

Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB)

Biotechnologie Nordhausen GmbH (BTN)

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben

Kinetik der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen bei kontinuierlicher Prozessführung als Grundlage für die Bemessung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen

Förderkennzeichen 22011402

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde über die Fachagentur
Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) mit Mitteln des Bundesministeriums für
Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Prof. Dr. agr. habil. Dipl.-Ing. B. Linke (Projektleiter)

Prof. Dr. sc. nat. G.-R. Vollmer

Dipl. Ing. agr. P. Mähnert

Potsdam, September 2006

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Symbolverzeichnis.....	III
1 Kurzdarstellung	5
1.1 Aufgabenstellung.....	5
1.2 Voraussetzungen	6
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	6
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	8
2 Eingehende Darstellung.....	9
2.1 Ergebnisse des Projektes	9
2.1.1 Einleitung und Stand des Wissens	9
2.1.2 Material und Methoden.....	13
2.1.3 Ergebnisse und Diskussion	30
2.1.4 Zusammenfassung.....	69
2.1.5 Anhang zu den Ergebnissen.....	71
2.2 Voraussichtlicher Nutzen.....	91
2.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens	91
2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	92
Literaturverzeichnis.....	93
Anlage.....	98
I Erfolgskontrollbericht.....	98
I.1 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen Zielen	98
I.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis	98
I.3 Fortschreibung des Verwertungsplans	99
I.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....	100
I.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	100
I.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	100
II Kurzfassung (Berichtsblatt)	101

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung Bedeutung

ATB	Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.
BHKW	Blockheizkraftwerk
BTN	Biotechnologie Nordhausen GmbH
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ES	Essigsäure
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
GPS	Ganzpflanzensilage
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
NawaRo	Nachwachsender Rohstoff
N _{ges}	Gesamt-Stickstoff
NH ₄ -N	Ammonium-Stickstoff
org. Sr.	organische Säuren
oTS	organische Trockensubstanz
P	Phosphor
PS	Propionsäure
RG	Rindergülle
SG	Schweinegülle
TS	Trockensubstanz
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	-	Koeffizient der Kurvenanpassung
a _i	-	Impfgülle:Substrat-Verhältnis
b	-	Koeffizient der Kurvenanpassung
B _R	kg m ⁻³ d ⁻¹	Raumbelastung
B _{R,k}	kg m ⁻³ d ⁻¹	kritische Raumbelastung
c	-	Koeffizient der Kurvenanpassung
c ₀	g kg ⁻¹	Zulaufkonzentration
c _A	g kg ⁻¹	Ablaufkonzentration
C _{CH₄}	Vol-%	korrigierte Methankonzentration im Gas
C _{CO₂}	Vol-%	korrigierte Kohlenstoffdioxidkonzentration im Gas
c _i	g kg ⁻¹	oTS-Gehalt der Impfgülle
c _s	g kg ⁻¹	oTS-Gehalt des Substrates
I _i	-	Hemmfunktion bei kontinuierlicher Vergärung für Hemmstoff i
k	d ⁻¹	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante
m ₀	kg d ⁻¹	Zulaufmasse
m _A	kg d ⁻¹	Ablaufmasse
m _g	kg d ⁻¹	Masse des Biogases

Symbol	Einheit	Bedeutung
m_i	kg	Frischmasse der Impfgülle
m_s	kg	Frischmasse des Substrates
n		Anzahl Stichproben
p_0	mbar	Normdruck (1013,25)
p_1	mbar	Luftdruck, unter dem das Gas mit dem Volumen v_1 steht
p_E	-	Anteil oTS aus Kosubstrat in der Mischung mit Gülle
p_w	mbar	Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur T_1
Q_B	$m^3 d^{-1}$	Biogasmenge
r	d^{-1}	Biogasbildungsrate
r_s	$m^3 kg^{-1} d^{-1}$	Spezifische Biogasrate
r_{s-CH_4}	$m^3 kg^{-1} d^{-1}$	Spezifische Methanrate
R^2	%	Bestimmtheitsmaß bei Kurvenanpassungen
s		Standardabweichung
t	d	Zeit
T_0	K	Normtemperatur (273,15)
T_1	K	absolute Temperatur, die das Gas mit dem Volumen v_1 besitzt
$t_{90\%}$	d	Zeitpunkt, an dem im Batch-Versuch 90 % von y_{max} erzielt wird
t_{Grenz}	d	Abbruchkriterium bei Batch-Versuchen nach VDI-Richtlinie
t_m	d	mittlere Verweilzeit
TS_{105}	%	Trockensubstanzgehalt bei Trocknung bei 105°C
TS_{60}	%	Trockensubstanzgehalt bei Trocknung bei 60°C
v_0	m^3	Volumen des Gases im Normzustand
v_1	m^3	Volumen bei der Temperatur T_1 und dem Druck p_1
V_R	m^3	Fermentervolumen
$y(t)$	$m^3 kg^{-1}$	Biogas-Summenkurve
y_B	$m^3 kg^{-1}$	oTS-Biogausbeute in Abhängigkeit von B_R
$y_{B,I}$	$m^3 kg^{-1}$	gehemmte oTS-Biogausfunktion in Abhängigkeit von B_R
y_{CH_4}	$m^3 kg^{-1}$	maximal mögliche oTS-Methanausbeute
$y_{CH_4}(t)$	Vol-%	Methangehalt zum Zeitpunkt t
y_i		Funktion für Hemmstoff i im Ablauf in Abhängigkeit von B_R
y_{max}	$m^3 kg^{-1}$	maximal mögliche oTS-Biogausbeute
$y_{org.Sr.}$	$g kg^{-1}$	Funktion für org. Säuren im Ablauf in Abhängigkeit von B_R
y_{pH}	-	Funktion für pH-Wert im Ablauf in Abhängigkeit von B_R
y_{pH}^{trans}	-	Transformierte Funktion für pH-Wert im Ablauf in Abhängigkeit von B_R
y_{PS}	$g kg^{-1}$	Funktion für Propionsäure im Ablauf in Abhängigkeit von B_R
ρ	$kg m^{-3}$	Dichte
ρ_0	$kg m^{-3}$	Dichte des Zulaufs
ρ_A	$kg m^{-3}$	Dichte des Ablaufs
ρ_g	$kg m^{-3}$	Dichte des Biogases

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die derzeit etwa 2700 landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland werden überwiegend mit Gülle und Energiepflanzen betrieben, da der Einsatz von Energiepflanzen durch die Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes (EEG) und dem darin gutgeschriebenem Energiepflanzenbonus besonders unterstützt wird. Die alleinige Vergärung von Energiepflanzen (Monovergärung) ist auch in kontinuierlichen Nassvergärungsanlagen möglich, häufig fehlen jedoch belastbare Daten zur Auslegung der Biogasanlage. Forschungsbedarf besteht insbesondere in der Belastbarkeit solcher Anlagen und in der Früherkennung kritischer Belastungszustände. In der Praxis ist bei der Biogasgewinnung aus NawaRos und Gülle in der Regel noch die mesophile Vergärung bei 30-45°C anzutreffen. Erfahrungsberichte bestätigen aber, dass auch die thermophile Vergärung bei 55-65°C ein geeignetes Verfahren ist, um möglichst hohe Biogausbeuten zu erzielen. Die Vor- und Nachteile beider Temperaturstufen müssen noch spezifiziert werden.

Im vorliegenden Projekt sollen Kenntnisse über die Kinetik der Biogasbildung aus NawaRos und Gülle unter praxisrelevanten Prozessbedingungen gewonnen werden. Durch kontinuierliche Belastungssteigerungsversuche bis zur Grenzbelastung wird die optimale Belastung des Biogasreaktors mit NawaRos ermittelt. Dabei werden die in der Praxis üblichen stoßweisen Dosierungen mit den NawaRos Mais-, Roggen- und Rübensilage sowie mit der Gülle von Rindern und Schweinen simuliert. Weiter wird der Einfluss der Temperatur auf die Abbaugeschwindigkeit der organischen Substanz ermittelt, indem die Langzeitversuche jeweils bei 35°C und 55°C durchgeführt werden. Das im Rahmen des Vorhabens erarbeitete Modell und die ermittelten Daten sollen Betreibern von Biogasanlagen als Richtlinien bzw. als Betriebsparameter für eine stabile Prozessführung mit hoher energetischer Effizienz zur Verfügung gestellt werden.

1.2 Voraussetzungen

Die Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde, haben sich auch während des Vorhabens gegenüber der Darstellung im Projektantrag nicht wesentlich geändert. Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen nehmen eher noch an Bedeutung zu, da das Erneuerbare-Energien-Gesetz während des Vorhabens im Juli 2004 novelliert wurde. Dadurch erfolgt derzeit eine zusätzliche Vergütung des Biogases, das ausschließlich aus Gülle und/oder Energiepflanzen gewonnen wird.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeits- und Zeitplanung konnte über den Vorhabenszeitraum eingehalten werden. An beiden beteiligten Instituten wurden die für die ersten 15 Monate (Phase 1) vorgesehenen Langzeitversuche im mesophilen Bereich durchgeführt und abgeschlossen. Die Vergärung im thermophilen Bereich (Phase 2) erfolgte in beiden Fällen ebenfalls im Zeitplan. Lediglich die Versuchs-Varianten der thermophilen Kovergärung der NawaRos mit Schweinegülle mussten mehrfach unterbrochen und neu gestartet werden, da Schweinegülle bei höheren Temperaturen unerwartet stark ausgeprägte Prozessstörungen verursacht.

Die Ausgaben für Verbrauchsmaterialien und Investitionen entsprechen weitgehend den angesetzten Werten.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Wissenschaftlicher Stand, an den das Vorhaben anknüpfen konnte, waren zahlreiche Untersuchungsergebnisse für die Verarbeitung agroindustrieller Reststoffe und Abfälle aus der Kommunalentsorgung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Für die Vergärung von NawaRos gab es hingegen noch keinen wissenschaftlich begründeten Stand der Technik. Eine Darstellung des Zusammenhangs zwischen Fermenterbelastung und zu erwartender Biogasausbeute fehlte. Über die gemessenen Biogasausbeuten aus nachwachsenden Rohstoffen in Praxisbiogasanlagen gab es in der Literatur unterschiedliche Angaben mit teilweise erheblichen Schwankungen (OECHSNER 2000, KEYMER 2001, WEILAND 2000). Ein Überblick über zu erwartende Biogasausbeuten bei der Kovergärung von Energiepflanzen gaben Linke & Vollmer (LINKE & VOLLMER 2002).

Zur Durchführung der kontinuierlichen Langzeitversuche wurden vollständig durchmischte Rührkesselreaktoren in optimierter Form eingesetzt, wie sie auch schon vor Projektbeginn am ATB, der BTN sowie weiteren Forschungseinrichtungen (z.B. ATZ, FAL, TUM, Uni Hohenheim s. 1.5) zum Einsatz kamen. Es konnte also an dem technischen Stand der Biogasproduktion angeknüpft werden und das Verfahren durch Automatisierung vereinfacht werden. Auch das Verfahren zur diskontinuierlichen Biogasproduktion (Batch-Versuche) war an den genannten Instituten bereits etabliert. Inzwischen werden beide Verfahren in der VDI-Richtlinie zur Vergärung organischer Stoffe (VDI 4630) empfohlen.

Ein Großteil der verwendeten Fachliteratur konnte über das Internet durch allgemeine Recherchen sowie über das internationale Wissenschaftsinformationssystem www.isiknowledge.com ausfindig gemacht werden. Darüber hinaus verfügt das ATB über eine umfangreiche und aktuell gehaltene Fachbibliothek und Zeitschriften-sammlung.

Nützliche Links zu Industriedatenbanken stellen elektronische Quellen wie www.zbmed.de, www.dainet.de, www.fis-elf.de oder www.boxer99.de. Für aktuelle Informationen im Bereich der Biogasproduktion waren neben den ausführlichen Veröffentlichungen der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (www.fnr.de) unter anderem Zusammenstellungen des Fachverbandes Biogas e.V. (www.biogas.org), des Schweizerischen Biogas Fachverbandes (www.biogas.ch), des Internationalen Biogas & Bioenergie Kompetenzzentrums (www.biogas-zentrum.de/ibbk) sowie des Biogas Infoservice der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (www.landwirtschaftskammer.de) hilfreich.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während des Vorhabens erfolgte auf diversen nationalen und internationalen Tagungen, Kongressen, Workshops und Messen fachlicher, das Projekt betreffender Austausch mit anderen Stellen. Dabei handelte es sich unter anderem um folgende Veranstaltungen:

Messe Agritechnica, 9.-15.11.2003 in Hannover

14. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V.: Biogas – Nachwachsende Rohstoffe, Neue Wege für die Landwirtschaft, 11.-14.01.2005 in Nürnberg

DokuPlant-Gemeinschaftsseminar, 12.04.2005 in Falkenrehde

Workshop im Zentrum für Nachwachsende Rohstoffe NRW: Biogas boomt: Trends und Technik, 15.04.2005 in Bad Sassendorf-Ostinghausen

15. Brandenburgische Landwirtschaftsausstellung 5.-8.5.2005 in Paaren/Glien

7. FAO/SREN-Workshop: The future of biogas for sustainable energy production in Europe, 30.11.-2.12.2005 in Uppsala, Sweden

Biogas-Intensiv-Workshop im Rahmen der SolarEnergy/bautec, 22.-24.02.2006 in Berlin

Workshop an der Universität Sancti Spiritus: Updating and Perspective for the Biogas Production in Cuba, 27.-29.03.2006 in Sancti Spiritus, Kuba

DKB-Biogasforum Brandenburg, 31.05.2006 in Rangsdorf

16. CIGR World Congress: Agricultural Engineering For A Better World, 3.-7.11.2006 in Bonn

Darüber hinaus fand eine Zusammenarbeit u.a. mit folgenden Stellen statt:

ATZ Entwicklungszentrum, Dr. rer. nat. Stephan Prechtl

Centro Universitario Sacti Spiritus Kuba, MSc. Ing. Osvaldo Romero Romero

FAL Bunderforschungsanstalt für Landwirtschaft, Prof. Dr. Ing. Peter Weiland

FEE Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e.V., Hr. Eberhard Oettel

TUM Technische Universität München, Dr. rer. nat. Hocine Arab

Universität Hohenheim, Prof. Dr. Hans Oechsner

Des weiteren erfolgt eine intensive Kooperation mit den am Netzwerk „Biogas-Crops“ beteiligten Instituten. Dieses vom BMBF geförderte Verbundprojekt leistet wissenschaftliche Grundlagenforschung zur Biogasgewinnung aus pflanzlicher Biomasse. Damit konnten die im Rahmen des genannten Verbundprojektes gewonnenen Erkenntnisse für die Projektbearbeitung genutzt werden.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Ergebnisse des Projektes

2.1.1 Einleitung und Stand des Wissens

Ziel des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ist die Verdopplung des Anteiles von Strom aus regenerativen Energiequellen zwischen den Jahren 2000 und 2010 (HEINZE ET AL. 2000), wobei der Gewinnung von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen eine bedeutende Rolle zukommt. Für die Biogaserzeugung sind „sämtliche biogene Roh- und Reststoffe geeignet, die anaerob weitgehend abbaubar sind und Hemm- bzw. Schadstoffe in so geringer Konzentration enthalten, dass weder der Gärprozess noch die nachfolgende landwirtschaftliche Verwertung des Gärrückstandes nachteilig beeinflusst werden“ (WEILAND 2000). Es können jedoch Schwierigkeiten entstehen, wenn Stoffe schwer mit Wasser mischbar, sehr heterogen sind oder einen sehr hohen Anteil an Zellulose und Lignin haben (JÄKEL 2000). Im 20. Jahrhundert bestand die herkömmliche Art der Biogasgewinnung im Wesentlichen aus der Vergärung von Gülle und Flüssigmist. Erst im Laufe der Zeit erkannte man die Vorteile der Mitvergärung von organischen Reststoffen als Kosubstrat. Seit dem Inkrafttreten der Bioabfallverordnung im September 1998 gibt es eine rechtliche Absicherung der Kovergärung organischer Abfallstoffe in Biogasanlagen (OECHSNER 2000). Diese und weitere Förderprogramme wie die Einführung des EEG im April 2000 und dessen Novellierung im Juli 2004 führten dazu, dass seit Anfang dieses Jahrhunderts zur Güllevergärung zunehmend mehr gasertragssteigernde Kosubstrate in Biogasanlagen eingesetzt werden.

Bereits im Jahr 2003 wurden über 93 % der landwirtschaftlichen Biogasanlagen als Kofermentationsanlagen betrieben, wobei als Grundsubstrat überwiegend Rindergülle und nur halb so häufig Schweinegülle zum Einsatz kam. Als Kosubstrate wurden die NawaRos am häufigsten eingesetzt und an deren Spitze Silomais mit einer relativen Häufigkeit von über 60 % (WEILAND 2003B). Bei den im Biogas-Messprogramm untersuchten Biogasanlagen werden in 75 % der Fälle u.a. Rindergülle und bei 39 % u.a. Schweinegülle als Grundsubstrat eingesetzt und in 82 % der Anlagen Silomais als mindestens eines der Kosubstrate (BUNDESFORSCHUNGSANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT 2005). In der Literatur finden sich ausführliche Übersichten zu für die Kofermentation geeigneten Reststoffen (GREPMEIER ET AL. 2000) sowie auf Stilllegungsflächen anbaubaren Energiepflanzen (MATTHIAS 2000).

Der Einsatz von Kosubstraten wie z.B. Reststoffen aus der Industrie unterliegt teilweise zahlreichen Vorschriften. Nachwachsende Rohstoffe können hingegen problemlos vergoren werden und werden bei alleinigem Einsatz nach dem EEG sogar zusätzlich vergütet. Aus diesem Grunde werden zunehmend mehr NawaRos eigens für die Biogasgewinnung angebaut. Diese Energiepflanzen haben den Vorteil, dass sie auf Stilllegungsflächen angebaut werden dürfen, hygienisch unbedenklich sind und der Nährstoffkreislauf geschlossen wird (MATTHIAS 2000). Auf der zehnten Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. wurden für die Verwertung in Biogasanlagen als meist diskutierteste Energiepflanzen Mais, Futterrüben und Gräser genannt, da diese hohe Massenerträge erzielen und haltbar gemacht werden können (RILLING 2001). Aber auch andere Energiepflanzen, die mit geringem Aufwand ganzjährig lagerfähig gemacht werden können, wie Getreide in Form von Ganzpflanzensilage (GPS), eignen sich gut als Substrat für Biogasanlagen. Silomais hat den Vorteil, dass die Ernte- und Lagertechnik bekannt und etabliert sind. Bei der Vergärung von Futterrüben ist hingegen eine spezielle Aufbereitung und Lagerung erforderlich: Rüben werden in der Regel nach der Ernte zerkleinert und der Rübenbrei in Lagerbehältern siliert und gespeichert (RILLING 2001). Trotz der speziellen Behandlung sind Futterrüben für die Biogasproduktion von besonderem Interesse, da sie hohe Massenerträge je Hektar bringen und die Handhabung der Silage im Biogasprozess einfach ist (ABDEL-HADI ET AL. 2002, WEILAND 2003A). Darüber hinaus weisen Futterrüben von allen Futterpflanzen die höchsten Energiegehalte auf (SCHERER ET AL. 2003).

Ein wichtiges Kriterium für die Wahl, welches Substrat der Landwirt in seiner Biogasanlage einsetzen sollte, ist die pro Hektar erzielbare Methanmenge (AMON ET AL. 2006B). Daher eignen sich für die Biogasproduktion ertragreiche Silomaisarten mit später Abreife und damit langer Ausnutzung der Vegetationszeit am besten, wohingegen extensiv gedüngte Maissorten und extensiv produzierte Rüben geringere Methanproduktionen je Hektar aufweisen (OECHSNER & LEMMER 2003). Versuchsergebnisse ergaben für ertragreiche Silomaisarten mit später Abreife eine Methanproduktion von $10.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (OECHSNER & LEMMER 2003). Damit hat Mais als C4-Pflanze von den in Deutschland heimischen Kulturpflanzen das höchste Methan-Ertragspotential (AMON ET AL. 2006A).

Bei der derzeitigen Tendenz der zunehmenden Monovergärung werden Energiepflanzen oder organische Reststoffe ohne Zugabe von Gülle vergoren. Laut Jahresbericht 2004/2005 der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) gilt bei der gülle-

freien Nassvergärung vor allem der Einsatz nachwachsender Rohstoffe als vielversprechend, da bei dieser Variante auch Landwirte ohne Tierhaltung von der Biogaserzeugung profitieren können. Bei diesem Verfahren seien zwar noch nicht alle Probleme gelöst, es gebe jedoch ein enormes Interesse daran und eine beachtliche Zahl an neu in Betrieb genommener Monovergärungs-Anlagen (FNR 2006). Zwei Beispiele sind die Biogasanlagen in Obernjesa¹ und Schornbusch² (FISCHER & KRIEG 2005). Die großtechnische Biogasanlage der *Schornbuscher Biogas GmbH & Co. KG* wurde im November 2004 eingeweiht und vergärt ausschließlich nachwachsende Rohstoffe (FNR 2006). Ebenso werden in den Biogasanlagen in Dolgeln nur Roggen-Ganzpflanzensilage (SCHNELL 2003) und in Beddorf nur Maissilage (RUGEN 2005) eingesetzt. Darüber hinaus wurden erfolgreiche Versuche zur Monovergärung im Labormaßstab zum Beispiel mit Kartoffeln, Gras- und Maissilage (WESOLOWSKI ET AL. 2004), Futterrüben (SCHERER ET AL. 2003), sowie Futter- und Zuckerrüben (HASSAN 2003) durchgeführt. Im Labormaßstab (ADOLPH ET AL. 2004B) und unter Praxisbedingungen (ADOLPH ET AL. 2004A) konnte nachgewiesen werden, dass auch mit Speiseresten Monovergärungen technisch problemlos realisierbar sind. Erfahrungen mit Praxisanlagen in Österreich haben jedoch trotz der höheren Biogasausbeuten aus Energiepflanzen gegenüber Wirtschaftsdüngern ergeben, dass Biogasanlagen, die beide Substratgruppen gemeinsam vergären, die höchsten Methanbildungsraten aufweisen (HOPFNER-SIXT ET AL. 2006).

In der Literatur stellen Übersichten von Gasausbeuten aus unterschiedlichen Substraten meist Biogasausbeuten in $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ oder $\text{m}^3 \text{t}^{-1}$ dar. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass die Methangehalte im Biogas je nach Substrat variieren und deshalb ein solcher Vergleich nur mit Methanausbeuten angestellt werden sollte (ANONYMUS 2006). Selten als die Ausbeute wird die in einer Biogas- oder Versuchsanlage bestehende Biogas- oder Methanrate in m^3 Biogas pro m^3 Fermentervolumen und Tag angegeben. Generell weisen Literaturangaben zur Biogasproduktion eine große Schwankungsbreite auf, was einen Vergleich dieser Angaben nur bedingt möglich macht. Spezifische Gasausbeuten, die in Exaktversuchen im Labor erzielt worden sind, lassen sich z.B. nicht in der Praxis erzielen (MATTHIAS 2002). Nach SCHATTNER & GRONAUER besteht bei dem Zugriff auf Literaturdaten auch das Problem, dass in Praxis und Theorie sehr unterschiedliche Bezugsgrößen für den Ertrag an Biogas oder Methan herangezogen werden. Häufig

¹ <http://www.bioenergiehof.de>

² <http://www.kriegfischer.de/factsheets/155%20Schornbusch%20deutsch%20040116.pdf>

anzutreffende Bezugsgrößen sind die Frischmasse FM und die organische Trockensubstanz oTS. Außerdem sei selten ersichtlich, auf welchem Weg und mit welcher Art von Versuchsaufbau die entsprechenden Daten ermittelt wurden (SCHATTNER & GRONAUER 2000). Unabhängig vom Verfahren hängt die Biogasausbeute zudem von der Prozesstemperatur, der Reaktorkonzentration, der Substratvorbehandlung, bei Güllevergärung von der Viehhaltung und -fütterung und bei Energiepflanzen vom Reifegrad ab (BADGER ET AL. 1979). Darüber hinaus ist die Normierung von großer Bedeutung, da das Volumen des Biogases von der Temperatur, dem Luftdruck und dem Dampfdruck des Wassers abhängig ist.

Biogas- oder Methanpotentiale können neben theoretischen Berechnungen nur über diskontinuierliche Batch-Versuche ermittelt werden. Bei kontinuierlichen Versuchen oder Praxis-Betrieben können aufgrund der Ausspülung der organischen Substanz und der schlechteren Milieubedingungen für die Bakterien keine maximalen Gasausbeuten erzielt werden. Die tatsächlichen Gasausbeuten weichen aufgrund von Verfahrensunterschieden teilweise erheblich vom Biogaspotential der Substrate ab (SCHUMACHER ET AL. 2006).

Schon bei systematischen Untersuchungen zur Vergärung von Rindergülle (HASHIMOTO 1982) und Schweinegülle (HASHIMOTO 1983) in den Anfängen der Biogas-Forschung wurden Batch-Versuche zur Bestimmung des Biogaspotentials und kontinuierliche Versuche zur Ermittlung des Einflusses von Temperatur, Zulaufkonzentration und mittlerer Verweilzeit durchgeführt. Ergebnisse mit Biogas-Gärtests in verschiedenen Fermentersystemen zeigen, dass sowohl bei der Übertragung von Batch- auf Durchflussbetrieb als auch bei der Übertragung von kleineren auf größere Fermentervolumina mit Abschlügen in der Gasproduktion zu rechnen ist (SCHLATTMANN ET AL. 2004). Auch nach GRUBER ET AL. lassen sich Laborwerte nicht ungehindert auf Praxisverhältnisse übertragen, da Laborversuche meist bei Raumbelastungen von unter $2 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ durchgeführt werden (GRUBER ET AL. 2004).

Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes sollen die Abhängigkeit der Biogasausbeute aus NawaRos im kontinuierlichen Prozess von der Temperatur, dem Anteil Kosubstrat in einer Mischung mit Gülle sowie der Fermenterbelastung darstellen.

2.1.2 Material und Methoden

2.1.2.1 Versuche

Diskontinuierliche Versuche (Batch-Tests)

Zur Ermittlung des Biogaspotentials ausgewählter Substrate dienten diskontinuierliche Versuche (Batch-Tests) im Labor-Maßstab mit einer Versuchsdauer von vier bis sechs Wochen. Dazu befanden sich gasdichte 2 l Faulflaschen aus Kunststoff in einem temperaturgeregelten Wasserbad. Die Temperatur beträgt je nach Fragestellung 35°C (mesophil) oder 55°C (thermophil) mit einer Genauigkeit von $\pm 2^\circ\text{C}$. Jede Faulflasche eines Versuchsansatzes enthielt 1 oder 1,5 kg Impfgülle (m_i) aus vorhergehenden Versuchen zur Gewährleistung eines stabilen Gärprozesses. Für jede Versuchsvariante wurde einmalig eine entsprechende Frischmasse des zu untersuchenden Substrates m_s mit dem oTS-Gehalt c_s hinzugegeben, so dass sich ein ausreichend hohes Impfgülle:Substrat-Verhältnis a_i (Gl. 1) von größer als 2 ergibt (GUNASEELAN 1997, HELFFRICH & OECHSNER 2003, LINKE & SCHELLE 2000). Bei Impfgüllen mit niedrigen oTS-Gehalten c_i können jedoch auch Werte von a_i in Höhe von 1 zugrunde gelegt werden, da zu geringe Substratzugaben eine zu geringe Biogasrate bewirken würden. Der Einfluss von a_i auf die Abfallvergärung wurde anhand von drei a_i -Werten getestet, die sogar gleich oder kleiner waren als 0,03 (FERNANDEZ ET AL. 2001).

$$a_i = \frac{m_i \cdot c_i}{m_s \cdot c_s} \quad (1)$$

a_i : Impfgülle:Substrat-Verhältnis

m_i, m_s : Frischmasse der Impfgülle bzw. des Substrates [kg]

c_i, c_s : oTS-Gehalt der Impfgülle bzw. des Substrates [g kg^{-1}]

Bei jedem Versuchsansatz diente eine Kontrollvariante (Impfgülle ohne Substrat) der Erfassung möglicher Gasbildung aus dem Impfmateriale, die den zu untersuchenden Varianten bei jeder Messung abgezogen wird. Jedes Substrat wurde in der Regel in zwei bis vier Ansätzen parallel untersucht. Zur Erfassung der gebildeten Gasmenge ist jede Faulflasche mit einer kalibrierten Gasmaus aus Glas verbunden, die sich in einem Standzylinder mit NaCl-gesättigter Sperrflüssigkeit befindet (Abb. 1). Die produzierte Gasmenge wurde während der ersten Versuchsphase werktäglich erfasst und mit Angabe der Temperatur und des Luftdrucks notiert. In der zweiten Versuchsphase war ein Ablesen der Gasmenge in mehrtägigen Abständen ausreichend. Nach Ansammlung einer für eine Gasanalyse ausreichenden Gasmenge wurde diese über einen Dreiwege-

Hahn abgesehen und hinsichtlich des Gehaltes an Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff mit Hilfe eines Deponiegasmonitors³ (Fa. ansyco, Karlsruhe)⁴ analysiert.

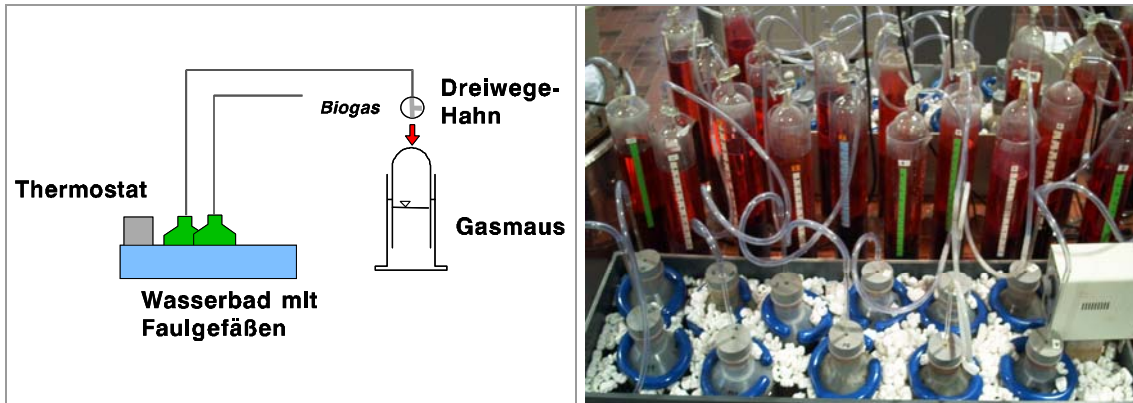


Abb. 1: Schematische Darstellung und Foto eines Batch-Versuchs

In Tab. 1 sind die am ATB und der BTN durchgeführten Batch-Versuche mit Angaben zum Zeitraum der Versuche, untersuchten Substraten, Anzahl der Varianten sowie Temperaturstufe des Prozesses dargestellt. Die Batch-Versuche dienen der Ermittlung des Biogaspotentials der in den kontinuierlichen Versuchen eingesetzten Substrate. Dabei wurde auch der Einfluss der Temperatur berücksichtigt, und es wurden Batch-Versuche bei 35°C und 55°C durchgeführt.

Tab. 1: Versuchsdaten zu den Batch-Versuchen

Ansatz	Zeitraum	Untersuchung	Anzahl Varianten	Prozess
Batch 1 ATB	19.04.04- 04.06.04	Drei Kosubstrate für kont. mesophile Vergärung ¹⁾	12	mesophil
Batch 2 ATB	29.06.04- 09.08.04	Rindergülle aus erster ²⁾ und zweiter Lieferung ¹⁾ für kont. mesophile Vergärung	6	mesophil
Batch 3 ATB	06.06.05- 04.07.05	Drei Kosubstrate für kont. thermophile Vergärung ¹⁾	12	thermophil
Batch 4 ATB	05.07.05- 23.08.05	Rindergülle aus dritter ¹⁾ und vierter Lieferung ²⁾ für kont. thermophile Vergärung	6	thermophil
Batch 5 BTN	15.06.06- 14.07.06	Drei Kosubstrate und Schweinegülle für kont. mesophile Vergärung ²⁾	8	mesophil

¹⁾ Vier Ansätze je Substrat

²⁾ Zwei Ansätze je Substrat

³ Messprinzip: Infrarotabsorption für Methan und Kohlendioxid bei selektiven Wellenlängen, elektrochemische Zelle für Sauerstoff. Genauigkeit bei 5-25 Vol-%: ± 1,0%; bei 15-100 Vol-%: ± 3,0%.

⁴ <http://www.ansyco.de>

Semi-kontinuierliche Versuche

Bei der kontinuierlichen Vergärung erfolgt eine stetige Substratzugabe, so dass das Verfahren wie in der Praxis beliebig fortgesetzt werden kann. Bei den Versuchen im Labormaßstab handelte es sich eigentlich um semi-kontinuierliche Vergärung, da die Zugabe portioniert nur einmal täglich erfolgte. Der Einfachheit halber wird im Folgenden jedoch von kontinuierlicher Vergärung gesprochen. Für die Versuche wurden am ATB und an der BTN je zehn vollständig durchmischte Rührkesselreaktoren mit einem Nutzvolumen von 8 l eingesetzt (Abb. 2).

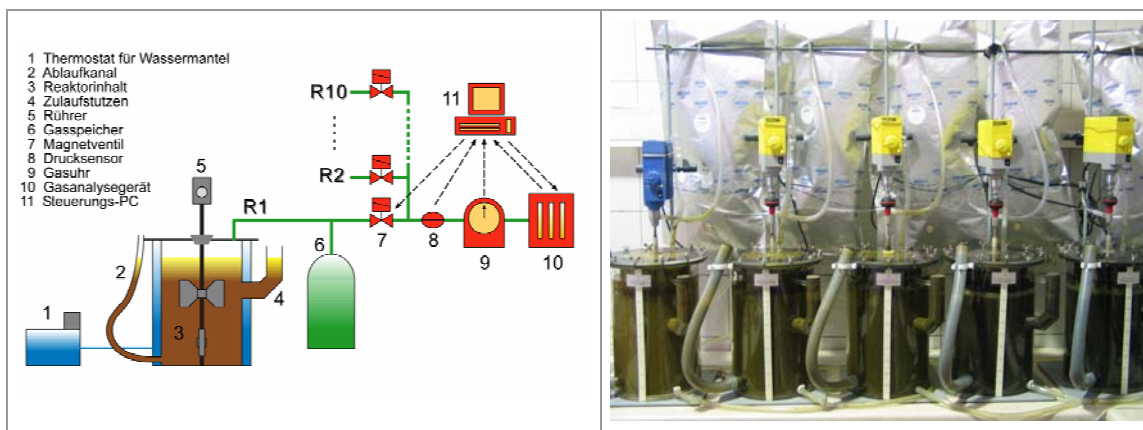


Abb. 2: Schematische Darstellung und Foto der kontinuierlich betriebenen Laboranlage

Die Temperierung der Reaktoren auf 35°C (mesophiler Prozess) bzw. 55°C (thermophiler Prozess) erfolgte über thermostatbeheizte Wassermäntel, wobei ein Thermostat (1) jeweils fünf Reaktoren beheizte. Die Durchmischung des Reaktorinhaltes (3) wurde über zeitschaltuhrgesteuerte Rührwerke (5) *OST basic* (Fa. IKA, Staufen)⁵ mit Stahlrührstäben gewährleistet. Die Rührstäbe drehten sich frei in einer in den Reaktorinhalt eintauchenden Rührerhülse. Die jeweils in zwei unterschiedlichen Höhen angebrachten doppelten Plexiglas-Rührblätter wurden während der mesophilen Versuchsphase teilweise den substratspezifischen Anforderungen angepasst. So wurden bei den Monovergärungen und den Kovergärungen mit 67 % NawaRos bei zunehmenden Raumbelastungen die großflächigen Rührblätter (8 x 7 cm) gegen schmale Metallstreifen (1 x 6 cm) ausgewechselt, um den Widerstand bei höherer Viskosität zu verringern. Bei der Rübenvergärung entstand bei höheren Raumbelastungen aufgrund des frei werdenden CO₂ eine so große Schaummengende, dass diese teilweise aus der Rührerhülse austrat. Um dies zu vermeiden, wurden zusätzlich zu den schmaleren Rührblättern zwei mal zwei konisch aufeinander zulaufende Metallplatten (5 x 5 cm) über der Oberfläche des

⁵ <http://www.ika.de>

Reaktorinhaltes am Rührstab befestigt. Dadurch konnte die Schaumschicht verdichtet werden. Da sich die so angepassten Rührer bewährten, wurden diese bei der thermophilen Vergärung von Anfang an eingesetzt. Das Rühren erfolgte in den ersten Monaten eines Versuchs jeweils stündlich für 15 Minuten im Drehzahlbereich von 50-100 min⁻¹. Bei den Vergärungen von Maissilage und Roggen-GPS wurde die Rührhäufigkeit bei höherer Raumbelastung verdoppelt. In den letzten Monaten eines Versuches wurde bei allen Reaktoren mindestens zweimal stündlich für 15 Minuten bzw. dauerhaft gerührt.

Die Substrate wurden an sechs Tagen je Woche einmal täglich in der Zeit zwischen 8:00 und 10:00 Uhr über einen in halber Höhe angebrachten und in den Fermenterinhalt eintauchenden Zulaufstutzen (4) zugegeben. Dazu wurde dem Reaktor zuvor über einen Ablaufkanal aus Gummi (2) Fermenterinhalt zum Anmischen des Substrates sowie für weitere Versuche bzw. Analysen entnommen. Von der Abnahmemenge wurde nach der Zugabe wieder so viel Reaktorablauf in den Reaktor gegeben, dass sich der gleiche Volumenpegel wie zuvor einstellte.

Zur Erfassung der Gasmenge und -zusammensetzung des jeweils produzierten Biogases diente eine automatische, prozessgesteuerte Datenerfassung. Dazu wurde das Biogas für jeden Reaktor in einem Gasbeutel (6) vor einem außerhalb der Messung geschlossenem Magnetventil (7) gespeichert. Die Ausgänge aller 2/2-Wege-Klein-Magnetventile *Type 6013* (Fa. Bürkert, Ingelfingen)⁶ mündeten zusammen mit einem Drucksensor (8) *MPX 2010 DP* (Fa. Conrad, Hirschau)⁷ über PVC-Schläuche in der Zuleitung zur Gasuhr (9). Der Ausgang dieses Trommelgaszählers *TG 1/5* (Fa. Ritter, Bochum)⁸ führte wiederum zum Gasanalysegerät *SSM 6000* (Fa. Pronova, Berlin)⁹. Ein PC-gesteuerter Microcontroller ermöglichte die zyklisch wiederkehrende Gasmengenerfassung wahlweise mit und ohne Gasanalyse in wählbaren Zeitabständen. Die Magnetventile wurden dazu alle 12 bis 48 Stunden nacheinander, in der Regel um 12:00 Uhr beginnend, geöffnet. Zeitgleich setzten die Bypass-Pumpe des Analysegerätes sowie gegebenenfalls die Analysenpumpe ein. Erstere pumpte das Biogas aus dem jeweils geöffneten Gasbeutel durch die Gasuhr. Diese sendete über einen Analogausgang Impulse entsprechend der Gasmenge an den Microcontroller. Parallel hierzu erzeugte der Drucksensor analog zur Differenz zwischen Umgebungs- und Systemdruck eine Spannung. Bei geleertem

⁶ <http://www.buerkert.de>

⁷ <http://www.conrad.de>

⁸ <http://www.ritter.de>

⁹ <http://www.pronova.de>

Gasbeutel und entsprechendem Unterdruck fiel die Spannung ab, das Ventil wurde geschlossen, und die Bypass-Pumpe wurde durch den Microcontroller bei Erreichen eines definierten Grenzwertes abgeschaltet. Ein Protokoll mit den reaktorspezifischen Angaben zu Pumpdauer, Durchflussgeschwindigkeit, Druckdifferenz, Gasmenge sowie die im Gasanalysegerät gespeicherten Gaszusammensetzungen des Biogases wurden an den PC ausgegeben und dort ausgewertet. Gasanalysen wurden in der Regel ein bis zwei mal wöchentlich durchgeführt. Bei einer Gaszusammensetzung mit Sauerstoffgehalten von über 1 % wurden die Daten nicht ausgewertet, da in diesen Fällen für eine Gasanalyse vermutlich nicht ausreichend Biogas produziert worden ist. In diesem Fall zieht das Gasanalysegerät Luft an. Schwefelwasserstoff-Gehalte (H_2S) von 0 ppm wurden ebenfalls ignoriert, da in diesen Fällen vermutlich der sensiblere H_2S -Sensor ausgefallen war. Ähnliche Verfahren der Gasspeicherung in Gasbeuteln und Abpumpen durch eine Gasuhr sind auch in der Literatur zu finden (STEWART ET AL. 1984).

Die semi-kontinuierlichen Versuche wurden als Langzeit-Versuche durchgeführt, um praxisnah den Einfluss der Raumbelastung auf die Biogasausbeute zu untersuchen. Um darüber hinaus die Bedeutung der Temperaturstufe zu ermitteln, wurden die Versuche im ersten Versuchsjahr (2004) bei 35°C (mesophil) und im zweiten Jahr (2005) bei 55°C (thermophil) durchgeführt. Je Institut wurden zehn Reaktoren (R1-R10) eingesetzt, so dass drei NawaRos jeweils in Monovergärung sowie als Kovergärung in zwei Mischungen mit Gülle untersucht werden konnten. Die Mischungsverhältnisse NawaRo zu Gülle betragen dabei 1:2 bzw. 2:1 auf der Basis von oTS. Demnach bestand die oTS einer Mischung jeweils aus 33 % bzw. 67 % aus dem NawaRo. Als NawaRos kamen Silagen aus Mais, Rüben und Roggen als Ganzpflanze zum Einsatz. Als zehnte Variante wurde als Kontrolle reine Gülle ohne Zusatz von Kosubstraten eingesetzt. Dabei handelte es sich am ATB um Rindergülle und an der BTN um Schweinegülle. Diese bildeten auch jeweils das Grundsubstrat bei den Kovergärungs-Varianten.

Um den Einfluss der Raumbelastung auf die Biogasausbeute zu ermitteln, wurde diese am ATB bei den Kovergärungs-Varianten von ca. 0,7 auf bis zu 6 (mesophil) bzw. 4,3 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ (thermophil) gesteigert. Die Monovergärungs-Varianten wurden bis zur jeweiligen Grenzbelastung durchgeführt, d.h. bis zu einer sehr ausgeprägten oder vollständigen Hemmung des Prozesses. Raumbelastungen von 1 und 2 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ wurden jeweils über einen Zeitraum von durchschnittlich zwölf Wochen beibehalten, während bei höheren Raumbelastungen fließende Übergänge vorliegen. Dies entsprach einem

Gesamtzeitraum für die Versuche von 42 Wochen im ersten bzw. 49 Wochen im zweiten Jahr.

An der BTN wurden die mesophilen Versuche (1. Jahr) ebenfalls 49 Wochen durchgeführt. Die Gasausbeuten wurden jedoch erst nach einer 18-wöchigen Startphase bei B_R von $1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ausgewertet. Ab diesem Zeitpunkt wurde die automatisierte Gasmesstechnik eingeführt, so dass die Ergebnisse an beiden Instituten nun vergleichbar waren. Die Raumbelastung wurde in allen Fällen auf etwa $3,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gesteigert. Die Dauer der thermophilen Versuche (2. Jahr) betrug bis zu 50 Wochen. Die maximalen Raumbelastungen betragen bei den Monovergärungs-Varianten bei Maissilage 3,6, bei Rübensilage 5,3 und bei Roggen-GPS $3,1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$. In Tab. 2 ist als Übersicht eine Zusammenfassung der untersuchten Einflüsse auf die Biomethanisierung mit den jeweiligen Einsatzbereichen und Faktorausprägungen dargestellt.

Tab. 2: Untersuchte Variablen bei der kontinuierlichen Vergärung

Einflussgröße	Einsatzbereich	Faktor
Grundsubstrat	ATB BTN	Rindergülle Schweinegülle
Temperaturbereich	1. Jahr (2004) 2. Jahr (2005)	mesophil (35 °C) thermophil (55 °C)
Raumbelastung	Jan. - März April - Juni Juli - Sep. Okt. - Dez.	$1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ $2 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ über $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$
Kosubstrat	Reaktor 1-3 Reaktor 4-6 Reaktor 7-9 Reaktor 10	Maissilage Gehaltsrübensilage Roggen-GPS Reine Gülle
Anteil Kosubstrat	Reaktor 1, 4, 7, 10 Reaktor 2, 5, 8 Reaktor 3, 6, 9	100 % 67 % 33 %

2.1.2.2 Substrate

Impfmaterialien und Gärrückstände

Die bei den Batch-Versuchen eingesetzten Impfmaterialien stammten in der Regel aus vorhergehenden Versuchen und wurden hinsichtlich ihres pH-Wertes und Gehalts an organischen Säuren analysiert, um einen Vergleich zum Versuchende bezüglich der Prozessstabilität zu ermöglichen (Tab. A 1). Darüber hinaus wurden TS und oTS bestimmt, um a_i (Gl. 1) ermitteln zu können.

Zu Beginn jedes kontinuierlichen Versuches wurden die Laborreaktoren mit Impfgülle befüllt, damit die Biomethanisierung sicher und schnell einsetzen konnte. Dieses methanogene Impfmateriale war Ablauf aus Praxis-Biogasanlagen, die bei mesophilen Temperaturen betrieben wurden. Vor den mesophilen Versuchsreihen wurde das Impfmateriale in die Reaktoren gefüllt, auf 35°C temperiert und einige Tage stehen gelassen, bis nur noch sehr geringe Mengen Biogas gebildet wurden. Bei den thermophilen Versuchen wurden ebenfalls Reaktorabläufe aus mesophil betriebenen Biogasanlagen eingesetzt, da keine entsprechenden Biogasanlagen in der Praxis gefunden werden konnten, die thermophil auf Basis von Rinder- und Schweinegülle nur NawaRos einsetzen. Die mesophilen Reaktorabläufe wurden in einem 100 l Tank (ATB) bzw. in den Reaktoren (BTN) 14 Tage bei 55°C gelagert, um eine thermophile Bakterienkultur für den Versuchsbeginn zu entwickeln.

Die am ATB eingesetzte Impfgülle stammte aus der Biogasanlage der *Rhinmilch GmbH* bei Fehrbellin¹⁰, die auf Basis von Rindergülle betrieben wurde und als Kosubstrate Mais- und Grassilage einsetzte. Die an der BTN für die mesophilen Versuche eingesetzte Impfgülle wurde der Biogasanlage der *Van Asten Tierzucht Nordhausen GmbH & Co KG* in Nordhausen¹¹ entnommen. Diese Biogasanlage wurde auf Basis von Schweinegülle mit Zusatz von Maissilage und Roggenmehl betrieben. Die Analyseergebnisse der eingesetzten Impfgüllen sind in Tab. 3 dargestellt. Für Ammonium-Stickstoff NH₄-N, Gesamtstickstoff N_{ges} und Phosphor P sind die Mittelwerte der ersten Ablaufprobe aus den zehn Reaktoren angegeben.

Tab. 3: Analyseergebnisse der eingesetzten Impfgüllen

Impfgülle auf Basis von	Eingesetzt für Prozess	pH	LF [mS cm ⁻¹]	TS [%]	oTS [% TS]	NH ₄ -N [g kg ⁻¹]	N _{ges} [g kg ⁻¹]	P [g kg ⁻¹]	org. Sr. [g kg ⁻¹]
Rindergülle (ATB)	mesophil	7,7	19,9	5,5	74,0	2,1	3,8	0,55	2,6
Rindergülle (ATB)	thermophil	8,0	20,1	4,0	69,8	2,1	3,2	0,32	2,1
Schweinegülle (BTN)	mesophil	8,2	--	4,4	63,6	4,6	4,7	--	1,0
Schweinegülle (BTN)	thermophil	8,2	--	4,9	72,0	2,1	3,2	--	0,5

Bei den Batch-Versuchen wurde nach Versuchsabschluss jeweils eine homogene Probe auf pH, LF, TS, oTS und Anteil organischer Säuren analysiert, um den Abschluss des

¹⁰ Substrateinsatz: 110 m³ d⁻¹ Rindergülle + 3,2 t d⁻¹ Silage; Kapazität: Lagerbecken: 25.000 m³, Reaktor: 5.080 m³, Gasspeicher: 500m³; Betriebsweise: einstufig; mesophil bei 37°; BHKW-Leistung: 312 kW_{el}, 824 kW_{th} (<http://www.brandenburgenergie.de/bbenergie/energieatlas/biogas/index.cfm>)

¹¹ Substrateinsatz: 68.000 m³ pro Jahr Schweinegülle von 58.000 Schweinen, nachwachsende Rohstoffe; Kapazität: Zwei Reaktoren à 8.000 m³; Betriebsweise: mesophil bei 37°; BHKW-Leistung: 1,4 MW_{el} (<http://www.btn-biotechnologie.de/referenzen03.html>)

Gärprozesses zu beurteilen. Bei der kontinuierlichen Vergärung wurde einmal wöchentlich¹² der am selben Tag entnommene Reaktorablauf jedes Reaktors auf pH, LF, TS, oTS, NH₄-N, N_{ges} und Anteil organischer Säuren mittels Wasserdampfdestillation untersucht. Bestand bei den Versuchen am ATB der Verdacht, dass der Gehalt an organischen Säuren im Reaktor anstieg, so wurde der Anteil zusätzlich anhand der zeitaufwändigeren, aber genaueren Gaschromatographie bestimmt.

Rinder- und Schweinegülle

Die am ATB bei den kontinuierlichen Versuchen als Grundsubstrat für die Kovergärungen und als alleiniges Substrat eingesetzte Rindergülle stammte von der Milchviehanlage *Rhinmilch GmbH*. In Abständen von 4-8 Monaten wurde jeweils frische Gülle aus der Güllegrube unterhalb des Tretmiststalls der Milchrinder entnommen. Dazu wurde die Gülle nach mehrstündigem Rühren mit Eimern aus der Entnahmestelle geschöpft und in 100 l Fässer für den Transport und die erste Lagerung am ATB gefüllt. Die jeweils 2-4 Fässer wurden luftdicht verschlossen im Kühlraum bei $1 \pm 1^\circ\text{C}$ bzw. im Winter bei Umgebungstemperatur im Freien gelagert. Ein zwischenzeitliches Einfrieren der Gülle konnte dabei nicht ausgeschlossen werden, Versuchsergebnisse am ATB bestätigen jedoch, dass das Einfrieren der Gülle den Biogasprozess nicht negativ beeinflusst. Nach Öffnen eines Fasses wurde der gesamte Inhalt in je 11-17 (n) 20 l Kanister umgefüllt und wiederum in einer Kühltruhe bei $1 \pm 1^\circ\text{C}$ für den täglichen Einsatz gelagert. Je Kanister wurde zu Beginn der Nutzung eine Analyse hinsichtlich pH, LF, TS, oTS, NH₄-N, N_{ges} sowie organischer Säuren durchgeführt. Die Analysenergebnisse sind je Lieferung (RG 1 bis RG 4) gemittelt in Tab. 4 dargestellt. Darüber hinaus sind die Lieferungen hinsichtlich ihres Einsatzes für die kontinuierliche mesophile (RG 2004) bzw. thermophile (RG 2005) Vergärung gemittelt und mit Standardabweichung ($\pm s$) dargestellt.

Die Analysenergebnisse zeigen deutlich, dass sich die vier Lieferungen der Rindergülle hinsichtlich pH, LF, NH₄-N, N_{ges} und organischer Säuren nicht deutlicher voneinander unterscheiden als die Standardabweichung innerhalb der 34 bzw. 21 Proben für die mesophile bzw. thermophile Vergärung. Hinsichtlich des TS- und oTS-Gehaltes liegt die vierte Lieferung (RG 4) mit 7,1 % TS und 78,7 % oTS jedoch deutlich unterhalb der ersten drei Lieferungen, die für die mesophile Vergärung (RG 2004) einen Mittelwert

¹² Die Probenahme erfolgte mittwochs, um einen möglichen Effekt des Nichtbefüllens an den Sonntagen zu mitteln.

von 9,0 % TS und 81,5 % oTS ergeben. Dies ist für die Auswertung der kontinuierlichen Versuche zu berücksichtigen. In Tab. 4 sind neben den gemittelten Werten der Rindergüllen für die kontinuierlichen Versuche die Einzelanalysen der bei den Batch-Versuchen eingesetzten Rindergüllen dargestellt. Die TS- und oTS-Gehalte liegen in allen Fällen im Bereich des Mittelwertes der jeweiligen Lieferung.

Tab. 4: Lieferungen und Analyseergebnisse der am ATB eingesetzten Rindergüllen. Mittelwerte von n Proben mit Standardabweichung s

Rindergülle (RG)	Eingesetzt ab	Versuch	n	pH [-]	LF [mS cm ⁻¹]	TS [%]	oTS [% TS]	NH ₄ -N [g kg ⁻¹]	N _{ges} [g kg ⁻¹]	org. Sr. [g kg ⁻¹]
RG 1	11.02.04	kont. Verg.	14	7,2	18,0	8,0	79,8	1,8	3,9	8,0
RG 2	09.07.04	kont. Verg.	13	6,9	16,3	9,9	83,0	1,8	4,3	9,9
RG 3	08.11.04	kont. Verg.	11	6,9	15,0	8,9	81,9	1,4	3,6	6,2
RG 4	17.06.05	kont. Verg.	17	6,8	16,8	7,1	78,7	1,4	3,1	8,1
RG 2004 (± s)	11.02.04- 22.12.04	mesophile Vergärung	34	7,0 ± 0,3	16,7 ± 1,5	9,0 ± 1,0	81,5 ± 1,6	1,7 ± 0,2	4,0 ± 0,3	8,4 ± 2,2
RG 2005 (± s)	07.02.05- 18.01.06	thermophile Vergärung	21	6,8 ± 0,2	16,4 ± 1,0	7,4 ± 0,8	79,2 ± 1,3	1,4 ± 0,2	3,2 ± 0,3	7,6 ± 1,6
RG 1-alt	29.06.04	Batch 2		7,5	16,3	8,8	79,0	1,7	3,6	7,0
RG 2-1 ¹⁾	29.06.04	Batch 2		7,0	13,7	10,1	84,4	1,7	4,7	8,0
RG 4-2 ¹⁾	05.07.05	Batch 4		6,8	17,4	6,7	77,8	1,5	3,1	9,2
RG 3	05.07.05	Batch 4		7,1	16,3	7,2	78,9	1,5	3,2	6,9

¹⁾ Angabe Lieferung - Kanister

Die an der BTN bei den kontinuierlichen Versuchen eingesetzte Schweinegülle stammte von der *Van Asten Tierzucht Nordhausen GmbH & Co KG*. Die Schweine wurden dort in einer Flatdeck-Aufstallung gehalten und mit Flüssigfutter ernährt. Die dabei anfallende Gülle wurde nach Bedarf aus den Stallungen in den Rohgüllebehälter der Biogasanlage gepumpt. Die Entnahme der Gülle für die Versuche erfolgte ca. alle vier Wochen bzw. je nach Bedarf aus dem Zulauf in den Rohgüllebehälter. Die Lagerung der Gülle erfolgte im Kühlschrank bei 4°C in 10 l Kanistern. Jede Güllecharge wurde auf pH-Wert, TS, oTS und organische Säuren (org. Sr.) untersucht (Tab. 5).

Tab. 5: Gemittelte Analyseergebnisse der an der BTN eingesetzten Schweinegülle. Mittelwerte von n Proben

Schweinegülle (SG)	Eingesetzt ab	Versuch	n	pH [-]	TS [%]	oTS [% TS]	NH ₄ -N [g kg ⁻¹]	N _{ges} [g kg ⁻¹]	org. Sr. [g kg ⁻¹]
SG 2004/2005	21.04.04- 24.03.05	mesophile Vergärung	18	7,7	6,0	72,8	4,1	5,5	6,2
SG 2005/2006	14.06.05- 03.06.06	thermophile Vergärung	9	7,6	5,1	81,6	-	-	5,6
SG 1	15.06.06	Batch 5		-	7,1	73,0	-	-	-

Nachwachsende Rohstoffe

Für die kontinuierlichen Versuche wurden die NawaRos Maissilage und Roggen-GPS im August bzw. Mai 2003 geerntet und in zwei Landwirtschaftsbetrieben siliert. Für die mesophile Startphase im Februar 2004 wurden in beiden Fällen ungeeignete Silagen¹³ eingesetzt. Ab Anfang März 2004 wurden diese jedoch ersetzt durch geeignete Silagen, die jeweils am Tag der Lieferung am ATB und an der BTN in Gefrierbeuteln mit 2,2 bis 2,4 kg Inhalt eingefroren wurden. Aufgrund der ungünstigen Jahreszeit für die Anforderung einer frischen Roggen-GPS musste auf eine Silage aus Liessow zurückgegriffen werden, die bereits mit Hühnerkot denaturiert worden war. Aufgrund der deutlichen Schichtenbildung innerhalb des Silos und der unterschiedlichen Farben von Hühnerkot und Roggen-GPS konnte jedoch eine sorgfältige manuelle Trennung vorgenommen werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass keine größeren Anteile des Kots in den Biogasprozess gelangten. Die Entnahme der Maissilage und Roggen-GPS am Praxis-Silo erfolgte einmalig für beide Institute. Die Substratmengen reichten jeweils für den gesamten Versuchszeitraum von 2004 bis 2006 aus. Aufgrund des sofortigen Einfrierens und Auftauens nur geringer Bedarfsmengen war eine gleichbleibende Qualität über den gesamten Versuchszeitraum an beiden Instituten gegeben.

Der verwendete Mais (*Zea mays*) wurde im Gemisch 1:1 der Sorten Lincoln und Cascadas auf Lehm mit 49 Bodenpunkten nach Winterweizen und Gelbsenf bei Nordhausen, Thüringen angebaut. Die Düngung erfolgte mit 33 m³ ha⁻¹ Schweinegülle. Beikrautregulierung wurde mit 2,5 l ha⁻¹ Lido SC durchgeführt. Der Mais wurde am 22.08.2003 im Reifestadium „Ende Teigreife“ geerntet und mit Hilfe der effektiven Mikroorganismen *EM-A* als Siliermittel konserviert.

Der Roggen (*Secale cereale*) der Sorte Avanti wurde auf Sand mit 22 Bodenpunkten nach Winterroggen am 18.08.2002 bei Liessow, Mecklenburg gedreht. Der Anbau erfolgte ohne Beikrautregulierung und mit Hilfe einer Düngung von 20 m³ ha⁻¹ Schweinegülle sowie 110 kg ha⁻¹ Stickstoff. Die Ernte erfolgte als Ganzpflanze am 28.05.2003 im Reifestadium „nach Ährenschieben“.

Bei der Rübensilage wurde ein Silieren am ATB dem Bezug aus der Praxis vorgezogen, um einen möglichst hohen oTS-Gehalt in der Trockensubstanz und damit unverfälschte

¹³ Die Maissilage wurde bei Regen dem Silo entnommen und nur kühl gelagert, so dass sie nach kurzer Zeit Schimmel bildete. Die Roggen-GPS stammte aus Dolgeln und hatte aufgrund des trockenen Sommers 2003 einen nicht repräsentativen, hohen oTS-Gehalt in Höhe von 40,6 % FM.

Ergebnisse ermöglichen zu können. In der Praxis werden bei Futterrüben in der Regel große Mengen an Sand mit einsiliert. Um dies zu vermeiden, wurden die Rüben am ATB gewaschen und von Sand befreit. Anschließend wurden sie gehäckselt, in 100 l Fässer und 10 l Siliereimer gefüllt und luftdicht abgeschlossen. Dieser Prozess wurde jeweils Anfang Dezember 2003 und 2004 mit den 2003 bzw. 2004 geernteten Rüben durchgeführt. Damit wurde die erste Lieferung für die kontinuierliche mesophile Vergärung und die zweite Lieferung für die thermophile Vergärung eingesetzt. Jeweils die Hälfte der Behälter blieb am ATB, während die andere an die BTN geliefert wurde. Damit unterschieden sich die Rübensilagen an beiden Instituten nicht, es waren nur Veränderungen innerhalb des Versuchsablaufs möglich. Nach zweimonatiger Konservierung wurde der erste Silageeimer geöffnet und die Silage für die kontinuierlichen Versuche eingesetzt. In den ersten vier Versuchsmonaten wurden jeweils Silagen aus den nacheinander geöffneten Silageeimern eingesetzt, danach wurde die gesamte verbleibende Rübensilage aus den Fässern und Eimern in Gefrierbeuteln mit ca. 3 kg Inhalt bei $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ eingefroren. Diese Portionen wurden bei Bedarf aufgetaut.

Bei den eingesetzten Futterrüben (*Beta vulgaris*) handelte es sich um Gehaltsrüben (subsp. vulgaris) der Sorte Kyros. Die erste Lieferung wurde im Oktober 2003 bei Meinsdorf, Brandenburg, die zweite im Oktober 2004 bei Pritzwalk, Mecklenburg-Vorpommern, geerntet und als Feldmiete zwischengelagert.

Die genannten NawaRos wurden nach jedem Auftauen eines Beutels bzw. Öffnen eines Silageeimers auf ihren Gehalt an TS und oTS sowie in regelmäßigen Abständen hinsichtlich weiterer Analyseparameter untersucht. Dies waren am ATB pH, $\text{NH}_4\text{-N}$, Gesamtstickstoff mittels Elementaranalysator N_{ges} , Zucker, Rohfaser XF, Rohfett XL sowie Gärssäuren. Der Gehalt an Rohprotein XP berechnet sich aus der Multiplikation von N_{ges} und 6,25. An der BTN wurden neben den Gehalten an TS und oTS Analysen bezüglich pH und Fettsäuren durchgeführt. Tab. 6 enthält die gemittelten Analysenwerte für jede Versuchsphase getrennt, auch wenn bei beiden Instituten ATB und BTN identische Silagen eingesetzt wurden. Dies ermöglicht die Erfassung eventueller Unterschiede in der Analytik an beiden Instituten oder veränderte Ergebnisse im Zeitverlauf bezogen auf die Auswertung der mesophilen und thermophilen Versuche. Darüber hinaus sind die Angaben um Literaturwerte aus Futterwerttabellen für Wiederkäuer (KIRCHGEBNER 1997) ergänzt. Angaben zu den Analyseergebnissen der in den Batch-Versuchen eingesetzten NawaRos finden sich im Anhang (Tab. A 2).

Tab. 6: Durchschnittliche Analysenergebnisse der NawaRos

Substrat / Prozess	n*	TS [%]	oTS [% TS]	oTS [% FM]	pH [-]	NH ₄ -N [g kg ⁻¹]	Zucker [% TS]	XP [% TS]	XL [% TS]	XF [% TS]	Säuren [g kg ⁻¹]
Maissilage											
ATB mesophil	20;9	31,0	94,7	29,3	3,7	0,33	5,0	9,5	2,6	24,6	4,3
ATB thermophil	13;4	31,6	95,1	30,1	3,4	0,34	3,9	10,0	2,7	24,4	7,4
BTN mesophil	8;8	27,5	91,1	25,1	3,8	-	-	-	-	-	10,4
BTN thermophil	12;11	29,8	95,0	28,3	3,8	-	-	-	-	-	8,4
<i>Literaturwert¹⁴</i>		<i>35,0</i>					<i>1,5</i>	<i>8,1</i>	<i>3,2</i>	<i>20,1</i>	
Rübensilage											
ATB mesophil	28;14	13,1	92,0	12,1	3,7	0,17	26,9	7,8	0,5	8,0	10,7
ATB thermophil	12;8	11,5	90,1	10,4	3,4	0,41	30,9	14,4	0,7	7,9	6,9
BTN mesophil	8;8	13,3	91,4	12,2	3,9	-	-	-	-	-	17,5
BTN thermophil	6;4	15,0	93,3	14,0	3,6	-	-	-	-	-	15,9
<i>Literaturwert¹⁵</i>		<i>15,0</i>					<i>61,4</i>	<i>7,7</i>	<i>0,7</i>	<i>6,4</i>	
Roggen-GPS											
ATB mesophil	22;7	21,8	88,8	19,3	4,6	1,73	1,0	10,4	3,7	31,9	11,9
ATB thermophil	10;4	22,4	87,7	19,6	4,4	1,16	1,4	11,3	3,7	35,3	8,7
BTN mesophil	8;6	25,4	88,1	22,4	4,4	-	-	-	-	-	18,7
BTN thermophil	6;6	23,3	87,6	20,4	4,7	-	-	-	-	-	20,7
<i>Literaturwert¹⁶</i>		<i>21,0</i>					<i>0</i>	<i>10,5</i>	<i>3,7</i>	<i>35,1</i>	

* (Anzahl TS- und oTS-Analysen; Anzahl sonstige Analysen)

2.1.2.3 Analysen

Die chemischen Parameter der Ausgangs- und Endsubstanzen wurden am ATB und an der BTN nach DIN-Norm bestimmt. Dabei handelte es sich um pH-Wert, Trockensubstanz (TS), organische TS (oTS), organische Säuren, Gesamtstickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff NH₄-N, Zucker, Stärke, Rohfaser und Rohfett. Bei den als Doppelbestimmung durchgeführten Analysen wie organische Säuren, Rohprotein und Rohfaser werden die Mittelwerte angegeben.

2.1.2.4 Berechnungsgrundlagen

Die im Zeitverlauf der Batch-Versuche gebildete Biogasmenge abzüglich der Gasbildung aus der Kontrollvariante wird nach Gl. 2 auf Normvolumen v_0 standardisiert (VDI 4630 2006). Dazu wird das Gasvolumen v_1 , das unter dem umgebenden Luftdruck p_1 steht, auf Normtemperatur T_0 und Normdruck p_0 bezogen. Dabei wird nach Gl. 2 der

¹⁴ Grünfuttersilage für Wiederkäuer aus Mais, Ende der Teigreife

¹⁵ Angaben nicht zu Silagen, sondern nur zu ganzer gehaltvoller Futterrübe, sauber. Deshalb unterscheidet sich der Gehalt an Zucker zu den eigenen Silagen deutlich.

¹⁶ Grünfuttersilage für Wiederkäuer aus Roggen, Beginn der Blüte

Dampfdruck des Wassers p_w in Abhängigkeit von der umgebenden Temperatur T_1 berücksichtigt¹⁷.

$$v_0 = v_1 \cdot \frac{(p_1 - p_w) \cdot T_0}{p_0 \cdot T_1} \quad (2)$$

v_1 :	Volumen bei der Temperatur T_1 und dem Druck p_1 [m^3]
p_1 :	Luftdruck, unter dem das Gas mit dem Volumen v_1 steht [mbar]
p_w :	Dampfdruck des Wassers in Abhängigkeit von T_1 [mbar]
T_1 :	absolute Temperatur, die das Gas mit dem Volumen v_1 besitzt [K]
v_0 :	Volumen des Gases im Normzustand [m^3]
p_0 :	Normdruck [1013,25 mbar]
T_0 :	Normtemperatur [273,15 K]

Die produzierte Biogasmenge in Normliter wird auf die zugegebene Menge an oTS bezogen und aufsummiert als Biogas-Summenkurve $y(t)$ dargestellt. Nach LINKE & SCHELLE lässt sich die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k für die Biogasbildung aus Batch-Versuchen mit einer maximalen Biogasausbeute y_{\max} aus Gl. 3 berechnen (LINKE & SCHELLE 2001). Umformung der Gl. 3 nach $y(t)$ führt zu Gl. 4 und liefert damit eine exponentielle Kurvenanpassung an die Biogas-Summenkurve aus Batch-Versuchen.

$$\ln \left[\frac{y_{\max} - y(t)}{y_{\max}} \right] = -k \cdot t \quad (3)$$

$$y(t) = y_{\max} \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad (4)$$

$y(t)$:	Biogas-Summenkurve [$m^3 \text{ kg}^{-1}$]
y_{\max} :	maximal mögliche Biogasausbeute [$m^3 \text{ kg}^{-1}$]
t :	Zeit [d]
k :	Reaktionsgeschwindigkeitskonstante [d^{-1}]

Diese Exponential-Funktion wird in der Literatur auch für die Methan-Summenkurve genannt, wenn keine Akkumulation von intermediären Produkten erfolgt (DEMIRBAS 2006, VEEKEN & HAMELERS 1999). Eine Kurvenanpassung über Gl. 4 gibt zwar nicht nur Auskunft über y_{\max} , sondern auch über k , verspricht jedoch in der Regel nicht die höchste Anpassungsgenauigkeit, da versuchsbedingte Verzögerungen in der Anfangsphase (Lag-Phase) nicht berücksichtigt werden. Kurvenanpassungen mit höherem

¹⁷ Die Berechnung erfolgt über eine Kurvenanpassung an Werte aus allgemeinen h-x-Diagrammen mit hoher Genauigkeit ($R^2=99,997\%$) für den Temperaturbereich von 15-35°C:

$$p_w = -4,3965 + 9,7961 \cdot e^{0,0521T_1}$$

Bestimmtheitsmaß R^2 sind die Hill-Funktion nach Gl. 5 (LINKE & SCHELLE 2000) sowie die Chapman-Funktion mit drei Parametern nach Gl. 6 (MÄHNERT ET AL. 2002).

$$y(t) = y_{\max} \cdot \frac{t^b}{c^b + t^b} \quad (5)$$

$$y(t) = y_{\max} \cdot (1 - e^{-bt})^c \quad (6)$$

$y(t)$: Biogas-Summenkurve [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

y_{\max} : maximal mögliche Biogasausbeute [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

t : Zeit [d]

b, c : Koeffizienten der Kurvenanpassung

Bei der Ergebnisauswertung wurden für jeden Batch-Test die drei Kurvenanpassungen nach Gl. 4 bis 6 durchgeführt und diejenige mit dem jeweils höchsten R^2 für die Ergebnisdarstellung genutzt. Neben y_{\max} ist auch die spezifische Biogasrate $r_s(t)$ im Verlauf des Batch-Versuchs von Interesse. Sie entspricht der ersten Ableitung der Biogas-Summenkurve $y(t)$ und ergibt sich aus den Kurvenanpassungen nach Chapman (Gl. 7) bzw. nach Hill (Gl. 8).

$$r_s(t) = y'(t) = y_{\max} \cdot b \cdot c \cdot (1 - e^{-bt})^{c-1} \cdot e^{-bt} \quad (7)$$

$$r_s(t) = y'(t) = y_{\max} \frac{b \cdot c^b \cdot t^{b-1}}{(c^b + t^b)^2} \quad (8)$$

$r_s(t)$: Spezifische Biogasrate zum Zeitpunkt t [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$]

$y(t)$: Biogas-Summenkurve [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

y_{\max} : maximal mögliche Biogasausbeute [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$]

b, c : Koeffizienten der Kurvenanpassung

Der Grenz-Zeitpunkt nach VDI-Richtlinie, zu dem nicht mehr als 1 % des bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Biogasgesamtvolumens produziert wird, sei t_{Grenz} in Tagen. Er ergibt sich durch Gleichsetzung von r_s mit $0,01 \cdot y$ und Umformung nach t . Im Falle der Kurvenanpassung an y über die Chapman-Funktion lässt sich t_{Grenz} mit Hilfe der Gl. 9 berechnen. Bei einer Anpassung über die Hill-Funktion ist die Berechnung nur iterativ möglich (Gl. 10). Da der Ungenauigkeitsfehler nur minimal ist, werden im Folgenden auch bei besseren Kurvenanpassungen über die Hill-Funktion die Parameter der Chapman-Funktion ermittelt und für die Berechnung von t_{Grenz} nach Gl. 9 genutzt.

$$t_{\text{Grenz}} = -\frac{1}{b} \cdot \ln\left(\frac{1}{100 \cdot b \cdot c + 1}\right) \quad (9)$$

$$t_{\text{Grenz}} \cdot c^b + t_{\text{Grenz}}^{b+1} = 100 \cdot b \cdot c^b \quad (10)$$

Allgemein wird der Anteil η von y_{\max} am Tag t_η erzielt, der sich nach Umformung aus der Gleichsetzung von y und $\eta \cdot y_{\max}$ berechnen lässt. Bei Anpassung über die Chapman-Funktion ergibt sich Gl. 11 und bei Anpassung über die Hill-Funktion Gl. 12. Damit lässt sich auch die technische Faulgrenze $t_{90\%}$ berechnen, zu der 90 % von y_{\max} produziert worden sind.

$$t_\eta = -\frac{1}{b} \cdot \ln(1 - \eta^{1/c}) \quad (11)$$

$$t_\eta = \left(\frac{\eta \cdot c^b}{1 - \eta} \right)^{1/b} \quad (12)$$

t_η : Zeitpunkt, zu dem der Anteil p von y_{\max} erzielt wird [d]

η : Anteil $y(t)$ von y_{\max}

b, c : Koeffizienten der Kurvenanpassung

Zu Beginn eines Batch-Versuches hat das Gasvolumen in der Gärtestapparatur (Kopfraum) eine relevante Größe im Vergleich zum gebildeten Biogasvolumen. Da der Kopfraum zu Beginn mit Luft gefüllt ist, kommt es in der Anfangsphase zu einer Verdünnung der produzierten Biogaskomponenten. Nach der VDI-RICHTLINIE 4630 (VDI 4630 2006) lässt sich dieser Effekt korrigieren, indem die Konzentration an Methan und Kohlendioxid als Summe auf 100 % hochgerechnet wird (Gl. 13-14).

$$C_{\text{CH}_4} = C_{\text{CH}_4}^{\text{gem}} \cdot \frac{100}{C_{\text{CH}_4}^{\text{gem}} + C_{\text{CO}_2}^{\text{gem}}} \quad (13)$$

$$C_{\text{CO}_2} = C_{\text{CO}_2}^{\text{gem}} \cdot \frac{100}{C_{\text{CH}_4}^{\text{gem}} + C_{\text{CO}_2}^{\text{gem}}} \quad (14)$$

C_{CH_4} : korrigierte Methankonzentration im Gas [Vol-%]

C_{CO_2} : korrigierte Kohlenstoffdioxidkonzentration im Gas [Vol-%]

$C_{\text{CH}_4}^{\text{gem}}$: gemessene Konzentration an Methan [Vol-%]

$C_{\text{CO}_2}^{\text{gem}}$: gemessene Konzentration an Kohlenstoffdioxid [Vol-%]

Die Methan-Summenkurve $y_{\text{CH}_4}(t)$ berechnet sich durch Multiplikation eines jeden Methanwertes mit der seit der vorherigen Gasanalyse produzierten Menge an Biogas und anschließender Aufsummierung aller Einzelwerte. Darüber hinaus lassen sich an die vereinzelt Methanwerte Kurven des Typs Chapman-Funktion mit vier Parametern anpassen (Gl. 15).

$$y_{\text{CH}_4}(t) = y_0 + a \frac{t^b}{c^b + t^b} \quad (15)$$

- $y_{\text{CH}_4}(t)$: Methangehalt zur Zeit t [Vol-%]
 y_0 : Methangehalt zum Zeitpunkt Null [Vol-%]
 a : maximal mögliche Zunahme des Methangehaltes [Vol-%]
 t : Zeit [d]
 b, c : Koeffizienten der Kurvenanpassung

Bei der Auswertung des kontinuierlichen Biogasprozesses sind die Kenntnis einiger Grundparameter und Berechnung daraus folgender Bemessungsparameter von großer Bedeutung (Abb. 3).

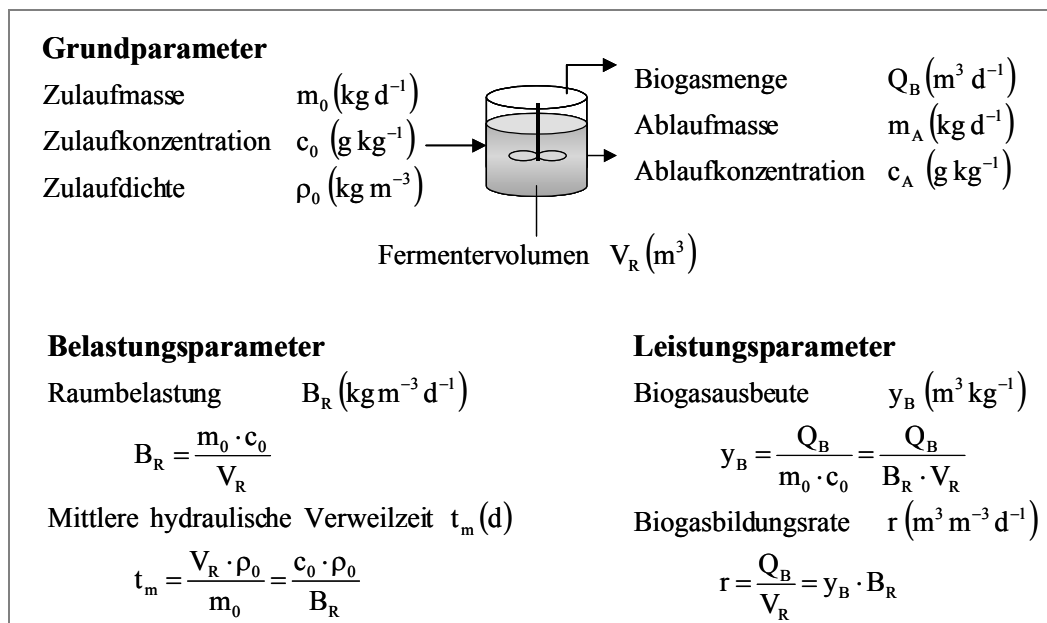


Abb. 3: Grund- und Bemessungsparameter im kontinuierlichen Biogasprozess (nach LINKE ET AL. 2003)

Bei festgelegtem V_R in m³ ergibt sich je nach Belastung des Reaktors die Masse des täglichen Zulaufes m_0 und damit des täglichen Ablaufes m_A in kg d⁻¹. Da die oTS ein Maß für die Konzentration vergärbarer Verbindungen ist, versteht man unter der Konzentration des Zulaufes c_0 und des Ablaufes c_A den Gehalt an oTS in g pro kg Frischmasse. Bei den Versuchen am ATB wurde für jede Berechnung die jeweils aktuell analysierte Konzentration des jeweiligen Zulaufes zugrunde gelegt. An der BTN stand nicht für jede neue Substrat-Charge ein Analysewert zur Verfügung. Es wurden für die Berechnungen daher die Mittelwerte aller während des ersten Versuchsjahres getätigten Analysen für die mesophilen Versuche und während des zweiten Jahres für die thermophilen Versuche verwendet. Mit Hilfe dieser Grundparameter lassen sich

einfache Belastungs- und Leistungsparameter nach Abb. 3 berechnen. Die Raumbelastung B_R gibt an, mit welcher oTS-Last in kg pro Tag ein Kubikmeter Reaktorraum belastet wird. Daraus ergibt sich je nach oTS-Konzentration und Dichte des Zulaufs ρ_0 die mittlere hydraulische Verweilzeit t_m in Tagen. Andererseits lässt sich bei gegebener Zulaufmasse und angestrebter t_m das notwendige V_R berechnen.

Die Biogausausbeute y_B in m^3 pro kg oTS sowie die Biogasbildungsrate r in m^3 Biogas pro m^3 Reaktorvolumen und Tag werden analog zu den Biogas-Summenkurven bei den Batch-Versuchen in Normvolumen (Gl. 2) angegeben. Eine Kopfraumkorrektur nach Gl. 13 und Gl. 14 ist bei kontinuierlichen Versuchen nicht notwendig, da sich in dem System die gesamte Versuchszeit über nur Biogas befindet. Eine Umrechnung auf trockenes Gas wird auch unterlassen, da das Gas vor Eintritt in die Gasuhr bereits in einem Gasbeutel gespeichert worden war und durch PVC-Schläuche und eine Kondensatfalle aus Glas geleitet worden ist.

Die Dichte des Biogases ρ_g hängt von dessen Zusammensetzung an Methan CH_4 und Kohlendioxid CO_2 ab. Geht man davon aus, dass das Biogas nur aus CH_4 und CO_2 besteht und diese sich wie ideale Gase mit den Dichten bei 0°C von ρ_{CH_4} mit $0,714 \text{ kg m}^{-3}$ und ρ_{CO_2} mit $1,964 \text{ kg m}^{-3}$ verhalten, so ergibt sich ρ_g nach Gl. 16.

$$\rho_g = \frac{p_{\text{CH}_4}}{p_{\text{CH}_4} + p_{\text{CO}_2}} \cdot 0,714 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CH}_4} + p_{\text{CO}_2}} \cdot 1,964 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (16)$$

ρ_g : Dichte des Biogases (kg m^{-3})

$p_{\text{CH}_4}, p_{\text{CO}_2}$: Anteil von Methan bzw. Kohlendioxid im Biogas

Alle folgenden Angaben zu Grundparametern stellen Wochen-Mittelwerte dar. Damit sollen tägliche Schwankungen nivelliert und die Tatsache, dass sonntags nicht befüllt wurde, berücksichtigt werden. Änderungen wie gesteigerte Raumbelastung sowie Durchführung der Analysen der Gaszusammensetzung und der Gärrückstände erfolgten stets mittwochs. Daher erfolgte die Mittelwertbildung der Einzelwerte von Mittwoch bis Dienstag bezüglich Zulaufmasse m_0 , Zulaufkonzentration c_0 und Fermentervolumen V_R . Die Mittelwertbildung bezüglich Biogasmenge Q_B , Ablaufmasse m_A und Ablaufkonzentration c_A erfolgte von Donnerstag bis Mittwoch.

2.1.3 Ergebnisse und Diskussion

2.1.3.1 Batch-Versuche

Als Beispiel für den zeitlichen Verlauf der Biogasbildung in diskontinuierlichen Batch-Versuchen sind die Biogas-Summenkurven y von jeweils ausgewählten Varianten aus den Batch-Versuchen 1 und 2 (vgl. Tab. 1) für Maissilage¹⁸, Rübensilage¹⁹, Roggen-GPS²⁰ und Rindergülle²¹ in Abb. 4 dargestellt. Über einen Zeitraum von 28 Tagen wurde das Biogaspotential der bei den kontinuierlichen Versuchen eingesetzten Substrate im mesophilen Bereich ermittelt.

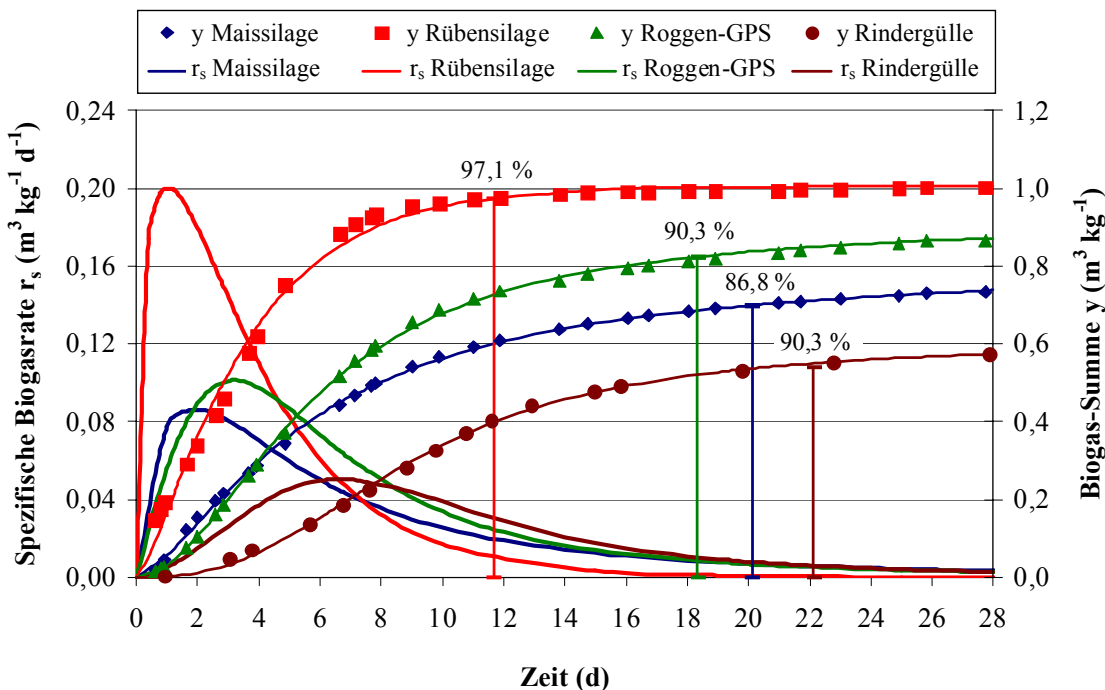


Abb. 4: Spezifische Biogasrate r_s , Biogas-Summenkurve y und Zeitpunkt des erfüllten Abbruchkriteriums nach VDI-Richtlinie t_{Grenz} ausgewählter Batch-Versuche mit Mais-, Rüben-, Roggensilage und Rindergülle

Bei den NawaRos Rübensilage, Roggen-GPS und Maissilage (Batch 1) setzt die Biogasproduktion nach Zugabe zum Impfschlamm sehr schnell ein. Bei den Biogas-Summenkurven ist in den ersten sieben bis zehn Tagen ein steiler Anstieg, also eine hohe Gasproduktion, zu verzeichnen. Anschließend wird der Verlauf flacher, da die tägliche Biogasproduktion nur noch gering ist. Bei der Rindergülle (Batch 2) setzt die Biogasproduktion etwas verzögert ein und der Verlauf der Biogas-Summenkurve flacht

¹⁸ Maissilage frisch, Variante 1

¹⁹ Rübensilage gefroren, Variante 1

²⁰ Roggen-GPS frisch, Variante 1

²¹ Rindergülle 2 gefroren, Variante 2

erst nach etwa 14 Tagen ab. Bei allen Varianten handelt es sich nach der VDI-Richtlinie 4630 (VDI 4630 2006) um typische Verläufe von Gasbildungskurven. Dabei kann die Biogasproduktion aus den NawaRos als normal angesehen werden und der Abbau der Gülle als verzögert. Die Biogas-Summen aus Maissilage, Rübensilage und Roggen-GPS weisen eine hohe Ähnlichkeit bezüglich ihrer Kurvenverläufe mit den Versuchsergebnissen mit Energiepflanzen im sogenannten Minibatch-Verfahren auf (MUKENGELE ET AL. 2006). Die guten Prozessbedingungen resultieren aus ausreichend hohen a_i (Gl. 1) von 2,7-3,0 bei den NawaRos und 1,9 bei der Gülle und werden durch die Analysenwerte der Gärrückstände bestätigt. Im Mittel weisen die Gärrückstände aus Batch 1 einen pH-Wert in Höhe von 8,1 und einen Anteil an organischen Säuren von $2,1 \text{ g kg}^{-1}$ auf. Bei Batch 2 beträgt der mittlere pH-Wert 7,9 und der Anteil an organischen Säuren $2,3 \text{ g kg}^{-1}$.

Bei der Vergärung der Rübensilage wird aufgrund der schnell einsetzenden Startphase die beste Kurvenanpassung²² über die Chapman-Funktion mit drei Parametern (Gl. 5) erzielt. Bei allen anderen Varianten ergeben Kurvenanpassungen nach der Hill-Funktion mit drei Parametern (Gl. 6) die höchsten Bestimmtheitsmaße²³. Mit Hilfe dieser Anpassungen lassen sich die Biogaspotentiale der Substrate, ausgedrückt in maximal möglicher Biogasausbeute y_{\max} , bestimmen (Tab. 7). Bei den NawaRos ergibt sich für die Rübensilage das höchste Potential mit einem über die vier Varianten gemittelten y_{\max} in Höhe von $0,99 \text{ m}^3$ pro kg oTS . Roggen-GPS und Maissilage unterscheiden sich mit Mittelwerten von $0,90$ und $0,87 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ nicht wesentlich. Die geringste Biogasausbeute wird mit Rindergülle erzielt. Die im Batch-Versuch 2 getesteten Rindergülle-Proben der zweiten Lieferung (Gülle 2) ergeben Werte für y_{\max} in Höhe von durchschnittlich $0,58 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$. Die Probe der ersten Lieferung (Rindergülle 1) in gefrorener Form brachte mit einem Mittelwert von $0,61 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ eine etwas höhere maximale Biogasausbeute. Der Unterschied zwischen den beiden doppelt durchgeführten Varianten der Rindergülle 1 beträgt jedoch $0,05 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$, also $8,4 \%$, was dem Abstand zum Mittelwert der Rindergülle 2 entspricht. HELFFRICH & OECHSNER beobachten bei verschiedenen Batch-Systemen einen Variationskoeffizienten von $7,1 \%$ und bezeichnen solche Abweichungen bei biologischen Prozessen, die äußeren Einflüssen unterliegen, als normal (HELFFRICH & OECHSNER 2003). Es kann also bei

²² Mit $R^2 = 99,21 - 99,52 \%$

²³ Mit $R^2 = 99,72 - 99,96 \%$

den vorliegenden Ergebnissen davon ausgegangen werden, dass zwischen den Rindergüllen hinsichtlich ihrer Eignung für die Biogasproduktion keine wesentlichen Unterschiede bestehen.

Mit Hilfe der Parameter y_{\max} , b und c aus den entsprechenden Kurvenanpassungen mit dem höchsten R^2 lassen sich r_s , t_{Grenz} sowie t_{η} bzw. $t_{90\%}$ (Gl. 7-12) ermitteln (Tab. 7).

Tab. 7: Parameter y_{\max} , b , c , Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k und Bestimmtheitsmaß R^2 aus Kurvenanpassungen und daraus berechnete Werte t_{Grenz} , $t_{90\%}$ sowie Methanausbeute y_{CH_4} und Methangehalt CH_4 bei Batch-Versuchen 1 und 2 mit NawaRos und Gülle

Substrat	Var.	y_{\max} [m ³ kg ⁻¹]	b [-]	c [-]	k [d ⁻¹]	R^2 [%]	t_{Grenz} [d]	$t_{90\%}$ [d]	y_{CH_4} [m ³ kg ⁻¹]	CH_4 [%]
Maissilage	1	0,84	1,50	5,13	0,14	99,95 ²⁾	17,6	22,1	0,47	56,3
	2	0,81	1,49	5,70	0,12	99,96 ²⁾	20,1	24,8	0,45	56,0
	3	0,94	1,42	5,21	0,14	99,92 ²⁾	18,1	24,5	0,53	56,7
	4	0,90	1,44	6,16	0,12	99,92 ²⁾	21,3	28,3	0,49	54,3
Rübensilage	1	0,98	0,29	1,27	0,24	99,52 ¹⁾	12,4	8,6	0,49	49,6
	2	0,98	0,28	1,25	0,23	99,43 ¹⁾	12,8	9,0	0,47	48,6
	3	1,01	0,33	1,41	0,25	99,45 ¹⁾	11,7	7,9	0,51	51,1
	4	0,98	0,27	1,29	0,22	99,21 ¹⁾	13,3	9,5	0,48	48,6
Roggensilage	1	0,91	1,93	5,77	0,12	99,96 ²⁾	18,3	18,0	0,54	59,2
	2	0,89	1,89	5,95	0,12	99,93 ²⁾	18,9	19,1	0,52	58,6
	3	0,90	1,89	5,59	0,12	99,96 ²⁾	17,3	17,9	0,54	60,0
	4	0,92	1,81	5,77	0,12	99,93 ²⁾	18,8	19,4	0,55	60,2
Rindergülle 1	1	0,64	3,14	9,60	0,06	99,80 ²⁾	21,7	19,3	0,41	64,5
	2	0,59	3,18	10,28	0,05	99,78 ²⁾	22,8	20,5	0,37	63,6
Rindergülle 2	1	0,55	3,07	8,90	0,07	99,72 ²⁾	20,7	18,2	0,35	63,4
	2	0,59	3,02	9,58	0,06	99,74 ²⁾	22,0	19,8	0,37	63,3
	3	0,57	2,61	8,00	0,08	99,91 ²⁾	20,2	18,6	0,36	63,9
	4	0,60	2,60	9,08	0,07	99,92 ²⁾	22,1	21,1	0,39	63,8

¹⁾ Kurvenanpassung über Chapman-Funktion (Gl. 5)

²⁾ Kurvenanpassung über Hill-Funktion (Gl. 6)

Die spezifische Biogasrate ist bei der Vergärung von Rüben- und Maissilage bereits in den ersten Tagen am höchsten und durchläuft am Tag 1,04 bzw. 1,76 das Maximum. Sie erreicht bei Rübensilage mit bis zu 0,20 m³ kg⁻¹ d⁻¹ deutlich höhere Werte als beispielsweise Rindergülle. Bei Rindergülle ist die maximale spezifische Biogasrate in Höhe von 0,05 m³ kg⁻¹ d⁻¹ erst am Tag 6,67 erreicht. Ursache hierfür ist eine verzögert einsetzende Biogasproduktion, die im Extremfall Lag-Phase genannt wird. Die zeitliche Reihenfolge, in der die spezifische Biogasrate der vier dargestellten Varianten das jeweilige Maximum durchläuft, spiegelt sich auch in der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k wider (Tab. 7). Diese lässt sich mittels exponentieller Funktion gemäß Gl. 4 annäherungsweise ermitteln, auch wenn die Kurvenanpassung geringere Bestimmtheitsmaße beinhaltet. Ebenso wie der Zeitpunkt der maximalen spezifischen Biogasrate von Rübensilage über Maissilage und Roggen-GPS bis Rindergülle später ausfällt, so nimmt k in gleicher Reihenfolge von 0,25 über 0,14 und 0,12 bis 0,07 d⁻¹ ab. Damit

liegen die Werte im Bereich der Literaturangaben bei der diskontinuierlichen Vergärung von Obst- und Gemüsereststoffen mit k -Werten zwischen $0,02$ und $0,13 \text{ d}^{-1}$ (GUNASEELAN 2004) bzw. von Maissilage von ebenfalls $0,12 \text{ d}^{-1}$ (LINKE & SCHELLE 2001). Es kann also zusammengefasst werden, dass hier eine höhere substratspezifische Reaktionsgeschwindigkeit auch mit einer höheren spezifischen Biogasrate und einem schnelleren Erreichen des Maximums einhergeht. Auch beim Hohenheimer Biogasertragstest (HELFFRICH & OECHSNER 2003) zeigte die Methanbildungskurve bei der Roggenganzpflanze einen wesentlich flacheren Verlauf als bei der Rübensilage (MUKENGELE ET AL. 2006).

Die Kombination der erhöhten Abbaugeschwindigkeit sowie des höheren Wertes für y_{\max} bei Rübensilage gegenüber Rindergülle bewirkt in diesem Zusammenhang auch ein früheres Erreichen des Abbruchkriteriums t_{Grenz} . Bei der Rübensilage beträgt die spezifische Biogasrate bereits am Tag 11,7 nur noch 1 % des bis zu diesem Zeitpunkt angefallenen Biogasgesamtolumens. Bei der Rindergülle ist dies erst am Tag 22,2 der Fall. Darüber hinaus wird an diesem Tag erst 90,3 % von y_{\max} erzielt, während dieser Anteil bei der Rübensilage knapp elf Tage vorher zum Zeitpunkt t_{Grenz} schon 97,1 % beträgt. Der Wert für t_{Grenz} liegt bei Maissilage und Roggen-GPS mit 17,6 und 18,3 im mittleren Bereich. Zu diesem Zeitpunkt betragen die Gasausbeuten $0,72$ und $0,82 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ und machen damit 86,5 bzw. 90,3 % des Maximums aus. Dies verdeutlicht, dass auch definierte Abbruchkriterien keine Verallgemeinerung erlauben, welcher Anteil von y_{\max} innerhalb eines Batch-Versuchs im Labormaßstab erzielt werden kann. Die Versuche bestätigen aber, dass bei der Vergärung von NawaRos und Gülle im Batch-Verfahren bei ungehemmter Biogasproduktion eine pauschale Versuchsdauer von vier Wochen als ausreichend angesehen werden kann. Bei den in Abb. 4 dargestellten Beispielen wurden nach 28 Tagen 92 bis 100 % des Biogaspotentials erzielt. Auch nach BASERGA & EGGER sind bei 3 cm langem Frischgras- und Silage-Material im Batch-Versuch nach 25 Tagen 90-99 % der maximalen Gasausbeute erzielt worden (BASERGA & EGGER 1997). Je nach Reaktionsgeschwindigkeit wird 90 % von y_{\max} , also $t_{90\%}$, bei Rübensilage bereits nach 7,9-9,5 Tagen und bei Maissilage erst nach 22,1-28,3 Tagen erzielt. Nach CZEPUCK ET AL. benötigt Gelatine 19, Casein 21 und Sonnenblumenöl 24 Tage, um 90 % seines gesamten Normgases gebildet zu haben (CZEPUCK ET AL. 2006). Bei Batch-Versuchen mit acht Silomaisorten und Silagen aus Sonnenblumen, Hirse, Futterrüben und Rügenblatt war nur bei Sonnenblumensilage nach 36 Versuchstagen

die Gasproduktion nicht auf weniger als 1 % täglicher Zuwachs gesunken (OECHSNER & LEMMER 2003).

Die hier genannten Biogasausbeuten aus den NawaRos liegen meist oberhalb der Literaturangaben (Tab. 8). Dies kann auch daran liegen, dass in der Regel nicht das maximale Potential genannt wird, sondern die Biogasausbeute zu einem bestimmten als Abbruchkriterium definierten Zeitpunkt festgelegt wird.

Tab. 8: Literaturangaben zu Biogasausbeuten y_B und Methanausbeuten y_{CH_4} aus Mais-, Rüben- und Roggensilage bei Batch-Versuchen

Maissilage		Rübensilage		Roggen-GPS		Autor
y_B [m ³ kg ⁻¹]	y_{CH_4} [m ³ kg ⁻¹]	y_B [m ³ kg ⁻¹]	y_{CH_4} [m ³ kg ⁻¹]	y_B [m ³ kg ⁻¹]	y_{CH_4} [m ³ kg ⁻¹]	
0,81-0,94	0,45-0,53	0,98-1,01	0,47-0,51	0,89-0,92	0,52-0,55	Eigene Ergebnisse
0,33-0,96						AMON ET AL. 2004
	0,30-0,38					ANONYMUS 2006
0,53	0,34					BADGER ET AL. 1979
	0,32					GRONAUER ET AL. 2004
					0,4	GRUBER ET AL. 2004
			0,5			HASSAN 2003
0,68-1,05				0,63-0,73		HEIERMANN & PLÖCHL 2004
	0,26-0,36		0,35			KAISER ET AL. 2004
0,88		0,9				LINKE & SCHELLE 2001
0,92		1,06				LINKE 2003
0,68-0,86		0,88		0,73		LINKE ET AL. 2003
	0,40		0,38		0,37	MUKENGELE ET AL. 2006
0,7-0,8	0,40	0,7	0,40			OECHSNER & LEMMER 2003
	0,32-0,35					OECHSNER 2000
	0,49-0,55		0,58-0,62			PLÖCHL ET AL. 2001
0,5-0,6		0,85				SCHATTNER & GRONAUER 2000
	0,31-0,35					SCHUMACHER ET AL. 2006
0,62	0,33					SPECKMAIER ET AL. 2005
0,64				0,63		TENTSCHER & DUMSCH 2003
	0,41		0,46			WEILAND 2003B

Auch für Rindergülle liegen die Versuchsergebnisse unterhalb der Literaturangaben von 0,33-0,48 bzw. als Extremwerte 0,17-0,57 m³ kg⁻¹ oTS (AMON ET AL. 2004).

An die nach Gl. 13 korrigierten Methangehalte und daraus gebildeten Methan-Summenkurven lassen sich ebenfalls Kurven nach Gl. 5 bzw. 6 anpassen (Abb. 5). Zu Beginn des Batch-Versuchs wird überwiegend Kohlendioxid freigesetzt, so dass der Gehalt an Methan im Biogas anfangs gering ist und im Verlauf des Versuchs zunimmt. Dadurch verschiebt sich das Optimum der spezifischen Methanrate gegenüber dem der spezifischen Biogasrate nach rechts. Der aus der Kurvenanpassung resultierende Maximalwert ist das Methanpotential y_{CH_4} der getesteten Substrate. Dieser liegt bei den NawaRos im Bereich von 0,45 bis 0,55 m³ Methan pro kg oTS und bei der Rindergülle zwischen 0,35 und 0,41 m³ kg⁻¹. Damit liegen die Methanausbeuten bei den NawaRos

wie die Biogasausbeuten meist oberhalb der Literaturangaben (Tab. 8). Versuche ergaben, dass bei Mais die Ernte zum Ende der Teigreife, also das Reifestadium der hier getesteten Maissilagen, optimal sein soll (ANONYMUS 2006). Bezüglich der Methanausbeuten aus Rindergülle können in der Literatur Werte von 0,13-0,32 (OECHSNER 2000), 0,16 (GRONAUER ET AL. 2004) bzw. 0,17 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ oTS (HELFRICH & OECHSNER 2003) gefunden werden.

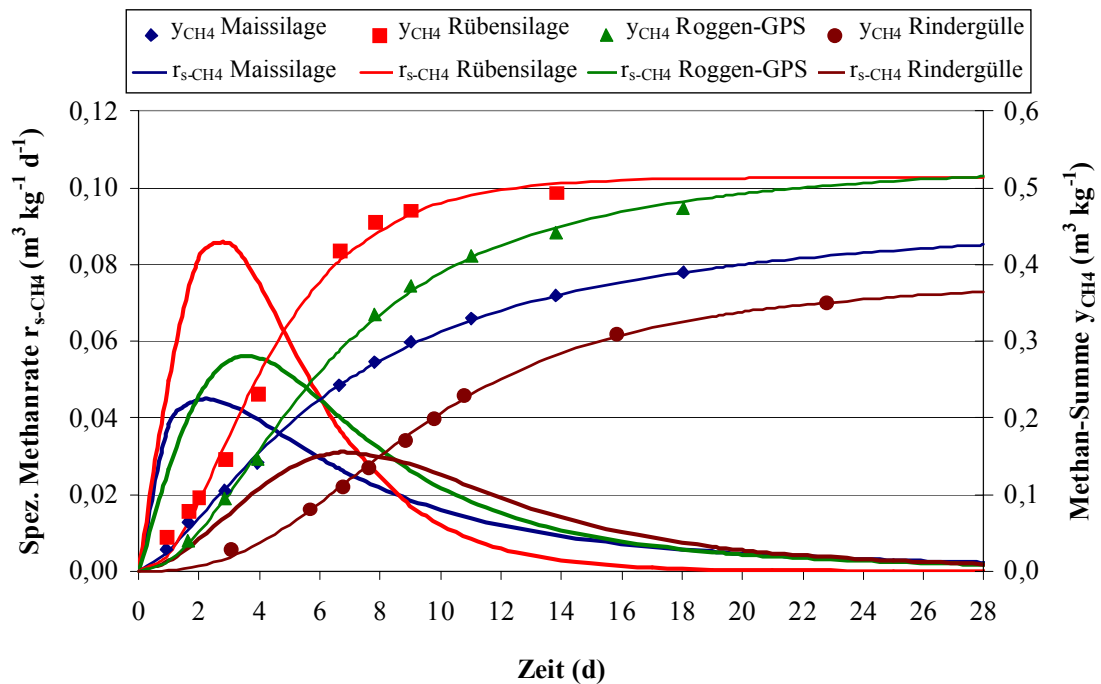


Abb. 5: Spezifische Methanrate r_{s-CH_4} und Methan-Summenkurve y_{CH_4} ausgewählter Batch-Versuche mit Mais-, Rübensilage, Roggensilage und Rindergülle

Dividiert man das Methanpotential mit dem Biogaspotential, so ergibt sich der durchschnittliche Methangehalt des Biogases bei den Batch-Versuchen. Dieser steigt als Mittelwert in der Reihenfolge Rübensilage, Mais-, Roggensilage bis Rindergülle mit 49,5 über 55,8 und 59,5 bis 63,6 %.

In der Literatur finden sich Methangehalte für Biogas aus Maissilage in Höhe von 51,9-54 % (ANONYMUS 2005), 52,5 % (OECHSNER & LEMMER 2003), 64-69 % (HEIERMANN & PLÖCHL 2004) und 66 % (TENTSCHER & DUMSCH 2003). Für Roggensilage finden sich Angaben in Höhe von 59-69 % (HEIERMANN & PLÖCHL 2004), 69 % (TENTSCHER & DUMSCH 2003) und für Rübensilage von 57,5 % (OECHSNER & LEMMER 2003). Als Mittelwert für Methangehalte aus Laborversuchen werden für Rindergülle von Milchvieh-Betrieben 61,9 % und für Schweinegülle 60,8 % angegeben (ANONYMUS 2005).

Die Ergebnisse der diskontinuierlichen Biogasproduktion bei 55°C (Batch 3 und 4) sowie an der BTN durchgeführten Versuche bei 35°C sind jeweils über die doppelt oder vierfach durchgeführten Varianten in Tab. 9 gemittelt. Es konnten in allen Fällen sehr gute Kurvenanpassungen mit R^2 über 99,0 % erzielt werden.

Tab. 9: Parameter y_{\max} , Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k und Bestimmtheitsmaß R^2 aus Kurvenanpassungen und die daraus berechneten Werte t_{Grenz} , $t_{90\%}$ sowie Methanausbeute y_{CH_4} und Methangehalt CH_4 bei Batch-Versuchen mit NawaRos und Gülle bei 55°C und 35°C (vgl. Tab. 1)

Substrat	Batch	Temp. [°C]	y_{\max} [m ³ kg ⁻¹]	k [d ⁻¹]	R^2 [%]	t_{Grenz} [d]	$t_{90\%}$ [d]	y_{CH_4} [m ³ kg ⁻¹]	CH_4 [%]
Maissilage	Batch 3	55	0,80	0,14	99,09 ¹⁾	18,1	14,8	0,38	47,7
Rübensilage	Batch 3	55	0,95	0,27	99,29 ¹⁾	11,3	7,7	0,45	47,7
Roggen-GPS	Batch 3	55	0,80	0,14	99,61 ¹⁾	16,2	12,6	0,42	52,7
Rindergülle 3	Batch 4	55	0,40	0,07	99,74 ¹⁾	24,5	21,6	0,24	60,3
Rindergülle 4	Batch 4	55	0,54	0,07	99,59 ¹⁾	24,1	21,3	0,32	60,3
Maissilage	Batch 5	35	0,63	0,17	99,74 ²⁾	15,8	12,1	-	-
Rübensilage	Batch 5	35	0,97	0,22	99,69 ²⁾	13,6	9,8	-	-
Roggen-GPS	Batch 5	35	0,61	0,16	99,48 ²⁾	15,4	11,6	-	-
Schweinegülle	Batch 5	35	0,51	0,09	99,19 ²⁾	25,8	26,2	-	-

¹⁾ Kurvenanpassung über Chapman-Funktion (Gl. 5)

²⁾ Kurvenanpassung über Hill-Funktion (Gl. 6)

Ein Vergleich der bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführten Batch-Versuche zeigt deutlich, dass mit zunehmender Temperatur k größer wird und damit die Werte für t_{Grenz} und $t_{90\%}$ abnehmen. Die Ergebnisse haben jedoch gezeigt, dass die Prozess-temperatur bei 35°C und 55°C keinen wesentlichen Einfluss auf die Methanausbeute hat. Vergleiche in der Literatur bei meso- und thermophilen Versuchen mit Futterrübensilage haben ebenfalls ergeben, dass in beiden Fällen gleich hohe Methanausbeuten erzielt werden (HASSAN 2003). Auffällig bei den vorliegenden Versuchen sind die deutlich niedrigeren Methangehalte bei höheren Temperaturen. Dies wird durch die geringere Wasserlöslichkeit des Kohlendioxids mit steigender Temperatur hervorgerufen. So beträgt zum Beispiel bei der Vergärung von Maissilage der Methangehalt im Biogas bei 55°C etwa 48 % und bei 35°C deutlich höhere 54-57 %. Stöchiometrisch sind maximale Biogausbeute eines Substrates und Methangehalt im Biogas festgelegt und nicht temperaturabhängig. Darüber hinaus kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich bei höheren Temperaturen nicht gewisse Mengen an gebildeten Säuren verflüchtigen und in die Gasometer entweichen, wo sie nicht mehr zu Biogas abgebaut werden. Dafür spricht auch, dass die Methanausbeuten bei der thermophilen Vergärung jeweils im unteren Bereich im Vergleich mit den anderen Versuchen liegen. Zusammenfassend kann man davon ausgehen, dass bei Batch-Versuchen mit höheren Temperaturen aufgrund der Verflüchtigung von Säuren etwas geringere Methanausbeuten zu erzielen sind. Wegen der geringeren Löslichkeit des CO₂ weist das Biogas jedoch geringere

Methangehalte auf und es ergibt sich eine höhere Biogasausbeute. Dem widerspricht GUNASEELAN, der aus Literaturangaben zusammenfasst, dass bei Batch-Versuchen die Methanausbeute und Effizienz der Vergärung im thermophilen Optimum bei 55°C höher ausfällt als im mesophilen Optimum bei 40°C (GUNASEELAN 1997).

Bei den Batch-Versuchen mit Rindergüllen erzielen Kurvenanpassungen bei mesophiler Vergärung über die Hill-Funktion und bei thermophiler Vergärung über die Chapman-Funktion wie bei den NawaRos zufriedenstellende Werte für R^2 von über 99,6 % (Tab. 7). Auch hier werden bei der thermophilen Vergärung (Batch 4) mit Werten von 0,24 bzw. 0,32 m³ kg⁻¹ oTS geringere Methanausbeuten aufgrund der Verflüchtigung von organischen Säuren erzielt. Ebenso besteht bei thermophiler Vergärung das Biogas mit 60,3 % zu geringerem Anteil aus Methan, da sich weniger CO₂ im Gärrest löst. Bei Batch 4 liegt k in Höhe von 0,07 d⁻¹ trotz höherer Prozesstemperatur im Bereich der Werte bei den mesophilen Versuchen mit 0,05 bis 0,08 d⁻¹. In allen Fälle ist dabei t_{Grenz} nach 20,2 bis 22,8 Tagen erreicht. Batch-Versuche mit Gülle im mesophilen Bereich bestätigen, dass nach 15-18 Tagen 80-85 % des Maximums erzielt worden sind (DEMIRBAS 2006).

Bei der mesophilen Vergärung von Schweinegülle wird mit y_{max} von 0,51 m³ kg⁻¹ oTS ein ähnlich hohes Biogaspotential ermittelt wie bei Rindergülle. Angaben zu Methanausbeuten können hier aufgrund fehlender Gasanalysen nicht getroffen werden. Es ist aber sicher, dass diese niedriger ausfallen würden als 0,48 m³ kg⁻¹ oTS, wie es für Schweinegülle bei meso- und thermophiler Vergärung im Batch-Versuch angegeben wird (HASHIMOTO 1984). Nach GRONAUER ET AL. wird mit Gülle von Wiederkäuern, die mit rohfaserreicherem Futter gefüttert werden, eine geringere Gasmenge erzielt als mit Schweinegülle. Dabei werden Methanausbeuten in Höhe von ca. 0,16 für Rindergülle und 0,23 m³ kg⁻¹ oTS für Schweinegülle genannt (GRONAUER ET AL. 2004). Versuche mit jeweils sieben Proben Rinder- und Schweinemist bestätigen, dass sowohl die theoretisch berechneten, als auch die in Batch-Versuchen ermittelten Methanausbeuten bei Schweinemist deutlich höher ausfallen. Eine Ursache wird in den höheren Fettgehalten des Schweinedungs gesehen (MOLLER ET AL. 2004). Auch SCHATTNER & GRONAUER geben mit einer Spanne für Literaturdaten von 0,2-0,4 für Rindergülle niedrigere Biogasausbeuten als bei Schweinegülle mit 0,30-0,43 m³ kg⁻¹ oTS an (SCHATTNER & GRONAUER 2000). In früheren Versuchen war das Methanpotential mit 0,5 m³ kg⁻¹ oTS bei Schweinegülle ebenfalls signifikant höher als bei Rindergülle mit 0,20-0,35 m³ kg⁻¹ oTS (HASHIMOTO 1983).

2.1.3.2 Kontinuierliche Versuche

Die Biogasausbeuten y_B aller semi-kontinuierlich durchgeführten Versuche sind zusammen mit der jeweiligen Raumbelastung B_R im Zeitverlauf im Anhang dargestellt (Abb. A 1 bis Abb. A 4). In jeder Graphik steht die Monovergärung eines NawaRos den beiden entsprechenden Kovergärungs-Varianten mit 33 % und 67 % Kosubstrat und der Vergärung der reinen Gülle gegenüber. Angaben zu y_B und B_R sowie die Anzahl der Messwerte n beziehen sich auf Wochen-Mittelwerte.

Biogasausbeuten bei mesophiler Vergärung

Bei der mesophilen Vergärung der NawaRos auf der Basis von Rindergülle (Abb. A 1) ist ein deutlich abnehmender Trend der Biogasausbeuten im Zeitverlauf bei gesteigerten Raumbelastungen zu verzeichnen. Dieser Trend ist bei der Vergärung von Rübensilage allerdings weniger stark ausgeprägt als bei Mais- und Roggensilage. In allen Fällen wurde zu Versuchsbeginn die Raumbelastung über 12 Wochen konstant bei B_R von $1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gehalten. Anschließend wurde B_R bis auf Werte in Höhe von ca. $6 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ bei den Kovergärungen und ca. $4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ bei den Monovergärungen gesteigert. Bei der ersten Raumbelastung werden mittlere Biogasausbeuten in Höhe von 0,82 bei Maissilage, 0,92 bei Rübensilage, 0,80 bei Roggen-GPS und $0,52 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ bei Vergärung von reiner Rindergülle erzielt ($n=9-11$). Bei einer gesteigerten Raumbelastung von etwa $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ fallen die Biogasausbeuten mit Mittelwerten von 0,67, 0,86, 0,63 bzw. $0,38 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ für die genannten Substrate geringer aus ($n=4-5$). Bei der Monovergärung von Maissilage tritt ab B_R von $4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ eine deutliche Hemmung auf, und y_B fällt schlagartig ab. Bei der Monovergärung von Rübensilage wurde B_R in der 51. bis 53. Woche (hier nicht dargestellt) von $4,0$ auf $5,4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gesteigert, was ein abruptes Erliegen der Biogasproduktion mit sich brachte. Bei der Roggen-GPS als Monosubstrat liegen für die Beschreibung dieses Überlastungsprozesses nicht genügend Daten vor. Bei allen untersuchten Kovergärungen und der Vergärung reiner Rindergülle ist ebenfalls ein besonders ausgeprägter Rückgang der Biogasausbeute bei gesteigerter B_R von über $4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ (43. bis 46. Woche) zu beobachten.

Bei der mesophilen Vergärung auf Basis von Schweinegülle (Abb. A 2) wird y_B erst ab der 19. Woche ausgewertet, da erst ab diesem Zeitpunkt eine einheitliche Gasmengenfassung durchgeführt wurde. Die kontinuierliche Beschickung der Reaktoren erfolgte jedoch überwiegend auch in den ersten 19 Wochen bei B_R von $1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$.

Bei der Vergärung von Maissilage als Mono- und Kosubstrat sind nur geringfügige Auswirkungen von B_R auf y_B zu verzeichnen. Die gemittelte y_B fällt bei der Monovergärung bei einer B_R -Steigerung von 1 auf etwa $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ von $0,83$ ($n=4$) nur auf $0,76 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ ($n=10$) ab. Bei der Vergärung von Rübensilage, Roggen-GPS und Schweinegülle sowie den entsprechenden Kovergärungen sind hingegen ähnliche Tendenzen der abnehmenden y_B bei gesteigerten B_R wie bei der mesophilen Vergärung auf Rindergüllen-Basis zu erkennen. Dabei liegen die Gasausbeuten bei B_R von $1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mit $0,96$ für Rübensilage, $0,78$ für Roggen-GPS und $0,43 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ für Schweinegülle ($n=3-4$) deutlich über y_B bei B_R von etwa $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mit $0,87$, $0,61$ bzw. $0,32 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ ($n=5-11$). Bei allen Varianten wurde B_R auf ca. $3,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gesteigert. Die Monovergärungs-Varianten wurden in der Regel mit beginnender Prozesshemmung abgebrochen.

Bei den genannten mesophilen Versuchen (Abb. A 1 und Abb. A 2) ist deutlich zu erkennen, dass mit der Monovergärung der NawaRos die höchsten und mit der Vergärung der reinen Gülle die niedrigsten Biogasausbeuten erzielt werden. Die y_B -Kurven der Kovergärungs-Varianten verlaufen dabei in gleichen Abständen zwischen den beiden Extremen. Dieser Zusammenhang wird deutlich, wenn man y_B mehrerer Mischungen bei einer festgelegten B_R über den Anteil der oTS aus dem Kosubstrat bezogen auf die oTS in der Mischung p_E abträgt. In Abb. 6 sind für die mesophile Vergärung die y_B aller Varianten bei B_R von $3 \pm 0,25 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ dargestellt.

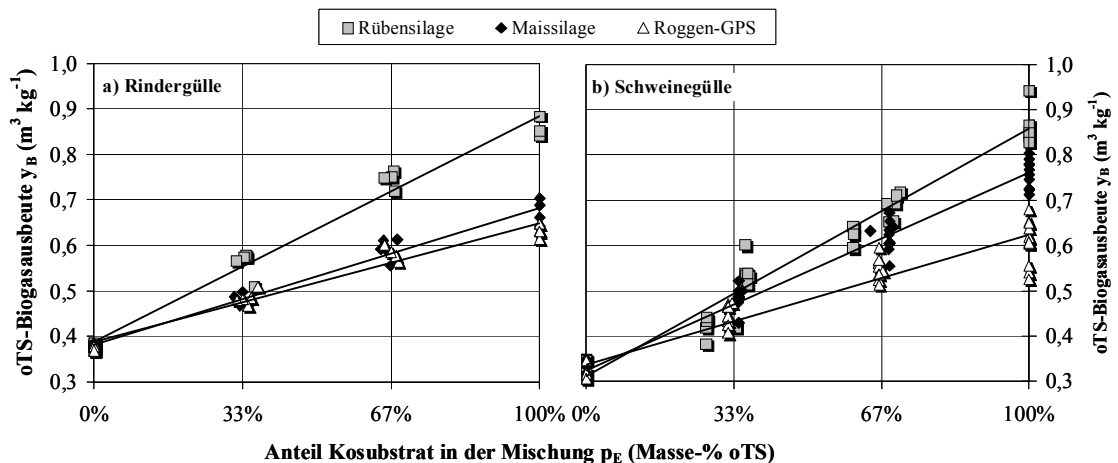


Abb. 6: oTS-Biogasausbeuten y_B bei verschiedenen oTS-Anteilen aus NawaRos in der Mischung mit a) Rindergülle und b) Schweinegülle bei einer Raumbelastung von $3 \pm 0,25 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$

In allen Fällen besteht ein linearer Zusammenhang zwischen y_B und p_E . Die B_R -abhängige Biogasausbeute einer Mischung aus NawaRo und Gülle lässt sich also bei gegebenem Anteil der oTS aus dem NawaRo bei Kenntnis der Gasausbeuten der Einzel-

substrate berechnen (Gl. 17). Dabei ist zu beachten, dass sich die Gasausbeuten der Einzelsubstrate y_K und y_G auf die gleiche B_R beziehen müssen wie die für die Vergärung der Mischung angestrebte B_R .

$$y_M = y_G + (y_K - y_G) \cdot p_E \quad (17)$$

y_M : oTS-Biogasausbeute aus der Gülle-Kosubstrat-Mischung M
 y_G : oTS-Biogasausbeute aus der Gülle G
 y_K : oTS-Biogasausbeute aus dem Kosubstrat K
 p_E : Anteil oTS aus dem Kosubstrat in der Mischung mit Gülle

Entgegen mancher Meinung in der Literatur (MUKENGELE ET AL. 2006) belegen die Versuchsergebnisse, dass es bei der Vergärung von NawaRos und Gülle hinsichtlich y_B zu keinen Synergieeffekten kommt. Mögliche Synergieeffekte können sich jedoch hinsichtlich der Prozessstabilität bei höheren B_R positiv bemerkbar machen, wenn bei Mischungen mit Gülle die Pufferkapazität zum Tragen kommt (SCHATTNER & GRONAUER 2000). Versuche mit Futterrübensilage von ABDEL-HADI ET AL. zeigten, dass bei einer Verweildauer t_m von 20 Tagen maximale Biogasausbeuten bei einem Mischungsverhältnis von 75 % oTS aus der Silage in der Mischung mit Rindergülle bei mesophiler Vergärung und von 50 % bei thermophiler Vergärung erzielt werden. Zu berücksichtigen ist dabei aber, dass gleiche t_m bei unterschiedlichen Mischungen aus Silage und Gülle unterschiedliche B_R mit sich bringen. Nichtsdestotrotz kommt es bei alleiniger Vergärung von Gehaltrübensilage zu reduzierten Methanausbeuten je kg Substrat bei sehr hohen Raumbelastungen und instabilen pH-Werten (ABDEL-HADI ET AL. 2002).

Biogasausbeuten bei thermophiler Vergärung

Bei der thermophilen Vergärung der NawaRos auf Basis von Rindergülle (Abb. A 3) ist die Abnahme von y_B im Zeitverlauf bei gesteigerter B_R weniger deutlich zu erkennen als bei der mesophilen Vergärung. Es kann also geschlussfolgert werden, dass bei höheren Temperaturen ein schnellerer Abbau erfolgt, so dass auch bei höheren Raumbelastungen noch hohe Gasausbeuten erzielt werden. Ähnlich wie bei der mesophilen Vergärung betragen die gemittelten Biogasausbeuten bei B_R von etwa $1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ bei der Vergärung von Maissilage 0,78, Rübensilage 0,81, Roggen-GPS 0,78 und Rindergülle $0,44 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS (n=9-14). Bei B_R von etwa $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ist y_B bei Maissilage und Rindergülle jedoch noch immer hoch mit Mittelwerten von 0,74 bzw. $0,38 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS (n=5). Bei der thermophilen Monovergärung von Rübensilage und Roggen-GPS bewirkt B_R von etwa $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ schon deutliche Hemmungen, die bis

zum Erliegen der Biogasproduktion führen. Bei allen thermophilen Kovergärungen und der Vergärung reiner Rindergülle wurde B_R bis maximal $4,3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gesteigert, was in keinem der Fälle eine ausgeprägte Hemmung des Prozesses bewirkt.

Bei der thermophilen Vergärung auf Basis von Schweinegülle liegen bei den Monovergärungen relativ große Schwankungen bezüglich y_B vor (Abb. A 4). Während der ersten Versuchsphase werden bei B_R Mittelwerte für y_B aus Mais-, Rüben- und Roggensilage von $0,80$, $0,84$ bzw. $0,76 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ ($n=11-13$) erzielt. Damit unterscheiden sich die Ergebnisse kaum von denen bei der Vergärung auf Basis vom Rindergüllen-Impf-schlamm. Es ist jedoch eine deutlichere Abnahme von y_B bei gesteigerter B_R zu erkennen. Mit B_R von über $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ kommt es bei allen Monovergärungen zu einem starken Rückgang in der Biogasproduktion. Die Kovergärungs-Varianten und die Versuchsreihe mit reiner Schweinegülle wurden während der Versuchsphase mehrfach unterbrochen, da es nach B_R -Steigerungen häufig zu sehr starken Prozessstörungen kam. In diesen Fällen liegen nicht ausreichend Versuchsergebnisse vor, um den Einfluss von B_R auf y_B beschreiben zu können. Tendenziell ist jedoch auch hier zu erkennen, dass y_B bei geringen B_R mit zunehmendem Anteil Kosubstrat in der Mischung steigt (vgl. Gl. 17). Aus reiner Schweinegülle wurde dabei von der 4. bis 6. Woche bei B_R von $1 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ein Mittelwert für y_B von $0,48 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ beobachtet. Bei B_R von $2,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ (46.-50. Woche) werden mit Mittelwerten in Höhe von $0,10 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ deutlich niedrigere Gasausbeuten gegenüber $0,42 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ bei mesophiler Vergärung erzielt.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass entgegengesetzt zur mesophilen Vergärung auf Basis von z.B. Rindergülle die Stabilität des Prozesses mit höherem Gülleanteil nicht zu-, sondern abnimmt.

Zusammenfassend lassen die vorliegenden Ergebnisse darauf schließen, dass die Abbaugeschwindigkeit der organischen Substanz im kontinuierlichen Prozess vom jeweiligen Substrat, dem eingesetzten Impfmateriale, der Raumbelastung und der Prozesstemperatur abhängt.

Biogas-Zusammensetzungen

Die Auswertung der Biogas-Zusammensetzung im Zeitverlauf (hier nicht dargestellt) zeigt, dass diese im ungehemmten Bereich von B_R unabhängig zu sein scheint. Der Literatur sind unterschiedliche Aussagen über einen möglichen Zusammenhang zu entnehmen. Bei kontinuierlichen Versuchen mit Schweinegülle zeigten sich bei unterschiedlichen B_R einheitliche Methangehalte von 61% bei der thermophilen

Vergärung und ansteigende Methangehalte mit zunehmender B_R bei mesophiler Vergärung (HASHIMOTO 1983). Bei Lebensmittelabfällen wurde hingegen nachgewiesen, dass mit zunehmender B_R und abnehmender t_m der Methangehalt im Biogas abnimmt (HEO ET AL. 2003). Versuche mit Rindermist wiesen schließlich nach, dass es keinen Einfluss von t_m auf y_B gibt (SANCHEZ ET AL. 1992). Bei den vorliegenden Versuchen nimmt der Methangehalt im Biogas erst bei hohen B_R und bereits deutlich ausgeprägten Prozesshemmungen ab. Im Folgenden wird daher auf die im ungehemmten Bereich gemittelten Biogas-Zusammensetzungen je Versuchsvariante eingegangen (Tab. 10). Da das Biogas jeweils über einen Zeitraum von mindestens einem Tag im Gasbeutel gesammelt wurde und erst mehrere Stunden nach der täglichen Zugabe analysiert wurde, kann davon ausgegangen werden, dass die Biogas-Zusammensetzung trotz semi-kontinuierlicher Betriebsform repräsentativ ist. Bei Versuchen mit Futterrübensilage²⁴ zeigte sich, dass kurz nach der Zugabe der Gehalt an CO_2 auf bis zu 50 % anstieg. Danach sank er kurzfristig stark ab und pendelte sich nach einigen Stunden bei 31 % ein.

Tab. 10: Anteile von Methan CH_4 , Kohlendioxid CO_2 und Schwefelwasserstoff H_2S in Biogas bei der Vergärung von NawaRos als Mono- und Kosubstrat mit Gülle (\pm Standardabweichung)

Anteil in Mischung	mesophil			thermophil		
	CH_4 [Vol.-%]	CO_2 [Vol.-%]	H_2S [ppm]	CH_4 [Vol.-%]	CO_2 [Vol.-%]	H_2S [ppm]
Basis Rindergülle						
100 % Maissilage	54,5 \pm 1,5	45,0 \pm 2,2	252 \pm 401	56,5 \pm 1,2	45,2 \pm 1,7	41 \pm 44
67 % Maissilage	56,2 \pm 1,1	42,6 \pm 1,4	568 \pm 438	57,6 \pm 1,6	43,2 \pm 1,6	185 \pm 223
33 % Maissilage	58,2 \pm 1,1	40,1 \pm 1,4	1061 \pm 663	59,0 \pm 1,3	41,2 \pm 1,3	82 \pm 200
100 % Rübensilage	55,4 \pm 2,4	42,7 \pm 3,3	74 \pm 187	56,7 \pm 2,6	44,1 \pm 3,1	16 \pm 13
67 % Rübensilage	56,4 \pm 2,1	41,6 \pm 2,9	219 \pm 312	59,1 \pm 2,4	41,1 \pm 2,4	27 \pm 16
33 % Rübensilage	58,4 \pm 1,3	39,8 \pm 1,4	720 \pm 592	60,9 \pm 1,7	40,3 \pm 1,7	798 \pm 635
100 % Roggen-GPS	57,4 \pm 1,3	40,6 \pm 1,5	209 \pm 304	58,6 \pm 1,8	42,3 \pm 2,3	29 \pm 18
67 % Roggen-GPS	58,5 \pm 1,3	39,6 \pm 1,7	747 \pm 539	59,6 \pm 2,3	41,3 \pm 2,5	403 \pm 419
33 % Roggen-GPS	60,0 \pm 1,2	38,0 \pm 1,2	1148 \pm 635	60,7 \pm 1,9	40,3 \pm 1,8	839 \pm 572
100 % Rindergülle	61,5 \pm 2,0	35,9 \pm 1,6	1405 \pm 733	61,9 \pm 1,4	38,9 \pm 1,5	1208 \pm 669
Basis Schweinegülle						
100 % Maissilage	52,1 \pm 3,3	43,9 \pm 3,2	225 \pm 152	50,4 \pm 1,2	37,0 \pm 2,0	49 \pm 33
67 % Maissilage	53,5 \pm 1,5	41,2 \pm 1,6	641 \pm 180	48,3 \pm 3,3	36,8 \pm 2,8	321 \pm 254
33 % Maissilage	56,1 \pm 1,9	36,3 \pm 1,7	1015 \pm 454	53,9 \pm 4,0	33,5 \pm 4,6	534 \pm 403
100 % Rübensilage	51,2 \pm 4,0	44,2 \pm 3,5	111 \pm 53	52,0 \pm 3,2	36,8 \pm 2,7	47 \pm 61
67 % Rübensilage	55,3 \pm 2,2	39,8 \pm 1,1	505 \pm 145	50,6 \pm 4,6	34,9 \pm 3,4	120 \pm 127
33 % Rübensilage	57,8 \pm 2,0	35,8 \pm 2,6	945 \pm 298	50,0 \pm 5,6	33,9 \pm 4,5	387 \pm 309
100 % Roggen-GPS	54,1 \pm 1,8	38,9 \pm 1,4	114 \pm 25	51,1 \pm 2,0	36,4 \pm 1,8	129 \pm 136
67 % Roggen-GPS	55,5 \pm 1,6	37,6 \pm 1,1	355 \pm 219	51,2 \pm 2,4	35,0 \pm 2,7	195 \pm 195
33 % Roggen-GPS	57,6 \pm 1,7	34,3 \pm 1,0	668 \pm 297	50,6 \pm 5,5	34,1 \pm 3,6	362 \pm 320
100 % Schweinegülle	61,3 \pm 2,3	29,1 \pm 1,1	828 \pm 324	51,0 \pm 6,1	32,9 \pm 4,8	764 \pm 358

²⁴ <http://www.triesdorf.de/EBA/graskraftprojekte.htm#Futterrübenvergärung%202001>

Ähnlich wie bei den Biogasausbeuten besteht offenbar auch beim Methan- bzw. Kohlendioxid-Gehalt des Biogases ein annähernd linearer Zusammenhang zum Anteil an oTS aus dem Kosubstrat in der Mischung mit Gülle (Abb. A 5). Es ist bekannt, dass kohlenhydratreiche Pflanzen niedrigere Methankonzentrationen im Biogas aufweisen, da nach stöchiometrischen Berechnungen aus Kohlenhydraten ein Methangehalt im Biogas von nur 50 % erreicht wird (OECHSNER ET AL. 2003). Bei der mesophilen Monovergärung der NawaRos auf Basis des Rindergüllen-Impfschlamms liegen die Methangehalte im Biogas bei 54,5 %, 55,4 % und 57,4 % für Mais-, Rüben- und Roggensilage. Mit abnehmendem Anteil Kosubstrat in der Mischung bis hin zu reiner Rindergülle-Vergärung steigt der Methangehalt im Biogas auf 61,5 % an. Analog nimmt der Gehalt an Kohlendioxid von 45,0 %, 42,7 % bzw. 40,6 % bis 35,9 % bei der Gülle-Vergärung stetig ab. Damit werden ähnlich hohe Methangehalte erzielt wie in der Literatur für kontinuierliche Vergärung angegeben. Z.B. zeigten Versuche, dass der Methangehalt im Biogas bei der Vergärung von reiner Maissilage bei 57 % lag (STEWART ET AL. 1984). In Praxis-Versuchen lagen die Methangehalte bei Kovergärung aus ca. 64 % Maissilage mit Gülle bei ebenfalls 54 % (GRUBER 2004). Auch ein Vergleich der Gülle- und Kovergärung mit Maissilage im Labormaßstab zeigte, dass der Methangehalt von 57-60 % auf 54-47 % absinkt (LEMMER & OECHSNER 2001).

Bei der thermophilen Vergärung auf Basis von Rindergülle werden im Mittel um 0,4-2,7 % höhere Methangehalte erzielt als bei der mesophilen. Die Linearität zu p_E ist in gleichem Maße gegeben. Trotz der höheren Methangehalte bei thermophiler Vergärung übertreffen auch die Kohlendioxidgehalte stets die der mesophilen Vergärung. Die Summe aus CH_4 und CO_2 liegt rein rechnerisch bei der mesophilen Vergärung durchschnittlich bei 97-100 % und bei den thermophilen Versuchen bei 100-101 %. Als Ursache für die etwas höheren Methan- und Kohlendioxidgehalte im Biogas bei thermophiler Vergärung können also versuchsbedingte Einflussgrößen in den aufeinander folgenden Versuchsjahren nicht ausgeschlossen werden. Versuche mit Rübensilage als Monosubstrat ergaben für mesophile und thermophile Vergärung etwa gleiche Methangehalte im Biogas, die mit 62-64 % allerdings sehr hoch ausfallen (SCHERER ET AL. 2003).

Bei den Versuchen auf Basis der Schweinegülle liegen jeweils weniger Gasanalysen vor (mesophil $n=7-18$ bzw. thermophil $n=9-34$), so dass die Mittelwert-Bildung nicht so genau ist wie bei den Versuchen auf Basis der Rindergülle-Vergärung ($n=51-64$ bzw. $n=40-50$).

Bei der mesophilen Vergärung auf Basis von Schweinegülle werden bei den Monovergärungen geringere Methan- und Kohlendioxid-Gehalte gemessen als bei den Versuchen auf Basis der Rindergülle. Dementsprechend beträgt die Summe der beiden Gase auch nur 90-96 %, was ebenfalls an einer Ungenauigkeit des Gasanalysegerätes liegen kann. Der lineare Trend des zunehmenden CH₄-Gehaltes und abnehmenden CO₂-Gehaltes bei geringerem Anteil an Kosubstrat in der Mischung mit Schweinegülle liegt auch hier deutlich vor. Damit besteht das Biogas bei der mesophilen Vergärung reiner Schweinegülle ähnlich wie bei der Rindergülle-Vergärung aus 61,3 % CH₄ und 29,1 % CO₂. Bei der thermophilen Vergärung fallen alle Methangehalte deutlich niedriger aus als bei der thermophilen Vergärung auf Basis der Rindergülle. Auch liegt der Methangehalt bei der reinen Gülle-Vergärung mit 51,0 % teilweise unterhalb des Methangehaltes bei der Monovergärung. In diesen Fällen betragen die CH₄-Gehalte für Mais-silage 50,4 %, für Rübensilage 52,0 % und für Roggen-GPS 51,1 %. Beide Phänomene können durch die erheblich größere Hemmung der thermophilen Vergärung bei Einsatz von N-reicher Schweinegülle gegenüber Rindergülle erklärt werden. Auch bei den Versuchen von HASHIMOTO wurde aus Schweinegülle Biogas produziert, das bei 55°C nur 41,7 ± 10,7 % Methan enthielt und damit deutlich weniger als das Biogas bei 35°C mit 60,9 ± 0,8 % Methan (HASHIMOTO 1983).

Die Gehalte an Schwefelwasserstoff H₂S im Biogas unterliegen sehr starken Schwankungen (Tab. 10), aus den Mittelwerten lassen sich jedoch deutliche Trends ableiten (Abb. A 6). So wie der CH₄-Gehalt steigt auch der Gehalt an H₂S im Biogas mit abnehmendem Anteil Kosubstrat in der Mischung deutlich an. Höchste Gehalte werden bei mesophiler Vergärung auf Basis von Rindergülle erzielt. Bei der mesophilen Vergärung von Mais- und Rübensilage unterscheidet sich der Einsatz von Rinder- und Schweinegülle bezüglich des H₂S-Gehaltes nicht deutlich. Nur bei der Roggen-Vergärung fallen die H₂S-Gehalte bei der Vergärung auf Basis von Schweinegülle niedriger aus. In allen Fällen liegen die Gehalte an H₂S bei mesophiler Vergärung deutlich höher als bei der thermophilen Vergärung.

Chemische Analysen der Zu- und Abläufe

Chemische Analysen der Abläufe bezüglich pH-Wert, Anteil organischer Säuren sowie Gesamtstickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff $\text{NH}_4\text{-N}$ dienen der Charakterisierung des kontinuierlichen Biogasprozesses hinsichtlich seiner Stabilität. Diese wöchentlich ermittelten Analysenergebnisse im Zeitverlauf sind im Anhang für die mesophilen (Abb. A 7 bis Abb. A 9) und thermophilen (Abb. A 10 bis Abb. A 12) Versuche dargestellt. Ergänzend enthalten die Graphiken Angaben zu N_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$ des Inputs. Dabei entsprechen die Angaben bei den Monovergärungen und der Gülle-Vergärung auf Basis des Rindergüllen-Impfschlamm (Graphiken 1) den Mittelwerten aller Analysen während einer Versuchsphase. Da die Analysen bei den NawaRos nur am ATB durchgeführt wurden, werden bei den Versuchen auf Basis des Schweinegüllen-Impfschlamm (Graphiken 2) Mittelwerte aller am ATB durchgeführten Analysen bezüglich N_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$ aus den NawaRos zugrunde gelegt. Bei den Kovergärungs-Varianten ergeben sich die Gehalte aus den entsprechend gemittelten Analysenergebnissen und dem zeitlich geringfügig variierenden Frischmasse-Anteil des Kosubstrates und der Gülle in der Mischung.

Die Analysenergebnisse der Reaktorabläufe bestätigen die Aussagen, dass es zwischen der 30. und 40. Woche bei der mesophilen Monovergärung von Maissilage auf Basis des Rindergüllen-Impfschlamm sowie bei allen thermophilen Monovergärungs-Varianten zu Prozesshemmungen kommt, die zwischen der 40. und 50. Woche zu starken Übersäuerungen der Reaktorinhalte führen. Die Gehalte an organischen Säuren steigen in diesen Fällen auf Werte von meist über 10 g kg^{-1} an, und die pH-Werte fallen ab. Auf die Auswirkung von Hemmfaktoren auf die Biogasproduktion wird in Kap. 2.1.3.3 noch näher eingegangen. In diesem Zusammenhang werden auch die Säure-Gehalte von über 10 g kg^{-1} in Abhängigkeit von B_R sowie der Anteil an Propionsäure betrachtet. Im Folgenden sollen die Zeitverläufe der Analysenergebnisse in den nicht wesentlich gehemmten Bereichen erläutert werden.

Sieht man von den Bereichen der Reaktorüberlastung ab, so lassen sich die wöchentlich gemessenen pH-Werte mit Standardabweichungen zwischen 0,08 bis 0,23 mitteln. Die Art des Inputs scheint dabei keinen Einfluss auf den mittleren pH-Wert auszuüben. Lediglich die Prozesstemperatur bewirkt unterschiedlich hohe pH-Werte. So liegen die mittleren pH-Werte bei der mesophilen Vergärung zwischen 7,76 (Abb. A 8-1a) und 8,11 (Abb. A 7-2d) und bei der thermophilen Vergärung zwischen 8,25 (Abb. A 11-1a)

und 8,43 (Abb. A 10-2d). Damit gilt für jede Versuchsvariante, dass bei erhöhter Temperatur auch höhere pH-Werte beobachtet werden.

Besonders bei der Monovergärung von Rübensilage kommt es zu einem ausgeprägten Aufschäumen des Reaktorinhaltes. Dies wurde auch beim Graskraft-Projekt 1998 in Triesdorf²⁵ beobachtet. Als Ursache hierfür kann das plötzliche Entweichen von Kohlendioxid aus der Silage gesehen werden. Es wird frei, wenn die Silage mit pH-Werten von durchschnittlich 3,4-3,9 (vgl. Tab. 6) mit den höheren pH-Werten des Reaktorablaufs vermischt wird.

Die Analyseergebnisse zum Anteil an organischen Säuren bei den Versuchen auf Basis von Rindergülle (Graphiken 1) und Schweinegülle (Graphiken 2) können nicht miteinander verglichen werden, da unterschiedliche Analysemethoden angewandt wurden. Im ersten Fall werden höhere Angaben gemacht, da es bei dieser Methode zu keinem Austreiben des Kohlendioxids in den Abläufen kam. Es ist jedoch in beiden Fällen festzustellen, dass der Gehalt an organischen Säuren nicht wesentlich von dem Inputmaterial, sondern vorwiegend von der Temperatur und der gesteigerten B_R im Zeitverlauf abhängt. Betrachtet man bei der mesophilen Vergärung die Zeiträume, in denen B_R von $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ nicht überschritten werden, so schwankt der Gehalt an organischen Säuren bei den Versuchen auf Basis von Rindergülle (Abb. A 7 bis Abb. A 9, Graphiken 1) stets zwischen 1 und 4 g kg^{-1} . Bei den Versuchen auf Basis von Schweinegülle (Graphiken 2) liegen die Gehalte an organischen Säuren im wesentlichen zwischen 0 und 1 g kg^{-1} und nur in Einzelfällen zwischen 1 und 2 g kg^{-1} .

Mit den erhöhten Temperaturen bei der thermophilen Vergärung steigen in allen Fällen auch die Gehalte an organischen Säuren an. Bei den Versuchen auf Basis von Rindergülle (Abb. A 10-Abb. A 12, Graphiken 1) liegen in den ersten drei Versuchswochen hohe Gehalte an organischen Säuren von $4\text{-}6 \text{ g kg}^{-1}$ vor. Der Prozess stabilisiert sich jedoch nach kurzer Zeit und weist für den Zeitraum, in dem B_R maximal $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ beträgt, für die Kovergärungs-Varianten Bereiche zwischen 1 und 5 g organische Säuren pro kg FM auf. Bei den Monovergärungs-Varianten erfolgen schon bei geringeren B_R -Werten ausgeprägte Akkumulationen der Säuren.

Bezüglich der thermophilen Kovergärungen mit Schweinegülle (Abb. A 10-Abb. A 12, Graphiken 2), und besonders ausgeprägt bei der alleinigen Vergärung der Schweine-

²⁵ <http://www.triesdorf.de/EBA/graskraftprojekte.htm#Futterrübenvergärung%202001>

gülle, steigen die Gehalte an organischen Säuren mit höheren B_R so schnell an, dass es mehrfach während des Langzeitversuches zu einer extremen Hemmung kam. Die Versuche zeigen, dass mit Schweinegülle als Grundsubstrat oder alleinigem Substrat eine stabile Biogasproduktion bei B_R von über $2 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ im thermophilen Bereich nicht möglich ist. Bei B_R von $2,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ (ab 45.-46. Woche) liegen die Gehalte an organischen Säuren bei den Kovergärungen stets zwischen 5 und 10 g kg^{-1} bzw. bei reiner Schweinegülle-Vergärung bei $5-8 \text{ g kg}^{-1}$. Eine vergleichbare Studie zur Schweinegülle-Vergärung bei 35°C und 55°C kommt zu ähnlichen Ergebnissen (HASHIMOTO 1983). Dabei beträgt der Gehalt an organischen Säuren bei einer mittleren Verweilzeit von 25 Tagen, was in diesem Fall einer B_R von $2,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ entspricht, bei 35°C ca. 1 g kg^{-1} und bei 55°C bis zu 9 g kg^{-1} .

Für die vergorenen Einzelsubstrate sind die Stickstoffgehalte je Versuchsphase gemittelt in Tab. 11 zusammengefasst. Ausgehend von den Stickstoffgehalten der Impfgüllen (vgl. Tab. 3) entwickeln sich die Nährstoffgehalte der Reaktorabläufe im Zeitverlauf gemäß der Anteile an N_{ges} und $\text{NH}_4\text{-N}$ im Input.

Tab. 11: Analyseergebnisse pH-Wert, Ammonium-Stickstoff $\text{NH}_4\text{-N}$ und Gesamt-Stickstoff N_{ges} der bei der kontinuierlichen Vergärung auf Basis von Rindergülle (RG) und Schweinegülle (SG) eingesetzten Einzelsubstrate

Substrat	RG-Mesophil			RG-Thermophil			SG-Mittelwert		
	pH [-]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [g kg ⁻¹]	N_{ges} [g kg ⁻¹]	pH [-]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [g kg ⁻¹]	N_{ges} [g kg ⁻¹]	pH [-]	$\text{NH}_4\text{-N}$ [g kg ⁻¹]	N_{ges} [g kg ⁻¹]
Maissilage	3,7	0,33	4,12	3,4	0,34	4,94	3,8	0,33	4,42
Rübensilage	3,7	0,17	1,49	3,4	0,41	2,53	3,8	0,25	1,89
Roggen-GPS	4,6	1,73	3,60	4,4	1,16	3,57	4,6	1,52	3,59
Gülle	7,0	1,71	4,01	6,8	1,43	3,19	7,6	4,10	5,50

Die Zeitverläufe der Gehalte an N_{ges} in den Reaktorabläufen zeigen deutlich, dass es zu einer Anreicherung von N_{ges} kommt, wenn die Gehalte des Inputs annähernd gleich oder höher sind als die des Startmaterials. Dies ist bei allen Varianten der Vergärung von Maissilage und Roggen-GPS der Fall, am ausgeprägtesten jedoch bei den Monovergärungs-Varianten. So lässt sich in allen Fällen ausgehend von $3-4 \text{ g } N_{\text{ges}} \text{ kg}^{-1}$ im Ablauf ein Anstieg um etwa 2 g kg^{-1} beobachten. Zu der Stickstoff-Akkumulation im Ablauf kommt es, da der Stickstoff aus dem Input nicht über das Gas entweicht, sondern im Reaktor verbleibt. Je höher die auf Frischmasse bezogene Biogasausbeute aus dem Input ist, desto mehr Kohlenstoff und Wasserstoff entweichen über das Gas, so dass sich das C:N-Verhältnis im Gärrest umso mehr verengt. Da die Biogasausbeute je kg FM aus Gülle deutlich niedriger ist als die aus NawaRos, kommt es bei der Gülle-

Vergärung auch zu geringeren N-Anreicherungen. Dieser Zusammenhang kann auch eine Ursache für die bei den meisten Versuchs-Varianten beobachteten geringfügigen Rückgängen der N-Gehalte im Ablauf in den jeweils letzten Versuchswochen bei gesteigerten B_R sein. Bei den Varianten der mesophilen Vergärung von Rindergülle und von 33 % Roggen-GPS mit 67 % Rindergülle kam es aufgrund von Undichtigkeiten bei den beiden Reaktoren nach sechs bzw. drei Wochen zu einer Verdünnung der Reaktorinhalte mit Wasser, die sich in einem abrupten Abfall der N-Gehalte bemerkbar machen.

Bei der mesophilen und thermophilen Vergärung von Rübensilage kommt es aufgrund der geringeren N-Gehalt in Höhe von 1,5 und 2,5 g kg⁻¹ bzw. im Mittelwert von 1,9 g kg⁻¹ zu keiner Anreicherung, sondern zur Abnahme des N-Gehaltes im Ablauf vom Gehalt des Impfschlammes bis etwa zum Gehalt des Inputs.

Bei der Entwicklung der NH₄-N-Gehalte im Zeitverlauf können ähnliche Tendenzen wie bei N_{ges} beobachtet werden. Unabhängig von der Temperatur nehmen die Gehalte im Ablauf bei der Monovergärung von Maissilage aufgrund der niedrigen NH₄-N-Gehalte des Inputs nur minimal zu. Die Roggen-GPS bewirkt mit ihren hohen Ammonium-Gehalten von durchschnittlich 1,5 g kg⁻¹ eine deutlich ausgeprägte Anreicherung von NH₄-N im Ablauf, so dass z.B. bei der mesophilen Monovergärung der Gehalt im Ablauf von 2,1 auf 3,7 g kg⁻¹ ansteigt. Entsprechend der annähernd gleichen N_{ges} -Verläufe und der unterschiedlichen NH₄-N-Verläufe in den Abläufen bei der mesophilen Monovergärung von Maissilage und Roggen-GPS ergibt sich, dass der Anteil des organisch gebundenen Stickstoffs bei der Maissilage im Zeitverlauf zunimmt und bei der Roggen-GPS annähernd gleich bleibt. Bei der Vergärung von Rübensilage nimmt aufgrund der niedrigen NH₄-N-Gehalte des Inputs der Gehalt im Ablauf ebenfalls ab, bis er etwa dem Gehalt des Inputs gleicht.

Rinder- und Schweinegülle weisen mit durchschnittlich 1,6 bzw. 4,1 g kg⁻¹ hohe bzw. sehr hohe Ammoniak-Konzentrationen auf. Es kommt aufgrund der im Vergleich zu NawaRos deutlich niedrigeren FM-Biogasausbeuten zwar zu keiner so starken Akkumulation, jedoch bleiben die Gehalte an NH₄-N im Ablauf hoch. Laut Literatur führen Ammoniak-Konzentrationen von 4 g N kg⁻¹ bei thermophiler Vergärung von Rindergülle schon zu erheblicher Hemmung der Biogasproduktion (ANGELIDAKI & AHRING 1993). HASHIMOTO fasst Literaturangaben zusammen, dass Ammoniak bei pH-Werten von über 7,4-7,6 mit 1,5 bis 3,0 g N kg⁻¹ eine Hemmung des Biogasprozesses bewirkt. Bei Werten von über 3,0 g N kg⁻¹ kommt es sogar schon zum Absterben des *Methanobacterium formicicum* (HASHIMOTO 1983). Bei der vorliegenden mesophilen

und thermophilen Vergärung von Schweinegülle (Graphiken 2d) werden sogar noch höhere Ammonium-Konzentrationen von bis zu 5,3 bzw. 4,6 g kg⁻¹ gemessen. Bei der mesophilen Vergärung von Rindergülle, die einen NH₄-N-Gehalt von 1,7 g kg⁻¹ aufweist, liegen die gemessenen NH₄-N-Gehalte im Ablauf zwischen 1,8 und 2,5 g kg⁻¹. Damit liegen die Werte etwas unterhalb, aber in ähnlichem Verhältnis zueinander wie bei Versuchen mit Gülle aus der Stiermast, bei denen die Rohgülle 2,9 und Biogasgülle 3,7 g kg⁻¹ Ammonium-Stickstoff aufweist (BOXBERGER ET AL. 2002).

Da die Hemmwirkung des freien Ammoniaks mit steigender Temperatur und pH-Werten zunimmt, ist besonders bei thermophiler Vergärung sowie bei der Vergärung von Gülle wegen ihrer Pufferwirkung mit starker Prozesshemmung zu rechnen. Bei gleichem pH-Wert nimmt in anaeroben Prozessen die Hemmung der Methanbildung aus Essigsäure durch Ammoniak bei Anhebung der Temperatur um einige Grad schon deutlich zu (KROISS 1986). Diese Zusammenhänge machen deutlich, weshalb es bei den vorliegenden Versuchen besonders bei den thermophilen Kovergärungen mit der stickstoffhaltigen Schweinegülle zu ausgeprägten Säurebildungen kam. Auch in landwirtschaftlichen Biogasanlagen kam es wiederholt zu hohen, prozessstörenden Ammoniakbelastungen, wenn stickstoffreiche Schweinegülle und Geflügelexkrementen zum Einsatz kamen (GRUBER ET AL. 2004). Da die Güllevergärung häufig einen hohen pH-Wert mit sich bringt (um 8,0), ist bei der thermophilen Güllevergärung die Konzentration an freiem Ammoniak teilweise zehn mal höher als die Konzentration, die in der Literatur als hemmend genannt wird (ANGELIDAKI & AHRING 1993). Durch Zugabe von sogenanntem „activated carbon“ und „Glaucinite“ konnte die Methanausbeute bei thermophiler Vergärung von Schweinegülle jedoch deutlich verbessert werden (HANSEN ET AL. 1999).

HASHIMOTO kommt ebenfalls zu dem Ergebnis, dass trotz höherer Biogaspotentiale von Schweinegülle gegenüber Rindergülle bei der kontinuierlichen Vergärung von Rindergülle höhere Methanraten erzielt werden können. Eine Ursache für die um vier mal höheren Raten ist die Realisierung deutlich höherer Raumbelastungen bei der Rindergülle-Vergärung (HASHIMOTO 1983).

In einer Studie über den Einfluss von pH-Wert und Ammonium-Konzentration auf die Methanproduktion wurden für die pH-Werte zwischen 7,0 und 8,5 Aussagen über die Hemmung der methanogenen Aktivität bei gesteigerten NH₄-N-Gehalten getroffen. Demnach sinkt die Produktivität um 10 % bei 1,7-3,7 g kg⁻¹, um 50 % bei 4,3-5,6 g kg⁻¹ und vollständig bei Werten ab 6,5 g kg⁻¹ (LAY ET AL. 1998).

Physikalische Analysen der Zu- und Abläufe

Die oTS-Zulaufkonzentration c_0 und Ablaufkonzentration c_A sind für alle Versuchsvarianten bei meso- und thermophiler Vergärung zusammen mit der jeweiligen Raumbelastung im Zeitverlauf in Abb. A 13 bis Abb. A 18 dargestellt. Um den Abbaugrad der zugeführten oTS bei der Biogasproduktion zu bestimmen, finden sich in der Literatur zwei unterschiedliche Herangehensweisen. Zum einen stellt der Quotient aus c_A und c_0 im Gleichgewichtszustand den Anteil der nicht abgebauten oTS im Reaktor dar. Demnach ist die Differenz des Quotienten zu 1 der oTS-Anteil, der über die oTS zu Biogas abgebaut wird. Der Abbau der oTS lässt sich aber auch über die Masse des produzierten Biogases berechnen. Dabei entspricht der Abbau über das Gas dem Produkt aus oTS-Biogasausbeute y_B und Dichte des Biogases ρ_{Gas} (vgl. Gl. 16). Beide Verfahren sind ebenfalls in den oben genannten Abbildungen dargestellt, obwohl sie jeweils mit unterschiedlichen Vereinfachungen bzw. Ungenauigkeiten verbunden sind. Bei der Berechnung des Abbaus über die oTS wird unterstellt, dass diese zu 100 % zu Biogas umgesetzt wird. Dies ist so nicht der Fall, da in der oTS des Zulaufs und damit des Ablaufs auch nicht abbaubare Anteile wie z.B. Lignin enthalten sind. Damit fällt der Quotient aus analysierter c_A und c_0 größer aus, als der Quotient auf Grundlage der tatsächlich abbaubaren oTS. Die hier dargestellten Grade des Abbaus über oTS im Zeitverlauf liegen also insgesamt unterhalb der tatsächlichen Abbaugrade. Bei der Berechnung des oTS-Abbaus über die Menge an Biogas wird zusätzlich davon ausgegangen, dass das produzierte Biogas nur aus der zugeführten oTS gebildet wird. Stöchiometrische Betrachtungen machen jedoch deutlich, dass Biogas aus oTS nur unter Einbindung von Wasser gebildet werden kann. Bei einer vereinfachten Summenformel für pflanzliche Biomasse ($\text{C}_{38}\text{H}_{60}\text{O}_{26}$) ergibt sich nach der Buswell-Formel für ein Mol Biomasse die Notwendigkeit von 10 Mol Wasser, um Biogas erzeugen zu können (LINKE ET AL. 2003). Demnach ergibt sich rein rechnerisch ein höherer Anteil an abgebauter oTS als tatsächlich. Damit kommen bei hohen Biogasausbeuten und Substraten mit hoher Einbindung von Wasser auch Werte von über 1 zustande. Beide hier genannten Berechnungsmethoden werden in der Literatur z.B. auch auf Basis des chemischen Sauerstoffbedarfs statt auf oTS-Basis genannt (HASSAN 2003).

Ein Vergleich der beiden im Anhang abgebildeten Verläufe der jeweiligen Abbaugrade macht deutlich, dass bei der Berechnung über das Gas höhere Werte und über die oTS niedrigere Werte bestimmt werden. Größenordnungen und abnehmende Tendenzen im

Zeitverlauf mit zunehmender B_R sind jedoch in allen Fällen deutlich zu erkennen. Dabei nimmt der oTS-Abbau im Zeitverlauf bei der mesophilen Vergärung stets stärker ab als bei der thermophilen Vergärung. Dadurch wird erneut bestätigt, dass der Substratabbau durch Erhöhung der Temperatur gefördert wird.

Die Verläufe der Ablaufkonzentrationen zeigen deutlich den Zusammenhang zwischen c_A und c_0 sowie B_R . Höchste oTS-Gehalte im Ablauf werden bei der mesophilen Vergärung von Maissilage als Monosubstrat (Abb. A 13, Graphiken a) erzielt, welche auch die höchste Zulaufkonzentration mit durchschnittlich 293 g kg^{-1} aufweist. Bei einer maximalen B_R von etwa $4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ beträgt c_A bis zu 12 %. Bei ähnlich hoher B_R bewirkt die mesophile Monovergärung von Roggen-GPS (Abb. A 15, Graphiken a) oTS-Gehalte im Ablauf von etwa 8-10 %. Daher wird bei der Vergärung von Mais- und Roggensilage besonders bei der mesophilen Vergärung aufgrund des verzögerten Abbaus bei höheren B_R die Rührfähigkeit des Reaktorinhaltes deutlich erschwert.

Bei der Vergärung von Rindergülle steigen die Ablaufkonzentrationen im mesophilen Bereich bei B_R von bis zu $4 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ für c_A auf 5-6 % und im thermophilen Bereich fast gleichbleibend auf maximal 4 %. Die Schweingülle bewirkt aufgrund ihrer niedrigen oTS-Gehalte (vgl. Tab. 5) und der geringen Biogasausbeute bzw. Abbaubarkeit der oTS weder im meso- noch thermophilen Bereich eine deutliche Anreicherung der oTS im Ablauf. Die oTS-Gehalte des Impfmateri als werden mit Werten für c_A im Zeitverlauf zwischen 2 und 4 % nahezu beibehalten.

2.1.3.3 Kinetik der kontinuierlichen Biogasproduktion

Entwicklung eines kinetischen Modells

Für eine exakte mathematische Beschreibung der von Mikroorganismen ausgehenden Stoffwechselaktivitäten müssen die beteiligten Substrate und Mikroorganismen bekannt sein. Bei NawaRos und Gülle handelt es sich jedoch um komplex zusammengesetzte Substrate mit einer kaum überschaubaren Anzahl von Nährstoffen, Bakterien und Stoffwechselprodukten. In diesen Fällen scheint es aussichtslos, die aus der Bioprozesstechnik bekannten Beziehungen anzuwenden. Bei der Bemessung von Biogasanlagen kann der Prozess also nur auf der Grundlage von Summenparametern beschrieben werden (LINKE ET AL. 2003). Für die Herleitung eines Modells zur Berechnung von y_B in Abhängigkeit von B_R wurde in vorhergehenden Betrachtungen vom Massenerhaltungssatz in vollständig durchmischten, kontinuierlich betriebenen Systemen ausgegangen (LINKE & MÄHNERT 2005). Für die Herleitung war jedoch die Vereinfachung notwendig, dass die Ablaufmasse m_A der Zulaufmasse m_0 entspricht. Bei Substraten mit niedrigen Zulaufkonzentrationen c_0 wie Gülle ist dies gerechtfertigt (MITTERLEITNER & HOFFMANN 2000). Mit zunehmender Vergärung von TS-reichen Substraten wie NawaRos trifft diese Verallgemeinerung jedoch weniger zu, da teilweise ein erheblicher Anteil der Zulaufmasse als Frischmasse über das Biogas entweicht. Eine andere Herangehensweise an die Herleitung des Modells geht von zwei Gleichungen zur Berechnung der Masse des Biogases m_g aus.

Zum einen kann angenommen werden, dass das Substrat in einem Reaktor ohne wesentliche Prozesshemmung mit einer Reaktionsgeschwindigkeit $r(c)$ abgebaut wird. Dann ist m_g das Produkt aus der Masse des Reaktorinhaltes und $r(c)$. Die Masse des Reaktorinhaltes ist wiederum das Produkt aus Reaktorvolumen V_R und Dichte des Reaktorinhaltes ρ_a (Gl. 18). Für vollständig durchmischte Systeme gilt, dass die Konzentration und die Dichte im Reaktor denen des Ablaufs entsprechen.

$$m_g = V_R \cdot \rho_a \cdot r(c) \quad (18)$$

Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Reaktionsgeschwindigkeit des Substratabbaus nach Gl. 19 einer Reaktion erster Ordnung (Zerfallsreaktion) mit einer Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten k entspricht (GUNASEELAN 2004, LINKE & MÄHNERT 2005). Damit ist $r(c)$ linear abhängig von der Ablaufkonzentration c_A , die bei vollständiger Durchmischung der Konzentration im Reaktor entspricht.

$$r(c) = k \cdot c_A \quad (19)$$

Da sich das Reaktorvolumen V_R nach Gl. 20 aus der Zulaufmenge m_0 , der Zulaufkonzentration c_0 sowie der Raumbelastung B_R berechnen lässt (Abb. 3), ergibt sich für die Masse des Biogases Gl. 21.

$$V_R = \frac{m_0 \cdot c_0}{B_R} \quad (20)$$

$$m_g = m_0 \cdot \frac{c_0}{B_R} \cdot \rho_A \cdot k \cdot c_A \quad (21)$$

Darüber hinaus lässt sich m_g über das Volumen des täglich produzierten Biogases multipliziert mit der Dichte des Biogases ρ_g berechnen. Dabei entspricht das Volumen des täglich produzierten Biogases dem Produkt aus y_B und der täglichen oTS-Zugabemenge $m_0 \cdot c_0$ (Gl. 22).

$$m_g = y_B \cdot \rho_g \cdot m_0 \cdot c_0 \quad (22)$$

Gleichsetzung der Gl. 21 und Gl. 22 führt zu Gl. 23 und damit Gl. 24.

$$\frac{c_0}{B_R} \cdot \rho_A \cdot k \cdot c_A = y_B \cdot \rho_g \cdot c_0 \quad (23)$$

$$y_B = \frac{c_0}{B_R} \cdot \frac{\rho_A}{\rho_g} \cdot k \cdot \frac{c_A}{c_0} \quad (24)$$

Zwischen c_A und c_0 sowie der oTS-Biogasausbeute y_B und der maximalen Biogasausbeute y_{\max} besteht die in Abb. 7 dargestellte Korrelation, wenn man davon ausgeht, dass die abbaubare oTS vollständig zu Biogas umgesetzt wird. Eine Darstellung dreier Kurvenverläufe von c_A bei leicht, unterschiedlich und schwer abbaubarem Substrat findet sich in der Literatur (SCHATTNER & GRONAUER 2000). Mit \bar{k} als Produkt aus k und ρ_A/ρ_g ergibt sich Gl. 25 und damit Gl. 26.

$$y_B = \frac{c_0}{B_R} \cdot \bar{k} \cdot \left(\frac{y_{\max} - y_B}{y_{\max}} \right) \quad (25)$$

$$y_B = y_{\max} \cdot \frac{\bar{k} \cdot c_0}{\bar{k} \cdot c_0 + y_{\max} \cdot B_R} \quad (26)$$

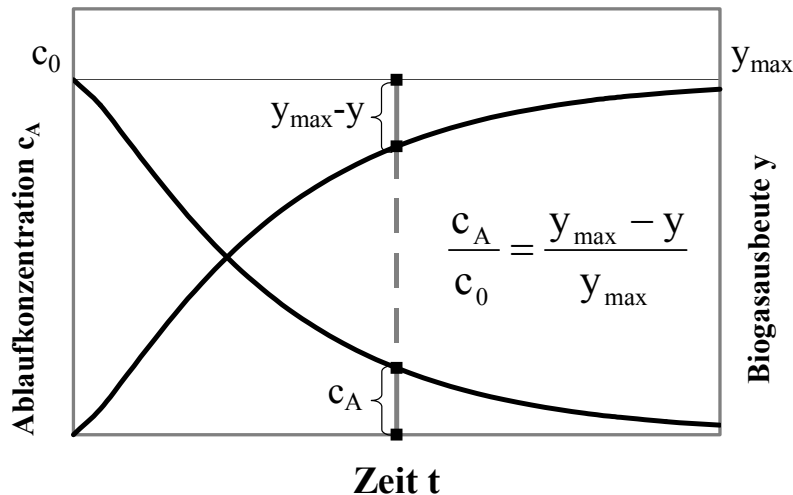


Abb. 7: Zusammenhang zwischen Biogasausbeute y_B und Ablaufkonzentration c_A in Bezug auf maximale Biogasausbeute y_{\max} und Zulaufkonzentration c_0

Mit Hilfe der Gl. 26 lassen sich an y_B in Abhängigkeit von B_R für den ungehemmten Bereich hyperbolische Kurven des Typs

$$y = \frac{a \cdot b}{b + a \cdot x} \quad \text{mit } a = y_{\max} \quad \text{und } b = k \cdot \rho_A / \rho_g \cdot c_0$$

anpassen. Der Wert für y_{\max} ist substratspezifisch und kann alternativ mit Hilfe von Batch-Experimenten bestimmt werden. Der Parameter b aus der Kurvenanpassung ist als Summenparameter eine substrat- und prozessspezifische Größe, mit deren Hilfe sich y_B berechnen lässt. Bei Kenntnis von ρ_A , ρ_g und c_0 lässt sich aus b der Wert für k herleiten. Dabei hängt k von der Abbaubarkeit des Substrates unter den gegebenen Prozessbedingungen wie Temperatur, Durchmischung, Hemmung etc. ab. Die Dichte des Ablaufes kann vereinfachend mit 1000 kg m^{-3} gleichgesetzt werden, da die rheologischen Untersuchungen für die Reaktorabläufe aller untersuchten Varianten bei geringen und maximalen B_R Werte zwischen 954 und 1067 kg m^{-3} aufweisen. Die Dichte des Biogases hängt von der jeweiligen Gaszusammensetzung ab (Gl. 16). Die Zulaufkonzentration ist durch den oTS-Gehalt des Input-Materials vorgegeben.

Wie anfangs beschrieben, gilt die hergeleitete Funktionsgleichung nur für den Prozess ohne deutliche Hemmung bis zu einer kritischen Raumbelastung $B_{R,k}$. Für B_R -Werte oberhalb $B_{R,k}$ kann es zu einer Hemmung kommen, und Gl. 26 muss um eine oder mehrere Hemmfunktionen I_i erweitert werden. Für eine ab $B_{R,k}$ gehemmte Biogasfunktion $y_{B,I}$ mit n Hemmfaktoren ist eine mögliche Funktionsgleichung in Gl. 27 gegeben. Dabei muss jede Hemmfunktion I_i so transformiert werden, dass sich die Funktionswerte im Bereich zwischen 0 und 1 bewegen. Für den ungehemmten Bereich

bei B_R kleiner $B_{R,k}$ verändern die Funktionswerte der I_i mit 1 die ungehemmte Funktion nach Gl. 26 damit nicht. Für Werte oberhalb $B_{R,k}$ verursachen die Funktionswerte der I_i eine angepasste Stauchung der gegen Unendlich strebenden ungehemmte Funktion. Die erweiterte Funktion $y_{B,I}$ kann demnach auch abknicken und bei einer B_R , bei der die Biogasproduktion zum Erliegen kommt, Funktionswerte von 0 annehmen.

$$y_{B,I} = y_B \prod_{i=1}^n I_i \quad (27)$$

Zur Ermittlung möglicher Hemmfunktionen I_i sind Anpassungen an hemmende Parameter in Abhängigkeit von B_R bei der Biogasproduktion notwendig. Mögliche Kurvenanpassungen y_i können für Anpassungen an wasserdampfvlüchtige Säuren ($y_{\text{org.Sr.}}$), über GC analysierte Gesamtsäuren (y_{GC}), Propionsäure (y_{PS}) etc. mittels Sigmoid-Funktion mit drei (Gl. 28) oder vier Parametern (Gl. 29) erfolgen.

$$y_i = \frac{a_i}{1 + e^{-\left(\frac{B_R - x_0}{b_i}\right)}} \quad (28)$$

$$y_i = y_0 + \frac{a_i}{1 + e^{-\left(\frac{B_R - x_0}{b_i}\right)}} \quad (29)$$

Eine Anpassung an den pH-Wert kann über eine Sigmoid-Funktion mit drei Parametern erfolgen, wenn die pH-Werte zuvor transformiert worden sind. Dazu werden die pH-Werte in Abhängigkeit von B_R von dem im ungehemmten Bereich gemittelten pH-Wert \bar{y}_{pH} subtrahiert (Gl. 30).

$$y_{pH}^{\text{trans}} = \bar{y}_{pH} - y_{pH} = \frac{a_{pH}}{1 + e^{-\left(\frac{B_R - x_0}{b_{pH}}\right)}} \quad (30)$$

Mit Hilfe der Parameter x_0 und b_i lässt sich I_i nach Gl. 31 berechnen, so dass die Funktionswerte zwischen 0 und 1 liegen.

$$I_i = 1 - \frac{1}{1 + e^{-\left(\frac{B_R - x_0}{b_i}\right)}} \quad (31)$$

Mesophile Vergärung - Basis Rindergülle

Für die mesophile Monovergärung von Mais- und Rübensilage auf Basis von Rindergüllen-Impfslamm setzt die Übersäuerung und ausgeprägte Prozesshemmung ab B_R von 3,5 bzw. 4,8 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ deutlich ein. Für diese Varianten lassen sich die Kurven y_i an die Hemmstoffe pH, organische Säuren und Propionsäure PS anpassen. Beispielhaft seien $y_{\text{org.Sr.}}$, y_{PS} und die Kurvenanpassung an die transformierten pH-Werte $y_{\text{pH}}^{\text{trans}}$ sowie y_{pH} in Abhängigkeit von B_R für die mesophile Monovergärung von Maissilage dargestellt (Abb. 8).

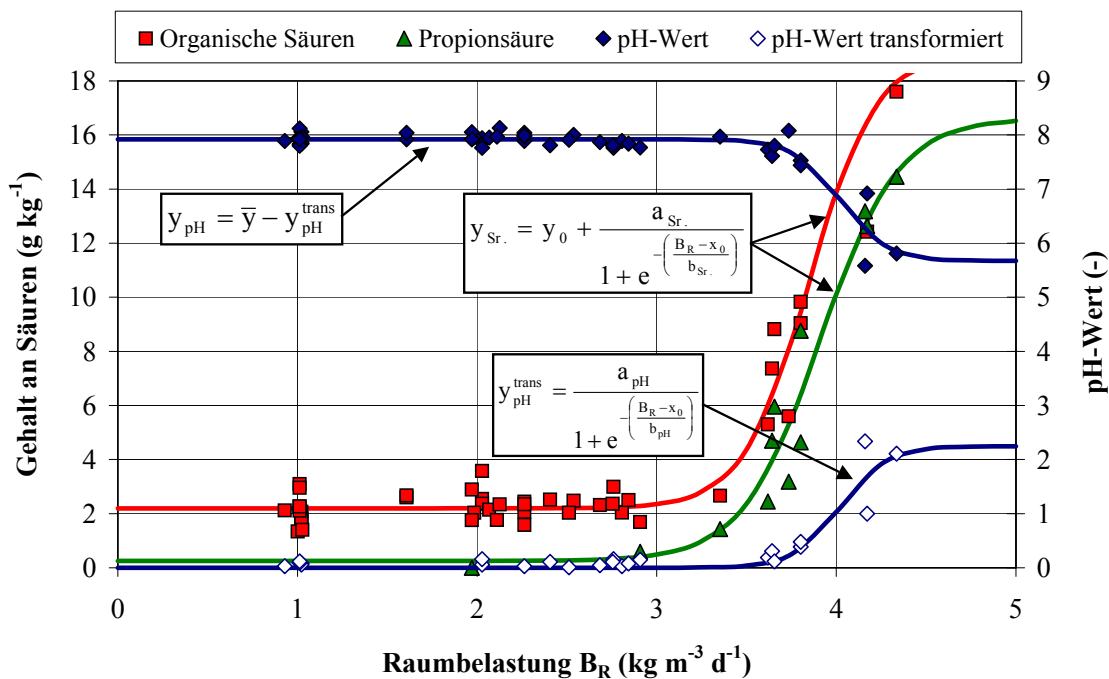


Abb. 8: Hemmfaktoren pH-Wert, organische Säuren und Propionsäure mit Kurvenanpassungen y_i in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R bei mesophiler Monovergärung von Maissilage mit \bar{y} als Mittelwert der pH-Werte bis $B_R=3 \text{ kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$

Es zeigt sich, dass in dieser und in folgenden ausgewerteten Monovergärungen die beste Kurvenanpassung an die gehemmte y_B -Kurve erfolgt, wenn y_B nur mit I_{pH} multipliziert wird. Eine Ursache kann sein, dass sowohl die oTS-Biogasausbeute als auch der pH-Wert eine verzögerte Reaktion auf Prozessstörungen zeigen. Für die Monovergärung der Roggen-GPS kann nur eine beginnende Prozessstörung bei B_R im Bereich zwischen 3 und 4 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ festgestellt werden. Für Aussagen über den Kurvenverlauf von $y_{B,1}$ bei B_R von über 4 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ fehlen belastbare Daten.

Die wöchentlich gemittelten oTS-Biogasausbeuten bei der mesophilen Vergärung der NawaRos als Monosubstrat und Kosubstrat mit Rindergülle sind in Abhängigkeit von B_R in Abb. 9 dargestellt. Für die Monovergärungen der untersuchten NawaRos erweist

sich die Biogasproduktion bis zur kritischen Raumbelastung $B_{R,k}$ in Höhe von $3,0 \pm 0,25 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ als Bereich ohne ausgeprägte Hemmung. $B_{R,k}$ sollte so gewählt werden, dass unterhalb dieser Raumbelastung keine deutliche Hemmwirkung beobachtet werden kann. Andererseits sollte $B_{R,k}$ groß genug sein, damit für eine aussagekräftige Kurvenanpassung nach Gl. 26 ausreichend Versuchsdaten zur Verfügung stehen. Für die Berechnung des Kurvenverlaufs im Bereich der Prozesshemmung ist es nicht entscheidend, ob $B_{R,k}$ exakt am Wendepunkt liegt, da sich die Hemmfunktionen ausschließlich aus den tatsächlich gemessenen Hemmfaktoren bei allen B_R gemäß Abb. 8 ergeben. Bei den Kovergärungen und der Vergärung reiner Gülle wird daher für $B_{R,k}$ ein Wert von $4,0 \pm 0,25 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ angenommen. Damit entsprechen die Ergebnisse etwa den Erfahrungen von WEILAND, denen zufolge Rübensilage als Monosubstrat bis zu B_R von $3,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ vergoren werden kann (WEILAND 2003A). Vergärungen von Rübensilage als Kosubstrat sind hingegen bis B_R von $5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ als stabil zu bezeichnen (WEILAND & HASSAN 2001). Für nicht genauer definierte Kosubstrate zeigen Untersuchungen, dass bei Überschreiten einer B_R von $4,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ eine Überlastung des Methanisierungsprozesses eintritt (OECHSNER 2000). An die jeweiligen y_B bis $B_{R,k}$ können mit annähernd hoher Genauigkeit Kurvenanpassungen gemäß der hyperbolischen Funktion nach Gl. 26 erfolgen. Für die Varianten mit Kosubstraten bzw. reiner Gülle werden die so ermittelten Kurven bis zu B_R von $6,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ fortgesetzt, da der Prozess der Übersäuerung während der Langzeitversuche nicht erfolgte. Es kann also in diesen Fällen keine Hemmfunktion I_i ermittelt werden. Die Versuchsergebnisse bei B_R von $6,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ liegen jedoch trotz beginnender Übersäuerung noch annähernd auf den ermittelten Kurvenverläufen.

In Abb. 9 entspricht die jeweils oberste Kurve der Monovergärung des NawaRos und die unterste der Vergärung reiner Rindergülle. Die Symbole auf der linken y-Achse sind die in den Batch-Versuchen ermittelten Biogaspotentiale der NawaRos bzw. Rindergülle (Kap. 2.1.3.1). Aus den hyperbolischen Funktionsgleichungen der Kurvenanpassungen lassen sich für den nur geringfügig gehemmten Bereich bis $B_{R,k}$ bei bekannten c_0 und ρ_g die maximal mögliche Biogasausbeute y_{\max} und k berechnen (Tab. 12). Dabei wird c_0 über den Versuchszeitraum bei ungehemmter Biogasproduktion gemittelt und ρ_g nach Gl. 16 aus den gemittelten Methangehalten berechnet. Die Dichte des Biogases liegt bei den mesophilen Versuchen je nach Zusammensetzung in einem Bereich zwischen $1,12$ und $1,29 \text{ kg m}^{-3}$.

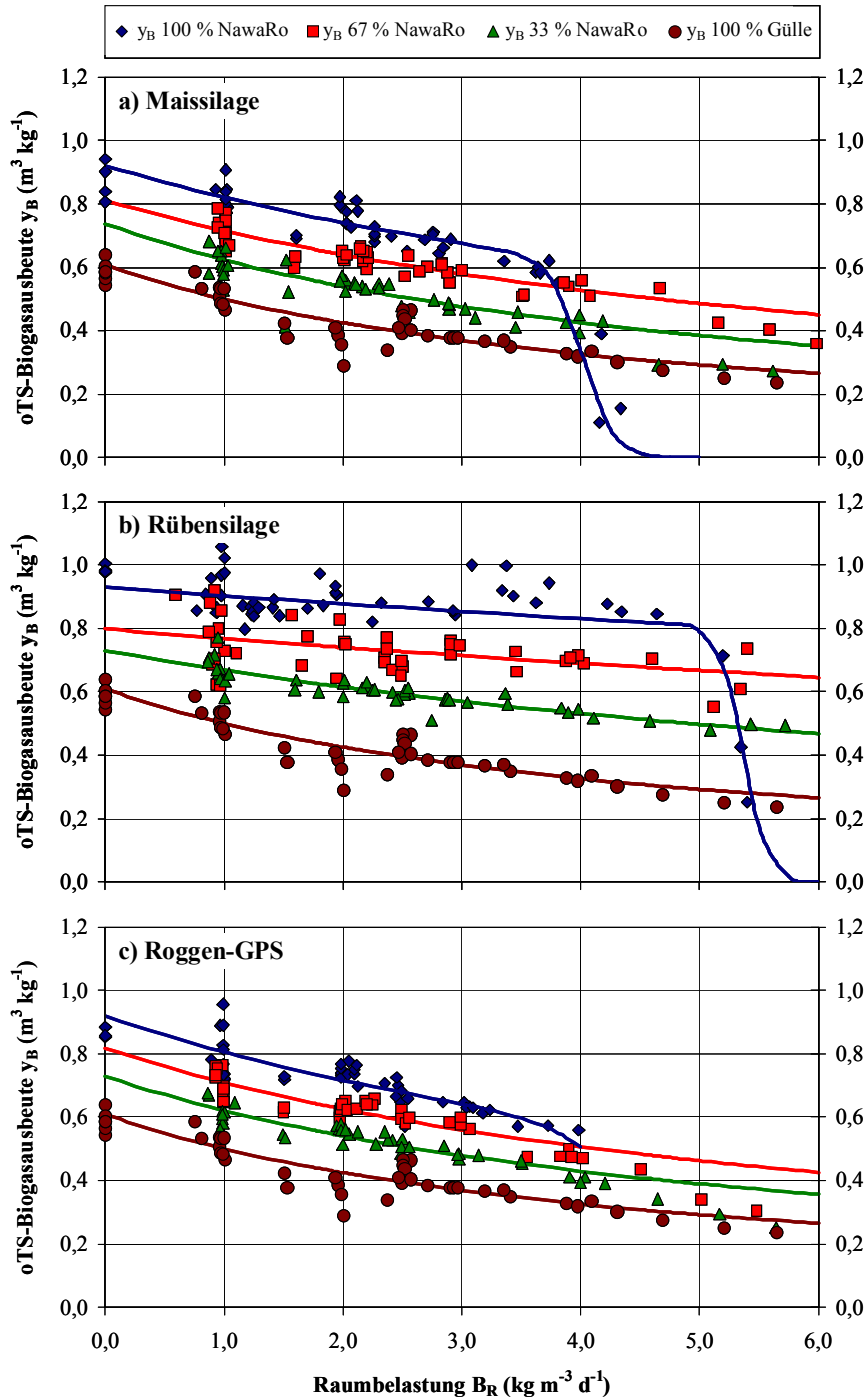


Abb. 9: oTS-Biogasausbeuten y_B bei mesophiler Vergärung der NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R

Bei der mesophilen Vergärung auf Basis von Rindergülle kann am besten die Variante mit 33 % Roggen-GPS über die hyperbolische Funktion beschrieben werden. In diesem Fall werden 86,5 % der Gesamtstreuung (R^2) mit Hilfe der Regression beschrieben. Bei der Monovergärung von Rübensilage lässt sich unterhalb von $B_{R,k}$ kein signifikanter Einfluss von B_R auf y_B erkennen. In diesem Fall besagt der F-Test mit $F_{err} = 2,76 < 4,15 = F_{0,95}(1;32)$, dass die Nullhypothese angenommen werden muss, also der Zusammen-

hang zwischen B_R und y_B nicht mit einem Risiko von weniger als 5 % durch die Funktion erklärt werden kann. Der P-Wert, also die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers bei Annahme der Alternativhypothese, beträgt 10,6 %. Die Alternativhypothese besagt, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen B_R und y_B gemäss der hyperbolischen Funktion nach Gl. 26 besteht. Bei der Vergärung von 33 % Rübensilage kann zwar die Alternativhypothese akzeptiert werden, der P-Wert beträgt jedoch 0,022, das Risiko der fälschlichen Annahme der Hypothese liegt bei 2,2 %. Bei allen anderen getesteten Varianten ist der P-Wert für die Varianzanalyse zur Regression kleiner als 0,0001. Der t-Test bezüglich der Koeffizienten a und b aus der Funktion ergibt ebenfalls P-Werte von $< 0,0001$, abgesehen von den Werten für die b-Koeffizienten bei der Monovergärung von Rübensilage (0,1102) und der Vergärung von 33 % Rübensilage (0,022).

Bei den vier untersuchten Substraten stimmen die ermittelten Maximalwerte für Raumbelastungen von annähernd Null im wesentlichen mit den Ergebnissen aus Batch-Versuchen überein. Es gibt Hypothesen, dass aufgrund der ausgeglicheneren Bedingungen bei kontinuierlicher Vergärung sogar höhere Gasausbeuten erreicht werden können als bei Batch-Versuchen (STEWART ET AL. 1984). Die y_{\max} der jeweiligen NawaRos unterscheiden sich mit ca. $0,9 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ bei der Monovergärung und $0,8$ bzw. $0,7 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ bei den Kovergärungen mit 67 % bzw. 33 % oTS aus dem Kosubstrat nicht voneinander. Aus reiner Rindergülle wird y_{\max} in Höhe von $0,6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ erzielt. Wie schon in Kapitel 4.2.1 angedeutet, unterscheiden sich die NawaRos jedoch deutlich bezüglich der Abnahme von y_B mit zunehmender B_R . Während bei der Monovergärung von Rübensilage auch bei Raumbelastungen von $3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ noch 92 % der maximalen Gasausbeute erzielt werden, macht die entsprechende Gasausbeute bei der Vergärung von reiner Rindergülle mit $0,38 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ nur etwa 60 % von y_{\max} aus. Diese substratspezifische Eigenschaft drückt sich in k aus, die bei der Monovergärung von Rübensilage mit $0,32 \text{ d}^{-1}$ deutlich höher liegt als bei der Rindergülle mit $0,05 \text{ d}^{-1}$. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist mit Werten für k von $0,03$ bzw. $0,04 \text{ d}^{-1}$ bei der Monovergärung von Mais- und Roggensilage annähernd gleich. Generell geht mit höheren Werten für k auch eine schlechtere Kurvenanpassung einher, da bei erhöhter Reaktionsgeschwindigkeit der Einfluss von B_R auf y_B geringer ausfällt und damit die versuchsbedingten Abweichungen ausgeprägter sind.

Tab. 12: Ergebnisse der Kurvenanpassungen bei der mesophilen Vergärung von NawaRos als Mono- und Kosubstrat mit Rinder- und Schweinegülle: Zulaufkonzentration c_0 , Dichte des Biogases ρ_g , Bestimmtheitsmaß der Anpassung R^2 , maximale Biogasausbeute y_{\max} und Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k

Anteil in Mischung	Rindergülle					Schweinegülle				
	c_0 [g kg ⁻¹]	ρ_g [kg m ⁻³]	R^2 [%]	y_{\max} [m ³ kg ⁻¹]	k [d ⁻¹]	c_0 [g kg ⁻¹]	ρ_g [kg m ⁻³]	R^2 [%]	y_{\max} [m ³ kg ⁻¹]	k [d ⁻¹]
100 % Maissilage	292	1,279	59,7	0,92	0,033	253	1,286	14,8	0,82	0,147
67 % Maissilage	147	1,253	80,0	0,81	0,052	99	1,258	31,1	0,69	0,301
33 % Maissilage	97	1,224	84,4	0,74	0,051	60	1,205	52,5	0,62	0,119
100 % Rübensilage	124	1,258	7,9	0,93	0,316	114	1,293	40,5	1,08	0,162
67 % Rübensilage	100	1,245	13,7	0,80	0,252	73	1,237	47,0	0,89	0,155
33 % Rübensilage	84	1,221	69,2	0,73	0,113	55	1,192	49,8	0,73	0,105
100 % Roggen-GPS	198	1,232	58,6	0,92	0,040	202	1,237	68,3	1,01	0,028
67 % Roggen-GPS	125	1,219	81,9	0,82	0,052	92	1,219	80,8	0,88	0,052
33 % Roggen-GPS	92	1,199	86,5	0,73	0,054	59	1,181	82,0	0,81	0,057
100 % Gülle	72	1,175	65,2	0,61	0,046	44	1,116	51,2	0,55	0,057

Auch in der Literatur sind abnehmende Gasausbeuten mit zunehmender B_R beobachtet worden (MORAR & OECHSNER 2002, HEO ET AL. 2003, STEWART ET AL. 1984), jedoch fehlt die Beschreibung eines systematischen Zusammenhangs. Nach einer Empfehlung des KTBL für die zu wählende B_R zwischen 0,5 bis 10 kg m⁻³ d⁻¹ sinkt die Gasausbeute mit der Steigerung der Belastung von 1 bis 3 kg m⁻³ d⁻¹ um bis zu 10 % je Belastungsstufe. Die Prozessstabilität sinkt jedoch bei einer Steigerung von B_R ab 3 kg m⁻³ d⁻¹. Demnach werden maximale Reaktorbelastungen für die Monovergärung von NawaRos von bis zu 3 kg m⁻³ d⁻¹ und für die Kovergärung mit Rinder- und Schweinegülle in Höhe von 3-4 kg m⁻³ d⁻¹ angegeben (ANONYMUS 2005).

Mesophile Vergärung - Basis Schweinegülle

Da bei keinen der untersuchten mesophilen Varianten auf Basis von Schweinegülle ausgeprägte Hemmungen beobachtet werden, können $B_{R,k}$ und $y_{B,l}$ bzw. I_i nicht ermittelt werden. Alle Versuche wurden bis zu B_R von maximal 3,5 kg m⁻³ d⁻¹ durchgeführt, so dass alle y_B -Werte für die Kurvenanpassung genutzt werden können (Abb. 10). Es zeigt sich, dass ähnlich gute Anpassungen an y_B über Gl. 26 erfolgen wie bei den Versuchen auf Basis von Rindergülle (Tab. 12). Bei der Vergärung von Maissilage als Mono- und Kosubstrat werden mit Werten für R^2 von 14,8 bis 52,5 % schlechtere Anpassungen erreicht. Dies liegt zum Teil an den höheren Werten von k , die in diesen Fällen zwischen 0,12 und 0,30 d⁻¹ liegen. Damit sind die k -Werte ähnlich hoch wie bei der mesophilen Vergärung von Rübensilage auf Schweinegülle-Basis mit 0,11-0,16 d⁻¹. Da diese Werte wiederum niedriger sind als die bei der Rüben-Vergärung auf Basis von Rindergülle (0,11-0,32 d⁻¹), erfolgen die Kurvenanpassungen hier mit höheren R^2 von

40,5-49,8 %. Die maximalen Gasausbeuten liegen mit Werten in Höhe von 0,82 für Maissilage und 1,08 bzw. 1,01 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ oTS für Rüben- und Roggensilage als Monosubstrat ähnlich hoch wie bei den Versuchen auf Basis von Rindergülle. Schweinegülle erzielt etwas niedrigere maximale Gasausbeuten von 0,55 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ oTS als Rindergülle.

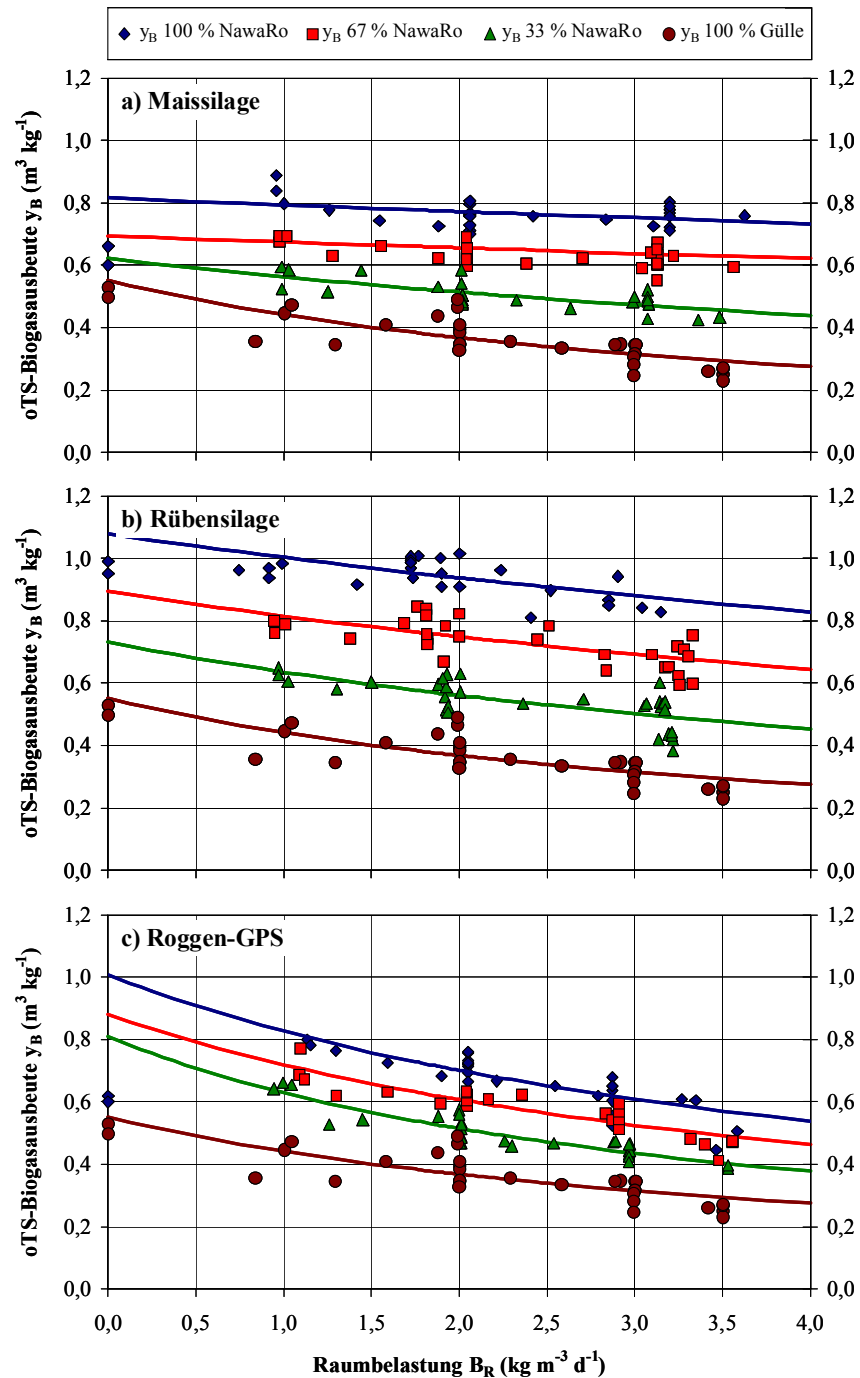


Abb. 10: oTS-Biogasausbeuten y_B bei mesophiler Vergärung der NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Schweinegülle in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R

Vergleich Basis Rinder- und Schweinegülle

In Abb. 11 sind y_B in Abhängigkeit von B_R für den ungehemmten Bereich bis B_R von $3,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ bei den Monovergärungen der NawaRos bzw. der Vergärung reiner Gülle jeweils für die Versuche mit Impfmateriale auf Basis von Rindergülle bzw. Schweinegülle gegenübergestellt. Die Kurven der Monovergärung von Rübensilage und Roggen-GPS zeigen für Impfmateriale auf Basis von Rinder- und Schweinegülle ähnliche Verläufe. Besonders bei der Monovergärung von Maissilage unterscheiden sich jedoch y_{\max} mit Werten von $0,9$ und $0,8 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS und k mit $0,03$ und $0,15 \text{ d}^{-1}$ bei Einsatz von Impfschlamm auf Basis von Rinder- bzw. Schweinegülle wesentlich. Dadurch wird deutlich, dass die Abbaubarkeit der Substrate nicht nur vom Inputmaterial, der Versuchsdurchführung und der Prozesstemperatur abhängt, sondern auch von der Bakterienpopulation, die über das Impfmateriale den Biogasprozess auch im Folgenden beeinflusst. Bei der Vergärung von Schweinegülle werden mit k von $0,09$ bei jeder B_R nur geringfügig kleinere y_B als bei Rindergülle erzielt.

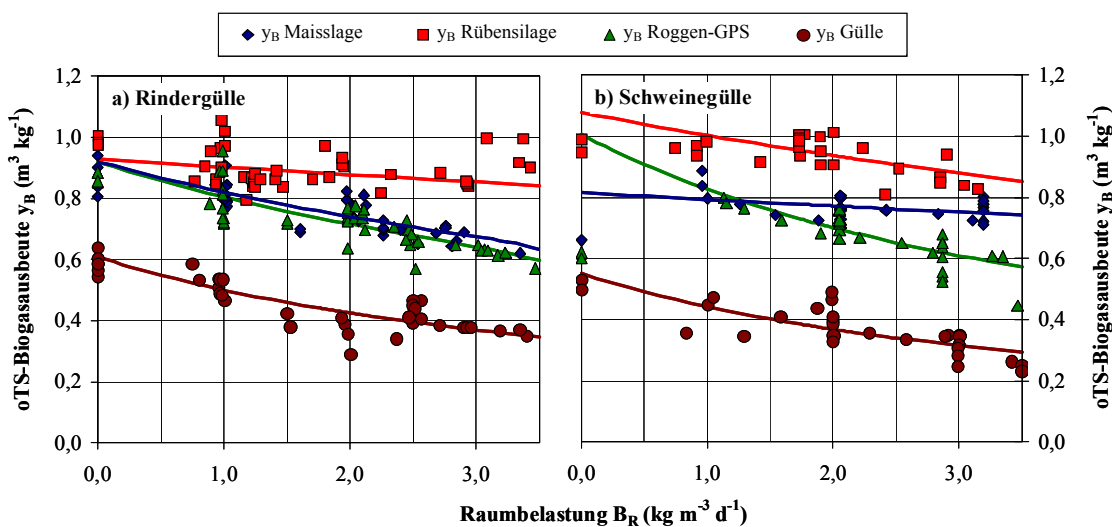


Abb. 11: oTS-Biogasausbeuten y_B bei mesophiler Vergärung von Mais-, Rüben- und Roggensilage als Monosubstrat sowie reiner Gülle in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R bis $B_{R,k}$ bei Versuchen mit Impfgülle auf Basis von a) Rindergülle und b) Schweinegülle

Mit Hilfe der dargestellten B_R -abhängigen y_B -Kurven für die mesophile Vergärung von NawaRos und Gülle lassen sich Literaturangaben zu Gasausbeuten bei kontinuierlichen Versuchen besser einordnen. Zum Beispiel werden bei dem Graskraft-Projekt 1999 in Triesdorf²⁶ bei der Monovergärung von Futterrüben bei B_R von $1,3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ Biogasausbeuten von $0,75 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS erzielt. Andere kontinuierliche Langzeitversuche

²⁶ <http://www.triesdorf.de/EBA/graskraftprojekte.htm#Futterrübenvergärung%202001>

bei 35-39°C ergeben für Maissilage und Futterrübensilage bei B_R von 2,0-3,2 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ Gasausbeuten in Höhe von 0,56 bzw. 0,75 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ (KRIEG 2000). Damit liegen die Literaturdaten ähnlich wie bei der Auswertung der Batch-Versuche unterhalb der hier dargestellten Versuchsergebnisse. Die Differenz von y_B bei Mais- und Rübensilage von 0,19 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ (KRIEG 2000) entspricht jedoch genau der bei den vorliegenden mesophilen Versuchen auf Basis von Rindergülle vorliegenden Differenz bei B_R von 3,2 $\text{kg}^{-3} \text{d}^{-1}$. Für die mesophile Monovergärung von Maissilage bei B_R von 2,5 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ wird in der Literatur y_B in Höhe von 0,44 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ angegeben, jedoch wurde bei den Versuchen zur Maissilage so viel Leitungswasser hinzugegeben, dass sich eine mittlere Verweilzeit von 20 Tagen einstellte (STEWART ET AL. 1984). Bei einer ebenfalls verkürzten Verweilzeit von 32,7 Tagen ergaben sich für Maissilage in anderen Versuchen Biogasausbeuten von 0,62 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ (SPECKMAIER ET AL. 2005). Damit verbleibt die Silage deutlich kürzer im Fermenter als ohne Zugabe von Wasser, wo t_m bei c_0 von ca. 300 g kg^{-1} etwa 120 Tage betragen würde. Bei Praxisversuchen wurden bei der Kovergärung von ca. 64 % Maissilage mit Gülle 0,55 $\text{m}^3 \text{Biogas je kg oTS}$ gebildet (GRUBER 2004). Angaben zur B_R werden nicht gemacht, die Werte entsprechen aber den vorliegenden Versuchsergebnissen bei B_R von 3,5 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$. Bei der Kovergärung von Silomais in einem Modellbetrieb wurde bei t_m von 40 Tagen und B_R von ca. 2,5 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ ein Methanertrag von 0,35 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ beobachtet (LEMMER & OECHSNER 2001). Bei einem Methangehalt von z.B. 57 % entspricht dies einer Biogasausbeute von 0,61 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$, was wiederum den vorliegenden Versuchsergebnissen einer Mischung aus 67 % Maissilage und Rindergülle bei B_R von 2,5 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ entspricht. In vorhergehenden Versuchen am ATB wurden bei mesophiler und thermophiler Monovergärung von Rübensilage bei B_R von 2,7 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ ebenfalls sehr hohe Gasausbeuten von 1,02 bzw. 1,15 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ erzielt. Auch eine Mischung aus Rinder- und Schweingülle erzielt bei diesen Versuchen mit y_B von 0,47 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ bei B_R von 1,2 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ nahezu identische Ergebnisse wie die hier vorliegenden (LINKE 2003). Kontinuierliche Versuche mit Rinder- und Schweingülle als alleiniges Substrat und mit Maissilage als Kosubstrat ergeben für die Güllevergärung Methanausbeuten von 0,15-0,18 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$, was bei einem Methangehalt von ca. 61 % einer Biogasausbeute von 0,25-0,30 $\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{oTS}$ entspricht (WESOLOWSKI ET AL. 2004). Es werden keine Angaben zu B_R gemacht, die Ausbeuten entsprechen jedoch denen der hier dargestellten Versuche bei B_R von 5,0-6,0 bei Rindergülle und 3,5-5,0 $\text{kg m}^{-3} \text{d}^{-1}$ bei Schweingülle. Für die Kovergärungen mit Maissilage werden Methanausbeuten

von ca. $0,2-0,3 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ angegeben, was bei einem Methangehalt von 57 % Biogasausbeuten von $0,35-0,53 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ entspricht (WESOLOWSKI ET AL. 2004). Dieser Bereich wird in den vorliegenden Kovergärungen von 33 % Maissilage mit Rindergülle bei B_R von 2,0 bis $6,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ abgedeckt. Die Versuchsergebnisse stimmen ebenfalls sehr gut mit den Spannen für Biogasausbeuten für Gülle und Maissilage bei begrenzten Raumbelastungen aus kontinuierlichen mesophilen Versuchen überein. Hier werden Angaben zur Biogasausbeute aus Rindergülle von $0,27-0,37 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ bei B_R von $2,0-4,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$, aus Schweinegülle von $0,36-0,54$ bei B_R von $0,5-3,8 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ und aus Maissilage von $0,30-0,81 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ bei B_R von $1,0-4,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gemacht (AMON ET AL. 2004). Bei der mesophilen Vergärung von Schweinegülle stimmen die Versuchsergebnisse für y_B bei B_R von $3,3 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ mit denen aus der Literatur in Höhe von $0,36 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ überein. Diese Versuche wurden bis B_R in Höhe von $10 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ gesteigert, was zu einem Rückgang von y_B auf $0,26 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ führt (HASHIMOTO 1983). Auch bei Laborversuchen mit kontinuierlich betriebenen liegenden Durchflussbiogasanlagen werden die hier dargestellten Ergebnisse bestätigt. In diesem Fall werden bei t_m von 25 Tagen, was bei Rindergülle etwa B_R von $3,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ entspricht, Methanerträge von 0,17 bzw. bei 61 % Methan im Biogas y_B von $0,28 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ erzielt (OECHSNER & LEMMER 2003).

Thermophile Vergärung - Basis Rindergülle

Analog zu den Ergebnissen bei der mesophilen Vergärung findet sich im Anhang eine Darstellung der Hemmfaktoren y_i in Abhängigkeit von B_R für die thermophil durchgeführten Mono- und Kosubstrat vergärungen bei Einsatz von Impfgülle auf Basis von Rindergülle (Abb. A 19).

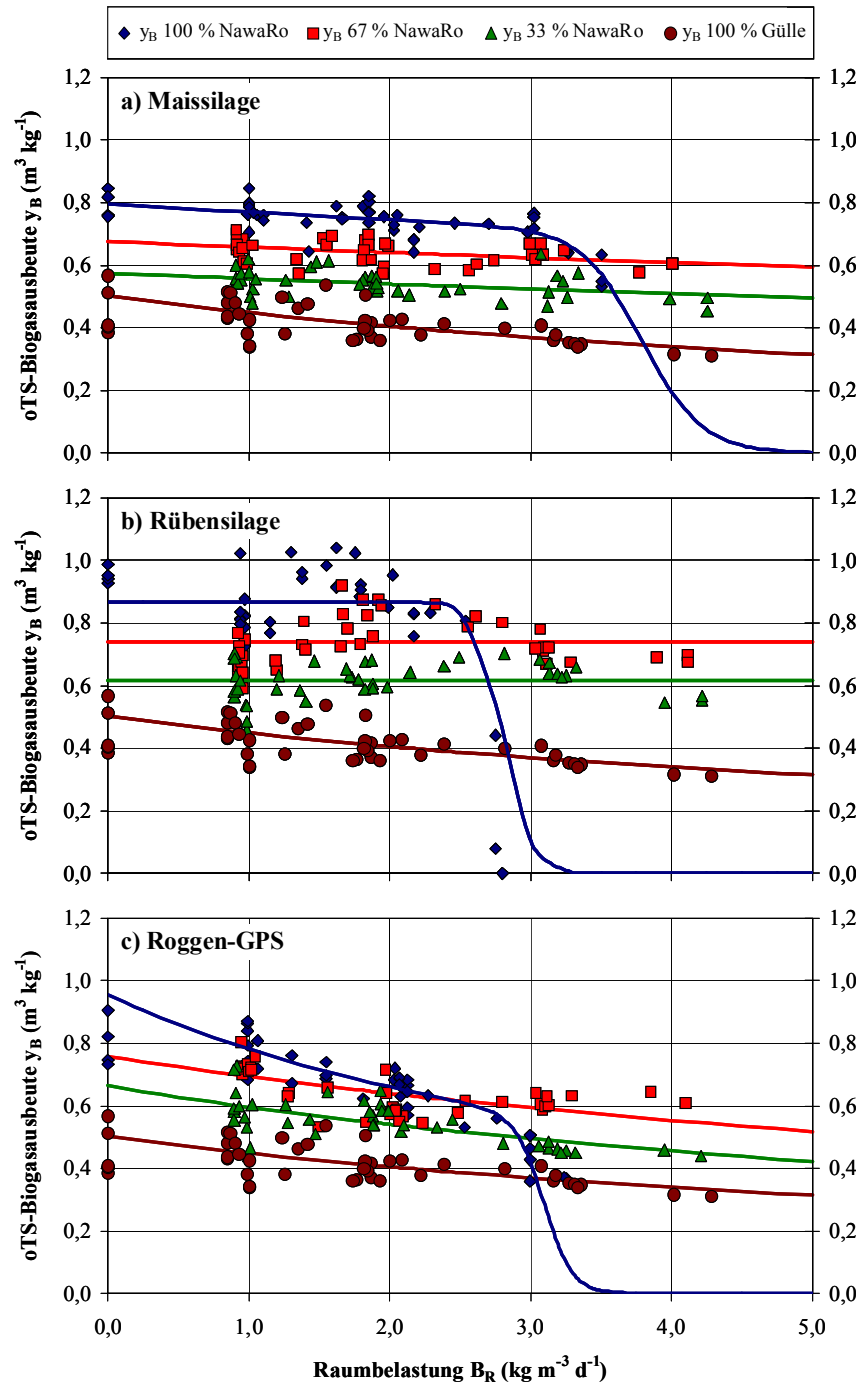


Abb. 12: oTS -Biogasausbeuten y_B bei thermophiler Vergärung der NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R

In Abb. 12 sind für alle thermophilen Varianten auf Basis von Rindergülle die Werte für y_B in Abhängigkeit von B_R dargestellt. Für die Monovergärungen lassen sich die angepassten Kurven aus den Hemmfunktionen I_{pH} und den hyperbolischen Kurvenanpassungen an die y_B -Werte im ungehemmten Bereich bis $B_{R,k}$ herleiten. Die Werte für b_{pH} wurden teilweise auf- oder abgerundet, um genauere Kurvenanpassungen zu erhalten. Als $B_{R,k}$ wird bei der Monovergärung von Maissilage der gleiche Wert von $3,0 \pm 0,25 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ wie bei der mesophilen Vergärung angesetzt. Bei der thermophilen Monovergärung von Rüben- und Roggensilage liegt bei B_R von $3,0 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ bereits ein ausgeprägter Gehalt an Säuren und Rückgang von y_B vor, so dass für die Kurvenanpassung nur Werte bei B_R unterhalb von $2,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ berücksichtigt werden. Die Kurvenanpassungen an die thermophilen Varianten der Maissilage-Vergärung auf Basis von Rindergülle zeigen mit geringen R^2 von 12,8-15,1 % und hohen k -Werten von $0,10$ - $0,27 \text{ d}^{-1}$, dass sich B_R nur sehr geringfügig auf y_B gemäß Gl. 26 auswirkt (Tab. 13). Bei der Vergärung von Rübensilage besagt die Varianzanalyse zur Regression, dass die Streuung der y_B -Werte in Abhängigkeit von B_R nicht durch Gl. 26 begründet werden kann, da die jeweiligen P -Werte größer sind als 0,05. In diesen Fällen wirkt sich B_R bis zu $B_{R,k}$, also nicht wesentlich auf die Gasausbeute aus. Da der t -Test bezüglich des Parameters y_{max} jedoch ergibt, dass der P -Wert kleiner als 0,0001 ist, wird diese Größe ebenfalls als auswertbar angesehen.

Bei der Monovergärung von Roggen-GPS ist ein sehr steiler Abfall von y_B bei gesteigerten B_R zu beobachten, der sich in einem relativ niedrigen k von $0,03 \text{ d}^{-1}$ auswirkt. Auch y_{max} ist mit $0,96 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ im Vergleich zu den Batch-Ergebnissen relativ hoch, so dass hier möglicherweise von gestörten Prozessbedingungen ausgegangen werden muss.

Im Vergleich zur mesophilen NawaRo-Vergärung auf Basis von Rindergülle fällt y_{max} bei der thermophilen Vergärung in der Regel niedriger aus. Hier werden bei der Vergärung von Mais- und Rübensilage maximale Gasausbeuten bei der Monovergärung in Höhe von $0,80$ bzw. $0,87 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS erzielt. Die Kovergärungen ergeben y_{max} von ca. $0,7$ bzw. $0,6 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ bei 67 % bzw. 33 % Kosubstrat in der Mischung mit Rindergülle. Bei der reinen Rindergülle fällt y_{max} mit $0,5 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS deutlich niedriger aus. In allen Fällen der thermophilen Vergärung gibt es jedoch entweder keine Abnahme von y_B bei gesteigerter B_R , oder k ist sehr groß, was wiederum eine sehr hohe Reaktionsgeschwindigkeit bedeutet. Demnach sind die Gasausbeuten auch bei höheren B_R fast noch maximal (Abb. 12). Auf der anderen Seite tritt bei der thermophilen Mono-

Vergärung eine ausgeprägte Hemmung bei B_R -Werten von jeweils unter $3,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ deutlich früher ein als bei der mesophilen Vergärung.

Tab. 13: Ergebnisse der Kurvenanpassungen bei der thermophilen Vergärung von NawaRos als Mono- und Kosubstrat mit Rinder- und Schweinegülle: Zulaufkonzentration c_0 , Dichte des Biogases ρ_g , Bestimmtheitsmaß der Anpassung R^2 , maximale Biogasausbeute y_{\max} und Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k

Anteil in Mischung	Rindergülle					Schweinegülle				
	c_0 [g kg ⁻¹]	ρ_g [kg m ⁻³]	R^2 [%]	y_{\max} [m ³ kg ⁻¹]	k [d ⁻¹]	c_0 [g kg ⁻¹]	ρ_g [kg m ⁻³]	R^2 [%]	y_{\max} [m ³ kg ⁻¹]	k [d ⁻¹]
100 % Maissilage	299	1,270	12,8	0,80	0,101	285	1,243	40,3	1,03	0,013
67 % Maissilage	127	1,250	15,1	0,68	0,247	102	1,255	2)	2)	2)
33 % Maissilage	81	1,228	14,6	0,58	0,273	62	1,193	2)	2)	2)
100 % Rübensilage	106	1,261	1)	0,87	1)	136	1,232	29,5	0,88	0,065
67 % Rübensilage	83	1,227	1)	0,74	1)	82	1,224	2)	2)	2)
33 % Rübensilage	68	1,212	1)	0,62	1)	58	1,219	2)	2)	2)
100 % Roggen-GPS	202	1,238	59,3	0,96	0,026	208	1,234	1)	0,73	1)
67 % Roggen-GPS	112	1,226	37,7	0,76	0,089	96	1,222	2)	2)	2)
33 % Roggen-GPS	77	1,213	41,6	0,66	0,092	60	1,217	2)	2)	2)
100 % Gülle	58	1,196	39,1	0,50	0,086	44	1,204	2)	2)	2)

1) Varianzanalyse erlaubt keine Kurvenanpassung über Gl. 26 mit P-Wert < 0,05

2) Gasausbeuten wurden aufgrund zu starker Prozesshemmungen nicht ausgewertet

Thermophile Vergärung - Basis Schweinegülle

Bei der thermophilen Vergärung der NawaRos als Monosubstrat mit Impfmateriale aus der Schweinegülle-Biogasanlage steigen die Gehalte an Säuren bereits ab B_R von $2,5 \text{ kg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ deutlich an, so dass dieser Grenzwert als $B_{R,k}$ gewählt wird (Abb. A 19). Bei der Monovergärung von Roggen-GPS kann keine gesicherte Kurvenanpassung über die hyperbolische Funktionsgleichung erfolgen. Für y_{\max} ergibt sich ein relativ niedriger Wert in Höhe von $0,73 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS. Für Rübensilage ergibt sich ein k -Wert von $0,07 \text{ d}^{-1}$ und mit $0,88 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS ein nahezu gleicher Wert für y_{\max} wie bei der Vergärung auf Basis von Rindergülle. Der Einfluss von B_R auf y_B ist bei der Monovergärung von Maissilage ähnlich extrem ausgeprägt wie bei der Monovergärung von Roggen-GPS auf Basis von Rindergüllen-Impfsubstrat. Die Werte für y_{\max} und k belaufen sich dabei auf $1,03 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ oTS und $0,01 \text{ d}^{-1}$. Damit liegt in diesem Fall der geringste k -Wert von allen untersuchten mesophilen und thermophilen Varianten vor. Auch hier muss möglicherweise von einer versuchsbedingten Prozessstörung ausgegangen werden.

Vergleich Basis Rinder- und Schweinegülle

Abb. 13 stellt einen Vergleich der thermophilen Monovergärung beim Einsatz von Impfgülle auf Basis von Rinder- bzw. Schweinegülle graphisch dar. Es wird ersichtlich,

dass auch hier der Verlauf der y_B -Kurven in Abhängigkeit von B_R nicht allein substratabhängig ist, sondern von vielen Faktoren beeinflusst wird.

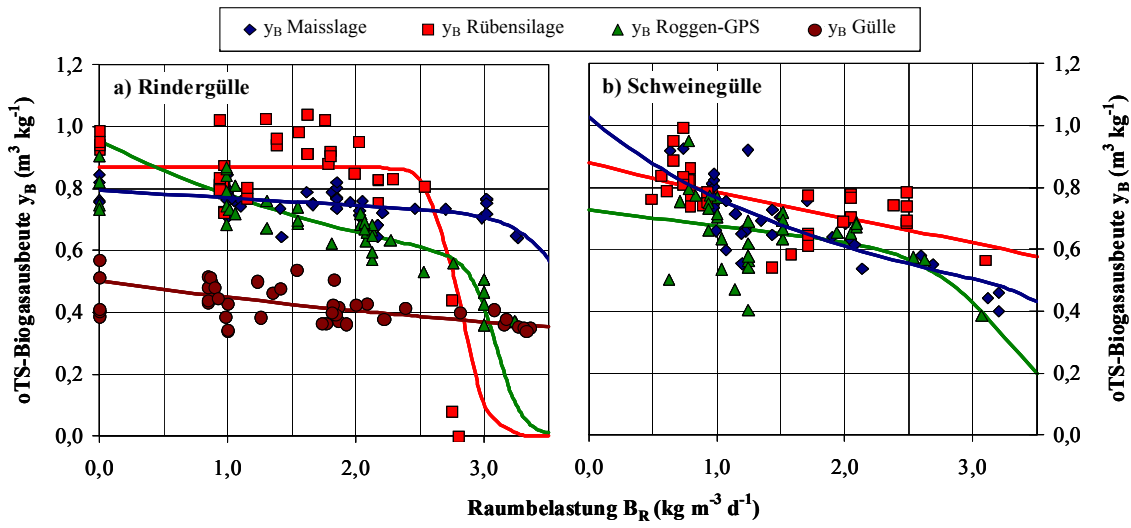


Abb. 13: oTS-Biogasausbeuten y_B bei thermophiler Vergärung von Mais-, Rüben- und Roggensilage als Monosubstrat sowie reiner Gülle in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R bis $B_{R,k}$ bei Versuchen mit Impfgülle auf Basis von a) Rindergülle und b) Schweinegülle

2.1.4 Zusammenfassung

Die vorliegenden Ergebnisse aus quasi-kontinuierlichen Langzeitversuchen haben gezeigt, dass der Einfluss der oTS-Raumbelastung B_R auf die oTS-Biogasausbeute y_B für den anaeroben Abbau von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen in vollständig durchmischten Reaktoren auf der Grundlage einer Reaktion 1. Ordnung mit einer einfachen Bemessungsgleichung beschrieben werden kann. Neben der oTS-Raumbelastung sind in der Bemessungsgleichung die Parameter oTS-Konzentration des Gärsubstrates c_0 , maximale oTS-Biogasausbeute y_{\max} , Reaktionsgeschwindigkeitskonstante k sowie Dichte des Biogases und des Ablaufs zu berücksichtigen. Diese Parameter sind substrat- und prozessspezifisch und müssen für jede Biogasgewinnung aus NawaRos und Gülle individuell ermittelt werden. Liegen keine systematischen Belastungssteigerungsversuche für die Vergärung von NawaRos vor, so lassen sich die Zulaufkonzentration durch eine einfache oTS-Analyse und das Biogaspotential y_{\max} durch Batch-Gärtests bestimmen. Zur Ermittlung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten ist darüber hinaus ein Langzeitversuch bei einer konstanten Raumbelastung notwendig, die zwischen 2 und 3 kg m⁻³ d⁻¹ gewählt werden sollte.

Der so ermittelte Wert für k gibt Auskunft über den Einfluss der gesteigerten Raumbelastung auf die Biogasausbeute. Bei der mesophilen Monovergärung von Rübensilage liegt k mit 0,32 d⁻¹ zum Beispiel deutlich höher als bei der Vergärung von reiner Rindergülle mit 0,05 d⁻¹. Demnach werden im ersten Fall auch bei Raumbelastungen von 3 kg m⁻³ d⁻¹ noch 92 % der maximalen Gasausbeute, die 0,93 m³ kg⁻¹ oTS beträgt, erzielt. Die entsprechende Gasausbeute macht bei der Vergärung von Rindergülle mit 0,38 m³ kg⁻¹ oTS hingegen nur etwa 60 % vom Maximum mit 0,61 m³ kg⁻¹ oTS aus. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist mit Werten für k von 0,03 bzw. 0,04 d⁻¹ bei der mesophilen Monovergärung von Mais- und Roggensilage annähernd gleich.

Geringe Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten bedeuten deutlich reduzierten Substratabbau und damit hohes Biogaspotential des Gärrestes bei hohen Raumbelastungen. Die bei der kontinuierlichen Vergärung von NawaRos erzielbaren Gasmengen aus dem Gärrest sollten wirtschaftlich genutzt und nicht in die Umwelt entlassen werden. In diesen Fällen ist daher die Anbringung einer gasdichten Abdeckung des Gärrestlagers zu empfehlen.

Erhöhte Raumbelastungen führen nicht nur zu einer weiteren Reduzierung der Biogasausbeute, sondern sie gefährden die Stabilität des Prozesses durch Übersäuerung

der Reaktionsmasse. Für den stark gehemmten Bereich bei höheren Raumbelastungen ist eine Erweiterung der einfachen Bemessungsgleichung um eine oder mehrere Hemmfunktionen notwendig. Diese können sich auf den pH-Wert, den Gehalt an organischen Gesamtsäuren bzw. Propionsäure beziehen.

Ein Vergleich der meso- und thermophilen Versuche bei 35°C bzw. 55°C machte deutlich, dass die Abnahme der Biogasausbeute bei gesteigerter Raumbelastung bei höheren Temperaturen weniger stark ausgeprägt ist. Der Zeitpunkt der Übersäuerung tritt bei thermophiler Vergärung jedoch vorzeitiger ein, da ein schnellerer Substratabbau auch eine höhere Instabilität des Prozesses mit sich bringt. Aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes von Schweinegülle ist eine thermophile Vergärung nur bei extrem geringen Fermenterbelastungen möglich. Bei der Kovergärung nimmt mit abnehmendem Anteil des Kosubstrates in der Mischung die oTS-Biogasausbeute linear ab. Der Methangehalt des Biogases steigt jedoch analog von ca. 55-57 % bei der mesophilen Monovergärung von NawaRos auf 62 % bei der mesophilen Vergärung von Rinder- und Schweinegülle an.

Mit Hilfe der hyperbolischen Funktionsgleichung und der Kenntnis über die Gasausbeuten der Einzelsubstrate lässt sich für jede Substratmischung die von der Raumbelastung abhängige Gasausbeute in Abhängigkeit von der Temperatur berechnen.

2.1.5 Anhang zu den Ergebnissen

Tab. A 1: Analyseergebnisse der Impfgülle für Batch-Versuche

Impfgülle für	pH [-]	TS [%]	oTS [% TS]	org. Sr. [g kg ⁻¹]
Batch 1	8,1	3,8	66,0	2,1
Batch 2	8,1	3,0	59,8	0,8
Batch 6	8,0	2,9	58,5	2,3
Batch 4	8,9	2,6	58,6	1,9
Batch 5	--	11,2	71,2	--

Tab. A 2: Analyseergebnisse der NawaRos für Batch-Versuche

Substrat/Batch	TS [%]	oTS [% TS]	oTS [% FM]	pH [-]	NH ₄ -N [g kg ⁻¹]	Zucker [% TS]	XP [% TS]	XL [g kg ⁻¹]	XF [% TS]	Säuren [g kg ⁻¹]
Maissilage										
Batch 1	31,5	94,9	29,9	3,9	0,38	1,7	8,8	8,5	23,6	5,8
Batch 3	33,8	95,2	32,2	3,5	0,38	4,4	11,3	9,1	30,6	-
Batch 5	31,7	95,0	30,1	-	-	-	-	-	-	-
Rübensilage										
Batch 1	7,8	92,9	7,3	3,8	0,17	41,5	6,3	0,4	6,5	8,2
Batch 3	12,2	90,9	11,1	3,5	0,35	27,5	12,6	1,1	8,0	7,5
Batch 5	13,1	92,4	12,1	-	-	-	-	-	-	-
Roggen-GPS										
Batch 1	22,3	89,6	20,0	4,8	2,08	0,6	9,7	7,8	34,0	16,4
Batch 3	23,4	88,1	20,6	4,4	0,89	1,7	11,8	7,0	38,9	5,1
Batch 5	23,3	89,7	20,9	-	-	-	-	-	-	-

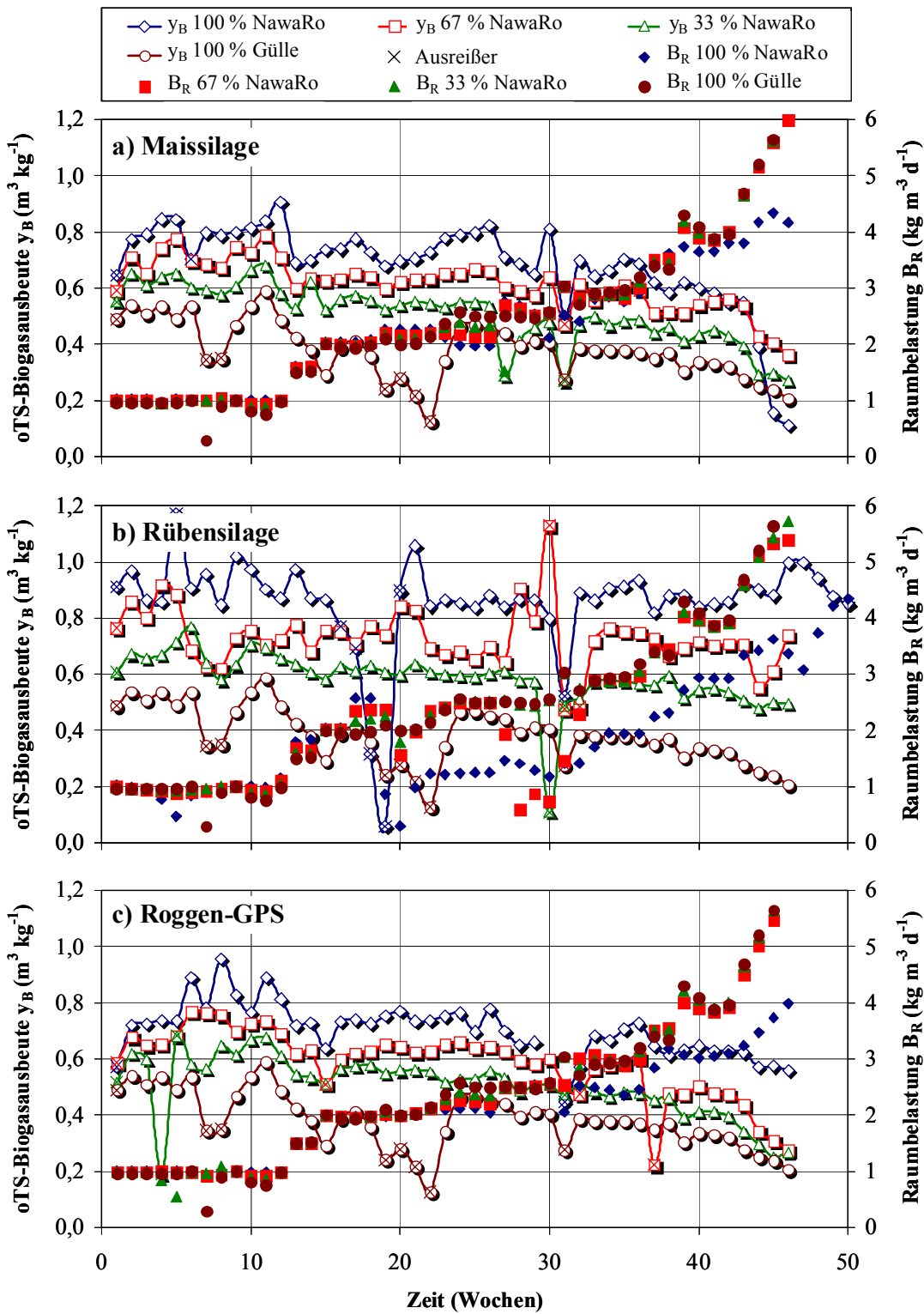


Abb. A 1: Raumbelastungen B_R und oTS-Biogasausbeuten y_B aus den NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle im Zeitverlauf, mesophile Vergärung

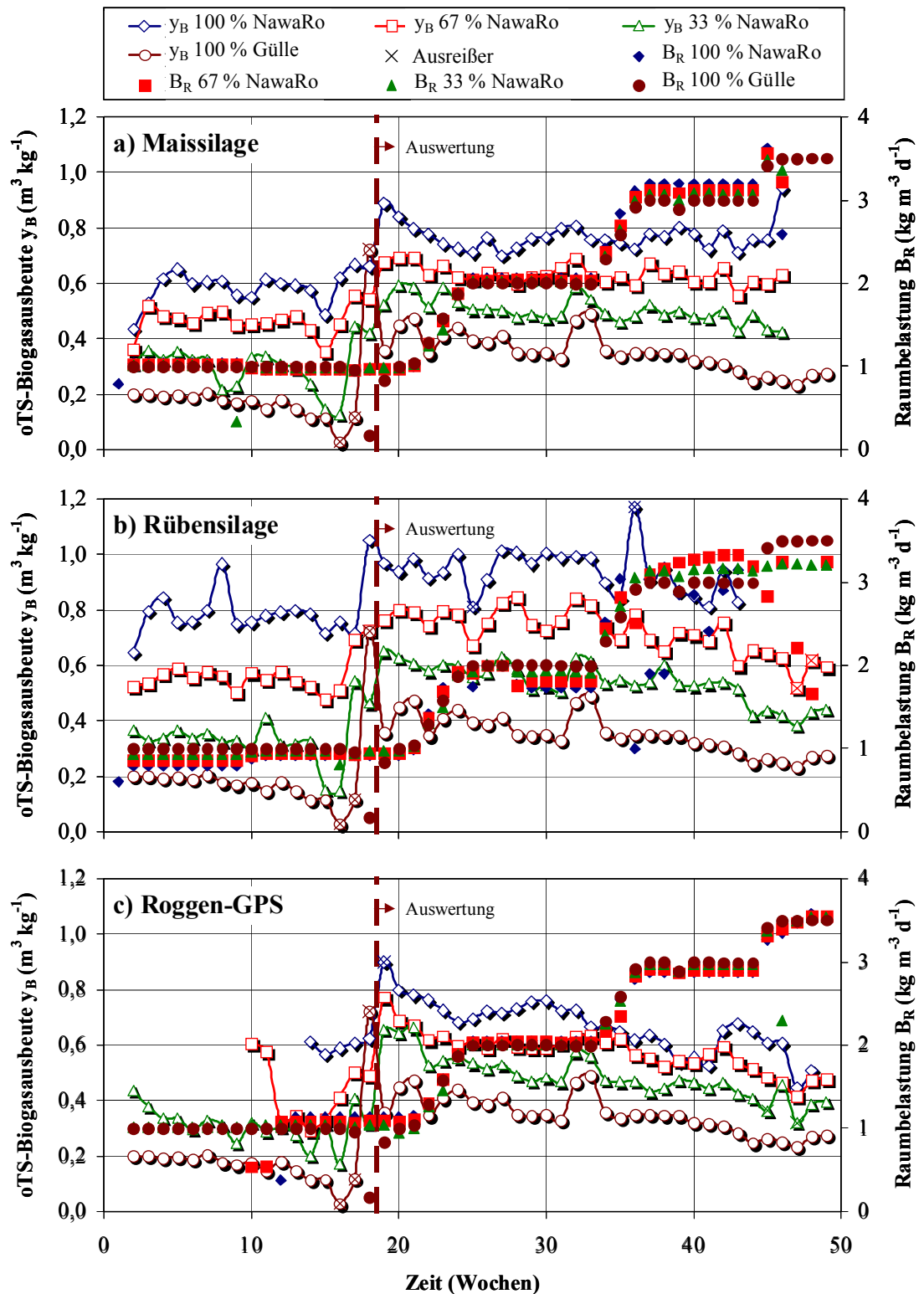


Abb. A 2: Raumbelastungen B_R und oTS-Biogasausbeuten y_B aus den NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Schweinegülle im Zeitverlauf, mesophile Vergärung

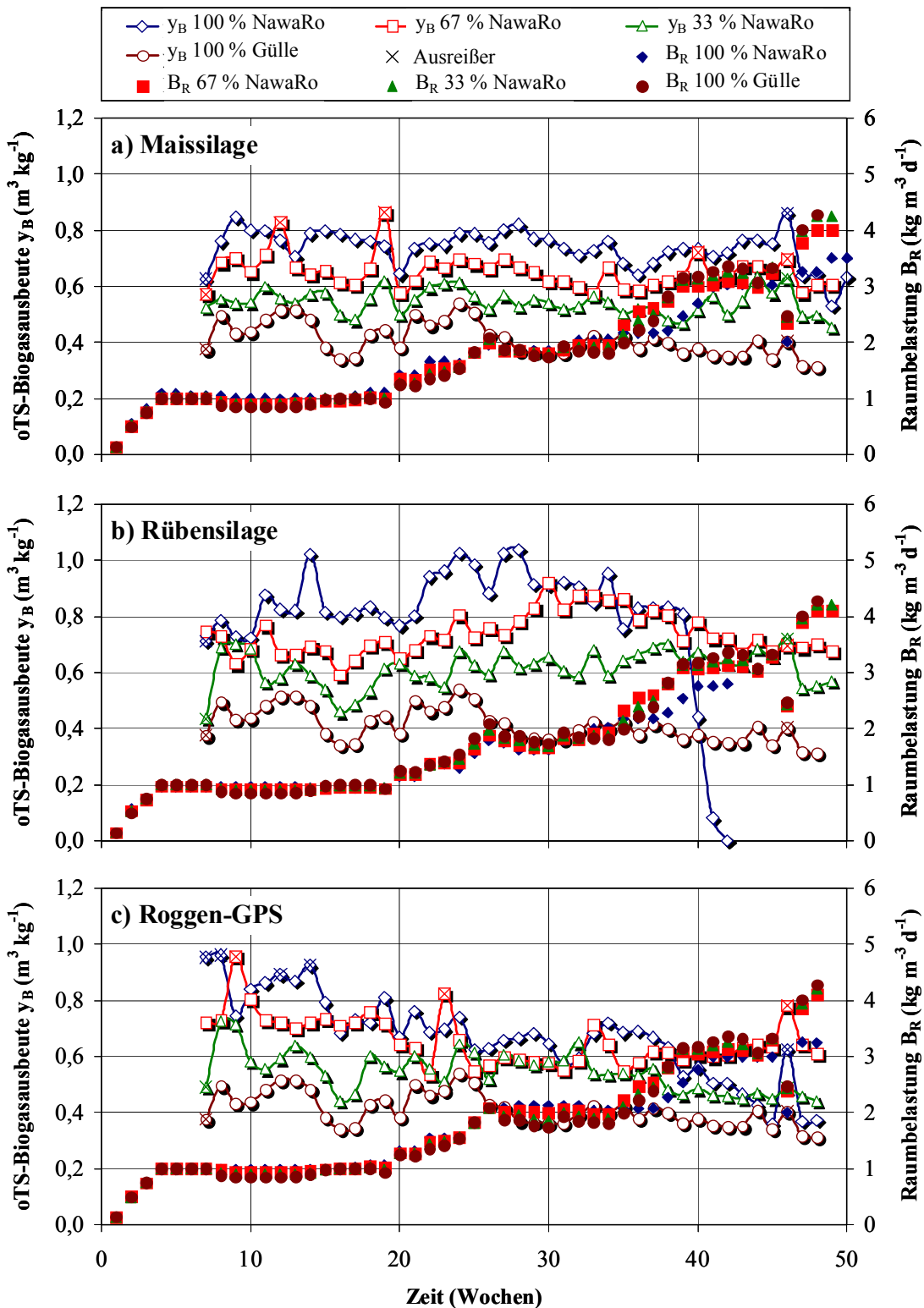


Abb. A 3: Raumbelastungen B_R und oTS-Biogasausbeuten y_B aus den NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle im Zeitverlauf, thermophile Vergärung

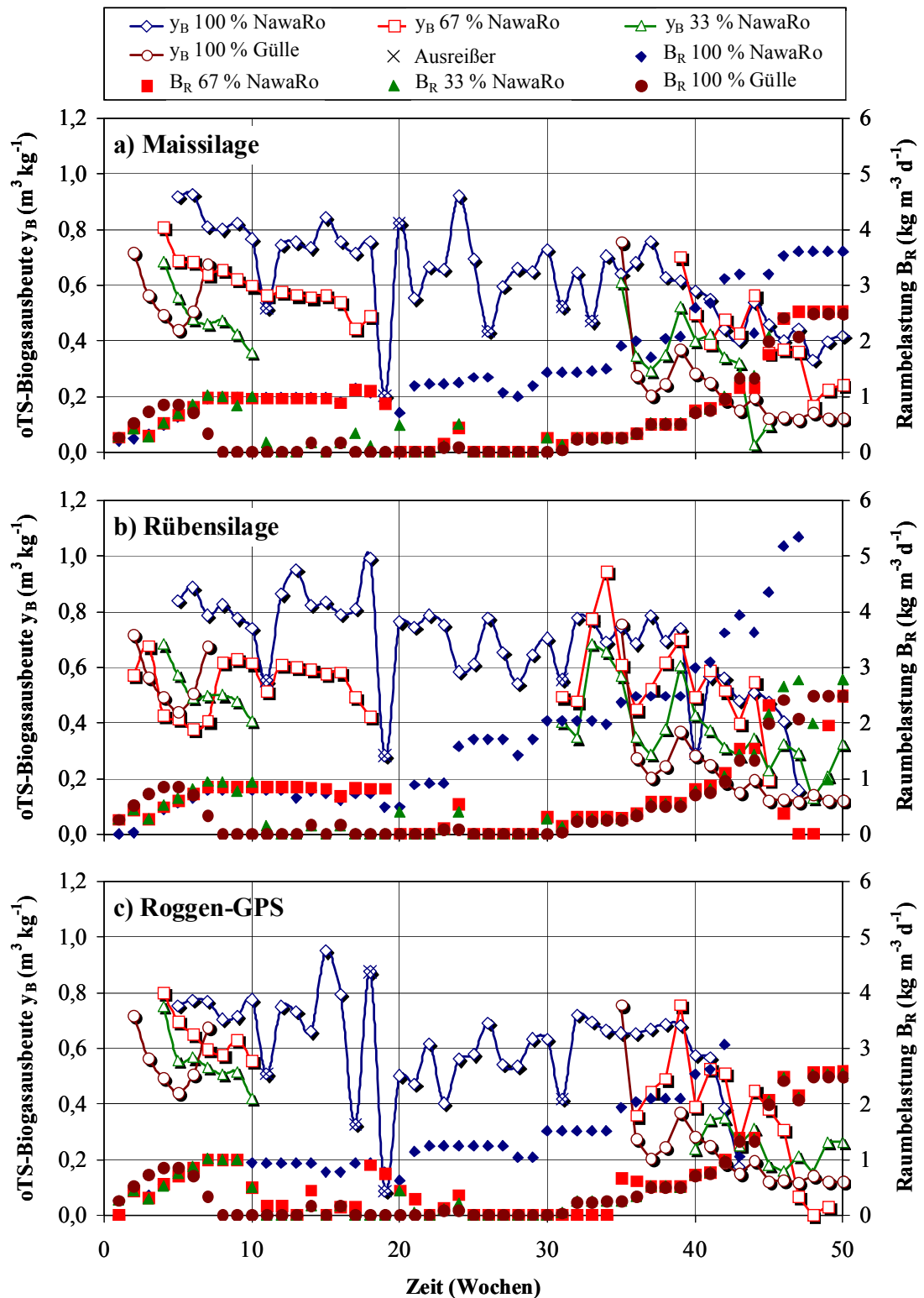


Abb. A 4: Raumbelastungen B_R und $\text{oTS-Biogasausbeuten } y_B$ aus den NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Monosubstrat im Zeitverlauf, thermophile Vergärung

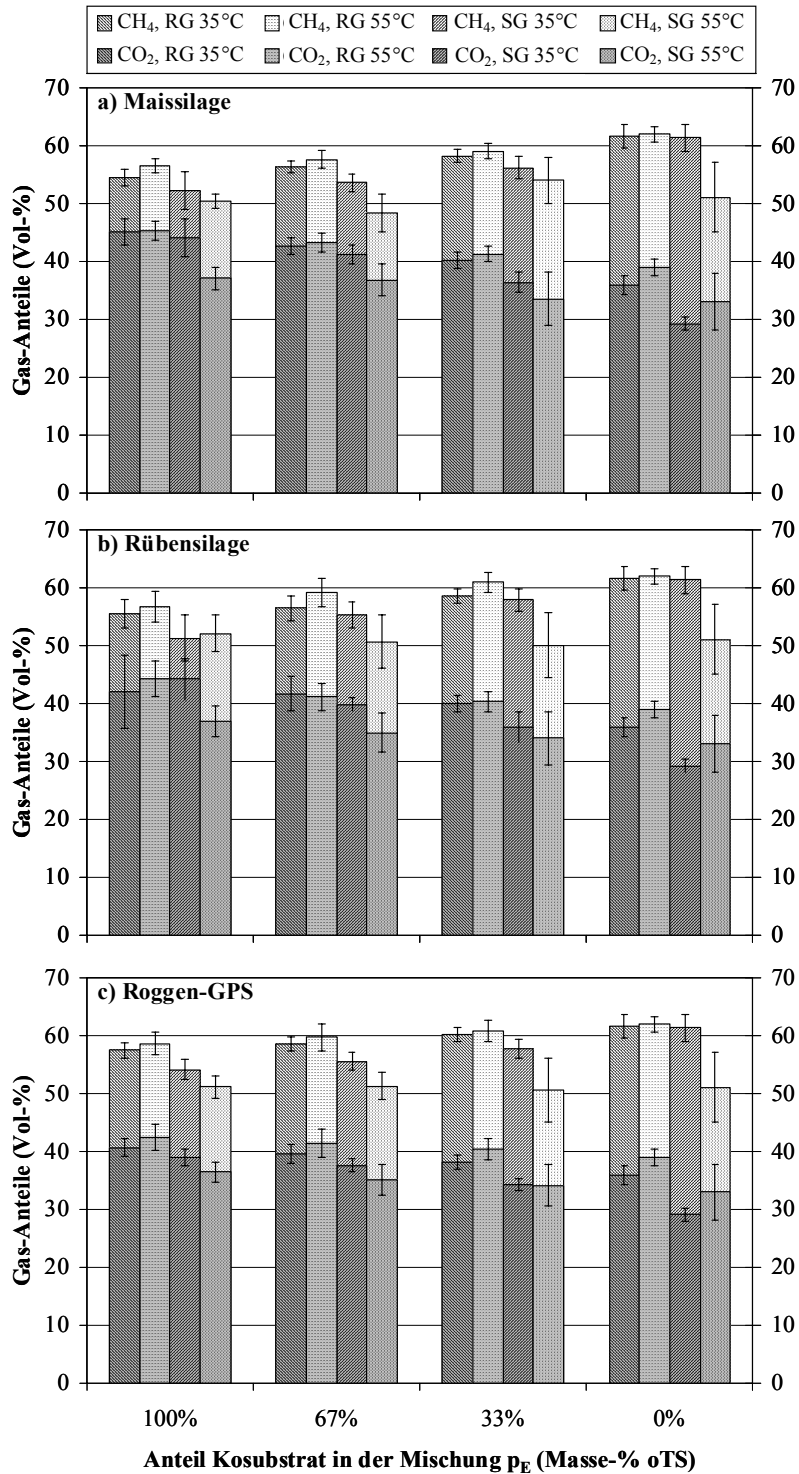


Abb. A 5: Anteile von Methan CH₄ und Kohlendioxid CO₂ im Biogas bei Vergärung der NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle (RG) und Schweinegülle (SG) unter mesophilen (35°C) und thermophilen (55°C) Bedingungen in Abhängigkeit von dem Anteil oTS aus dem Kosubstrat in der Mischung mit Gülle p_E

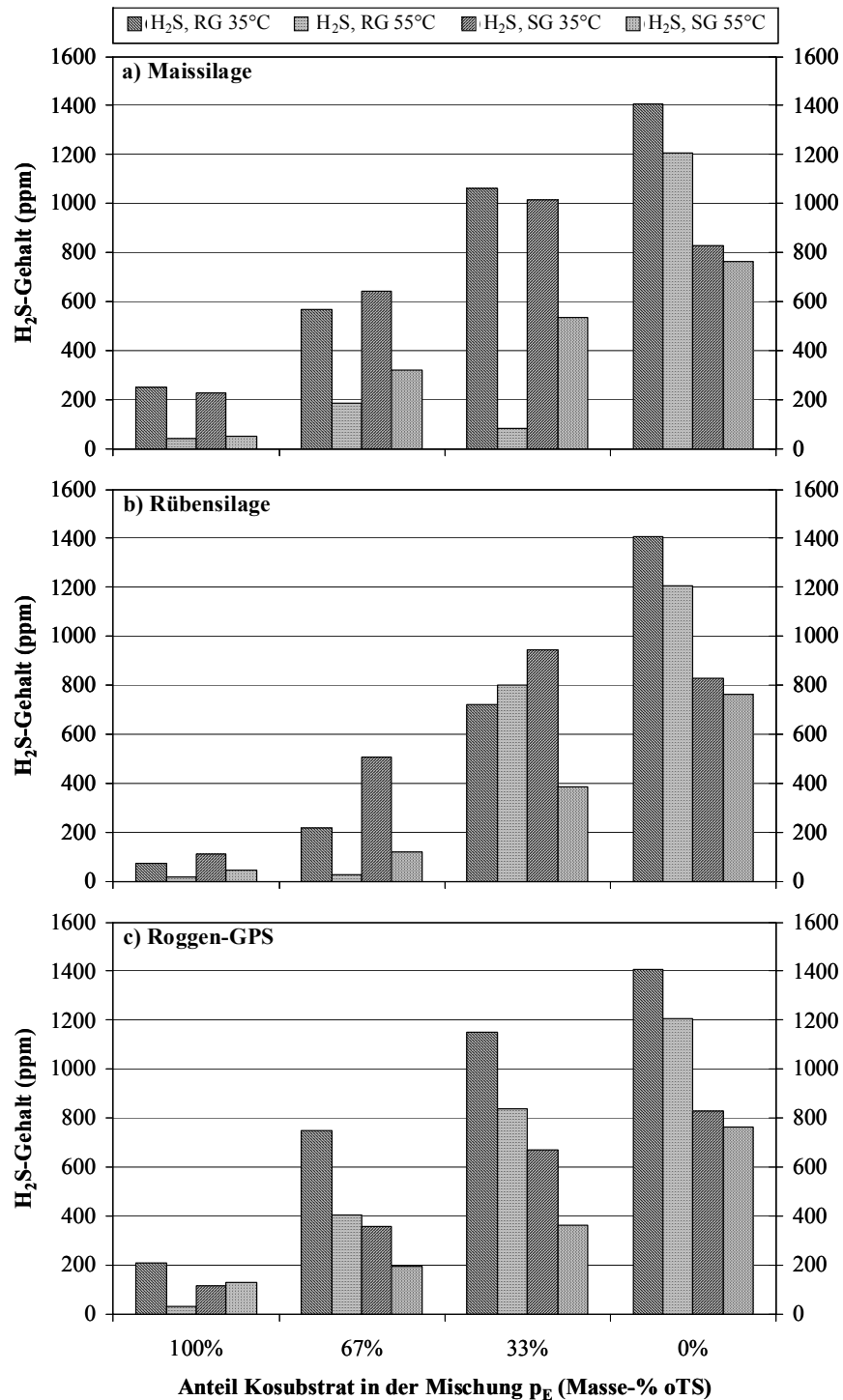


Abb. A 6: Gehalt an H₂S im Biogas bei Vergärung der NawaRos a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS als Mono- und Kosubstrat mit Rindergülle (RG) und Schweinegülle (SG) unter mesophilen (35°C) und thermophilen (55°C) Bedingungen

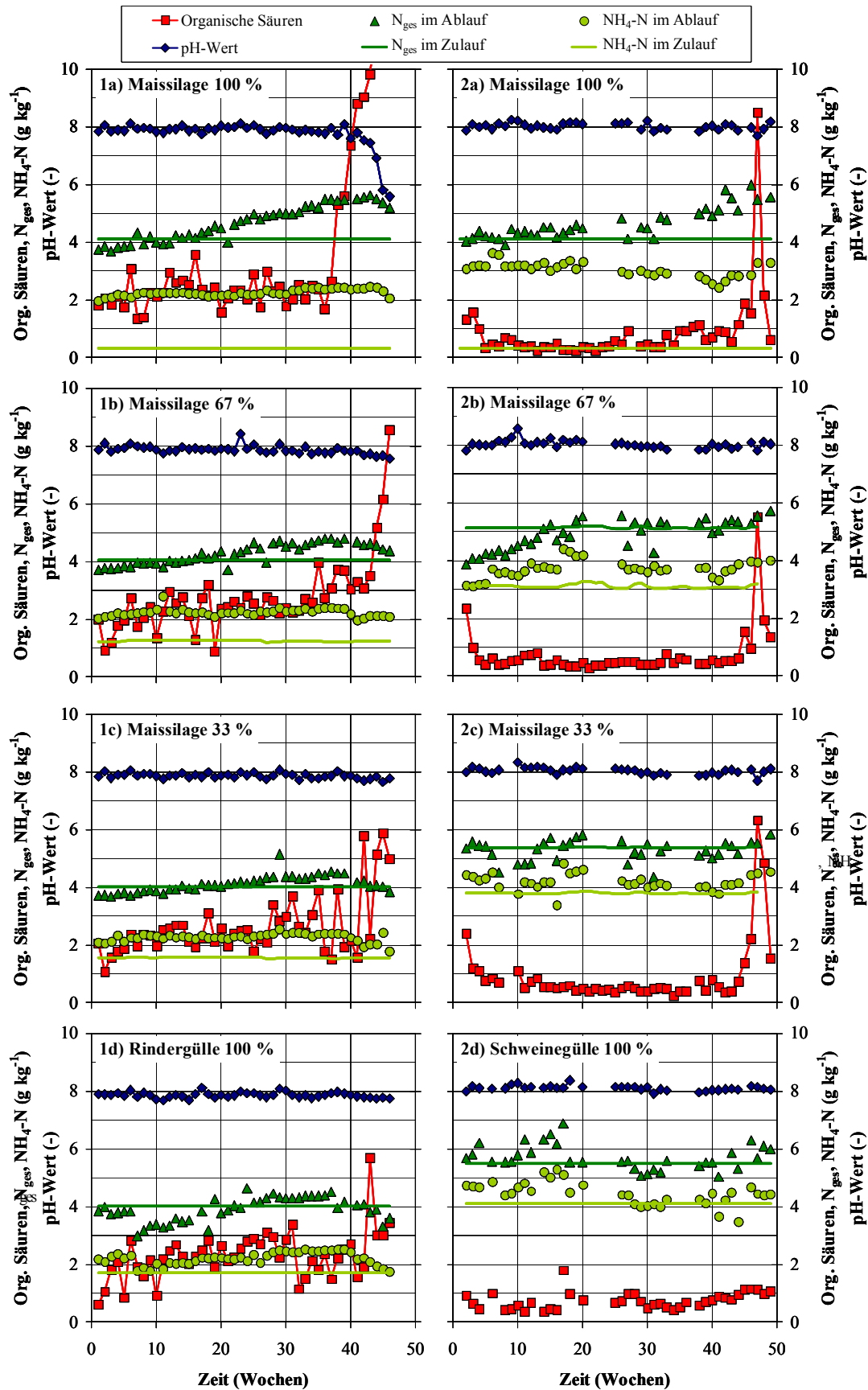


Abb. A 7: Analysen des Inputs und der Reaktorabläufe im Zeitverlauf: pH-Wert, organische Säuren, Gesamt-Stickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff NH_4-N bei Maissilage in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Maissilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, mesophile Vergärung

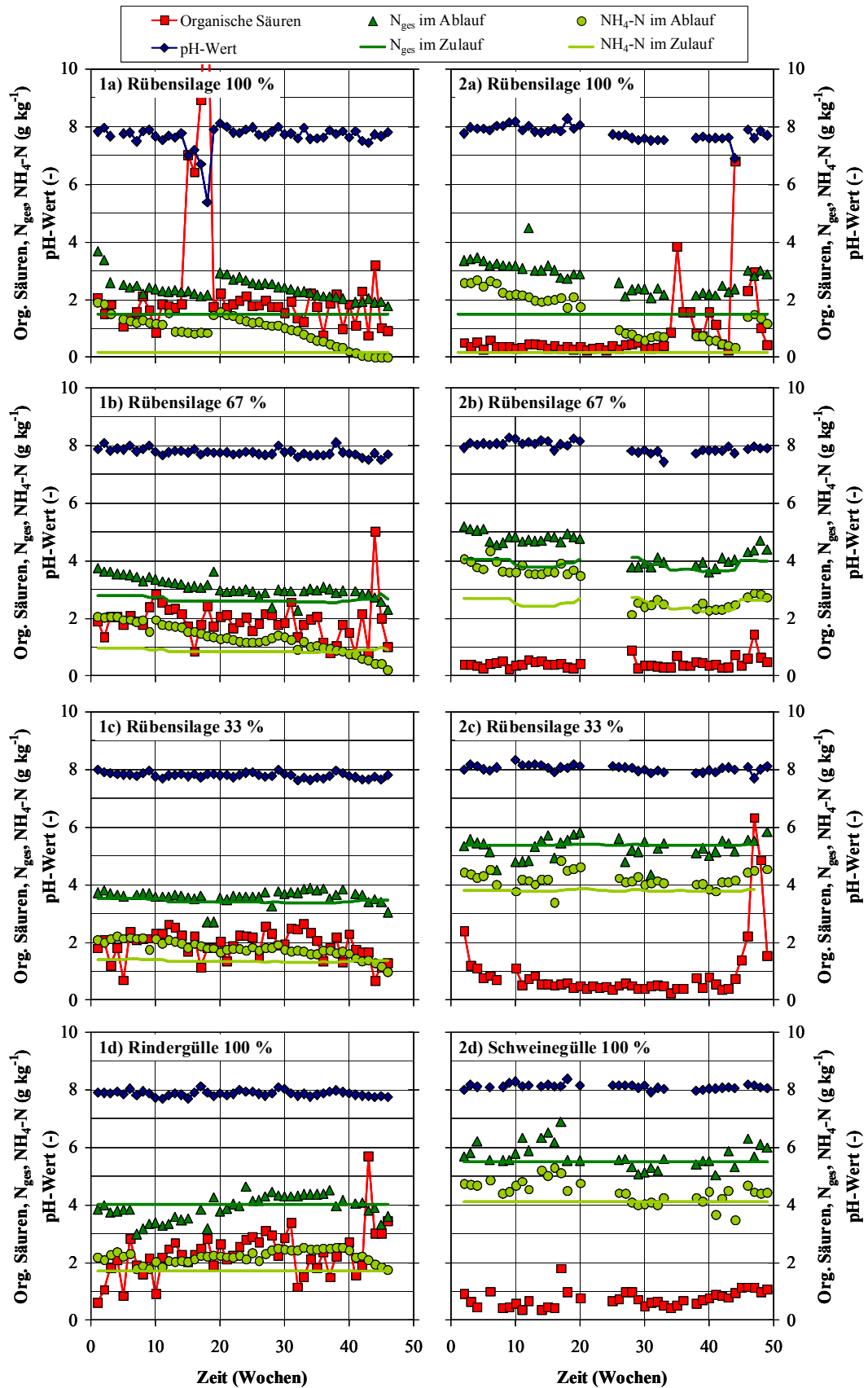


Abb. A 8: Analysen des Inputs und der Reaktorabläufe im Zeitverlauf: pH-Wert, organische Säuren, Gesamt-Stickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff NH₄-N bei Rübensilage in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Rübensilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, mesophile Vergärung

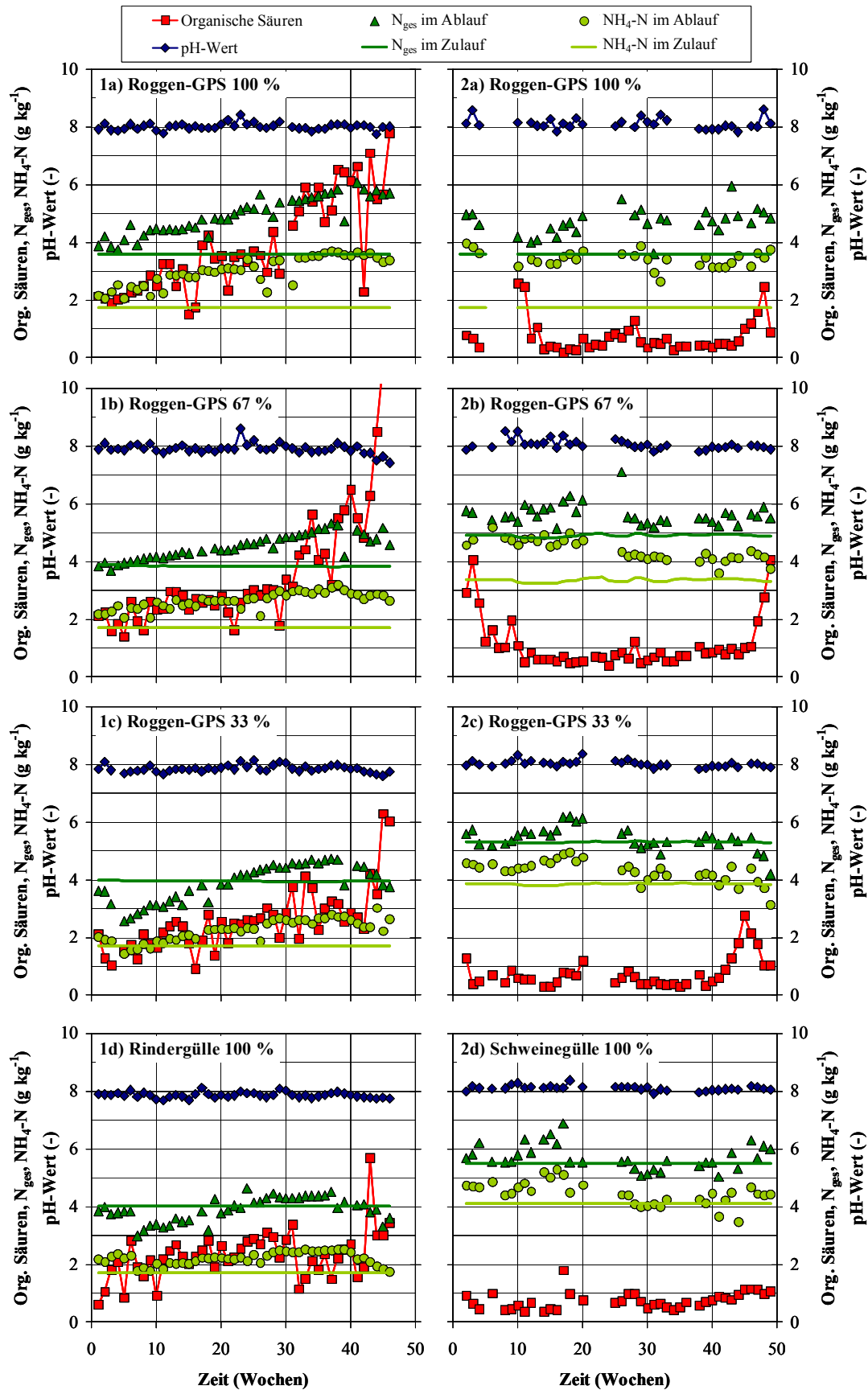


Abb. A 9: Analysen des Inputs und der Reaktorabläufe im Zeitverlauf: pH-Wert, organische Säuren, Gesamt-Stickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff NH₄-N bei Roggen-GPS in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Roggen-GPS und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, mesophile Vergärung

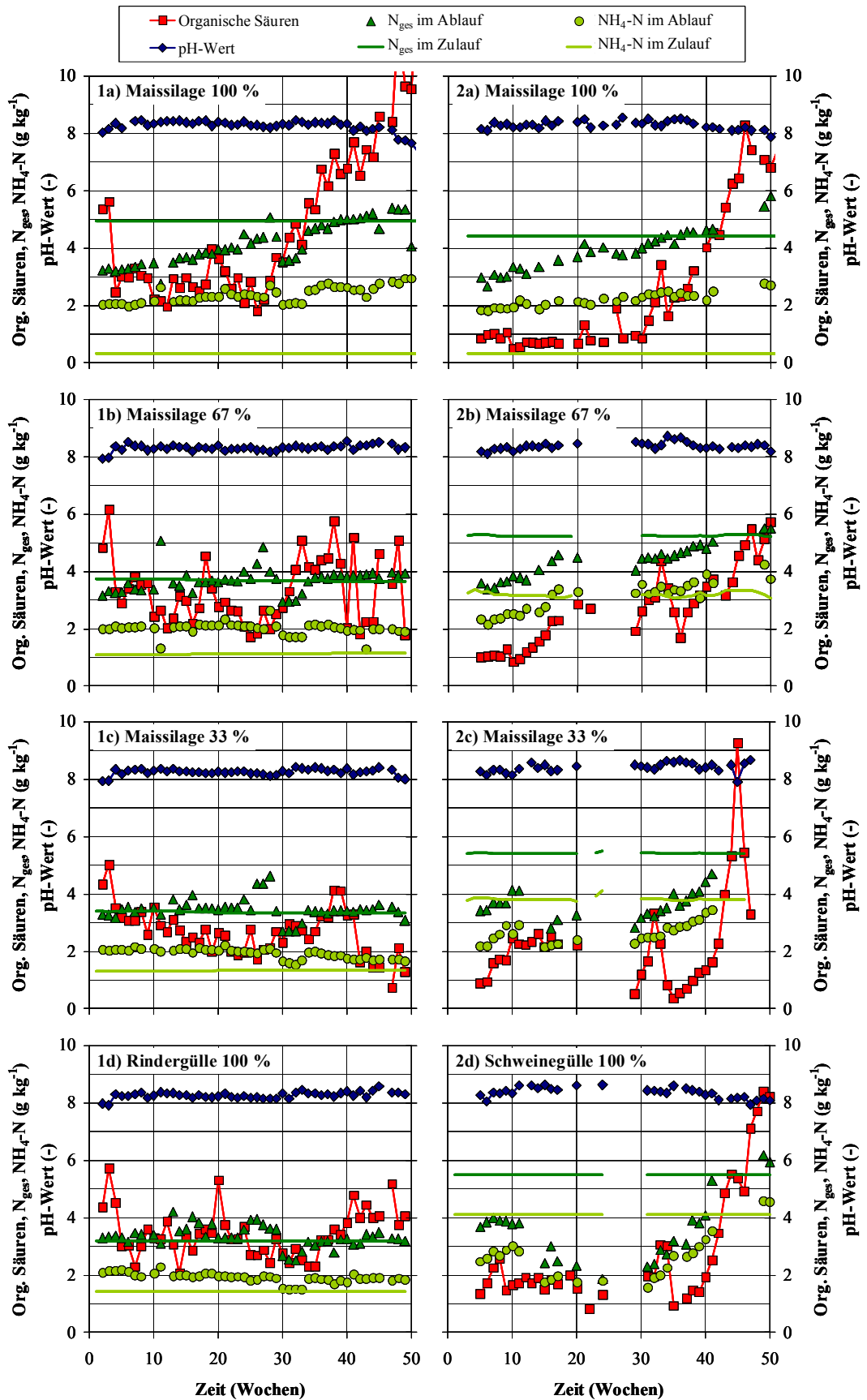


Abb. A 10: Analysen des Inputs und der Reaktorabläufe im Zeitverlauf: pH-Wert, organische Säuren, Gesamt-Stickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff NH_4-N bei Maissilage in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Maissilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, thermophile Vergärung

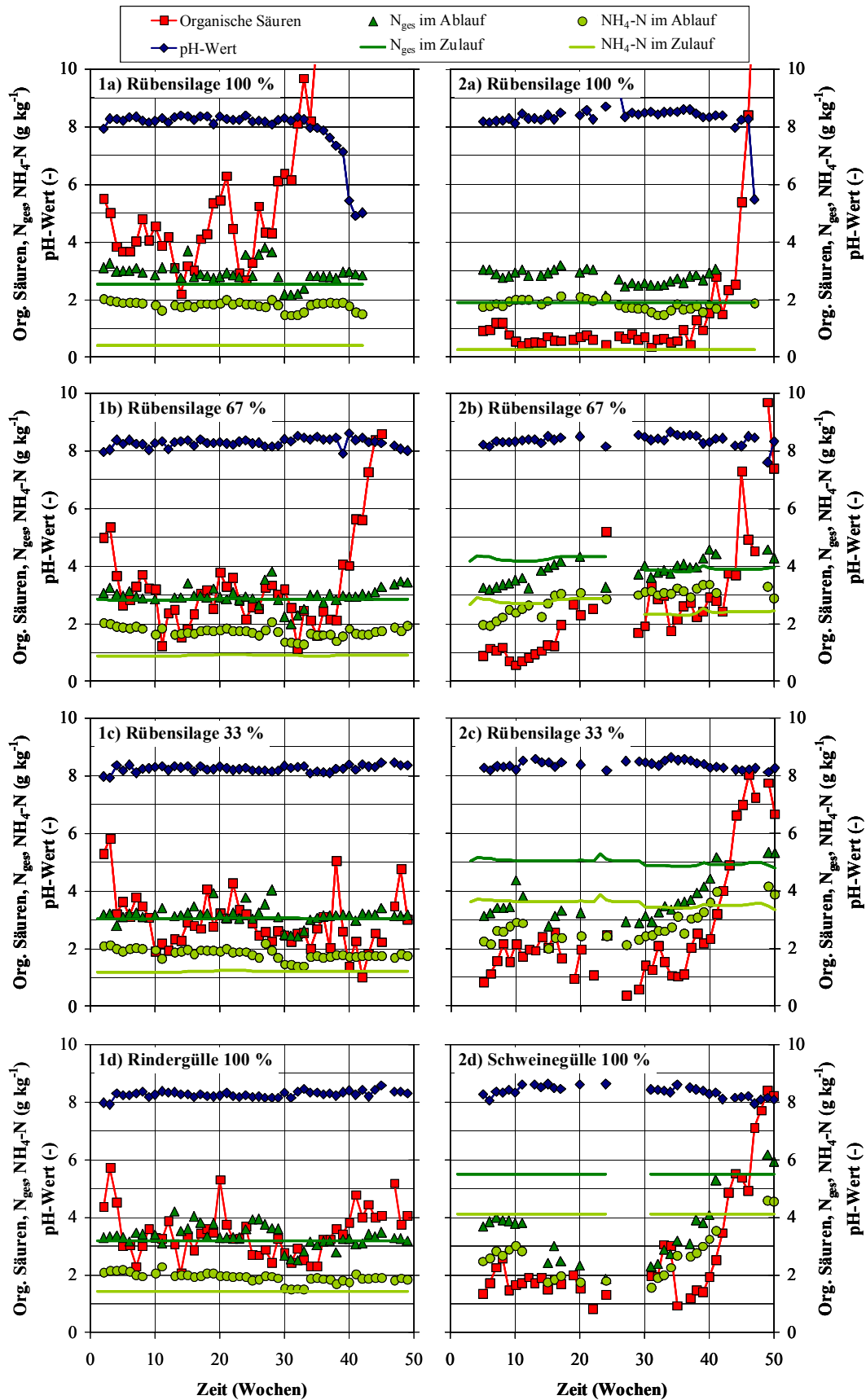


Abb. A 11: Analysen des Inputs und der Reaktorabläufe im Zeitverlauf: pH-Wert, organische Säuren, Gesamt-Stickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff $NH_4\text{-N}$ bei Rübensilage in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Rübensilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, thermophile Vergärung

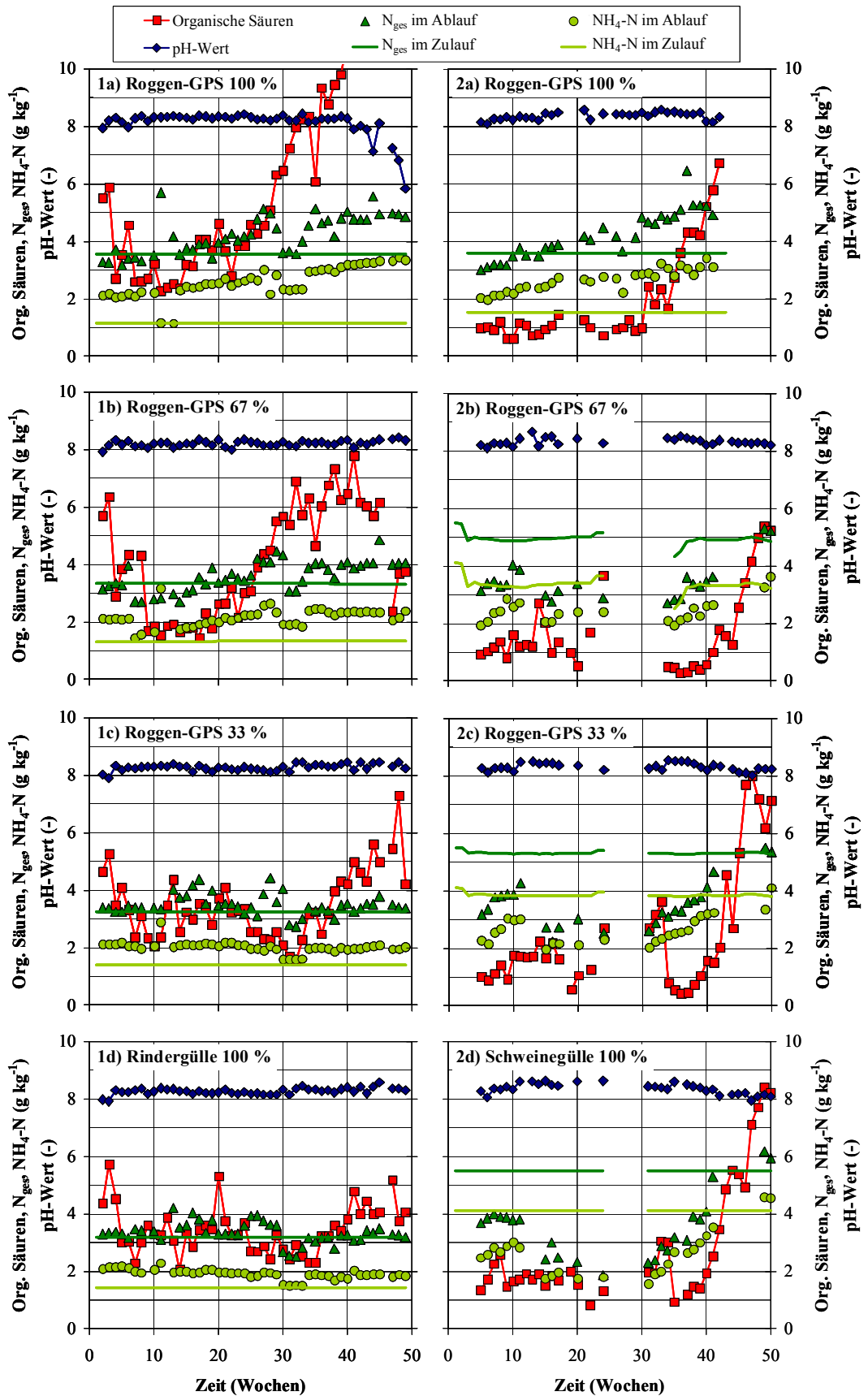


Abb. A 12: Analysen des Inputs und der Reaktorabläufe im Zeitverlauf: pH-Wert, organische Säuren, Gesamt-Stickstoff N_{ges} und Ammonium-Stickstoff NH₄-N bei Roggen-GPS in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Roggen-GPS und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, thermophile Vergärung

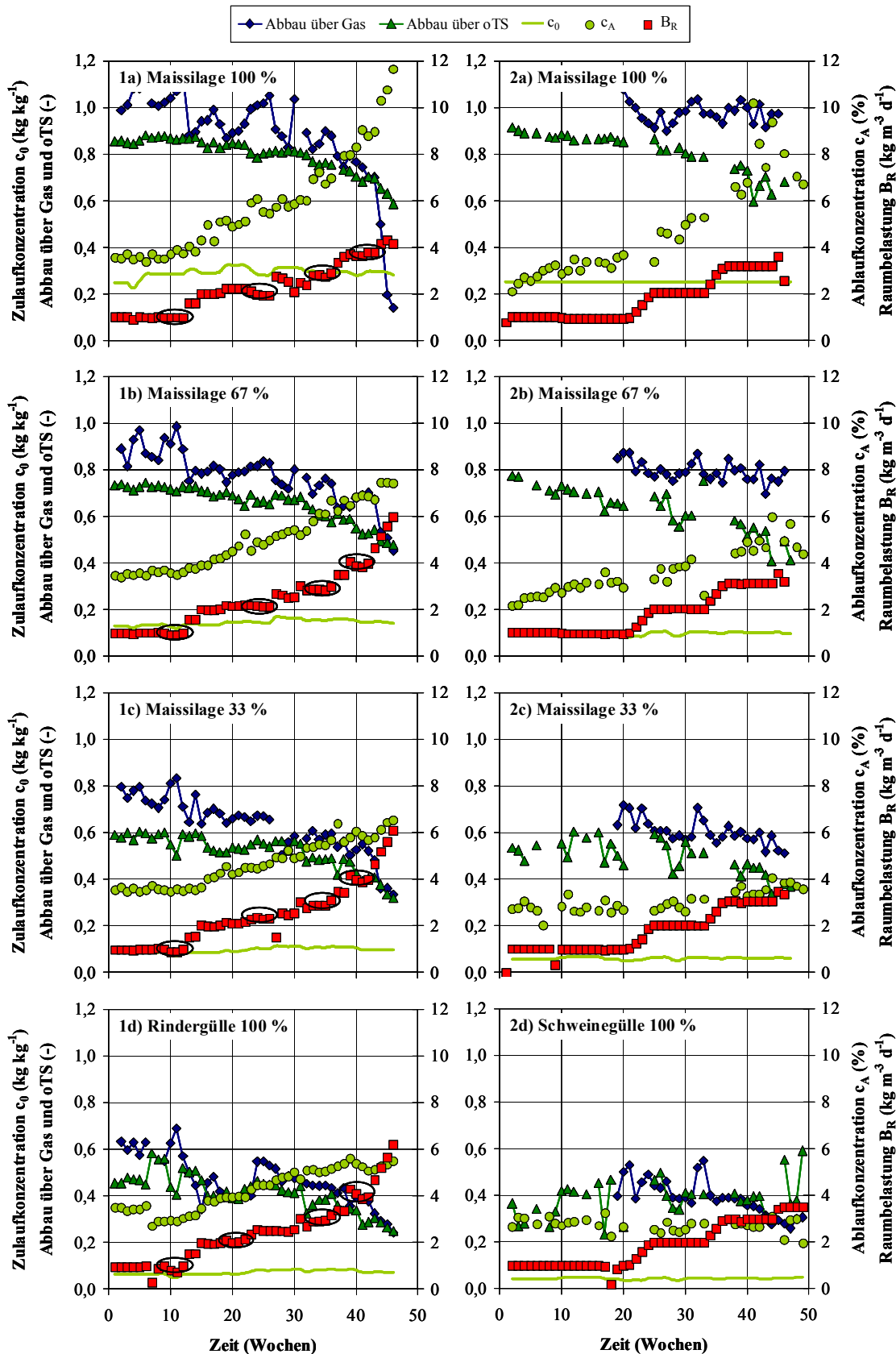


Abb. A 13: Zulaufkonzentration c_0 und Abbaugrad der oTS bei Berechnung über das Gas bzw. über die oTS im Zu- und Ablauf (linke y-Achse) sowie Ablaufkonzentration c_A und Raumbelastung B_R (rechte y-Achse) im Zeitverlauf bei Maissilage in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Maissilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, mesophile Vergärung

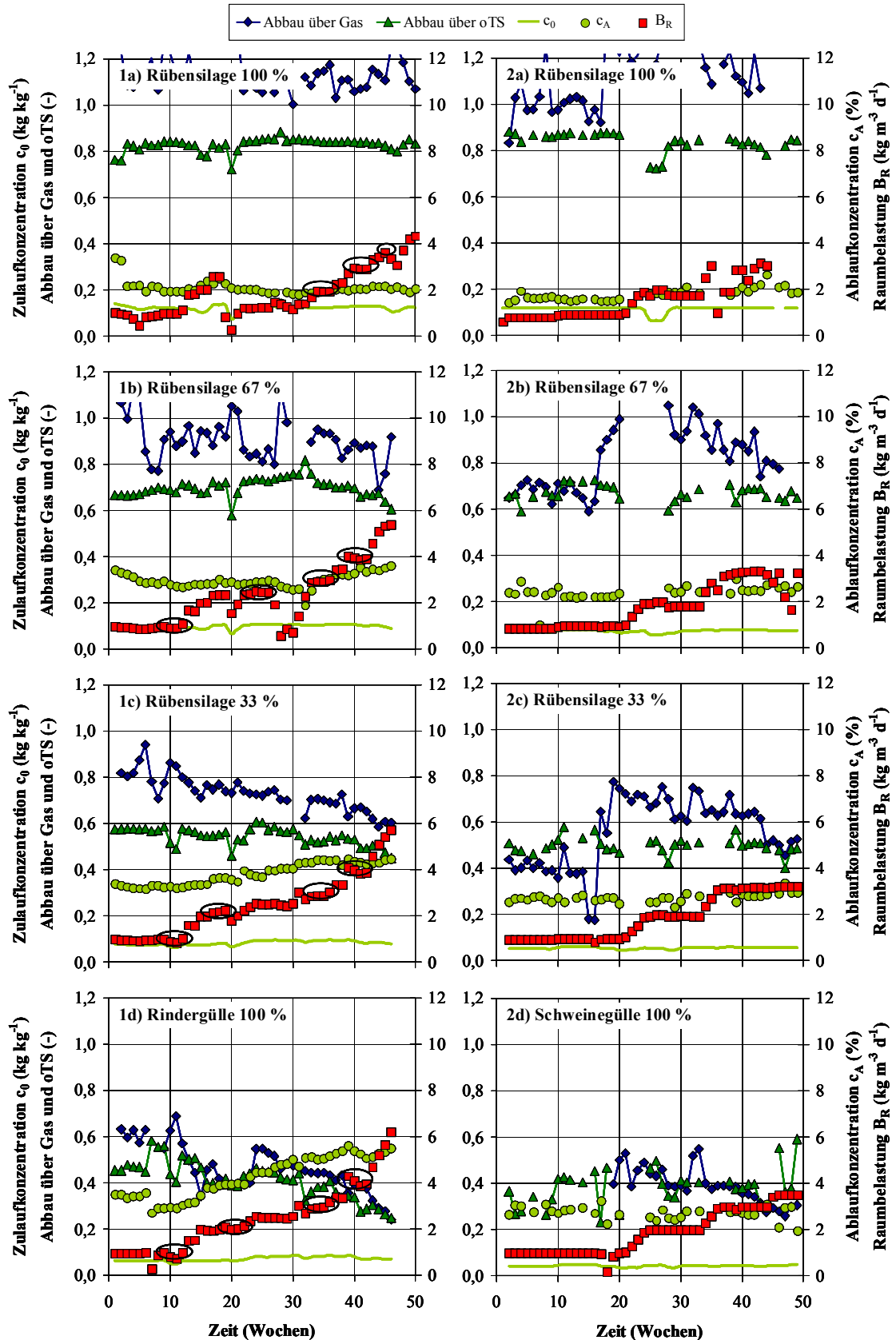


Abb. A 14: Zulaufkonzentration c_0 und Abbaugrad der oTS bei Berechnung über das Gas bzw. über die oTS im Zu- und Ablauf (linke y-Achse) sowie Ablaufkonzentration c_A und Raumbelastung B_R (rechte y-Achse) im Zeitverlauf bei Rübensilage in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Rübensilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, mesophile Vergärung

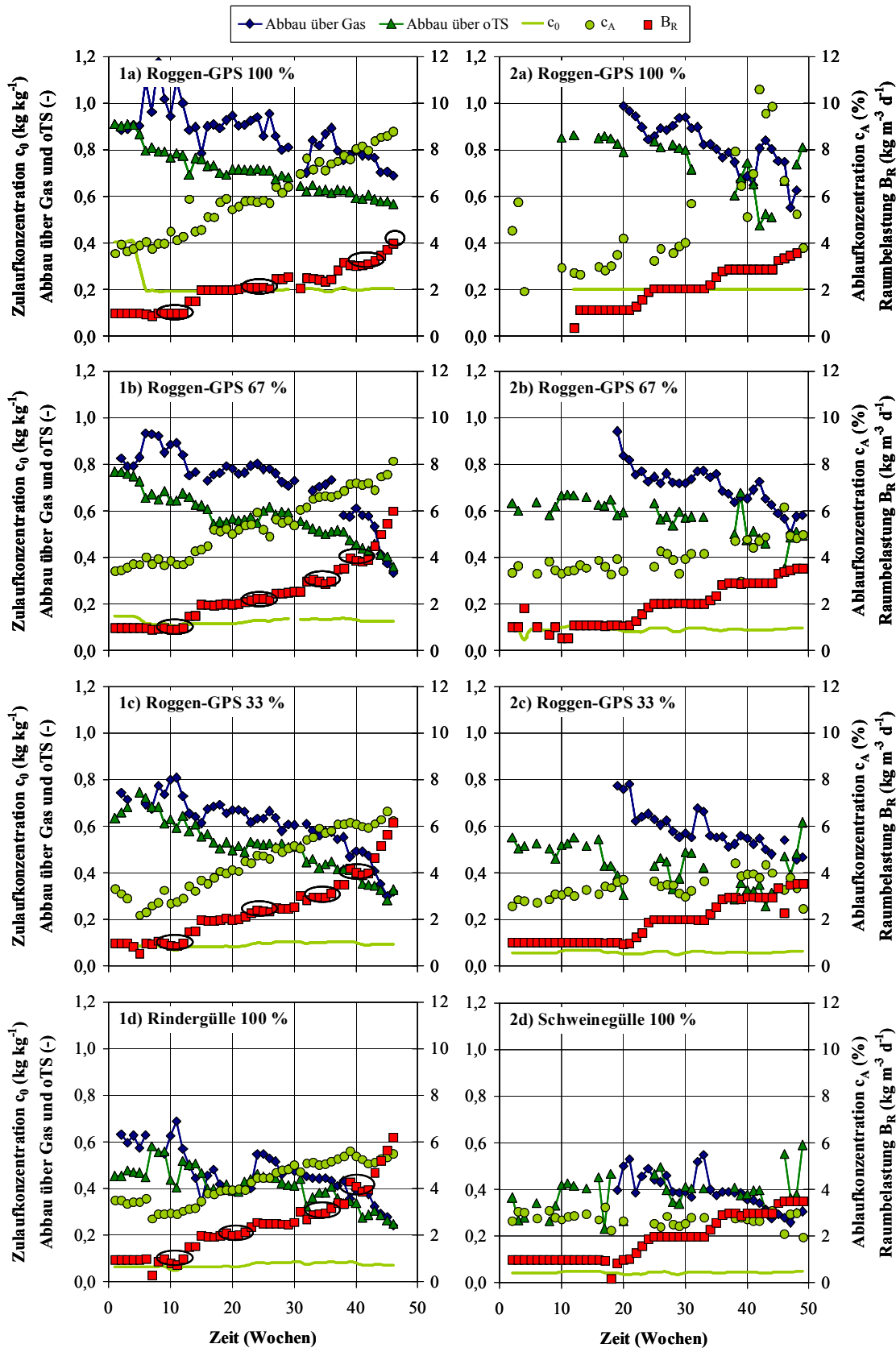


Abb. A 15: Zulaufkonzentration c_0 und Abbaugrad der oTS bei Berechnung über das Gas bzw. über die oTS im Zu- und Ablauf (linke y-Achse) sowie Ablaufkonzentration c_A und Raumbelastung B_R (rechte y-Achse) im Zeitverlauf bei Roggen-GPS in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Roggen-GPS und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, mesophile Vergärung

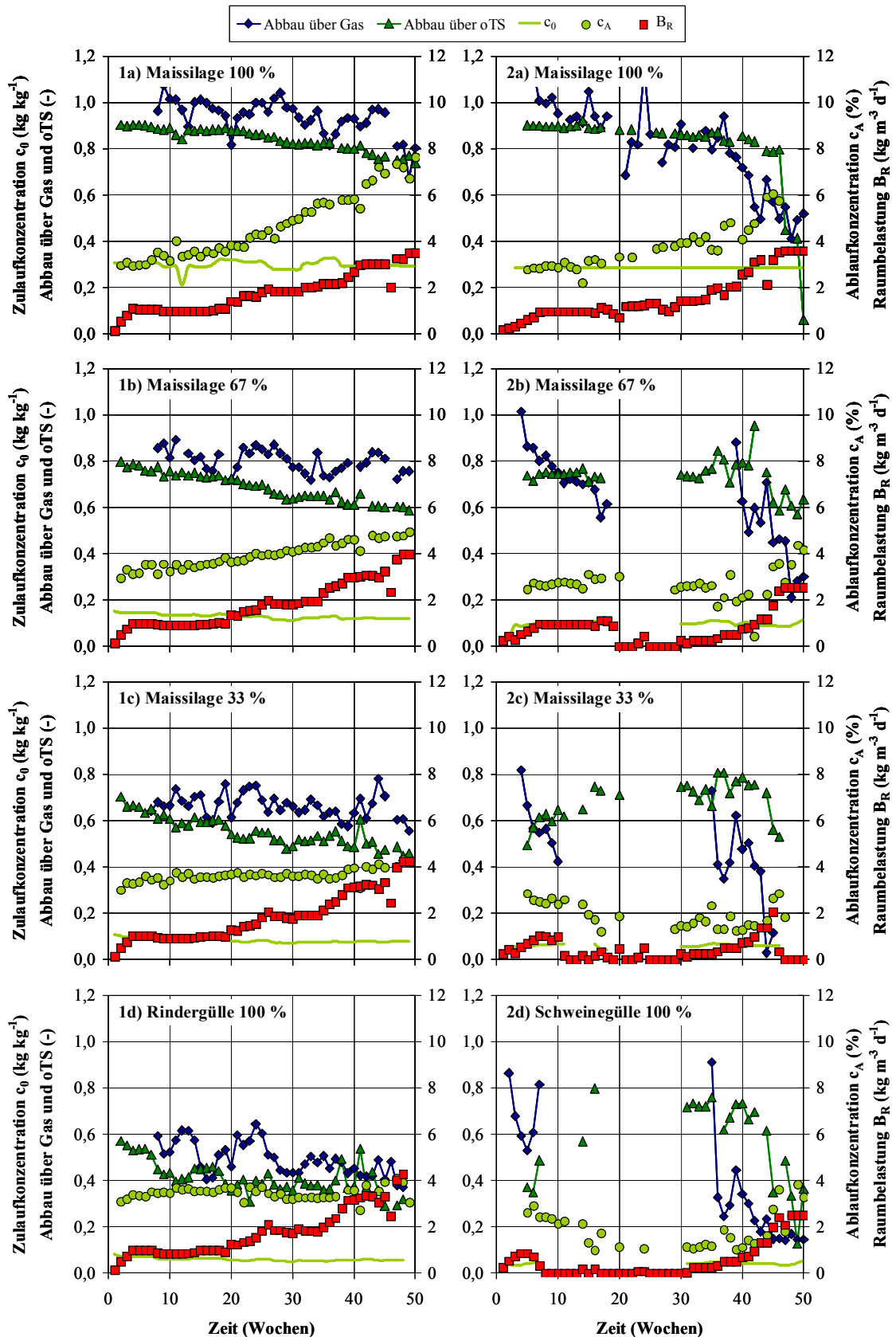


Abb. A 16: Zulaufkonzentration c_0 und Abbaugrad der oTS bei Berechnung über das Gas bzw. über die oTS im Zu- und Ablauf (linke y-Achse) sowie Ablaufkonzentration c_A und Raumbelastung B_R (rechte y-Achse) im Zeitverlauf bei Maissilage in a) Monofergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Maissilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, thermophile Vergärung

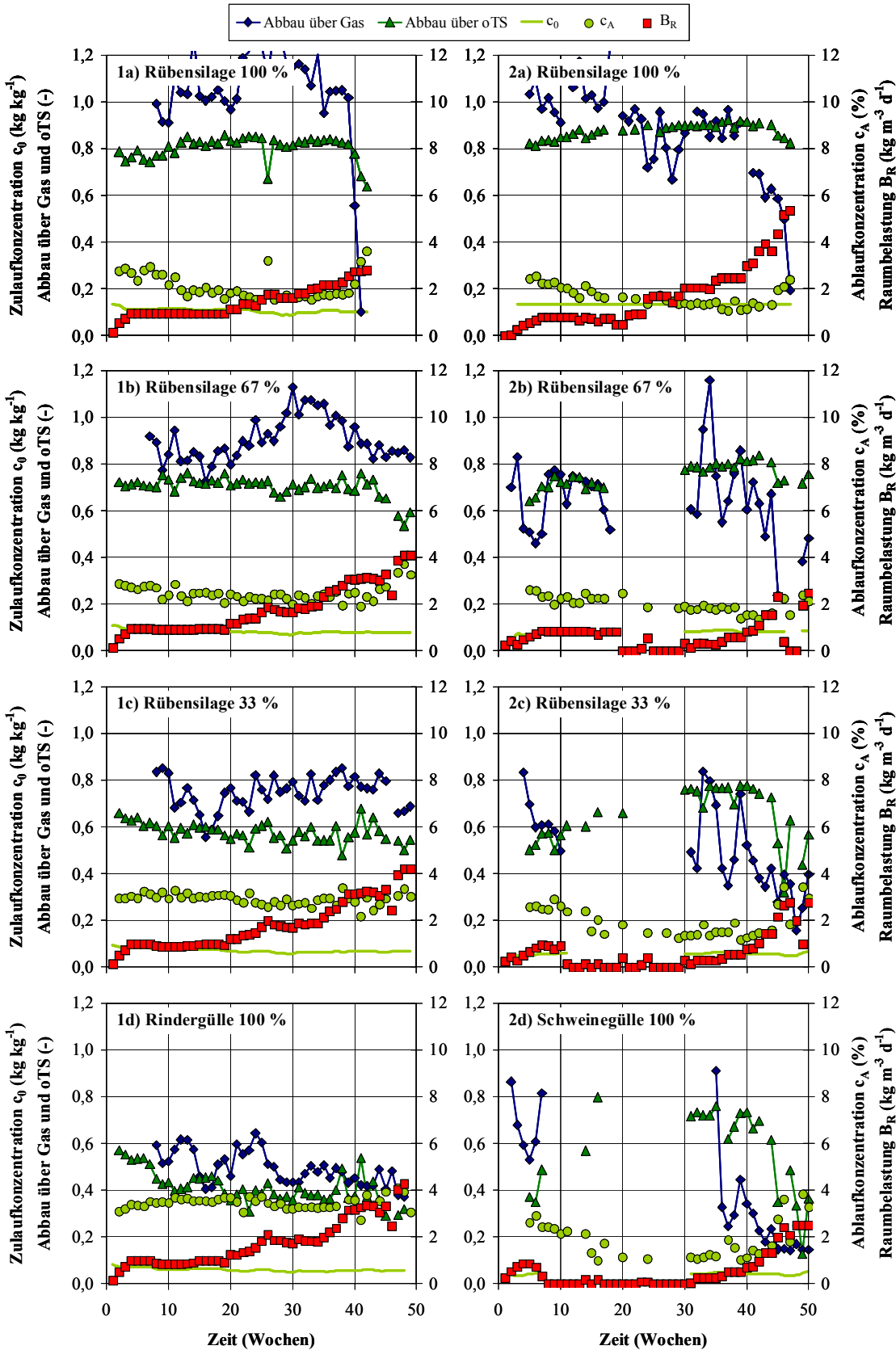


Abb. A 17: Zulaufkonzentration c_0 und Abbaugrad der oTS bei Berechnung über das Gas bzw. über die oTS im Zu- und Ablauf (linke y-Achse) sowie Ablaufkonzentration c_A und Raumbelastung B_R (rechte y-Achse) im Zeitverlauf bei Rübensilage in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Rübensilage und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, thermophile Vergärung

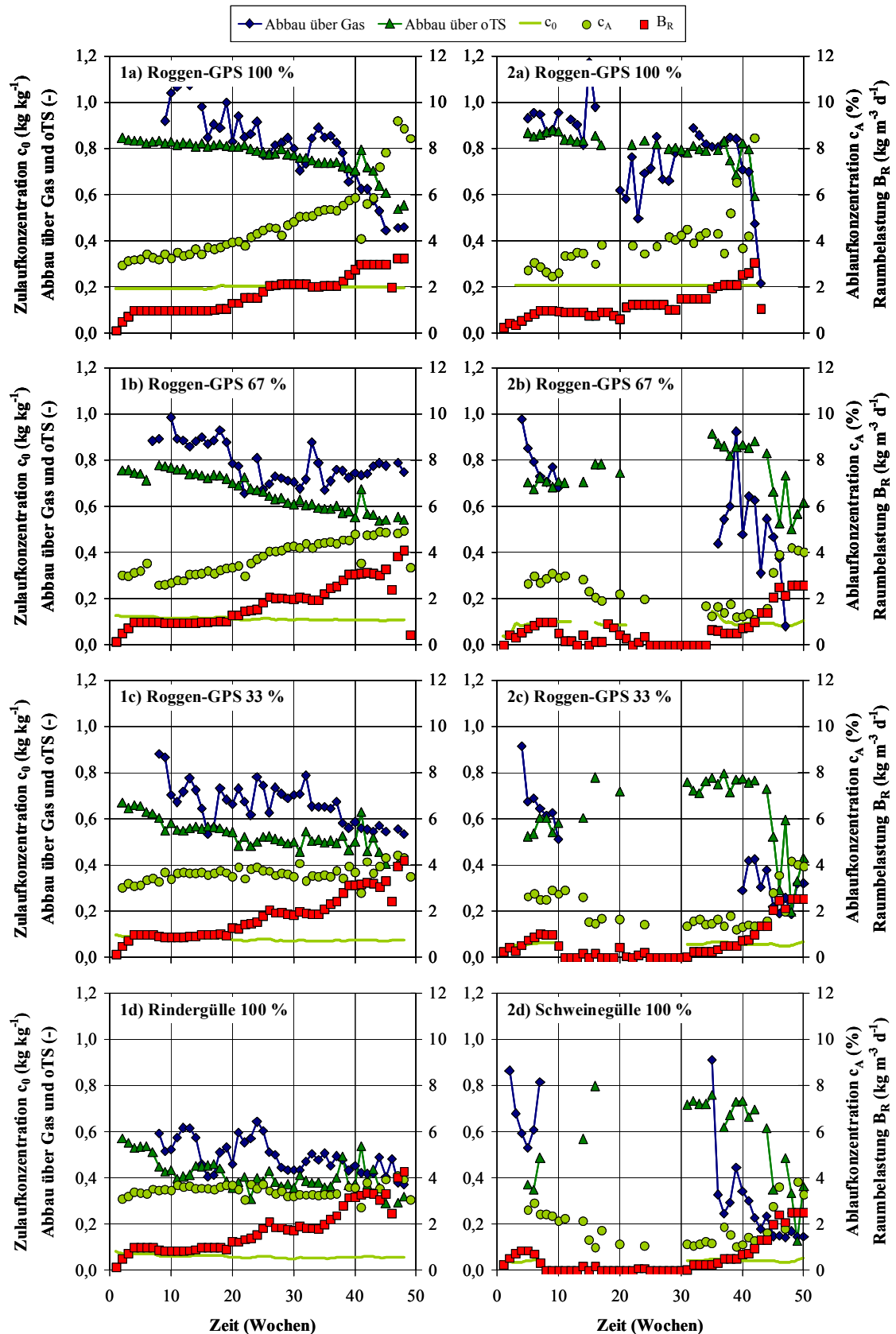


Abb. A 18: Zulaufkonzentration c_0 und Abbaugrad der oTS bei Berechnung über das Gas bzw. über die oTS im Zu- und Ablauf (linke y-Achse) sowie Ablaufkonzentration c_A und Raumbelastung B_R (rechte y-Achse) im Zeitverlauf bei Roggen-GPS in a) Monovergärung, b) Kovergärung mit 67 %, c) Kovergärung mit 33 % Roggen-GPS und d) Vergärung von Gülle auf Basis von 1) Rindergülle und 2) Schweinegülle, thermophile Vergärung

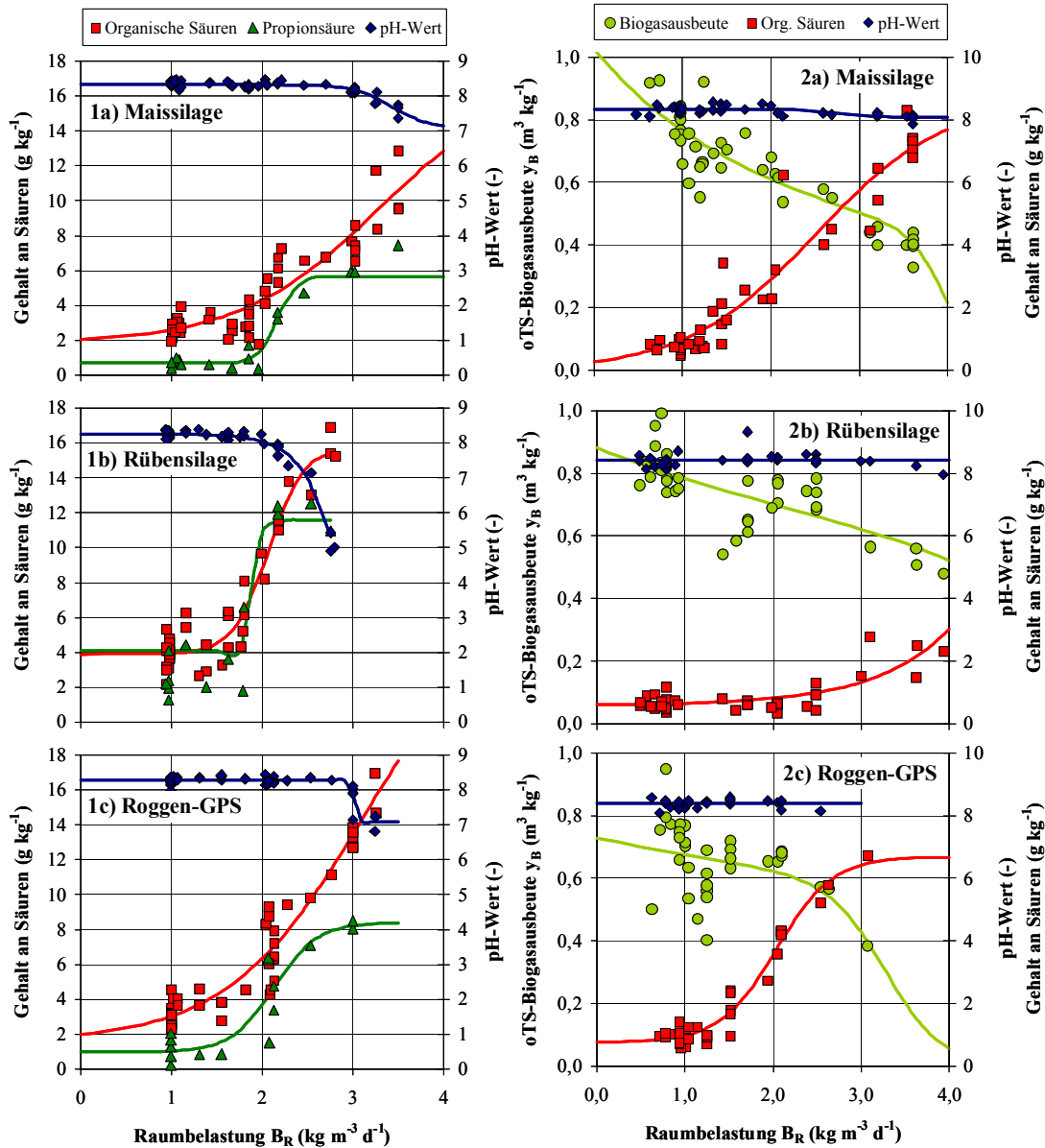


Abb. A 19: Hemmfaktoren pH, organische Säuren und Propionsäure sowie oTS-Biogasausbeute y_B in Abhängigkeit von der Raumbelastung B_R bei thermophiler Monovergärung von a) Maissilage, b) Rübensilage und c) Roggen-GPS bei Einsatz von Impfmaterail auf Basis von 1) Rindergülle bzw. 2) Schweinegülle

2.2 Voraussichtlicher Nutzen

Mit Hilfe eines einfachen mathematischen Modells wird Planern von Biogasanlagen ein unkompliziertes Instrumentarium für die Bemessung von Kofermentationsanlagen mit NawaRos in die Hand gegeben. Für die NawaRos Mais-, Roggen- und Rübensilage als Monosubstrat und Kosubstrat bei der Vergärung mit Rinder- und Schweingülle werden konkrete Parameter genannt, mit deren Hilfe sich die Biogasausbeute bei jeder beliebigen Mischung und Fermenterbelastung im meso- und thermophilen Bereich berechnen lässt. Diese Parameter lassen sich für andere Substrate oder andere Temperaturen leicht mit Hilfe eines Batch-Tests und einer kontinuierlichen Vergärung bei konstanter Raumbelastung ermitteln. Aus den Versuchsergebnissen können Empfehlungen für energetisch effiziente Betriebsregime für landwirtschaftliche Biogasanlagen abgeleitet werden. Die Ermittlung von Belastungsgrenzen bei der Monovergärung von NawaRos hilft Überdosierungen und damit Versäuerung von Biogasreaktoren mit Betriebsunterbrechungen zu vermeiden.

Die im Rahmen des Vorhabens entwickelte Laboranlage zur kontinuierlichen Biogasproduktion mit automatisierter Gasmengenerfassung wurde bereits von anderen Forschungseinrichtungen übernommen, so dass sich Versuchsergebnisse zukünftig besser vergleichen lassen. Darüber hinaus werden durch wissenschaftliche Publikationen und Fachvorträge die gewonnenen Erkenntnisse weiter vermittelt.

2.3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Zu Beginn des Vorhabens kamen zwei Forschungsprojekte bei anderen Stellen zum Abschluss, die ebenfalls die Besonderheiten der kontinuierlichen Monovergärung von NawaRos untersuchten. Dabei handelt es sich um die 2003 veröffentlichte Promotion über die Vergärung von Futter- und Zuckerrüben am Institut für Technologie und Biosystemtechnik Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (HASSAN 2003). Die Versuchsergebnisse aus den diskontinuierlichen und kontinuierlichen Laborversuchen werden jedoch nicht systematisch hinsichtlich des Einflusses der Fermenterbelastung auf die Biogasausbeute hin ausgewertet. Ebenfalls in Laborversuchen, jedoch nur im diskontinuierlichen Batch-Verfahren, wurde die Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras am Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik der Universität für Bodenkultur Wien untersucht (AMON ET AL. 2003).

2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Erfolgte Publikationen

- Linke, Bernd & Mähnert, Pia (2005): Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen. In: Tagungsband Biogas – Nachwachsende Rohstoffe, Neue Wege für die Landwirtschaft, 14. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., 11.-14.01.2005 in Nürnberg, S. 33-43
- Linke, Bernd & Mähnert, Pia (2005): Belastungsfrage. BiogasJournal 8 (1), S. 12-15
- Linke, Bernd & Mähnert, Pia (2005): Biogasgewinnung aus Rindergülle und nachwachsenden Rohstoffen – Einfluss der Belastung des Fermenters. Landtechnik 60 (5), S. 276-277
- Linke, Bernd & Mähnert, Pia (2005): Biogasgewinnung aus Rindergülle und nachwachsenden Rohstoffen – Einfluss der Belastung des Fermenters. Agrartechnische Forschung 11 (5), S. 125-132
- Linke, Bernd & Mähnert, Pia (2005): Einfluss der Faulraumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und Nachwachsenden Rohstoffen. In: Tagungsband Biogas boomt: Trends und Technik; Zentrum für Nachwachsende Rohstoffe NRW (ed.), 15.04.2005 in Bad Sassendorf-Ostinghausen, Online unter URL: <www.duesse.de> (Aufruf: 19.01.2006)
- Klocke, Michael; Mähnert, Pia; Mundt, Kerstin; Souidi, Khadidja & Linke, Bernd (2006): Microbial community analysis of a biogas-producing completely stirred tank reactor fed continuously with fodder beet silage as mono-substrate. Systematic and Applied Microbiology, DOI: 10.1016/j.syapm.2006.03.007
- Linke, Bernd; Vollmer, Gerd-Rainer & Mähnert, Pia (2005): Effect of organic loading rate on biogas yield from energy crops and animal waste slurry. In: Proceedings The future of biogas for sustainable energy production in Europe, 7th FAO/SREN-Workshop, 30.11.-2.12.2005 in Uppsala, Sweden, 7 S.
- Mähnert, Pia & Linke, Bernd (2006): Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen und Gülle unter Berücksichtigung der Raumbelastung im Fermenter. In: Tagungs-CD Biogas-Intensiv-Workshop im Rahmen der SolarEnergy/bautec, 22.-24.02.2006 in Berlin, 11 S.
- Mähnert, Pia & Linke, Bernd (2006): Biogas production from energy crops in Germany. In: Proceedings Updating and Perspective for the Biogas Production in Cuba. Workshop 27.-29.03.2006 in Sancti Spiritus, Cuba, 9 S.
- Mähnert, Pia & Linke, Bernd (2006): Biogas Production from Energy Crops and Cattle Slurry under Meso- and Thermophilic Conditions. In: Proceedings Agricultural Engineering For A Better World. 16. CIGR World Congress, 3.-7.09.2006 in Bonn, 6 S.

Geplante Publikationen

- Mähnert, Pia & Linke, Bernd (2006): Advanced Model of proportionate biogas yield depending on organic loading rate and fermentation step. Biotechnology Journal

Literaturverzeichnis

- Abdel-Hadi, M.; Beck, J.; Jungbluth, T. (2002): Methanerträge bei der Kofermentation flüssig siliierter Gehaltsrüben. *Landtechnik* 57; 2; S. 96-97.
- Adolph, J.; Beck, J.; Jungbluth, T. (2004a): Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen in Biogasanlagen - Pilotbiogasanlage. *Agrartechnische Forschung* 10; 2; S. 38-46.
- Adolph, J.; Beck, J.; Mukengele, M.; Jungbluth, T. (2004b): Monofermentation von Nahrungsmittelabfällen in Biogasanlagen - Laboruntersuchungen. *Agrartechnische Forschung* 10; 1; S. 16-22.
- Amon et al. (2003): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Endbericht Forschungsprojekt 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01, Institut für Land-, Umwelt- und Energietechnik, Universität für Bodenkultur Wien, 77 S.
- Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Amon, B.; Bodiroza, V.; Zollitsch, W.; Boxberger, J. (2006a): Biogaserzeugung aus Energiemais. *Landtechnik* 61; 2; S. 86-87.
- Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Amon, B.; Bodiroza, V.; Zollitsch, W.; Pötsch, E. (2006b): Biogaserzeugung aus Grünlandbiomasse im Alpenraum. *Landtechnik* 60; 6; S. 336-337.
- Amon, T.; Kryvoruchko, V.; Amon, B.; Reinhold, G.; Oechsner, H.; Schwab, M.; Weiland, P.; Linke, B. (2004): Biogaserträge von Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern - Laborversuchsergebnisse. *Die Landwirtschaft als Energieerzeuger*; KTBL, 2. Aufl.; Darmstadt; S. 46-61.
- Angelidaki, I.; Ahring, B.K. (1993): Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste - the effect of ammonia. *Applied Microbiology and Biotechnology* 38; 4; S. 560-564.
- Anonymus (2005): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL Schriftenreihe
- Anonymus (2006): TechnologiePortrait Biogas Österreichische Energieagentur. <http://energytech.at>, 23 S.
- Badger, D.M.; Bogue, M.J.; Stewart, D.J. (1979): Biogas production from crops and organic wastes. 1. Results of batch digestions. *New Zealand Journal of Science* 22; 1; S. 11-20.
- Baserga, U.; Egger, K. (1997): Vergärung von Energiegras zur Biogasgewinnung. Schlussbericht Forschungsprogramm Biomasse; Tänikon; 41 S.
- Boxberger, J.; Amon, T.; Weber, A. (2002): Biogasnutzung im Kontext von Agrar-, Umwelt- und Energiepolitik. Tagungsband Biogas - die universelle Energie von morgen, 11. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas; 29.-31.01.2002; S. 7-17.
- Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (2005): Ergebnisse des Biogas-Messprogramms. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow; 163 S.
- Czepuck, K.; Oechsner, H.; Schumacher, B.; Lemmer, A. (2006): Biogasausbeuten im Labor im Vergleich zur rechnerischen Abschätzung. *Landtechnik* 61; 2; S. 82-83.
- Demirbas, A. (2006): Biogas potential of manure and straw mixtures. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects* 28; 1-3; S. 71-78.

- Fernandez, B.; Porrier, P.; Chamy, R. (2001): Effect of inoculum-substrate ratio on the start-up of solid waste anaerobic digesters. *Water Science and Technology* 44; 4; S. 103-108.
- Fischer, T.; Krieg, A. (2003): Praxisbeispiele für Anlagen zur Vergärung von Gras und nachwachsenden Rohstoffen. *BIOGAS Journal* 2003; 2; S. 28-30.
- FNR (2006): Jahresbericht 2004/2005 der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. http://www.fnr-server.de/pdf/literatur/pdf_221jb2005.pdf 1
- Grepmeier, M.; Wiegand, S.; Meyer-Pittroff, R. (2000): Industrielle Kosubstrate: Nicht blind füttern! *Biogas, top agrar extra*; S. 54-55.
- Gronauer, A. et al. (2004): *Biogashandbuch Bayern*. München; 50 S.
- Gruber, W. (2004): Biogasanlagen - Lohnt der Einsatz von Kofermenten? *Mais: Die Fachzeitschrift für den Maisanbauer, Sonderheft: Mais als Energieträger*; S. 4-7.
- Gruber, W.; Linke, B.; Schelle, H.; Reinhold, G.; Keymer, U. (2004): Gaserträge aus der Sicht der Praxis. *Die Landwirtschaft als Energieerzeuger*; KTBL, 2. Aufl.; Darmstadt; S. 62-69.
- Gunaseelan, V.N. (1997): Anaerobic digestion of biomass for methane production: A review. *Biomass & Bioenergy* 13; 1-2; S. 83-114.
- Gunaseelan, V.N. (2004): Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. *Biomass & Bioenergy* 26; 4; S. 389-399.
- Hansen, K.H.; Angelidaki, I.; Ahring, B.K. (1999): Improving thermophilic anaerobic digestion of swine manure. *Water Research* 33; 8; S. 1805-1810.
- Hashimoto, A.G. (1982): Methane from cattle waste: Effects of temperature, hydraulic retention time, and influent substrate concentration on kinetic parameter K. *Biotechnology and Bioengineering* 24; S. 2039-2052.
- Hashimoto, A.G. (1983): Thermophilic and mesophilic anaerobic fermentation of swine manure. *Agricultural Wastes* 6; 3; S. 175-191.
- Hashimoto, A.G. (1984): Methane from swine manure - effect of temperature and influent substrate concentration on kinetic parameter (k). *Agricultural Wastes* 9; 4; S. 299-308.
- Hassan, E. (2003): Biogas production from forage and sugar beets. Dissertation, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) 412, University of Kassel, 170 S.
- Hassan, E.A. (2003): Biogas production from forage and sugar beets: process control and optimization; ecology and economy; 170 S.
- Heiermann, M.; Plöchl, M. (2004): Biogas aus Pflanzen - Ergebnisse von Gärversuchen. Tagungsband Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe, 10. Internationale Fachtagung 2004; S. 79-84.
- Heinze, U.; Rockmann, G.; Sichtung, J. (2000): Energetische Verwertung von Biogas. *Bauen für die Landwirtschaft Biogas* 3; S. 25-29.
- Helffrich, D.; Oechsner, H. (2003): Hohenheimer Biogasertragstest. *Agrartechnische Forschung* 9; 3; S. 27-30.
- Heo, N.H.; Park, S.C.; Lee, J.S.; Kang, H.; Park, D.H. (2003): Single-stage anaerobic codigestion for mixture wastes of simulated Korean food waste and waste activated sludge. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 105; S. 567-579.

- Hopfner-Sixt, K.; Amon, T.; Bodiroza, V.; Kryvoruchko, V.; Milovanovic, D.; Zollitsch, W.; Boxberger, J. (2006): Biogaserzeugung aus agrarischen Rohstoffen - Kennwerte zur stofflichen und energetischen Bewertung. *Landtechnik* 61; 3; S. 148-149.
- Jäkel, K. (2000): Grundlagen der Biogasproduktion. Bauen für die Landwirtschaft *Biogas* 3; 37; S. 3-7.
- Kaiser, F.; Diepolder, M.; Eder, J.; Hartmann, S.; Prestele, H.; Gerlach, R.; Ziehfrend, G.; Gronauer, A. (2004): Biogaserträge verschiedener nachwachsender Rohstoffe. *Landtechnik* 59; 4; S. 224-225.
- Keymer, U. (2001): Guter Schnitt mit Grünem Strom. *Neue Landwirtschaft, Sonderheft 2001 – Mais*, S. 12-13
- Kirchgeßner, M. (1997): Tierernährung. 10. Aufl.; Frankfurt (Main); 582 S.
- Krieg, A. (2000): Vom Futterwert auf den Gasertrag schließen. *Biogas, top agrar extra* S. 62-63.
- Kroiss, H. (1986): Anaerobe Abwasserreinigung 62; Wien; S. 1-134.
- Lay, J.J.; Li, Y.Y.; Noike, T. (1998): The influence of pH and ammonia concentration on the methane production in high-solids digestion processes. *Water Environment Research* 70; 5; S. 1075-1082.
- Lemmer, A.; Oechsner, H. (2001): Kofermentation von Gras und Silomais. *Landtechnik* 56; 6; S. 412-413.
- Linke, B. & Vollmer, R. (2002): Ergebnisse der Kovergärung von Energiepflanzen und organischen Reststoffen. 5. Dialog Abfallwirtschaft M-V, Institut für Landschaftsbau und Abfallwirtschaft der Universität Rostock, Tagungsband, S. 85-95
- Linke, B. (2003): Biogas aus Energiepflanzen. *Agrartechnische Forschung* 9; 5; S. 78-82.
- Linke, B.; Heiermann, M.; Grundmann, P.; Hertwig, F. (2003): Grundlagen, Verfahren und Potenzial der Biogasgewinnung im Land Brandenburg. *Biogas in der Landwirtschaft*; 2. Aufl.; Potsdam; S. 10-23.
- Linke, B.; Mähner, P. (2005): Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen. *Biogas - Nachwachsende Rohstoffe*, 14. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V.; 11.-14.01.2005 in Nürnberg; S. 33-46.
- Linke, B.; Schelle, H. (2000): Solid State Anaerobic Digestion of Organic Wastes. *AgEng Warwick 2000*; Paper Number 00-AP-025; S. 1-10.
- Linke, B.; Schelle, H. (2001): Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen. Tagungsband 7. Internationale Fachtagung 2001, Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe; S. 81-86.
- Mähner, P.; Heiermann, M.; Plöchl, M.; Schelle, H.; Linke, B. (2002): Verwertungsalternativen für Grünlandbestände. *Landtechnik* 57; 5; S. 260-261.
- Matthias, J. (2000): Mit Energiepflanzen den Gasertrag steigern. *Biogas, top agrar extra*; S. 56-60.
- Matthias, J. (2002): Energiepflanzen steigern den Gasertrag. *Biogas - Strom aus Gülle und Biomasse, top agrar Fachbuch*; S. 86-89.

- Mitterleitner, H.; Hoffmann, M. (2000): Die Stärken und Schwächen der einzelnen Gärssysteme. *Biogas, top agrar extra*; S. 19-20.
- Moller, H.B.; Sommer, S.G.; Ahring, B. (2004): Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass & Bioenergy* 26; 5; S. 485-495.
- Morar, M.; Oechsner, H. (2002): Experiments regarding the anaerobic digestion of distillery wastes. *EurAgEng* 2002; 02-SE-008
- Mukengele, M.; Brule, M.; Oechsner, H. (2006): Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag. *Landtechnik* 61; 1; S. 26-27.
- Oechsner, H. (2000): Erfahrungen mit Biogasanlagen in Baden-Württemberg. *Bauen für die Landwirtschaft*, Heft 3, S. 16-19.
- Oechsner, H. (2000): Erfahrungen mit Biogasanlagen in Baden-Württemberg - Anlagenbau, Kosubstrateinsatz, Biogasnutzung. *Bauen für die Landwirtschaft; Biogas* 3; S. 16-19.
- Oechsner, H.; Lemmer, A. (2003): Gras ist nicht gleich Gras beim Einsatz in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. *Tagungsband Biogas - eine Bioenergie mit Zukunft*; 9. Thüringer Bioenergietag; S. 45-51.
- Oechsner, H.; Lemmer, A.; Neuberger, C. (2003): Feldfrüchte als Gärsubstrat in Biogasanlagen. *Landtechnik* 58; 3; S. 146-147.
- Plöchl, M.; Heiermann, M.; Linke, B.; Schelle, H. (2001): Wieviel Strom bringen Pflanzen? *Neue Landwirtschaft* 2001; 3; S. 42-45.
- Rilling, N. (2001): Wirtschaftlichkeit der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen. *Tagungsband Biogas - mit neuer Energie Ressourcen schonen*; 10. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas; 09.-12.01.2001; S. 38-43.
- Rugen, A. (2005): Erfahrungen aus dem Betrieb einer reinen NawaRo-Anlage. *Tagungsband Biogas – Nachwachsende Rohstoffe*; 14. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas; 11.-14.01.2005 in Nürnberg; S. 47-53.
- Sanchez, E.P.; Weiland, P.; Travieso, L. (1992): Effect of the hydraulic retention time on the anaerobic biofilm reactor efficiency applied to screened cattle waste treatment. *Biotechnology Letters* 14; 7; S. 635-638.
- Schattner, S.; Gronauer, A. (2000): Methanbildung verschiedener Substrate - Kenntnisstand und offene Fragen. *Gülzower Fachgespräche; Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial*; S. 28-38.
- Scherer, P.A.; Dobler, S.; Rohardt, S.; Looock, R. (2003): Continuous biogas production from fodder beet silage as sole substrate. *Water Science and Technology* 48; S. 229-233.
- Schlattmann, M.; Speckmaier, M.; Gronauer, A. (2004): Biogas-Gärtests in verschiedenen Fermentertypen. *Landtechnik* 59; 6; S. 338-339.
- Schnell, R. (2003): Strom und Wärme über Biogas aus Getreideganzpflanzen. 6. Graskraft-Seminar in Emstek; S. 43-48.
- Schumacher, B.; Böhmel, C.; Oechsner, H. (2006): Welchen Energiemais wann ernten für die Biogaserzeugung? *Landtechnik* 61; 2; S. 84-85.
- Speckmaier, M.; Schlattman, M.; Metzner, T.; Gronauer, A. (2005): Bestimmung des Biogasertrags aus Co-Substraten im diskontinuierlichen Durchflussverfahren. *Landtechnik* 60; 6; S. 340-341.

-
- Stewart, D.J.; Bogue, M.J.; Badger, D.M. (1984): Biogas production from crops and organic wastes. 2. Results of continuous digestion tests. *New Zealand Journal of Science* 27; 3; S. 285-294.
- Tentscher, W.; Dumsch, C. (2003): Energie- und Ökobilanzen von Energiepflanzen zur Biogaserzeugung. *Energie pflanzen* 2003; 5; S. 6-10.
- VDI 4630 (2006): Vergärung organischer Stoffe. VDI-Richtlinien; 48 S.
- Veeken, A.; Hamelers, B. (1999): Effect of temperature on hydrolysis rates of selected biowaste components. *Bioresource Technology* 69; 3; S. 249-254.
- Weiland, P. (2000): Optimaler Prozess bringt gute Ausbeute. *Bauernzeitung, Wissen kompakt*, Nr. 2, S. 13-15
- Weiland, P. (2000): Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland. *Gülzower Fachgespräche Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial*; S. 8-27.
- Weiland, P. (2003a): Production and energetic use of biogas from energy crops and wastes in Germany. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 109; 1-3; S. 263-274.
- Weiland, P. (2003b): Stand der Biogastechnologie, die Rahmenbedingungen und die perspektivischen Entwicklungen. 9. Thüringer Bioenergietag: *Biogas - eine Bioenergie mit Zukunft Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen*; Heft 6; S. 13-23.
- Weiland, P.; Hassan, E.A. (2001): Untersuchungen zur Vergärung von Futterrübensilage. BLE-AZ 99UM031; Braunschweig; 58 S.
- Wesolowski, S.; Ferchau, E.; Pötke, W. (2004): Der effektive Einsatz von Cosubstraten in Biogasanlagen. *Tagungsband Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe*, 10. Internationale Fachtagung; S. 85-94.

Anlage

I Erfolgskontrollbericht

I.1 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen Zielen

In der EU besteht die Zielstellung, das Energieaufkommen aus Biomasse bis zum Jahr 2010 zu verdreifachen. Der Landwirtschaft als primären Biomasseproduzenten kommt im Zusammenhang mit dieser Zielstellung nicht nur eine erhöhte Verantwortung aus umweltrelevanter Sicht zu, sondern es eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Erschließung zusätzlicher Einkommensquellen. Dadurch werden in den ländlichen Gebieten Arbeitsplätze erhalten und neue geschaffen. Vor- und nachgelagerte Bereiche werden gestärkt durch das anwachsende Marktpotential im Biogasanlagenbau.

Die energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe entwickelt nachhaltige Wirtschaftsformen im Sinne der Agenda 21: die Umwelt wird durch CO₂-Emissionsminderung entlastet, und Ressourcen für die Elektro- und Wärmeenergiebereitstellung aus fossilen Quellen werden geschont.

I.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der oTS-Raumbelastung auf die oTS-Biogasausbeute für den anaeroben Abbau von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen in vollständig durchmischten Reaktoren auf der Grundlage einer Reaktion 1. Ordnung mit einer einfachen Bemessungsgleichung beschrieben werden kann. Neben der oTS-Raumbelastung sind in der Bemessungsgleichung die Parameter oTS-Konzentration des Gärsubstrates, maximale oTS-Biogasausbeute, Reaktionsgeschwindigkeitskonstante sowie Dichte des Biogases und des Ablaufs zu berücksichtigen. Diese Parameter sind substrat- und prozessspezifisch und müssen für jede Biogasgewinnung aus NawaRos und Gülle individuell ermittelt werden.

Die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante gibt Auskunft über den Einfluss der gesteigerten Raumbelastung auf die Biogasausbeute. Geringe Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten bedeuten reduzierten Substratabbau und damit hohes Biogaspotential des Gärrestes bei hohen Raumbelastungen. Die bei der kontinuierlichen Vergärung von NawaRos erzielbaren Gasmengen aus dem Gärrest sollten wirtschaftlich genutzt und nicht in die Umwelt entlassen werden. In diesen Fällen ist daher die Anbringung einer gasdichten Abdeckung des Gärrestlagers zu empfehlen.

Erhöhte Raumbelastungen führen nicht nur zu einer weiteren Reduzierung der Biogasausbeute, sondern sie gefährden die Stabilität des Prozesses durch Übersäuerung der Reaktionsmasse. Für den stark gehemmten Bereich bei höheren Raumbelastungen ist eine Erweiterung der einfachen Bemessungsgleichung um eine oder mehrere Hemmfunktionen notwendig. Diese können sich auf den pH-Wert, den Gehalt an organischen Gesamtsäuren bzw. Propionsäure beziehen.

Ein Vergleich der meso- und thermophilen Versuche bei 35°C bzw. 55°C macht deutlich, dass die Abnahme der Biogasausbeute bei gesteigerter Raumbelastung bei höheren Temperaturen weniger stark ausgeprägt ist. Der Zeitpunkt der Übersäuerung tritt bei thermophiler Vergärung jedoch vorzeitiger ein, da ein schnellerer Substratabbau auch eine höhere Instabilität des Prozesses mit sich bringt.

Aufgrund des hohen Stickstoffgehaltes von Schweinegülle ist eine thermophile Vergärung nur bei extrem geringen Fermenterbelastungen möglich. Bei der Kovergärung nimmt mit abnehmendem Anteil des Kosubstrates in der Mischung die oTS-Biogasausbeute linear ab. Der Methangehalt des Biogases steigt jedoch analog von ca. 55-57 % bei der mesophilen Monovergärung von NawaRos auf 62 % bei der mesophilen Vergärung von Rinder- und Schweinegülle an.

Mit Hilfe der entwickelten hyperbolischen Funktionsgleichung und der Kenntnis über die Gasausbeuten der Einzelsubstrate lässt sich für jede Substratmischung die von der Raumbelastung abhängige Gasausbeute in Abhängigkeit von der Temperatur berechnen.

I.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Mit der Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im Juli 2004 sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Verwertung der Vorhabensergebnisse nachhaltig gestaltet.

Den Planern und Betreibern landwirtschaftlicher Biogasanlagen steht nun ein Instrumentarium zur Verfügung, das eine hohe energetische Effizienz für die Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe in Biogasanlagen bei betriebssicherer Verfahrensgestaltung ermöglicht. Das entwickelte Modell, untersetzt durch die erarbeiteten Daten, liefert die notwendigen Verfahrensparameter sowohl für die Monofermentation von nachwachsenden Rohstoffen als auch für die Kofermentation mit Gülle.

Der Vergleich der mesophilen mit der thermophilen Prozessführung gibt Hinweise zu einer optimierten Temperaturführung. Wichtig ist, dass die Prozessstabilität durch frühzeitiges Übersäuern der Fermenter thermophil wesentlich geringer ist.

Da mit dem Vorhaben Probleme der gegenwärtigen Biogaspraxis aufgegriffen wurden, können die Ergebnisse unmittelbar umgesetzt werden, indem sie Betreibern und Planern von Biogasanlagen verfügbar gemacht werden.

So wurden erste Ergebnisse schon zur 14. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. im Januar 2005 in Nürnberg vorgetragen.

I.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Die thermophile Fermentation von Schweinegülle ist bei hohen Stickstoffgehalten nur bei extrem geringen Raumbelastungen möglich, so dass die geplanten Untersuchungen sowohl zur Mono- als auch zur Kofermentation (hier besonders bei hohem Gülleanteil) bei hohen Raumbelastungen nicht möglich waren.

Die Ergebnisse sind aber trotzdem relevant, da für die Planung Schweinegülle verarbeitender Biogasanlagen der thermophile Temperaturbereich nicht berücksichtigt werden sollte.

I.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Ergebnisse sind in bisher 10 Publikationen präsentiert (Punkt 2.4 des vorliegenden Berichtes). International sind Vorträge in Uppsala auf dem 7. FAO/SREN-Workshop sowie in Sancti Spiritus (Kuba) vorgetragen. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des vorliegenden Projektes auf dem 16. CIGR World Congress in Bonn vorgetragen und mit dem Armand Blanc Preis des CIGR ausgezeichnet.

I.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Sowohl Ausgaben- als auch Zeitplanung wurden antragsgemäß eingehalten.

II Kurzfassung (Berichtsblatt)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	geplant	2. Berichtsart	Schlussbericht
3a. Titel des Berichts Kinetik der Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen bei kontinuierlicher Prozessführung als Grundlage für die Bemessung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen			
3b. Titel der Publikation Einfluss der Raumbelastung auf die Gasausbeute von Gülle und nachwachsenden Rohstoffen			
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Linke, Bernd; Vollmer, Gerd-Rainer; Mähnert, Pia		5. Abschlussdatum des Vorhabens März 2006	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n)) Linke, Bernd; Vollmer, Gerd-Rainer; Mähnert, Pia		6. Veröffentlichungsdatum geplant	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) Max-Eyth-Allee 100 14469 Potsdam BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH Kommunikationsweg 11 D-99734 Nordhausen		7. Form der Publikation Fachzeitschrift	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)		9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
		10. Förderkennzeichen *) 22011402	
		11a. Seitenzahl Bericht	
		11b. Seitenzahl Publikation	
		12. Literaturangaben 6	
		14. Tabellen	
		15. Abbildungen	
16. Zusätzliche Angaben			
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)			
18. Kurzfassung Die gemeinsame Behandlung von Gülle als Basissubstrat und Energiepflanzen in Kofermentation ist empirisch in die landwirtschaftliche Praxis eingeführt, ohne Kenntnisse über den Zusammenhang zwischen Raumbelastung und Biogasausbeute zu haben. Deshalb wurden quasikontinuierliche Langzeitlaboruntersuchungen mit Maissilage, Roggenganzpflanzensilage und Rübensilage als Monosubstrat und in Kofermentation mit Rinder- und Schweinegülle durchgeführt mit dem Ergebnis, dass die Biogasausbeute mit steigender Raumbelastung sinkt. Für die Kalkulation der Biogasausbeute in Abhängigkeit von der Raumbelastung wurde ein einfaches Bemessungsmodell entwickelt.			
19. Schlagwörter Gülle, Biogasausbeuten, Energiepflanzen, Modellierung, Raumbelastung			
20. Verlag		21. Preis	

Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN	planned	2. Type of Report Final report
3a. Report Title Kinetic of biogas production from renewable raw materials in continuous process as basis for assessment for agricultural biogas plants		
3b. Title of Publication Effect of organic loading rate on biogas yield from energy crops and animal waste slurry		
4a. Author (s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Linke, Bernd; Vollmer, Gerd-Rainer; Mähnert, Pia		5. End of Project March 2006
		6. Publication Date planned
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s)) Linke, Bernd; Vollmer, Gerd-Rainer; Mähnert, Pia		7. Form of Publication periodical
8. Performing Organization (s) (Name, Address) Leibnitz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) Max-Eyth-Allee 100 14469 Potsdam BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH Kommunikationsweg 11 D-99734 Nordhausen		9. Originators Report No.
		10. Reference No.
		11a. No of Pages Report
		11b. No. of Pages Publication
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL)		12. No. of References 6
		14. No. of Tables
		15. No. of Figures
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract The common treatment of animal waste slurry as basic substrate and energy crops in co-digestion is introduced in agricultural practice without knowledge of the influence of the organic loading rate (OLR) on the biogas yield. Therefore reactor performance data were studied in long term semi-continuous lab-scale experiments from maize silage, whole – crop rye silage and fodder beet silage as single substrates and in co-digestion with cattle and pig slurry. Results have shown that the biogas yield decreased with the increase of OLR. For calculation of biogas yield as function of OLR a simple equation was developed.		
19. Keywords Animal slurry, biogas yield, energy crops, modelling organic loading rate		
20. Publisher		21. Price