



## Du willst andere Einsatzstoffe verwenden?

Eine SLP Batch\*-Hydrolyse ermöglicht Dir andere, billigere und faserige Einsatzstoffe zu verwenden – Stroh, Mist, Maisstroh, Gras, etc.

## Du willst Deine Einsatzstoffkosten senken?

Mit der SLP Batch\*-Hydrolyse in hyper-thermophilen Betrieb, kannst Du Zellulose und sogar einen Teil der Lignozellulose aufschließen. Du brauchst weniger Einsatzstoffe je Kilowattstunde Strom.

## Du willst Ruhe haben mit der Düngeverordnung?

Mit der SLP Batch\*-Hydrolyse kannst Du Einsatzstoffe verwenden, die weniger Nährstoffe je Kilowattstunde Strom haben. Insbesondere Getreidestroh hat sehr wenig Nährstoffe im Verhältnis zur Biogasausbeute.

\*Batch – Du fütterst die Hydrolyse nur alle 2 Tage auf einmal mit der 2-Tages-Ration. Im Hydrolyse-Behälter werden die Einsatzstoffe innerhalb von 2 Tagen zu Fettsäuren verflüssigt. Es wird dann das Fettsäuregemisch stündlich aus einem Hydrolyse-Behälter in den Fermenter gepumpt. Das optimiert Arbeitszeit und Flexibilität deiner Anlage.

# Inhalt

Vorteile der Semi-Aeroben SLP Batch-Hydrolyse.....	3
Die SLP-Antwort auf Experten-Meinung.....	6
Warum eine Batch-Hydrolyse mehr <b>Flexibilität</b> bringt als ein zusätzlicher Fermenter.....	16
pH-Wert in der Batch-Hydrolyse von SLP-Biogasanlagen.....	21
Vergleich von 1-stufigen Biogasanlagen zu einer 2-stufigen SLP-Biogasanlage.....	26
Original-Artikel von Prof. Scherer & Coll.....	31
Biologische Performance – <b>Biogas Mehrertrag</b> : SLP Batch-Hydrolyse vs. KTBL.....	43
Biogasanlage Gradec, Kroatien: <b>Nachrüstung</b> einer SLP-Batch-Hydrolyse.....	45
Biogasanlage Laburnum House, UK: SLP Biogasanlage für landwirtschaftliche Nebenprodukte, Mist und Abfälle aus der Gemüseverarbeitung.....	47
<b>Wirtschaftlichkeitsbetrachtung</b> einer SLP Batch-Hydrolyse	49
Informationsflyer.....	53
Zusammenfassung.....	56

# Vorteile der Semi-Aeroben SLP Batch-Hydrolyse



## Die Semi-Anaerobe SLP Batch-Hydrolyse

Die SLP-Batch-Hydrolyse wird ca. alle 2 Tage gefüllt. Damit wird eine hohe Raumbelastung erreicht, vergleichbar mit der im Pansen einer Kuh. Wir dosieren zu Beginn etwas Luft hinzu, damit die „Sauerstoffversorgung“ der Hydrolyse-Bakterien sichergestellt ist. Wenn der Sauerstoff aufgebraucht ist, läuft die Hydrolyse anaerob. Damit werden die hohen Abluftmengen, welche Methan enthalten und ein Umweltproblem darstellen, vermieden. Die Batch-Hydrolyse operiert völlig geruchlos, weil das gesamte Hydrolysegas erfasst und genutzt wird.

## Wir imitieren die Kuh-Verdauung!

### Vorteile der SLP Batch-Hydrolyse

**Gesteuerte Biogasproduktion** – in der Hydrolyse wird der Aufschluss und die Versauerung der Biomasse herbeigeführt. Die Biogasproduktion ist noch sehr gering. Erst, wenn das Hydrolysat vom Hydrolysebehälter in den Fermenter gepumpt wird, läuft die Biogasproduktion richtig an. Innerhalb von ca. 30 Minuten erhöht sich die Biogasproduktion erheblich. Sie nimmt ebenso schnell wieder ab, wenn die Fettsäuren aufgebraucht sind. Damit lässt sie sich gezielt steuern. Das fördert die Flexibilität bei der Produktion von Regelenergie.

**Höhere Biogas- und Methanausbeute** – Mit der Batch-Hydrolyse schließen wir Fasern besser auf

als in einstufigen Biogasanlagen ohne separate Hydrolyse. Damit erhöhen wir die Methanausbeute pro Tonne organische Trockensubstanz (oTS). Je nach Zusammensetzung der Ration erreichen wir 10 - 30% höhere Biogausbeuten im Vergleich zu den KTBL-Standardwerten. Das zeigen jahrelange Auswertungen in Praxisbiogasanlagen.

### Weniger Einsatzstoffe bei gleicher

**Stromproduktion** – Eine höhere Biogausbeute führt bei gleicher Anzahl von Volllaststunden zu einem geringeren Einsatzstoffbedarf. Das erhöht die Flexibilität, wenn die Einsatzstoffe überwiegend zugekauft werden müssen.

**Geringerer Anbauflächenbedarf** – Weniger Einsatzstoffe führen zu geringerem Flächenbedarf und Pachtbedarf. Die teuersten Pachtflächen können zurückgegeben werden. Die Nutzung von wenig nachgefragten Einsatzstoffen, wie Gras und strohhaltiger Mist, führt zu einer weiteren Reduktion des Pachtflächenbedarfs. Das erhöht die Konkurrenzfähigkeit am Pachtmarkt und verringert gleichzeitig die Abhängigkeit von den Verpächtern.

„Mit dem Grasanbau komme ich leichter an Pachtflächen, weil die Verpächter zunehmend ablehnend gegenüber dem Maisanbau von Biogasanlagen sind.“

Alfons Nebauer

# Vorteile der Semi-Anaeroben SLP Batch-Hydrolyse

**Mehr Volllaststunden der BHKWs** – Aufgrund der gesteuerten Biogasproduktion können mehr Volllaststunden mit dem BHKW gefahren werden, weil immer genügend Biogas für den Volllastbetrieb zur Verfügung steht. Nicht die Biogasproduktion ist wie üblich der Engpass der Stromproduktion, sondern die Verfügbarkeit des BHKW. Damit erhöhen sich die Einnahmen und die finanzielle Flexibilität der Anlage.

**Regelenergie ganz einfach!** – Aufgrund der Steuerbarkeit der Biogasproduktion kann je nach Bedarf mehr oder weniger Biogas produziert werden. Das erleichtert die Produktion von Regelenergie. Unsere Erfahrungen zeigen, dass die Biogasproduktion innerhalb von 30 Minuten stark ansteigt.

**Saisonale Schwankungen der Biogasproduktion (wärmegeführt)** – Aufgrund der Situation am Energiemarkt wird von Biogasanlagen in Zukunft höhere Flexibilität verlangt – auch saisonale Schwankungen mit geringerer Stromproduktion im Sommer und höherer Stromproduktion im Winter. Unsere Erfahrungen zeigen, dass SLP Biogasanlagen innerhalb einer Woche die Leistung vervielfachen können, ohne die Bakterien über zu beanspruchen.

**Robuste Biologie durch die Trennung von Hydrolyse und Methanisierung!**

**Billigere Einsatzstoffe** – Mit der Batch-Hydrolyse kann der Anteil von faseriger Biomasse (Stroh, Mist, Gras, etc.) im Einsatzstoffmix erhöht werden. Faserige Einsatzstoffe sind in der Regel billiger und einfacher am Markt zu beziehen. Die Kosten der Einsatzstoffbeschaffung sinken.

**Einfacher Einsatzstoffwechsel** – in einstufigen Biogasanlagen darf der Einsatzstoffwechsel nur ganz vorsichtig über mehrere Wochen erfolgen,

um die Biogasproduktion nicht zu beeinträchtigen. Bei der SLP-Batch-Hydrolyse können die Einsatzstoffe innerhalb weniger Tage gewechselt werden. Das erhöht die Flexibilität des Betriebs.

**Mehr Flexibilität mit der SLP-Batch-Hydrolyse bei Betrieb, Einsatzstoffen und Biogasproduktion!**

**Festseparat nochmals füttern** – in einigen Fällen, wenn der Strohanteil und damit der Lignozellulosegehalt sehr hoch ist, füttern wir das Festseparat aus dem Separator nochmals. Unsere Praxisergebnisse zeigen, dass wir mit 3 - 5 t Festseparat eine Tonne Maissilage ersetzen können. Am Ende des Gärprozesses bleibt dann fast nur noch die Lignozellulose, der Stoff für die Dauerhumusbildung, übrig. Das reduziert die benötigte Einsatzstoffmenge nochmals.

**Zuckerrüben und andere hoch energetische Einsatzstoffe** – Mit der Batch-Hydrolyse haben wir schon bis zu 40 % Zuckerrüben in der Ration gehabt. Wenn Zuckerrüben verfügbar sind, dann können sie problemlos genutzt werden. Auch ein gewisser Erdanteil ist kein Problem, weil die Hydrolysebehälter gereinigt werden können. Das spart Kosten.

**Hebeleffekt der Zuckerrüben** – Zuckerrüben in der Ration beschleunigen und intensivieren den biologischen Abbauprozess, so dass auch noch Fasern zusätzlich abgebaut werden. Wir hatten den Fall, dass der Schneckenseparator abgeschaltet werden musste, weil die Faserteilchen im Substrat zu klein waren. Der Einsatz von Zuckerrüben führt zu zusätzlichen Biogaserträgen aus den anderen Einsatzstoffen in der Ration. Das ist der Hebeleffekt der Zuckerrübe. Dieser funktioniert nur in der Batch-Hydrolyse, weil nur dort die Versauerung

# Vorteile der Semi-Anaeroben SLP Batch-Hydrolyse

stattfinden kann, ohne die Methanbiologie zu stören.

**Geringere Einsatzstoffkosten** – insgesamt führen die Effekte der Batch-Hydrolyse zu geringeren Einsatzstoffkosten. Weniger Einsatzstoffe und die Verwendung billigerer Einsatzstoffe sind die beiden Hauptgründe. Es hat sich herausgestellt, dass besonders die Kosten für die Einsatzstoffe entscheidend für den wirtschaftlichen Erfolg einer Biogasanlage sind.

**Arbeitsersparnis** – Es wird täglich nur einmal gefüttert. Manche Betreiber füttern auch nur alle zwei Tage oder legen das Füttern so, dass sie am Wochenende fütterungs-frei haben. Das erhöht die zeitliche Flexibilität für Betreiber und Mitarbeiter.

**Gesunder Gärrest** – bei den hohen Temperaturen, von durchschnittlich 55 °C und bis zu 60 °C im Hydrolyse-Behälter werden Krankheiten und Keime von Einsatzstoffen (z.B. Kartoffelfäule) und Unkrautsamen zuverlässig abgetötet. Eine Verbreitung kann nicht mehr stattfinden.

**Einfachere und bessere Fruchtfolgen** – mit der Fähigkeit viele verschiedene faserhaltige Einsatzstoffe zu vergären, ergeben sich neue Möglichkeiten im Ackerbau. Es kann Maisstroh aus der Körnermaisproduktion verwertet werden. So lässt sich der Anteil von Biogas-Mais in der Fruchtfolge reduzieren. Zwischenfrüchte, mehrjähriges Klee gras und Gras können in die Fruchtfolge mit aufgenommen werden. Die positiven Effekte sind Bodengesundung, einfachere Unkrautbekämpfung und Erosionsschutz. Gras hat zudem den Vorteil, dass Gärrest viermal im Jahr darauf ausgebracht werden darf. Mit diesen Kulturen lassen sich auch Arbeitsspitzen brechen.

**Schlussbemerkung:** Wir werden oft gefragt, warum wir **keine** Aerobe Hydrolyse machen. Ganz einfach – mit der Belüftung hat die offene aerobe Hydrolyse so viel Methanschlupf (meint: Methanemission), dass der Umweltvorteil der Biogasanlage negativ kompensiert ist. Eine aerobe Hydrolyse führt zur Klimaveränderung, weil Methan 20-fach schädlicher für das Klima ist als CO<sub>2</sub>!

## Nachrüstung einer SLP Batch-Hydrolyse

Höhere Biogausbeute bei gleichem Fermentervolumen – die Vorbehandlung in der Hydrolysestufe verkürzt die Verweildauer im Fermenter erheblich. Unsere Praxiserfahrungen zeigen, dass mit der vorgeschalteten Hydrolysestufe die Leistung der Biogasanlage verdoppelt werden kann. Es sind keine zusätzlichen Fermenter und Nachgärer nötig.

## Ansprechpartner

Walter Danner  
Snow Leopard Projects GmbH  
Marktplatz 23, D-94419 Reisbach, Germany  
Tel: +49-(0)8734-939770  
Email: w.danner@strohvergaerung.de

Stand 17.06.16

# Was sogenannte „Experten“ über die Hydrolyse in Biogasanlagen sagen – und wie es wirklich ist!

## Eine Antwort:

**Wir, die SLP**, äußern uns normalerweise nicht über andere Biogassysteme. Jetzt haben uns aber in letzter Zeit mehrfach Kunden berichtet, dass Landwirtschaftskammern, Mitbewerber und sogenannte Fachleute gesagt haben, „dass eine Hydrolyse nichts bringt“. Angeblich solle eine Hydrolyse nur den Eigenstromverbrauch erhöhen.

Es ist immer noch so, dass diese angeblichen Fachleute keine Ahnung von der Hydrolyse haben. Sie sind diesbezüglich auf dem Wissensstand von 2006, als niemand Wissen und Erfahrungswerte über die Hydrolyse und schon gar nicht über eine Batch-Hydrolyse besaß.

2006 befand sich Vieles im Entwicklungsstadium und es gab Probleme mit Geruchsemissionen und dem Rühren. Diese Probleme sind inzwischen jedoch effektiv gelöst und Hydrolysen sind heute Standard bei der SLP.

## Birnen mit Birnen und Äpfel mit Äpfeln vergleichen – oder warum es den EINEN Eigenstromverbrauch nicht gibt

Kürzlich erzählte uns ein Kunde, dass der Eigenstromverbrauch bei der Hydrolyse höher sei wegen des Rührens. Das hatte ihm ein Mitbewerber auf einer Messe erzählt.

**Die Frage ist: Höher im Vergleich zu was?** Den niedrigsten Eigenstromverbrauch hat man mit Maissilage mit einem TS-Gehalt von 30%. Das ist das ideale Biogassubstrat - schnell abbaubar und leicht zu rühren. Aber – auch das Teuerste!

Zudem ist bei der Frage zu berücksichtigen, ob es sich dabei um den Eigenstromverbrauch mit BHKW oder ohne BHKW handelt. Mit BHKW verdoppelt sich schon mal der Prozentwert beim Eigenverbrauch. Verkäufer verschweigen diese Information gerne mal, weil es ja nicht ihre Biogasanlage ist, sondern nur das BHKW, das separat betrachtet wird. Kosten verursacht es trotzdem.

Wir bauen unsere Batch-Hydrolyse für schwierige Einsatzstoffe, wie Stroh, Strohmist, Gras und anderes. Diese Einsatzstoffe sind billig und konkurrenzlos, weil keine andere Biogasanlage sie in größeren Mengen vergären kann. Und – diese Materialien sind schwieriger zu rühren.

Deshalb ist auch der Eigenstromverbrauch tatsächlich ein wenig höher. In Prozentwerten sowieso, weil diese billigen, aber schwierigen Einsatzstoffe weniger Biogas - und damit Strom je Tonne - geben. Die gleiche Strommenge (Eigenverbrauch) von weniger Strom (Strom je Tonne Einsatzstoff) ergibt einen höheren Prozentwert. Das ist logisch.

## Doch bei all diesen Berechnungen zählt eines:

Anlagenbetreiber erzielen einen deutlich größeren Gewinn mit der zweistufigen Biogasanlage mit Batch-Hydrolyse, weil die verwendeten Substrate so viel billiger sind. Denn **wenn wir schon über Prozente sprechen:**

Die Einsatzstoffkosten machen ca. 40-60% der jährlichen Betriebsausgaben einer Biogasanlage aus, der Eigenstromverbrauch dagegen nur 5-10%. Der Hebel mit geringeren Einsatzstoffkosten ist also deutlich höher. Und die Konkurrenz um diese faserigen Einsatzstoffe ist sehr gering, weil die gängigen Biogasanlagen diese Stoffe nicht im großen Umfang verarbeiten können.

Neulich meinte ein Kunde, dass seine Landwirtschaftskammer sagt, dass die Hydrolyse nichts bringt.

## Unsere Antwort darauf:

### Wissenschaftliche Bestätigung für die positive Wirkung der Hydrolyse auf die Biogaserträge

Es wird viel geforscht in Sachen Hydrolyse. Warum ist das so? 2009 hat die Uni Hohenheim noch veröffentlicht, dass die Hydrolyse keinen Mehrertrag bringt<sup>1</sup>. Das war eine Diplo-

<sup>1</sup> Oechsner et al. (2009): Kein Mehrertrag durch Hydrolyse. In TOP AGRAR 2009



marbeit mit handwerklichen Fehlern, weil das Hydrolysegas im Gegensatz zur SLP-Praxis komplett ungenutzt blieb. Später hatte die Universität einen Forschungsauftrag, der sich mit Hydrolyse beschäftigte. Im Ergebnis konnte man dank der Hydrolyse plötzlich Unmengen von Pferdemist in der Biogasanlage einsetzen.<sup>2</sup>

Fazit: Wenn man wirklich hinschaut, dann erkennt man, dass die Hydrolyse Vorteile hat, die die einstufige Biogasanlage nicht bieten kann

## Hier einige Forschungsansätze und –Ergebnisse:

Ergebnisse:	<a href="#">Endbericht HydroCon (2016) - PDF 34,1 MB</a>
Thema:	Bestehende Biogasanlagen sollen durch einen externen Container – als eine nachrüstbare Komponente – in die Lage versetzt werden, die Hydrolysestufe des Biogasprozesses effizienter ablaufen zu lassen. Der Substratbedarf reduziert sich, die Gasausbeuten können erhöht werden und die Klimateffizienz verbessert sich. Die Abtrennung dieser Stufe mittels eines Containers betrifft auch die jeweils entstehenden Gase: eine Biogasproduktion mit einem höheren Methananteil wird ermöglicht. Eine Anpassung an bestehende bzw. an Neuanlagen kann durch diesen kompakten und flexibel einsetzbaren Container individuell realisiert werden. Mit einer gesteuerten Zuführung des Hydrolysats in den Hauptfermenter kann die Menge des produzierten Biogases beeinflusst werden. Es ist möglich, dem schwankenden Energiebedarf auf dem Markt stärker zu entsprechen. Das Projekt umfasst Grundlagenuntersuchungen, aber auch Praxisuntersuchungen mit einem Funktionsmuster. Anschließend soll die Pilotlösung umgesetzt werden.

3

Abbildung 1: Entwicklung einer Container-Hydrolyse (2016)

Fazit: Hydrolysen erhöhen den Biogasertrag, reduzieren den Substratbedarf und flexibilisieren die Biogasproduktion.

<sup>2</sup> Meta-Newsletter-Biogas; 23.03.2010

<sup>3</sup> Quelle: [https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/vorhaben/liste-aller-vorhaben/projects/03kb082a\\_hydrocon.html](https://www.energetische-biomassenutzung.de/de/vorhaben/liste-aller-vorhaben/projects/03kb082a_hydrocon.html)



In einem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) geförderten Forschungsprojekt wurden Biogasanlagen mit Hydrolyseeinrichtung analytisch begleitet und hinsichtlich ihrer Optimierungspotenziale untersucht. Wissenschaftler der BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH evaluierten während der Projektlaufzeit drei großtechnische Biogasanlagen, die sich in Bauart und Substrateinsatz unterschieden. Unter Laborbedingungen wurden durch parallele Untersuchungen zur Quantifizierung der Hydrolyseleistungen die für die jeweiligen Hydrolysefermenter optimalen Verfahrensparameter ermittelt. Daraufhin konnten im Rahmen des Projektes praxisrelevante Aussagen zu Vorteilen und zur Dimensionierung von Hydrolysebehältern erarbeitet werden. Im Ergebnis ist eine Erhöhung der Gasausbeute und damit der energetischen Anlageneffizienz mittels der vorgeschalteten Hydrolysestufe möglich. Die optimale mittlere hydraulische Verweilzeit für Hydrolysefermenter liegt dabei zwischen 3 und 5 Tagen. Der Einfluss der Temperatur ist im Bereich zwischen 20 und 30 °C dagegen weniger gravierend. Höhere Methanausbeuten konnten nachweislich auch bei geringen Raumbelastungen erzielt werden.

Weitergehende Informationen stehen in der [Projektdatenbank der FNR](#) unter dem Förderkennzeichen [22006711](#) zur Verfügung.

**Pressekontakt:**  
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

4

Abbildung 2: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (2014)

Fazit: Es werden auch in Praxis-Biogasanlagen mit Hydrolyse höhere Methanausbeuten erzielt.

<sup>4</sup> Quelle: <http://www.fnr.de/index.php?id=911&alles=1&status=Inhalt&fkz=22006711&suche=Stichwort%20eingeben!&suchefkz=22006711&sucheadresse=Namen%20eingeben!&von=01.04.1992&bis=20.08.2014&zeitraum=formular&minz=0&maxz=1&anzahl=10&zurueck=1>



**DonauTV**

## Eröffnung der Hydrolyse Kläranlage in Straubing

Ein mutiges Vorzeigeprojekt, das bayern- und deutschlandweit Modell- und Vorbildcharakter haben wird, wie die Umweltministerin betonte. Pannermayr lobte das Projekt als ökologisch, ökonomisch und nachhaltig: "Das passt wunderbar zu unserer Philosophie der Region der nachwachsenden Rohstoffe!"

Für rund eine Million Euro wurde in den vergangenen Monaten der ehemalige Voreindicker der Kläranlage an der Imhoffstraße zu einem hochmodernen Hydrolyse-Reaktor umgebaut (wir berichteten). Dieser Reaktor ermöglicht es, industrielle Abwässer mit einem hohen Anteil an energiereichen Co-Substraten im Klärwerk anzunehmen und aus dem Abwasser jede Menge Gas, Strom und Wärme zu gewinnen, erklärte SER-Werkleiterin Cristina Pop. Neben der so produzierten Energie können auch die Auslastung der Kläranlage optimiert und so die Abwassergebühren niedrig gehalten werden.

5

Abbildung 3: Pilotprojekt bei der Kläranlage Straubing (2016)

Fazit: Mit der Hydrolyse ist es möglich „mit einem hohen Anteil an energiereichen Co-Substraten“ zu arbeiten.

Diese kleine Auswahl an Forschungsprojekten zur Hydrolyse zeigt die positive Wirkung der Hydrolyse auf den Biogasertrag.

### **Jetzt gibt es keine Vorurteile mehr, sondern nur noch Vorteile:**

Unsere Einschätzung bezüglich Forschung und Pilotprojekten basiert auf unserer mehr als zehnjährigen Praxiserfahrung mit der Hydrolyse: Die in den Forschungsarbeiten betrachteten und für Pilotprojekte konzipierten Biogasanlagen, werden mit kontinuierlichen Hydrolysen mit einem Hydrolysetank betrieben.

Die SLP dagegen baut die Batch-Hydrolyse mit mindestens zwei Hydrolysetanks. Damit stellen wir sicher, dass die Biomasse in der Hydrolysestufe vollständig hydrolysiert wird. Bei

<sup>5</sup> Quelle: <http://www.idowa.de/inhalt.donautv-eroeffnung-der-hydrolyse-klaeranlage-in-straubing.42120299-30d9-41ea-977e-80e4a2c24567.html>



nur einem Hydrolysebehälter gelangt rechnerisch immer die Hälfte des neuen Futters unhydrolysiert in den Fermenter. Unser SLP-Standard ist daher die Hydrolysestufe mit mehr als einem Behälter, die wir seit 10 Jahren mit Erfolg in der Praxis einsetzen.

## Warum wird gerade in den letzten Jahren so viel über die Hydrolyse geforscht?

Es wird u.a. auch deswegen so viel über Hydrolyse geforscht, weil die Biogasausbeuten höher sind und man mit der Hydrolyse auch schwer abbaubare faserige Einsatzstoffe wie Maisstroh und Strohmist vergären kann. Das hat jahrelang niemanden interessiert, da Maissilage als Haupteinsatzstoff in den Biogasanlagen billig war. Heute ist der Einsatz von Maissilage bei den neuen Biogasanlagen aufgrund des öffentlichen Drucks gedeckelt bei 40%.

Außerdem ist die Konkurrenz auf dem Pachtmarkt so groß, dass der Anbau von Silomais für die Biogasanlage unwirtschaftlich wird. Deshalb versuchen nun viele Biogasanlagenbetreiber, einen Teil der Maissilage durch billigere Einsatzstoffe, wie Gras, Pferdemist oder anderes zu ersetzen. Das geht aber nicht so einfach, weil diese Biogasanlagen von der Technik und Biologie her nicht für schwierigere Einsatzstoffe ausgerüstet sind.

Nur mit einer Aufbereitung wie der SLP-Batch-Hydrolyse wäre das ohne Komplikationen möglich. Deshalb das große Forschungsinteresse bei der Hydrolyse für Biogasanlagen.

## Bedarfsgerechte Stromerzeugung

Für Deutschland kommt noch hinzu, dass die Politik nur noch Biogasanlagen akzeptiert, die bedarfsgerecht Strom erzeugen können. Dazu muss die Biogasproduktion schnell hoch und runter gefahren werden können. Am besten und einfachsten ist das mit einer vorgeschalteten Hydrolyse zu realisieren.

Dort werden die Fettsäuren gebildet und gelagert. Wenn dann der flüssige Fettsäure-Cocktail vom Hydrolysebehälter in den Fermenter gepumpt wird, kommt es sofort zu einer schnellen Erhöhung der Biogasproduktion. Sind die Fettsäuren verbraucht und es wird kein Hydrolysat in den Fermenter nachgepumpt, dann geht die Biogasproduktion schnell zurück.

Dieses schnelle Auf und Ab der Biogasproduktion ist das A und O der bedarfsgerechten Stromproduktion. Dafür ist die Hydrolyse die optimale Technologie. Auch deshalb das große Forschungsinteresse bei Hydrolysen für die Biogasanlagen.



Die SLP praktiziert das seit mehr als 10 Jahren und hat die Erfahrung damit!

Wir wissen schon lange, wie und warum Hydrolysen so gut funktionieren, weil wir die Daten unserer Anlagen sammeln und auswerten. Unsere Daten sind nicht im Labor ermittelt. Wir arbeiten nicht mit dem Teelöffel und der Pipette. Wir arbeiten mit der Radladerschaufel und mit großen Pumpen.

## **Einstufig reicht nicht - wissenschaftlich belegt und schwarz auf weiß**

Seit mehr als 10 Jahren erfassen wir die Daten der Batch-Hydrolyse-Biogasanlagen. Das machen wir monatlich und verfügen deshalb über große Datenbestände. Die Auswertung dieser Daten zeigt, dass wir von faserigen Substraten mehr als 20% und in vielen Fällen mehr als 30% Biogas bekommen im Vergleich zu den KTBL Werten.

Dem Argument, die KTBL Daten seien eh zu niedrig angesetzt, halten wir entgegen, dass wir immer wieder auch die Leistungsfähigkeit laufender einstufiger Biogasanlagen auswerten und feststellen, dass diese nicht mal die KTBL-Werte erreichen. Siehe dazu die Studie von Fraunhofer Umsicht und bioreact: Bei 1.800 Biogasanlagen liegt der Durchschnitt unter KTBL!<sup>6</sup>

Die Ergebnisse der umfangreichsten und detailliertesten Auswertung von mehr als 1.800 Praxis-Biogasanlagen zeigen, dass die Mehrheit der Biogasanlagen nicht einmal die KTBL-Werte erreicht. Das steht im Gegensatz zu „Experten“-Aussagen, dass eine Hydrolyse nichts bringt.

---

<sup>6</sup> [https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/user\\_upload/Aktuelles/Presseinformationen/03KB071\\_Abschlussbericht\\_Repowering.pdf](https://www.energetische-biomassennutzung.de/fileadmin/user_upload/Aktuelles/Presseinformationen/03KB071_Abschlussbericht_Repowering.pdf)

Anlagendaten	
Anlagenzahl (Kontrollgruppe)	1809
Fermentervolumen (m <sup>3</sup> )	1732
Nachgärervolumen (m <sup>3</sup> )	1828
Endlagervolumen (m <sup>3</sup> )	2740
kg oTS / m <sup>3</sup> / d (Fermenter)	4,50
Verweilzeit Fermenter	62,3
Gesamtverweilzeit	117
installierte elektrische Leistung (kW)	430
Auslastung BHKW (%)	90,2
Volllaststunden pro Jahr	7901
angegebener elektrischer Wirkungsgrad	38,37
Substratausnutzung (Erreicht / KTBL * 100)	97,85

Abbildung 4: Auswertung von 1.809 einstufigen Biogasanlagen

Fazit: Die SLP-Batch-Hydrolyse produziert mehr Biogas aus der gleichen Menge an Einsatzstoffen.

Oder anders rum: Sie benötigt weniger Einsatzstoffe für dieselbe Strommenge.

Der finanzielle Multiplikator-Effekt: Jede zusätzliche Tonne Einsatzstoffe wird immer teurer. Sie sparen also immer die teuerste Tonne Einsatzstoffe ein. Das ist ein doppelter Gewinn.

## Zur Erinnerung:

### **Versauerung ist nicht gleich Versauerung – warum wir im Batch-Hydrolysebehälter gezielt versauern – ein Grund für die höheren Biogaserträge**

Früher hatten Biogasanlagenbetreiber Angst vor der Versauerung (Acidose) im Fermenter. Dieser Zustand tritt ein, wenn schnell abbaubare Stoffe, wie Zuckerrüben, Glycerin oder -

<sup>7</sup> Quelle: Fraunhofer UMSICHT et al. (2015): Abschlussbericht Repowering von Biogasanlagen – Maßnahmen zur Effizienzsteigerung für den vorhandenen Anlagenbestand [online] [https://www.energetischebiomassenutzung.de/fileadmin/user\\_upload/Aktuelles/Presseinformationen/03KB071\\_Abschlussbericht\\_Repowering.pdf](https://www.energetischebiomassenutzung.de/fileadmin/user_upload/Aktuelles/Presseinformationen/03KB071_Abschlussbericht_Repowering.pdf) [18.10.2016]

im Abfallbereich - Fette eingesetzt werden. Die Produktion von Fettsäuren passiert schneller als der Abbau der Fettsäuren zu Biogas. Es reichern sich in der Folge Fettsäuren an, der pH-Wert sinkt und die Biogasproduktion geht zurück.

**Ganz anders im Hydrolysebehälter!** Im Hydrolysebehälter ist die Versauerung erwünscht. Bei niedrigerem pH-Wert arbeiten die Hydrolyseenzyme<sup>8</sup>, die von den Bakterien selbst produziert werden, am besten. Dadurch werden auch schwer abbaubare Stoffe verdaut und zu Fettsäuren umgesetzt. Wenn dann auch noch die Temperatur im Hydrolysebehälter erhöht wird, läuft dieser Prozess noch schneller ab.

In der Natur machen Wiederkäuer wie die Kuh das genauso. Der Pansen ist ein Teil des Verdauungssystems. Dort kann die Kuh das Futter aufschließen. Deshalb kann sie Gras verdauen und ein Schwein nicht.

Eine Versauerung im Fermenter ist vergleichbar mit der Versauerung beim Menschen, wenn er zu schnell, zu viel leicht verdaubares Essen ist. Dann wird dem Menschen unwohl. Das ist nicht erwünscht.

Eine Versauerung im Hydrolysebehälter ist wie die Versauerung im Pansen der Kuh. Sie schließt Zellulose auf. Das ist erwünscht.

## Hydrolyse ist nicht gleich Hydrolyse – Vorteile der Batch-Hydrolyse

Es werden Hydrolysetechnologien mit nur einem Behälter angeboten. Dabei handelt sich mehr um eine Anmischgrube als um eine echte Hydrolyse. Bei nur einem Behälter wird der Behälter befüllt und dann sofort wieder in den Fermenter weiter gefüttert. Viel unversauertes Material kommt dann gleich in den Fermenter. Das ist mehr oder weniger einstufig.

Nur mit zwei Hydrolysebehältern im Batch-Betrieb ist wirklich eine kontrollierte Hydrolyse und Versauerung möglich. Deshalb bauen wir 2 Hydrolysebehälter und betreiben sie im Batch-Betrieb. Nur dadurch kann man die Vorteile der Hydrolyse voll nutzen und hat dadurch den höchstmöglichen ökonomischen Effekt.

---

<sup>8</sup> Bakterien produzieren Enzyme, die sie ausscheiden und die dann die Kohlenstoffketten zerkleinern. Es gibt auch industriell produzierte Enzyme, die den denselben Effekt haben. Sie werden bei hohen Faseranteilen, wenn die Enzymproduktion der Bakterien nicht ausreicht, der Hydrolyse zugegeben.

Man soll nicht schlecht über andere reden, sagten schon unsere Mütter. Aber es lässt sich einfach nicht vermeiden auch die Nachteile der einstufigen Biogasanlagen aufzuzeigen, wenn immer wieder über die vermeintlichen Nachteile der Hydrolyse gesprochen wird.

## Die Nachteile einer einstufigen Biogasanlage im Schnelldurchgang:

- Unflexibel bei der Biologie; schwieriger Futterwechsel,
- Überfütterungsrisiko bei hohen Anteilen von leicht abbaubaren Stoffen wie Zuckerrüben.
- Kann Stroh und Fasern nur schlecht und im geringen Umfang verarbeiten
- Unflexible Biogasproduktion – es werden sehr große Biogasspeicher benötigt für die Regelenergieproduktion
- Volllaststundenzahl im Durchschnitt niedriger
- Das Wichtigste: Die Biogaserträge sind niedriger! Und es werden mehr Einsatzstoffe benötigt.

Für Maisilage und Gülle kann eine einstufige Biogasanlage ausreichend sein. Wenn Sie aber andere Einsatzstoffe haben, dann sollten Sie auf eine Batch-Hydrolyse setzen.

## Zum Schluss

Es gibt immer wieder neue Aussagen gegen Hydrolysen in Biogasanlagen. Wenn Sie eine neue hören, dann sagen Sie uns das bitte. Wir nehmen gerne dazu Stellung. Bisher haben wir die Argumente immer stichhaltig entkräften können – insbesondere mit den positiven Ergebnissen auf SLP-Praxis-Biogasanlagen.



# Warum eine Batch-Hydrolyse mehr Flexibilität bringt als ein zusätzlicher Fermenter

## Eine Stellungnahme:

**Berater und Verkäufer** empfehlen oft das Fermentervolumen zu erhöhen, um Probleme mit der Biologie und der Biogasausbeute zu lösen. In einigen Fällen kann das sinnvoll sein.

## In folgenden Fällen macht eine Batch-Hydrolyse mehr Sinn:

- Bei der Umstellung auf die Produktion von bedarfsgerechtem Strom (Regelenergie)
- Bei wärmegeführten BHKWs und Biogasanlagen
- Bei der Einführung und Umstellung auf faserige Einsatzstoffe
- Bei der Nutzung von Zuckerrüben
- Bei wechselnden Einsatzstoffen

## Warum hat die Batch-Hydrolyse bei der bedarfsgerechten Stromproduktion Vorteile?

Bei der bedarfsgerechten Stromversorgung fährt das BHKW zu unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlichen Leistungen. Der Biogasverbrauch variiert. Eine einstufige Biogasanlage kann darauf kaum reagieren.

Daher muss viel Biogas vorgehalten werden, um die Spitzen abzudecken. Große Gasspeicher sind erforderlich. Daher läuft die Fackel länger und Biogas wird umsonst produziert. Die biologische Reaktionszeit ist bei einstufigen Biogasanlagen sehr lange. Da hilft auch ein größeres Fermentervolumen nichts.

## Im Gegenteil: Die Biologie wird noch träger.

## Anders bei der Batch-Hydrolyse:

Wenn das Fettsäure-Gemisch aus der Hydrolyse in den Fermenter gepumpt wird, entsteht daraus sehr schnell Biogas – innerhalb von 30 bis 60 Minuten. Spitzen können dadurch gut abgedeckt werden. Und das Fettsäure-Gemisch ist schnell verbraucht. Wenn weniger Biogas gebraucht wird, wird weniger gefüttert. Die biologische Reaktionszeit ist sehr schnell.

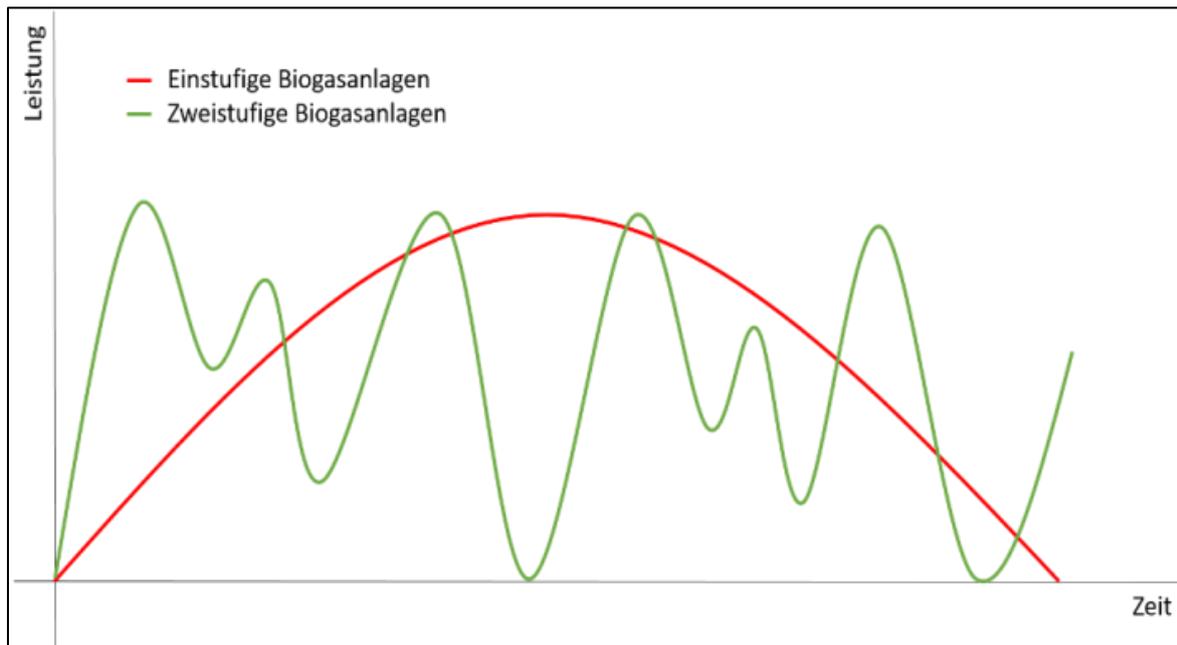


Abbildung 1: Qualitativer Vergleich der Biogasproduktion bei ein- und zweistufiger Biologie

Abbildung 1 zeigt, dass die Biogasproduktion bei einstufiger Biologie in langen Zyklen läuft, während bei der zweistufigen Biologie die Zyklen sehr kurz sind. Damit können Lastkurven bei der bedarfsgerechten Stromproduktion nachgefahren werden.

Mehr Flexibilität bei der Biogas- und Stromproduktion mit einer SLP Batch-Hydrolyse!

## Warum hat die Batch-Hydrolyse bei der Vergärung von faserigen Einsatzstoffen Vorteile?

Die Batch-Hydrolyse hat andere physikalische und chemische Bedingungen als der Fermenter. Die Temperaturen sind höher. Die Raumbelastung ist höher. Der pH-Wert ist

**Warum eine Batch-Hydrolyse mehr Flexibilität bringt als ein zusätzlicher Fermenter**

niedriger. Das führt zu einem besseren Aufschluss von Zellulose und Hemizellulose. Die Folge ist ein höherer Biogasertrag und weniger Schwimmschichten im Fermenter.

Im Fermenter mit einem pH-Wert von 7,6 – 8 liegen Umweltbedingungen vor, die den Abbau der Zellulose erschweren. Würde aber der pH-Wert sinken, würden die methanogenen Organismen beeinträchtigt.

Im Folgenden zeigt die Abbildung 2 die Unterschiede von einstufiger und zweistufiger Biologie.

	Einstufige Biologie	Batch-Hydrolyse
Temperatur	37 – 43°C	Über 50 °C bis 60 °C
pH-Wert	7,6 – 8,0	6,6 – 7,2
Raumbelastung	3 – 4 kg oTS/m <sup>3</sup>	30 – 40 kg oTS/m <sup>3</sup>
Zelluloseabbau	Niedrig	Hoch

Abbildung 2: Vergleich von ein- und zweistufiger Biologie

Mehr Flexibilität bei der Menge der faserigen Einsatzstoffe mit der SLP Batch-Hydrolyse!

**Warum hat die Batch-Hydrolyse bei der Vergärung von Zuckerrüben Vorteile?**

Zuckerrüben enthalten schnell abbaubare Kohlenhydrate. Das kann schnell zu einer Übersäuerung (niedriger pH) im Fermenter führen, wenn zu viele Zuckerrüben gefüttert werden. Es darf also nur ein begrenzter Anteil an Zuckerrüben in der Futtermischung sein.

In der Batch-Hydrolyse können hohe Anteile von Zuckerrüben verfüttert werden. Die entstehende Versauerung ist erwünscht. Wir haben in der Praxis festgestellt, dass bei steigendem Zuckerrübenanteil der Abbau der faserigen Stoffe, wie Stroh, gefördert wird. Es steigt insgesamt die Biogasausbeute auch bei den anderen Einsatzstoffen. Zuckerrüben in der Ration sind also ein Hebel für eine hohe Biogasausbeute.

Mehr Flexibilität bei der Menge der hochenergetischen Einsatzstoffe mit der SLP Batch-Hydrolyse!



## Warum hat die Batch-Hydrolyse bei wechselnden Einsatzstoffen Vorteile?

Jeder kennt das: Wenn in einer Biogasanlage Einsatzstoffe gewechselt werden müssen, dann dauert das Wochen. Die Biologie im Fermenter braucht Zeit um sich umzustellen.

Ganz anders bei der Batch-Hydrolyse: Innerhalb einer Woche ist ein kompletter Futterwechsel möglich ohne die Biogasproduktion zu beeinträchtigen. Der Grund liegt in der räumlichen Trennung von Hydrolyse und Versauerung im Hydrolysebehälter und der Methanisierung im Fermenter. Die empfindlichen Methaner werden nicht gestört.

Eine Batch-Hydrolyse bietet also höchste Flexibilität bei den Einsatzstoffen.

Mehr Flexibilität beim Wechsel der Einsatzstoffe mit der SLP Batch Hydrolyse!

Die folgenden Abbildungen zeigen die hohe Flexibilität bei der Biogasproduktion in SLP Biogasanlagen. Die Biologie reagiert sehr schnell auf die Bedarfsänderungen von Biogas durch das BHKW.

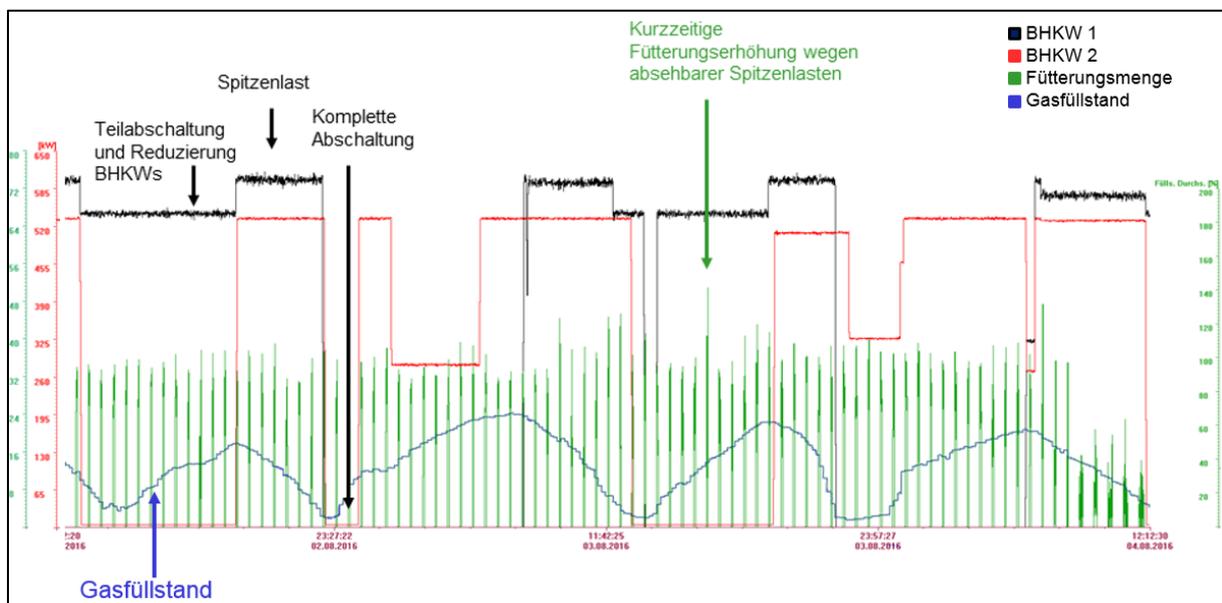


Abbildung 3: Regelenenergie auf der Biogasanlage Nebauer - Bedarfsgerechte Stromproduktion

Die Biogasanlage Nebauer fährt im Regelbetrieb mit 2 BHKWs mit jeweils 500 kW elektrisch. Die Biogasproduktion wird flexibel der dem Gasverbrauch der BHKWs angepasst. Innerhalb weniger Stunden können große Biogasmengen erzeugt werden. Bei der

## Warum eine Batch-Hydrolyse mehr Flexibilität bringt als ein zusätzlicher Fermenter

Fütterung von Hydrolysat auf der Hydrolyse in den Fermenter wird die Menge variiert in Abhängigkeit des Füllstandes im Gasspeicher.

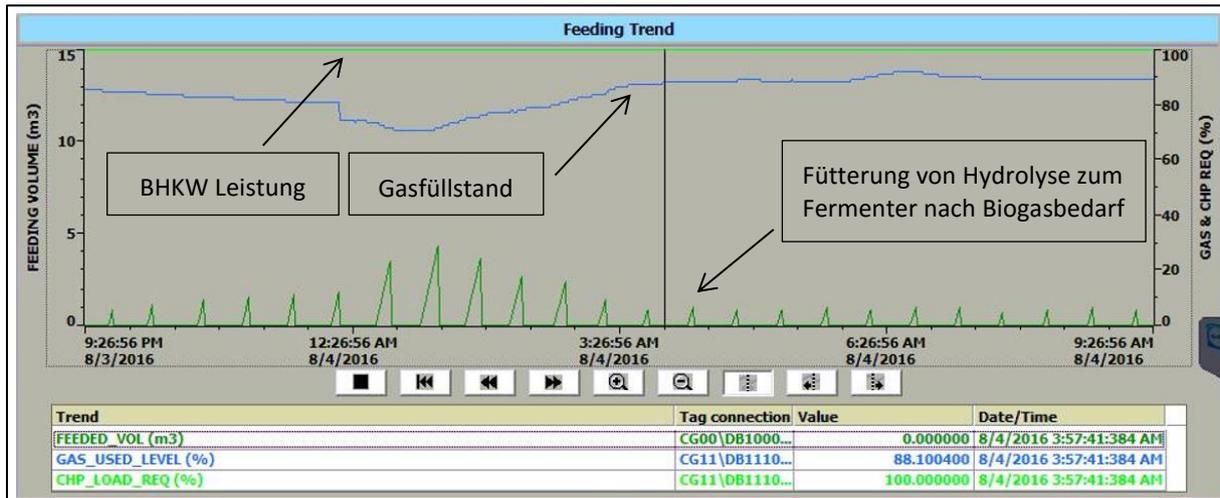


Abbildung 4: Fütterungsautomatik auf der Biogasanlage Laburnum House Boston, England

- Sofortige Reaktion des Systems um einen Gas-Engpass zu vermeiden

Abbildung 4 zeigt, dass die Fütterung sofort auf den fallenden Gasfüllstand reagiert. Innerhalb einer Stunde ist die Tendenz von einem fallenden Gasfüllstand zu einem steigenden Gasfüllstand umgekehrt. Danach wird die Fütterung von Hydrolysat wieder zurück gefahren.

# pH-Wert in der Batch-Hydrolyse von SLP-Biogasanlagen

## Eine ewige Diskussion!

### Eine Antwort aus der Praxis:

**Gerade neulich** erzählte einer unserer Kunden, ein Professor habe bei einem Vortrag gesagt, dass eine Hydrolyse bei Biogasanlagen nicht funktioniere. Es sei nicht möglich, den pH-Wert konstant niedrig zu halten. Das ist wieder einmal ein schönes Beispiel dafür, dass auch Professoren falsch liegen können. Immer wieder werden wir mit „veralteten“ oder allgemeinen Aussagen zur Hydrolyse konfrontiert. Seit mehr als 10 Jahren.

Die weit verbreitete Auffassung von einer Hydrolyse ist, dass sie mit Temperaturen um die 25 °C betrieben wird. Der pH-Wert sollte niedrig sein, so um pH 5. „Dann ist es eine richtige Hydrolyse.“ **Das ist schlicht Unsinn.**

Laut Wikipedia ist „Die Hydrolyse (altgr. ὕδωρ hydor „Wasser“ und λύσις lysis „Lösung, Auflösung, Beendigung“) die Spaltung einer (bio)chemischen Verbindung durch Reaktion mit Wasser. Dabei wird (formal) ein Wasserstoffatom an das eine „Spaltstück“ abgegeben, der verbleibende Hydroxyrest an das andere Spaltstück gebunden.“

Die Hydrolyse ist also die Spaltung einer bio-chemischen Verbindung. Über das „Wie“ ist damit zunächst noch nichts gesagt. Über Temperatur und pH-Wert wird erstmal keine Aussage getroffen. Die Hydrolyse ist laut Definition erfolgreich, wenn die biochemische Verbindung gelöst ist.

## Warum wird behauptet, die Temperatur müsse bei 25 °C liegen?

Das kommt aus der Vergangenheit. Heute reden wir über landwirtschaftliche Biogasanlagen. Früher gab es fast nur industrielle Biogasanlagen mit Hydrolyse. Dort wurden organisch hoch belastete Abwässer (Brauerei, Fruchtsaftherstellung, Schlachthöfe) mit hohen Abwassermengen biologisch behandelt.

Die organischen Bestandteile waren gelöst. Die Mengen waren groß, mehrere hundert Kubikmeter pro Tag. Deshalb war eine kurze Verweildauer in der Hydrolyse erforderlich. Sonst hätte man riesige Behälter bauen müssen. Daher wurde mit den Temperaturen gearbeitet, die aus dem Produktionsprozess verfügbar waren. Die Hydrolysen wurden nicht geheizt. Es war praktisch und billig. Und – es wurde nur Flüssigabfälle eingesetzt!

## Warum betreiben wir die Hydrolyse mit 50 °C und höher?

Wir betreiben die Batch-Hydrolyse mit möglichst hohen Temperaturen. Wir wollen Fasern aus Stroh und Mist abbauen. Diese Einsatzstoffe haben komplexe Strukturen mit Zellulose, Hemizellulose und Lignozellulose.

Am Prozess der Hydrolyse von Zellulose sind auch Enzyme beteiligt, sogenannte Zellulasen (Enzyme für den Abbau von Zellulose). Diese entfalten ihre beste Wirkung bei Temperaturen zwischen 50-60 °C und einem pH über 6,5. Wir heizen in der Batchhydrolyse das Hydrolysat auf, damit die Zellulose abbauenden Enzyme am effektivsten wirken.

Zellulose ist die billigste und häufigste Biomasse auf der Erde. Die hohen Temperaturen helfen uns die Zellulose aufzuschließen, damit die Bruchstücke dann zu Fettsäuren und später zu Biogas umgebaut werden können.

Ziel ist es, in der Batch-Hydrolyse die billigen Fasern aus Stroh aufzuschließen und für die Biogasproduktion verfügbar zu machen. Deshalb optimieren wir die Bedingungen für den Aufschluss von Zellulose.

Stärke, wie hauptsächlich in der Maissilage vorhanden, ist einfach abzubauen und wird sowieso, quasi nebenbei, aufgeschlossen. Dafür sind keine besonderen Umgebungsbedingungen nötig.

Exkurs: Ein **Enzym** ist ein Stoff, der aus biologischen Riesenmolekülen besteht und als Katalysator eine chemische Reaktion beschleunigen kann. Fast alle Enzyme sind Proteine. Ihre Bildung erfolgt in der Zelle (Bakterie). Enzyme haben wichtige Funktionen im Stoffwechsel von Organismen: Sie steuern den überwiegenden Teil biochemischer Reaktionen. (Quelle: Wikipedia; verkürzt)



Was sogenannte „Experten“ über die Hydrolyse in Biogasanlagen sagen  
– und wie es wirklich ist!

**Ein Hinweis:** Wir betreiben genau aus diesem Grund die Hydrolyse im Batch (Rein/Raus) und nicht kontinuierlich. Nur so bekommen wir die Verweildauer zum Aufheizen und für den bio-chemischen Aufschluss.

**Der zu Anfang zitierte Professor hat bei dem Vortrag behauptet, der pH-Wert könne bei den Hydrolysen nicht unten gehalten werden.**

**Daher funktioniere die Hydrolyse nicht. Ist das so?**

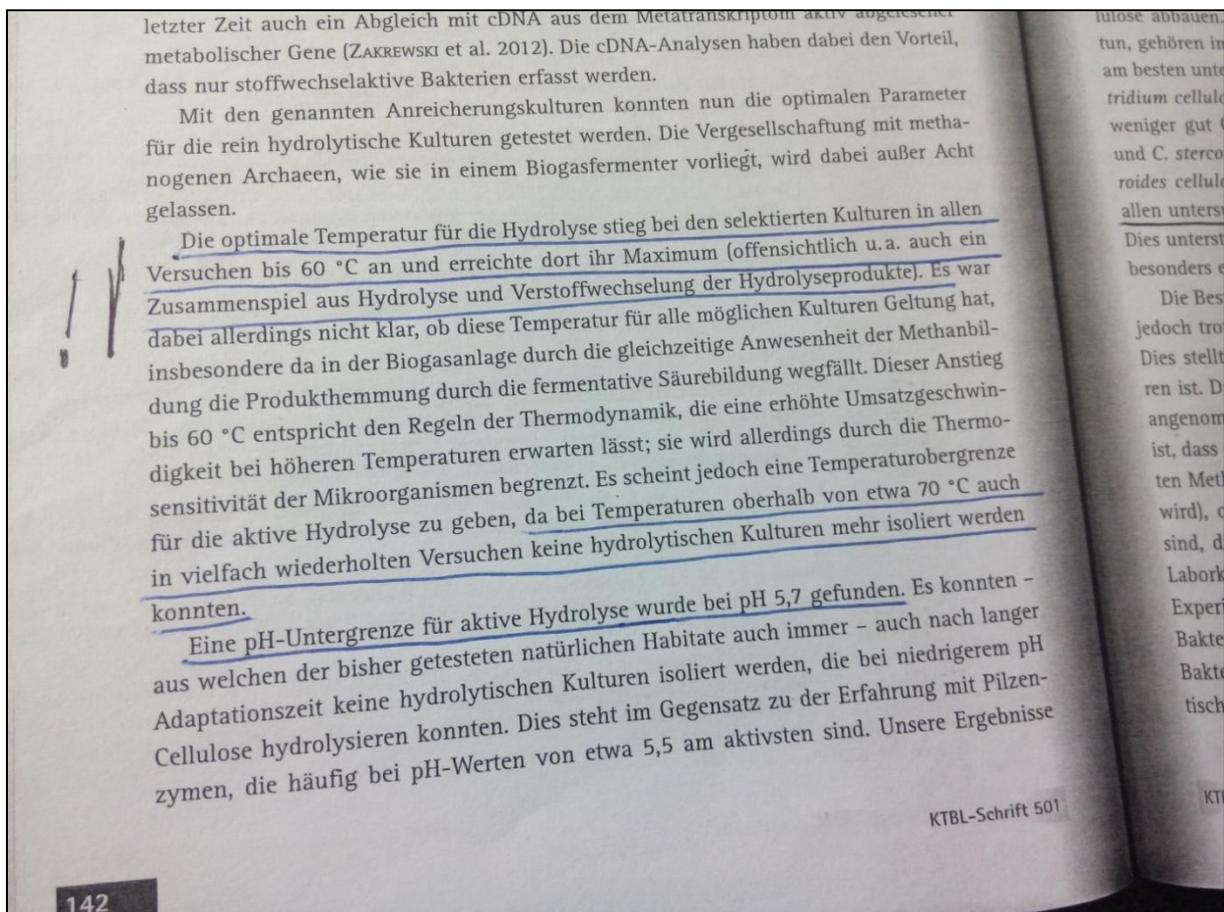
Das Ziel der Hydrolyse ist bei uns, die Fasern (Zellulose, Hemizellulose, Lignozellulose) aufzuschließen. Es geht nicht um eine akademische Diskussion. Es gibt keinen „richtigen“ pH-Wert in der Hydrolyse. Der richtige pH-Wert ist der pH, der die Fasern effektiv aufschließt. Dadurch soll so viel Biogas wie möglich kostengünstig aus Stroh zu produziert werden.

Die Wissenschaft hat festgestellt, dass bei unterschiedlichen pH-Werten Enzyme unterschiedlich aktiv sind und die organische Substanz abbauen.

Die Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) hat bei Biogasertragsversuchen ermittelt, dass der optimale pH-Wert für den Abbau von Gras (Fasern) über 6,5 liegt. Hier ein Auszug aus den Forschungsergebnissen:

## Was sogenannte „Experten“ über die Hydrolyse in Biogasanlagen sagen

– und wie es wirklich ist!



Es ist sogar so, dass bei zu tiefem pH die Zellulose nicht mehr hydrolysiert wurde. Das bestätigt unsere praktischen Erfahrungen auf Biogasanlagen. Ist der pH zu tief, dann nimmt die Biogasproduktion je Tonne Trockensubstanz ab.

Bei unseren Batch-Hydrolysen sehen wir pH-Werte von 5,0 bis 7,3. Wenn man genau hinschaut, hängt es immer von der Zusammensetzung der Futtermischung ab. Sind Zuckerrüben in der Ration, dann ist der pH tiefer. Ist viel Mist in der Ration, dann ist der pH höher.

Wir erzielen sehr gute Methanausbeuten je Tonne oTS bei einem pH über 6,5.

**Also:** Wir wollen keinen festgelegten pH-Wert. Wir streben den pH-Wert an, der die höchste Biogasausbeute aus billiger Zellulose ermöglicht. Die Stärke wird sowieso abgebaut.



## Fazit

Mit einer Temperatur über 50 °C und pH-Werten von über 6,5 erzielen wir den besten Abbau von Zellulose. Das ist unsere Praxiserfahrung, die von den Forschungsergebnissen der LfL bestätigt wird. **Hier die Zusammenfassung der LfL:**

### Zusammenfassung

Die Hydrolyse der Biomasse ist in Biogasanlagen der erste Schritt für den Abbau zu Biogas und deshalb entscheidend für die Effizienz des Gesamtprozesses. Nebenprodukte des Stoffwechsels der hydrolytischen Bakterien sind kurzkettige Fettsäuren und Alkohole, sowie Hydrolysegas (CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>), die zusammen mit dem Hydrolysegas durch Archaeobakterien zu Methan umgewandelt werden. Über die Gemeinschaft der hydrolytischen Bakterien und die besten Bedingungen für ihre Aktivität ist bisher wenig bekannt.

Auf Silage aus Ganzpflanzen-Mais und Gras aus Dauergrünlandanbau wurden bei 37 und 55 °C Bakterien-Mischkulturen angereichert und auf optimales Wachstum und gute Hydrolyse gescreent. Es wurden die Bedingungen ausgetestet, die für eine Hydrolyse am besten geeignet sind. Bei 55 °C wurden durchwegs bessere Ergebnisse erzielt als bei 37 °C. Der pH-Bereich über 6,5 ist für die Hydrolyse von Cellulose geeignet. Für die Analyse der Abbaueffizienz wurden Batch-Kulturen angesetzt. Das Retentat wurde nach Abtrennung und Waschen mit einem feinen Nylonsieb getrocknet und gewogen.

Die Zusammensetzung eines optimal hydrolysierenden Bakterien-Konsortiums wurde mit molekularbiologischen Methoden bestimmt. Die Zahl der Klone wurde durch einen Vergleich der Restriktionsmuster (RFLP) eingeschränkt und durch Sequenzierung taxonomischer Einheiten (OTUs) zugeordnet. Um cellulolytische Vertreter in der Bakteriengemeinschaft zu identifizieren, wurden Reinkulturen auf Cellulose-Hydrolyse gescreent. 70 % der cellulolytischen Isolate waren verwandt zu *Clostridium thermocellum*. Um die Beschränkung auf kultivierbare Bakterien zu umgehen, wurden Cellulose-bindende Proteine isoliert und durch MALDI-TOF-TOF und Peptid-Sequenzierung *C. thermocellum* und *Clostridium stercorarium* zugeordnet. Damit wurden diese beiden Bakterien als die hauptverantwortlichen Bakterien für die Hydrolyse in thermophilen Biogasanlagen identifiziert.

**Also** – was auch immer die Experten behaupten, was falsch oder richtig sei bei der Hydrolyse: Es kommt einzig und allein darauf an, wie viel Biogas aus strohhaltiger Biomasse entsteht.

**Worauf denn sonst?**



# Warum reicht ein Fermenter bei der SLP Hochleistungsbiogasanlage aus oder warum arbeitet die Gär-Biologie bei den SLP Biogasanlage so effizient?

Herkömmliche, biologisch einstufige Biogasanlagen haben mindestens einen Fermenter, einen Nachgärer und ein Endlager. Die SLP Hochleistungstechnologie kommt mit einem Fermenter und einem Endlager aus. Warum?

Im Folgenden wird dargestellt, wie durch den Einsatz einer Hydrolyse- und Versauerungseinheit der

biologische Prozess beschleunigt und verbessert wird und warum dadurch die Funktion des Nachgärers entfällt.

Die tabellarische Übersicht 1 zeigt die Unterschiede zwischen dem herkömmlichen einstufigen System und dem SLP Batchsystem:

	<b>Einstufiges Biogassystem</b>	<b>SLP Batch Hochleistungs-Biogasanlage</b>
Biologisches Grundprinzip	 <p>Schweine als Monogastrier (Ein-Magen-System) brauchen hochenergetisches Futter wie Körnermais und Getreide; faserreiches Futter wie Silomais oder Grassilage ist ungeeignet für hohe Zunahmen.</p> <p>Eine einstufige Biogasanlage ist aufgebaut wie die Verdauung eines Schweins.</p>	 <p>Kühe haben ein mehrgliedriges Verdauungssystem mit unterschiedlichen Aufgaben und pH-Werten. Kühe können Gras und Maissilage verwerten.</p> <p>Die SLP Batch Hochleistungs-Biogasanlage ist aufgebaut wie der Verdauungstrakt einer Kuh.</p>
Prozessbiologie	Vermischung der biologische Prozesse von Hydrolyse, Versauerung, Acetatbildung und Methanbildung in einem Behälter	Trennung der biologischen Prozesse in 1) Hydrolyse und Versauerung (im Hydrolysebehälter) 2) Acetatbildung und Methanbildung (im Fermenter)
Technische Ausstattung	Fermenter Nachgärer Endlager	Hydrolyse & Versauerung Fermenter Endlager
Verweildauer im Gärsystem	Fermenter – 20-50 Tage Nachgärer – 20-50 Tage	Hydrolyse & Versauerung – 4 Tage Fermenter 8- 20 Tage
Biologische Kennzahlen	pH Werte Fermenter 7,0 – 8,2 Nachgärer 7,5 – 8,2  Raumbelastung <sup>1</sup> Fermenter 1,5 – 3,5 kg oTS/m <sup>3</sup> d	pH Werte Hydrolyse & Versauerung 3,7 – 6,5 (in Abhängigkeit von den Einsatzstoffen) Fermenter 7,8 – 8,2  Raumbelastung Hydrolyse & Versauerung > 30 kg Fermenter > 6 kg

Übersicht 1: Vergleich von einstufigen Biogassystemen mit der SLP Batch Hochleistungs-Biogasanlage

<sup>1</sup> Raumbelastung: Die Raumbelastung gibt an mit wie viel organischer Substanz, aus der Biogas gebildet werden kann, das System beschickt wird. Es wird definiert mit kg organischer Trockensubstanz (oTS) pro Kubikmeter Fermentervolumen am Tag. Das ergibt die Bezeichnung kg oTS/m<sup>3</sup> d.

Die Vermischung aller biologischen Prozesse in einem Behälter verursacht, dass sich die verschiedenen Bakterienstämme nicht optimal entwickeln können. Die folgende Übersicht 2 zeigt die optimalen Lebensraumsprüche der zwei Hauptgruppen von

### Die Ergebnisse aus 7 Jahren SLP Batch Hochleistungs-Biogasanlagenbetrieb

Nachfolgend werden Praxiserfahrungen und Praxisergebnisse beschrieben. Bis jetzt gibt es keine

	Hydrolyse- und Versauerungsbakterien	Methanbakterien
Reproduktionszeit	3 Stunden bis 3 Tage	6- 14 Tage
Temperaturoptimum	30 bis 65 °C variabel	37 °C oder 55 °C absolut konstant!
pH-Wert	runter bis 4,5 maximal 7,8	ca. 7-8
Vitalität	Robust, vertragen Störungen bei Temperatur und pH-Wert	Sehr empfindlich gegenüber jeder Art von Störung im pH-Wert und Temperaturschwankungen
Aerobe Sensibilität	Arbeiten auch bei Eintrag von Sauerstoff, wie beim Beschicken der Hydrolysebehälter	Sterben bei Sauerstoffeintrag sofort ab.
Biogasausbeute	Gering Methangehalt bis 0-30 %	Hoch Methangehalt >50%

Übersicht 2: Vergleich Lebensraumsprüchen von Hydrolyse- und Versauerungsbakterien, sowie Methanbakterien

Bakterien, die am Biogasbildungsprozess beteiligt sind. Der tabellarische Vergleich zeigt, dass Hydrolyse- und Versauerungsbakterien einerseits und Methan bildende Bakterien andererseits völlig unterschiedliche Lebensraumsprüche haben. Bei der Vermischung in einem Behälter wird man keinem der Bakterienstämme vollständig gerecht. Die empfindlichsten Bakterien sind die Methanbildner; deshalb muss sich im einstufigen System die Prozessführung nach deren Ansprüchen richten. Dabei können sich aber die Hydrolysebakterien nicht vollständig entfalten. Deshalb heißt es in der wissenschaftlichen Literatur immer wieder dass die Hydrolyse der „begrenzende Faktor“ in der Biogasproduktion ist. Das stimmt aber nur dann, wenn die Hydrolyse, Versauerung und Vergärung in nur einem Behälter abläuft. Denn die Ansprüche der Methanbakterien schränken die Hydrolysebakterienentwicklung zu stark ein. Aus diesen Gründen werden bei der SLP Batch-Hochleistungs-Biogasanlage die beiden biologischen Prozesse räumlich in unterschiedlichen Behältern und zeitlich – nacheinander – getrennt. Damit kann die Hydrolyse und Versauerung schneller und besser ablaufen; die Methanisierung kann ungehindert von den Hydrolysebakterien sehr schnell ablaufen, denn dort wo es keine aktiven Hydrolysebakterien gibt, gibt es mehr Methanbakterien, weil ihnen keiner den Platz bzw. den Lebensraum streitig macht. wissenschaftlichen Studien zu den Ergebnissen einer Batch-Hydrolyse nach dem SLP-System.

### Raumbelastung im Fermenter

Die Raumbelastung gibt an mit wie viel organischer Substanz das biologische System gefüttert wird. In der Praxis der einstufigen Biogasanlage wird mit einer Raumbelastung von 1,5 bis 3,5 kg oTS/m<sup>3</sup>d gerechnet. Im Rahmen des Trockenfermentationsbonus des EEG von 2004 wird mindestens eine Raumbelastung von 3,5 kg gefordert, um einen technologischen Fortschritt zu dokumentieren.<sup>2</sup> Die Raumbelastung bei der SLP Hochleistungsbiogasanlage liegt über 6 kg oTS.

Die Raumbelastung errechnet sich in der Praxis aus der Einsatzstoffmenge in to x TS-Gehalt x oTS-Gehalt. Damit ist die oTS-Menge in to oder kg bestimmt. Die oTS-Menge wird durch das Fermentervolumen geteilt und ergibt dadurch die Raumbelastung.

### Praxisbeispiel vom Oktober 2007<sup>3</sup>

Die Einsatzstoffmenge aus der Mischung von Entenmist, Grassilage, Maissilage und Roggen-GPS<sup>4</sup> beläuft sich auf 903 to. Aus den jeweiligen TS- und oTS-Gehalten, die durch Futtermittelanalysen bestimmt wurden, errechnet sich eine oTS-Menge von 252 to und eine oTS-Menge pro

<sup>2</sup> Auslegungshilfe: Trockenfermentation für kontinuierliche Verfahren; Bundesministerium für Umwelt (BMU) 4/2007

<sup>3</sup> Biogasanlage Nebauer: Betriebstagebuch, Futtermittelanalysen für die Einsatzstoffe; alle Einsatzstoffe werden zweimal verwogen über die Fräse am Fahrsilo und ein zweites Mal im Mischer bei der Beschickung der Hydrolysen

<sup>4</sup> GPS – Ganzpflanzensilage

Tag von 8.142 kg. Bei einem Netto-Gärvolumen<sup>5</sup> von 1.100 m<sup>3</sup> errechnet sich eine Raumbelastung von 7,4 kg oTS/m<sup>3</sup>d.

Warum kann die SLP Batch Hochleistungsbiogasanlage mit einer so hohen Raumbelastung betrieben werden? Die Methanbakterien können ungestört von den Hydrolysebakterien die in der Hydrolyse gebildeten Fettsäuren abbauen.

Es wird dreimal pro Stunde automatisch von der Hydrolyse in den Fermenter gefüttert. Damit wird eine Überfütterung vermieden, aber auch einem Verhungern vorgebeugt.

#### Kann die Biologie über einen längeren Zeitraum mit einer so hohen Raumbelastung stabil betrieben werden?

Auf der Biogasanlage Nebauer, Simbach werden regelmäßig die Fettsäurewerte bestimmt. Auf der

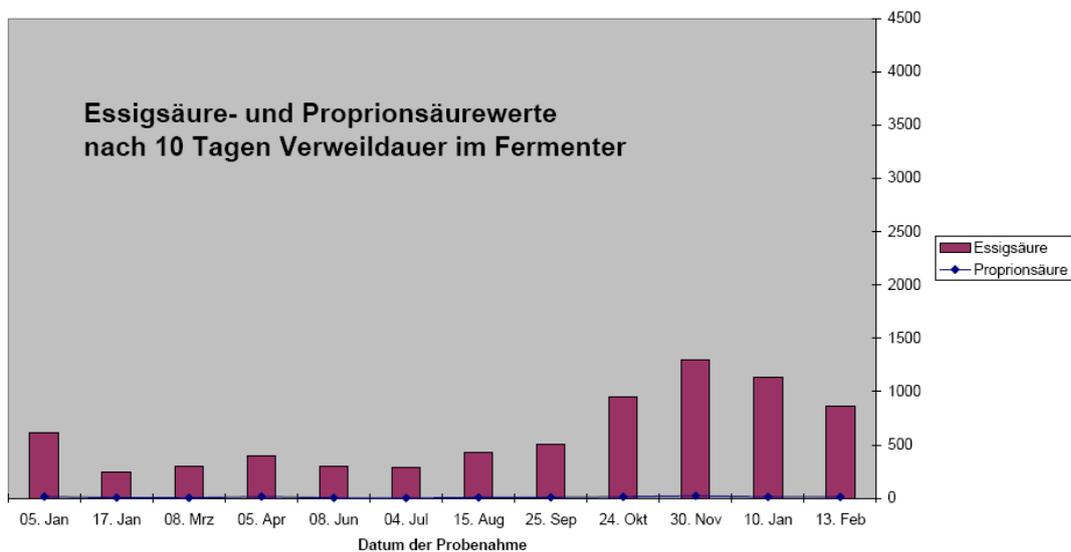
dieser hohen Raumbelastung vor. Die Fütterung könnte sogar erhöht werden.

#### Abbauraten und Geschwindigkeit der biologischen Umsetzung

Die Geschwindigkeit der biologischen Prozesse ist in der Praxis schwer zu ermitteln.

Auf der Biogasanlage Nebauer wurde die Möglichkeit genutzt, während der turnusgemäßen 12.000 Stunden-Wartung des BHKW die Abbauraten im Fermenter zu testen. Um die Gasproduktion während der Wartung zu reduzieren wurde am 25.02.08 um 7 Uhr die Fütterung des Fermenters eingestellt. Die Fütterung wurde am 15.30 Uhr wieder aufgenommen. Zu beiden Zeitpunkten wurde eine Gärsubstratprobe genommen und im Labor ausgewertet.<sup>7</sup>

Die folgende Graphik 2 zeigt die Abbauraten innerhalb von 8,5 Stunden.



nachfolgenden Graphik 1<sup>6</sup> ist der Verlauf der Fettsäurewerte zu sehen. Der entscheidende Faktor für die Stabilität der Biologie ist das Verhältnis von Essigsäure zu Propriionsäure. Wenn der Essigsäureabbau zu Biogas gehemmt ist dann verzögert sich der Umbau von Propriionsäure zu Essigsäure. Es ist also mehr „Futter“ für die Methanbakterien vorhanden als sie verwerten können. Der Propriionsäuregehalt im Fermenter steigt an. Ein Verhältnis von Propriionsäure zu Essigsäure 1:3 ist mindestens nötig für eine stabile Biologie. Ist das Verhältnis enger oder ist sogar mehr Propriionsäure als Essigsäure im Fermenter vorhanden, spricht man von einer Übersäuerung. Im Extremfall stürzt die Biologie ab. Ist das Verhältnis weiter als 1:3, dann kann noch mehr gefüttert werden.

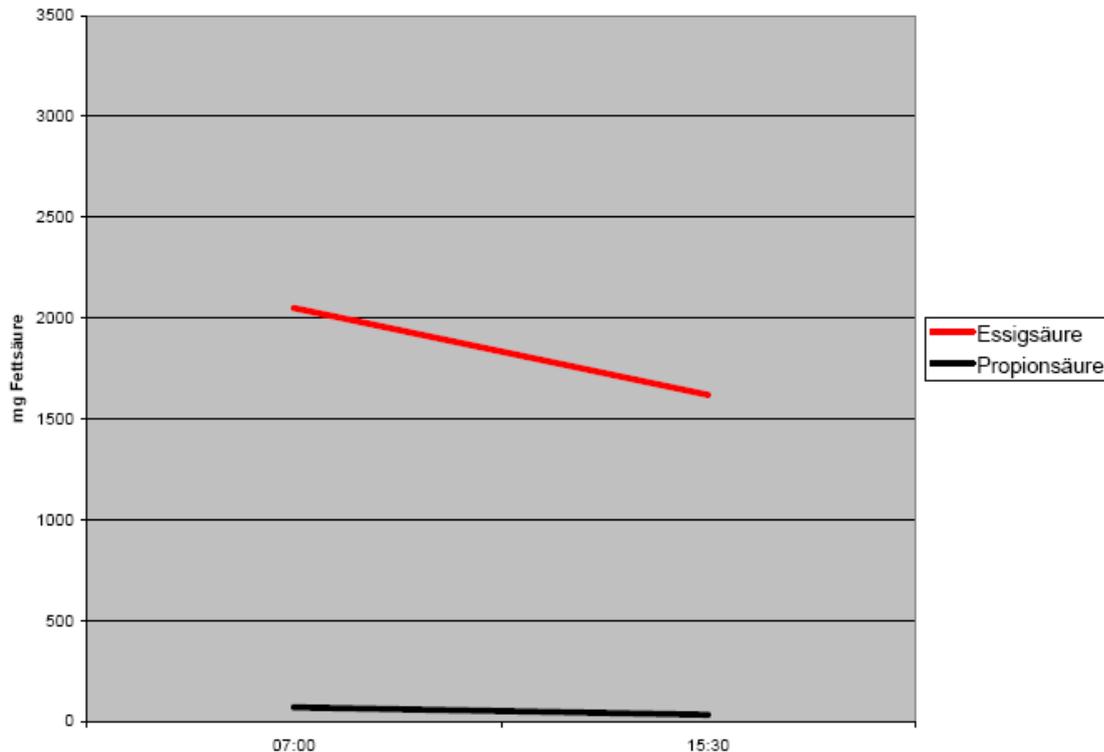
Die Graphik zeigt, dass trotz einer Raumbelastung von mehr als 6 kg das Verhältnis Propriionsäure zu Essigsäure bei ca. 1:10 liegt. Damit liegt keine Überfütterung bei

<sup>5</sup> Netto-Gärvolumen: Volumen des Fermenters in m<sup>3</sup> minus Gasraum im Fermenter (ca. 0,5 m) = Netto-Gärvolumen

<sup>6</sup> Quelle: Fettsäureanalysen des Labor Hoffmann; Januar 07 – Februar 08

<sup>7</sup> Quelle: Fettsäureanalysen des Labor Hoffmann

## Abbaurrate der Essigsäure und Propionsäure im Fermenter innerhalb von 8,5 Stunden



Innerhalb von nur 8,5 Stunden wurde der Essigsäuregehalt von 2.050 mg auf 1.620 mg abgebaut. Die Propionsäure wurde von 71 mg auf 34 mg reduziert. Damit wurde 1/5 des Essigsäuregehaltes und über 50% des Propionsäuregehaltes innerhalb von nur 8,5 Stunden abgebaut. Das ist ein klares Indiz für die Leistungsfähigkeit der Fermenterbiologie.

### Verweildauer im Fermenter

Aufgrund der hohen Abbauleistung im Fermenter ist die Verweildauer des Gärsubstrates im Fermenter reduziert. Die Verweildauer ist ein rechnerischer Wert, der angibt wie lange sich die Einsatzstoffe im Durchschnitt im Vergärungssystem befinden. Einstufige Biogasanlagen gehen von 40 Tagen bis zu 150 Tagen Verweildauer aus in der Erwartung, dass damit die Abbauleistung besser und die Gasbildung erhöht ist. Bei der SLP Hochleistungsbiologie gehen wir von einer Verweildauer von ca. 16 – 20 Tagen im Fermenter, je nach Einsatzstoffen, aus.

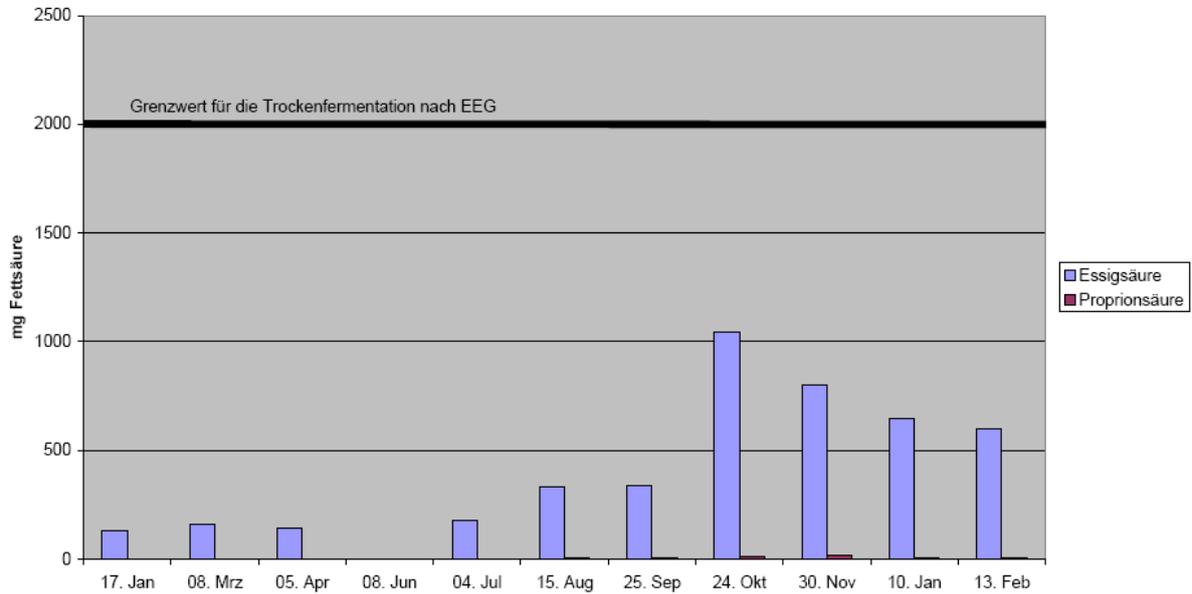
### Praxisbeispiel

Bei einem Hydrolysevolumen von 240 m<sup>3</sup> und einer Fütterung von der Hydrolyse in den Fermenter wird im Durchschnitt 120 m<sup>3</sup> Hydrolysat gefüttert. Bei einem Netto-Gärvolumen von 1.100 m<sup>3</sup> errechnet sich eine Verweildauer von 9,1 Tagen. Wie oben in der Graphik 1 dargestellt ist nach 10 Tagen der Fettsäurevorrat fast komplett abgebaut.

Aufgrund der vorliegenden Fakten ist eine Verweildauer von ca. 16 – 20 Tagen vollkommen ausreichend für den vollständigen Abbau der Fettsäuren. Zudem werden auch noch im Endlager Rest-Fettsäuren abgebaut. Somit geht kein Gasbildungspotential verloren.

Die Graphik 3 zeigt die Ergebnisse der Fettsäureanalysen im Endlager der Biogasanlage Nebauer.

## Essigsäure- und Propriensäuregehalte im Endlager der Biogasanlage Nebauer



Bereits nach 10 Tagen liegt der Wert für das Essigsäureäquivalent weit unter den 2.000 mg wie für die Trockenfermentation vom BMU gefordert.

Die eingangs implizierte Frage, ob ein Fermenter für die vollständige Vergärung der eingesetzten Biomasse ausreicht, kann mit einem klaren JA beantwortet werden.



**„98% Abbaurate der berechneten, theoretisch  
möglichen Biogasausbeute“**

Zweistufig, Thermophil  
Das hat Prof. Scherer, Hamburg, schon 1999 nachgewiesen.

## **Original-Artikel von Prof. Scherer & Coll.**

### **Zusammenfassung für Praktiker:**

- ✓ 98 % Abbaurate
- ✓ Mehrstufigkeit
- ✓ Hohe Temperaturen 65°C/55°C
- ✓ Max. Verweildauer 18,5 Tage

Mit freundlicher Empfehlung von  
**Snow Leopard Projects**

Bei Fragen erreichen Sie uns unter:  
[w.danner@snow-leopard-projects.com](mailto:w.danner@snow-leopard-projects.com)  
Tel: 08734 -939770

# „98% Abbaurate der berechneten, theoretisch möglichen Biogasausbeute“

Zweistufig, Thermophil

Das hat Prof. Scherer, Hamburg, schon 1999 nachgewiesen. Hier der Originalartikel:

MÜLLVERGÄRUNG Verfahren

## Entwicklung eines einfachen Hochleistungsvergärungsverfahrens zur Behandlung von Restmüll

Prof. Dr. Paul A. Scherer und Dr. sc. nat. Gerd-Rainer Vollmer,



**Prof. Dr. Paul A. Scherer**  
Studium in Aachen, Bochum und Marburg. Promotion in Bochum/Marburg. 1983 Professur für Mikrobiologie und Biotechnologie an der FH Weihenstephan und Mitaufbau eines neuen Studienganges und Fachbereichs Biotechnologie. Seit 1992 an der Fachhochschule Hamburg, Standort HH-Bergedorf.



**Dr. sc. nat. Gerd-Rainer Vollmer**  
Chemiestudium in Halle und Studium für mikrobielle Biotechnologie in Jena. 1981 bis 1990 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Abteilungsleiter am Institut für Biotechnologie Potsdam. 1990 Habilitation und 1991 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Landwirtschaftlichen Untersuchungs- u. Forschungsanstalten Thüringen. Seit 1995 Gründer und Geschäftsführer der BTN Biotechnologie Nordhausen GmbH.

### 1. Einleitung/Praxisbezug

Im Rahmen des bundesweiten Verbundvorhabens „Mechanisch-biologische Vorbehandlung von zu deponierenden Abfällen“ des Umweltbundesamtes Berlin bzw. des BMBF (17 Teilvorhaben, TV) wurde sowohl das Projekt „Erschöpfende Vergärung von Restmüll mit Hygienisierung und Schadstoffabbau“ (BTN GmbH) als auch das gekoppelte Projekt „Mikrobiologisch-biochemische Charakterisierung von Prozessvarianten zur erschöpfenden Vergärung von Restmüll“ (FH Hamburg/Bergedorf) gefördert. Im Verbund wurden verschiedene Konzepte im Labor- oder Pilotmaßstab durchgetestet: Gänzlich aerobe, aerob-anaerobe Wechselverfahren, primär anaerobe Verfahren (mit aerober Nachrotte/Nachbehandlung).

Nach der neuen Technischen Anleitung Siedlungsabfall muß Restmüll („Rest des sortierten Hausmülls“) vor einer Deponierung inertisiert bzw. mineralisiert werden, da dieser je nach Herkunft immer noch 20–50% biogene organische Stoffe enthalten kann, welche zu gasförmigen und wäßrigen Emissionen führen können. Das bundesweite BMBF-Verbundvorhaben zielt letztlich darauf ab, indirekt dem Deutschen Bundestag eine Empfehlung abzugeben, inwieweit eine biologische Kalt-Inertisierung zwecks sicherer Deponierung zur Minimierung der relativ teuren thermischen Verwertung führen kann. Es geht insbesondere um die hochorganische Siebfraction des Restmülls mit einer Obergrenze von 40–60 mm, für die mit 5000 kJ/kg eine thermische Verwertung unvorteilhaft und nicht statthaft wäre.

Die energetisch günstigen Vergärungsverfahren haben den Vorteil, daß die Biomasseneubildung im Gegensatz zur Kompostierung vernachlässigbar ist (Scherer 1996). Auch wegen der Methanbildung und des teilweise größeren Substratspektrums (AOX) ist der anaerobe Abbau derzeit sehr aktuell (Speece 1996). Daher sind für eine hohe Mineralisierung Vergärungsverfahren prinzipbedingt vorzuziehen. Durch verfahrenstechnische Variierungen sollte ein über den Stand der Technik hinausgehender Abbaugrad und damit eine Minimierung und besonders gute Stabilisierung organischer Restmüllfraktionen erreicht werden. Außerdem wurde geprüft, ob eine Nachrotte als wichtiger Kostenfaktor eingespart werden könnte, um dennoch die üblichen Depo-niegrenzwerte in Form biologischer Abbaubarkeitstests zu erhalten.

(Lizenzen über die FH Hamburg oder die BTN GmbH)

### 2. Material und Methoden

Der eingesetzte Restmüll stammte zum einen aus der Versuchsanlage zur kalten Vorbehandlung der Depo-nie Scharfenberg bei 16909 Wittstock, Land Brandenburg (40–60 mm Siebdurchlaß, organikreiche Feinfraktion), zum anderen aus einer Lieferung der Anlage Quarzbichl in 82547 Eurasburg (40 mm Siebdurchlaß).

Die 6–18 %ige Suspension wurde dann nochmals durch ein 7 mm Sieb gedrückt. Die Herstellung von störstoffbefreiten Müllsuspensionen für eine „Naßvergärung“ bis Korngrößen von 3 mm hinunter ist schon seit etwa 1985 Stand der Technik (z. B. Solidigest-Verfahren, Tidden 1992). Die Anlage von Wittstock wird im Teilvorhaben TV 2/3 des Verbundes (G. Janikowski ITU GmbH, Berlin), die Quarzbichl-Anlage von Müller u. Fricke (1997) beschrieben (ebenfalls Fördermitglied des Verbundes).

Folgende Konzepte mit Reaktoren bei 55° bis 70° C wurden mit Müllmaischen getestet, s. Abb. 1:

- ◆ **Einstufig:** Zulauf Dosage 1x pro Tag in den Methanreaktor RM1 (1-stufig), i. d. R. hydraulische Verweilzeit HRT von 14,2d, teilweise 7,1d.
- ◆ **Zweistufig:** Identischer Zulauf mit Hydrolysestufe RH und nachgeschaltetem Methanreaktor RM2 (ge-speist durch Ablauf von RH), i. d. R. HRT = 14,2d für RM2 und 4,3d für RH.
- ◆ **Dreistufig:** Zulauf wie 1. u. 2. Mit Hydrolysestufe RH und zwei in Reihe nachgeschalteten Methanreaktoren RM2 und RM3.

### 3. Ergebnisse

3.1 Beurteilung der Deponiefähigkeit: Restgasbildung, AT<sub>4</sub>-Test, Photosynthese-Test, AOX, TOC-Eluat

In der Tab. 1 sind wichtige Variationen der einzelnen Versuchsläufe hervorgehoben (kontrastiert). Sie zeigen die Ergebnisse charakteristischer Bewertungsparameter, wie die Zulaufkonzentration, die Beladungsrate, Abbau- und Gasbildungsraten, den Glühverlust vom Reaktorsediment, den Cellulose/Lignin-Quotienten, die GB<sub>21</sub>- und AT<sub>4</sub>-Werte von Sedimenten.

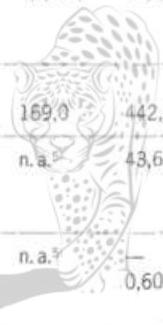
Dabei ist der GB<sub>21</sub>-Test nach einer eigenen Anleitung mit selektiertem Impfschlamm, ferner der Kalibrier-substanz Cellulose (protokolliert durch die Arbeitsgruppe Qualitätssicherung des Verbundes) und der AT<sub>4</sub>-Test gemäß dem Protokoll der AG Qualitätssicherung des Verbundes durchgeführt (mit oder ohne „Erde“ als Impfmateriale, Oxitop-Gerät der Firma WTW, Weilheim).

Bei dem GB<sub>21</sub>-Gasbildungstest (37 °C) zeigte es sich, daß das Sediment aus der Vergärung von Wittstockmaterial besonders inert mit Werten zwischen 1,0–4,8 Nml/g TS war, während Quarzbichl-Reaktorsedimente bei (1–22,6 Nml/g TS lagen (im Verbund diskutierter Grenzwert: 20–30 Nml/g TS/21d, < 1% des Gasbildungspotentials). Bei der Variante Quarzbichl 1 lagen die GB<sub>21</sub>-Werte unter 1 ml/g TS. Die AT<sub>4</sub>-Testergebnisse (Atmung in 4d bei 20 °C) lagen mit aerobem Impfmateriale bei Wittstock - als auch Quarzbichl-Reaktorsedimenten bei 0,5 bis 3,6 mg O<sub>2</sub>/g TS, ansonsten ohne dieses Impfmateriale bei ≤ 0,1 mg O<sub>2</sub>/g TS, s. Tab. 1 (AT<sub>4</sub>-Impfmateriale „Erde“ = ca. 6 mg O<sub>2</sub>/g TS!).

Diese Daten stehen im Einklang mit einem neu formulierten Cellulose/Lignin-Quotienten der Reaktorsedimente (Scherer et al. 1998, s. 3.2), der bei Wittstockmaterialien nicht über 0,6 ging. Die hydraulische Verweilzeit HRT von „Hydrolyse“ und Methanstufe belief sich dabei zusammen auf max. 18,5 Tage. Das Quarzbichlmaterial als Sediment wies einen C/L-Quotienten bei den bevorzugten Varianten von 0,6–0,9 auf (gleiche Verweilzeiten, s. Tab. 1,3. Querspalte).

Versuch	Wittstock 1	Wittstock 2	Quarzbichl 1	Quarzbichl 2	Quarzbichl 3	Wittstock 3	Quarzbichl 4	Quarzbichl 5	Quarzbichl 6	Quarzbichl 7
Reaktorstufen	RM1 RH/RM2	RM1 RH/RM2	RM1 RH/RM2 RM2/RM3	RM1 RH/RM2	RM1 RH/RM2	RH/RM2	RH/RM2	RH/RM2	RM1 RH/RM2	RM1 RH/RM2
Temperaturen	55°C 55°C/55°C	55°C 55°C/55°C	55°C 55°C 55°C	55°C 55°C/55°C	55°C 55°C/55°C	55°C/55°C	55°C/55°C	70°C/55°C	65°C 65°C/55°C	60°C 60°C/55°C
HRT [d]										
RM1	14,2d	7,1d	14,2d	14,2d	14,2d	1,25d/3,5d	4,3d/14,2d	4,3d/14,2d	10d	10d
RH/RM2	4,3d/14,2d	2,3d/7,1d	4,3d/14,2d	4,3d/14,2d	4,3d/14,2d				4,3d/14,2d	4,3d/14,2d
oTS Zulauf [%]	n. a. <sup>6)</sup>	5,4	4,4	10,4	6,8	3,7	6,4	4,9	4,3	6,1
oTS Ablauf [%]										
RM1	n. a. <sup>6)</sup>	4,0	1,4	7,0	2,9	3,8/2,1	3,6/2,5	4,6/1,1	2,4	2,9
RH/RM2		4,5/4,6	3,1/0,98	8,7/5,6	5,9/3,1				4,4/0,9	5,5/1,2
Beladung [g oTS/l/d] <sup>2)</sup>	RM1 RH/RM2 RM2/RM3	7,6 25,9/6,3	3,1 10,6/2,2 2,2/2,4	7,3 25,0/6,2	5,4 18,2/3,1	29,2/10,6	15,4/2,6	11,8/3,3	4,3 10,3/3,1	5,1 14,6/3,9
Abbaurrate [% oTS]	RRM1 RH/RM2 RM2/RM3	27,0 16,8/n. a.	67,7 30,5/68,2 68,2/n. a.	33,1 16,0/35,6	58,2 13,0/48,4	n. a./45,5	43,9/31,2	6,5/76,4	44,0 n. a./79,6	52,2 9,7/77,4
GBR <sup>3)</sup> [l/RV/d]		15,3 12,1/2,6	15,3 12,1/1,6	19,9 15,8/6,3 6,3/0,2	5,7 15,2/2,7	8,3 13,0/2,3	4,2/11,7	16,1/1,9	0,8/17,4	7,4 0,8/18,2
GB <sup>4)</sup> [NI Gas/kg oTS Input]	RM1 RH/RM2/RM3	243,0 233,0	711,1 797,2	86,2 270,8	191,9 353,8	169,0	442,2	584	649,4 694,7	747,5 574,8
oTS bzw. GV [% TS] Sed. RM	1 7,6 2 3	5,5	30,9 26,5 n. a. <sup>4)</sup>	17,4 21,8	46,9 42,5	n. a. <sup>5)</sup>	43,6	40,5	35,2	n. a. <sup>6)</sup>
C/L <sup>5)</sup> Reaktor Sediment <sup>2)</sup> RM	1 0,05 2 0,67 3	0,57 0,46	0,65 0,58 n. a. <sup>4)</sup>	1,0 1,0	0,73 0,67	n. a. <sup>5)</sup>	0,60	0,90	0,78 0,86	0,65 0,63
GB <sub>21</sub> <sup>7)</sup> Sed. [Nm/g TS/21d]	1 1,7 2 1,0 3	≤ 1 4,8	≤ 1 n. a. <sup>5)</sup>	21,8 13,1	6,6 ≤ 1	n. a. <sup>5)</sup>	n. a. <sup>5)</sup>	n. a. <sup>6)</sup> 17,8	n. a. <sup>6)</sup>	n. a. <sup>6)</sup>
AT <sub>4</sub> Sed. [mg O <sub>2</sub> /g TS/4d]	1 0,5 2 1,0 3	1,4 0,8	n. a. <sup>5)</sup>	n. a. <sup>5)</sup>	2,1 1,7	n. a. <sup>5)</sup>	n. a. <sup>5)</sup>	n. a. <sup>6)</sup> 3,6	n. a. <sup>6)</sup>	n. a. <sup>6)</sup>

Tabelle 1: Hauptvariationen und einige Ergebnisse der verschiedenen Reaktorläufe mit angemischtem Restmüll aus 16909 Wittstock und Quarzbiche (86495 Eurasburg)



SNOWLEOPARD

#### Hauptvariationen

GBR = Gastladungsrate

HRT = Hydraulische Verweilzeit

- <sup>1)</sup> Die Zahlenwerte und Bakterienanalysen beziehen sich im wesentlichen auf einzelne Tages- oder Wochenwerte und nicht auf Mischwerte von Wochen. Die Beladung und Abbaurrate wurde je nach Stufe differenziert.
- <sup>2)</sup> Sediment der letzten Stufe RM2 (RM3) geht auf die Deponie, Prozesswasser wird im Kreislauf gefahren.
- <sup>3)</sup> C/L-Quotient: Quotient aus Cellulose und Lignin nach von Soest.
- <sup>4)</sup> Kaum noch Sediment bei 3. Stufe vorhanden.
- <sup>5)</sup> Nicht ausgewertet, da zu wenig Probenmaterial.
- <sup>6)</sup> Vorläufig nicht ausgewertet.
- <sup>7)</sup> Die AT<sub>4</sub>-Werte wurden mit einer für Gärreststoffe variierten Methode der

Arbeitsgruppe Qualitätssicherung (mit „Erde“ als Impfmateriale) durchgeführt. Ohne Impfmateriale lagen alle Werte bei <0,1 mg O<sub>2</sub>/g TS. Standardabweichung teilweise 50%, da sehr geringe Restaktivitäten.

<sup>8)</sup> Tägliche GBR pro gesamtem Reaktorvolumen RV der Stufe (Gasverlust bei RH und RM1 durch Suspensionszugabe 1 x/d). Reaktorvolumen RV: RM1/RM2 = 8,5 l, RM1 (Q6/Q7)/RH = 2,5 l RH, (W3) = 3,0 l

<sup>9)</sup> Umrechnungsfaktor bei 25°C Gasmeßtemperatur von Liter in NormLiter: 0,917. Mit Flüssigkeit gefülltes Gasometer. Es wurden ca. 3% Gasentweichung berücksichtigt, – bei täglicher, einmaliger Substratzugabe über geöffnetem Reaktordeckel.

Zur Überprüfung der Rottstabilität wurde auch ein neuer Test von Helfrich et al. angewendet (Helfrich et al. 1998), der direkt auf die Photosynthese wirkt und daher als Maß für eine Pflanzenverträglichkeit von Kompost gelten kann. Danach entsprachen die Feststoffe des Zulaufes einem 6 Tage alten Frischkompost, während die Sedimente der Methanstufe RM<sub>2</sub> (Q<sub>7</sub>) einem 110 ca. Tage alten, nahezu ausgereiften Kompost entsprachen (Durchführung Peter Helfrich, Univ. Bonn).

Loll (1998) weist auf die vielfach bei Kompostierungen und Vergärungen nicht eingehaltenen Grenzwerte von AOX in den Sicker- und Prozesswässern hin (Grenzwert: 0,5–1 mg/l). Sie lagen in den Reaktorsedimenten von Wittstock und Quarzbichl bei 0,2–0,35 mg/l Sedimentvolumen und bei 0,76 mg/l im Prozesswasser (Quarzbichl).

Die TOC-Eluatwerte lagen bei den Reaktorsedimenten der bevorzugten Verfahrensvarianten bei 17–30 mg/l (Wittstock) und ferner bei etwa 150 mg/l (Quarzbichl). Auch hier werden die von Verbundteilnehmern diskutierten Grenzwerte in Höhe von 300 mg/l deutlich unterschritten (Bestimmung nach DIN 38414-54).

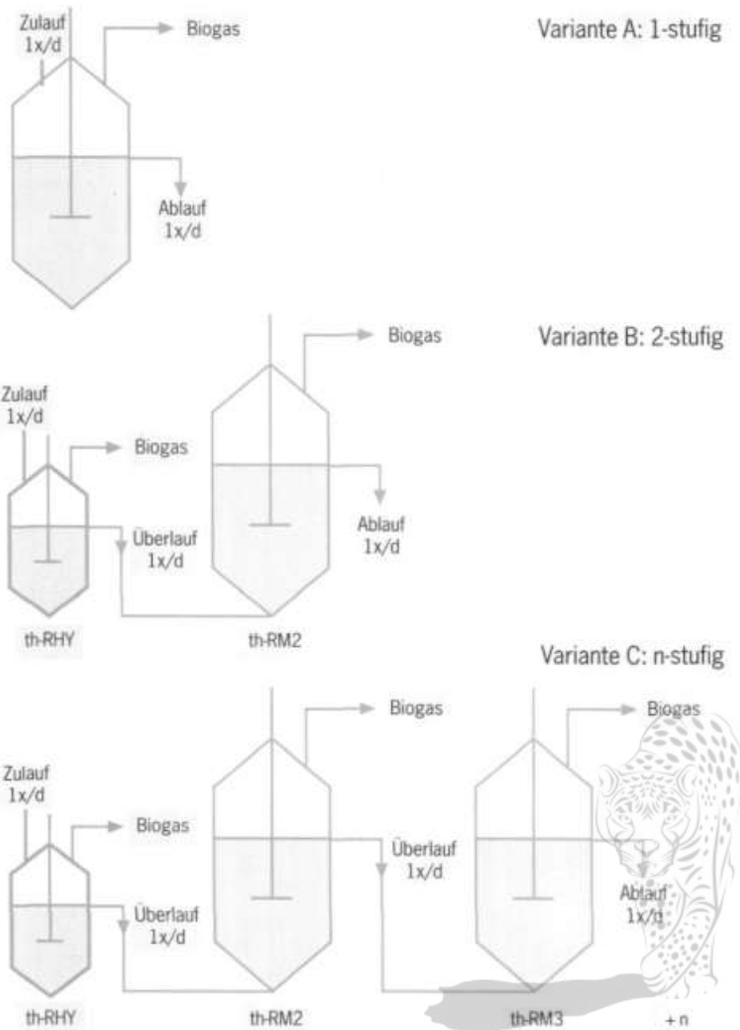
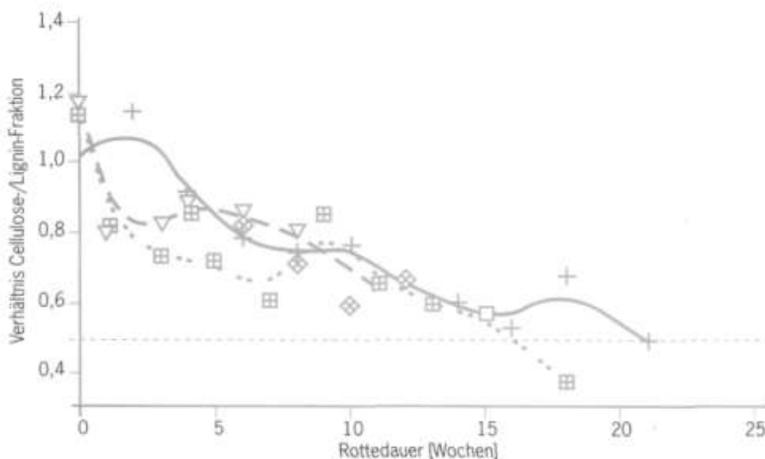


Abbildung 1: Erschöpfende Vergärung von Bioabfällen mit Hygienisierung und Schadstoffabbau

3.2. Stoffgruppenanalytik – finaler Cellulose/Lignin Quotient  
 Bereits vor dem Projekt war durch eigene Laborexperimente die Feststoffgruppenanalytik nach van Soest aus dem Futtermittelbereich als geeignet befunden

Abbildung 2: Verhältnis der Cellulose-/Lignin-Fraktion im Rotteverlauf von Bioabfall. Ergebnisse von 4 Großanlagen (Becker et al. 1996, teilw. unveröff., Cellulose- und Ligninwerte aus Daten von Becker neu berechnet und neu gezeichnet)



worden, eine Vergärung damit bilanzmäßig zu erfassen. Die dabei vernachlässigbare Biomasseneubildung wurde über den DNA-Gehalt bestimmt (Scherer et al. 1990). Die van Soest-Methode benutzt eine Säurefraktionierung, um damit gravimetrisch „Hemicellulose“ (Xylane), „Cellulose“ und „Lignin“ zu bestimmen (Goering u. van Soest, 1970; Robertson u. van Soest, 1981). Diese Originalmethode wurde nun im Rahmen des Projektes im Vergleich mit drei weiteren Methoden (Spörri 1969, Updegraff 1970, Prosky et al. 1984) auch zur Bestimmung von Cellulose und Faserstoffen in verschiedenen Abfällen (Bioabfall, Speisereste, Mischgülle, Restmüll) erfolgreich validiert. Insbesondere gelang eine sehr gute Übereinstimmung der enzymatischen AOAC-Methode nach Prosky et al. mit der van Soest-Methode bezüglich Cellulose (Abweichung 0,5–3,0%, außer bei Speiseresten, dort 22%), was die Richtigkeit der naßchemischen van Soest-Methode für Cellulose belegt.

Die Untersuchungen zu Bioabfall aus verschiedenen aeroben Rottestadien von 4 Großanlagen, Abb. 2 (Becker et al. 1996), nach einer verkürzten van Soest-Methode (Amin u. Lepom 1995) und von Restmüll aus Rottevorgängen von der MBA-Anlage Quarzbichl, Abb. 3 (Hennecke u. Kördel, TV 3/4 des Verbundes, pers. Mitt.) führten zu parallelen Ergebnissen. Es kam die Idee, als Bewertungskriterium für die Güte des Abbauverhaltens einen konkreten Quotienten aus der Cellulose- und Lignin-Einzelfraktion („C/L-Wert“), heranzuziehen Abb. 4, ähnlich dem BSB5/CSB-Quotienten zur Einschätzung der Abbaubarkeit bei der belüfteten Abwasserreinigung.

Hennecke u. Kördel (TV 3/4 des Verbundes, pers. Mitt.) ermittelten auch den C/L-Quotienten einer 1-stufigen Trockenvergärung (BRV AG 60 m<sup>3</sup>-Reaktor, 40–50 °C, Temperaturausfälle), die mit „Roco 3“-Inputmaterial aus Quarzbichl für 18 Tage betrieben wurde (W. Müller, IGW). Im Anschluß an die Trockenvergärung fand eine einwöchige, unbelüftete Nachrotte statt. Das so behandelte Material hatte einen C/L-Quotienten von 0,4, der sich in der folgenden 8-wöchigen, belüfteten Nachrotte praktisch nicht mehr änderte. Auch ein nachgeschalteter gasdichter Deponiesimulator hatte nach fast 9-monatiger Betriebsweise keinen Einfluß mehr, s. Abb. 3a. Die erfolgreichen Feldversuche mit dem BRV-Reaktor sind insbesondere in Müller u. Fricke (1997) beschrieben.

Als Pendant zu der anaeroben Behandlung von Restmüll aus Quarzbichl ist eine aerobe, intensiv belüftete Rottevariante in Abb. 3b dargestellt. Man erkennt den um etwa 3 Monate verlängerten Rotteverlauf mit nahezu gleichem C/L-Endergebnis.

Momentan sieht es bei einer Gesamtbetrachtung so aus, daß sich – egal ob aerober oder anaerober Abbau – bei einer Rotte mit einem Anfangswert von 1-3 ein C/L-Endwert von etwa 0,4–0,7 (teilweise 0,8) einstellt (Abb. 3-4, Tab. 1). Diese C/L-Werte werden nach etwa 16 Wochen bei den Kompostierungen (Abb. 3b) und nach lediglich 9,4–18,5 Tagen mittlerer hydraulischer Verweilzeit (HRT) bei den hier durchgeführten Vergärungen erreicht. Abb. 4 – ohne aerobe Nachrotte!

Höring und Ehrig (1997) erhielten beim biol. Abbau von Restmüll Grenzwerte von 0,5 für den C/L-Wert.

wobei parallel die Gasbildung in 20d auf Null l/kgTS absank, was wiederum mit der Atmungsaktivität korrelierte (Statistische Absicherung:  $R=0,94/R^2=0,88$ ). Bookter und Ham (1982), sowie Suflita et al. (1992) bestimmten C/L-Werte für Deponien aus unsortiertem Hausmüll und fanden für frischen Müll höchste Werte bis zu 4 und tiefste Werte für alten Müll zwischen 0,55–0,7 (im Einzelfall bei einer 25–35-jährigen Deponie Werte um 0,21–0,24, Bookter u. Ham 1982). Diese Ergebnisse unterstreichen den finalen Charakter des C/L-Wertes 0,4–0,8 bei Kompostierungen oder Vergärungen, da bei beiden Prozessen der Ligninabbau durch Pilze i.d.R. limitiert ist<sup>11</sup>, wodurch der korrespondierende „Lignin“-Anteil der Cellulose im Verlauf einer belüfteten Rotte gleichbleibt oder sogar tendenziell ansteigt (Müller 1995, Tseng et al. 1996). Durch einen Anstieg der „Ligninfraktion“ in aeroben Milieu können sich im Vergleich zum anaeroben Celluloseabbau sogar auch C/L-Werte unter 0,4 ergeben (Abb. 3b).

### 3.3. Mikrobiologie-Methodik

Um die Bakterien quantitativ zu ermitteln, wurde die gängige most probable number (MPN)-Technik aus der Mikrobiologie angewendet, die mit 3-fach-Ansätzen pro etwa 10 Verdünnungsstufen pro Probenansatz die Werte statistisch absichert bzw. ermittelt. Aus einer Verdünnung, in der im Grenzfall 1 Bakterium pro Reagenzglasansatz verbleibt, kann auf die Ausgangskonzentration statistisch rückgeschlossen werden. Es kam eine Pyrogalloltechnik zum Zuge (Scherer 1978), die abgewandelt und optimiert wurde (Scherer u. Otzen 1997), um damit 6 Gruppen: Gesamtkohlenstoffverwerter, Celluloseabbauer, Acetat- und  $H_2/CO_2$ -Abbauer (Methanogene und nicht Methanogene - getrennt) quantitativ zu bestimmen (Verbesserung um den Faktor 10–100). Um nichtmethanogene Bakterien auszuschließen, wurde Cefotaxim (Hoechst AG) in den Medien eingesetzt (Godsy 1980).

### 3.4. Mikrobiologie – Ergebnisse

Im Falle thermophiler anaerober Celluloseabbauer (Spezialisten!) wurden im Zulauf bereits bis zu  $5,2 \cdot 10^6$  Bakterien/gTS ermittelt. Anaerobe, thermophile Gesamtkohlenstoffverwerter (verschiedene Zucker) lagen zwischen  $10^8$  bis annähernd  $10^{10}$ /gTS. Wenn man bedenkt, daß ein Escherichia coli-Bakterium etwa 0,75 Picogramm ( $10^{-12}$  g) trocken wiegt, dann kann man nachvollziehen, daß die Zellzahl bei einem mit 10% TS beladenen Reaktor bei max.  $10^{10}$ – $10^{11}$  /ml liegen kann (bei 10% Feststofflösung und 10% Anteil der Bakterien am Feststoff). Für sauerstoffempfindliche Lebendzellzahlbestimmungen mit extrem hohen Verdünnungen wie hier müßten diese Zahlen eigentlich tiefer angesetzt werden. Die quantitativen Zahlen dokumentieren daher, daß die Anzucht- und Nachweisbedingungen korrekt waren.

Diese Bakterienzahlen zeigen für sich betrachtet nicht immer in die gleiche Richtung, aber eine Zu-

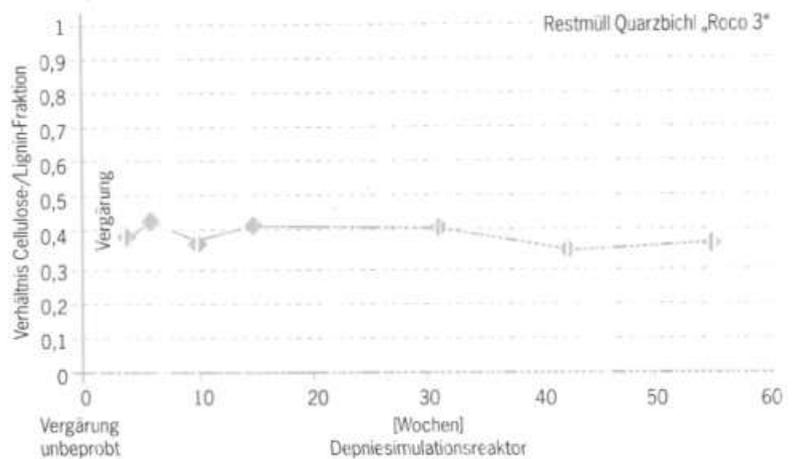


Abbildung 3 a: Einfluß einer belüfteten Nachrotte auf den Cellulose-/Lignin-Quotienten von Gärreststoffen. Ausgangsmaterial: Quarzbüchl-Restmüll, Siebdurchlauf 40 mm. Für 18 Tage (8. 1.-26. 1.) lief 1stufige Trockenvergärung (BRV 60 m<sup>3</sup>, 40-50° C), dann etwa 1 Woche unbelüftete Nachrotte. Ab 6. 2. belüftete Nachrotte für ca. 8 Wochen, dann ab 25. 4.-29. 1. für 9 Monate im gasdichten Deponiesimulator. Rottedurchführung IGW (W. Müller), sonst Fhg-Schmallenberg (D. Hennecke, K. Hund, W. Kördel), Werte hiervon, pers. Mitteilung.

nahme anaerober thermophiler Celluloseabbauer (trifft weniger für die anaeroben Gesamtkohlenstoffverwerter zu) war tendenziell im Verlaufe der Vergärungsstufen vom Zulauf über die 1-stufige Variante oder vom Zulauf über die 1., 2. und ggf. 3. Reaktorstufe zu beobachten (teilweise deutliche Chargenunterschiede).

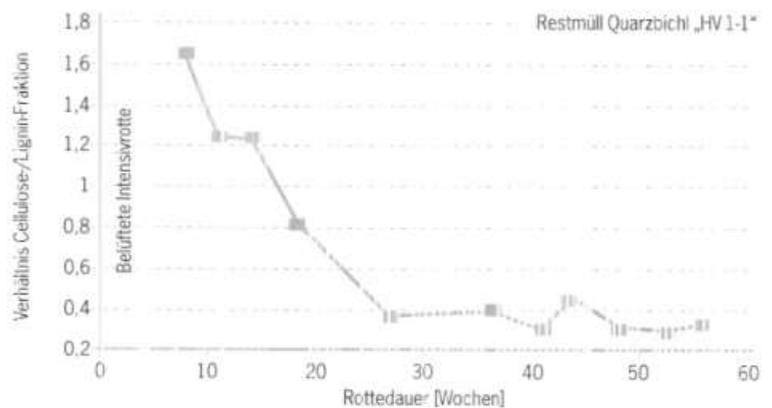
Ergebnisse der mikrobiellen Populationsanalysen der sämtlich thermophil/hyperthermophil betriebenen Vergärungsreaktoren sind exemplarisch in Abb. 5 (Reaktorlauf Q<sub>1</sub>) gezeigt.

Es ist der hohe Anteil an Wasserstoffverwertern zu beachten. Durch Antibiotikazusatz gegen Eubakterien (Methanbildner sind sog. Archaeobakterien) konnte aber auch die gängige Lehrmeinung überprüft werden, ob etwa 70–90 % des Kohlenstoffabbaus über acetatumsetzende, methanogene Bakterien erfolgte, wie es für mesophile Vergärungen anhand von Tracerexperimenten festgestellt worden war. Da durch Antibiotikaeinsatz i. d. R. die Bakterienzahlen sanken, konnten sich neben den methanogenen Acetatverwertern darunter auch eubakterielle Acetatoxidierer befinden.

Acetatoxidation durch ein sog. „Reversibacter“ (Produkt  $H_2-CO_2$ !) ist bislang vornehmlich in thermophilen

Abb. 3b:

Verhältnis der Cellulose/Lignin-Fraktion im Verlauf von 48 Wochen einer unbelüfteten Nachrotte (Quarzbüchl HV1-1; 40 mm) mit End-C/L-Wert von 0,3–0,4. Zuvor 8 Wochen belüftete Intensivrotte mit End-C/L-Wert 1,7. Die Werte 41. und 52. Woche stammen von einem parallel angesetzten Deponiesimulator. Versuchsanalytik u. Daten von Hennecke u. Kördel (1997), Versuchsdurchführung s. Müller u. Fricke (1997).



<sup>11</sup> (Bei der Vergärung trifft man i.d.R. keine dafür notwendigen Pilze an; sie sind i.d.R. aerob. Diese aerob wachsenden Pilze sind aber mit Lignin als Kohlenstoffquelle recht langsamwüchsig).

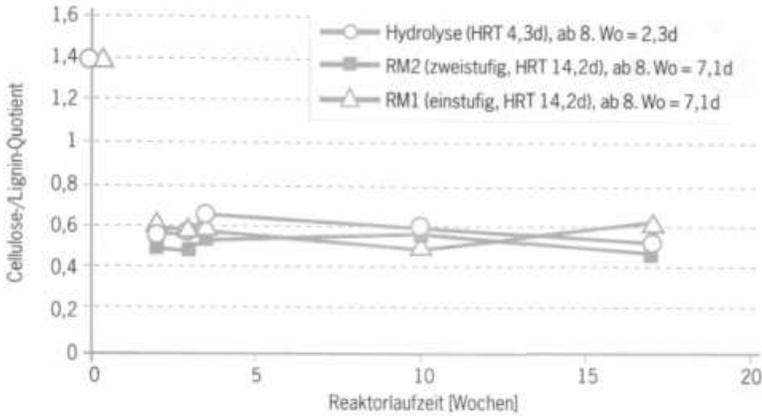
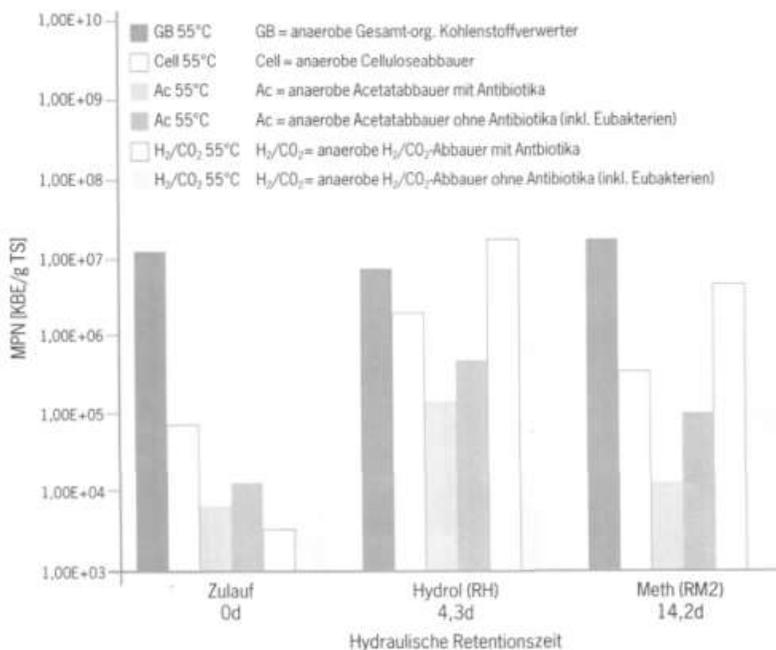


Abb. 4: Eigene Cellulose/Lignin-Quotienten nach Original-van Soest bei der Restmüllvergärung in 1- und 2-stufigen Reaktoren. Es wurden die gerührten Suspensionen von Wittstock-Restmüll (40–60 mm Siebdurchlass) untersucht. Die Gesamtreaktorlaufzeit hat hier nur protokollarischen Charakter, entscheidend war die HRT (keine Nachrotte).

Standorten gefunden worden, während die „Hinreaktion“ zu Acetat durch die gleichen homoacetogenen Bakterien im mesophilen Bereich zu erwarten ist (Zinder 1994). Überraschend lagen die Zahlen für acetatumsetzende Methanbildner (mit Antibiotika) in der Methanstufe RM2 bei meist  $10^4$ – $10^5$ , also etwa 1000–10 000fach geringer als die  $H_2$ - $CO_2$ -Umsetzer (Abb. 5). Die beobachteten, hohen Werte für autotrophe  $H_2$ - $CO_2$ -Verwerter lagen gleich hoch oder bis zu 1 Zehnerpotenz höher als die der Gesamtbakterien zur Verwertung von organischem Kohlenstoff (siehe Abb. 5). Solch hohe Zahlen der energetisch begünstigten und daher relativ schnellwüchsigen autotrophen, thermophilen  $H_2$ - $CO_2$ -Verwerter (auch von Methanbildnern) hat man in jüngster Zeit auch bei der Heißrottephase von belüfteten Kompostierungen angetroffen (Derikx et al. 1988, Boffa et al. 1996). Ihr Vorkommen in einer solch organikreichen Matrix ist überraschend. Daraus erklärt sich die bei thermophiler Betriebsweise beobachtete starke Methanbildung in der „Hydrolyse“, d. h. bei sehr kurzen Verweilzeiten von nur 4,3 Tagen (s. Tab.1, 9. Querspalte).

Abbildung 5: Anaerobe Keimzahlen von 6 spezifischen Bakteriengruppen in der Hydrolyse- und Methanstufe (55°C) einer Vergärung von Restmüll (Quarzbichl 4)



3.5. Abbaugrad der organischen Trockensubstanz oTS (über die oTS-Bilanz bestimmt Zulauf)

Letztlich erbrachte die erste Reaktorstufe, die eigentlich eine Hydrolyse sein sollte, bei einer HRT von lediglich 2,1–4,3 d bis zu ca. 80% (besonders extrem bei Lauf Q 4) der beobachteten Gasbildung und auch einen hohen oTS-Abbau (direkt über die oTS-Zulauf-Bilanz bestimmt) von max. 79,6% bzw. 77,4% bei Quarzbichl-Lauf 6 bzw. 7 und max. 27% bei Wittstockmaterial 2, s. Tab. 1 (u. a. abhängig vom Ausgangs-oTS-Gehalt bzw. dem Anteil von Mineralien wie Sand, Glas und Asche).

Trägt man den oTS-Abbaugrad (s. Tab. 1, 7. Querspalte) gegenüber der Beladungsrate (s. Tab. 1, 6. Querspalte) auf, so erhält man die gewohnte Sättigungskinetik 0.–1.ter Ordnung, d. h. bei zu hoher Beladung sinkt die Abbaurrate auf ein etwa gleichbleibend tiefes Niveau, s. Abb. 7. Hier sind allerdings in der oTS-Abbaurrate noch viele weitere Feststoffe außer Cellulose enthalten, da die Anfangs-Restmüllmaische bei Material aus Wittstock zwischen 6–7% und bei Material aus Quarzbichl ca. 17% Cellulose der Trockensubstanz enthielt, wobei die Trockensubstanz wiederum bei Ausgangsmaterial Wittstock nur zwischen 30–35% und bei Quarzbichl zwischen 60–65% organischer Trockensubstanz aufwies (Glühverlust).

Einen akzeptablen Glühverlust-Wert GV der zu deponierenden Reaktorsedimente in Richtung TASI von 5% (Wagner 1998) erbrachte jedoch nur das Wittstockmaterial, vermutlich aufgrund eines hohen Sand- oder Ascheanteils (5,5% bzw. 7,6% GV im Sediment). Ansonsten stagnierten die GV-Werte für Quarzbichl-Reaktorsedimente bei meist 30–40%. Diese Sedimente sind aber, wie zu Anfang unter 3.1 auf mehrfache Weise gezeigt, als biologisch inert zu betrachten, was letztlich auf die stattgefundenen Abbau- oder Umbauraten zurückzuführen sein muß.

Bei den hohen oTS-Abbauraten, die auch durch eine außergewöhnlich hohe Gasbildung abgesichert sind, hätte sich eigentlich im Verlaufe des Abbaus bei Quarzbichl-Materialien durch Abreicherung der Organik ein geringerer Glühverlust in den Reaktorsedimenten als beobachtet einstellen müssen. Dieser Effekt wurde aber durch die notwendige, starke Homogenisierung bei der Probenahme des Sediments etwas verwischt. Andererseits kam bei der Probenahme des Reaktorablaufs zu wenig schwere Anorganik in die ablaufende Suspension, so daß sich also der auf Anorganik bezogene Glühverlust wegen dieser experimentellen Schwierigkeiten als Kenngröße zur Charakterisierung des Abbaus nur bedingt eignen konnte.

3.6. Über die Gasbildung ermittelte oTS-Abbaugrade

Die konventionell über oTS (heterogene Suspension !) bestimmten Abbau- bzw. Schwundraten sind zu gering mit Hinblick auf die Gaserträge pro kg oTS (Tab. 1). Man erkennt jedoch in Tab. 1 (9. Querspalte), daß die über gekoppelten Gaserträge abzuleitenden Abbauraten bei Lauf Q1 am höchsten sein mußten (mind. 797 NI/kg oTS), ferner daß auch die 1-stufige Variante RM1 mit 14,2 Tagen Verweilzeit (Q1, Q7, s. Tab. 1, 3. Querspalte) Abbauraten (über die oTS-Bilanz ermittelt) von über 70% hervorbringen konnte, Tab.1 (7. Querspalte). Wenn man außerdem bedenkt, daß sich in der Rest-

oTS höhere unbekanntete Anteile von Kunststoffen verbergen (M. Pichler, I. Kögel-Knabner unveröff., mit C<sup>13</sup>-CPMAS-NMR-Spektroskopie bestimmt), so muß bei gleichzeitig 6–11% TS-Anteil Lignin im Input ein noch höherer Abbaugrad vermutet werden. Bemerkenswert ist die hohe Gas- bzw. Methanbildung in der als Hydrolyse konzeptionierten Stufe RH (s. Tab.1, 8. Spalte GBR) bei hydraulischen Verweilzeiten von nur 2,3 oder 4,3 Tagen (siehe Tab1, 2. Spalte), da allgemein bei anaeroben Prozessen 7 Tage Verweilzeit als unteres Limit betrachtet werden (s. Schober et al. 1999).

Eine echte separate Hydrolyse in der 1. Reaktorstufe mit Gasbildungsraten unter 10% konnte erst durch extrem kurze Verweilzeiten ( $W_{i3} = 1,25d!$ ) und durch Temperaturen ab 60°C erzielt werden (Q5–Q7, s. Tab. 1, 8. Querspalte), wobei der Gesamt-oTS-Abbau sogar bis auf 79,6% bei Q6 in der Suspension stieg (bestimmt über oTS). Eine strikte Trennung zwischen Hydrolyse und Methanbildung bietet aufgrund des höheren Methananteils in der Methanstufe deutliche energetische Vorteile, da Hydrolysegase wegen eines hohen CO<sub>2</sub>-Anteils oft nicht brennfähig sind.

Bei 100% oTS-Abbau (Lignin = inert) kann man 807 NI/kg oTS als theoretische Gesamtausbeute zugrunde legen. Zu dieser Zahl gelangt man, wenn man 3% Fett (1,42 l Biogas/g), 13% Eiweiß (über Kjeldahl-N bestimmt; 0,89 l Biogas/g), 17% Cellulose (0,96 l Biogas/g), 8,5% ligninartiges Material (Null Biogas) und 58,5% sonstige Kohlenhydrate wie Stärke (0,83 l Biogas/g) bei der verwendeten Restmüllcharge bezogen auf oTS zugrunde legt (Quarzbichl-Restmüllfraktion). Die Gas-konversionsfaktoren stammen über die Buswell-Gleichung aus der Arbeit von Langhans (1997).

Mit den gleichen Konversionsfaktoren erzielt man eine sehr gute Übereinstimmung zu andersweitigen Biogaserträgen und oTS-Umsatzraten, so daß daran nicht gezweifelt wird. So wären bei Essensresten 1076 NI Biogas/kg theoretisch möglich gewesen (Schober et al. 1999). Es wurden aber durch Vergärungen bei 55°C experimentell Gaserträge von max. 885 NI/kg oTS erzielt, was 82% Abbau entspricht, gerechnet mit 37,1% Fett, 7,1% Cellulose, 27% Eiweiß (geschätzt) 2,8% Lignin, 26% Kohlenhydrate (bei Schober et al. max. 85% Abbau genannt).

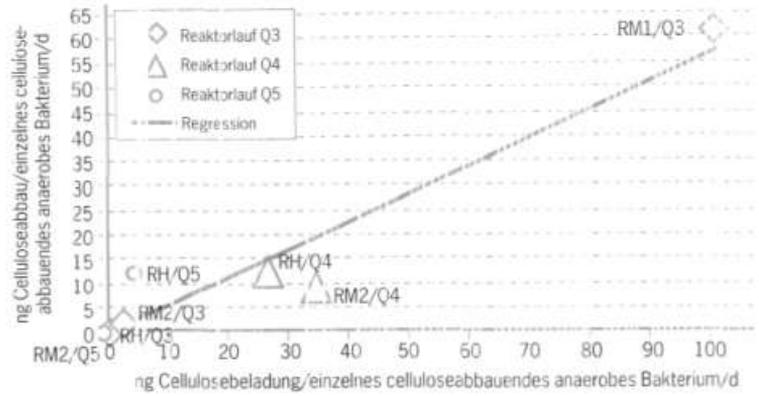


Abb. 6: Reaktionsabhängigkeit zwischen Cellulosebelastung in ng pro einzelnes Bakterium und Tag und ng Celluloseabbau pro einzelnes Bakterium und Tag. Lineare Korrelation („Reaktion 1. Ordnung“) trotz unterschiedlicher Reaktorstufe und Beladungsrate.

Wenn man aber hier die gemessenen 797 NI zu den aufgrund der vorliegenden Stoffgruppenanalyse theoretisch möglichen 807 NI Biogas in Beziehung setzt, käme man auf 98% Abbau! Bei verschiedenen Vergärungsanlagen für kommunale Abfälle mit ähnlichen Beladungsraten (s. Tab.1) fand man nicht mehr als 240–530 NI Gas/kg oTS, wobei 500 NI/kg oTS etwa 150 NI/Mg Bioabfall-Input entsprechen (Tidden 1992). An diesen Beispielen aus der Literatur mag man die hier beobachteten außergewöhnlich hohen Gaserträge und die damit direkt gekoppelten sehr hohen oTS-Abbauraten erkennen.

Die zu Anfang vorgestellten Ergebnisse zur Charakterisierung der Inertheit der Restmaterialien erhalten daher eine fundierte Grundlage und Bestätigung. Man kann tatsächlich von einer ultimativen Vergärung sprechen, die fast nichts für einen weiteren Umsatz in einer belüfteten Nachrotte übrig läßt. Damit können auch die Befürchtungen derer für eine ungenügende Inertisierung durch eine mechanisch biologische Abfallbehandlung entkräftet werden (Wagner 1998). Die Befürchtungen orientieren sich dabei allerdings primär an dem unspezifischen Glühverlustwert (GV = %oTS bezogen auf Gesamttrockensubstanz) von 5%, der in der TASI derzeit festgelegt ist.

### 3.7. Spezifischer Celluloseabbau

Für den Feststoffumsatz – dabei ist in der Literatur allgemein der Celluloseabbau der limitierende Faktor –

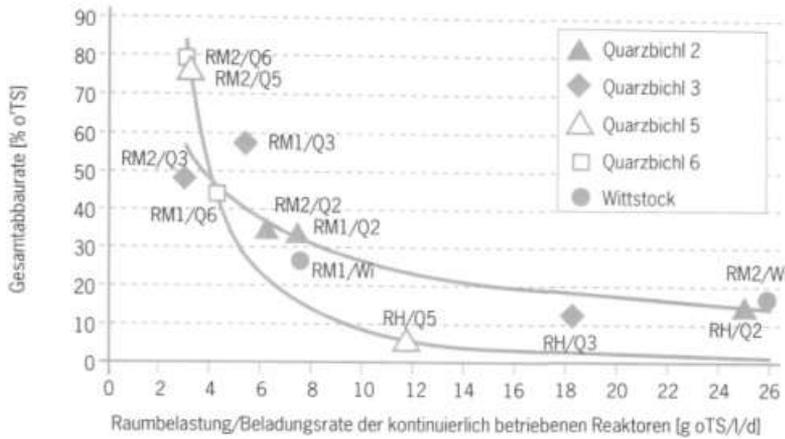


Abb. 7: Abhängigkeit der Abbauraten von der Raumbelastung bzw. Beladungsrate in den untersuchten Reaktorvarianten mit Restmüll aus Wittstock und Quarzbichl. Keine Abhängigkeit zwischen Abfallherkunft und/oder Reaktorstufe.

ist die „Fitness“ der Bakterien entscheidend, die sich z. B. aus dem Quotienten Celluloseabbau (ng Cellulose/d) pro Cellulosebeladung (ng Cellulosebeladung/d) pro einzelnes celluloseabbauendes Bakterium ergibt. Die Darstellung des spezifischen Celluloseabbaus offenbart wie schon in früheren Untersuchungen mit kommunalem Bioabfall (Scherer et al. 1992), mit synthetischem Bioabfall (Scherer et al. 1997), sowie ebenfalls mit den hier verwendeten Restmüllarten (Wittstock u. Quarzbichl, Scherer et al. 1998) eine lineare Abhängigkeit: Je höher die Cellulosebeladung/d, um so leistungsfähiger werden die Bakterien/d. Dieses Erkenntnis-, konträr zur oTS-Beladungsrate-, hat Konsequenzen für die Reaktorkonzeption. So ist es für den Stoffumsatz unerheblich, welche Abfallart vorliegt und ob der Celluloseabbau im Hydrolysereaktor RH mit 2,1–4,3 d HRT (bei Q5–Q7 echte Hydrolyse, s. Text) oder im Methanreaktor RM1 oder RM2 mit HRT<sup>-</sup> 7,1–14,2 d abläuft, s. Abb. 6. Damit deckt sich das Ergebnis nicht mit Befunden und Theorien (Trösch und Schmid-Staiger, 1995), daß der Celluloseabbau durch H<sub>2</sub>-Produktion im Hydrolysereaktor oder in einem einstufigen Reaktorsystem (hier RM1) gehemmt wird und der Celluloseabbau aus diesem Grund auf den Methanreaktor bei einer zweistufigen Version zu verlagern wäre. Die überaus hohe Präsenz von H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-Verwertern bei thermophiler/hyperthermophiler Betriebsweise, s. Abb. 5, liefert aber eine passende Er-

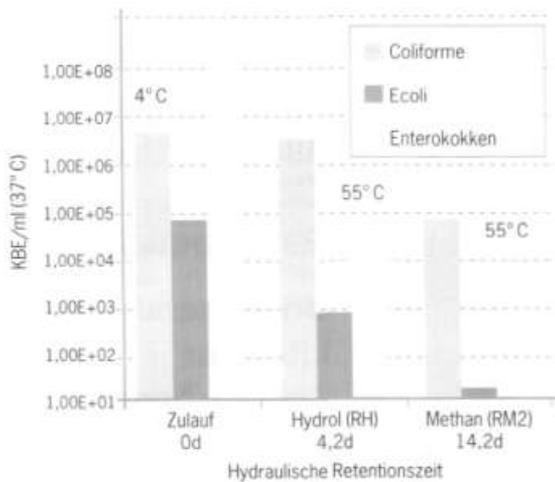


Abb. 8: Hygieneuntersuchung über spezifische Bakteriengruppen im Zulauf, in der Hydrolyse- und Methanstufe einer Vergärung von Restmüll (Quarzbichl 3) Temperatur = Reaktorbedingungen, Bakterien bei 37°C bestimmt.

klärung dazu ab, warum es offenbar keine Probleme durch H<sub>2</sub>-Hemmung gab.

Auch sprechen die Daten für kein alternatives Konzept mit geringer oder fehlender Durchmischung (z. B. Pfropfenstrom) und ergeben auch keine Notwendigkeit für eine relativ aufwendige Massenaufkonzentrierung hinter der 1. Stufe zwecks Erhöhung des oTS-Abbaugrades, sei es durch Zentrifugation oder Filtration. Das entwickelte ultimative Vergärungsverfahren erübrigt auch spezielle kostentreibende Vorbehandlungsverfahren, wie z. B. Behandlung mit Natronlauge, Ultraschall, Anwendung hoher Drücke kombiniert mit hohen Temperaturen und Wasserdampf-, um nur einige in der gegenwärtigen Diskussion zu nennen. Für die außergewöhnlich hohen Abbauraten wird momentan im wesentlichen die intensive Stoffaufbereitung vor der Vergärung und die spezielle Mikrobiologie bei außergewöhnlich hohen Temperaturen (Hypertherm<sup>®</sup>-Verfahren, pat.) verantwortlich gemacht.

Auch aus diesem Grund erscheint der sich nicht auf Anorganik beziehende C/L-Quotient oder der Koeffizient von Helfrich et al. (1998) besser geeignet zur Charakterisierung des oTS-Abbaus als ein Glühverlustwert zu sein. Ein Nullwert bei einem biologischen Test, s. AT<sub>4</sub>-Ergebnisse, kann ebenfalls irreführend sein, wenn der biologische Test nicht ausreichend kalibriert wird.

### 3.8. Keine Probleme mit der Hygiene bei hyperthermophilen Bedingungen

Hygieneuntersuchungen zeigten, daß in der 1. Stufe bei 55°C Reaktortemperatur E.coli (10<sup>3</sup>–10<sup>4</sup>) und Enterokokken (10<sup>5</sup>–10<sup>7</sup>) meist in der zweiten Reaktorstufe unter die Nachweisgrenze sanken (10<sup>1</sup>/g TS). Enterokokken sind im allgemeinen weniger hitzeempfindlich als etwa die nach Bioabfallverordnung untersuchungspflichtigen Salmonellen, wobei Larsen et al. (1994) Grenzwerte von 10<sup>2</sup>/g TS als ausreichend angeben. Salmonellen, falls vorhanden, wurden entsprechend bereits in der 1. Stufe abgetötet (nicht abgebildet). Damit ist die Hygienisierung erwartungsgemäß gesichert (für eine Restmüllbehandlung nicht unbedingt erforderlich).

### 3.9. Kapillarelektrophorese CE - Daten zur Restmüllvergärung

Die verwendete Kapillarelektrophorese wurde direkt mit 1:100 Verdünnungen der zentrifugierten und filtrierten Reaktorüberstände durchgeführt. Die Methode war im wesentlichen für wässrige Medien entwickelt (Boden 1997). Ein Schwerpunkt der Analytik lag auf der Trennung von Propionat und Lactat.

Um die Kapillarelektrophoresebestimmungen zu dokumentieren, ist hier exemplarisch einmal die Temperaturvariation der 1. Reaktortufe 65°C bei der bevorzugten Variante Q6 (echte Hydrolyse, siehe Text zuvor) und der 2. Stufe 55°C als Tabelle dargestellt, vgl. Tab. 2. Gemäß Tab. 1 (7. Querspalte) wäre die oTS-Abbauraten (bestimmt über die oTS-Bilanz) in der einstufigen Variante RM1 mit 10 Tagen hydraulischer Verweilzeit deutlich schlechter als die der 2-stufigen Variante RM2 mit insgesamt 18,5 Tagen gewesen (44,0 zu 79,6%), während die wohl korrekteren oTS-Abbauraten (über die Gasbildung bestimmt) ähnliche Abbauraten ergaben (649,4 zu 694,7 Nl/kg oTS), d. h. sie lagen bei 80,5 zu

86,1% oTS-Abbau (bezogen auf den theoretisch möglichen Maximalgaswert). Dementsprechend war auch das Carbonsäuremuster in der Kapillarelektrophorese ähnlich (s. Tab. 2), wenngleich deutlich besser für die 2-stufige Variante (448 mg/l zu 2078 mg/l Essigsäureäquivalente). Insbesondere die problematischen Propionsäurewerte waren bei Q6/RM1 etwa 6 mal so hoch wie bei Q6/RM2. So ergibt sich ein wesentlich differenzierteres Bild als bei oberflächlicher Betrachtung der Gasbildung.

Gleichzeitig läßt sich aus den Elektropherogrammen die Salzfracht über die Chloridkonzentration abschätzen, die lediglich ca. 80 mM betrug (s. Tab. 2; nicht abgebildet NH<sub>4</sub>-N: 600–900 mg/l, kationisch).

#### 4. Zusammenfassung

Ziel war es, verschiedene thermophile (55°C) und hyperthermophile Konzepte zur Naßvergärung von 40–60 mm Restmüllfraktionen aus Wittstock und Quarzbühl mit ein- und mehrstufigen, durchmischten Reaktoren im Labormaßstab zu testen, um mit Hinblick auf die TASI einen möglichst ultimativen Stoffabbau zu gewährleisten. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Reaktorsediment auf der Deponie entsorgt wird, während das Prozeßwasser weitgehend im Kreislauf gefahren wird. Daher galt dem Reaktorsediment besondere Beachtung.

Es zeigte sich dabei, daß ein einfaches zweistufiges Naßvergärungskonzept mit hyperthermophiler Stufe, – ohne besondere Masseaufkonzentrierung hinter der 1. Stufe –, mit 65°C in der 1. Stufe (Verweilzeit 4,3d) und 55°C in der 2. Stufe (Verweilzeit 14,2d) bis zu 79,6% Abbau der organischen Trockensubstanz (oTS) aufwies (direkt über oTS-Bilanz-Zulauf bestimmt), wobei aufgrund nachgewiesener höherer Kunststoffanteile (<sup>13</sup>C-CPMAS-NMR-Spektroskopie, M. Pichler, I. Kögel-Knabner, TUM-Weißenstephan unveröff.) und einer inerten Ligninfraktion von 6–11% des Inputs der Abbau von verfügbarem oTS noch größer als 80% eingestuft werden muß. Die außergewöhnlich hohen Biogaserträge mit bis zu 797 Normliter/kg oTS Input betragen sogar 98% der berechneten, theoretisch möglichen Gasausbeute (Lignin = inert). In der Literatur existieren für eine Müll-Bioabfallmatrix lediglich Daten von 240–530 l/kg oTS (Tidden 1992).

Ein in etwa TASI-konformer Glühverlust der Reaktorsedimente von nahezu 5% konnte nur mit relativ mineralischem Wittstock-Input erzielt werden. Die zu deponierenden Sedimente der bevorzugten Verfahrensvarianten erfüllten jedoch alle den Atmungstest AT<sub>4</sub> mit 0,5–2 mg O<sub>2</sub>/g TS/4d (diskutierter Grenzwert: 5–10 mg) und den Gärtest GB<sub>21</sub> mit ≤ 1–6,6 Nml/g TS/21d (diskutierter Grenzwert: 20–30 Norm-ml) deutlich, was auch durch einen neu formulierten finalen Cellulose:Lignin-Quotienten von 0,4–0,8 des Reaktorsediments bestätigt werden konnte. Dieser Quotient für den biogenen Feststoffabbau wurde in Analogie zum BSB<sub>5</sub>/CSB-Quotienten bei der Abwasserreinigung formuliert (Scherer et al. 1998). Ein neuer Test auf Beeinflussung der Photosyntheseaktivität kam ebenfalls zum Einsatz, der für das Reaktorsediment eine scheinbare Rottedauer von 110 Tagen ergab (Helfrich et al. 1998 u. unveröff.). Damit werden die sehr hohen oTS-

Probennummer Probenart Konzentration	Q-6/98025 Zulauf (65°C)		Q-6/98027 Ablauf RH (65°C)		Q-6/98026 Ablauf RM1 (65°C)		Q-6/98028 Ablauf RM2 (55°C)	
	mg/l	mM	mg/l	mM	mg/l	mM	mg/l	mM
Chlorid (Salze)	597,2	16,8	709,6	19,8	689,2	19,4	577,4	16,3
Sulfat/Nitrat	376,5	3,9	402,6	4,2	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Formiat/Fluorid	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	72,0	3,7	n.n.	n.n.
Phosphat	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Carbonat	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Acetat	1835,0	30,8	2400,8	40,0	365,8	6,0	217,0	3,6
Propionat	778,5	10,5	917,6	12,4	1254,1	16,9	231,0	3,1
Lactat	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Iso/n-Butyrat	2591,2	29,4	2832,5	32,1	170,9	1,9	n.n.	n.n.
Iso-Valeriat	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
N-Valeriat	298,2	2,9	427,0	4,2	288,7	2,8	n.n.	n.n.
Iso/n-Capronat	450	3,9	428,0	3,7	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Heptanat	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.
Gesamtcarbonsäuren in mm als mg/l	5953	99,2	7006	116,7	2078	34,6	448	7,5
Essigsäureäquivalente (M = 60 g/l) umgerechnet								

Bei der 1:100 Probenverdünnung sind Konzentrationen < 1 mM nur qualitativ zu detektieren, n. n. = nicht nachweisbar, n. a. = nicht auswertbar

Abbauraten bzw. die außergewöhnlich hohen Gasbildungs-raten (50% mehr als bei Referenzverfahren) zusätzlich plausibel.

Auch die Schwermetall- und AOX-Werte, ferner die TOC-Fluorwerte der Reaktorsedimente unterschritten alle die festgelegten bzw. diskutierten Grenzwerte. Damit kann das extrem schnelle Verfahren sogar ohne Nachkompostierung auskommen, was es damit ko-

Tabelle 2:  
Ergebnisse der Kapillarelektrophorese mit Restmüll – Quarzbühl 6 Verfahrensvarianten s. separates Schema 1, Tabelle 1 und Text

#### 150 RUBRIZIERUNG

Prof. Dr. P. A. Scherer,  
Dr. sc. nat. G.-R. Vollmer

Entwicklung eines einfachen Hochleistungsvergärungsverfahrens zur Behandlung von Restmüll

- ◆ Mechanisch-biologische Abfallbehandlung  
*municipal solid waste*
- ◆ Abfall  
*garbage*
- ◆ Restmüll  
*refuse*
- ◆ Vergärung  
*anaerobic digestion*
- ◆ Biogas  
*methane*
- ◆ Mikrobiologie  
*microbiology*
- ◆ Hygiene  
*hygienic risk*
- ◆ Kompost  
*compost*

Hyperthermophile Vergärungsverfahren sind sehr schnell, d. h., sie erzielen in weniger als 3 Wochen einen weitestgehenden Abbau organischer Substanz und erzeugen dabei inerte Reststoffe. Eine Nachrotte erscheint daher nicht nötig. Das Verfahren wirkt aufgrund der hohen Dauerbetriebstemperaturen pasteurisierend und ist sehr preiswert (Energieüberschuß, keine Nachrotte). Außer für Restmüll erscheint das Verfahren auch für andere Materialien prädestiniert, z. B. für Essenreste u. Kovergärungen. Es fehlt noch eine Pilotanlage.

stengünstiger als andere MBA-Verfahren machen würde. Eine Abfallvergärung mit inerten Gärreststoffen ohne belüftete Nachrotte stellt ein absolutes Novum dar.

Aufgrund der pasteurisierenden Dauerbetriebsbedingungen war eine Abtötung (um bis zu 6-7 Zehnerpotenzen) von hygienerlevanten Keimen unter die Nachweisgrenze gegeben ( $10^{-1}$ /ml). Damit eignet sich dieses Verfahren auch exzellent für die Vergärung von hygienisch problematischen Essensresten oder für Ko-Vergärungen.

#### Danksagung

Für die Ergebnisse verantwortlich waren die Diplom-Ingenieure/innen M. Eckers, T. Fakhouri, S. Martensen, M. Ma-Nlep, A. Meyer, D. Otzen, I. Theilen sowie die Mitarbeiter/innen G. Rösler, D. Taubitz und M. Unbehauen. Ihnen gilt unser besonderer Dank.

#### Literaturangaben:

(siehe auch Homepage <http://scherer-anaerobiotec.home.ml.org>.)

- Amin, M., Lepom, P. (1995)  
Stoffgruppenanalyse zur Charakterisierung des biologisch abbaubaren Anteils der organischen Substanz in Müllproben. Müll und Abfall 4/95, S. 242-250.
- Becker, G., Kötter, A., Gallenkemper, B. (1996)  
Bewertungskriterien für das Rottstadium von Bioabfallkomposte. In: Neue Techniken der Kompostierung (R. Stegmann Hrsg.), S. 7-19, Economica Verlag, Bonn.
- Beffa, T., Blanc, M., Aragno, M. (1996)  
Obligately and facultatively autotrophic, sulfur- and hydrogen oxidizing thermophilic bacteria isolated from hot composts. Arch. Microbiol. 165: 34-40.
- Boden, Jan (1997 pers. Mitt.)  
Ingenieurbüro für Chem. Analytik, Nollböhistr. 19, 65468 Trebur
- Bookter, T., Ham, R. (1982)  
Stabilisation of solid waste in landfills. J. Environ. Engin. 108: 1089-1100.
- Goering, H.K., Van Soest, P.J., (1970)  
„Forage Fiber Analysis“, Agriculture Handbook No. 379, U.S. Department of Agriculture, S. 1-20, Washington, D.C.
- Hennecke, D.; Kördel, W. (1997)  
Pers. Mitt., Teilvorhaben 4/1, BMBF-Vorhaben „Mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“, FhG-Institut für Umweltchemie und Ökotoxologie, Schmallenberg, unveröff.
- Höring, K., Ehrig, H.-J. (1998)  
Stabilisierungsgrad und Emissionsverhalten mechanisch-biologisch vorbehandelter Restabfälle. In: Abfallwirtschaft am Wendepunkt (K. J. Thome-Kozmiensky, Hrsg.), S. 427-464, TK-Verlag, Neuruppin, ISBN 3-9 24511-86-1.
- Larsen, H.E., Munch B., Schlundt, J. (1994)  
Use of indicators for monitoring the reduction of pathogens in animal waste treated in biogas plants. Zbl. Hyg. 195: 544-555.
- Loll, U. (1998)  
Sickerwasser aus Kompostierungs- und Anaerobanlagen. Entsorgungspraxis 7-8/98: 52-58
- Müller, W. (1995)  
Leistungsfähigkeit der biologischen Restmüllbehandlung und Auswirkungen der biologischen Vorbehandlung auf die Stabilität des zu deponierenden Materials. Band 14 der Studienreihe Abfall Now, Verlag Abfall Now e.V., Stuttgart.
- Müller, W., Fricke, K. (1997)  
Vergärungsverfahren als integraler Bestandteil der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung-Untersuchungen auf der MBA Quarzbühl. In: Abfallwirtschaft am Wendepunkt (K. J. Thome-Kozmiensky, Hrsg.), S. 351-370, TK-Verlag, Neuruppin, ISBN 3-9 24511-86-1, identisch mit Aufsatz Fricke, Müller, Hake und U. Turk im Abfallwirtschaftsjournal 11/97.
- Prosky, L., Asp, N.-G.; Furda, I.; Devries, J.W.; Schweizer, T.F.; Harland, B.F. (1984)  
„Determination of total dietary fiber in food products and total diets: interlaboratory study“, Journal of the Association for Official Analytical Chemistry Nr. 67, S. 1044-1052.
- Robertson, J.B.; Van Soest, P.J., (1981)  
„The detergent system of analysis and its application to human foods“, In: James WPT, Theander O (eds): The analysis of dietary fiber in food, Marcel Dekker, New York, 123-158.
- Scherer, P. A. (1978)  
Isolierung und Charakterisierung der CO<sub>2</sub>-Reduktase aus Clostridium pasteurianum, ein neues Eisen-Schwefel Molybdoprotein. Ruhr-Universität Bochum/Philipps-Universität Marburg.
- Scherer, P. A., Schultz, K.-H. Meyer-Pittroff, R. (1990)  
Comparisons of methods to characterize the biodegradation rate during solid state fermentations. In: Dechema Biotechnology Conferences, Vol. 4 (D. Behrens, P. Krämer, eds.), S. 661-665.
- Scherer, P. A., Kirchmann, B., Kübler, H. (1992)  
Optimierung der Hydrolysestufe einer mehrstufigen Vergärungsanlage für organische Siedlungsabfälle durch Bilanzierung biochemischer Stoffgrößen und Quantifizierung spezifischer Bakteriengruppen. In: Getrennte Wertstofffassung und Biokompostierung 2 (K. J. Thome-Kozmiensky, P. A. Scherer, Hrsg.), S. 273-298, EF Verlag für Energie und Umwelt technik GmbH Berlin (jetzt TK-Verlag, Neuruppin).
- Scherer, P. A. (1996)  
Biogas-Vergärungstechniken mit Nachrotte in der Abfallwirtschaft – Ein Überblick unter Einbeziehung ökologischer Vorteile gegenüber reinen Kompostierungsanlagen. In: Bioabfallmanagement '96, S.183-241, Rheinisches Institut für Ökologie, Melchiorstr. 14, 50670 Köln.
- Scherer, P., Vollmer, G.-R., Otzen, D., Theilen, I. (1997)  
Microbiological investigations of the anaerobic digestion of bio-waste and of residual municipal refuse. BIOSpektrum Sonderheft 3/97: 62.
- Scherer, P., Otzen, D., (1997)  
A simplified technique to obtain high numbers of anaerobic cellulose degraders. BIOSpektrum Sonderheft 3/97: 93.
- Scherer, P. A., Otzen, D., Theilen, I., Taubitz, D. (1998)  
Mikrobiologisch-biochemische Charakterisierung von Prozessvarianten zu erschöpfender Vergärung von Restmüll: Finaler Cellulose/Lignin Quotient, spezifischer Celluloseabbau/Bakterium/d, Kapillarelektrophorese. In: BMBF Statusseminar „Verbundvorhaben mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen“ (Wissensch. Leitung J. Jaschinski, UBA; K. Soyev, Univ. Potsdam), S. 121-132, Verlag Univ. Potsdam.
- Speece, R. E. (1996)  
Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters. Archae Press, Nashville, ISBN 0-9650226-0-9.
- Spörri, K. (1977)  
Die Cellulosebestimmung, eine überarbeitete Untersuchungsmethode zur Beurteilung von Kompostproben. Müll u. Abfall (5) 77: 149-152.
- Sufflita, J., Gerba, C., Ham, R., Palmisano, A., Rathje, W., Robinson, J. (1992)  
The world's largest landfill-a multidisciplinary investigation. Environm. Sci. Technol. 26(8): 1486-1495.
- Trösch, W., Schmid-Staiger, U. (1995)  
Mechanismus des Feststoffabbaus unter anaeroben Bedingungen. In: Biologische Abfallbehandlung II (K. Wiemer, M. Kern, Hrsg.), S. 529-540, Baeza Verlag, Witzhausen
- Tseng, D. Y., Vir, R., Trana, S. J., Chalmers, J. J. (1996)  
A Fourier-transform infrared spectroscopic analysis of organic matter degradation in a bench-scale solid substrate fermentation (composting) system. Biotechnol. Bioengin. 52: 661-671.
- Updegraff, D. M. (1969)  
Semimicro determination of cellulose in biological materials. Anal. Biochem. 32: 420-424.
- Weiland, P. (1989)  
Industrieabfälle und Möglichkeiten für die Vergärung. In: Vergärung fester organischer Abfälle (A. Pfrirer, Hrsg.) ANS-Heft 16, S. 54-83, ANS e.V., Mettmann (1989)
- Zinder, S.H. (1994)  
Synthrophic acetate oxidation and „reversible aceto-genesis“. In „Acetogenesis“ (H.L. Drake, ed.), S. 386-415, Chapman and Hall, New York/London.

#### Anschriften der Verfasser

- Prof. Dr. Paul A. Scherer  
FH Hamburg  
Forschungsschwerpunkt „Umwelt- und Bioverfahrenstechnik“  
21033 Hamburg-Bergedorf, Lohbrügger Kirchstraße 65  
Fax: (0 40) 4 28 91-26 81
- Dr. sc. nat. Gerd-Rainer Vollmer  
Biotechnologie Nordhausen GmbH (BTN GmbH)  
99734 Nordhausen (Thür.) Kommunikationsweg 11  
Tel.: (0 36 31) 65 69 61, Fax: (0 36 31) 65 69 97



## Mehr Gewinn, Kosten runter bei Biogas

### Einsatzstoffkosten halbieren

**Wir beraten und planen für Biogasanlagenbetreiber,  
die es satt haben,  
die ständigen Kostensteigerungen mitzutragen und überwiegend  
Gras, Strohmist und andere billige Einsatzstoffe einsetzen wollen.**

Die Kosten für Equipment und **Einsatzstoffe steigen**,  
der **Strompreis bleibt aber gleich**.

Die **Gewinne sinken stetig**.

Dabei sind die Einsatzstoffe mittlerweile für 60% der Kosten  
verantwortlich.

Wir zeigen Biogasanlagenbetreibern, die bereits eine (fast)  
abbezahlte Biogasanlage haben, wie sie den immensen  
Kostenblock Einsatzstoffe knacken und die  
Einsatzstoffkosten auf Zwei-Drittel senken oder sogar  
Halbieren können.

Sie produzieren Biogas zu niedrigsten Kosten und sind auch in  
den nächsten 10-20 Jahren immer konkurrenzfähig.

**80% Förderung für die Beratung**

41

**Kontaktieren Sie uns und fordern Sie unsere  
„Die 9 besten Möglichkeiten, um die Einsatzstoffkosten bei Biogasanlagen  
drastisch zu senken“ an.**

**08734-939770 oder [IchWill@mehrGewinnbeiBiogas.de](mailto:IchWill@mehrGewinnbeiBiogas.de)**

**[www.mehrGewinnbeiBiogas.de](http://www.mehrGewinnbeiBiogas.de)**

# Sie wollen Gras, Stroh (Getreide, Mais) und Strohmist rühren ohne ständig Probleme zu haben?

Sie machen gerade Ihre Biogasanlage zukunftsfähig und wollen kostengünstige Einsatzstoffe einsetzen und trotzdem keine Probleme mit den Rührwerken haben.

## Warum Sie sich dann das Hydrolyse-Rührwerk 4.0 anschauen sollten

Beim Hydrolyse-Rührwerk 4.0 wurde das Peters-Rührwerk speziell für den Hydrolysebetrieb ausgerüstet:

- ✓ **25 Jahre Know-how** der Fa. Peters in der Rührwerksherstellung
- ✓ **15 Jahren Know-how** in der Batch-Hydrolyse-Entwicklung von Snow Leopard Projects
- ✓ **Getriebewert von 2** – das heißt, dass das Getriebe doppelt so stark ausgelegt ist, wie der Antriebsmotor. Das gewährleistet einen sicheren Betrieb der Hydrolyse auch bei einer Raumbelastung von  $>50 \text{ kg oTS/m}^3\text{d}$ .
- ✓ **Sehr geringer Stromverbrauch** im Dauerbetrieb als Langsamläufer und dennoch hohe Spitzenleistung, wenn es erforderlich ist.
- ✓ **Temperaturstabil**, auch wenn die Hydrolyse bei  $62 \text{ °C}$  betrieben wird.
- ✓ **Nur noch 1 Rührwerk** – statt früher 2
- ✓ **Unempfindlich** gegen Schwimmschichten

### Und im Fermenter? Kein Problem.

Dieses Rührwerk kann natürlich auch in einem Fermenter eingesetzt werden. Dann haben Sie Ruhe.

### SLP-Batch Hydrolyse Know-How Inside

Jetzt Angebot anfordern und von geballtem Know-How profitieren.



**Beratung und Angebot anfordern unter  
[IchWill@mehrGewinnbeiBiogas.de](mailto:IchWill@mehrGewinnbeiBiogas.de)**

# Biologische Performance – Biogas Mehrertrag

## SLP Batch Hydrolyse vs. KTBL

### Praktisches Beispiel: Biogasanlage Malching

**Der Umweltgutachter bestätigt einen Mehrertrag von 134% über KTBL in 2018 & 2019.**

Die Maisernte 2018 war aufgrund der Trockenheit im Rottal, Niederbayern, nicht gut.

Folge war, dass der Biogasanlage zum ersten Mal seit ihrer Inbetriebnahme vor 10 Jahren im April /Mai 2019 der Mais ausging.

Stattdessen fütterte der Betreiber Gras, GPS, Pferdemit, Rindermist und einige wenige Tonnen Winterweizen oder CCM.

Selbst ohne Mais konnte die Vollast gefahren werden – es gab keinen Einbruch in der Gasproduktion.

Und der Umweltgutachter bestätigt in seinem Gutachten 133,5 % bzw. 134,5% über KTBL.



#### Anlagendaten

##### Biogasanlage

Fermenter	1.000 m <sup>3</sup>
Hydrolyse	2x 200 m <sup>3</sup>
Endlager	3.000 m <sup>3</sup>

(wegen hoher Schweinegüllemenge)

##### BHKW Daten

1. Stufe	250 kW (2009)
2. Stufe	250 kW (August 14)

#### Fütterungsdaten für ~ 470 kW Vollast (Höchstbemessungsleistung)

November 2019:	16t/d Maissilage 11 cbm Gülle (Schwein/Rind)
Juli 2019:	11 t/d Grassilage 7 t/d GPS 1 t/d Mais 1 t/d Pferdemit 0,5 t/d Winterweizen 12,5 cbm Gülle (Schwein/Rind)

Snow Leopard Projects GmbH  
 Marktplatz 23 · D-94419 Reisbach  
 Fon: +49-(0)8734-93977-0  
 Mail: [info@snow-leopard-projects.com](mailto:info@snow-leopard-projects.com)  
[www.snow-leopard-projects.com](http://www.snow-leopard-projects.com)



Auszug aus dem Umweltgutachten 2018:

#### 3.1.4 Plausibilitätsprüfung

Zur Prüfung der Plausibilität der vom Anlagenbetreiber erfassten Substratdaten wurde vom Umweltgutachter die Substrateffizienz über KTBL-Standarderträge aus den angegebenen Substratmassen errechnet. Für die spezifischen Energieausbeuten der Substrate wurden KTBL-Werte<sup>4</sup> herangezogen und dem tatsächlichen Stromertrag der Anlage gegenübergestellt. Die KTBL-Werte wurden auf den elektrischen Wirkungsgrad der Anlage umgerechnet. Für die begutachtete Anlage ergibt sich für den Berichtszeitraum eine **Substrateffizienz von 134,5 % KTBL**. Somit sind die Mengenangaben der eingesetzten Substrate für die begutachtete Anlage

Auszug aus dem Umweltgutachten 2019:

#### 3.1.4 Plausibilitätsprüfung

Zur Prüfung der Plausibilität der vom Anlagenbetreiber erfassten Substratdaten wurde vom Umweltgutachter die Substrateffizienz über KTBL-Standarderträge aus den angegebenen Substratmassen errechnet. Für die spezifischen Energieausbeuten der Substrate wurden KTBL-Werte<sup>7</sup> herangezogen und dem tatsächlichen Stromertrag der Anlage gegenübergestellt. Die KTBL-Werte wurden auf den elektrischen Wirkungsgrad der Anlage umgerechnet. Für die begutachtete Anlage ergibt sich für den Berichtszeitraum eine **Substrateffizienz von 133,5 % KTBL**. Somit sind die Mengenangaben der eingesetzten Substrate für die begutachtete Anlage

**Haben Sie Interesse mehr zu erfahren?  
Rufen Sie uns an 08734-939770**

oder schicken Sie eine Email: [w.danner@snow-leopard-projects.com](mailto:w.danner@snow-leopard-projects.com)

---

Snow Leopard Projects GmbH  
Marktplatz 23 · D-94419 Reisbach  
Fon: +49-(0)8734-93977-0  
Mail: [info@snow-leopard-projects.com](mailto:info@snow-leopard-projects.com)  
[www.snow-leopard-projects.com](http://www.snow-leopard-projects.com)



# Nachrüstung einer Batch-Hydrolyse BGA Gradec / Kroatien

Von 1 MW<sub>el</sub> auf 2,1 MW<sub>el</sub> ohne Fermenterzubau



## Biogasanlage Agrokor Energija Gradec, Kroatien

### Ausgangssituation und Umsetzung

Die Biogasanlage der Agrokor Energija in Gradec / Kroatien wird mit Abfällen aus der Lebensmittelindustrie und Einzelhandel, Schweinegülle und Energiepflanzen betrieben. Die Anlage mit einem Fermentervolumen von 5.700 m<sup>3</sup> wurde 2014 in Betrieb genommen und hatte eine BHKW-Kapazität von 1 MW<sub>el</sub>. Man wollte die Leistung der BGA auf 2,1 MW<sub>el</sub> erweitern. Es stand zur Entscheidung, zusätzliche Fermenter zu bauen oder eine Hydrolyse nachzurüsten. Die Entscheidung fiel zugunsten der SLP-Hydrolyse.

### Vorteile der Batch-Hydrolyse-Nachrüstung

- Höhere Flexibilität beim Einsatz von wechselnden Abfallstoffen
- Reduzierung der Einsatzstoffkosten durch den Ersatz von Maissilage durch Sorghumsilage (faserreicher)
- Stabile Biogasproduktion bei wechselnden Einsatzstoffmengen

- Höhere Methanausbeute aus den Einsatzstoffen

- Niedrigere Baukosten als bei Fermenterzubau

### Ergebnisse

Heute läuft die Biogasanlage mit einer Leistung von 2,1 MW<sub>el</sub>. Es wird also doppelt so viel Biogas pro Kubikmeter Fermentervolumen produziert wie vorher mit der einstufigen Biogasanlage. Trotz der höheren Raumbelastung von ca. 7 kg organischer Trockensubstanz je Kubikmeter und Tag ist die Biologie stabil. Die FOS/TAC-Werte liegen standardmäßig bei 0,3. Das heißt, dass die Biologie hungert und jederzeit mehr gefüttert werden könnte. Mit der vorgeschalteten Batch-Hydrolyse können höhere Raumbelastungen gefahren und die Gasproduktion beschleunigt und erhöht werden.

Der Mix an Abfallstoffen wechselt oft. Das hat bei 2-stufigen Biogasanlagen keinen negativen Einfluss auf die Biogasproduktion wie bei einstufigen Biogasanlagen. Die Hydrolyse- und Versauerungsbakterien in der ersten Vergärungsstufe sind robust und zerlegen jeden Einsatzstoff. Die „empfindlichen“ Methanbakterien in der 2. Stufe bekommen einen Fettsäure-Cocktail aus der Hydrolyse und sind damit optimal versorgt.

Änderungen und Irrtümer vorbehalten.

Snow Leopard Projects GmbH  
Marktplatz 23 · D-94419 Reisbach  
Fon: +49-(0)8734-93977-0  
Mail: [info@snow-leopard-projects.com](mailto:info@snow-leopard-projects.com)  
[www.snow-leopard-projects.com](http://www.snow-leopard-projects.com)



# Nachrüstung einer Batch-Hydrolyse BGA Gradec / Kroatien

Von 1 MW<sub>el</sub> auf 2,1 MW<sub>el</sub> ohne Fermenterzubau

## SLP-Batch-Hydrolyse: Verdoppelung der Biogasproduktion bei gleicher Fermenterkapazität

### Industriestandard

Die Biogasanlage wurde im Industriestandard ausgeführt; mit kompletter Prozessautomatisierung, Edelstahlverrohrung und Industriepumpen.

Die erwartete Lebensdauer der Anlage beträgt 50 Jahre.



### Anlagendaten

#### Biogasanlage

Fermenter (Bestand)	2x 2.850 m <sup>3</sup>
Nachgärer (Bestand)	2.470 m <sup>3</sup>
Hydrolyse	2x 588 m <sup>3</sup>
Endlager (Bestand)	Lagune ca. 100.000 m <sup>3</sup>

#### BHKW Daten

1. Stufe	1.060 kW (Nov 2013)
2. Stufe	2x 1.060 kW (Juni 2015)

### Einsatzstoffe

Schweinegülle  
Rinderfestmist,  
Schlachtabfälle, Backabfälle  
Material von Fettabscheidern, Glycerin  
Melasse  
Sorghum, Maissilage

### Investor und Betreiber

Agrokor Energija d.o.o.  
Zagreb/Kroatien

### Projektdate/Kennzahlen

#### Inbetriebnahme der SLP Batch Hydrolyse

Baubeginn	Februar 2015
Inbetriebnahme	Juni 2015

**2,1 MW elektrisch bei nur 2.850 m<sup>3</sup>  
Fermentervolumen funktioniert nur  
mit einer SLP Batch-Hydrolyse.**

Velimir Varljen (Projektleiter)

Stand 28.06.16

Änderungen und Irrtümer vorbehalten.

Snow Leopard Projects GmbH  
Marktplatz 23 · D-94419 Reisbach  
Fon: +49-(0)8734-93977-0  
Mail: info@snow-leopard-projects.com  
www.snow-leopard-projects.com



# BIOGASANLAGE LABURNUM HOUSE

Landwirtschaftliche Nebenprodukte, Mist und Abfälle aus der  
Gemüseverarbeitung



## Biogasanlage Laburnum House, Lincolnshire, England

### Biogasanlage im Gemüseanbaubereich

Lincolnshire ist ein großes Gemüseanbaubereich. Dort fallen hohe Mengen an aussortierten Kartoffeln, Bohnenstroh und Abfälle aus der Gemüseverarbeitung an. Bisher wurden diese am Feldrand gelagert, verrotteten dort unkontrolliert und wurden, wenn möglich, ausgebracht.

Im dortigen Getreideanbau ist eines der größten Problemunkräuter der Ackerfuchsschwanz („black grass“). Er lässt sich chemisch kaum noch bekämpfen. Nur durch eine weite Fruchtfolge kann das Problem gelöst werden. Mit der Biogasanlage sollten die landwirtschaftlichen Nebenprodukte verwertet und die getreidelastige Fruchtfolge mit Klee gras und auch Silomais erweitert werden.

### Die Bodengesundheit wirtschaftlich sinnvoll verbessern

- Verwertung der landwirtschaftlichen Nebenprodukte
- Bekämpfung der Ackerunkräuter
- Verbesserung der Fruchtfolge im Ackerbau
- Reduzierung der Düngerkosten im Ackerbau

### Problemstoffe werden erfolgreich vergärt und Ernteverluste kompensiert

Es wird eine breite Palette von Einsatzstoffen verwertet, wie Rindermist, Schweinefestmist, Ganzpflanzensilage, Hühner trockenkot, Gemüseabfälle, Bohnenstroh, Getreidestroh, Kartoffeln aus einem Sortierbetrieb, Grassilage und etwas Maissilage.

Sobald der Ackerfuchsschwanz auf den Getreidefeldern chemisch nicht mehr bekämpfbar ist, wird daraus Ganzpflanzensilage gemacht werden und damit die Ernte trotzdem noch genutzt. Die hohen Temperaturen in der Batch-Hydrolyse töten die Unkrautsamen wirksam ab. Damit ist der Vermehrungszyklus des Ackerfuchsschwanzes unterbrochen.

Mit der Batch-Hydrolyse können auch die sehr oft wechselnden Einsatzstoffe sicher und effektiv vergoren werden. Hohe Anteile von unzerkleinerten Kartoffeln verkraftet die Biologie in der Hydrolyse problemlos.

Erde und Fremdstoffe werden im Hydrolysetank abgeschieden und können bei Bedarf geräumt werden.

### Gärresttrocknung sichert Fördermittel

Ein ans System angeschlossener Trockner wird genutzt um den entstehenden Gärrest zu trocknen. Dieser kann anschließend wieder auf die Felder ausgebracht werden. Durch dieses ganzheitliche Konzept hat die Anlage zusätzlich Anspruch auf staatliche Förderung

# BIOGASANLAGE LABURNUM HOUSE

Landwirtschaftliche Nebenprodukte, Mist und Abfälle aus der Gemüseverarbeitung

## Industriestandard

Die Biogasanlage wurde im Industriestandard ausgeführt; mit kompletter Automatisierung, Rohrleitungen in Edelstahl und Industripumpen.

Die erwartete Lebensdauer der Anlage beträgt 50 Jahre.

## Projekt Daten/Kennzahlen

### Standort Daten

Laburnum House,  
Main Road,  
Langrick,  
Boston,  
Lincolnshire  
PE22 7AN  
England



### Anlagendaten

#### Biogasanlage

Fermenter	2.355	m <sup>3</sup>
Hydrolyse	2x 350	m <sup>3</sup>
Endlager	4.616	m <sup>3</sup>

Inbetriebnahme Mai 2015

#### BHKW Daten

Leistung 499 kW<sub>el.</sub>

## Einsatzstoffe



Stroh



Rindermist



Körnermais  
verschimmelt



Kartoffeln



Reste von  
Erbsenpflanzen



Gemüseabfälle



Hühnermist

## Investor und Betreiber

### Investor

Octopus Investments  
33 Holborn  
London  
EC1N 2HT

### Betreiber

Wildmore Renewables Limited  
Paul Grant

## Ansprechpartner

Walter Danner  
Snow Leopard Projects GmbH  
Marktplatz 23, D-94419 Reisbach, Germany  
Tel: +49-(0)8734-939770  
Email: info@snow-leopard-projects.com

Stand 12.08.2016

**Heuer habe ich den Ackerfuchsschwanz mit dem Getreide gemäht, statt zu spritzen. Jetzt liegt er im Fahrsilo und geht dann in die Biogasanlage.**

Paul Grant (Farmer)

# Hydrolyse Nachrüstung für Beispiel Biogasanlage Emsland

## 1 Allgemeine Hinweise

- a) m<sup>3</sup> entspricht to, sofern nicht anders angegeben.  
 b) **Farbig unterlegte Felder sind Eingabefelder und können angepasst** werden.  
 c) Die aufgeführten Kosten und Erlöse in € sind als Nettobeträge angegeben.  
 d) Die Angaben zu Gas-, Strom-, Wärmemengen, kW etc. sind Durchschnittswerte.  
 e) HINWEIS: Die tatsächliche Leistung der Biogasanlage kann von der hier kalkulierten abweichen, da die Werte vieler Faktoren mit Einfluss auf die Stromerzeugung in der Praxis schwanken. Eine Garantie kann aus diesem Grund auf die tatsächlich erzeugten Strommengen nicht gegeben werden.

## 2 Einsatzstoffe, Biogasausbeute und Dimensionierung

Der Gesamt-Einsatzstoffmenge der geplanten Biogasanlage setzt sich aus den folgenden Materialien zusammen und kann in der Praxis je nach Marktlage verändern werden:

Einsatzstoffe	to pro Tag	to pro Jahr	% an der Futtermation	TS-Gehalt in %	CH <sub>4</sub> /to oTS in m <sup>3</sup>	Hydrolyse-Plus für zellulosehaltige Einsatzstoffe
Schweinegülle	10	3.800	23%	6	280	0%
Rindergülle separiert	8	3.000	18%	25	220	10%
Gärrest 70 m <sup>3</sup> Biogas pro FM	0	0	0%	25	175	0%
Rindermist	11	4.000	24%	25	248	23%
Hähnchenmist/Putenmist	0	0	0%	25	280	20%
Pferdemist	3	1.000	6%	60	189	20%
Maisstroh	10	3.714	22%	40	270	20%
GPS	0	0	0%	30	319	20%
Maissilage	0	0	0%	40	340	20%
Getreidemix	0	0	0%	87	380	0%
Grassilage	3	1.000	6%	35	320	25%
CCM/ Körnermais	0	0	0%	65	380	0%
Zuckerrübe	0	0	0%	23	357	0%
Landschaftspflegegras	0	0	0%	65	80	25%
Getreidestroh (feucht)	0	0	0%	30	189	30%
<b>Summe</b>		<b>16.514</b>				

**Hydrolyse Plus:** Mehrertrag über KTBL2004 für zellulosehaltige Einsatzstoffe, da Vorversauerung und Hydrolyse für den Zelluloseaufschluss eingesetzt werden. Die Mehrerträge basieren auf langjähriger Erfahrung mit der SLP Batch-Hydrolyse seit 2006.

Bei der Vergärung dieser Stoffe erhält man folgende Biogas-, Strom-, Wärme- und Düngermengen (brutto) (Mittelwert):

Methangasmenge	1.155.225	m <sup>3</sup> /a
Methangehalt im Biogas (Mittelwert)	55	%
Biogasmenge	2.100.409	m <sup>3</sup> /a
Produzierte Strommenge	4.620.900	kWh/a
Produzierte Wärmemenge	4.620.900	kWh/a
Wärmeleistung (durchschnittlich)	528	kW <sub>therm</sub>
Gärrest gesamt - vor der Separation	13.744	m <sup>3</sup> /a
Gärrest flüssig	8.813	m <sup>3</sup> /a
Gärrest fest	4.931	to

mit 25% TS aus dem Separator

Dies reicht für eine Bemessungsleistung von 528 kW<sub>inst.</sub>-BHKW-Anlage  
 bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 40,0% bei 8.760 Volllaststunden  
 Es ist eine Hydrolysekapazität erforderlich von mindestens 371 m<sup>3</sup> netto  
 Für diese Inputstoffe ist ein Fermentervolumen erforderlich von mindestens 1.669 m<sup>3</sup> netto  
 Bei einer hydraulischen Verweildauer im Fermenter von 18 Tagen  
 Bei einer Faulraumbelastung von 4,91 kg oTS/m<sup>3</sup>d

Das Endlagervolumen für flüssige Gärreste (Dünger) bei 9 Monate Lagerdauer ist 6.610 m<sup>3</sup>

Gasausbeuten sind substratspezifisch, d.h. die produzierten Gasmengen schwanken und sind von Qualität, Zusammensetzung und TS-/oTS-Gehalt der Einsatzstoffe, sowie von Temperatur und Verweildauer abhängig.

8.760 Volllaststunden entspricht 100% Volllast der Bemessungsleistung. Dies ist praktisch nur machbar bei einer Überbauung.

### 3 Einsatzstoffe Einsparung

#### 3.1 Einsatzstoffe mit Hydrolysenachrüstung

Einsatzstoff	to pro Jahr	Kosten pro to inkl. Transportkosten	Gesamtkosten pro Jahr	Kosten pro m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	Kosten pro kWh	Nährstofffracht N in kg
Schweinegülle	3.800	1 €	3.800 €	0,07 €	0,02 €	16.720
Rindergülle separiert	3.000	0 €	0 €	0,00 €	0,00 €	12.000
Gärrest 70 m <sup>3</sup> Biogas pro FM	0	0 €	0 €	0,00 €	0,00 €	0
Rindermist	4.000	4 €	16.000 €	0,07 €	0,02 €	24.000
Hähnchenmist/Putenmist	0	1 €	0 €	0,01 €	0,00 €	0
Pferdemist	1.000	0 €	0 €	0,00 €	0,00 €	1.076
Maisstroh	3.714	25 €	92.850 €	0,21 €	0,06 €	17.084
GPS	0	25 €	0 €	0,23 €	0,07 €	0
Maissilage	0	40 €	0 €	0,26 €	0,08 €	0
Getreidemix	0	145 €	0 €	0,45 €	0,11 €	0
Grassilage	1.000	34 €	34.000 €	0,27 €	0,08 €	6.000
CCM/ Körnermais	0	151 €	0 €	0,62 €	0,16 €	0
Zuckerrübe	0	35 €	0 €	0,46 €	0,12 €	0
Landschaftspflegegras	0	0 €	0 €	0,00 €	0,00 €	0
Getreidestroh (feucht)	0	22 €	0 €	0,32 €	0,10 €	0

**Kosten Einsatzstoffe mit Hydrolyse Nachrüstung** **146.650 €**

#### 3.2 Bisherige Einsatzstoffe

Hochgerechnet auf höhere Stromproduktion von 4.620.900 kWh

Schweinegülle	4.026	1 €	4.026 €	32%
Rindermist	772	4 €	3.088 €	6%
GPS	360	25 €	8.990 €	3%
Maissilage	7.230	40 €	285.929 €	57%
Getreidemix	28	145 €	4.057 €	0%
CCM/ Körnermais	162	151 €	24.412 €	1%
Summe	12.577			

**Kosten Bisherige Einsatzstoffe** **330.503 €**

**Einsparung Einsatzstoffe** **183.853 €**

### 4 Mehr-Einnahmen Stromproduktion

Leistung bisher	509 kW	
Leistung mit SLP Batch-Hydrolyse	527,5 kW	Höchstbemessungsleistung
Volllaststunden bisher	8.760 Vlh	
Volllaststunden mit SLP Batch-Hydrolyse	8.760 Vlh	nur bei Überbauung möglich
kWh produziert bisher	4.458.840 kWh	
kWh produziert mit SLP Batch-Hydrolyse	4.620.900 kWh	
Mehrertrag	162.060 kWh	
Einspeisevergütung für Mehrertrag	12,01 cent/kWh	19.463 €
KWK Bonus	2,94 cent/kWh	4.765 €
		100% KWK-Ausnutzung des Mehrertrags-Strom

**Mehr-Einnahmen Stromproduktion** **24.228 €**

### 5 Zusätzliche Einnahmen

**Zusätzliche Einnahmen** **0 €**

### 6 Betriebskosten Hydrolysenachrüstung

#### 6.1 Kosten durch Reparatur/Wartung

Bau	2.980 €	2,0% der Investition Bau
Technik	12.000 €	8% der Investition Technik

**Kosten Reparatur und Wartung pro Jahr** **14.980 €**

6.2 Kosten durch Verbrauchsstoffe und Sonstiges			
	Bezugsstrom	18,86	cent€/kWh
Stromverbrauch Hydrolyse		20.969 kWhel	3.955 €/a
2 Rührwerke	32.120 kWh		
Pumpe	8.213 kWh		
Flüssigzerkleinerung	16.425 kWh		
weniger Rühren	-35.788 kWh		
Spurenelemente, Mineralien etc für Bakterien			0 €/a (Pauschale)
Enzyme			1.000 €/a (Pauschale)
Fettsäureanalysen			0 €/a (Pauschale)
Sonstiges			0 €/a (Pauschale)
<b>Kosten Verbrauchsstoffe</b>			<b>4.955 €</b>

6.3 Ausbringungs-/ Entsorgungskosten			
Flüssiger Gärrest	8.813 to		
Wärme zur Verdampfung	kWh th		
Verdampfung	kWh th/to H2O		
Verdampftes Wasser	0 to		
Rest flüssiger Gärrest	8.813 to		
Ausbring-/Entsorgungskosten	10 €/to		
Kosten Flüssiger Gärrest			88.132 €
Fester Gärrest	4.931 to		
Ausbring-/Entsorgungskosten	10 €/to		
Kosten Fester Gärrest			49.308 €
Gärrest ohne Hydrolyse	10.467		
Ausbring-/Entsorgungskosten	10 €/to		
Gärrest Entsorgungskosten ohne Hydrolyse			104.675 €
Zusätzliche Kosten mit Hydrolyse			32.765 €
<b>Kosten Entsorgung</b>			<b>32.765 €</b>

## 7 Investition (CAPEX)

### 4.1 Investition

SLP Batch Hydrolyse-Nachrüstung		
<small>ohne Detailplanung!</small>		
Genehmigungskosten + Gutachten		35.000 €
Erdarbeiten		25.000 €
Behälterbau		97.000 €
Technische Ausstattung		150.000 €
Rohrleitungsbau		52.000 €
Ingenieursleistung		69.000 €
Förderantrag		6.500 €
Sonstiges		10.000 €
Gesamte Projektkosten		444.500 €

### 4.2 Abschreibung

Die Abschreibung ergibt sich aus der Nutzungsdauer und der garantierten Vergütungszeit lt EEG.  
Die tatsächliche Nutzungsdauer beträgt zwischen 40 bis 50 Jahren

	Investition	Nutzungsdauer in Jahren EEG-Restlaufzeit	Abschreibung
SLP Batch Hydrolyse-Nachrüstung			
Genehmigungskosten + Gutachten	35.000 €	11	3.182 €
Erdarbeiten	25.000 €	11	2.273 €
Behälterbau	97.000 €	11	8.818 €
Technische Ausstattung	150.000 €	11	13.636 €
Rohrleitungsbau	52.000 €	11	4.727 €
Ingenieursleistung	69.000 €	11	6.273 €
Förderantrag	6.500 €	11	591 €
Sonstiges	10.000 €	11	909 €
	444.500 €		40.409 €

**Die Abschreibung pro Jahr beträgt 40.409 €**

#### 4.3 Zinsen auf das eingesetzte Kapital

Investition	100%	444.500 €
Eigenkapital	20%	88.900 €
Förderung Bafa		65.096 €
Fremdkapital		290.504 €
und einem Zinssatz von		3,0%

**Achtung: durchschnittlicher Wert!!!**

**bedeutet das eine durchschnittliche jährliche Belastung durch Zinsen von (Zinsen/2) 4.358 €**

### 8 Zusammenfassung

<b>Einnahmen SLP Batch Hydrolyse</b>		
Einsparung Einsatzstoffe		183.853 €
Mehreinnahmen Stromproduktion		24.228 €
Zusätzliche Einnahmen		0 €
<b>Gesamt Einsparung &amp; Einnahmen pro Jahr</b>		<b>208.081 €</b>
<b>Investkosten SLP Batch Hydrolysenachrüstung</b>		
Abschreibung		444.500 €
Zinsen		40.409 €
Betriebskosten pro Jahr Hydrolysenachrüstung		4.358 €
Gärrestausbringung		19.935 €
		32.765 €
Restlaufzeit Anlage (2031)	11 Jahre	
Zusätzlich mögliche Laufzeit	10 Jahre	
Amortisierung in Jahren		2,9
<b>Gewinn SLP Batch Hydrolyse jährlich</b>		<b>110.614 €</b>
<b>Zusätzlicher Gewinn auf Restlaufzeit</b>		<b>1.420.952 €</b>
<b>Zusätzlicher Gewinn auf Restlaufzeit &amp; +10 Jahre</b>		<b>2.641.718 €</b>
mit 2% jährliche Kostensteigerung; nicht abgezinst		

## Warum ?

eine SLP BATCH Hydrolyse

Warum es sinnvoll ist, eine BATCH Hydrolyse vor Ihre bestehende Biogasanlage zu bauen.

### Sie wollen...

- Ihre Biogasanlage auch nach 20 Jahren EEG weiter betreiben?
- Wenig Konkurrenz bei der Einsatzstoffbeschaffung?
- Billigere Einsatzstoffe verwenden?
- Ihre Biogasanlage flexibel betreiben?
- Technische Probleme, wie z.B. Rühren, grundlegend lösen?
- Mehr Biogas aus weniger Einsatzstoffen?
- Ersatzinvestitionen vornehmen?
- Weniger Stress?
- Dauerhaften mehr verdienen?

**Sie erreichen es mit einer BATCH Hydrolyse von Snow Leopard Projects!**

## Vorteile

der SLP BATCH Hydrolyse



Sie können **Einsatzstoffe**, die billiger sind oder die niemand haben will, einsetzen – Festmist, Pferdemist, Stroh, Maisstroh, Zwischenfrüchte. Auch in großen Anteilen – nicht nur 10%.

Sie erzielen eine **höhere Biogausbeute** aus den gleichen Einsatzstoffen wie bisher. Sie lassen dann einfach die für Sie teuersten Einsatzstoffe weg. Je nach Einsatzstoffmix brauchen Sie bis zu 20% weniger!

Sie haben **mehr Flexibilität** beim Anlagenbetrieb, bei den Einsatzstoffen, bei der Biogasproduktion (Regelenergie!).

Sie können Einsatzstoffe einsetzen, die einstufige Mais-Biogasanlagen nicht verwerten können. Da sind Sie quasi außer Konkurrenz. Wenn Sie nur 50% der Maissilage ersetzen, dann **senken Sie Ihre Einsatzstoffkosten** dramatisch, weil die den teuersten Teil der Maissilage weglassen.

Sie brauchen **weniger Pachtflächen**, wenn Sie weniger Einsatzstoffe benötigen. Das Geld kommt Ihrem Bankkonto zugute und nicht dem des Verpächters.

Sie können Ihren Silomais später, mit höherem TS-Gehalt (bis zu 40%) und **mehr Trockensubstanzertrag** je Hektar ernten. Die hohen TS-Gehalte werden vom BATCH-Hydrolysebehälter vertragen. Dasselbe gilt für Gras-Anwelk-Silage. Je trockener, desto besser.

Sie betreiben Ihre Biogasanlage im Regelbetrieb? Dann können Sie mit der BATCH-Hydrolyse Biogas erzeugen, wenn Sie es grade brauchen. Ja, Sie können mit der BATCH-Hydrolyse die **Biogasproduktion steuern**.

**Immer noch nicht überzeugt?**

Fragen Sie uns, wenn Sie konkrete Probleme oder Aufgabenstellungen haben.

# Ihr Weg

zur SLP BATCH Hydrolyse

## Melden Sie sich

Setzen Sie sich mit uns in Verbindung; telefonisch, per Email  
– wir schicken Ihnen ausführliches Infomaterial.

## Informieren Sie sich

Sie informieren sich im Detail, was die SLP Batch-Hydrolyse kann und ob es etwas für Sie wäre.

## Wir rufen Sie an

Wir telefonieren wegen Fragen und Unklarheiten.

## Fragebogen

Sie füllen einen Fragebogen aus und wir kalkulieren, ob sich eine Hydrolyse-Nachrüstung für Sie lohnt.

## Besuchen Sie uns

Wenn Sie weiter Interesse haben, dann laden wir Sie ein, eine oder zwei SLP-Biogasanlagen mit BATCH-Hydrolyse zu besuchen.

# SLP BATCH Hydrolyse



## 100% Erneuerbare Energie ist unser Ziel

Wir vergären Reststoffe und landwirtschaftliche Nebenprodukte.

Wir erzeugen Regelenergie.

**SNOW LEOPARD PROJECTS GMBH**  
BIOGAS IS OUR BUSINESS

**SNOW LEOPARD PROJECTS GMBH**  
Beratung · Planung · Design · Genehmigung  
Projektentwicklung · Hydrolyse-Nachrüstung

Marktplatz 23 · 94419 Reisbach  
Tel.: 08734 / 93 977 0  
Mail: [info@snow-leopard-projects.com](mailto:info@snow-leopard-projects.com)  
Web: [www.snow-leopard-projects.com](http://www.snow-leopard-projects.com)



# Hydrolyse Nachrüstung

**SLP BATCH Hydrolyse**  
Ihr Weg in die Zukunft



## Warum ?

eine SLP Batch Hydrolyse

## Vorteile

der SLP Batch Hydrolyse

## Vorteile

der SLP Batch Hydrolyse



## Wir haben, was Sie brauchen

- Eine Biogasanlage, die auch nach 20 Jahren EEG weiter betriebsfähig ist
- Wenig Konkurrenz bei der Einsatzstoffbeschaffung
- Billigere Einsatzstoffe
- Flexibilität bei der Gasproduktion
- Grundlegende Lösungen für technische Probleme wie z.B. Rühren
- Mehr Biogas von weniger Einsatzstoffen
- Ersatzinvestitionen
- Weniger Stress
- Dauerhaften Mehrverdienst

Sie können **Einsatzstoffe**, die billiger sind oder die keiner haben will, einsetzen – Festmist, Pferdemist, Stroh, Maisstroh, Zwischenfrüchte. Auch in großen Anteilen – nicht nur 10%.

Sie haben **mehr Biogas** von den gleichen Einsatzstoffen wie bisher. Sie lassen dann einfach die für Sie teuersten Einsatzstoffe weg. Je nach Einsatzstoffmix brauchen Sie bis zu 20% weniger!

Sie haben **mehr Flexibilität** beim Anlagenbetrieb, bei den Einsatzstoffen, bei der Biogasproduktion (Regelenergie!).

Sie können Einsatzstoffe einsetzen, die einstufige Mais-Biogasanlagen nicht verwerten können. Da sind Sie quasi außer Konkurrenz. Wenn Sie nur 50% der Maissilage ersetzen, dann **senken Sie Ihre Einsatzstoffkosten** dramatisch, weil die den teuersten Teil der Maissilage weglassen.

Sie brauchen **weniger Pachtflächen**, wenn Sie weniger Einsatzstoffe brauchen. Das Geld geht auf Ihr Bankkonto und nicht auf das des Verpächters.

Sie können Ihren Silomais später, mit höherem TS-Gehalt (bis zu 40%) und **mehr Trockensubstanzertrag** je Hektar ernten. Die hohen TS-Gehalte werden im vom Batch-Hydrolysebehälter vertragen. Dasselbe gilt für Gras-Anwelk-Silage. Je trockener, desto besser.

Sie betreiben Ihre Biogasanlage im Regelbetrieb? Dann können Sie mit der Batch-Hydrolyse Biogas erzeugen, wenn Sie es grade brauchen. Ja, Sie können mit der Batch-Hydrolyse die **Biogasproduktion steuern**.

## Immer noch nicht überzeugt?

Fragen Sie uns, wenn Sie konkrete Probleme oder Aufgabenstellungen haben.

## Eine SLP Batch-Hydrolyse ist etwas für Dich wenn :

- Du nach den 20 Jahren EEG für mindestens weitere 10 Jahre weiter machen willst
- Du günstigere, faserige Einsatzstoffe einsetzen willst
- Du Probleme mit der Düngeverordnung hast
- Du zu wenig Lagervolumen für Deine Gärreste hast
- Du mehr Biogas aus Deinen vorhandenen Einsatzstoffen herausholen willst
- Du weniger Wartung und Eigenstromverbrauch haben willst

## Die Batch-Hydrolyse ist nichts für Dich wenn:

- Deine Biogasanlage ohnehin sehr gut läuft und die biologische Performance weit über KTBL Standard liegt
- Du eine Biogasanlage mit weniger als 250 kW hast
- Du nach den 20 Jahren EEG definitiv aufhörst

## Zusammenfassung

Ein SLP Batch-Hydrolyse kostet nicht mehr als eine Einbringtechnik mit Zerkleinerung.

Die SLP Batch Hydrolyse bringt im Dauerbetrieb in der Praxis bis zu 35% mehr Methan pro t oTS im Vergleich zu KTBL. Insbesondere bei faserigen, zellulose-haltigen Einsatzstoffen.

Die SLP Batch-Hydrolyse wird hyper-thermophil betrieben und kann daher Teile der Ligno-Zellulose (Holzstoff) aufschließen.

Es muss keine Zerkleinerung vor der Hydrolyse durchgeführt werden. Wir lassen erst die Bakterien arbeiten – das kostet weder Strom noch Verschleiß. Nur der noch nicht verdaute Anteil wird dann über eine Flüssigzerkleinerung nochmal zerkleinert.

Weniger Einsatzstoffe bedeutet auch weniger Lagervolumen, weniger Nährstoffe und entspanntes Arbeiten bis in das späte Frühjahr.

## Du denkst, dass eine Batch-Hydrolyse für deine Biogasanlage passt, dann:

**1)** Klären wir all deine Fragen und können Dir in einer **kostenlosen Erstanalyse** unsere Einschätzung geben.



**2)** Auch wenn es im Biogasbereich bei Investitionen in Equipment schnell mal in die 100.000er geht, wir finden es gehört vorher eine fundierte **Wirtschaftlichkeitsberechnung** gemacht.

Die gute Nachricht: wir können dir ein Energieaudit bei deiner Biogasanlage anbieten. Das beinhaltet die energetische und biologische Analyse deiner Biogasanlage inkl. der Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Batch-Hydrolyse.



Die Kosten dafür liegen bei 7.500€. Doch jetzt die noch bessere Nachricht: das wird vom Bafa zu 80% gefördert (= 6.000€ Förderung).

**Das heißt dein Eigenanteil liegt nur bei 1.500 €**

**3)** Es zeigt sich die Batch-Hydrolyse passt für deine Anlage und kann ein wichtiger Bestandteil für die +10 Jahre EEG Ausrichtung deiner Biogasanlage sein. Super! Dann planen und setzen wir für dich die Batch-Hydrolyse um – **von Genehmigung bis Inbetriebnahme.**

