

Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen in Biogasanlagen

Laboruntersuchungen

Jan Adolph, Jürgen Beck, Michael Mukengele und Thomas Jungbluth

Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, Stuttgart

In einem Gemeinschaftsprojekt der Partner Ing. Friedrich Bauer GmbH aus Kimmelbach, Österreich, der Firma Enersys GmbH, Donaueschingen und den Instituten für Agrartechnik sowie für Umwelt- und Tierhygiene mit Tierklinik (Leiter: Prof. Dr. R. Böhm) der Universität Hohenheim wird ein Verfahren zur Monofermentation von Speiseresten entwickelt. In einem Laborversuch wurden systematische Untersuchungen über einen Zeitraum von 126 Tagen mit zwölf liegenden Laborfermentern mit jeweils 16 l Nettovolumen durchgeführt. Nach einer Einlaufphase zur Adaption der Mikroorganismen an das Substrat wurden in drei Teilerperimenten die Einflüsse von unterschiedlichen Temperaturbereichen (mesophil bei 40 °C und thermophil bei 55 °C) und verschiedenen Raumbelastungen (hoch mit 5,1 kg oTS/m³ Reaktorvolumen (RV) • d und niedrig mit 3,5 kg oTS/m³ RV • d) getestet. Darüberhinaus wurde ein zweistufiges Verfahren mit doppelter Raumbelastung und 10,1 kg oTS/m³ RV • d simuliert. Hydrolyse und Methanisierung liefen hierbei in zwei nacheinandergeschalteten Reaktoren getrennt voneinander ab.

Die eingesetzten Speisereste waren aufgrund ihres hohen Energieinhaltes von durchschnittlich 18,3 MJ ME / kg TS für eine Monofermentation in Biogasanlagen geeignet. Beim Vergleich der unterschiedlichen Temperaturniveaus waren die reaktorspezifischen Methanerträge zunächst gleich hoch mit etwa 2,12 l CH₄/l RV • d. Im letzten Drittel fiel die Leistung der mesophilen Varianten jedoch bis auf 50 % der thermophilen Vergleichsreaktoren. Bei der Variation von Raumbelastung in Wechselwirkung mit dem Temperaturbereich ergab die thermophile Variante mit hoher Raumbelastung die höchsten reaktorspezifischen Methanerträge mit 2,25 l CH₄/l RV • d im Vergleich zu nur 0,86 l CH₄/l RV • d in der mesophilen Variante mit niedriger Raumbelastung. Durch Aufteilung der Faulung in Hydrolyse- und Methanisierungsstufe in der abschließenden zweistufigen Fermentation gelang es, den Prozess weitgehend stabil zu halten.

Schlüsselwörter

Reststoffbehandlung, Speisereste, Monofermentation, Methan

Einleitung und Problemstellung

Aus Einrichtungen der Gemeinschaftsverpflegung wie z. B. Gastronomie, Krankenhäusern, Kantinen, Mensen und Kasernen fallen jedes Jahr in der Bundesrepublik Deutschland etwa zwei Mio. t Speisereste an. Dazu kommen weitere bedeutende Abfallmengen aus der Nah-

rungsmittelindustrie und -vermarktung. Die Entsorgung dieser Stoffe, wie z. B. Brauerei - Nebenprodukte, Reste der Erfrischungsgetränke- und Tierfutterindustrie sowie Abfälle aus der Gelatineproduktion, Faser-, Fleischwaren-, Lederindustrie und Arzneimittelherstellung, ist durch die Bioabfallverordnung - BioAbfV - geregelt [1]. Ordnungsgemäße Beseitigung

nach § 5 Abs. 3 KrW-/AbfG [2] bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Verwertung von Abfällen im Einklang mit anderen öffentlich rechtlichen Vorschriften (z. B. BImSchG, Chemikalienrecht, Gefahrstoffrecht, Bundes-Bodenschutzgesetz) stehen muss. Bisher wurden diese Stoffe durch spezialisierte Entsorgungsbetriebe oder z.T. durch mit speziellen Kochanlagen ausgerüstete Schweinehaltungsbetriebe in den landwirtschaftlichen Nährstoffkreislauf zurückgeführt, indem das unter hohem Energie- und Kostenaufwand aufbereitete und hygienisierte Material überwiegend an Schweine verfüttert wurde. Die neue EU - Verordnung 1774/2002 [3], anzuwenden seit dem 30. April 2003, verbietet die bisherige Verwertung dieser Materialien über die Aufbereitung zu Futtermitteln. Daraus ergibt sich ein Entsorgungsproblem mit hohen Kosten für die ordnungsgemäße Beseitigung des Materials, da gängige Verfahren wie z.B. Kompostierung oder Verbrennung aufgrund hoher Wassergehalte und fehlender Strukturmaterialien wenig geeignet sind [4].

Kenntnisstand

Ein großer Teil der heutigen landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird im mesophilen Temperaturbereich betrieben, wobei das Temperaturoptimum bei etwa 35-40°C mit den stabilsten Betriebsbedingungen zu liegen scheint [5]. Bei der Planung und Realisierung größerer Biogasanlagen mit höheren produzierten Gasmengen und damit auch steigenden Abwärmemengen durch die Kraft-Wärme-Kopplung geht die Tendenz aber zur Errichtung thermophil betriebener Anlagen. Der Vorteil der thermophilen Betriebsweise, vor allem bei der Kofermentation mit energiereichen Substraten wie z. B. Speiseresten, scheint ein besserer Hygienisierungseffekt durch die Abtötungswirkung auf pathogene Keime zu sein [6, 7]. Außerdem kann im thermophilen Betrieb von einem schnelleren

Abbau der zugeführten organischen Substanz aufgrund der Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit durch etwa 10°C Temperaturanstieg bei biologischen Stoffwechselforgängen ausgegangen werden [8]. Ein Nachteil der thermophilen Betriebsweise ist allerdings die niedrigere Prozessstabilität durch höhere Empfindlichkeit gegenüber Temperatur- und Belastungsschwankungen sowie die erhöhte Gefahr einer Ammoniakhemmung, so dass vermehrter Aufwand zur Anlagensteuerung und Prozessüberwachung betrieben werden muss [9]. Bei solchen Anlagen, deren Investitionsvolumen oft mehrere Mio. € beträgt, ist es besonders wichtig, den bereitgestellten Fermenterraum möglichst optimal auszunutzen. Deshalb kommen vermehrt energiereiche und strukturarme Stoffe zum Einsatz, ohne Zusatz landwirtschaftlicher Reststoffe, wie z. B. Rindergülle. Damit fehlt aber auch die Pufferwirkung dieser Stoffe, so dass der Verfahrenstechnik und der Prozesssteuerung besondere Bedeutung zukommt. Bislang gibt es nur wenig Erfahrung zur Monovergärung von Speiseresten [10]. Bisherige Untersuchungen wurden überwiegend nach dem Prinzip der Kofermentation durchgeführt [11,12,13].

Zielsetzung

Ziel der wissenschaftlichen Untersuchungen war die Entwicklung und Erprobung einer geeigneten Verfahrenstechnik zur alleinigen anaeroben Verwertung von

Speiseresten ohne Verwendung landwirtschaftlicher Kosubstrate zur Pufferung. Das aus der Monofermentation erzeugte Methan dient zur Produktion regenerativer Energie über Kraft - Wärme - Kopplung. Um dies zu erreichen, sollte der anaerobe Fermentationsprozess mit den Besonderheiten einer Monofermentation von strukturarmen und energiereichen Substraten verfahrenstechnisch optimiert werden.

Das Hauptziel sollte über folgende Teilziele erreicht werden:

1. Laborversuche zur Monofermentation von Speiseresten
 - Untersuchung von zwei Temperaturbereichen,
 - Überprüfung unterschiedlicher Raumbelastungen,
 - Test eines zweistufigen Verfahrens.
2. Ableitung von Empfehlungen für den Betrieb einer Pilotanlage im Praxismaßstab
3. Begleitende verfahrenstechnische und hygienische Untersuchungen an der Pilotanlage

In diesem ersten Teil von zwei Veröffentlichungen zur Monofermentation von Speiseresten sollen gemäß dem ersten Teilziel die Methodik und die Ergebnisse der Laborversuche dargestellt und diskutiert werden. Im zweiten Teil wird die Pilotanlage vorgestellt und die dort erhobenen Daten und Messwerte präsentiert.

Material und Methode

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeit war die Untersuchung und Optimierung des Gärprozesses in Biogasanlagen mit den Besonderheiten der Monofermentation von Speiseresten. Für diese Fragestellung waren in einer Grundlagenuntersuchung im Biogaslabor des Instituts für Agrartechnik die Eigenschaften des zu vergärenden Substrates zu testen, noch bevor die Praxisanlage in Betrieb genommen wurde. Diese Pilotanlage im großtechnischen Maßstab begleiteten weitere systematische Untersuchungen über einen Zeitraum von sechs Monaten, die zu einer Beurteilung der Verfahrenstechnik führen sollten. Um als vorbereitende Untersuchungen möglichst praxisnahe Bedingungen simulieren zu können, stellten sich im Laborversuch folgende Anforderungen an das Substrat und die Versuchsanlage:

- gleiches Substrat im Vorversuch wie in der geplanten Praxisanlage,
- gleiche Verweilzeit bzw. Raumbelastung,
- identische Temperaturbereiche (mesophil, 40 °C / thermophil, 55 °C).

Für die Laboruntersuchungen standen im Biogaslabor des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim zwölf Laborfermenteranlagen zur Verfügung (Bild 1).

Nach einer Einlaufphase von 29 Tagen wurden drei Teilerperimente mit einer Verweilzeit von jeweils 26 Tagen und dazugehörigen Adaptionphasen durchgeführt.

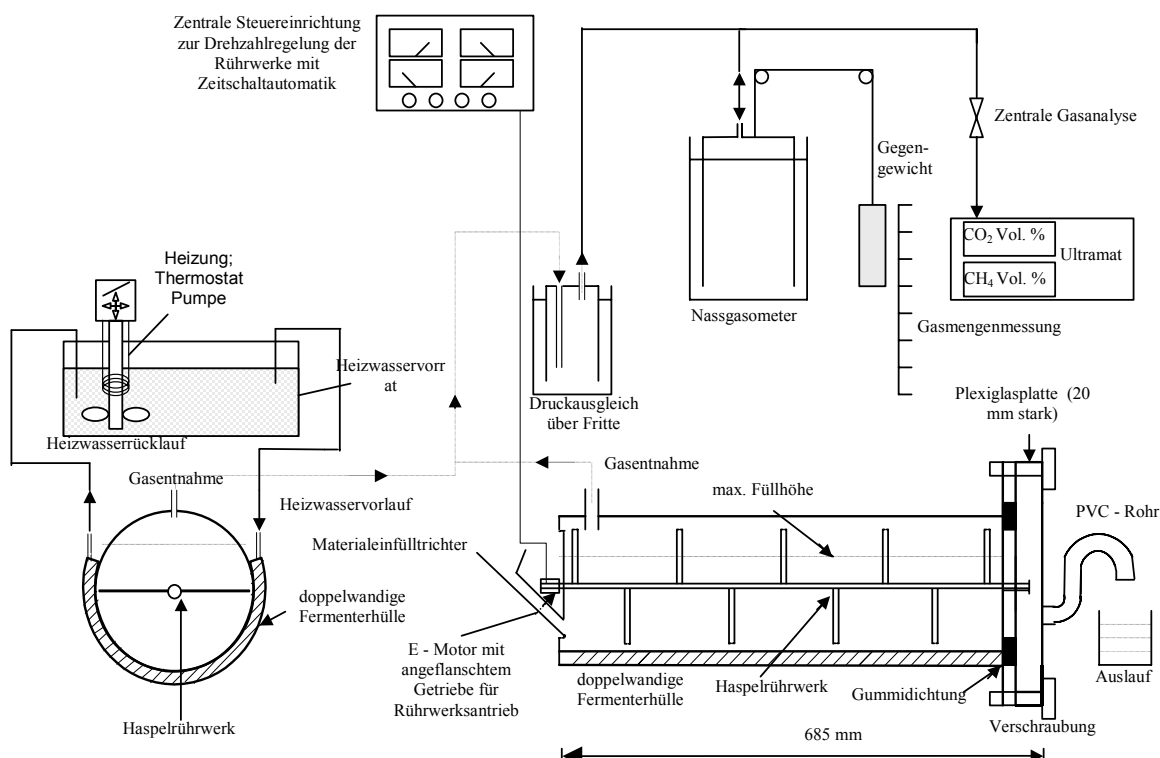


Bild 1: Schema der liegenden Hohenheimer Laborfermenteranlage (16 l Nettovolumen, semikontinuierlicher Durchlaufbetrieb) mit Haspelrührwerk, Nassgasometer als Gasspeicher und Gasanalyse

Fermenter

Die Fermenter bestehen aus jeweils zwei miteinander verschweißten zylindrischen Edelstahlrohren. Im Inneren ergibt sich dadurch ein Faulraum mit einem Gesamtvolumen von 22 Liter. Davon stehen 16 Liter als Nettovolumen zur Substratbefüllung zur Verfügung. Das restliche Volumen bildet den Gasraum, notwendig vor allem dann, wenn schäumende Substrate eingesetzt werden, um eine Verstopfung des Gasaustritts zu verhindern. Zwischen innerem und äußerem Edelstahlzylinder zirkuliert das von einer zentralen Heizvorrichtung erwärmte Wasser, das der Beheizung des Faulraumes dient. Die Befüllung der Anlage mit Gärsubstrat wird über ein verlängertes Rohr mit Einlauftrichter an der Rückseite des Fermenters vorgenommen. Als Auslauf dient ein Rohr, durch das das ausgefaulte Substrat entsprechend der täglich zugeführten Menge drucklos aus dem Behälter austreten kann. Die Vorderseite des Reaktors wird dabei von einer durchsichtigen Plexiglasscheibe abgeschlossen, die es ermöglicht, den Gärprozess im Behälter mit seinen Farbveränderungen und eventueller Sedimentations- oder Schaumbildung zu beobachten.

Rührwerk

Zur Vermischung des Fermenterinhalt befindet sich in der Mitte des Biogasreaktors eine horizontale Edelstahlwelle mit zwölf aufgeschweißten Rührstäben, die rechtwinklig gegeneinander versetzt angeordnet sind. Ein Elektromotor mit 54 W Nennleistung (24 V) treibt das Haspelrührwerk über ein Untersetzungsgetriebe an, wobei durch die zentrale Steuereinheit die Drehzahl von 10 - 100 U/min mit einem Potentiometer angepasst werden konnte. Über eine Zeitschaltvorrichtung bestand die Möglichkeit, beliebige Zeiträume und -intervalle zum Rühren vorzugeben, wobei für diese Versuche ein Rührintervall von 10 min mit einer Rührzeit von 15 s gewählt wurde.

Heizung

Die Beheizung des Faulraumsubstrates erfolgte im Fermenter indirekt über Heißwasser. Mittels eines Heizthermostates mit integrierter kleiner Pumpe zirkulierte das durch eine Heizschlange erwärmte Wasser zwischen innerer und äußerer Behälterwand, so dass der Faulraum über seine gesamte Länge gleichmäßig beheizt wurde. Je nach vorgegebenem Temperaturbereich wurde die Gärsubstrattemperatur über den integrierten Thermostat konstant gehalten. Dies war insbesondere bei

der gegenüber Temperaturschwankungen empfindlichen thermophilen Gärung (55°C) sehr wichtig.

Gasspeicher

Über einen Druckausgleichsbehälter mit Fritte, der im Fermenter für einen konstanten Betriebsdruck sorgte, gelangte das entstehende Biogas in ein Nassgasometer mit Wasservorlage, das der volumetrischen Gasmengenmessung diente und ebenso eine Speicherfunktion erfüllt, um eine repräsentative Gasanalyse auf Methan- und Kohlendioxidgehalt durchführen zu können. Ein Nassgasometer besteht dabei aus einem größeren (ca. 60 cm Durchmesser) und einem kleineren Behälter (ca. 50 cm Durchmesser). Der Größere von beiden ist als Flüssigkeitsbehälter mit Wasser befüllt, der Kleinere befindet sich um 180 ° verdreht innerhalb des Größeren und hat am Deckel einen Anschluss für die zum Fermenter führende Gasleitung (Bild 1). Außerdem ist ein Gegengewicht über einen Seilzug mit einer kalibrierten Skala verbunden, an der die produzierte Gasmenge abgelesen werden konnte. Eine etwa 10 mm dicke Pflanzenölschicht auf der Wasseroberfläche unterbindet hierbei den Gasaustausch mit der Atmosphäre, minimiert die Wasserverdunstung und verhindert die Lösung von Kohlendioxid im Wasser zur Verhinderung verfälschter Messergebnisse bei der Biogasqualität.

Eingesetztes Gärsubstrat

Damit die Laborversuche möglichst praxisnah durchgeführt werden konnten, wurde von der Firma LRG Lebensmittelrecycling GmbH aus Werl, Westfalen das gleiche homogenisierte und hygienisierte Material in einem 600 Liter fassenden Standard -Container angeliefert, wie es auch an der Praxisanlage in Donaueschingen eingesetzt werden sollte. Das Material wurde bei +4°C in der Kühlzelle des Instituts für Agrartechnik in luftdicht verschlossenen Behältern bis zur Verwendung zwischengelagert. Durch eine hohe Zahl an Einzelkunden und ein weites Entsorgungsspektrum (Kleingastronomie – Großverbraucher - Handelsketten), ist die Variation der Inhaltsstoffe gering, so dass dieses Material für die Biogasproduktion gut geeignet scheint (**Tabelle 1**).

Impfsubstrat

Zum Start des Vergärungsprozesses in den Laborbiogasanlagen wurde sowohl für den mesophilen als auch für den thermophilen Versuchsansatz temperiertes Impfsubstrat von zwei sich in Betrieb befindlichen Biogasanlagen nach Hohen-

heim transportiert. Die Reaktoren wurden vollständig mit Impfs substrat befüllt, die Zugabe von Gärsubstrat folgte dann in langsam steigenden Mengen, um den Prozess in der empfindlichen Startphase nicht zu überlasten.

Tabelle 1: Nährstoffgehalte und Energiekonzentrationen der im Laborversuch eingesetzten Speisereste (Weender Analyse)

	im Laborversuch eingesetzte Speisereste	
	Gehalte in der	
	TS (%)	FS (%)
Trockensubstanz	100	14,2
Wasser	0	85,8
Rohasche	8,2	1,2
Rohprotein	22,0	3,1
Rohfett (Meth. B)	24,8	3,5
Rohfaser	3,6	0,5
Stärke	13,7	1,9
Gesamtzucker	5,4	0,8
Umsetzbare Energie (ME)	17,9	2,5
N _{ges.} (g/kg)	43,7	6,2
NH ₄ - N (g/kg)	1,6	0,22

Versuchsplan

Zur Erzielung praxisrelevanter Daten wurde ein Versuchsplan aufgestellt, der es ermöglichte, folgende Parameter einzuhalten (**Tabelle 2**):

- über den Versuchszeitraum gleichmäßige Substratzusammensetzung des Nährstoff- und Energiegehaltes,
- exakte Temperaturführung im mesophilen (40 °C) und thermophilen (55°C) Bereich,
- Raumbelastung: 3,5 und 5,1 kg oTS/m³ Reaktorvolumen • Tag (m³ RV d⁻¹),
- Zweistufige Prozessführung mit Test der Belastungsgrenze und einer Raumbelastung von 10,1 kg oTS m³ RV d⁻¹,
- Prozessstabilisierung und Anpassungsmaßnahmen in den Zwischenphasen.

Phase I - Einlaufphase und Phase II Prozessstabilität

Zu Beginn der 29 Tage dauernden Einlaufphase wurden die Versuchsreaktoren mit Impfmateriale aus zwei Biogasanlagen befüllt, die in dem jeweiligen Temperaturbereich betrieben werden und einen hohen Anteil an Speiseresten im Beschickungsmaterial haben. Es erfolgte eine langsame Steigerung der Beschickungsmengen mit reinen Speiseresten auf bis zu 5,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹, um eine Adaption der Mikroorganismen an das Substrat zu gewährleisten. Für beide

Tabelle 2: Versuchsplan

Phase	Raumbelastung [kg oTS m ⁻³ RV d ⁻¹]	Art der Fermentation	Versuchsdauer [d]	Wiederholungen	Temperaturbereich		Anzahl der Beschickungen pro Tag
					mesophil [40°C]	thermophil [55°C]	
I	steigend	mono einstufig	29	6	•	•	1
II	5,1	mono einstufig	26	6	•	•	1
III	3,5	mono einstufig	26	3	•	•	1
	5,1		26	3			1
IV	10,1	mono einstufig	26	3	•	•	3

Temperaturbereiche wurden je sechs Wiederholungen durchgeführt. Daran anschließend wurde die Prozessstabilität für 26 Tage sowohl im mesophilen als auch im thermophilen Temperaturbereich mit einer konstanten Raumbelastung von 5,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹ überprüft.

Phase III – Variation der Raumbelastung

Nach einer Zwischenphase von vier Tagen zur Stabilisierung der Reaktionsbedingungen im mesophilen Temperaturbereich folgte der nächste Versuchsabschnitt mit 26 Tagen, in dem eine niedrig belastete Variante mit 3,5 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹ und eine hoch belastete mit 5,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹ miteinander verglichen wurden. Jede Variante wurde dreimal wiederholt.

Phase IV – Simulation eines zweistufigen Verfahrens

Für diesen Teil der Laboruntersuchungen wurden jeweils zwei Fermenter mit identischem Fermentervolumen hintereinandergeschaltet. Damit konnte die Auftrennung der Abbaustufen in einen zweistufigen Verfahrensablauf simuliert werden. Im ersten Fermenter erfolgte damit die Hydrolyse, der nachgeschaltete zweite Fermenter methanisierte die zuvor in der Hydrolyse gebildeten Stoffwechselprodukte. Durch die spezielle Versuchsanordnung ergab sich ein Volumenverhältnis Hydrolysestufe zu Methanisierungsstufe von 1:1. Gleichzeitig wurde bei dreimaliger Beschickung pro Tag die Raumbelastung auf 10,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹, bezogen auf das Volumen der Methanisierungsstufe, verdoppelt. Ziel war es, herauszufinden, ob bei diesen extrem hohen Beschickungsraten noch ein störungsfreier Prozessablauf zu gewährleisten ist. Auch für dieses Teilerperiment wurden beide Temperaturbereiche mit jeweils drei Wiederholungen überprüft.

Ergebnisse

Phase I - Einlaufphase und Phase II - Prozessstabilität

Während der Einlaufphase wurden die Beschickungsmengen bis auf die angestrebte Raumbelastung von 5,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹ langsam gesteigert, um den Prozess nicht zu überlasten. Die reaktorspezifischen Methanerträge stiegen in beiden Temperaturbereichen bis auf einen Wert von etwa 2,12 l CH₄/l RV · d (1 CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹) (Bild 2). Die unterschiedlichen Impfsubstrate erforderten unterschiedliche Beschickungsmengen in der Einlaufphase. Daraus ergaben sich die zu Beginn höheren reaktorspezifischen Methanerträge im mesophilen Temperaturbereich. Schon während der Einlaufphase war ein leichtes Absinken der pH-Werte in beiden Tem-

peraturbereichen zu erkennen. Zu Beginn von Phase II, dem Test der Prozessstabilität, lagen die reaktorspezifischen Methanerträge bei beiden Gärtemperaturen im Mittel bei 2,05 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹. Im letzten Drittel war allerdings ein deutliches Abfallen der Methanerträge im mesophilen Temperaturbereich zu erkennen, so dass zum Ende der Phase II nur noch etwa 1,15 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹ erreicht wurden. Bei thermophiler Gärtemperatur blieben die Methanerträge bei durchschnittlich etwa 2,10 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹ konstant. Auch die pH-Werte sanken zum Ende von Phase II ab. Im überwiegenden Teil des Versuchsabschnitts schwankten die pH-Werte in den mesophilen Reaktoren um einen Wert von pH 7,6. Erst im letzten Viertel dieser Phase fielen sie deutlich ab, so dass teilweise sogar pH-Werte unterhalb 7,0 beobachtet werden konnten. Daraus lässt sich ableiten, dass am Ende von Phase II im mesophilen Betrieb keine stabilen Betriebsbedingungen mehr herrschten.

Die in Phase II der Laboruntersuchungen erzielten Abbaugrade als Maß für die Effektivität des Prozesses lagen bei 69,7 % im thermophilen Temperaturbereich und 68,3 % im mesophilen Temperaturbereich (Tabelle 3). Diese annähernd identischen Werte lassen den Schluss zu, dass die biologische Abbaubarkeit der organischen Substanz in dieser Versuchsphase eher von der chemischen und physikalischen Zusammensetzung des Materials abhängt, als von der Gärtemperatur.

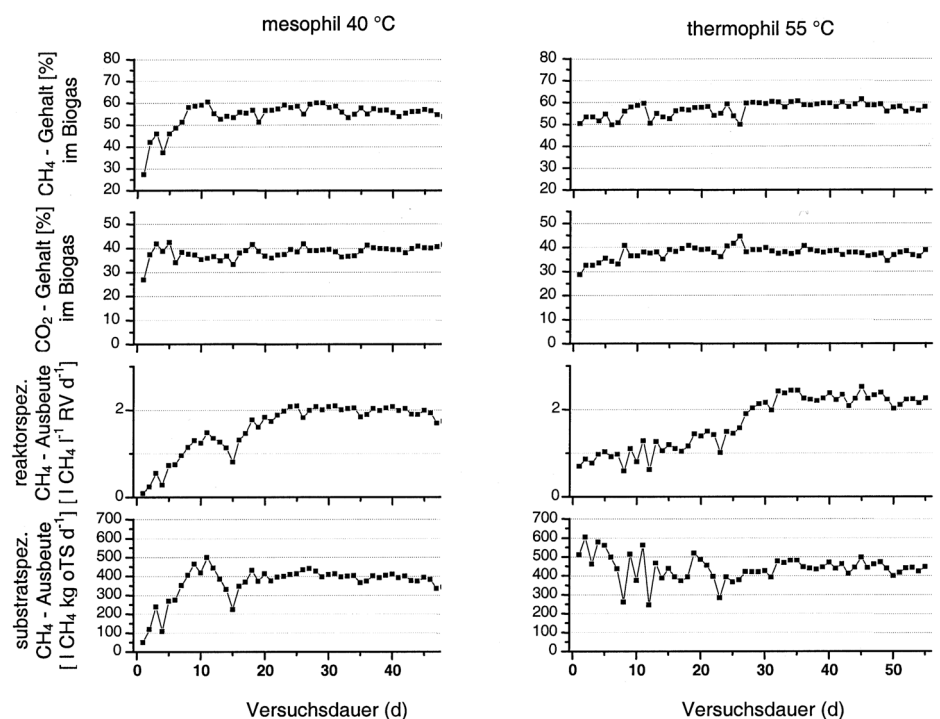


Bild 2: Prozessstabilität bei der Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen - Gasparameter in Abhängigkeit von der Fermentationstemperatur - Einlaufphase + Prozessstabilität (n = 6 Wh.)

Tabelle 3: Abbaugrade bei der Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen im mesophilen und thermophilen Temperaturbereich nach 26 Tagen Verweilzeit

		Abbaugrade in %					
		thermophil (55°C)			mesophil (40 °C)		
Raumbelastung [g oTS l ⁻¹ RV d ⁻¹]	Wh.	3,5	5,1	10,1	3,5	5,1	10,1
Phase II	6	-	69,7	-	-	68,3	-
Phase III	3	71,3	73,1	-	65,6	71,1	-
Phase IV Methanisierungstufe	3	-	-	75,4	-	-	76,7

Phase III - Variation der Raumbelastung

Die pH-Werte im thermophilen Betrieb lagen in Phase III deutlich über denen bei mesophiler Betriebsweise. Im mesophilen Betrieb schwankten die pH-Werte um bis zu einer Einheit, die pH-Werte der höheren Beschickungsvariante lagen durchschnittlich um 0,5 unter denen bei niedrigerer Beschickungsrate. Im Gegensatz zum mesophilen Temperaturbereich war im thermophilen Temperaturbereich kein wesentlicher Unterschied der Beschickungsvarianten festzustellen. Die Höhe der Raumbelastung wirkt sich also im mesophilen stärker aus als im thermophilen Temperaturbereich. Ein Absinken der pH-Werte auf unter 7 in beiden Varianten der Raumbelastung im mesophilen Temperaturbereich lässt auf eine Überlastung des Prozesses schließen. Bei thermophiler Betriebsweise stellte sich bei beiden Raumbelastungen im Bereich von pH 7,2 stabile Prozessbedingungen ein. Die durchschnittlichen reaktorspezifischen Methanerträge lagen für die Variante „hohe Raumbelastung / thermophil“ bei 2,25 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹ und damit fast doppelt so hoch wie die Variante „niedrige Raumbelastung / thermophil“ mit durchschnittlich 1,40 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹. Im mesophilen Temperaturbereich lagen die Methanerträge bei durchschnittlich 0,86 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹, unabhängig von der Raumbelastung, deutlich niedriger (Bild 3). Im Gegensatz zum mesophilen ist der thermophile Prozess wesentlich stabiler, leistungsfähiger und unempfindlicher gegenüber höheren Substratbelastungen und ermöglicht eine erstaunlich hohe Raumbelastung von 5,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹. Bei annähernd gleichem substratspezifischen Methanertrag (y_{CH₄}) lag der reaktorspezifische Methanertrag (r_{CH₄}) bei höherer Raumbelastung um etwa 25 % höher und entsprach dem rechnerischen Wert (r_{CH₄} = y_{CH₄} · B_R).

Die Abbaugrade der oTS in der zweiten Phase waren etwas höher als in der Einlaufphase mit Test der Prozessstabilität. Im mesophilen Temperaturbereich lagen die Werte bei 65,6 % bei 3,5 kg oTS

m⁻³ RV d⁻¹ und 71,1 % bei 5,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹, für den thermophilen Betrieb konnten 71,3 % für 3,5 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹ und 73,1 % bei 5,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹ festgestellt werden (Tabelle 3). Somit ist der Effekt der Raumbelastung auf die Abbaugrade der oTS im mesophilen größer als im thermophilen Betrieb.

Phase IV – Simulation eines zweistufigen Verfahrens

Phase IV des Experimentes diente dazu, herauszufinden, bis zu welcher täglichen Beschickungsmenge der Prozess belastbar ist, wenn er zweistufig angelegt wird. Sowohl im thermophilen als auch im mesophilen Temperaturbereich sanken die pH-Werte in der ersten Stufe des Verfahrens während der 26-tägigen Versuchsdauer erwartungsgemäß auf bis zu pH 5 ab. In der zweiten Stufe hingegen konnten die pH-Werte bis zum Ende der Versuche über der Grenze von pH 7 gehalten wer-

den, die in der Literatur als Untergrenze für einen stabilen Prozess gilt [14]. Nach etwa 14 Tagen Versuchsdauer kam in der ersten Stufe (Hydrolysereaktoren) die Methanisierung auf beiden Temperaturniveaus zum Erliegen. Die reaktorspezifischen Methanerträge lagen auch im zweistufigen Experiment im thermophilen Betrieb mit durchschnittlich 1,78 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹ höher als bei mesophilem Betrieb mit durchschnittlich 1,47 l CH₄ l⁻¹ RV d⁻¹. Die reaktorspezifischen Methanausbeuten stiegen bis zum Versuchsende im thermophilen Betrieb deutlich an, wohingegen die Werte im mesophilen Betrieb lediglich eine relativ schwache Tendenz nach oben zeigten. Generell ist aus den Ergebnissen zu folgern, dass der Prozess trotz zweistufiger Auslegung bei einer Raumbelastung von 10,1 kg oTS m⁻³ RV d⁻¹, bezogen auf die Methanisierungsstufe, nicht mehr in seiner höchsten Effizienz lief, da die Summe der reaktorspezifischen Methanausbeuten in den einstufigen Experimenten höher als im zweistufigen Verfahren lagen. Trotzdem konnte der Prozess aufrechterhalten werden, insbesondere der thermophile Temperaturbereich schien diese hohen Substratmengen besser verarbeiten zu können.

In der letzten Phase des Experimentes wurden im Abstand von vier Tagen Fett säureuntersuchungen zur Kontrolle des Gärverlaufs und der Prozessstabilität durchgeführt. Es zeigte sich, dass in beiden Temperaturbereichen in der ersten

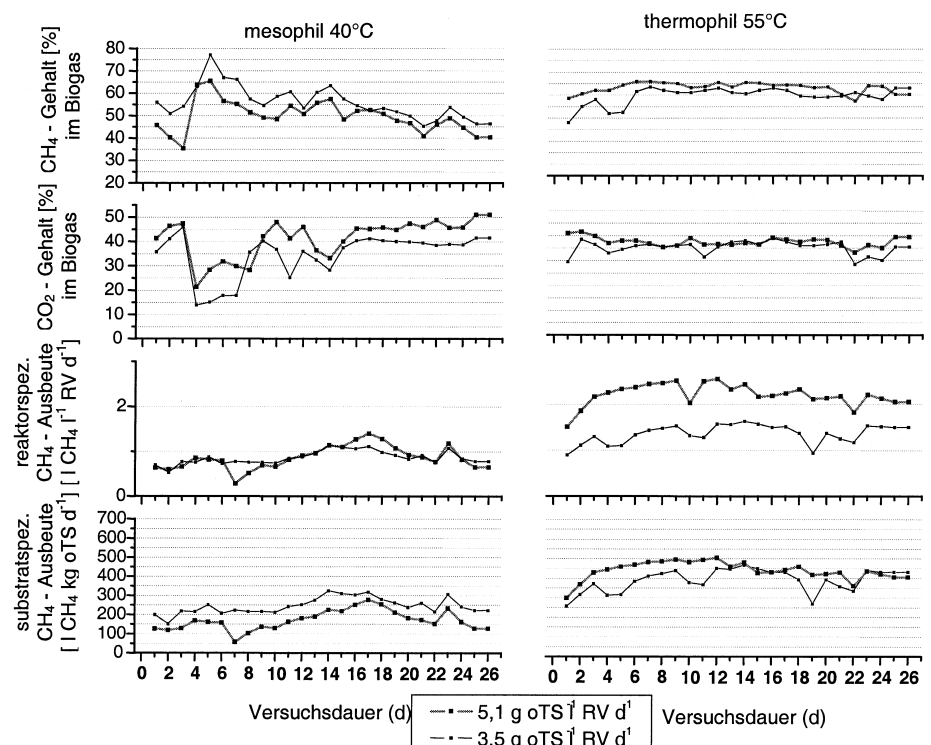


Bild 3: Einfluss der Raumbelastung bei der Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen in Phase III der Laboruntersuchungen auf die Gasparameter in Abhängigkeit von der Fermentationstemperatur (n = 3 Wh.)

Stufe (Hydrolyse) ein rascher Anstieg der Gesamtfettsäuren stattfand (**Bild 4**). Es wurden bis zu 24.000 ppm im mesophilen Betrieb und 25.300 ppm im thermophilen Betrieb am 16. Tag gemessen. Im weiteren Versuchsverlauf gingen diese hohen Werte auf etwa 16.000 ppm in beiden Temperaturbereichen zurück. Die Gasbildung kam durch die Versäuerung, wie zu erwarten, zum Erliegen (**Bild 5**). In der zweiten Reaktorstufe (Methanisierung) konnte in beiden Temperaturbereichen ein langsamer Anstieg der Fettsäuregehalte auf bis zu 10.000 ppm am 24. Versuchstag beobachtet werden. Der Kurvenverlauf lässt vermuten, dass bei gleichbleibend hoher Beschickung mit $10,1 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ RV d}^{-1}$ die Gehalte an Fettsäuren weiter steigen werden. In der Vergärungsstufe ist demnach noch kein stabiler Gleichgewichtszustand erreicht und eine Übersäuerung der Reaktionsmasse kann nicht ausgeschlossen werden. Trotz sinkender pH - Werte lagen die reaktorspezifischen Methanerträge in beiden Temperaturbereichen auf einem hohen Niveau (**Bild 5**), wobei sie im thermophilen Betrieb zum Ende des Versuchsabschnitts bis über $2,5 \text{ l CH}_4 \text{ l}^{-1} \text{ RV d}^{-1}$ anstiegen.

Ausblick

Die Laboruntersuchungen zur Monofermentation von Speiseresten konnten im Juli 2002 mit vielversprechenden Ergebnissen abgeschlossen werden. Es zeigte sich, dass eine alleinige Vergärung von hoch energiereichen Substraten wie Speiseresten in Biogasanlagen prinzipiell möglich ist. Selbst sehr hohe Raumbelastungen mit bis zu $10,1 \text{ kg oTS m}^{-3} \text{ RV d}^{-1}$ in der Methanisierungsstufe konnten mit einem zweistufigen Verfahren stabil gehalten werden, wobei sich der thermophile Betrieb der Anlagen in jedem Fall als leistungsfähiger und unempfindlicher herausgestellt hat. Die so gewonnenen Daten konnten nun für die Planung und den Betrieb einer Pilotanlage mit den Kooperationspartnern des Projektes verwendet werden.

Literatur

Bücher sind mit einem • gekennzeichnet.

- [1] *BioAbfV* (1998): Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden vom 21. September 1998, Bundesgesetzblatt Jg. 1998 S. 2955; 2001 S. 3379; 25.4.2002 S. 1488)

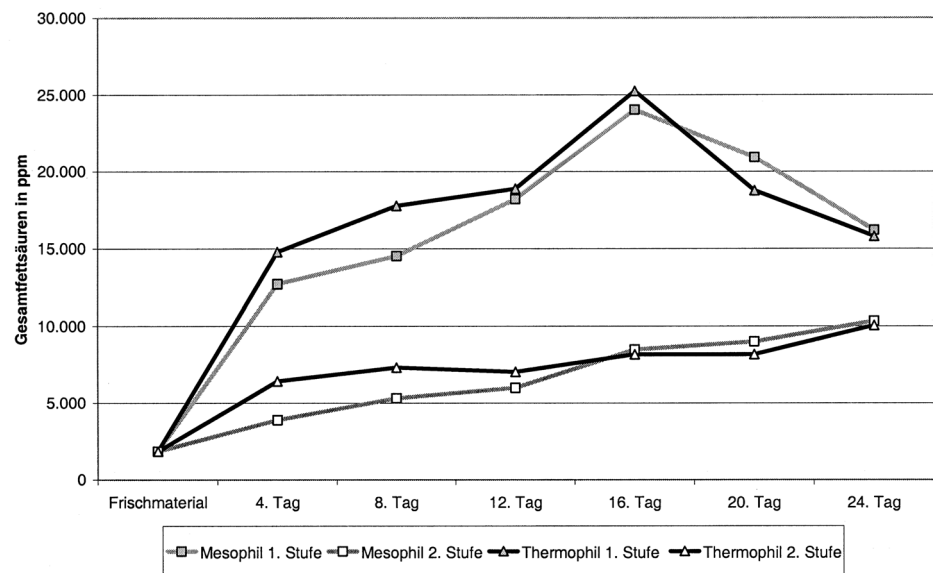


Bild 4: Gesamtfettsäuren bei der zweistufigen Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen mit maximaler Raumbelastung in Phase IV (n = 3 Wh.)

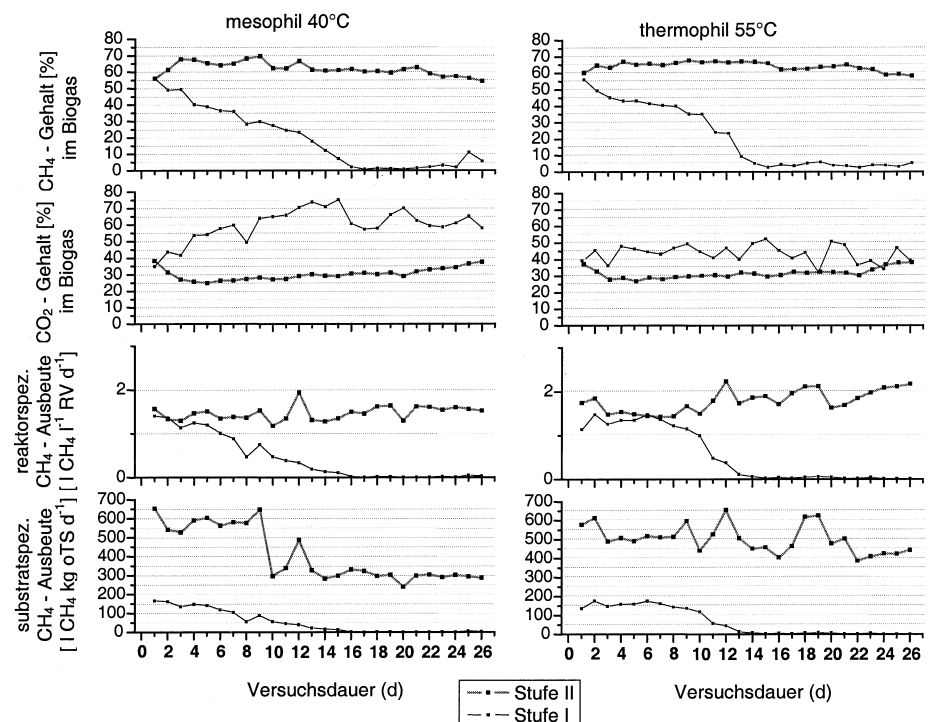


Bild 5: Zweistufige Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen mit maximaler Raumbelastung - Gasparameter in Phase IV (n = 3 Wh.)

- [2] *KrW-/AbfG* (1994): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, verkündet als Art. 1 des Gesetzes zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen vom 27.9.1994, Bundesgesetzblatt Jg. 1994 Teil I, S. 2705
- [3] *Verordnung (EG) Nr. 1774 / 2002* des europäischen Parlamentes und des Rates vom 3. Oktober 2002 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmten tierischen Nebenprodukten; Amtsblatt der europäischen Gemeinschaften 10.10.2002, L 273/1 – L 273/96.
- [4] *Beck, J. und J. Adolph* (2003): Anaerobe Verwertung von Speiseresten zur Energiegewinnung - Erfahrungen in Labor- und Pilotanlagen – Tagungsband zum Symposium der International Energy Agency Task 37: Vergärung biogener Abfälle – Vergärungsanlage Wien, am 22. – 23. Mai 2003 in Wien.
- [5] *Oechsner, H.* (1995): Erhöhung der Energieproduktion landwirtschaftlicher Biogasanlagen durch Zusatz von Speiseabfällen. Energy generated from Residual and Waste Substances. CIGR - International Commission of Agricultural Engineering IV Hohenheim Energy and Agriculture vom 25. bis 28. September, Topic 3, Paper 24, Deutschland

- [6] *Böhm, R.* (1998): Die Bewertung von mesophilen und thermophilen Kofermentationsverfahren aus Sicht der Hygiene. In: Technik anaerober Prozesse (Hrsg.: Märkl, H., R. Stegmann) S. 215 – 230, DECHEMA, Frankfurt, Deutschland
- [7] *Hoferer, M.* (2001): Seuchenhygienische Untersuchungen zur Inaktivierung ausgewählter Bakterien und Viren bei der mesophilen und thermophilen anaeroben alkalischen Faulung von Bio- und Küchenabfällen sowie anderen Rest- und Abfallstoffen tierischer Herkunft, Dissertation, Freie Universität Berlin, D 188, Shaker Verlag, Aachen
- [8] *Hornix, W.J. Und S.H.W.M. Mannaerts* (2001): Van 't Hoff and the Emergence of Chemical Thermodynamics, Delft University Press, p. 212 - 242, Netherlands
- [9] *Van Velsen, A.F.M.* (1981): Anaerobic digestion of piggery waste. Ph.D. Thesis of the Agricultural University Wageningen, S. 103, Niederlande
- [10] *Grasmug, M. und R. Braun* (2002): „Vergärung biogener Abfälle aus Wien- Untersuchungen zur Vergärbarkeit und Verwertbarkeit von Speiseresten und Markt- abfällen“, Wiener Umweltanwartschaft, MA 22 und MA 48, Wien
- [11] *Kraschinski, S.* (1995): Untersuchungen zur gemeinsamen Vergärung von Rindergülle und Speiseabfall zur Biogasgewinnung. Diplomarbeit, Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim, Deutschland
- [12] *Schüle, S.* (2001): Anaerobe Verwertung von Speiseresten. Diplomarbeit, Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim, Deutschland
- [13] *Abdel - Hadi, M.* (2003): Methangewinnung aus Nahrungsmittelabfällen und Biotarübern durch Kofermentation. Dissertation, Universität Hohenheim, MEG Nr. 403, Deutschland
- [14] • *Wellinger, A., U. Baserga, W. Edelmann, K. Egger, B. Seiler* (1991): Biogas Handbuch, Grundlage - Planung - Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen, 2. Auflage, Wirz - Verlag, Aarau, Schweiz

Danksagung

Die Untersuchungen werden durch Pro-INNO ("PROgramm INNOvationskompetenz mittelständischer Unternehmen") unter Projekträger- schaft der AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen, Berlin) gefördert.

Autoren

Dipl.-Ing.sc.agr. Jan Adolph
 Institut für Agrartechnik
 Universität Hohenheim
 Garbenstrasse 9
 70599 Stuttgart
 Tel: +49/(0)711/459-3930
 Fax: +49/(0)711/459-2519
 E-mail: jadolph@uni-hohenheim.de

Dr. Jürgen Beck
 Institut für Agrartechnik
 Universität Hohenheim
 Garbenstrasse 9
 70599 Stuttgart
 Tel: +49/(0)711/459-2502
 Fax: +49/(0)711/459-4307
 E-mail: jafbeck@uni-hohenheim.de

M.sc.agr. Michael Mukengele
 Institut für Agrartechnik
 Universität Hohenheim
 Garbenstrasse 9
 70599 Stuttgart
 Tel: +49/(0)711/459-2505
 Fax: +49/(0)711/459-2519
 E-mail: mikem@uni-hohenheim.de

Prof. Dr. Thomas Jungbluth
 Institut für Agrartechnik
 Universität Hohenheim
 Garbenstrasse 9
 70599 Stuttgart
 Tel: +49/(0)711/459-2835
 Fax: +49/(0)711/459-4307
 E-Mail: jungblut@uni-hohenheim.de