

Empfehlungen zu Verfahren der Hydrolyse in der Praxis



www.biogas-forum-bayern.de/bif7

Biogas Forum Bayern, Verfasser:

Dr. Mathias Effenberger
Rainer Kissel
Carmen Marín-Pérez
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Dr. Jürgen Beck

BIOVoltaik GmbH

BIOVOLTAIK®

Frank Friedrich

SVLFG



Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Vorbemerkung.....	4
2. Grundlagen	4
3. Wann kann ein Hydrolyseverfahren sinnvoll sein?.....	6
4. Problematik offener Hydrolyse-Stufen.....	7
5. Beobachtungen an Referenzanlagen mit zweistufig-zweiphasiger Verfahrensführung.....	10
Zusammenfassung	15
Quellenangaben	16
Glossar	17

1. Vorbemerkung

Die vorliegende Schrift soll Planern, Investitions-willigen und Betreibern von Biogasanlagen in der Landwirtschaft eine Hilfestellung für die Beurteilung von Biogasverfahren mit sogenannter „Hydrolyse-Stufe“ geben. In knapper Form werden dafür die biochemischen Grundlagen erläutert und es werden anhand verfügbarer Daten

von Referenzanlagen Hinweise dazu gegeben, wann eine separate Hydrolyse-Stufe an einer Biogasanlage sinnvoll sein kann und was bei der Ausführung zu beachten ist. Was die Schrift hingegen nicht leisten kann, ist eine erschöpfende Darstellung des Standes der Technik von Biogas-verfahren mit „Hydrolyse-Stufe“.

2. Grundlagen

Der Abbau organischen Materials, beispielsweise in Form von Gülle, Pflanzenmasse oder Bioabfall, kann im Wesentlichen in vier Phasen untergliedert werden, wie in Abb. 1 skizziert. An diesem komplexen Netzwerk sind verschiedene Gruppen von Mikroorganismen beteiligt, die

teilweise deutlich unterschiedliche Anforderungen an die Umgebungsbedingungen haben und sich auch unterschiedlich schnell vermehren. Für eine ausführliche Beschreibung der mikrobiologischen Prozesse in Biogasanlagen siehe die Fachinformation „[Prozessmodell Biogas](#)“

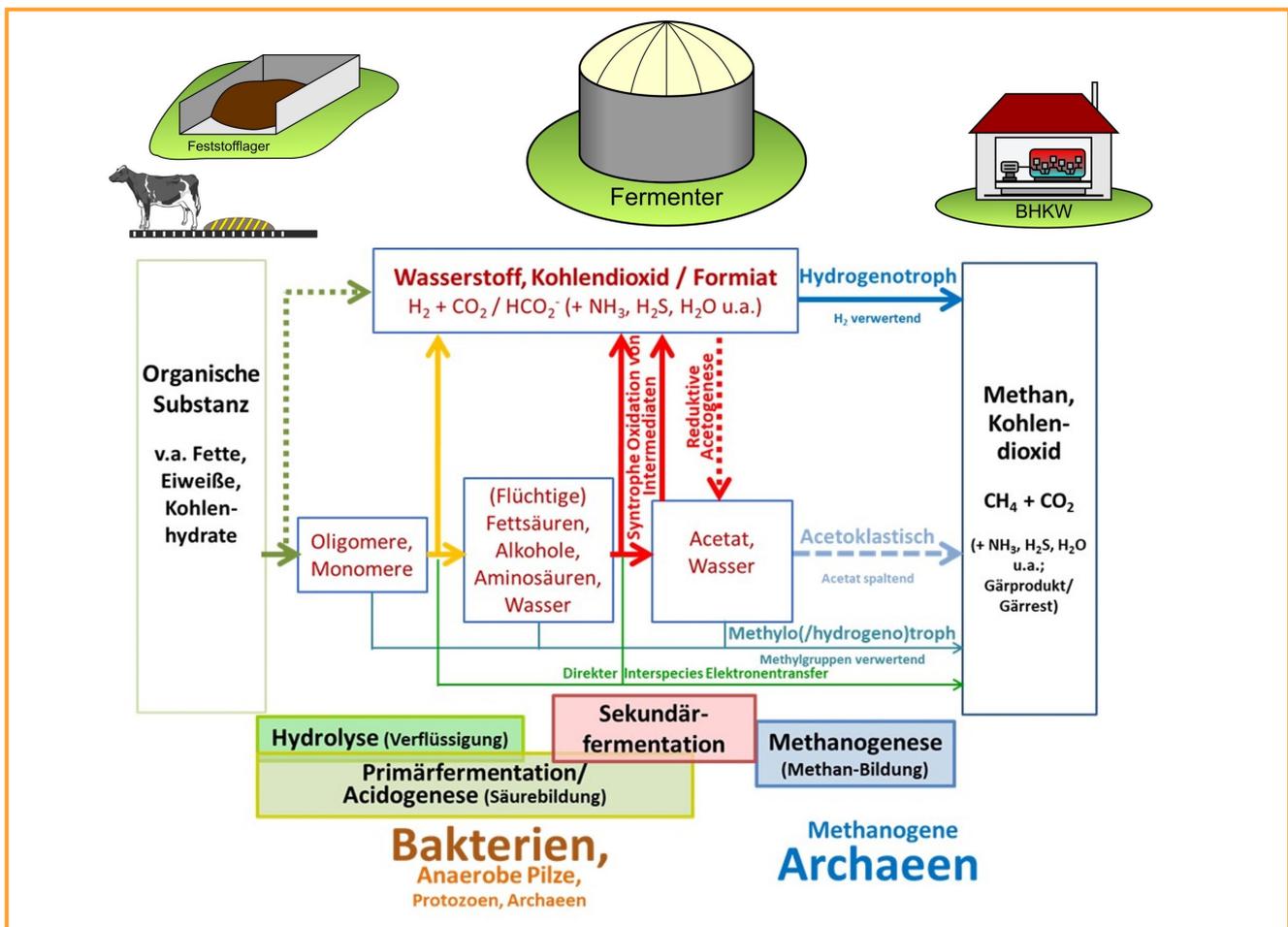


Abb. 1: Die unterschiedlichen Phasen der mikrobiologischen Methanbildung mit den wichtigsten Gruppen der beteiligten Mikroorganismen (Lebuhn, 2020)

An dieser Stelle ist es wichtig zu beachten, dass der Begriff der Hydrolysestufe, wie er in der Praxis verwendet wird (und daher aus Gründen der Vereinfachung auch in dieser Abhandlung), aus biochemischer Sicht nicht korrekt ist. In einer solchen Hydrolysestufe wird im Normalfall nicht nur der Prozess der Hydrolyse stattfinden (d.h. Spaltung von Makromolekülen unter Anlagerung von Wasser und Bildung kleinerer, meist wasserlöslicher Moleküle), sondern auch die Acidogenese oder Versäuerung einsetzen. Gelegentlich wird daher auch der Begriff der „Vorversäuerung“ verwendet. Zur Bildung von Methan sollte es in dieser Stufe der Zielsetzung entsprechend nicht kommen. Unter Praxisbedingungen wird jedoch häufig Gärgemisch oder Gärrest zum Anmischen der Feststoffkomponenten in die Hydrolysestufe zurückgeführt oder es wird Flüssig- oder Festmist zugegeben, so dass auch Methan entstehen kann. Darüber hinaus enthält das bei der Hydrolyse und Versäuerung gebildete Gasgemisch („Hydrolysegas“) als brennbare Komponente Wasserstoff (H_2) sowie die giftigen und geruchsintensiven Substanzen Schwefelwasserstoff (H_2S) und Ammoniak (NH_3). Kohlendioxid als Hauptbestandteil des Hydrolysegases und daneben Kohlenmonoxid stellen in geschlossenen Räumen eine Erstickungs- und Vergiftungsgefahr dar.

In der landwirtschaftlichen Biogastechnologie kommt bisher weitaus überwiegend das sogenannte **einphasige Verfahren** zum Einsatz, bei welchem alle Phasen der Vergärung in einem Gärbehälter ablaufen. Dieses wird manchmal ungenauer Weise auch schlicht als „einstufig“ bezeichnet, kann jedoch „einstufig-einphasig“ mit nur einem Gärbehälter oder „mehrstufig-einphasig“ mit zwei oder mehr Gärbehältern in Reihe ausgeführt werden. Die Vorteile des einphasigen Verfahrens liegen vor allem in den deutlich geringeren Investitionskosten und der vereinfachten Prozesssteuerung. Nachteilig ist,

dass dieses Verfahren bezogen auf die Reaktionsbedingungen für die verschiedenen beteiligten Mikroorganismengruppen immer einen Kompromiss darstellt und die Methanbildung dabei oft suboptimal abläuft.

Enthalten die Einsatzstoffe einen hohen Anteil an löslichen, rasch vergärbaren Stoffen (z. B. Zucker, Stärke, Proteine), kann es im einphasigen Verfahren durch die rasche Anreicherung der Versäuerungsprodukte (in Abhängigkeit von der Pufferkapazität des Fermenterinhalt) leicht zu einer Hemmung des Abbauprozesses kommen. Dies beruht auf den vergleichsweise hohen Vermehrungsraten der Mikroben in der Hydrolyse und Acidogenese (Verdoppelung der Population im Bereich von Minuten bis Stunden), während die für die Methanbildung zuständigen Archäen ihre Population teilweise erst nach zehn bis 14 Tagen verdoppeln.

Beispielsweise in einem solchen Fall bietet das zweistufig-**zweiphasige Verfahren** den Vorteil, dass die Belastung des Methanreaktors weitgehend unabhängig vom optimalen Betrieb der Hydrolysestufe geregelt werden kann. Hierdurch lassen sich u. a. bei der anaeroben Behandlung von Abwässern mit hoher gelöster organischer Fracht Raumbelastungen von $12 \text{ kg oTM} / (\text{m}^3 \text{ d})$ und darüber realisieren. Ähnliche Vorteile sind auch bei der Vergärung hoher Anteile von frischen oder getrockneten, leicht fermentierbaren Einsatzstoffen wie Getreide, Körnermais, Zucker- oder Gehaltsrüben zu erwarten. Durch die Versäuerung des Mischsubstrates in einem separaten Reaktor kann die Zusammensetzung des Zulaufs zum Hauptgärbehälter dann wesentlich besser kontrolliert werden. Andererseits entsteht ein deutlich höherer technischer Aufwand für die Steuerung und Regelung sowie den sachgerechten Umgang mit dem Hydrolysegas.

4. Wann kann ein Hydrolyseverfahren sinnvoll sein?

Mit einer zweiphasigen Verfahrensführung verfolgt man typischer Weise die folgenden Ziele:

- ▶ (1) Vermeidung einer Anreicherung von Versäuerungsprodukten im einphasigen Prozess und damit einer Hemmung der Methanbildung
- ▶ (2) Beschleunigung des Abbaus schwer hydrolysierbarer Substrate bzw. Erhöhung der Methanproduktivität.

Ob ein Biogasverfahren mit getrennter Hydrolysestufe sinnvoll ist, wird in erster Linie durch die Einsatzstoffe bestimmt. Ziel (1) lässt sich bei richtiger Verfahrensführung für Einsatzstoffe

mit einem hohen Gehalt an schnell hydrolysierbaren Substanzen wie Stärke, Zucker und Proteinen durch eine biochemische Hydrolyse erreichen. Beispiele hierfür sind: frisches, nicht siliertes Pflanzenmaterial (geschrotete Getreide- oder Maiskörner, frischer Grasschnitt, frische Zwischenfrüchte, Rübenschnitzel, Kartoffeln); Speisereste; Schlempe; Schlachtabfälle; Gemüseabfälle. Eine getrennte Hydrolysestufe ist vor allem dann sinnvoll, wenn solche Substratströme in häufigem Wechsel anfallen. Kontraproduktiv können sich Gülle, Mist oder zurückgeführter Gärrest in der Hydrolysestufe auswirken, da hierdurch die Pufferkapazität erhöht wird und eingetragene Methan bildende Mikroorganismen aktiv werden können.

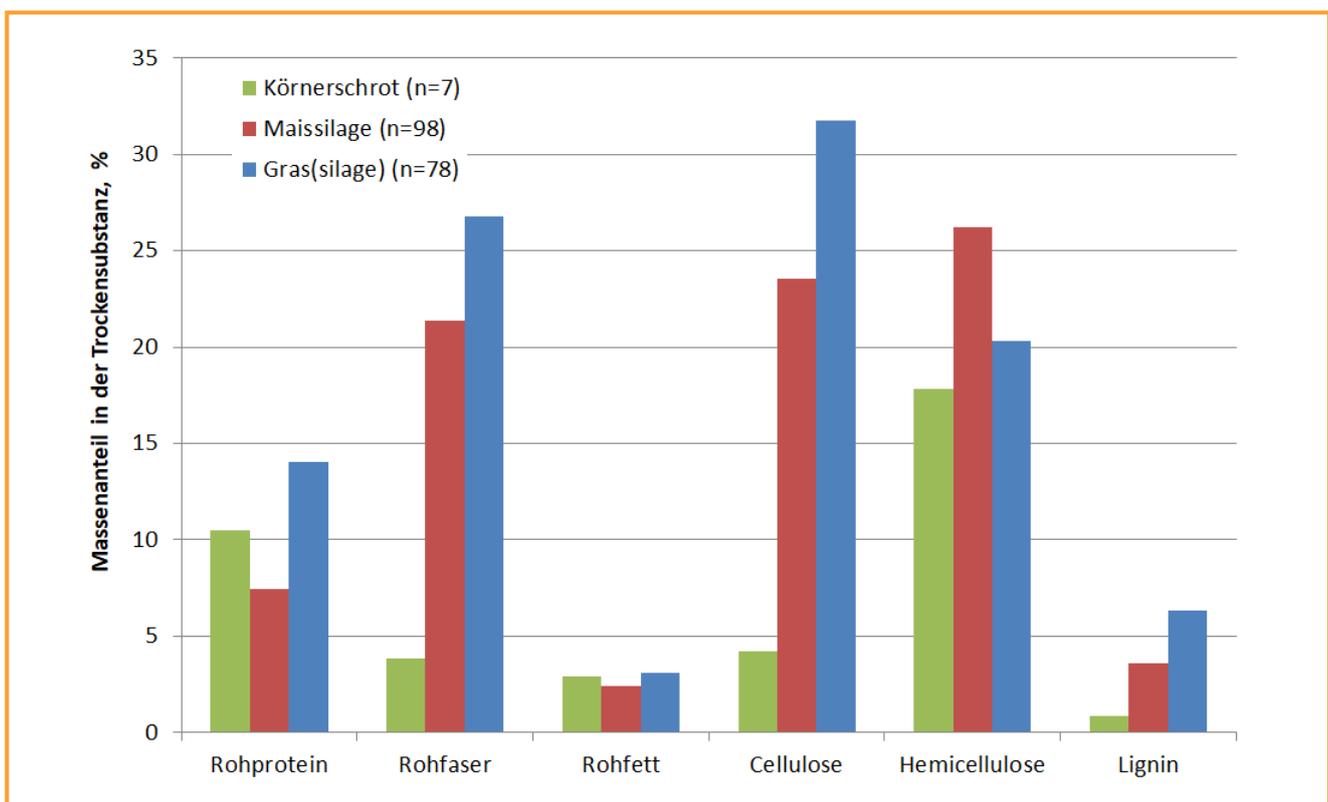


Abb. 2: Mittlere Zusammensetzung der Trockenmasse unterschiedlicher pflanzlicher Einsatzstoffe (eigene Daten)

Je höher hingegen der Anteil an Lignocellulose in der Biomasse ist, desto geringer sind beim derzeitigen Entwicklungsstand die Vorteile einer separaten Hydrolysestufe. Dieser Anteil ist beispielsweise bei Gras und Ganzpflanzensilagen

gegenüber Körnern bereits deutlich erhöht und steigt über Stroh bis hin zu verholztem Landschaftspflegematerial stark an (Abb. 2). Die biochemische Hydrolyse läuft in diesen Fällen zu langsam ab. Im Sinne von Ziel (2) versucht man

beim Einsatz solcher Substrate die Verweilzeit zu verkürzen, indem die Biomasse mechanisch, thermisch oder mikrobiell aufgeschlossen („desintegriert“) wird. Während die physikalischen / chemischen Methoden in der Praxis eingesetzt werden, befinden sich die mikrobiologischen Ansätze u. a. mit Einsatz von Pilzen in einer vorgelagerten Stufe eher noch in der Ent-

wicklung. Allerdings sind sie vielversprechend, da sich mit ihnen Energie und Ressourcen einsparen lassen (Kainthola et al., 2021; Wagner et al., 2018). Mehr zu diesem Thema findet sich auch in der Fachinformation „[Substrataufbereitung zur Verbesserung des Abbaus fettsäurereicher Biomasse](#)“ des Biogas Forums Bayern.

4. Problematik offener Hydrolyse-Stufen

Die Ausgestaltung von Verfahren mit „Hydrolysestufen“ in der landwirtschaftlichen Biogastechnik erscheint uneinheitlich, wie das nachfolgende Kapitel zu Beobachtungen an Referenzanlagen zeigt. Durch eine unsachgemäße Verfahrenskonzeption mit einer zur Atmosphäre hin offenen, evtl. zusätzlich beheizbaren Hydrolysegrube wird möglicherweise nicht nur ein erheblicher Anteil des Energiepotentials der Einsatzstoffe durch die Freisetzung von Wasserstoff und Methan verschwendet, sondern auch ein erhebliches Sicherheitsrisiko verursacht. Solche Verfahren (Bild 1) sind daher aus Gründen des Arbeits- und Immissionschutzes prinzipiell nicht tolerierbar und aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll.



Bild 1: So nicht! Zur Atmosphäre hin offene Hydrolysegrube: das rote Kreuz kennzeichnet die mit Holzplanken abgedeckte Befüllöffnung (Foto: LfL)

Um eine Methanbildung in der Hydrolysestufe zu unterdrücken, muss der pH-Wert rasch auf einen Wert zwischen 4,5 und 5,0 abgesenkt werden; die weitere Absenkung des pH-Wertes verringert hingegen den Abbaugrad der Feststoffe (LfL, 2022). Mit steigendem pH-Wert bis

in den Neutralbereich nimmt die Abbauaktivität rasch zu und es werden zunehmend flüchtige Fettsäuren, Wasserstoffgas und auch Methan gebildet: je nach Mischungsverhältnis mit Luft kann dann ein hochexplosives Gemisch vorliegen. Flüchtige Fettsäuren (FFS) führen zu erheblichen Geruchsemissionen, aus offenen Hydrolyse-Stufen, insbesondere während Rührvorgängen. Werden Stoffe mit erhöhtem Schwefelgehalt, wie tierische Exkremente oder Speisereste, eingesetzt, entsteht in größeren Mengen Schwefelwasserstoff, der nicht nur geruchsintensiv, sondern auch giftig ist. Ebenfalls kann beim Einsatz und Abbau stickstoffreicher Einsatzstoffe giftiges Ammoniak entstehen und ausgasen.

Darüber hinaus bedeutet die Bildung von Methan und Wasserstoff in einer nicht zur Atmosphäre dichten Hydrolysestufe für das Gesamtverfahren einen Verlust an nutzbarer Energie. Die unkontrollierte Methanfreisetzung aus der Hydrolysestufe trägt zudem zum Treibhauseffekt bei.

Im Folgenden werden kurz einige auf dem Markt verfügbare Verfahren mit Hydrolysestufe angesprochen. Diese Auswahl ist unsystematisch und stützt sich im Wesentlichen auf die Angaben der anbietenden Unternehmen. Für die Richtigkeit der Informationen wird keine Gewähr übernommen.

Eine etwas weitere Verbreitung hat das zweiphasige Biogasverfahren der Firma Rohn Werksvertretungen GmbH (Insingen) gefunden. Ursprünglich wurde dieses mit einem Hochsilo zur Flüssigkonservierung von Feuchtmais oder Getreidekörnern („Ligavator“) bzw. Rüben

(„Betavator“) kombiniert (mitunter auch als „Langzeit-Hydrolyse“ bezeichnet). Von dort wurde die Biomasse in eine offene „Hydrolyse-Grube“ gepumpt, aus der wiederum der Fermenter beschickt wurde. Werden solche Anlagen auf die Eingabe stapelbarer Substrate direkt in die jetzt als Vorgrube fungierende Hydrolysestufe umgestellt, muss in der Regel Fermenterinhalt rezirkuliert werden. In diesem Fall ist, insbesondere beim weitverbreiteten Einsatz von Mischungen aus Mais- und Grassilage mit Gülle, mit deutlich höheren pH-Werten als bei der ursprünglichen Betriebsweise und in der Folge mit der Freisetzung von Methan aus der offenen Grube zu rechnen. Die Gefahren, welche sich aus dieser Vorgehensweise ergeben, dürfen nicht unterschätzt werden, wie obenstehend bereits dargelegt wurde. Um die Geruchsemissionen zu minimieren, ist das Verfahren mit einer sogenannten Hydroschleuse – auf Wunsch mit Wiegesystem – und Biofilter verfügbar (P. Rohn, Rohn Werksvertretungen GmbH, Insingen, persönliche Mitteilung: 11.09.2012). Ob hierdurch eine Freisetzung von Methan und Wasserstoff sicher vermieden werden kann, ist im Einzelfall zu prüfen. Eine Nutzung des Hydrolysegases erfolgt hierbei nicht, was als energetischer Verlust zu verbuchen ist.

Beim Konzept der „semi-aeroben Hydrolyse“ der Bionova Biogas GmbH (Königs Wusterhausen; <https://bionova-biogas.de>) soll die Freisetzung von Wasserstoff verhindert werden, indem der Hydrolysestufe Luft zugeführt wird. Auch bei diesem Verfahren sind unbedingt die oben beschriebenen Vorkehrungen für den Explosionsschutz zu treffen und es ist eine geschlossene Ausführung des Hydrolysebehälters anzustreben. Eine Verwertung des Hydrolysegases ist auch hier nicht vorgesehen, außerdem würde hierdurch beim Verschneiden mit dem im Hauptfermenter gebildeten Biogas nicht verbrauchter Sauerstoff zugeführt.

Die Hydrolysestufe der BIOVoltaik® GmbH (Rottenburg am Neckar) besteht aus einem entsprechend der täglichen Beschickungsmenge dimensionierten Edelstahlbehälter, der mittels in der Stahlwand integrierter Wärmetauscher auf 55 – 60 °C beheizt wird und mit zwei Stab-
rührwerken ausgestattet ist. Die Einsatzstoffe werden nach Zerkleinern und Anmischen als

Suspension in den Wirkungsbereich des bodennahen Mixers eingetragen. Dabei verliert das Einsatzstoffgemisch seine Sedimente höherer Dichte (Störstoffe) in einer Sedimentfalle, die je nach Bedarf entleert wird. Der zweite, im oberen Drittel angebrachte Mixer wird entsprechend den Änderungen im Füllstand des Behälters bei Anmischen und Ausdosieren im Anstellwinkel automatisch nachgeführt. Das erwärmte, O₂-freie Hydrolysat wird nach Passage eines Inline-Zerkleinerers quasi kontinuierlich in den meist thermophil betriebenen Hauptfermenter eindosiert. Der wärmegegedämmte Hydrolysebehälter ist vollständig geruchs- und gasdicht ausgeführt (Bild 2). Die Hydrolysegase werden entweder mit dem in der Hauptfermentation entstehenden Biogas vermischt und gemeinsam verwertet oder nach Kompression in den optionalen Festbettfermenter eingepresst und dort methanisiert.



Bild 2: Im Vordergrund: Gasdichte wärmegegedämmte BIOVoltaik® - Hydrolysestufe mit Bodenrührwerk (links unten am Behälter), Oberrührwerk mit Frequenzumformer (rechts oben am Behälter) und Beschickungseinrichtung (Bildmitte am Behälter); rechts hinter der Hydrolysestufe: BIOVoltaik® - „Turbo-Höchstlastfermenter“ (Foto: BIOVoltaik® GmbH)

Das „ThermDes®-Verfahren“ der ARCHEA New Energy GmbH (Hessisch Oldendorf; <https://www.archea-biogas.de>) kombiniert einen liegenden Propfenstromfermenter als „Hydrolysestufe“ und eine als klassischer Rührkesselfermenter ausgebildete „Methanstufe“ mit einer zwischengeschalteten Einheit zur „thermischen Desintegration“ - ThermDes®, in

der das Gärgemisch für die Dauer von etwa einer Stunde auf 70 °C erhitzt und somit auch weitgehend hygienisiert wird. Eine Anlage dieses Typs wurde bereits in der ersten Runde des Bayerischen Biogas-Monitorings untersucht – allerdings wurde in diesem Fall die ThermDes®-Einheit nie in Betrieb genommen (Effenberger

et al., 2010). Die Analyseergebnisse für die Prozessindikatoren FOS/TAC, Essigsäure, Propionsäure und pH-Wert von Proben aus der ersten Stufe zeigen, dass dort zeitweise organische Säuren in erhöhten Konzentrationen auftraten (Tab. 1).

Tab 1: Analyseergebnisse für ausgewählte Prozessindikatoren in Proben aus der ersten Stufe einer nach dem ThermDes®-Verfahren konzipierten Referenzanlage (Quelle: Effenberger et al., 2010)

Parameter	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert
FOS/TAC, 1	0,51	2,1	1,3
Essigsäure, mg/L	268	3.373	2.052
Propionsäure, mg/L	6	4.117	2.987
pH, 1	7,0	8,2	7,5

Beim einphasigen Verfahren sollte als Richtwert die Konzentration von Essigsäure deutlich unter 3.000 mg/L, die Konzentration von Propionsäure deutlich unter 1.000 mg/L und der FOS/TAC-Wert unter 0,5 bis 0,8 bleiben (Vergleiche hierzu auch die Fachinformation „[Schlüsselparameter zur Kontrolle des Gärprozesses](#)“). Demnach wies der Propfenstromfermenter der untersuchten Anlage anhand der ausgewählten Prozessindikatoren nicht durchgängig die Charakteristik einer Hydrolyse-Versäuerungsstufe auf. Da der pH-Wert im neutralen Bereich lag, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer erheblichen Methanbildung auszugehen, was mangels der Möglichkeit zur getrennten Analyse des Gases aus diesem Fermenter jedoch nicht validiert werden konnte. Das Hydrolyse-Gasgemisch wird mit dem produzierten Biogas gemeinsam verwertet.

Bei der „Thermo-Druck-Hydrolyse“, wie sie für die Behandlung von kommunalem Klärschlamm zum Einsatz kommt, werden Temperaturen von ca. 170 °C und Drücke von mehreren hundert Kilopascal angewandt (Brodtkorb, 2008). Das Verfahren kann auch zur Behandlung biologischer Reststoffe eingesetzt werden, wobei eine mechanische Vorzerkleinerung der Biomasse erfolgt, um die Effektivität des Aufschlusses zu erhöhen. Auf Grund des erheblichen Invest-

ments und des hohen Prozessenergiebedarfs dürfte das Verfahren für landwirtschaftliche Biogasanlagen allerdings uninteressant sein, sofern nicht ohnehin die Notwendigkeit für eine Hygienisierung der Einsatzstoffe gegeben ist.

Fazit:

Aus den dargestellten Gründen ist eine Hydrolysestufe in jedem Fall **zur Atmosphäre hin dicht** auszuführen. Das Hydrolysegas ist in geeigneter Weise in das Gassystem der Biogasanlage einzuleiten: es kann entweder in das Gärgemisch (zur Verwertung insbesondere des Wasserstoffs in der biologischen Methansynthese) eingepresst oder in den Biogasspeicher eingeleitet werden. Hierzu muss das Hydrolysegas gegebenenfalls getrennt gesammelt, behandelt und evtl. komprimiert werden. Eine direkte Einleitung des Hydrolysegases in den Ansaugluftstrom des BHKW ist nicht sachgerecht und kann zu Motorschäden führen. Von der Vorgehensweise, das Gas über einen Biofilter ins Freie abzuleiten, ist abzuraten, da hierbei keine ausreichende Betriebssicherheit insbesondere beim Abbau von Wasserstoff zu erwarten ist; zudem ist im Hydrolysegas enthaltene nutzbare Energie in diesem Fall verloren. In jedem Fall sind die Vorschriften zum Immissionsschutz einzuhalten.

5. Beobachtungen an Referenzanlagen mit zweistufig-zweiphasiger Verfahrensführung

Aus dem Biogas-Messprogramm III (BMP III; FNR, 2021) stehen Daten mehrerer Referenzanlagen zur Verfügung, die mit einer Hydrolysestufe ausgestattet sind. Unter den insgesamt 60 im BMP III untersuchten Biogasanlagen waren zwei Anlagen mit offener Hydrolysestufe und fünf Anlagen mit einer geschlossenen, an die Gasstrecke angeschlossenen Hydrolysestufe vertreten. Im Folgenden soll beleuchtet werden, ob aus den Ergebnissen des Messprogramms Hinweise für eine effektive zweistufig-zweiphasige Verfahrensführung abgeleitet werden können.

Wie bereits erwähnt, setzt mit der Hydrolyse in der Regel auch der Prozess der Versäuerung ein (Vergleiche Abb. 1). Im BMP III wurden als chemische Prozessindikatoren der pH-Wert, die Konzentration an flüchtigen Fettsäuren (FFS) und der TAC-Wert bestimmt. Als übergreifende Kennwerte zur Beurteilung der Prozessführung sollen zudem die Raumbelastung des Fermentersystems mit organischer Trockenmasse (oTM) und die Methanproduktivität herangezogen werden.

Vergleicht man die Grundcharakteristik der sieben Anlagen aus dem BMP III mit Hydrolysestufe gemäß Tab. 2, so weisen diese Anlagen alle einen Substratmix auf, der überwiegend aus Mais-GPS und Rinder- oder Schweinegülle besteht. (Vermutlich wurde der Substratmix dahingehend optimiert, den Güllebonus zu realisieren.) Für eine bessere Übersicht wurden die Anlagen in Tab. 1 qualitativ nach dem Einsatz tierischer Wirtschaftsdünger gruppiert: In Nrn. 5, 29, 41 wird Schweinegülle eingesetzt; in Nrn. 9, 10, 14 ist Rindergülle das Hauptsubstrat, daneben kommt auch Rindermist zum Einsatz; Nr. 39 ist die einzige Anlage in dieser Auswahl, in der auch Hühnertrockenkot verwertet wird.

Betrachtet man die in Kap. 3 vorgestellten Kriterien, würde man anhand der Einsatzstoffe lediglich für die Anlagen Nr. 5 und 29 zu dem Schluss kommen, dass eine getrennte Hydrolyse-/Versäuerungsstufe eventuell sinnvoll sein könnte: Zuckerrüben, Silo-Sickersaft und Getreide-

schrot versauern rasch. Während leider nicht für alle Anlagen Proben aus den Hydrolysestufen chemisch analysiert wurden, liegen für diese beiden Anlagen Analysendaten vor (Vergleiche Tab. 4). Die hohen FFS- und FOS/TAC-Werte zeigen eindeutig eine vorherrschende Versäuerung an. Gleichzeitig wird in beiden Anlagen Gärgemisch in die Hydrolysestufe zurückgeführt. Deshalb ist bei den gemessenen pH-Werten um 6 davon auszugehen, dass in diesem Milieu auch eine nennenswerte Methanbildung stattfindet. Dies ist im Falle der offenen Bauweise der „Hydrolysestufe“ von Anlage 5 äußerst problematisch.

Von den übrigen Anlagen liegen nur für Nr. 39 Analysenergebnisse von Proben aus der Hydrolysestufe vor. FFS-Konzentration und FOS/TAC zeigen hier jedoch eher das Muster eines hoch belasteten einphasigen Gärprozesses und nicht dasjenige einer Hydrolyse-/Versäuerungsstufe. Hierbei verhindert die hohe Pufferkapazität aufgrund des Einsatzes von Rindergülle und Hühnertrockenkot eine Versäuerung des Gärgemisches.

Aufgrund der lückenhaften Daten für die Hydrolysestufe kann der Gärprozess im Gesamtvergleich der sieben ausgewählten Anlagen nur anhand der Prozessindikatoren für die Hauptgärstufe beurteilt werden. Hierbei fallen in Tab. 4 mit Ausnahme von Anlage 29 die sehr geringen FFS-Konzentrationen und FOS/TAC-Werte auf, welche auf eine ungehemmte Methanbildung hinweisen. Für Anlage 29 ist anhand der verfügbaren Daten davon auszugehen, dass sich die Methanbildung auf die drei Behälter „Hydrolysestufe“, „Fermenter“ und „Gärrestlager 1“ (mit Gaserfassung) aufteilt; messtechnisch validiert werden konnte dies leider nicht (Vergleiche FNR, 2021). Die TS-Gehalte in der Hauptgärstufe liegen – mit Ausnahme von Anlage 39 – deutlich unter dem Mittelwert für die Gesamtheit der Anlagen im BMP III (Vergleiche Tab. 3 und Tab. 4), was damit zu erklären ist, dass diese Stufe mit Gärsuspension aus der vorgeschalteten Hydrolysestufe beschickt wird – nicht direkt mit Feststoffen.

Tab 2: Wertebereich ausgewählter Kennzahlen und Prozessindikatoren für die Gesamtheit der im BMP III untersuchten Biogasanlagen (Quelle: FNR, 2021)

	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum
oTM-Raumbelastung, kg / (m³ d)	2,7	2,3	0,7	5,1
Methanproduktivität, m³ / (m³ d)	0,9	0,9	0,2	1,9
Hauptgärstufe: TS-Gehalt, %	9,6	k.A.	4,3	18,8
Hauptgärstufe: FOS/TAC, 1	0,27	K.A.	0,09	1,68

Diese Befunde lassen darauf schließen, dass die mehrstufig-mehrphasige Prozessführung zu einer größeren Stabilität des gesamten Gärprozesses beitragen kann, wenn wie in Anlage 5 leicht abbaubare Substrate, möglicherweise in schwankenden Anteilen, in Verbindung mit Gülle und Stärke betonten Energiepflanzen eingesetzt werden. Allerdings finden sich im BMP III auch Beispiele für Anlagen mit ähnlichem Substratmix wie Anlage 5, jedoch mit einstufiger (Nr. 59) bzw. einphasig-zweistufiger Prozessführung (Nr. 56), die ebenso stabil betrieben werden konnten.

Im Sinne von Kriterium (2) in Kap. 3 soll nun überschlägig betrachtet werden, ob die Anlagen mit „Hydrolysestufe“ im Vergleich mit der

Grundgesamtheit der im BMP III untersuchten Biogasanlagen erkennbar produktiver arbeiten. Hierfür wurde in Abb. 3 für alle mehrstufigen Anlagen die Methanproduktivität über der oTM-Raumbelastung, jeweils bezogen auf das Arbeitsvolumen des gesamten Fermentersystems, aufgetragen. Außerhalb des eingezeichneten 5 %-igen Konfidenzbereichs für den linearen Trend liegen vier Anlagen: Nrn. 9, 29 und 39 erreichen eine (leicht) überdurchschnittliche Produktivität, Nr. 14 fällt hingegen deutlich nach unten ab. Es ist also anhand dieser Auswertung von Daten aus dem Biogas-Messprogramm III kein klarer Vorteil von Praxisanlagen mit separater Hydrolysestufe für eine Steigerung der Methanproduktivität erkennbar.

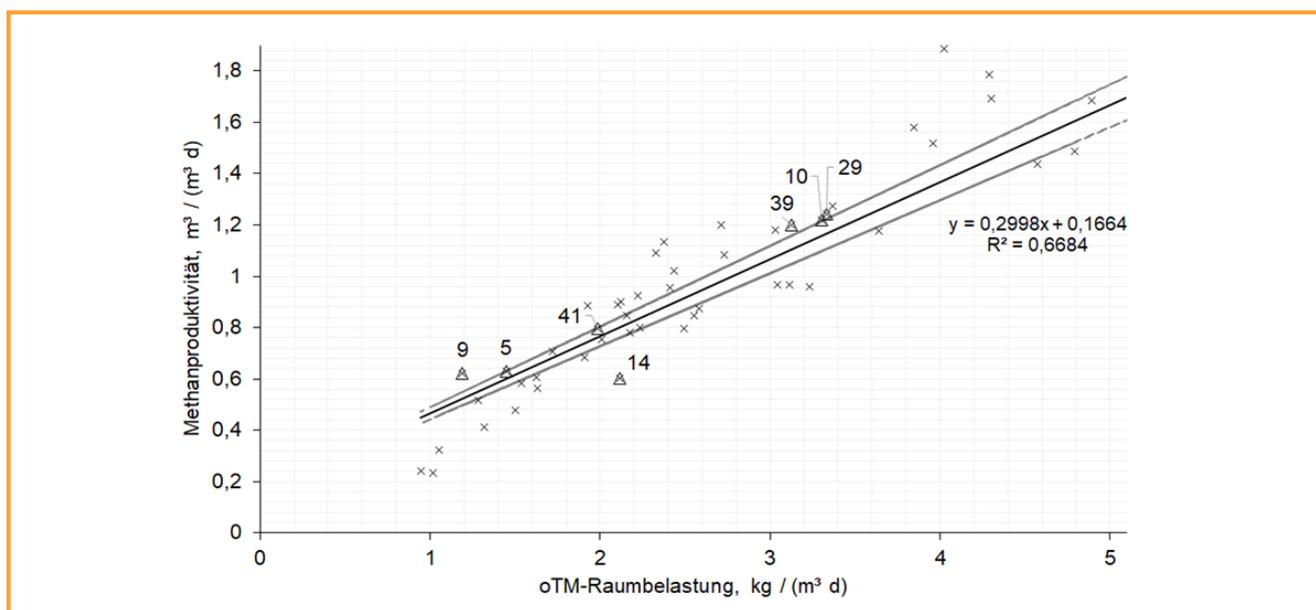


Abb. 3: Darstellung von Methanproduktivität und oTM-Raumbelastung für alle mehrstufigen Biogasanlagen im BMP III. Anlagen mit ausgewiesener Hydrolysestufe sind mit einem Dreieck markiert und mit der Anlagennummer gekennzeichnet; die Regressionsgerade (mit 5 %-igem Konfidenzbereich) basiert auf allen fünfzig mehrstufigen Anlagen

Abschließend soll noch das Ergebnis der qualitativen Bewertung der ausgewählten Anlagen mit der im BMP III verwendeten Referenzmethode „Benchmarksystem Biogas“ im Hinblick auf den möglichen Nutzen einer Hydrolysestufe überprüft werden. Die qualitative Bewertung sagt aus, ob eine bestimmte Biogasanlage in Bezug auf das jeweilige Kriterium im Vergleich mit einer Grundgesamtheit von Anlagen – in diesem Falle die Gesamtheit der 60 Anlagen im BMP III – eine Schwachstelle erkennen lässt und dementsprechend technische und/oder organisatorische Maßnahmen ergriffen werden sollten, um diese Schwachstelle zu beseitigen und die Anlageneffizienz zu verbessern. Hier fällt in Tab. 3 zunächst auf, dass für Anlage 41 eine deutliche Schwachstelle und für Anlage 5 ein schwerwiegender Mangel bei der relativen Biogasausbeute angezeigt wird. Dies deutet darauf hin, dass es aus den offenen Hydrolysestufen dieser

beiden Anlagen tatsächlich zu einem Verlust an nutzbarer Energie kommt.

Für die Methanproduktivität (Tab. 3: dritte Spalte) zeichnet das Benchmarksystem ein von der Darstellung in Abb. 3 etwas abweichendes Bild. (Prinzipielle Unterschiede zwischen einstufigen und mehrstufigen Anlagen sind hierbei in die Bewertungsmethode integriert.) Die absolut gesehen auf sehr niedrigem Niveau liegende Methanproduktivität der Anlagen 5 und 9 wird hier wie auch für Anlage 14 als Schwachstelle ausgewertet: der verfügbare Gärraum könnte durch eine Steigerung der Raumbelastung effizienter genutzt werden. Sollte dies tatsächlich umgesetzt werden, könnte sich die Hydrolysestufe doch als vorteilhaft erweisen, indem das Risiko einer Destabilisierung des Gärprozesses während der Steigerung der Raumbelastung minimiert wird.

Tab 3: Ergebnis der qualitativen Bewertung des Prozessabschnitts „Biogasproduktion“ mit dem „Benchmarksystem Biogas“ für die Anlagen mit ausgewiesener separater Hydrolysestufe im BMP III. Erläuterung der Bewertungsattribute: „sehr gut“ = praktisch keine Verbesserung möglich; „gut“ = keine signifikante Schwachstelle, leichte Verbesserung möglich; „ausreichend“ = Schwachstelle vorhanden, Verbesserung empfohlen; „ungenügend“ = schwerwiegender Mangel vorhanden, Verbesserung dringend erforderlich (verändert nach: FNR, 2021)

ID	Relative Biogasausbeute	Methanproduktivität	Biogasproduktion insgesamt
5	ungenügend	ungenügend	ungenügend
9	sehr gut	ungenügend	ausreichend
10	gut	gut	gut
14	gut	ungenügend	ausreichend
29	gut	gut	gut
39	gut	gut	gut
41	ausreichend	ausreichend	ausreichend

Für die zusammenfassende Bewertung (Tab. 3: letzte Spalte) der Biogasproduktion wird das Ergebnis für die relative Biogasausbeute im Benchmarksystem höher gewichtet als die Methanproduktivität. Zur Einordnung des Bewertungsergebnisses für die Biogasproduktion in den sieben Anlagen mit Hydrolysestufe: Von den 48 Anlagen im BMP III, die mit dem Benchmarksystem bewertet werden konnten, wurden drei Anlagen mit „sehr gut“, 26 mit „gut“, 14 mit „ausreichend“ und fünf mit „ungenügend“ bewertet.

Fazit:

Die dargestellte Auswertung der Ergebnisse für die im Biogas-Messprogramm III untersuchten sieben Biogasanlagen mit ausgewiesener separater Hydrolysestufe, davon zwei in offener und fünf in geschlossener Bauweise, lässt keine größere Stabilität des Gärprozesses oder eine höhere Produktivität des Fermentersystems gegenüber Anlagen ohne eine solche Hydrolysestufe, d. h. mit einphasig-einstufiger oder einphasig-mehrstufiger Prozessführung, erkennen. Unter der Annahme, dass die im BMP III beobachteten Anlagen das typische Spektrum an Substraten abbilden, welches in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zum Einsatz kommt bzw. kam, kann man schlussfolgern, dass bei diesen Konstellationen in aller Regel eine zweiphasige Prozessführung nicht notwendig ist. Mit den gegebenen Substratmischungen und der gängigen Praxis der Rezirkulation von Gärgemisch

wird sich hier ohnehin keine klare Phasentrennung realisieren lassen. Wenn in der Biogasanlage regelmäßig rasch hydrolysiertbare und versauernde Substrate zu variablen Anteilen eingesetzt werden sollen (etwa zur Flexibilisierung der Methanerzeugung), kann eine geschlossene Vorstufe zur Vermischung und „Vorversäuerung“ allerdings sinnvoll sein, um das Risiko einer Destabilisierung des Gärprozesses durch Beschickungsspitzen zu minimieren. Ähnliches kann auch für Weiterentwicklungen des mikrobiologischen Voraufschlusses schwer abbaubarer, lignocellulosereicher Einsatzstoffe gelten. Das Benchmarking für die erzielte Biogasausbeute bestätigt, dass offene Hydrolysestufen nicht nur aus Gründen des Arbeits- und Immissionsschutzes, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht nicht tolerabel sind.

Tab 4: Charakterisierung der Biogasanlagen aus dem BMP III mit ausgewiesener Hydrolysestufe (verändert nach: FNR, 2021)

Anlagen-ID	5	29	41	9	10	14	39
Einsatzstoffe*	Mais-GPS, Schweinegülle, Zuckerrüben, Silo-Sickersaft	Mais-GPS, Schweinegülle, Getreideschrot	Mais-GPS, Rindergülle, Schweinegülle	Rindergülle, Mais-GPS, Rindermist, Roggen-GPS	Rindergülle, Mais-GPS, Rindermist	Rindergülle, Mais-GPS, Grassilage, Rindermist	Mais-GPS, Rindergülle, Triticale-GPS, Hühner-trocken-kot
Anzahl Prozessstufen	(3)**	2	(3)**	3	3	3	3
Hydrolyse ist nte-Stufe	1	1	1	1	1	1	2
Zugabe Gülle in ...	Hydrolyse						Absetz-behälter
Eintrag Feststoffe in ...	Hydrolyse						Absetz-behälter
Hydrolyse: Bauform	Rühr-kessel	Pfropfen-strom	Rühr-kessel	Rühr-kessel	Rühr-kessel	Rühr-kessel	Rühr-kessel
Hydrolyse: Bauweise	offen	geschlossen	offen	geschlos-sen	geschlos-sen	geschlos-sen	geschlos-sen
oTM-Raumbelastung, kg/(m³ d)	1,4	3,3	2,0	1,2	3,3	2,1	3,1
Hydrolyse: Arbeitsvol. (AV), m³	200	110	191	238	238	628	200
Fermentersystem: AV, m³	3.030	850	6.898	6.472	3.112	5.672	3.230
Hydrolyse: Prozesstemp., °C	40	45	40	k.A.	k.A.	30	42
Hydrolyse: pH, 1	5,9	6,1	k.A.	k.A.	k.a.	k.A.	7,3
Hydrolyse: TS-Gehalt, %	9,6	9,6	k.A.	k.A	k.A	k.A	10,9
Hauptgärstufe: TS-Gehalt, %	5,8	6,8	6,8/7,2	6,5	7,3/7,6	6,6	9,8
Hauptgärstufe: Bauform	Rührkessel						
Hydrolyse: FFS, mg/L	13.000	17.500	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	9.000
Hauptgärstufe: FFS, mg/L	100	3.100	100/200	100/200	100	100	300
Hydrolyse: FOS/TAC, 1	4,3	4,4	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1,0
Hauptgärstufe: FOS/TAC, 1	0,1	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Methanproduktivität, m³/(m³ d)	0,63	1,3	0,82	0,50	1,2	0,60	1,2

*) Angegeben sind Einsatzstoffe mit einem mittleren Massenanteil von mindestens 3 % in der Reihenfolge abnehmenden Anteils. **) Da die Hydrolysestufe zur Atmosphäre hin offen ausgeführt ist, wurde diese – abweichend von FNR (2021) – nicht in das Arbeitsvolumen des Fermentersystems eingerechnet. k.A.: keine Angabe.

Zusammenfassung

Ob eine zweistufig-zweiphasige Verfahrensführung mit getrennter Hydrolysestufe für Biogasanlagen technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist, wird in erster Linie durch die Einsatzstoffe bestimmt. Kommen Substrate zum Einsatz, die reich an schnell hydrolysierbaren Substanzen wie Stärke, Zucker und Proteinen sind, kann gegenüber dem einphasigen Prozess durch die separate biochemische Hydrolyse eine Hemmung der Methanbildung durch Anreicherung von Versäuerungsprodukten verhindert werden. Dies hat bei einer biologischen Flexibilisierung der Methanerzeugung positive Effekte auf die Prozessstabilität. Sollen hingegen Substrate mit einem hohen Anteil an Lignocellulose verwertet werden, läuft die alleinige biochemische Hydrolyse in der Regel zu langsam ab und es kann versucht werden, die zum weitgehenden Abbau erforderliche Verweilzeit zu verkürzen, indem die Biomasse zuvor mechanisch, thermisch oder mikrobiell aufgeschlossen („desintegriert“) wird.

In der landwirtschaftlichen Biogastechnik zeigt sich die Ausgestaltung von Verfahren mit „Hydrolysestufen“ sehr uneinheitlich. Durch eine unsachgemäße Verfahrenskonzeption mit einer zur Atmosphäre hin offenen, evtl. zusätzlich beheizbaren Hydrolysestufe wird jedoch möglicherweise nicht nur ein erheblicher Anteil des Energiepotentials der Einsatzstoffe durch die Freisetzung von Wasserstoff und Methan verschenkt, sondern auch ein erhebliches Sicherheitsrisiko verursacht. Solche Verfahren sind daher aus Gründen des Arbeits- und Immissionsschutzes prinzipiell nicht tolerierbar und aus technologischer und wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll.

Eine gesonderte Auswertung des Biogas-Messprogramms (BMP) lässt zwar darauf schlie-

ßen, dass die mehrstufig-mehrphasige Prozessführung zu einer größeren Stabilität des gesamten Gärprozesses beitragen kann, wenn leicht abbaubare Substrate, möglicherweise in schwankenden Anteilen, in Verbindung mit Gülle und Stärke betonten Energiepflanzen eingesetzt werden. Allerdings finden sich im BMP auch Beispiele für Anlagen mit einem solchen Substratmix, die ebenso stabil nach dem einphasigen Verfahren betrieben wurden. Anlagen mit separater Hydrolysestufe ließen in dieser Auswertung auch keine generell höhere Methanproduktivität erkennen. Im Benchmarking für die erzielte relative Biogasausbeute schnitten hingegen die beiden Anlagen mit offener Hydrolysestufe klar unter dem Durchschnitt ab.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei dem Spektrum an Substraten, welches typischerweise in landwirtschaftlichen Biogasanlagen zum Einsatz kommt, in aller Regel eine zweiphasige Prozessführung nicht notwendig ist. Ohnehin lässt sich mit der gängigen Praxis der Rezirkulation von Gärgemisch in die Hydrolysestufe keine klare Phasentrennung realisieren. Wenn in der Biogasanlage regelmäßig rasch hydrolysierbare und versauernde Substrate zu variablen Anteilen eingesetzt werden sollen (z. B. zur Flexibilisierung der Methanerzeugung), kann eine Vorstufe zur Vermischung und „Vorversäuerung“ sinnvoll sein, um das Risiko einer Destabilisierung des Gärprozesses zu minimieren. Kommende Entwicklungen werden zeigen, ob dies auch für einen verstärkten Einsatz lignocellulosereicher Biomasse gilt. Eine solche Vorstufe muss jedoch in jedem Fall in zur Atmosphäre hin geschlossener Bauweise und möglichst mit energetischer Verwertung der dabei entstehenden Hydrolysegase ausgeführt werden.

Quellenangaben

- ▶ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Prozessbeschleunigung und Hygienisierung in Biogasanlagen durch Vorschaltung einer Hydrolysephase/-stufe. Online verfügbar unter <https://www.lfl.bayern.de/ilt/umwelttechnik/biogas/032393/index.php>, zuletzt geprüft am 17.03.2022
- ▶ Brodtkorb, N.: Optimierung der Desintegration von Klärschlämmen mit Thermo-Druck-Hydrolyse vor deren anaerober Stabilisierung. Diplomarbeit an der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel, Fachbereich Versorgungstechnik: Juni 2008
- ▶ Effenberger, M.; Bachmaier, H.; Kränsel, E.; Lehner, A.; Gronauer, A.: Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Schriftenreihe Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Nr. 1(2010), Freising-Weihenstephan: Januar 2010
- ▶ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2021): Biogas-Messprogramm III. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Online verfügbar unter <https://biogas.fnr.de/biogasmessprogramm-iii/index.html>, zuletzt aktualisiert am 22.02.2021.000Z, zuletzt geprüft am 11.03.2022
- ▶ Kainthola, J.; Podder, A.; Fechner, M.; Goel, R. (2021): An overview of fungal pretreatment processes for anaerobic digestion: applications, bottlenecks and future needs. *Bioresource Technology*, 321, 124397; <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124397>.
- ▶ Ottow, J. C. G und Bidlingmaier, W. (Hrsg.): *Umweltbiotechnologie*. Gustav Fischer Verlag: Stuttgart, Jena, Lübeck, Ulm: 1997 - ISBN 3-437-25230-5
- ▶ Wagner, A. O.; Lackner, N.; Mutschlechner, M.; Prem, E. M.; Markt, R.; Illmer, P. (2018): Biological pretreatment strategies for second-generation lignocellulosic resources to enhance biogas production. *Energies*, 11(7), 1797; <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1797>.

Glossar

- ▶ Fermenter; mit Substrat, Gärgemisch, Rezirkulat oder Gär-Hilfsstoffen beschickter Behälter, in dem ein biologischer Abbau stattfindet. Synonym: Reaktor oder Gärbehälter (wobei nur der Hauptgärbehälter und der Nachgärbehälter als eigentliche Gärbehälter gelten). In der Praxis werden die Begriffe Fermenter und Hauptgärbehälter synonym verwendet, der Nachgärbehälter wird hingegen nicht als Fermenter bezeichnet.
- ▶ Hydrolyse; Spaltung von Makromolekülen unter Anlagerung von Wasser und Bildung kleinerer, meist wasserlöslicher Moleküle.
- ▶ Methanproduktivität; Gebildete Menge an Methan pro Volumeneinheit des Gärbehälters und Zeiteinheit, $\text{m}^3 / (\text{m}^3 \text{ d})$.
- ▶ Relative Biogasausbeute; Verhältnis des an der Anlage über einen bestimmten Zeitraum gemessenen Biogasertrags zur prognostizierten Biogasmenge, die mittels einer Referenzmethode aus der über den gleichen Zeitraum eingebrachten Masse an Substrat berechnet wird, %.

Zitiervorlage: Effenberger, M., R. Kissel, C. Marín-Pérez, J. Beck und F. Friedrich (2022): Empfehlungen zu Verfahren der Hydrolyse in der Praxis. In: Biogas Forum Bayern bif7, Hrsg. ALB Bayern e.V., <https://www.biogas-forum-bayern.de/bif7>, Stand [Abrufdatum].



Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und
Landwirtschaftliches Bauwesen (ALB)
in Bayern e.V.

Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon: 08161 / 887-0078

Telefax: 08161 / 887-3957

E-Mail: info@alb-bayern.de

Internet: www.alb-bayern.de