

Nachhaltige Biogaserzeugung

WAS WIR VON DER NATUR LERNEN KÖNNEN

Die verfügbare Fläche der Erde

ist angesichts der rasch

wachsenden Weltbevölkerung

längst ein knappes Gut.

Einhergehend mit unserem

globalen wirtschaftlichen

Handeln entsteht eine

grundsätzliche Flächenkonkur-

renz durch nachwachsende

Rohstoffe gegenüber Nahrungs-

mitteln, wenn die Preise für

Nahrungsmittel niedriger sind

als ihr Wert als Energieträger

oder die chemischen Produkte

aus Biomasse günstiger

hergestellt werden können

als aus fossilen Rohstoffen.



Nutzungskonflikt pflanzlicher Rohstoffe – Nahrung contra Energie

Wir Menschen nutzen Landflächen sowohl als Siedlungsraum und Industriestandort wie auch zum Anbau von Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen (NaWaRo). Zudem sind große Flächen für die Aufrechterhaltung regulatorischer Funktionen der Erde und der globalen Biodiversität existenziell.

Während die Energiewirtschaft alternativ Wind, Wasser, Photovoltaik und fossile Energieträger nutzen und die chemische Industrie zwischen fossilen Rohstoffen und Biomasse wählen kann, gibt es für Nahrungsmittel derzeit keine Alternative zur flächengebundenen Produktion.

Daraus resultiert eine klare Prioritätenliste der globalen Anbauflächennutzung:

1. Nahrungsmittel
2. Rohstoffe für die chemische Industrie
3. Energetische Nutzung [1].

Für die Biogaserzeugung sind mit den üblichen Verfahren wesentliche Biomassenstoffströme (beispielsweise Stroh, Grasschnitte, organische Reststoffe) bisher nicht erschließbar [2]. Diskussionen wie »Tank oder Teller« oder »Heizen mit Weizen« wären hin-fällig, könnte man die in der Natur etablierten Lösungen für den Aufschluss von Hemi-

und Lignocellulose heimischer Pflanzen anwenden und somit Nichtnahrungsmittelpflanzen für die Produktion von Biogas einsetzen. Derzeit installierte Biogasanlagen nutzen zumeist den Fruchtanteil, also die in der Phytomasse vorhandenen Proteine, die Fette und den Zucker [3].

Lernen von der Natur

Ein besonders effektives und natürliches Vorbild sind in dieser Hinsicht die cellulose-verzehrenden Wiederkäuer. In ihrem Pansen (englisch: *rumen*) erfolgt mit Hilfe der speziellen Pansenmikrobiologie in anaeroben Milieu und einer Temperatur von 39 °C der Aufschluss (Hydrolyse und Versäuerung) cellulosehaltiger Substrate. Der Pansen ist mit einem kontinuierlich arbeitenden Bioreaktor (Chemostaten) zu vergleichen, in welchem Cellulose als Hauptbestandteil des überwiegend faserhaltigen Futters durch spezialisierte Mikroorganismen zu kurz-kettigen Fettsäuren (SCFA), insbesondere Essigsäure, Propionsäure und Buttersäure, abgebaut wird.

Der Abbau erfolgt sowohl in quantitativer als auch in zeitlicher Hinsicht mit sehr hohem Wirkungsgrad. So kann eine Hochleistungskuh aus einer Futterration von bis zu 20 Kilogramm/Tag mit einer Verweilzeit von nur drei Tagen 6–9 Kilogramm/Tag SCFA bil-

den. Diese SCFA werden über die Magenwand resorbiert und dienen dem Tier unter anderem als Quelle seines Energiestoffwechsels sowie der Synthese von Milchinhaltstoffen. Mit einem durchschnittlichen Pansenvolumen beim Rind von 100–150 Litern entspricht die tägliche Futterzufuhr 150–200 Kilogramm/Kubikmeter Trockenmasse.

Die Gesamtstöchiometrie der im Pansen parallel stattfindenden Prozesse – **Hydrolyse und Versäuerung** mit geringer Gasbildung – lässt sich dabei wie folgt beschreiben (Angaben in der Basiseinheit mol):

- 1) Cellulose → Glucose (**Hydrolyse**)
- 2) 115 Glucose → 130 Acetat⁻ + 40 Propionat⁻ + 30 Butyrat⁻ + 120 CO₂ + 70 CH₄ + 50 H₂O (**Versäuerung**)

Die vom Tier für dessen Stoffwechsel genutzten SCFA könnten Grundlage für andere Produkte sein. Fettsäuren werden im anaeroben Milieu durch Mikroorganismen mit unterschiedlicher Ausbeute direkt zu Methan und Kohlendioxid umgesetzt (**Methanogenese**):

- 3) 130 Acetat → 130 CH₄ + 130 CO₂ (CH₄-Ausbeute: 1:1,0)
- 4) 40 Propionat → 70 CH₄ + 50 CO₂ (CH₄-Ausbeute: 1:1,75)
- 5) 30 Butyrat → 75 CH₄ + 45 CO₂ (CH₄-Ausbeute: 1:2,5).

Durch Kombination beider Prozesse ergibt sich insgesamt für die Methanproduktion aus Cellulose:

- 6) $115 \text{ Glucose} \rightarrow 345 \text{ CO}_2 + 345 \text{ CH}_4$ beziehungsweise
7) $1 \text{ Glucose} \rightarrow 3 \text{ CO}_2 + 3 \text{ CH}_4$

Somit werden 50 Prozent der hydrolysierten Cellulose zu CH_4 umgewandelt, wobei 80 Prozent des Methanertrags aus dem stofflichen Abbau der – im Pansen gebildeten – SCFA stammen. Erst die Nutzung dieses Potenzials macht den besonderen Sinn einer Technologie aus, welche den Pansenprozess technologisch zur Methangewinnung einsetzt.

Techniktransfer

Die technische Übertragung des Vormagensystems der Wiederkäuer, welches die Natur im Laufe der Evolution als das effizienteste System des Celluloseaufschlusses hervorgebracht hat, ist daher zentraler Ausgangspunkt für die Effizienzsteigerung der Biogastechnologie in dem For-

ren Komponenten, wie NaWaRo, organischen Abfällen unterschiedlicher Herkunft oder nur mit Monosubstraten (etwa Maissilage) betrieben. Die in den Biogasanlagen vorhandenen Mikroorganismen stammen aus den zugeführten tierischen Exkrementen oder aus der Animpfung mit Faulschlamm von Kläranlagen. Die zum Einsatz gelangenden Kulturen haben daher ihren Ursprung am Ende des Verdauungssystems und entsprechen in physiologischer Hinsicht der **Mikrobiologie des Dickdarms**, in dem eine geringere Stoffwechselaktivität vorliegt, als in den Vormagenabteilungen.

Aus diesem Grund sind klassische Biogasanlagen wesentlich auf die stoffliche Umsetzung der in den Gärsubstraten enthaltenen Stärke, Proteine und Fette angewiesen. Deshalb werden sie mit den ebenfalls zur Nahrungsmittel- und Futterproduktion nutzbaren leicht verdaulichen Substraten wie zum Beispiel Getreide-Ganzpflanzensilagen, Mais, Zuckerrübe »gefüttert«.

Methanogenese Stand der Technik ist [3], wurde das von Natur aus effiziente Stoffwechselprinzip des Pansens, mit seiner Entkopplung der Verweilzeiten von zu vergärenden Feststoff und dem als »Prozesslösung« dienenden Speichel, bisher nicht übertragen. Dies ist die wesentliche Innovation, die aus der Tiermedizin importiert wird, um auch bisher nicht nutzbare Energiequellen (Hemi- und Lignocellulose) zu erschließen.

RUMEN – bionischer Ansatz mit Pansenkultur

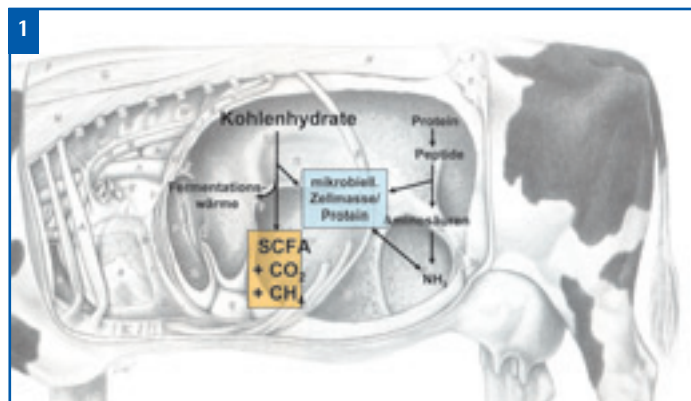
Nach einer Laborphase mit 1- und 5-Liter-Fermentern, wurde im März 2007 eine erste Scale-Up-Stufe mit einem 50-Liter-»Pansenreaktor« und 3 Kilogramm Panseninhalt als Startkultur in Betrieb genommen und bis heute kontinuierlich aufrechterhalten. Es ist gelungen, seit fast zwei Jahren die Mikroorganismenkultur des Pansens außerhalb des lebenden Tieres zu erhalten und sogar gezielt zu vermehren. Bisher wurde die Anlage mit den verschiedenartigsten Substraten »gefüttert«, zu denen auch für den Betrieb von Biogasanlagen untypische Stoffe zählen wie Heu, Stroh, Mais ohne Fruchtanteil, Grasschnitt, Sonnenblumen, Rübenblätter, Laubbabfälle, Altpapier und Kartonagen, Weizenkleie und Biertreber (ausgelaugte Malzrückstände) sowie Gelbsenf und andere Zwischenfrüchte oder Bodenverbesserer.

Obwohl die zum Einsatz gelangenden Substrate nur marginal zerkleinert wurden, konnte ein schneller stofflicher Abbau der Gärsubstrate beobachtet werden. Der stoffliche Umsatz kann mit etwa 6 Kilogramm/Kubikmeter · Tag veranschlagt werden und überschreitet bereits jetzt das bei konventionellen Biogasanlagen übliche Niveau.

Vor wenigen Monaten wurde eine zweite Scale-up-Stufe mit einem Pansenvolumen

Wissenschaftler der

Leibniz Universität Hannover,
der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover und der Firma
ARES erforschen die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung
im Bereich der Biogastechnologie und präsentieren
überzeugende Ergebnisse.



schungsprojekten RUMEN und DAUMEN.

Zwar wird auch in der einschlägigen Fachliteratur immer wieder die klassische Biogasanlage mit dem Pansen eines Wiederkäuers verglichen [5, 6, 7], jedoch ist dies in fachlicher Hinsicht falsch. Klassische Anlagen werden in der Regel mit einem Gemisch aus angeregter Gülle und weite-

Zur Abkürzung der Gärzeiten wurde auch erprobt, die Mikroorganismen oder die Partikel des Pansens in herkömmliche Anlagen zu impfen, was aber nur eine kurzfristige Verbesserung brachte [8, 9].

Während in Abhängigkeit vom Substrat die räumliche Trennung von Hydrolyse und

Bild 1
Vormagensystem eines Rinds mit den ablaufenden Fermentationsprozessen
Quelle: Schummer und Seiferle.
Lehrbuch der Anatomie der Haustiere [erweitert]

von circa 5 Kubikmeter sowie einem Fermenter zur Fettsäurevergärung mit etwa 10 Kubikmeter installiert und in Betrieb gesetzt, um im Projekt RUMEN – in unterschiedlichen Maßstäben – diverse potenzielle Gärsubstrate im Hinblick auf ihre stoffliche Umsetzbarkeit zu untersuchen.

DAUMEN – technischer Ansatz

Das Projekt DAUMEN setzt bei der prozesstechnischen Optimierung herkömmlicher Biogasanlagentechnik an. Die Prozessführung erfolgt wie beim Vormagensystem: Trennung der Mikrobiologien von

kann anschließend im »Pansen« erneut mit SCFA angereichert werden.

Umsetzung und Ausblick

Das RUMEN-Verfahren tritt in Konkurrenz zu klassischen Biogasanlagen. Durch die technische Realisierung und der besonderen Mikrobiologie werden die in der Landwirtschaft anfallenden Reststoffe und Nebenprodukte (wie dritter Grasschnitt, Stroh, und ähnliches) energetisch nutzbar, was dem Auftreten einer Konkurrenzsituation von Nahrung- und Energiepflanzenanbau unmittelbar entgegenwirkt.

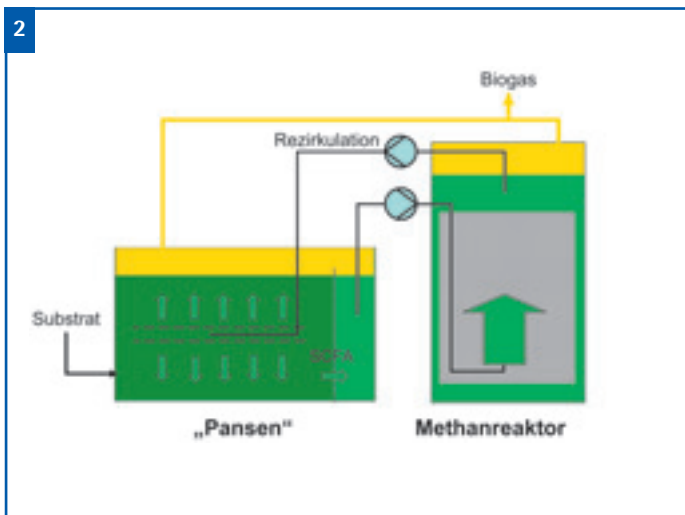


Bild 2
Schematische Darstellung des RUMEN-Prozesses
Quelle: Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Leibniz Universität Hannover

Bild 3
Zweite Scale-Up Stufe der RUMEN-Anlage (liegend 5 Kubikmeter Pansenreaktor, stehend 10 Kubikmeter Methanreaktor)
Quelle: ARES-Consultants, Hannover

Hydrolyse und Versäuerung von der Methanogenese. Die technische Innovation liegt – neben der Vorzerkleinerung und dem Feststoffrückhalt – in der Methanproduktion mit einer Hochlaststufe. Während der Feststoff in der Hydrolysestufe verbleibt, werden die SCFA mit der permanent zirkulierenden Prozesslösung in die Hochlaststufe geführt und durch spezialisierte Mikroorganismenstämme (Pelletschlamm aus anaeroben Industrieabwasserbehandlungsanlagen) zu Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) umgesetzt. Die Prozesslösung ist somit wieder regeneriert und

Das RUMEN-Verfahren benötigt *keine* angegorene Gülle oder andere Exkremate tierischer Herkunft als Quelle stoffwechselaktiver Mikroorganismenstämme. Es kommt nach Animpfung mit Panseninhalt allein mit einer wässrigen Elektrolytlösung (entsprechend dem Speichel der Wiederkäuer) aus, die weitestgehend recycelt wird. Der güllefreie Betrieb und der Einsatz cellulosehaltiger Substrate ermöglichen damit auch in Gebieten ohne Tierhaltung eine wirtschaftliche Biogasproduktion. Die klassischen Anlagen laufen in ihrer Substratausbeute unbefriedigend und

ineffizient. Die Betriebsführung gestaltet sich aufgrund der Vermischung der Prozessstufen häufig durch Inhibierungen (organischer Säuren, Stickstofffrachten) als äußerst schwierig und führt nicht selten zum Ausfall der Anlagen oder zum Austausch der Biomassen mit entsprechenden Beeinflussungen der Umwelt.

Der Einsatz regenerativer Energien ist nur dann sinnvoll, wenn er in nachhaltiger Weise geschieht [9]. Das hier vorgestellte Verfahren erlaubt im Unterschied zur gegenwärtigen Bioenergiebereitstellung unter anderem den vollstän-

**Dr.-Ing. Dirk Weichgrebe**

Jahrgang 1964, arbeitet seit 1999 am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover.
Kontakt: weichgrebe@isah.uni-hannover.de

Prof. Dr. Gerhard Breves

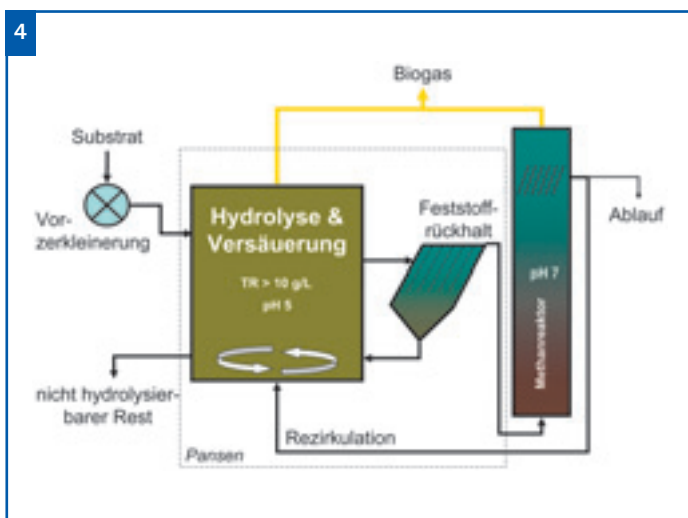
Jahrgang 1950, arbeitet seit 1997 an der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover.
Kontakt: gerhard.breves@tiho-hannover.de

Dr. Michael Strecker

Jahrgang 1964, hat 2005 mit seinem Bruder David die ARES-Consultants GbR gegründet.
Kontakt: michael.strecker@ares-consultants.de

Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinz Rosenwinkel

Jahrgang 1950, arbeitet seit 1995 am Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Leibniz Universität Hannover.
Kontakt: rosenwinkel@isah.uni-hannover.de



- [5] Zwart K. B., et.al. [1988] Anaerobic Digestion of a Cellulosic Fraction of Domestic Refuse by a Two-Phase Rumen-Derived Process, *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 32, pp. 719–724.
- [6] Gijzen, H. J. [2002] Anaerobic Digestion for Sustainable Development: a Natural Approach, *Water Science and Technology* Vol. 45, No. 10, pp. 321–328.
- [7] Raizada, N., et. Al [2003] Population Dynamics of Rumen Microbes Using Modern Techniques in Rumen Enhanced Solid Incubation, *Water Science and Technology* Vol. 48, No. 4, pp. 113–119.
- [8] Schieder, D., Faulstich, M. [2008] Substrataufschluss/mikrobiol. Hydrolyse (Biogas) von nachwachsenden bzw. cellulosehaltigen Substraten, 6. Fachtagung Anaerobe biologische Abfallbehandlung– neue Tendenzen in der Biogastechnologie, 23.–24.9.2008, Dresden.
- [9] Wahmhoff, W. [2006] Nachwachsende Rohstoffe nachhaltig nutzen, In: *factorY* 4/2006, p 15.

Bild 4

Schematische Darstellung des DAUMEN-Prozesses
Quelle: *Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Leibniz Universität Hannover*

digen Verzicht auf den Fruchtanteil (ethischer Aspekt), die Extensivierung der Pflanzenproduktion, unter weitgehender Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutz- und Düngemitteln (Gewässer- und Bodenschutz), den Einsatz so genannter »Unkräuter« (Naturschutz, Artenvielfalt) und den Verzicht auf Gentechnik. Dieser erfasst sowohl die Pflanze selbst als auch die auf sie Anwendung findenden Mikroorganismen. Die vorgestellten Innovationen von DAUMEN und RUMEN ermöglichen somit die Einhaltung relevanter Nachhaltigkeitskriterien.

Literatur

- [1] Wahmhoff, W. [2008] *Nahrungsmittel – Nachwachsende Rohstoffe – Naturschutz – Wie nutzen wir die Flächen der Welt in nachhaltiger Weise?*, 22. Hülseberger Gespräche, Lübeck, 21.–23. Mai 2008.
- [2] Ökoinstitut (Hrsg.) [2004] *Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung*, Freiburg – Darmstadt – Berlin. Online: www.erneuerbare-energien.de.
- [3] FNR [2005] *Handreichung Biogasgewinnung- und -nutzung*.
- [4] Nickel, R., Schummer, A., Seiferle, E. [1967] *Lehrbuch der Anatomie der Haustiere*, Band 2, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.

RUMEN und DAUMEN sind EFRE-Mittel geförderte Tandemforschungsprojekte der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, der Leibniz Universität Hannover und der Firma ARES.