

# Zweistufiges Fest-Flüssig-Biogasverfahren mit offener Hydrolyse – ein neues technologisches Konzept für die Biogasgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen und bioverfügbaren Abfällen

Günter Busch, Marko Sieber  
Lehrstuhl Abfallwirtschaft

## Kurzfassung

Zweistufige Prozesse haben bei der Optimierung der Biogasprozesse erhebliche Vorteile, die von der Optimierung der einzelnen Stufen bis zur Steuerung und Regelung des Prozesses reichen. Für die Praxis sind dabei insbesondere die hohe Prozessstabilität und die verhältnismäßig leichte Anpassbarkeit auf neue wechselnde Substrate von Bedeutung. Da die Hydrolyse der intensitätsbestimmende Teilprozess ist, steht die Optimierung der Prozessparameter der Hydrolyse im Vordergrund der gegenwärtigen Forschungsarbeiten. Die Zweistufigkeit gestattet die Ausnutzung des verfahrenstechnischen Optimierungspotentials und erschließt auch weitere potentielle Substrate für die Erzeugung von Biogas. Der Lehrstuhl Abfallwirtschaft ist Projektpartner im BioGas Crops Network, eines Verbundprojektes des BMBF mit zehn wissenschaftlichen Einrichtungen der Bundesrepublik, und führt in diesem Rahmen die Optimierungsuntersuchungen für die Gewinnung von Biogas aus verschiedenen nachwachsenden Rohstoffen durch.

## Abstract

In biogas production, double stage operation (consequent separation of hydrolysis and methanation) provides considerable advantages ranging from optimization of particular stages up to the control of the whole process. For practical application, the high process stability and the adaptability to new and changing substrates are of outstanding importance. Since the hydrolysis stage determines the intensity in total, optimization of this process plays an important role within the ongoing research activities. The double-stage conception makes the exploitation of the process optimization potential and discovers more potential input substrates for biogas generation than presently. The Department of Waste Management at Brandenburg University of Technology is a project partner within the „BioGas Crops network“ sponsored by the BMBF. Among ten of the leading scientific institutions of Germany, optimization of the biogas production from different renewable resources is the main focus of this network.

## Einführung

Die Gewinnung von Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen („NawaRo“) – bevorzugt aus Maissilage, Gras und Getreide – ist durch die Wirkung der jüngsten Novellierung des EEG in Deutschland wirtschaftlich attraktiv geworden. Das führt zu einem rapiden Aufschwung der Biogasbranche.

Die technologische hat allerdings mit der wirtschaftlichen Entwicklung nicht Schritt halten können. Die Technik der Vergärung nachwachsender Rohstoffe basiert im Wesentlichen noch auf der Vergärung von Gülle, wobei zerkleinerte NawaRo's als sogenannte Co-Substrate zugemischt werden. Nur sehr zögerlich werden auch Anlagen für die ausschließliche Vergärung von NawaRo errichtet und betrieben (BEKON, LOOK, Schmack ...), jedoch wurden bei diesen Verfahren wesentliche Prozessparameter der konventionellen Nassvergärung beibehalten und bei näherer Analyse wird festgestellt, dass auch diese Anlagen zumindest in der Anfahrphase, oft aber auch während des Betriebes mit Gülle als Stütz- oder Basissubstrat betrieben werden.

Die Defizite der bisherigen technologischen Lösungen für die Vergärung nachwachsender Rohstoffe lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Trotz zahlreicher, auch eigener Ansätze<sup>1</sup> ist es bisher nicht gelungen, durch Steuerung oder Regelung der Prozessparameter wesentliche Fortschritte in der Gewährleistung der Prozessstabilität zu erreichen. Die Ursachen sind konkurrierende Bedingungen für die verschiedenen Stufen des Biogasprozesses im Reaktor und immer noch weitgehende Unkenntnis der tatsächlichen biochemischen Abläufe. Somit führt eine Fahrweise der Fermentatoren in der Nähe des Produktivitätsmaximums zu geringer Prozessstabilität oder, umgekehrt, die sicherheitsorientierte Fahrweise zu niedriger Gasproduktivität. Aus Praxiserfahrungen ist bekannt, dass die tatsächliche Verfügbarkeit der Fermentatoren durchschnittlich 25 % niedriger liegt als die der Prozessauslegung.

<sup>1</sup> JUNG, UWE: Ein Online-Analysesystem zur Charakterisierung heterogener Biosuspensionen für Prozesse der anaeroben Behandlung fester Bioabfälle, Dissertationsschrift, BTU Cottbus, 2004

Die Gasproduktion aller bekannten Biogastechnologien ist nicht steuerbar. Es erfolgt allenfalls eine Anpassung von Erzeugung und Bedarf über einen Gasspeicher. Damit sind alle bekannten Anlagen lediglich grundlastfähig, jedoch nicht oder nur über den Gasspeicher spitzlastfähig. Bei Ausfall der Gasabnahme bzw. im Havariefall muss das Biogas abgefackelt werden, da die Gasproduktion nicht steuerbar ist.

Das Biogas enthält üblicherweise bis zu 1 % Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ ), in Extremfällen auch wesentlich mehr. Dieser muss durch eine biologische oder chemisch-physikalische Gasreinigung entfernt werden, da es zu Schäden an den Gasmotoren durch Korrosion und Beeinträchtigung der Schmierfähigkeit des Motorenöls führt. Die Bildung von Schwefelwasserstoff kann bisher nicht unterdrückt werden. Lediglich die Verfahren zur bakteriellen Reduktion des Schwefelwasserstoffs im Kopf der Fermentatoren belassen den Schwefel zumindest in elementarer Form, die dem Nährstoffkreislauf wieder zugeführt werden kann.

Die klassischen Nassfermentatoren, aber auch neuere Fermentatoren der Semi-Trockenvergärung, sind im verfahrenstechnischen Sinne als mehr oder weniger ideal durchmischte Rührkesselreaktoren aufzufassen. Diese zeichnen sich insbesondere durch ein einheitliches Verweilzeitverhalten, nämlich durch die hydraulische Verweilzeit, aller echt gelösten oder suspendierten Stoffe aus. Als Ergebnis dessen ist es nicht möglich, die Verweilzeit einzelner Substrate zu beeinflussen. Da aber die verschiedenen, oftmals parallel zugesetzten Substrate außerordentlich unterschiedliche Abbauraten aufweisen (z.B. Bioabfall ca. 7 Tage, Gülle 20 Tage, Maissilage im Extremfall bis zu 120 Tagen), kann eine optimale substratspezifische Verweilzeit nicht eingestellt werden.

Zur Homogenisierung des Fermenterinhalt werden Rührorgane, Pumpen oder Gaseinpressungen verwendet. Sie dienen auch der Verhinderung von Schwimmdecken- und Sedimentbildung. Nachwachsende Rohstoffe als Substrate neigen zu starker Entmischung wegen der Schwimmdeckenbildung, die nur durch erhöhten Energieeintrag zu vermeiden ist. Der Energiebedarf für die Aufrechterhaltung der Homogenität kann durchaus 10 % und mehr der in der Anlage erzeugten Elektroenergie betragen! Die hohen Belastungen der Rührerwellen haben außerdem schon mehrfach zum Wellenbruch und damit zum Ausfall des Gesamtsystems geführt.

Neuerer Technologien zur reinen Trockenvergärung (d.h. Feststoffgehalte > 20 %) sind zwar schon am Markt verfügbar, jedoch wurde in eigenen Untersuchungen festgestellt, dass noch keine der Nassvergärung vergleichbaren kontinuierlichen Gasmengen und Gaszusammensetzungen erzeugt werden können. Außerdem sind die Inokulationsraten (d.h. der Anteil der zur Animpfung von Frischsubstrat benötigten Menge an ausgegorenem Gärrest) mit 40-80 % sehr hoch, was die Effizienz der Anlagen vermindert.

Am Lehrstuhl Abfallwirtschaft wurde eine Technologie entwickelt, die diese Defizite vermindern oder gar völlig vermeiden kann. Sie basiert selbstverständlich auf den gleichen biochemischen Grundlagen der tradierten Biogastechnik, nutzt aber auch zahlreiche wissenschaftliche Ergebnisse aus mehreren Jahrzehnten weltweiter Biogascforschung, die zwar an sich bekannt, aber technologisch nicht umgesetzt wurden.

## Kurzbeschreibung des zweistufigen Fest-flüssig-Biogasverfahrens

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf den Basisprozess, wie er in der Abb. 1 dargestellt wird.

In der ersten Stufe („Fest“), die aus einem oder mehreren parallel geschalteten Perkolatoren besteht, erfolgt eine enzymatisch und mikrobiologisch unterstützte Überführung fester, jedoch biogener verfügbarer Stoffe aus einem festen, stückigen Substrat in eine Vielfalt wasserlöslicher organischer Substanzen. Diese Stufe wird vereinfacht als Hydrolyse und das entstehende Gemisch aus Wasser und diesen organischen Substanzen als Hydrolysat bezeichnet. Gelegentlich wird dieser Prozess auch Bioleaching genannt. Anstelle der Perkolations kann auch eine Flutung und Durchströmung der Hydrolysestufe realisiert werden.

Die Hydrolyse wird offen gefahren, d.h. das Entweichen von Gasen und der Zutritt von Luft sind möglich.

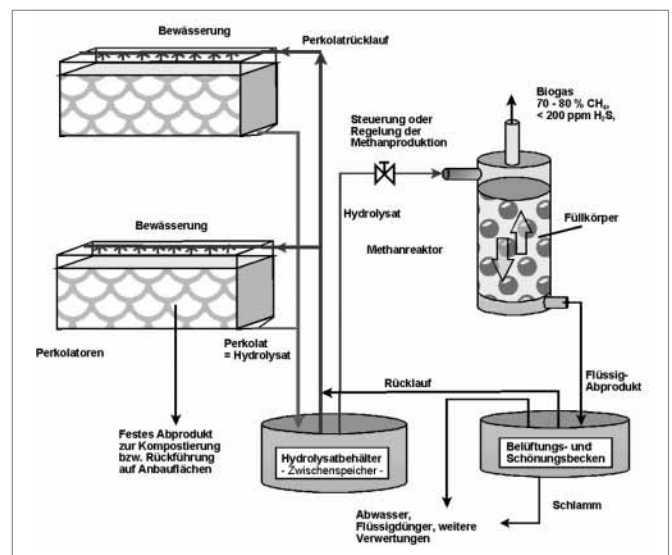


Abbildung 1:  
Layout des zweistufigen Fest-flüssig-Biogasprozesses

Ein Teilstrom des nahezu feststofffreien Hydrolyсата wird einer getrennten Methanstufe zugeführt und dort zu Biogas umgesetzt. Die Methanstufe besteht aus einem Reaktor mit immobilisierten Mikroorganismen.

Die Methanproduktion kann durch die Zuführrate des Hydrolyсата gesteuert oder geregelt werden und erliegt bei Unterbrechung der Zufuhr innerhalb kurzer Zeit entsprechend des Verhältnisses von Flüssigkeitsvolumen und Biofilmoberfläche im Methanreaktor.

Die aus dem Methanreaktor ablaufende Flüssigkeit wird nach einer Zwischenbelüftung wieder der Hydrolyse zugeführt. Eine aus Bilanzgründen aus dem Prozess auszuschleusende Menge dieses flüssigen Abproduktes kann als Flüssigdünger ausgebracht, als Abwasser entsorgt oder anderweitig verwertet werden.

## Methodische Ansätze der Technologieentwicklung und prozesstechnische Vorteile

Die am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen benötigen unterschiedliche optimale Milieubedingungen, die in einstufigen Prozessen grundsätzlich nicht gegeben sind. Daher wurde ein zweistufiges Verfahren bevorzugt, das den an der Hydrolyse und Versäuerung beteiligten Mikroorganismen ein saures Milieu und an der Methanbildung beteiligten Bakterien ein neutrales bis schwach basisches Milieu bietet (Abb. 2).

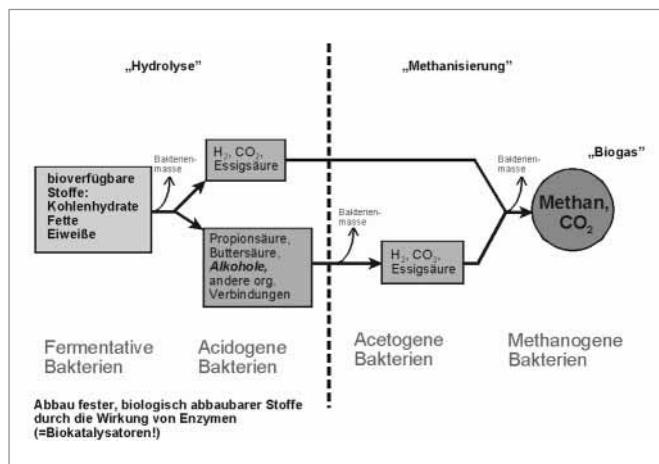


Abbildung 2:  
Prozessstufen der Biogasbildung

Die beiden Hauptprozesse Hydrolyse und Methanisierung wurden prozess- und apparatetechnisch streng getrennt. Diese Methode ist bereits bekannt und wird seit langem bei der Nassvergärung angewandt, jedoch noch nicht bei der sog. Trockenvergärung, zu der das hier dargestellte Verfahren gehört, soweit diese Unterscheidung überhaupt sinnvoll ist. Die Besonderheit der Lösung besteht allerdings darin, dass beide Hauptprozesse auch getrennt betrieben werden können, wodurch sich interessante Anwendungen ergeben, wie später erläutert werden wird.

Ein Teil des hier gebildeten Hydrolysats wird der Methanisierung zugeführt. Der Methanreaktor ist dabei mit hydrophoben Kunststofffüllkörpern analog denen, die bereits in der aeroben Abwasserreinigung als Trägermaterial eingesetzt werden, gefüllt. Sie werden mit den methanbildenden Biozönosen beimpft. Durch diese Maßnahme wird die hydraulische Verweilzeit von der Verweilzeit der Mikroorganismen getrennt. Deren Generationszeit beträgt je nach Art mehr als zehn Tage, so dass diese Zeit als Verweilzeit in Nassvergärungsanlagen nicht unterschritten werden darf, um ein völliges Austragen der methanbildenden Mikroorganismen zu vermeiden. Aus diesem Grund kann in Nassvergärungsanlagen eine Verweilzeit von 12-20 Tagen nicht unterschritten werden.

Durch die Immobilisierung der Methanbildner werden diese kaum noch aus dem Reaktor ausgewaschen, so dass die hydraulische Verweilzeit stark verkürzt werden kann, soweit es der Stoffumsatz zulässt. Experimentell wurde eine minimale Verweilzeit von ca. 18 Stunden ermittelt, bei der der Umsatz noch ca. 95 % betrug. Der Umsatz bezieht sich dabei auf den Abbau der gelösten organischen Substanz im Hydrolysats, gemessen am chemischen Sauerstoffverbrauch CSB.

## Offene, schwach aerobe Hydrolyse

Die Hydrolyse wird im Gegensatz zu allen bekannten Biogasverfahren offen und schwach aerob gefahren. Bei der (üblichen) gasdichten Fahrweise mit direkter Rückführung des Prozesswassers ohne Zwischenbelüftung kommt es zur Verschleppung von Methanbakterien in die Hydrolyse, und in dieser wird etwa nach Ablauf der halben Verweilzeit ebenfalls Biogas produziert. Zu Beginn der Hydrolyse von frischem Substrat werden diese wegen der hohen Konzentration organischer Säuren unterdrückt bzw. inhibiert und können sich erst mit Abnahme der Säurebildung nach der Umsetzung der leicht abbaubaren Stoffe im Hydrolysereaktor ansiedeln. Technisch stellt diese Verfahrensweise hohe Anforderungen, da das gesamte System aus Gründen der Ausbeute, des Arbeitsschutzes und des Umweltschutzes gasdicht ausgeführt werden muss. Die Menge des in der Hydrolysestufe erzeugten Biogases beträgt meist weniger als 25 % der gesamten erzeugten Biogasmenge.

Wählt man hingegen die offene Fahrweise und gestattet somit auch den Zutritt von Luftsauerstoff, so kann man die Entstehung von Methan in der Hydrolysestufe nahezu auch dann vollständig unterdrücken, wenn aufgrund des Prozessfortschrittes weniger organischen Säuren gebildet werden. Die Gasdichtheit wird somit nur noch für den Methanreaktor gefordert, alle anderen Prozessstufen, Speicher usw. bleiben offen.

Neben diesem apparatetechnischen Vorteil wird auch der größte Teil des in der Hydrolyse gebildeten Kohlendioxids in die Atmosphäre entlassen und erscheint daher nicht mehr im Biogas des Methanreaktors. Dessen Konzentration liegt jetzt um etwa 15 % höher als bei der geschlossenen Fahrweise und erreicht bis zu 80 %, typisch etwa 70-74 %. Natürlich nimmt die Biogasmenge um die Menge des bereits entwichenen Kohlendioxids ab. Daher werden alle Betrachtungen auf die Methanausbeute bezogen. Abb. 3 zeigt den Verlauf der Methankonzentration im Batch-Versuch (Substrat: Maissilage).

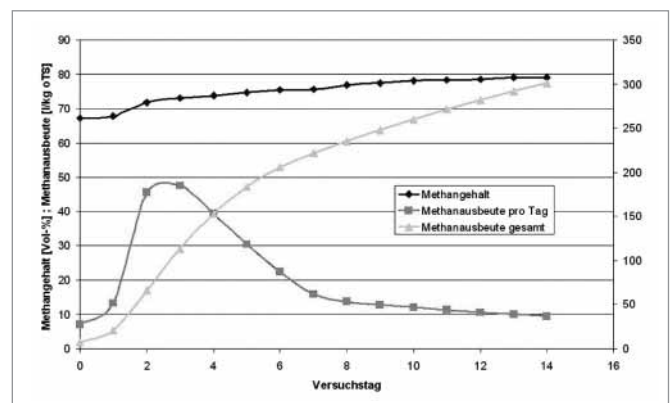


Abbildung 3:  
Verlauf der Methankonzentration und der Methanausbeute

Die Perkolationsflüssigkeit (das Perkolat bzw. Hydrolysats) wird im Kreislauf über einen Zwischenspeicher geführt. Es wird erreicht, dass die Kontakt- bzw. Verweilzeit der für den enzymatischen Abbau des Feststoffes und die weitere Versäuerung verantwortlichen extrazellulären Enzyme und der Mikroorganismen deutlich verlängert wird. Diese Maßnahme, gekoppelt mit einer ausreichenden Nährstoff- und Spurenele-

menterversorgung, bewirkt einen mehrfach rascheren Abbau der festen Substrate. So ist hier eine Verweilzeit für Maissilage von etwa 14-18 Tagen ausreichend für einen ca. 72 % Abbau der organischen Trocken-substanz, während in konventionellen Nassvergärungsanlagen dafür bis zu 60 Tagen, in Einzelfällen sogar die doppelte Zeit, erforderlich ist.

## Prozessstabilität der Methanstufe

In zahlreichen Experimenten wurde festgestellt, dass die Versagenswahrscheinlichkeit des hier beschriebenen Verfahrens ungewöhnlich niedrig ist. Seit Beginn der systematischen Untersuchung im Jahr 2002 wurde nicht ein einziges Versagen eines laufenden Prozesses festgestellt, es sei denn, die Feststellung der Versagensgrenze war Ziel der Untersuchung. Während Hydrolyse allgemein als stabil bekannt ist, versagen Biogasanlagen üblicherweise wegen der hohen Empfindlichkeit der Methanbakterien gegenüber dem in der Hydrolyse gebildeten Säurepotential.

Die Ursache für die hohe Prozessstabilität der Methanstufe liegt nach gegenwärtigem Erkenntnisstand in den strömungstechnischen Bedingungen in der Füllkörperpackung. Es ist bekannt<sup>2</sup>, dass sich Biofilme auf hydrophoben Kunststoffoberflächen gut ansiedeln. Für den Aufbau des Biofilms wird ein Schicht- oder Schalenmodell verschiedener Mikroorganismen angenommen<sup>3</sup>, wobei die oberste, der Flüssigkeit zugewandte Schicht aus acidogenen, die mittlere Schicht aus acetogenen und die unterste Schicht aus methanogenen Mikroorganismen besteht. Bei einem gut ausgebildeten und ungestörten Biofilm sind also die Methanbakterien gut gegen den unmittelbaren Angriff organischer Säuren geschützt. Der interzelluläre Stoffaustausch in dieser Biozönose sorgt gleichsam für eine harmonische und verträgliche Zuführung der Essigsäure sowie von Wasserstoff und Kohlendioxid zu den Methanbakterien und für die Abführung der Reaktionsprodukte (Abb. 4).

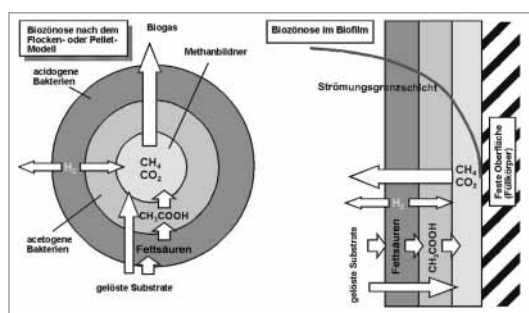


Abbildung 4:  
Aufbau des  
Biofilms

Die Stabilität des Biofilms und somit dieser Biozönose ist offenbar von den Strömungsbedingungen im Methanreaktor (oder auch im durchmischten einstufigen Nassreaktor) sehr stark abhängig. In der oben beschriebenen Anordnung wird das Hydrolysat als Pfropfenströmung einmalig innerhalb einer optimalen Verweilzeit von ca. 18 h durch die Schütt-schicht geführt. Die Strömung ist streng laminar mit Re-Zahlen < 10, es treten offenbar kaum Scherkräfte in Filmnähe auf. Dadurch bleibt der Biofilm mechanisch ungestört und somit auch biochemisch stabil.

Welche biochemische Stabilität der Biofilm an festen Oberflächen erreichen kann, konnte im Experiment eindrucksvoll nachgewiesen werden: Dazu wurde ein Substrat mit einem CSB von 180 000 mg/l (!) und einer Propionsäurekonzentration von 20 000 mg/l einem solchen immobilisierten Methanreaktor zugeführt. Die Methanproduktion war stabil, ein Versagen wurde nicht festgestellt.

Die Gasproduktivität erreicht sicher bis zu 8 (m<sup>3</sup> Biogas)/(m<sup>3</sup> Reaktorvolumen und Tag), eine weitere Steigerung bis auf den doppelten Wert erscheint durchaus möglich (Wahl von Füllkörpern mit höherer spezifischer Oberfläche, längere Adaption der Biozönosen).

## Rückführung des Prozesswassers

Die aus der Methanstufe ablaufende Flüssigkeit, hier als Prozesswasser bezeichnet, wird nach einer Zwischenbelüftung in einem offenen Speicherbecken in die Hydrolyse als Perkolationswasser zurückgeführt. Bei stabiler Betriebsführung arbeitet das Verfahren frischwasserfrei, d.h. außer der Erstbefüllung ist keine weitere Wasserzugabe erforderlich. Verdunstungsverluste werden durch die Feuchtigkeit des eingetragenen Substrates und des beim biochemischen Abbau freier werdenden Wassers mindestens ausgeglichen.

Mit dem Prozesswasser werden auch Nährstoffe, Enzyme und Mikroorganismen zurückgeführt. Die sich einstellende Anreicherung dieser Stoffe im Prozesswasser trägt entscheidend zum raschen Abbau des oTS in der Hydrolyse bei. Es wurde gefunden, dass ein Betrieb der Hydrolyse ohne diese Rückführung, also mit Ersatz des in die Methanstufe geführten Hydrolysat durch Frischwasser, zu einem raschen Erliegen der Hydrolyse führt. Diese Beobachtung kann wie folgt interpretiert werden: Zu Beginn der Hydrolyse ist die Konzentration an leicht-abbaubaren Substanzen und Nährstoffen im Substrat hoch, so dass gute Bedingungen für das Wachstum und die Aktivität der Mikroorganismen vorhanden sind. Mit zunehmender Dauer der Hydrolyse verbleiben jedoch nur noch die schwerer abbaubaren Stoffe (Lignozellulose usw.) des Substrates. Wird die Hydrolyse mit Frischwasser betrieben, so vermindert sich auch die Konzentration an Nährstoffen, Enzymen und Mikroorganismen, da diese ausgewaschen werden. Wird hingegen Prozesswasser zurückgeführt, so können zumindest vorteilhafte Umweltbedingungen für den weiteren biochemischen bzw. enzymatischen Abbau der schwer abbaubaren Stoffe aufrechterhalten werden. Abb. 5 zeigt diesen Effekt für die Hydrolyse von Maissilage. Für die Hydrolyse wurde Frischwasser (FW), „junges“ Prozesswasser (PW), das nur einmal den gesamten Prozess durchlaufen hat, und „altes“ Prozesswasser, das bereits mehrfach im Kreislauf gefahren wurde, verwendet, wobei die Freisetzung von CSB aus dem oTS des Substrates gemessen wurde.

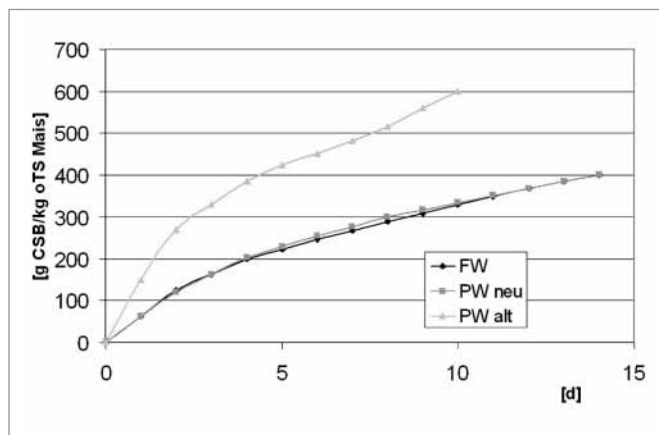
Die Anreicherung an mineralischen Nährstoffen im Kreislauf scheint dabei eine entscheidende Rolle zu spielen. Es wurde bereits berichtet<sup>4</sup>, dass ohne Kreislaufführung die Konzentrationen für viele der mit

<sup>2</sup> M. S., SALKINOJA: Starting-up of an anaerobic fixed film reactor, water science technology, 1983

<sup>3</sup> BISCHOFBERGER W. et. al., Anaerobtechnik; Springer Verlag 2005

<sup>4</sup> LANGHANS G., die Schadstoffproblematik in Biogasanlagen. In: Anaerobe biologische Abfallbehandlung; Eigenverlag Forum vor Abfallwirtschaften und Altlasten e.V., Dresden 2006

den nachwachsenden Rohstoffen in den Biogasprozess eingetragenen Nährstoffe und Spurenelemente weit unterhalb der für den mikrobiologischen Abbau optimalen Konzentration liegen. Die Kreislaufführung des Prozesswassers kann somit die ausreichende Nährstoffversorgung der Mikroorganismen versorgen, ohne dass zusätzliche Nährstoffe zugeführt werden müssen. Die damit verbundene Aufsalzung ist unkritisch und führt lediglich zu einer Protonenpufferung, was durch einen steigenden pH-Wert trotz hoher Säurekonzentration im Hydrolysat bemerkbar macht.



**Abbildung 5:**  
Effekt des „Alters“ des rückgeführten Prozesswassers

## Rücklaufverhältnis

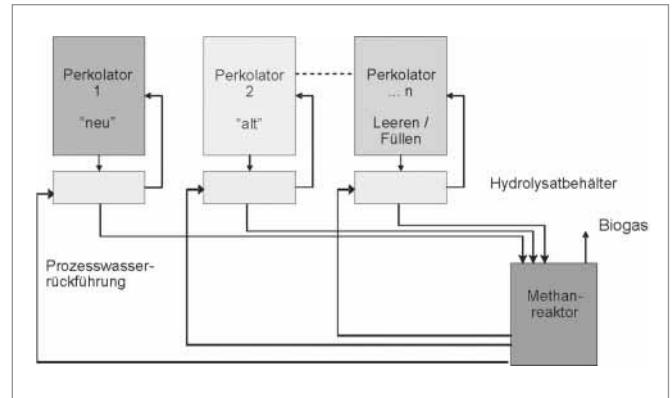
Das Rücklaufverhältnis ist hier definiert als die während eines Tages (24 h) rückgeführte Prozesswassermenge, bezogen auf die Inputmasse der organischen Trockensubstanz des Substrates. Es zeigt sich, dass es für das Rücklaufverhältnis zwei konkurrierende Bedingungen gibt: Einerseits beschleunigt ein hohes Rücklaufverhältnis die Freisetzung des CSB aus dem oTS des Substrates, andererseits führt es zur Verkürzung der Verweilzeit im Methanreaktor. Es wurde experimentell gefunden, dass das optimale Rücklaufverhältnis (für Maissilage) ungefähr  $7 \text{ l}/(\text{kg oTS} \cdot \text{d})$  beträgt.

## Schaltungsvariante

### „Gleichstromgekoppelte Reihenschaltung der Hydrolyse“

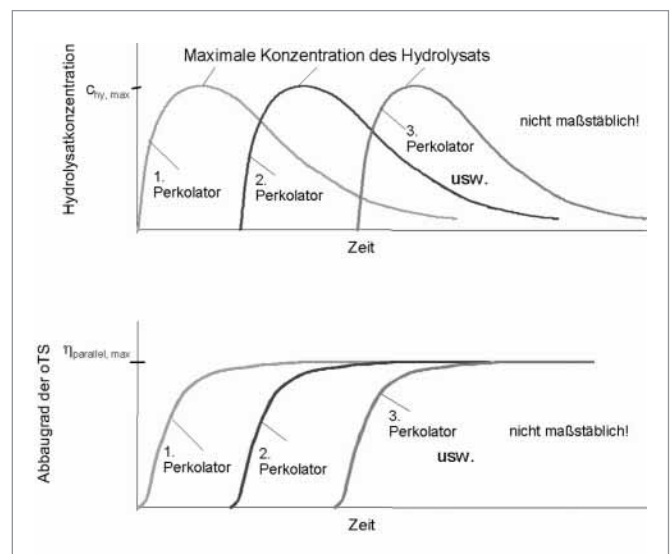
Offenbar kann ein rascherer und ggf. höherer Abbau der organischen Trockensubstanz erreicht werden, wenn eine hohe Enzym-, Mikroorganismen- und Nährstoffkonzentration auf die schwer abbaubaren Stoffe des Substrates treffen. Die bisher bevorzugt untersuchte Parallelschaltung mehrerer Perkolatoren zur Vergleichmäßigung der CSB-Mischkonzentration des in die Methanstufe geführten Hydrolysats bietet diese Bedingungen nicht. Der durch Hydrolyse und nicht durch Auswaschung wasserlöslicher Stoffe hervorgerufene CSB des Hydrolysats steigt wegen der Säureselbsthemmung bei Mais nicht über ca.  $40.000 \text{ mg/l}$ , was als die Maximalkonzentration des Hydrolysats angesehen werden muss. Der Abbaugrad  $\eta_{\text{parallel, max}}$  des oTS erreicht etwa 72 %.

Die Parallelschaltung und der prinzipielle Verlauf von CSB und oTS-Abbau sind in den Abb. 6 und Abb. 7 gezeigt.



**Abbildung 6:**  
Parallelschaltung der Perkolatoren

„Neu“ bezeichnet den jeweils frisch befüllten Perkolator, „alt“ den in der vorangegangenen Periode befüllten Perkolator.



**Abbildung 7:**  
CSB im Ablauf jedes Perkolators und Verlauf und Abbaugrad des oTS

Gegenwärtig werden Untersuchungen zu einer Gleichstrom-Reihenschaltung der Perkolatoren durchgeführt. Der Grundgedanke dieser Schaltungsvariante besteht darin, den Ablauf des jeweils jüngst befüllten Perkolators dem nächsten, älteres Substrat enthaltenden Perkolator zuzuführen. Somit trifft eine Perkolationsflüssigkeit mit hohen Konzentrationen an Enzymen, Mikroorganismen und Nährstoffen auf das nunmehr schwerer abbaubare Substrat. Der Ablauf aus diesem Perkolator gelangt dann in den nächsten, wiederum nunmehr älteres Substrat enthaltenden Perkolator usw., ohne dass die Perkolationsflüssigkeit die oben erwähnten hohen Konzentrationen verliert. Die Prozessbedingungen für den Abbau der schwerer abbaubaren Stoffe werden somit deutlich verbessert. Es wird daher eine höhere Methanausbeute aus dem eingesetzten Substrat erwartet.

## Anpassung der Verweilzeit in der Hydrolyse

Während die Verweilzeit des Hydrolysats in der Methanstufe weitestgehend unabhängig vom Ausgangssubstrat ist, hängt sie bei der Hydrolyse sehr stark von der Art des Substrates ab. Bei Mais beträgt sie ca. 16-20 Tage, bei Bioabfällen jedoch nur 5-7 Tage.

Im einstufigen Prozess darf die hydraulische Verweilzeit nicht kürzer als die Periode der des Zellwachstums der (Methan-)bakterien sein, sonst erfolgen eine Ausspülung der Methanbakterien und deren Abreicherung im Reaktor. Darauf braucht beim zweistufigen Prozess mit immobilisierten Methanbakterien keine Rücksicht mehr genommen zu werden. Die Verweilzeit in der Hydrolyse kann direkt und ohne weitere Einschränkungen auf das Substrat abgestimmt werden. Bei dem Betrieb mehrerer Hydrolysereaktoren können somit in den einzelnen Reaktoren verschiedene optimale Verweilzeiten und Milieubedingungen eingestellt werden. Damit lässt sich die Anlagenkapazität optimieren. Es ist grundsätzlich möglich, einen Methanreaktor mit dem Hydrolysat verschiedener Substrate zu beschicken, ohne dass eine längere Anpassung der Methanbildner erforderlich ist.

## Hydrolyse flüssiger Einsatzstoffe im Festbett

Neben dem Einsatz fester Substrate ist auch der organischer flüssiger Abfall- und Nebenprodukte für die Biogasproduktion interessant. Dabei ist allerdings entscheidend, ob die Hydrolyse stabil und sicher verläuft. Im untersuchten Anwendungsfall sollte für einen Biogasprozess ausschließlich das Glycerinrohabwasser aus der Herstellung von Biodiesel verwendet werden.

Die Zugabe von Hydrolysat aus einem anderen Prozess zum Zweck der Animpfung versagte in jedem Mischungsverhältnis bei der Durchführung der Hydrolyse in einem Durchflussmischreaktor. Dagegen war die Hydrolyse im Festbett unter Verwendung von Holzhackschnitzel oder Kunststofffüllkörpern erfolgreich. Die Füllkörper wurden einige Tage mit Hydrolysat aus einem parallel laufenden Fest-Flüssig-Biogasprozess angeimpft und dann mit verdünntem Glycerinrohabwasser beaufschlagt, wobei das modifizierte Schaltungsprinzip nach Abb. 11 angewandt wurde. Die Verdünnung erfolgt dabei mit rückgeführten Prozesswasser. Innerhalb von ca. 3 Tagen erfolgte eine fast vollständige Hydrolyse mit der bevorzugten Entstehung von Propionsäure, die dann dem bereits vorgestellten Methanreaktor zugeführt wurde. Der Gasertrag betrug dabei ca. 500 l Methan/kg Glycerin. Dieses Verfahren wird gegenwärtig weiterentwickelt, da sich hier die Möglichkeit eröffnet, eine große Vielzahl organisch belasteter Abwässer und Nebenprodukte für die Erzeugung von Biogas einzusetzen, und zwar vollständig als Monosubstrat, ohne dass, wie bisher üblich, eine Grundlast der Biogasanlage durch Gülle gebildet werden muss.

Die Abb. 8 zeigt den momentan verwendeten Versuchsaufbau mit zwei Hydrolysestufen, die beide als Festbettreaktoren ausgebildet sind. Die erste Stufe arbeitet als Schlaufenreaktor, die zweite als Pfropfenstromreaktor. Diese Anordnung erscheint zur vollständigen Hydrolyse des Substrates sinnvoll. Der Ablauf aus der zweiten Hydro-

lysestufe sollte glyzerinfrei sein, da die Methanbakterien bzw. der Biofilm auf den Füllkörpern im Methanreaktor recht empfindlich auf das Restglycerin reagieren.

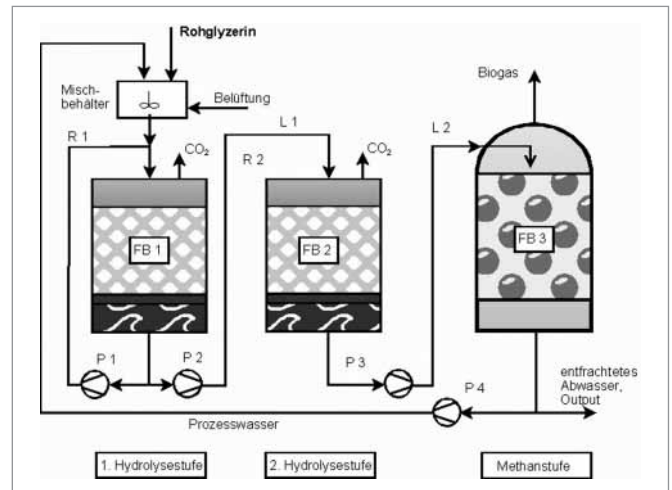


Abbildung 8:  
Monovergärung von Glycerinrohabwasser



**Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Busch**, geb. 1948; Studierte von 1969-1973 an der Technischen Universität in Dresden Verfahrenstechnik. Nach einer einjährigen Tätigkeit im Institut für Zellstoff und Papier Heidenau kehrte er als wissenschaftlicher Assistent an die TU Dresden zurück und promovierte 1976. Von 1983-1987 arbeitete er an der Universität Addis Abeba und gründete dort das Department of Chemical Engineering. 1988 habilitierte er sich und wurde als ordentlicher Professor an den Lehrstuhl „Umweltschutztechnik“ der TU Dresden berufen. 1991 nahm er eine Tätigkeit bei dem „Unternehmen Arthur D. Little“ in Wiesbaden auf und wechselte 1992 als Niederlassungsleiter zur „WESTAB Engineering“ nach Dresden. Am 1. November 1994 übernahm er im Rahmen einer Vertretungsprofessur die Leitung des Lehrstuhls „Abfallwirtschaft“ an der BTU Cottbus und wurde im Mai 1995 zum Universitätsprofessor berufen.



**Dipl. Ing. Marko Sieber**, geb. 1974; Studierte von 1994-1999 an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Umweltingenieurwesen und Verfahrenstechnik mit der Vertiefung Umweltverfahrenstechnik und Abfallwirtschaft. Von 1999-2002 war er für die Firma KUG aus Forst/Lausitz als Projektverantwortlicher tätig. Seit 2002 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Abfallwirtschaft mit dem Arbeitsgebiet biologische Abfallbehandlung, Spezialisierung Anaerobe Behandlung biogener Stoffe.