettenberger, G.; Stegmann, R.; Faulstich, M. (Hrsg.): 4. Fortschrittsbericht Anaerobe biologische Abfallbehandlung – Neue Entwicklungen. Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden, Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 32, 2004, S. 164-172
- Kruse, K.: Ammonium-Elimination durch Strippung und MAP-Fällung als Alternative zur Nitrifikation. In: Kayser, R.; Albers, H. (Hrsg.): Behandlung von Sickerwässern aus Abfalldponien. Zentrum für Abfallforschung der TU Braunschweig, Heft 3, 1988
- Kruse, K.: Langfristiges Emissionsgeschehen von Siedlungsabfalldponien. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der TU Braunschweig, Heft 54, 1994
- Kübler (Betreiber Bioferm-Anlage, 91126 Kammerstein/Rudelsdorf): persönliche Mitteilung anlässlich der Besichtigung der Anlage am 12.05.2006
- Kugeler, R.: Das Kompogas-Verfahren in Zürich. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 199-210
- Kusch, S.: Biogas production with agricultural substrates in simple solid-phase batch digestion systems. In: MTT (Hrsg.): Dry fermentation on-farm. Tagungsmappe zum Fachseminar veranstaltet von MTT Agricultural Engineering Research in Vihti, Finnland, am 14.02.2005
- Kusch, S.: Grasgrüne Energie vom Landwirt. In: UmweltMagazin, 3/2006, S. 48-49
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2004a): Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in Feststofffermentern. In: FNR (Hrsg.): Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004, S. 105-113
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2004b): Feststoffvergärung in Batchreaktoren – erste Versuchsergebnisse. In: IBBK (Hrsg.): Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft. Tagungsband zur 13. Jahrestagung in Wolpertshausen am 2.-4.12.2004, S. 115-124
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2005a): Feststofffermentation spezieller Biomassen – Zwischenbericht 2005 – 2. Zwischenbericht zum Forschungsprojekt 740216 der Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim unter Projekträgerschaft des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg, Stuttgart, 2005 (unveröffentlicht)
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2005b): Feststoffvergärung im Batchverfahren – erste Versuchsergebnisse. In: ALB Baden-Württemberg (Hrsg.): Tagungsband zur Fachtagung „Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen 2005“ in Stuttgart-Hohenheim am 17./18.02.2005, S. 61-70
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2005c): Feststofffermentation landwirtschaftlicher Substrate im Batch-Betrieb. In: KTBL (Hrsg.): 7. Tagung: Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2005. Tagungsband zur Fachtagung in Braunschweig am 01.-03.03.2005, S. 361-366
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2005d): Trockenfermentation – Überblick. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): Biogas – Energieträger der Zukunft. VDI-Berichte 1872, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005, S. 165-180
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2005e): Vergärung landwirtschaftlicher Feststoffe in berieselten Boxenfermentern. In: Akademie für Natur- und Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.): Biogas – alte und neue Chancen für Land(wirt)schaft und Kommunen. Tagungsmappe zur Tagung im Haus der Wirtschaft Stuttgart am 19.10.2005

- Kusch, S.; Oechsner, H. (2006a): Neues von der Trockenfermentation. In: Akademie Ländlicher Raum Baden-Württemberg (Hrsg.): Bioenergienutzung in Baden-Württemberg – Auf dem Weg zum nachhaltigen Ausbau. Tagungsmappe zur Tagung im Haus der Wirtschaft Stuttgart am 13.02.2006
- Kusch, S.; Oechsner, H. (2006b): Biogas production with agricultural substrates in batch-operated solid-phase digestion systems. In: VDI-Max-Eyth-Gesellschaft (Hrsg.): World Congress Agricultural Engineering for a Better World (Bonn, 03.-07.09.2006). Tagungsband (Kongress CIGR, EurAgEng, VDI-MEG, FAO), VDI-Berichte Nr. 1958, VDI Verlag Düsseldorf, 2006, S. 741-742 + Langfassung auf CD-Rom, paper EN 239 A
- Kusch, S.; Morar, M.V.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2005a): Research on the production of biogas in solid-phase digestion systems using agricultural substrates. In: University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine, Cluj-Napoca, Romania, Buletinul USAMV-CN 61/2005, ISSN 1454-2382, S. 289-294
- Kusch, S.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2005b): Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in diskontinuierlichen Feststofffermentern. In: Agrartechnische Forschung 11, 4/2005, S. 81-91
- Kusch, S.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2005c): Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in diskontinuierlichen Feststofffermentern. In: Landtechnik 60, 4/2005, S. 214-215 sowie: Digestion of Agricultural Substrates in Discontinuous Solid-phase Fermentation Systems. In: Landtechnik – englische Ausgabe 4/2005, S. 214-215
- Kusch, S.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2005d): Biogas production in discontinuously operated solid-phase digestion systems. In: FAO, JTI, FAL (Hrsg.): The future of biogas for sustainable energy production in Europe. Tagungsband 7th (8th) FAO/SREN-Workshop in Uppsala, Schweden, am 30.11.-2.12.2005
- Kusch, S.; Heinrich, M.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2006a): Verfahrensführung bei der Feststoffvergärung in berieselten Boxenfermentern mit Batch-Betrieb. In: Wasser und Abfall 8, 6/2006, S. 18-21
- Kusch, S.; Kranert, M.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2006b): Aufkonzentrierung des Prozesswassers bei der Feststoffvergärung in Boxenfermentern. In: KA – Abwasser, Abfall 53, 8/2006, S. 804-811
- Kusch, S.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2006c): Ausgewählte Ergebnisse zur Vergärung von Feststoffen in berieselten Boxenfermentern mit Batch-Betrieb. In: FNR (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006, S. 59-79
- Kusch, S.; Oechsner, H.; Jungbluth, T. (2007): Biogas production with horse dung in solid-phase digestion systems. In: Bioresource Technology, 2007, doi: 10.1016/j.biortech.2007.02.008, in press, available online 26 March 2007
- LAGA: Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen Untersuchungen in Zusammenhang mit der Beseitigung von Abfällen. -PN 2/78 K- Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen. In: Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Heft 9, 1985
- Lange, S.: Praktische Trockenfermentation auf der Kompostanlage Moosdorf/ Firma Bioferm. Materialien zur Tagung „Biogas – Mobilisierung der Energiereserve aus der Landwirtschaft“ in Schwäbisch Hall am 1./2.12.2000, S. 63-65
- Ledakowicz, S.; Kaczorek, K.: Laboratory simulation of anaerobic digestion of municipal solid waste. In: Journal of Environmental Science and Health, Band A39, 4/2004, S. 859-871
- Leikam, K.; Stegmann, R.; Arndt, M.; Bade, O.: Konzepte für die anaerobe Feststoff-Fermentation – Mehrkammer ATF-Verfahren. In: Tagungsband Technik anaerober Prozesse, Tagung an der TU Hamburg-Harburg am 7.-9.10.1998, S. 231-244
- Lemmer, A.: Kofermentation von Grüngut in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 435, Dissertation, Hohenheim, 2005
- Lemmer, A.; Oechsner, H.: Kofermentation von Gras und Silomais. In: Landtechnik 56, 6/2001, S. 412-413
- Lenkeit, D.; Pfeiffer, W.: Vergärung biogener Abfälle. In: Entsorgungspraxis, 11/1994, S. 21-27
- Linke, B.: Trockenvergärung – Ergebnisse über ein einfaches Satz-Verfahren im kleintechnischen Maßstab. In: Tagungsband „Biogas – Mobilisierung der Energiereserve aus der Landwirtschaft“ in Schwäbisch Hall am 1./2.12.2000, S. 71-79
- Linke, B. (Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim): Angaben im Vortrag und in der Diskussion zum Vortrag anlässlich des „Fachgesprächs Trockenfermentation“ bei der FNR in Gülzow am 15.02.2006
- Linke, B.; Schelle, H.: Biogaserzeugung durch Nass- und Trockenfermentation. Tagungsunterlagen zum 13. Energieseminar Prignitz „Mit Biogas vom Landwirt zum Energiewirt“ in Neustadt/Dosse am 26.10.2001
- Linke, B.; Heiermann, M.; Mumme, J.: Ergebnisse aus den wissenschaftlichen Begleitungen der Pilotanlagen Pirow und Clausnitz. In: FNR (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006, S. 112-130
- Linke, B.; Miersch, S.; Gegner, M.: Trockenvergärung im Siloschlauch. In: Fachverband Biogas (Hrsg.): Materialien zur 11. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas in Borken bei Kassel am 29.-31.01.2002, S. 70-80
- Linke, B.; Schelle, H.; Fuchs, H.; Knuth, U.; Laufeld, E.; Philipp, K.; Hager, R.: Stabilisierung halbfeuchter Reststoffe. Institut für Agrartechnik Bornim (ATB), Forschungsberichte des ATB 1998/6, Potsdam-Bornim, 1998
- Liu, K.-X.; Sun, G.-C.; Wu, X.-Q.; Wu, Y.-Z.: Research and Application of Technology for Dry-Wet Biogas Fermentation. In: Biological Wastes 20, 1987, S. 303-308

- Llabrés-Luengo, P.; Mata-Alvarez, J.: The hydrolytic step in a dry digestion system. In: Biological Wastes 23, 1988, S. 25-37
- Loock, R.: Von der Trockenfermentation zur Trocken-Nass-Simultan-Vergärung von Biomasse. In: IBBK (Hrsg.): Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft. Tagungsband 11. Jahrestagung des IBBK in Rot am See am 05./06.12.2002, S. 64-74
- Lutz, P. (2003a): Die Trockenfermentation – Ein neuartiges Verfahren zur Grüngutverwertung. In: IBBK (Hrsg.): Biogas International 2003 – Anaerobe Vergärung von organischen Reststoffen und Energiepflanzen. Tagungsband zur Fachtagung in Augsburg am 27.06.2003, S. 61-66
- Lutz, P. (2003b; Fa. Bekon): persönliche Mitteilung in München am 23.06.2003
- Lutz, P.: Das Bekon-Trockenfermentationsverfahren zur Biogaserzeugung aus Biomasse. Informationsschrift der Firma Bekon, URL www.bekon-energy.de/downloads2.htm, Datum des Zugriffs: 21.11.2006
- Mähnert, P.; Heiermann, M.; Plöchl, M.; Schelle, H.; Linke, B.: Verwertungsalternativen für Grünlandbestände. In: Landtechnik 57, 5/2002, S. 260-261
- Martin, D.J.: Mass transfer limitations in solid-state digestion. In: Biotechnol. Letters 21, 1999, S. 809-814
- Martin, D.J.; Potts, L.G.A.; Heslop, V.A.: Reaction mechanisms in solid-state anaerobic digestion: I. The reaction front hypothesis. In: Process Safety and Environmental Protection 81, 2003, S. 171-179
- Mata-Alvarez, J.; Macé, S.; Llabrés, P.: Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. In: Bioresource Technology 74, 2000, S. 3-16
- Mata-Alvarez, J.; Martinez-Viturtia, A.: Laboratory simulation of municipal solid waste fermentation with leachate recycle. In: J. Chem. Technol. Biotechnol. 36, 1986, S. 547-556
- Maurer, M.; Winkler, J.-P.: Biogas: theoretische Grundlagen, Bau und Betrieb von Anlagen. 2. Auflage, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, 1982
- Mehta, R.; Barlaz, M.A.; Yazdani, R.; Augenstein, D.; Bryars, M.; Sinderson, L.: Refuse decomposition in the presence and absence of leachate recirculation. In: J. Envir. Engrg. 128, 2002, S. 228-236
- Meier, U.; Egger, K.: Vergärung von Grünabfällen. In: Energy and Agriculture. Tagungsband 19. Konferenz CIGR IV, Stuttgart-Hohenheim am 25.-28.09.1995, paper 22
- Membrez, Y.: Installation-pilote de biogaz en discontinu chez M. Pierre Chabloz-1132 Lully – Campagne de suivi des performances 1998-2000. Bericht verfasst für das Département de la sécurité et de l'environnement, Canton de Vaud, Lausanne, Schweiz, 2000
- Membrez, Y. (2002a): Anaerobe Batch-Vergärung von städtischem und landwirtschaftlichem Trockenabfall. In: IBBK (Hrsg.): Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft. Tagungsband 11. Jahrestagung des IBBK in Rot am See am 05./06.12.2002, S. 75-80
- Membrez, Y. (2002b): Batch anaerobic digestion of agricultural and municipal solid wastes. *Quelle unbekannt, verfasst wahrscheinlich 2002*
- Membrez, Y. (2002c): Fermentation industrieller und häuslicher Abfälle. *Quelle unbekannt, verfasst wahrscheinlich 2002*
- Mennerich, A.: Beitrag zur anaerob-aeroben Behandlung von Sickerwässern aus Hausmülldeponien. Institut für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Braunschweig, Heft 44, 1988
- Metzler, A.; Pesaro, F.: Human-, tier- und pflanzenpathogene Keime in der Feststoffvergärung. Jahresbericht 1992 zum Auftrag EF-REN (91) 043 des Schweizer Bundesamtes für Energiewirtschaft (Bern), Veterinärmedizinische Fakultät der Universität Zürich, 1992
- Meynell, P.-J.: Biogasanlagen: Die Gewinnung von Methan. Udo Pfriemer Verlag, München, 1980
- Molnar, L.; Bartha, I.: Solid-state methane generation. In: Mircen Journal 4, 1988, S. 481-490
- Morar, M.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur anaeroben Behandlung von Brennereschlempe. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 405, Dissertation, Hohenheim, 2003
- Mukengele, M. (Landesanstalt für Landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen Universität Hohenheim): persönliche Mitteilung 2005
- Mukengele, M.; Oechsner, H.: Einfluss der Silierung auf den spezifischen Methanertrag bei Mais. In: Landtechnik 62, 1/2007, S. 20-21
- Mumme, J.; Linke, B. (Leibniz-Institut für Agrartechnik Bornim): persönliche Gesprächsmittelungen am ATB Potsdam am 15.02.2006
- N.N.: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich vom 21. Juni 2004. Bundesgesetzblatt Jg. 2004, Teil I, Nr. 40, S. 1918ff
- N.N.: Großtechnische Entwicklung von Verfahren zur einstufigen anaeroben Fermentation von Bioabfällen bei hohen Feststoffgehalten. Beschreibung zu finden auf der Homepage der TU Hamburg-Harburg, URL www.tu-harburg.de, Datum des Zugriffs: 08.07.2003
- Neumann, U.; Schwarting, N.: Biogas aus organischen Abfällen. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 189-197
- Neumüller, O.-A.: Römpps Chemie-Lexikon. Band 1-6, 7. Auflage, Franckh'sche Verlagshandlung, W. Keller & Co., Stuttgart, 1974/1976

- O'Keefe, D.M.; Chynoweth, D.P.: Influence of phase separation, leachate recycle and aeration on treatment of municipal solid waste in simulated landfill cells. In: *Bioresource Technology* 72, 2000, S. 55-66
- O'Keefe, D.M.; Chynoweth, D.P.; Barkdoll, A.W.; Nordstedt, R.A.; Owens, J.M.; Sifontes, J.: Sequential batch anaerobic composting of municipal solid waste (MSW) and yard waste. In: *Water Science & Technology* 27, 2/1993, S. 77-86
- Oechsner, H.; Helffrich, D.: Technische Anforderungen an landwirtschaftliche Biogasanlagen bei der Vergärung Nachwachsender Rohstoffe. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): *Biogas – Energieträger der Zukunft*. VDI-Berichte 1872, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005, S. 95-101
- Oechsner, H.; Lemmer, A.: Gras ist nicht gleich Gras beim Einsatz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. In: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.): *Biogas – eine Bioenergie mit Zukunft*. Tagungsband 9. Thüringer Bioenergetag am 30.09.2003 in Jena, Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, Heft 6, 2003, S. 45-51
- Oechsner, H.; Lemmer, A.; Neuberg, C.: Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. In: *Landtechnik* 58, 3/2003, S. 146-147
- Oesterschlink, B.: Biogas aus organischen Siedlungsabfällen – Betriebserfahrungen der Anlage in Bottrop. In: VDI-Gesellschaft Energietechnik (Hrsg.): *Biogas als regenerative Energie: Stand und Perspektiven*. Tagung in Hannover am 19./20.06.2001, VDI-Berichte 1620, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001, S. 107-114
- OWS (Fa.): OWS – Organic Waste Systems. Informationsschrift der Firma OWS N.V., URL www.ows.be, Datum des Zugriffs: 02.03.2004
- Pavan, P.; Battistoni, P.; Cecchi, F.; Mata-Alvarez, J.: Two-phase anaerobic digestion of source sorted OFMSW (organic fraction of municipal solid waste): performance and kinetic study. In: *Water Science & Technology* 41, 3/2000, S. 111-118
- Philipp, W.; Böhm, R.: Hygieneanforderungen an Verfahren der Bioabfallvergärung. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): *Bio- und Restabfallbehandlung I*. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie, Witzenhausen, 1997, S. 313-344
- Poggi-Varaldo, H.M.; Rodriguez-Vazquez, R.; Fernandez-Villagomez, G.; Esparza-Garcia, F.: Inhibition of mesophilic solid-substrate anaerobic digestion by ammonia nitrogen. In: *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 47, 1997, S. 284-291
- Prechtl, S.; Anzer, T.; Schneider, R.; Faulstich, M.; Rühl, O.; Kausch, U.: Energetische Optimierung von biologischen Abfallbehandlungsanlagen. In: Bilitewski, B.; Werner, P.; Rettenberger, G.; Stegmann, R.; Faulstich, M. (Hrsg.): *4. Fortschrittsbericht Anaerobe biologische Abfallbehandlung – Neue Entwicklungen*. Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden, Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 32, 2004, S. 109-120
- Pullammanappallil, P.; Clarke, W.; Rudolph, V.; Chynoweth, D.; Chugh, S.; Nopharatana, A.; Lai, T.; Nair, S.; Hegde, G.: High-solids, leach-bed anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. In: *Proceedings ADSW Conference 2005*, vol. 1, S. 519-526
- Radwan, A.M.; Sebak, H.A.; Mitry, N.R.; El-Zanati, E.A.; Hamad, M.A.: Dry anaerobic fermentation of agricultural residues. In: *Biomass and Bioenergy* 5, 1993, S. 495-499
- Ramke, H.-G.: Hydraulische Beurteilung und Dimensionierung der Basisentwässerung von Deponien fester Siedlungsabfälle. Mitteilungen des Leichtweiss-Instituts für Wasserbau, TU Braunschweig, Heft 114, 1991
- Raynal, J.; Delgenès, J.P.; Moletta, R.: Two-phase anaerobic digestion of solid wastes by a multiple liquefaction reactors process. In: *Bioresource Technology* 65, 1998, S. 97-103
- RBS Genius (Fa.): F+E-Vorhaben Energie aus Biomasse durch Vergärung – Schlussbericht (hier: Entwurf des Schlussberichts, Stand 13.03.2005). RBS Genius GmbH, EnBW Energie Baden-Württemberg AG (Forschung, Entwicklung & Demonstration), Ettlingen, 2005
- Rehm, H.-J.: Einführung in die industrielle Mikrobiologie. Springer-Verlag, Berlin, 1971
- Rettenberger, G.: Biologische Behandlung mit der Perkolations-technik am Beispiel der Anlage des ZAK. In: Bilitewski, B.; Werner, P.; Rettenberger, G.; Stegmann, R.; Faulstich, M. (Hrsg.): *4. Fortschrittsbericht Anaerobe biologische Abfallbehandlung – Neue Entwicklungen*. Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden, Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Band 32, 2004, S. 33-41
- Rettenberger, G.; Metzger, H.: Der Deponiegashaushalt in Altablagerungen. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Materialien zur Altlastenbearbeitung, Band 10, Karlsruhe, 1992
- Rettich, S.: Biogas aus Hausmüll. In: Mach, R.E.; Blickwedel, P.T. (Hrsg.): *Biogas aus Abfall und Abwasser*. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 11, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1983, S. 177-210
- Reuss, M.: Bioreaktionstechnik. Skriptum (und Mitschriften) zur Vorlesung, Universität Stuttgart, Institut für Bioverfahrenstechnik, Stand 1999
- Reuss, M.: Einführung in die Bioverfahrenstechnik. Skriptum (und Mitschriften) zur Vorlesung, Universität Stuttgart, Institut für Bioverfahrenstechnik, Stand 1998
- Richards, B.K.; Cummings, R.J.; Jewell, W.J.; Herndon, F.G.: High solids anaerobic methane fermentation of sorghum and cellulose. In: *Biomass and Bioenergy* 1, 1991, S. 47-53

- Rubarth, W.: Vergärung von Bioabfall nach dem Waasa-Verfahren. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 113-127
- Rüprich, W.: Verfahrenssysteme zur Faulung tierischer Exkremente und pflanzlicher Abfallstoffe der Landwirtschaft. In: Stadlbauer, E.A.; Sixt, H.; Konstadt, H.G.; Franzius, V.; Gosch, A.; Haferkamp, H.; Hees, N.; Ladenburger, E.; Rüprich, W.; Seufert, H.: Biogasanlagen. Kontakt & Studium, Band 103, expert verlag, Grafenau/Württ., 1982, S. 117-131
- Sahm, H.: Mikrobiologische Vorgänge bei der Biogask Gewinnung. In: Mach, R.E.; Blickwedel, P.T. (Hrsg.): Biogas aus Abfall und Abwasser. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 11, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1983, S. 5-18
- Santen, H.; Seifermann, T.: Untersuchungen zur Vorbehandlung von Abfällen vor der Vergärung mittels Perkolation nach dem ISKA®-Verfahren. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Bio- und Restabfallbehandlung VII. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie, Witzenhausen, 2003
- Schäfer, W.; Evers, L.; Lehto, M.; Sorvala, S.; Teye, F.; Granstedt, A. (2005a): Nutrient balance of a two-phase solid manure biogas plant. In: Stenberg, M.; Nilsson, H.; Brynjolfsson, R.; Kapuinen, P.; Morken, J.; Birkmose, T.S. (Hrsg.): Manure – an agronomic and environmental challenge. Tagungsband, NJF Seminar Nr. 372 in Skurup/Schweden, NJF Report 1 (2), 2005, S. 45-48
- Schäfer, W.; Evers, L.; Lehto, M.; Sorvala, S.; Teye, F.; Granstedt, A. (2005b): Two phase continuous digestion of solid manure on-farm: Plant design, mass, energy, and nutrient balance. In: FAO, JTI, FAL (Hrsg.): The future of biogas for sustainable energy production in Europe. Tagungsband 7th (8th) FAO/SREN-Workshop in Uppsala, Schweden, am 30.11.-2.12.2005
- Schäfer, W.; Teye, F.; Evers, L. (2005c): Zweistufige kontinuierliche Festmistvergärung auf dem landwirtschaftlichen Betrieb. In: Landtechnik 60, 6/2005, S. 338-339
- Schiedermeier, L.: Vorstellung der Projektvariante Kompostanlage Moosdorf – BIOFerm GmbH – Biogas aus Trockenfermentation. Informationsschrift der Firma BIOFerm GmbH, Stand: 2000
- Schiedermeier, L.; Schamann, (Fa. Bioferm): persönliche Mitteilung in Waldmünchen am 17.11.2005
- Schlegel, H.-G.: Allgemeine Mikrobiologie. 6. Auflage, Georg Thieme-Verlag, Stuttgart, 1985
- Schön, M.: Verfahren zur Vergärung organischer Rückstände in der Abfallwirtschaft. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, Band 66, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1994
- Schulz, H.: Biogas-Praxis. 1. Auflage, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 1996
- Schüsseler, P.: Ergebnisse der Diskussion und Zusammenfassung (zum Gülzower Fachgespräch zum Thema „Trockenfermentation“ am 4.-5.2.2006). In: FNR (Hrsg.): Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006, S. 131-141
- Schwarz, M.; Fuchs, S.; Hahn, H.H.: Mikrobielle Kolmation und Dekolmation in Bodenfiltern. In: Wasser und Abfall 5, 10/2003, S. 20-23
- Shan, M.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Biogask Gewinnung aus Schaf- und Ziegenkot. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG), Nr. 223, Dissertation, Hohenheim, 1992
- Silvey P.; Pullammanappallil, P.C.; Blackall, L.; Nichols, P.: Microbial ecology of the leach-bed anaerobic digestion of unsorted municipal solid waste. In: Water Science & Technology 41, 3/2000, S. 9-16
- Six, W.; De Baere, L.: Anaerobe compostering: praktijkervaringen met de Dranco installatie van igean. Unterlagen zum Vortrag im Rahmen von «Compostering in Vlaanderen» in Gent am 04.06.1998
- Six, W.; Kaendler, C.: Vergärung von Bioabfall – Das DRANCO-Verfahren in Brecht und Salzburg. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik. Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 211-220
- Steffen, H.: Energieerzeugung aus Trockenfermentation nachwachsender Rohstoffe nach dem 3A-Verfahren – Ein ökologischer Nebenerwerbszweig in der Landwirtschaft. In: IBBK (Hrsg.): Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft. Tagungsband 11. Jahrestagung des IBBK in Rot am See am 05./06.12.2002, S. 81-92
- Stegmann, R.: Die Deponie als Reaktor. In: EntsorgungsPraxis 10, 1990, S. 567-571
- Stegmann, R.; Ehrig, H.-J.: Entstehung von Gas und Sickerwasser in geordneten Deponien – Möglichkeiten der Beeinflussung biologischer Abbauprozesse. In: Müll und Abfall, 2/1980, S. 41-52
- Strell, M.; Götz, G.: Die Biogaserzeugung aus Abfallstoffen mit natürlichem Feuchtigkeitsgehalt. In: Gesundheits-Ingenieur 13/14, 1952, S. 229-232
- Sun, G.-C.; Wu, Y.-Z.; Sha, S.-J.; Liu, K.-X.: Dry Digestion of Crop Wastes: Studies on Dry Anaerobic Digestion with Agricultural Wastes. In: Biological Wastes 20, 1987, S. 291-302
- Suna Erses, A.; Onay, T.T.: Accelerated landfill waste decomposition by external leachate recirculation from an old landfill cell. In: Water Science & Technology 47, 12/2003, S. 215-222
- Ten Brummeler, E.: Full scale experience with the BIOCEL process. In: Water Science & Technology 41, 3/2000, S. 299-304

- Ten Brummeler, E.; Koster, I.W.: Enhancement of dry anaerobic batch digestion of municipal solid waste by an aerobic pretreatment step. In: *Biological Wastes* 31, 1990, S. 199-210
- Ten Brummeler, E.; Koster, I.W.: The effect of several pH control chemicals on the dry batch digestion of the organic fraction of municipal solid waste. In: *Resources, Conservation and Recycling* 3, 1989, S. 19-32
- Termorshuizen, A.J.; Volker, D.; Blok, W.J.; Ten Brummeler, E.; Hartog, B.J.; Janse, J.D.; Knol, W.; Wenneker, M.: Survival of human and plant pathogens during anaerobic mesophilic digestion of vegetable, fruit, and garden waste. In: *European Journal of Soil Biology* 39, 3/2003, S. 165-171
- Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.): *Biogas*. EF-Verlag, Berlin, 1989
- Thrän, D.; Vogel, A.; Weber, M.: Biogene Kraftstoffe in Deutschland, Techniken und Potenziale. In: *Müll und Abfall* 37, 11/2005, S. 552-559
- Tietjen, C.: From Biodung to Biogas – Historical Review of European Experience. In: Jewell, W.J. (Hrsg.): *Energy, Agriculture and Waste Management. Proceedings of the 1975 Cornell Agricultural Waste Management Conference*. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, 1975, S. 247-259
- Tong, X.; Smith, L.H.; McCarty, P.L.: Methane fermentation of selected lignocellulosic material. In: *Bio-mass* 21, 1990, S. 239-255
- Tscherpel, B.: Energetische Verwertung von Biomasse aus der Landwirtschaft nach dem 3A-Verfahren. In: 5. Dialog „Abfallwirtschaft M-V“ (Tagungsband). Tagung am Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft der Universität Rostock am 11.11.2002
- Vavilin, V.A.; Shchelkanov, M.Y.; Rytov, S.V.: Effect of mass transfer on concentration wave propagation during anaerobic digestion of solid waste. In: *Water Research* 36, 2002, S. 2405-2409
- Vavilin, V.A.; Rytov, S.V.; Lokshina, L.Y.; Pavlostathis, S.G.; Barlaz, M.A.: Distributed model of solid waste anaerobic digestion – Effects of leachate recirculation and pH adjustment. In: *Biotechnology and Bioengineering* 81, 2003, S. 66-73
- Weber, B.: Gas- und Wasserhaushalt von Deponien. In: *Abfallwirtschaftsjournal* 5, 1/1993, S. 29-33
- Wechs, F.: Ein Beitrag zur zweistufigen anaeroben Klärschlammstabilisierung. Technische Universität München, *Berichte aus Wassergüte und Gesundheitsingenieurwesen*, Band 53, 1985
- Wehrle Werk AG (Fa.): *Biopercolat® – Mechanisch-biologische Abfallbehandlung für flexible und wirtschaftliche Entsorgungskonzepte*. Informationsschrift der Firma Wehrle Werk AG (Emmendingen), URL www.wehrle-werk.de, Datum des Zugriffs: 22.03.2004
- Weiland, P.: One- and two-step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues. In: *Water Science & Technology* 27, 2/1993, S. 145-151
- Weiland, P.: Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Zukunftsperspektiven. In: *FNR* (Hrsg.): *Trockenfermentation – Evaluierung des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs*. Gülzower Fachgespräche, Band 23, 2004, S. 23-35
- Weiland, P. (2006a): Biomass digestion in agriculture: a successful pathway for the energy production and waste treatment in Germany. In: *Eng. Life Sci.* 6, 2006, S. 302-309
- Weiland, P. (2006b): Stand der Technik bei der Trockenfermentation – Aktuelle Entwicklungen. In: *FNR* (Hrsg.): *Trockenfermentation – Stand der Entwicklungen und weiterer F+E-Bedarf*. Gülzower Fachgespräche, Band 24, 2006, S. 22-38
- Weißgräber, H.; Langhans, G.: Anaerobtechnik zur Behandlung von flüssigen, pastösen oder festen Bioabfällen – Technologie der Linde-KCA-Dresden GmbH –. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): *Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik*. Fachbuchreihe *Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis*, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 147-157
- Weizhong, J.; Kitamura, Y.; Jia, J.; Takeyama, K.: Development of the dry methane fermentation system for livestock manure – experimental study on rotational drum fermentation. Tagungsband, *Proceedings 99th International Conference on Agricultural Engineering*, Peking/China, 1999, S. III-51 bis III-55
- Wellinger, A.; Baserga, U.; Edelmann, W.; Egger, K.; Seiler, B.: *Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*. 2. Auflage, Verlag Wirz, Aarau, 1991
- Westphal, W.: Das AN-Verfahren in Oldenburg. In: Wiemer, K.; Kern, M. (Hrsg.): *Grundlagen und Verfahren der Anaerobtechnik*. Fachbuchreihe *Abfall-Wirtschaft, Neues aus Forschung und Praxis*, Institut für Abfallwirtschaft, Witzenhausen, M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, 1994, S. 129-135
- Wittmaier, M.; Lutz, P.: Praxiserfahrungen mit Bioabfällen aus der Getrenntsammlung. „Trockenfermentation schüttfähiger Biomassen nach dem BEKON-Verfahren“. In: *Müll und Abfall* 37, 2/2005, S. 91-93
- Wobst, (landw. Betrieb): *Selbstdarstellung des landwirtschaftlichen Betriebs*, URL www.oekohofwobst.de, Datum des Zugriffs: 20.01.2005
- Zelter, S.Z.: *Fermentation méthanique en discontinu des déchets agricoles*. Abschlussbericht des Forschungsprojektes, Institut National de la recherche agronomique (I.N.R.A.), Paris, 1978
- Zoetemeyer, R.J.; Arnoldy, P.; Cohen, A.; Boelhouwer, C.: Influence of temperature on the anaerobic acidification of glucose in a mixed culture forming part of a two-stage digestion process. In: *Water Research* 16, 1982, S. 313-321