

Biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung



www.biogas-forum-bayern.de/bif45

Biogas Forum Bayern, Verfasser:

Gunter Pesta
Atres Group

Dr. Jürgen Beck
BIOVOLTAIK GmbH

Sören Weinrich
DBFZ

Georg Friedl
FVB

Dr. Konrad Koch
TUM

Jasmin Kaun
CARMEN e. V.

Dr. Michael Lebuhn
LfL

Foren der ALB Bayern e.V.

ALB-Arbeitsblätter, ALB-Beratungsblätter, ALB-Infobriefe, ALB-Leitfäden und Fachinformationen werden in den Foren der Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. erarbeitet.

Die Foren, denen Fachleute der jeweiligen Sachgebiete angehören, sind Expertenausschüsse zum Informationsaustausch und zur Wissensvermittlung in die landwirtschaftliche Praxis.

Foren der ALB Bayern e.V.:

- ▶ Bau Forum Bayern (BaF),
Leitung: Jochen Simon, LfL-ILT
- ▶ Bewässerungsforum Bayern (BeF)
Leitung: Dr. Martin Müller, ALB
- ▶ Biogas Forum Bayern (BFB),
Leitung: Dr. Martin Müller, ALB
- ▶ Landtechnik Forum (LaF),
Leitung: Dr. Markus Demmel, LfL-ILT

Partner



Bayerisches Staatministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten



Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

Impressum

Herausgeber Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.
(ALB), Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon 08161 / 887-0078
Telefax 08161 / 887-3957
E-Mail info@alb-bayern.de
Internet www.alb-bayern.de

1. Auflage 2024
© ALB Alle Rechte vorbehalten
Titelfoto Philipp Wagner, ALB

Inhaltsverzeichnis

| | Seite |
|--|-------|
| 1. Einleitung | 4 |
| 2. Problemstellung | 4 |
| 3. Die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung | 5 |
| 4. Rahmenbedingungen für die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung | 6 |
| 4.1 Biologische Rahmenbedingungen | 6 |
| 4.2 Verfahrenstechnische Rahmenbedingungen | 7 |
| 5. Ansatzpunkte für eine biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung | 8 |
| 5.1 Einsatzstoff- und Fütterungsmanagement | 8 |
| 5.2. Fütterungsmanagement: Flexible Beschickung | 9 |
| 5.2.1 Variation der flexiblen Beschickung: Beschickung des Nachgärers mit Substraten | 10 |
| 5.2.2 Variation der flexiblen Beschickung: Rezirkulation aus dem Nachgärer in den Hauptgärer | 11 |
| 5.3 Fütterungsmanagement: Variation der Substrate | 11 |
| 5.4 Speicherung von Zwischenprodukten: Konservierung und Aufbereitungstechnik | 12 |
| 5.5 Speicherung von Zwischenprodukten: Hydrolysestufe | 13 |
| 5.6 Fermentersysteme für die biologische Flexibilisierung | 14 |
| 5.7 Die biologische Methanisierung: Methanbildung aus Wasserstoff und Kohlendioxid | 15 |
| 6. Modellbasierte Prozessoptimierung für eine bedarfsgerechte Biogasproduktion | 16 |
| 6.1 Prozessmodellierung der biologischen Flexibilisierung | 17 |
| 6.2 Prozessmodellierung der biologischen Flexibilisierung | 18 |
| 6.3 Großtechnische Anwendung der modellbasierten Prozessoptimierung | 19 |
| 7. Ökonomische Aspekte bei der bedarfsgerechten Biogaserzeugung | 20 |
| 8. Rechtliche Aspekte bei der bedarfsgerechten Biogaserzeugung | 21 |
| 9. Zusammenfassung | 22 |
| Literatur | 23 |

1. Einleitung

Die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung hat zum Ziel, bei erhöhtem Strombedarf oder hohen Stromverkaufspreisen bedarfsgerecht und kurzfristig ausreichend große Mengen an Biogas für die Verstromung zur Verfügung zu stellen. Während bei der flexiblen Stromerzeugung

die Produktion des Biogases von dessen Verstromung zeitlich entkoppelt wird, vor allem durch den Einsatz von Gasspeichersystemen, setzt die biologische Flexibilisierung bereits bei der Auswahl der Einsatzstoffe, der Beschickungsweise oder der Prozessführung an.

2. Problemstellung

Ein wichtiges Ziel beim zukünftigen Betrieb von Biogasanlagen ist es, nicht nur eine bedarfsgerechte Stromerzeugung mit angepasster Technologie und flexibler Fahrweise zu erreichen, sondern hierfür auch eine möglichst exakt im Voraus berechnete und zeitgerecht generierte Biogasmenge pro Zeiteinheit bereit zu stellen. Für die Regelung der biologisch flexibilisierten Biogaserzeugung kommen insbesondere inner-tägige („intraday“) und ganztägige („day-ahead“) Regelungsarten in Betracht (Abb. 1). Die Regelungsarten unterscheiden sich in ihrer Reaktionszeit. Die Reaktionszeit beschreibt die Zeitspanne zwischen der Bedarfsmeldung und der Reaktion darauf. Die Regelleistung, also die Systemdienstleistung zur Stabilisierung der Netzfrequenz, erfordert Reaktionszeiten kleiner 60 Minuten, bis in den Sekundenbereich. Demgegenüber steht die Strommarktoptimierung, also das Ziel, eine möglichst hohe Stromvergütung im börslichen und

außerbörslichen Handel zu erlösen. Die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung zielt ausschließlich auf die Strommarktoptimierung ab, mit Reaktionszeiten, die über der Schwelle von 60 Minuten liegen und auch Tage oder Monate betragen können.

Je zuverlässiger die innertägigen oder ganztägigen Bedarfsschwankungen ausgeglichen werden können, umso wertvoller ist das bedarfsgerecht bereitgestellte Biogas für die Optimierung des Strommarkts und umso höher wird die eingespeiste kWh Strom am Strommarkt vergütet.

Die vorliegende Fachinformation beschreibt die für eine biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung zu beachtenden prozessbiologischen und verfahrenstechnischen Rahmenbedingungen. Für die effektive Umsetzung eines flexiblen Biogasanlagenbetriebs werden zudem die Modellierung und Optimierung einer bedarfsgerechten Biogaserzeugung erläutert.

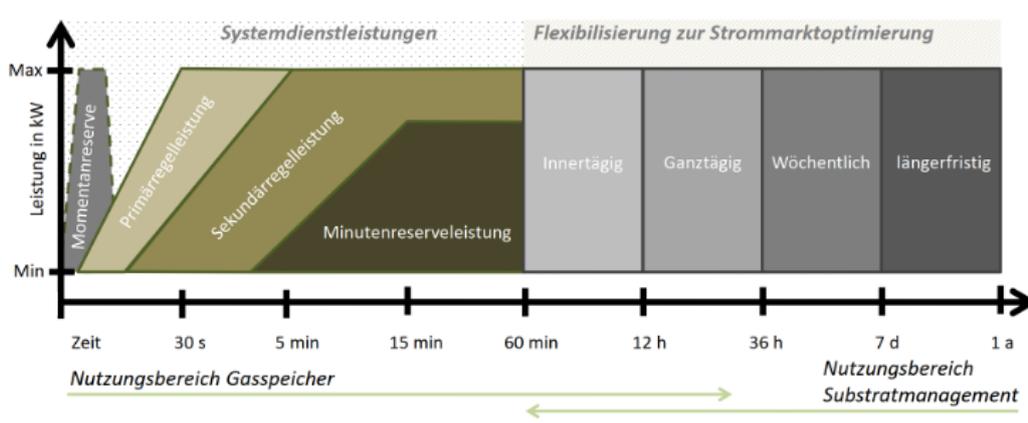


Abb. 1: Reaktionszeiten unterschiedlicher Regelungsarten für die Bereitstellung gesicherter elektrischer Leistung und deren Umsetzung auf Biogasanlagen (Quelle: Barchmann et al. [16])

3. Die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung

Die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung, für die in dieser Fachinformation synonym der Begriff der biologischen Flexibilisierung gebraucht wird, ist ein Ansatz zur bedarfsgerechten Bereitstellung von regenerativer Energie, wie beispielsweise Strom oder Wärme, aus Biogasanlagen. Biogasanlagen haben gegenüber anderen Verfahren zur Bereitstellung von regenerativer Energie wesentliche Alleinstellungsmerkmale. So können beispielsweise die Energieträger, d. h. die Substrate für die Biogasproduktion, über die Dauer eines Jahres und länger ohne größere Verluste bevorratet werden. Die Silierung von Energiepflanzen, wie beispielsweise Mais, Gras oder Rüben, ist hierzu ein lang bewährter Standard. Die Bevorratung der Substrate ist ein grundlegender Wettbewerbsvorteil der Biogasanlagen gegenüber den Anlagen für Photovoltaik, Windkraft und Wasserkraft. Diese nutzen mehr oder weniger stark fluktuierende Energiequellen und können systembedingt nicht immer bedarfsgerecht Strom liefern. Die größten Vorteile kann die flexible Biogaserzeugung dann ausspielen, wenn an einem windstillen Winter- oder Herbsttag der Himmel bedeckt ist, somit kein Windstrom erzeugt werden kann und die Einspeisung von Photovoltaikstrom ein sehr geringes Niveau aufweist

(sogenannte „Dunkelflaute“). Außerdem könnte es in Zeiten sehr niedriger Flusswasserpegel erforderlich werden, dass Laufwasserkraftwerke oder auch konventionelle Wärme-Kraftwerke in ihrer Leistung reduziert oder sogar vollständig abgeregelt werden müssen. Der Strom aus Biogasanlagen kann hingegen unabhängig von Dunkelflauten und Pegelständen erzeugt werden. In Abb. 2 sind verschiedene Möglichkeiten zur Flexibilisierung von Biogasanlagen dargestellt. Der Biogasprozess bietet über die gesamte Verfahrenskette hinweg prozessbiologische, technische und verfahrenstechnische Ansätze zur Flexibilisierung. Dabei kann zwischen Ansätzen einer bedarfsgerechten Biogasproduktion (auch: Biogaserzeugung) und Ansätzen einer bedarfsgerechten Stromproduktion unterschieden werden. Letztere basiert vornehmlich auf technischen Lösungen, wie einer Erweiterung von Biogasspeichersystemen, zur bedarfsgerechten Verwertung von Biogas zur Stromerzeugung. Die bedarfsgerechte Biogaserzeugung hingegen hat überwiegend prozessbiologische Lösungen wie das Fütterungsmanagement im Fokus. Dies kann durchaus auch in Kombination mit technischen Lösungen erfolgen, beispielsweise durch die Erweiterung um eine Hydrolysestufe.

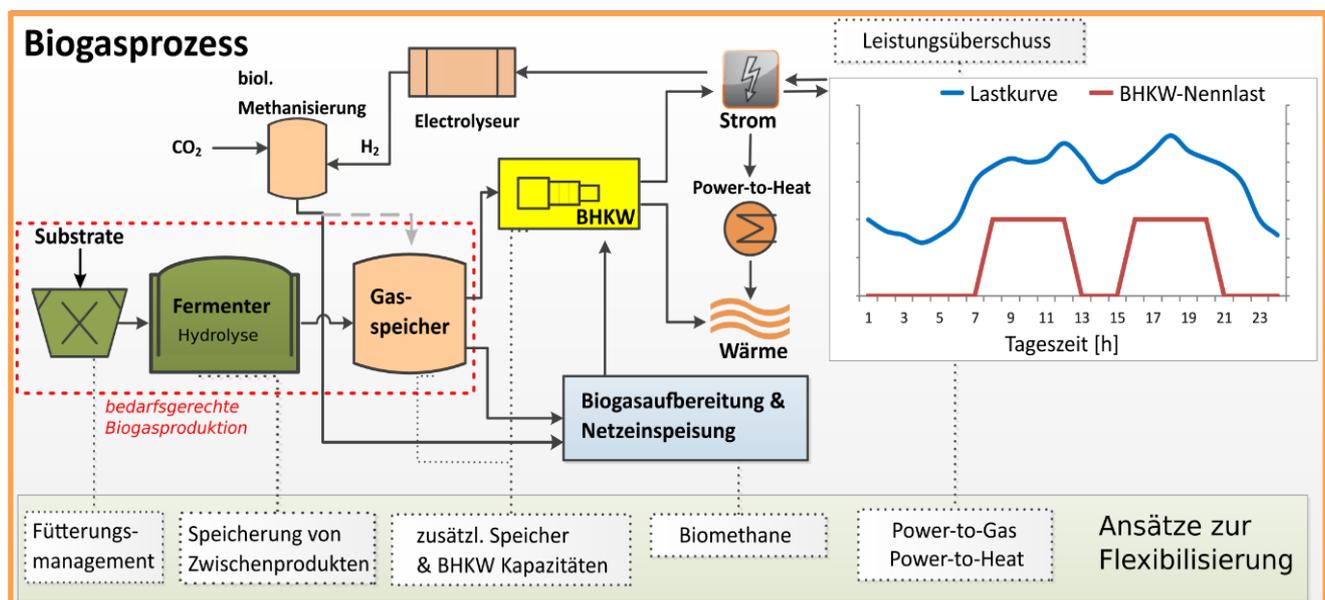


Abb. 2: Möglichkeiten zur Flexibilisierung von Biogasanlagen (angepasst nach Szarka et al. [18])

Grundsätzlich ist Standort spezifisch zu prüfen, welche der in Abb. 2 dargestellten Flexibilisierungsoptionen für eine bedarfsgerechte, effiziente und kostengünstige Bereitstellung von Biogas oder Strom aus Biogasanlagen in Betracht kommt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden jene Ansätze vorgestellt, die ausschließlich oder überwiegend biologische Mechanismen zur Steue-

rung der Biogaserzeugung beinhalten und damit konzeptionell einer „Biologischen Flexibilisierung der Biogaserzeugung“ zuzuordnen sind.

Ansätze, die eine Flexibilisierung der Stromerzeugung mittels überwiegend technischer Maßnahmen ermöglichen, z. B. durch Biogasspeichersysteme sind nicht im Fokus dieser Fachinformation und werden in der Veröffentlichung [„Technische Anforderungen an Biogasanlagen für die flexible Stromerzeugung“](#) behandelt.

4. Rahmenbedingungen für die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung

Die Ansätze für die biologische Flexibilisierung können biologischer, verfahrenstechnischer oder technischer Art sein und sind ebenfalls in Kombination möglich. Die Mehrzahl der Lösungsansätze entspricht dem Stand der Technik und ließe sich auf der überwiegenden Anzahl der Biogasanla-

genstandorte auch umsetzen. Für alle Standorte gilt gleichermaßen, dass die Bedürfnisse und Anpassungsfähigkeit der anaeroben Biozönose bei Maßnahmen zur biologischen Flexibilisierung zu berücksichtigen sind.

4.1 Biologische Rahmenbedingungen

Der Umstand, dass der anaerobe Abbau organischer Substanzen in mehreren Phasen erfolgt (siehe auch die Fachinformation [„Prozessmodell Biogas“](#)) lässt sich verfahrenstechnisch durch eine räumliche Trennung der Hydrolyse mit Versäuerung von der Methanogenese nutzen. So können bedarfsgerecht auch größere Mengen an flüchtigen Fettsäuren zu Biogas mit hohem Methangehalt verarbeitet werden.

Die sehr schnelle Reaktion der Hydrolysierer und Säurebildner auf zusätzlich pro Zeiteinheit dosierte, mikrobiell rasch abbaubare organische Substanz kann in einstufig/einphasigen Biogasanlagen zu einem kurzfristigen Überangebot an Wasserstoff und in Folge zu einem Überangebot an flüchtigen Fettsäuren führen. Der Anstieg der Wasserstoffkonzentration im Gärgemisch wirkt hemmend auf die syntrophen Stoffwechselforgänge, die zur Methanbildung führen. Durch den verlangsamten Abbau bei einer gleichzeitig weiterhin vermehrten Bildung von Fettsäuren

kommt es zur stetigen Anreicherung insbesondere von Essigsäure, Propionsäure und Buttersäure im Gärgemisch. Typischerweise sinkt hierdurch der pH-Wert, das Gärgemisch „versäuert“. Der pH-Wert sinkt umso schneller, je geringer das Puffervermögen des Gärgemischs ist. Weitere Folgen sind typischerweise ein sinkender Methangehalt und eine verringerte Biogasproduktion. In der Fachinformation [„Prozessbiologische Störungen in Nawaro- und Gülleanlagen: Symptome, Ursachen, Lösungsansätze“](#) finden sich dazu weiterführende Informationen.

Die flexible Biogasbildung ist umso leichter umzusetzen, je rascher die organische Raumbelastung gesteigert und wieder reduziert werden kann, ohne dass es zu einer Prozessstörung kommt. Dies gelingt zum einen durch den Einsatz leicht abbaubarer oder bereits hydrolysierter und versauerter Substrate (vgl. Kapitel 5.5). Bei der Auswahl der Substrate sind neben Konservierungsverlusten, Energiekonzentration, mikrobiel-

lerAbbaubarkeit und Abbaugeschwindigkeit auch deren zeitliche Verfügbarkeit, seuchenhygienische Anforderungen, ihre Anbaubedingungen, ihr Flächenbedarf, genehmigungsrechtliche Anforderungen sowie ihre logistischen Ansprüche und Bereitstellungskosten zu beachten.

Andererseits ist die Konzentration an methanogenen Archaeen direkt mit der Stabilität gegenüber Prozessschwankungen verbunden, zu denen beispielsweise auch die Steigerung der organischen Raumbelastung zählt: je höher die Konzentration aktiver Methanbildner im Fermenter ist, desto zuverlässiger können diese auf beschickungsbedingte, kurzfristige Schübe an Wasserstoff bzw. flüchtigen Fettsäuren reagieren. In den volldurchmischten Rührkesselfermentern ist die Konzentration an Methanbildnern jedoch nur bedingt beeinflussbar.

Im Gärgemisch bietet dessen Feststoffanteil (entspricht weitgehend dem Trockensubstanzgehalt) der Biozönose in der Regel ausreichend Aufwuchs- bzw. Besiedelungsfläche. Eine Erhöhung des Feststoffanteils in der Substratmischung kann deshalb die Konzentration der anaeroben Mik-

roorganismen erhöhen. Durch eine verfahrenstechnische Umgestaltung bzw. das „Repowering“ von Rührkesselfermentern ist eine Steigerung des Trockensubstanzgehalts jedoch nur begrenzt möglich. Biogasanlagen, die im sogenannten Trockenfermentationsverfahren betrieben werden, zeigen die Grenzen auf.

Im Umkehrschluss können nahezu feststofffreie Substrate in sogenannten Hochlastfermentern rasch und effektiv zu Biogas umgesetzt werden. Die Hochlastfermenter zeichnen sich dadurch aus, dass in ihrem aktiven Volumen eine sehr hohe Anzahl an Mikroorganismen vorzufinden ist. Hierbei können einerseits Einbauten oder grobporige Schüttgüter als Aufwuchsfläche für die Mikroorganismen dienen, andererseits kann die Biozönose selbst hochaktive Pellets ausbilden. Allerdings sollten die in Hochlastfermenter eingebrachten Substrate nahezu feststofffrei sein, da sonst deren Feststoffanteil die Einbauten verstopfen, den Biofilm ablösen oder die Pellets mechanisch zerstören könnten. Diese Problemstellung wird in Kapitel 5.6 weiter beschrieben.

4.2 Verfahrenstechnische Rahmenbedingungen

Die biologische Flexibilisierung weist nicht nur prozessbiologische Besonderheiten auf, es sind auch bauliche und verfahrenstechnische Aspekte zu berücksichtigen. Ideale Reaktoren bzw. Reaktorsysteme zur biologischen Flexibilisierung zeichnen sich durch eine potenziell möglichst hohe spezifische Biogas- bzw. Methanproduktivität aus. Je mehr Biogas mit möglichst hohem Methangehalt pro Kubikmeter Reaktorvolumen und Tag erzeugt werden kann, umso kleiner kann das benötigte Fermentervolumen bei vergleichbarer Biogasmenge ausfallen. Je höher die Energiekonzentration und leichter die anaerobe Abbaubarkeit der Substratmischung ist, je besser hydrolysiert/versauert also die Substratmischung bei der Einbringung in die Methanstufe ist, desto schneller und effektiver kann hochkalorisches Biogas zur Flexibilisierung generiert werden.

Weiterhin sind möglicherweise bauliche und verfahrenstechnische Anpassungen vorzusehen, wenn eher schwer abbaubare, lignozellulosereiche Substrate vergoren werden sollen, um einen längerfristig geringen Biogasbedarf angepasst zu bedienen.

Die entsprechenden technischen Maßnahmen sind allerdings nicht Gegenstand dieser Veröffentlichung. Hierzu wird auf die Fachinformationen „[Substrataufbereitung](#)“ und „[Einsatzstoffspezifische Besonderheiten in der Prozessführung](#)“ verwiesen.

5. Ansatzpunkte für eine biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung

In diesem Kapitel werden mögliche Ansatzpunkte für eine biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung beschrieben. Nicht immer ist eine eindeutige Abgrenzung zwischen biologischen und verfahrenstechnischen Maßnahmen möglich, vielmehr ergänzen sich diese in vielen Fällen. Eine derartige Abgrenzung erscheint auch nicht zwingend erforderlich, denn das Ziel ist eine gesamtheitliche und standortbezogene Lösung, die einen flexibilisierten Anlagenbetrieb zuverlässig

und effektiv ermöglicht. In jedem Fall gibt die anaerobe Biozönose mit ihren Anforderungen an das Prozessmilieu den Rahmen für die Möglichkeiten der biologischen Flexibilisierung vor. Für die Entscheidungsfindung sind die individuellen Rahmenbedingungen stets aktuell und den Gegebenheiten entsprechend zu ermitteln. Hierzu gehören auch bauliche und verfahrenstechnische Aspekte.

5.1 Einsatzstoff- und Fütterungsmanagement

Die Quantität und die Qualität der Einsatzstoffe (oder Substrate) sowie der Zeitpunkt ihrer Beschickung bieten effektive und kostengünstige Ansätze zur Regelung der Biogaserzeugung. Das Einsatzstoffmanagement hat die sichere Bereitstellung und den effektiven Einsatz der Substrate zum Ziel. Es umfasst alle Maßnahmen, die von der Auswahl der Substrate über deren Lagerung und Aufbereitung bis hin zur Beschickung des Fermenters reichen. Das in Abb. 2 dargestellte Fütterungsmanagement bezieht sich auf die Beschickung der Fermenter mit Substraten und ist damit Bestandteil des übergeordneten Einsatzstoffmanagements.

Im Rahmen des Einsatzstoffmanagements werden längerfristige Intervalle (Wochen oder Monate) typischerweise nach regelmäßigen, planbaren Änderungen gestaltet. Beispielsweise werden bei jahreszeitlichen Änderungen, z. B. im Winter wegen des höheren Energiebedarfs, bevorzugt energiereiche Substrate vergoren. Im Sommer wird dagegen der Anteil weniger energiereicher oder schwerer vergärbare Substrate, wie Gülle und lignozellulosereiche Reststoffe, gesteigert. Bei Letzteren sind ggf. verfahrenstechnische Anpassungen z. B. bei der Substrateinbringung zu

berücksichtigen (s. Abschnitt 4.2). Solche Szenarien mit jahreszeitlich variierender Auswahl der Einsatzstoffe werden in dieser Fachinformation nicht weiter vertieft.

Im Fokus der biologischen Flexibilisierung liegt vielmehr das Einsatzstoffmanagement mit kurzfristig vorzunehmenden Variationen der Futtermenge und -zusammensetzung über Zeiträume von knapp einer bis einigen Stunden oder Tagen (vgl. dazu Abb. 1). Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der nachfolgend näher beschriebenen Maßnahmen ist, dass der Betreiber durch gute fachliche Praxis bei der Konservierung eine sichere und nahezu verlustarme Bevorratung der Substrate sicherstellt. Damit einher geht die grundsätzliche Forderung nach einer nahezu gleichbleibenden, unverändert hohen Qualität der Substrate während der Dauer der Bevorratung.

Wie in allen anderen Fällen einer Prozessänderung auch, ist vor der Umsetzung der Maßnahmen der standortspezifisch gültige, rechtliche Rahmen für einen gesetzeskonformen Anlagenbetrieb bezüglich der Verweilzeit, der freigegebenen Substrate und der Vergütungsregelung zu beachten (vgl. auch Kapitel 8).

5.2. Fütterungsmanagement: Flexible Beschickung

Bei der flexiblen Beschickung soll durch Erhöhung der Beschickungsmenge die Biogasproduktionsrate innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne gesteigert und später durch Reduktion der Beschickungsmenge wieder verringert werden. Die Änderung der Beschickungsmenge muss entweder nach Fahrplan oder nach Abruf möglichst zeitnah und im Idealfall möglichst nahe der Last- bzw. Bedarfskurve erfolgen.

In Abb. 3 wird die flexible Beschickung mit bedarfsgerechter Substratzufuhr einer konstanten Beschickung gegenübergestellt. In der oberen

Darstellung der konstanten Substratzufuhr und einer dementsprechend gleichbleibenden Gasproduktionsrate wird die Bedeutung des Gasspeichers bzw. dessen Speicherkapazität deutlich. Nur ein ausreichend großes Gasspeichervolumen kann ein Leerfahren des Gasspeichers bei wechselndem Energie- bzw. Biogasbedarf verhindern. Die in Abb. 3 unten dargestellt bedarfsgerechte Substratzufuhr mit einer dementsprechend variablen Gasproduktionsrate ermöglicht es, zeitnah und effektiv auf Bedarfsschwankungen bei gleichzeitig reduzierter Anforderung an die Größe des Gasspeichervolumens zu reagieren.

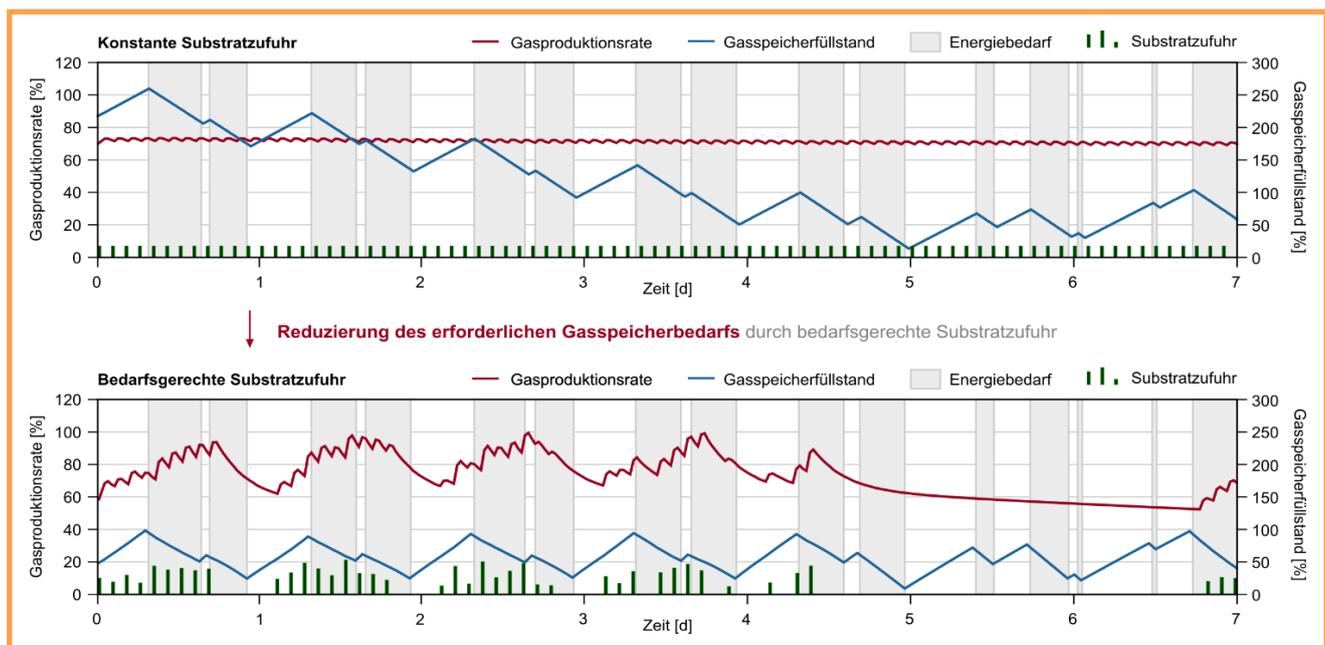


Abb. 3: Ergebnis einer modellbasierten Optimierung der Substratzufuhr zur bedarfsgerechten Biogasproduktion (Weinrich et al., 2017 [14])

Die Vorteile der in Kapitel 6 beschriebenen modellbasierten Prozessoptimierung für eine bedarfsgerechte Biogasproduktion werden in Abb. 3 bereits vorweggenommen: die Prozessmodellierung erlaubt eine vorausschauende Regelung der Beschickungsmenge und damit eine Verkürzung der Reaktionszeit des Gesamtsystems „Biogasanlage“.

Die Zeitspanne, die das Gesamtsystem „Biogas-

anlage“ ab dem Zeitpunkt der Bedarfsmeldung bzw. dem Beginn einer Maßnahme zur Flexibilisierung bis zum Zeitpunkt der Steigerung der Biogaserzeugung benötigt, wird als Reaktionszeit des Gesamtsystems definiert. Die Reaktionszeit berücksichtigt auch die Vorlaufzeit, die der Anlagenbetreiber oder das Regelungssystem benötigt, um bedarfsgerecht Anpassungen bspw. in der Zusammensetzung der Substratmischung

oder der Beschickungsmenge zu veranlassen. Je kürzer die Vorlaufzeit ist, und je rascher die zusätzliche Biogaserzeugung einsetzt, desto kürzer ist auch die Reaktionszeit des Gesamtsystems. Biogasanlagen mit kurzen Reaktionszeiten, wie sie auch durch eine modellbasierte Prozessoptimierung erzielt werden können, folgen den bedarfsorientierten Schwankungen des Biogasbedarfs zeitnah und effektiv. Dadurch können zusätzliche Investitionskosten, beispielsweise für eine Erweiterung der Gasspeicherkapazität, vermieden und letztlich höhere Erlöse aus dem Stromverkauf erzielt werden.

Die flexible Beschickung bewirkt mitunter einen kurzfristig starken Anstieg der organischen Raumbelastung des Fermenters, mit möglichen negativen Auswirkungen auf die Prozessbiologie. Je höher die organische Raumbelastung wird, desto anfälliger wird die Prozessbiologie gegenüber diesen oder weiteren Prozessänderungen. Folglich könnte der Prozess der Biogaserzeugung instabil werden und im schlimmsten Fall vorübergehend oder sogar gänzlich zum Erliegen kommen. Kurzfristige Beschickungsänderungen stellen demnach erheblich höhere Anforderungen an die Leistungsfähigkeit der Prozessbiologie und an die Überwachung der Prozessstabilität als bei konstanter organischer Raumbelastung. Beispielsweise erfasst ein automatisiertes Inline-Gasanalysegerät, vorzugsweise ausgestattet mit einem Wasserstoffsensoren, zeitnah Veränderungen der Biogasqualität und ermöglicht damit indirekt Aussagen über den Zustand der Prozessbiologie. Eine solche Inline-/Online-Gasmessung

ermöglicht bei kritischen Veränderungen der Biogasqualität kürzere Reaktionszeiten für das Einleiten von Maßnahmen zur Vermeidung von Prozessstörungen. In der Fachinformation [„Empfehlung für die messtechnische Ausstattung landwirtschaftlicher Biogasanlagen“](#) sind weiterführende Informationen zu messtechnischen Komponenten zu finden.

Einzelne Untersuchungen zeigen, dass trotz kurzfristiger Instabilitäten bei hohen Säurekonzentrationen wachstumslimitierende Zwischenprodukte bei angemessen langen Beschickungspausen wieder ausreichend abgebaut werden können [1]. Dieser „Kippunkt“ ist anlagen- und verfahrensspezifisch unterschiedlich und muss jeweils individuell ermittelt werden. Bis zu diesem „Kippunkt“ ist nicht mit einer längerfristigen Hemmung der Prozessbiologie durch den flexiblen Anlagenbetrieb zu rechnen. Somit lässt sich bereits durch gezieltes Beschickungsmanagement eine bedarfsorientierte Methanerzeugung an Bestandsbiogasanlagen realisieren.

Im Hinblick auf eine stabile Prozessführung bei flexibler Beschickung werden in den nachfolgenden Unterkapiteln zwei Variationen beschrieben. Diese Variationen haben das Ziel, dass der durch die flexible Beschickung unvermeidbare sprunghafte Anstieg der organischen Raumbelastung in einem Fermenter auf zwei oder mehrere Gärbehälter verteilt wird. Somit fällt in den einzelnen Fermentern der jeweilige relative Anstieg der Raumbelastung wesentlich moderater aus – mit positiven Effekten für die Prozessstabilität.

5.2.1 Variation der flexiblen Beschickung: Beschickung des Nachgärers mit Substraten

Der Nachgärer wird im Regelbetrieb mit dem Gärgemisch aus dem Hauptgärer beschickt, in dem ja bereits ein erheblicher Anteil der organischen Trockensubstanz umgesetzt wurde. Zudem hat der Nachgärer meist ein größeres Arbeitsvolumen als der Hauptgärer. Dementsprechend weist der Nachgärer eine wesentlich niedrigere organische Raumbelastung auf als der Hauptgä-

rer.

In der Regel erfolgt die Beschickung mit Substraten ausschließlich in den Fermenter bzw. Hauptgärer. Lässt die installierte Anlagentechnik zu, dass auch der Nachgärer mit Substraten beschickt werden kann, kann die Prozessbiologie im Hauptfermenter trotz flexibler Beschickung entlastet werden. Der durch die flexible Beschickung

bedingte rasche Anstieg der organischen Raumbelastung trifft hierbei nicht allein den möglicherweise bereits ausgelasteten Hauptgärer, der dann mit einer Prozessstörung reagieren könnte. Die relativ geringe organische Raumbelastung im Nachgärer wird durch dessen flexible Beschickung meist nur geringfügig angehoben bzw. bleibt unterhalb der für die dortige Prozessbiologie kritischen Werte. Absolute Zahlen für diese kritischen Werte sind von vielen Faktoren abhängig, beispielsweise von den Substraten, dem Fermentersystem oder der Betriebsweise. Sie sind deshalb nur standortspezifisch gültig und stets

vor Ort individuell zu ermitteln. Weiterführende Informationen über die organische Raumbelastung von Biogasfermentern finden sich im Bericht zum Biogasmessprogramm III (<https://mediathek.fnr.de/biogas-messprogramm-iii.html>).

Trotz des im Basis-Regelbetrieb eher energiearmen Substratangebots ist die Fermenterbiologie im Nachgärer sehr aktiv und kann nach einer direkt in den Nachgärer erfolgten Beschickung mit Substraten diese rasch umsetzen und messbar die Biogaserzeugung steigern.

5.2.2 Variation der flexiblen Beschickung: Rezirkulation aus dem Nachgärer in den Hauptgärer

Verfügt der Nachgärer über keine technische Einrichtung für eine direkte Beschickung oder kann diese nicht nachgerüstet werden, so kann die Prozessbiologie im Hauptgärer auch durch Umpumpen bzw. Rezirkulieren von Gärgemisch spürbar entlastet werden. Dabei wird aus dem Nachgärer mehrmals täglich eine größere Menge an Gärgemisch in den Hauptgärer zurück gepumpt. Korrespondierend dazu wird aus dem Hauptgärer zur Beibehaltung der Füllhöhen Gärgemisch zurück in den Nachgärer gepumpt. Prozessabhängig können täglich bis zu 15 % des Arbeitsvolumens des Hauptgärers ausgetauscht werden. Auf diese Weise werden zwei Effekte erzielt:

- ▶ Die durch die flexible Beschickung des Hauptgärers sprunghaft angestiegene organische Raumbelastung wird durch die „Verdünnung“ des Gärgemischs im Hauptgärer wieder verringert.
- ▶ Das Gärgemisch im Nachgärer wird demgegenüber durch frisches, vergärbare Material aus dem Hauptgärer „angereichert“, und somit wird dort mehr Biogas erzeugt.

Durch die Rezirkulation wird der sprunghafte Anstieg der effektiven organischen Raumbelastung im Hauptfermenter abgemildert, und die Belastung wird auf mehrere Gärbehälter verteilt.

5.3 Fütterungsmanagement: Variation der Substrate

In der Regel werden die Substratmischungen für Biogasanlagen kaum oder nur geringfügig in ihrer Zusammensetzung variiert. Meist sind für solche Änderungen äußere, nur bedingt planbare Umstände verantwortlich, wie eine zeitlich begrenzte oder mangelnde Verfügbarkeit einzelner Substrate oder die Festlegung der Schichtung unterschiedlicher Feldfrüchte im Silostock während des Einsilierens.

Für die biologische Flexibilisierung bietet sich hingegen eine gezielte, weil planbare, qualitative

Veränderung der Substrate an. Eine qualitative Veränderung bedeutet in diesem Fall, dass man durch Variation der Substrate

- ▶ kurzfristig den Mischungsanteil an sehr energiereichen und/oder rasch vergärbaren Substraten erhöht oder
- ▶ anstelle der bestehenden Substratmischung oder zusätzlich zu dieser kurzfristig energiereiche und/oder rasch vergärbare Substrate in den Reaktor dosiert.

Die sehr energiereichen und/oder rasch vergärbaren Substrate verkürzen die Reaktionszeit zwischen Beschickung und Biogaserzeugung messbar.

Für die Variation der Substrate ist es erforderlich, dass die energiereichen und/oder rasch vergärbaren Substrate getrennt von den regelmäßig dosierten Substraten gelagert werden. Beispielsweise können als energiereiche und/oder rasch vergärbare Substrate Getreide, Getreideschrot, Melasse oder Zucker- und Futterrüben bevorratet werden. Auch in diesem Fall können die unter

Abschnitt 5.2.1 und 5.2.2 beschriebenen Variationen (Beschickung direkt in den Nachgärer oder Rezirkulation zwischen Hauptgärer und Nachgärer) zur Stabilisierung der biologischen Abbauprozesse Anwendung finden.

Wie in allen anderen Fällen einer Prozessänderung auch ist vor der Variation der Substrate der standortspezifisch gültige, rechtliche Rahmen für einen gesetzeskonformen Anlagenbetrieb zwingend zu beachten. Dies betrifft z. B. die freigegebenen Substrate, aber auch eventuelle Vergütungsregelungen (vgl. auch Kapitel 8).

5.4 Speicherung von Zwischenprodukten: Konservierung und Aufbereitungstechnik

Voraussetzung für eine flexible Biogaserzeugung ist ein kurzfristig mobilisierbarer, hoher substratspezifischer Methanertrag je Kilogramm eingesetzter organischer Trockensubstanz. Um mit dem eingesetzten Substrat möglichst schnell und effizient Methan erzeugen zu können, sollten alle Voraussetzungen für einen zügigen und möglichst vollständigen Abbau des organischen Inputmaterials geschaffen werden. Wichtig ist dabei, dass qualitativ hochwertige Substrate mit möglichst durchgängiger Verfügbarkeit ausgewählt werden. Die wertbestimmenden Inhaltsstoffe der Substrate sollen durch eine verlustarme und möglichst schimmelfreie Konservierung bis zum Zeitpunkt der Beschickung des Fermenters erhalten bleiben. Beispielsweise wird bei der Silierung der im Substrat leicht verfügbare Zucker durch mikrobiologische Abbauprozesse zu kurzkettigen Fettsäuren abgebaut, vor allem zu Milchsäure. Dadurch wird der pH-Wert im Silostock abgesenkt und die Silage konserviert. In der Biogasanlage wiederum werden die kurzkettigen Fettsäuren rasch und vollständig von der Prozessbiologie primär über die Bildung von Essigsäure (Acetogenese) zu Methan umgesetzt.

Durch die gezielte Auswahl von für die Silierung geeigneten, energiereichen und rasch abbaubaren Substraten lassen sich besonders hohe Gehalte an flüchtigen bzw. kurzkettigen Fettsäuren erzielen, beispielsweise bei der Flüssigsilierung

von Rüben, CCM oder Getreide (siehe hierzu „[Rüben als Biogassubstrat – Teil 2/2 – Konservierung und Rübenkonzepte im Anlagenbetrieb](#)“). Die Flüssigsilierung führt im Vergleich zur Silierung im Silostock zu einer intensiveren Hydrolyse und Versäuerung der Substrate in der Maische. Entsprechend dieses weitergehenden Abbaus der Substrate werden große Mengen kurzkettiger Fettsäuren gebildet. Bei den sich dadurch einstellenden niedrigen pH-Werten kann die Maische langfristig nahezu verlustarm bevorratet werden. Ein zusätzlicher Vorteil der versauerten Maische ist deren Pumpfähigkeit, die einen vollautomatischen Abruf ermöglicht. So kann bei flexibler Beschickung der versauerten Maische eine messbare Steigerung der Biogasproduktion im Viertel- bis Halbstundenbereich erzielt werden. Auf Grund des niedrigen pH-Werts der versauerten Maische sind säure- und korrosionsfeste Lagerbehälter, Förderleitungen und Pumpen Grundvoraussetzung für die Funktionssicherheit.

Neben der chemischen Zusammensetzung der Substrate spielt für den erzielbaren mikrobiologischen Abbaugrad die Zugänglichkeit der Substratoberflächen für den enzymatischen Angriff eine maßgebliche Rolle. Steht für den enzymatischen Angriff eine zu geringe Oberfläche bzw. keine geeignete Angriffsfläche wie lignozellulosereiche Zellwandstrukturen oder sehr grobes/stückiges

Substrat zur Verfügung, so kann eine physikalische oder chemische Aufbereitung der Substrate erforderlich sein (siehe hierzu Kapitel 4.2 und Fachinformation „[Substrataufbereitung](#)“). Ziel

dieser Substrataufbereitung ist die Verbesserung der mikrobiologischen Abbaubarkeit der Substrate und daraus resultierend ein möglichst geringes Restgaspotenzial des Gärrests.

5.5 Speicherung von Zwischenprodukten: Hydrolysestufe

Für die gängigen einstufigen bzw. einphasigen Fermentersysteme ist die verfahrenstechnische Abtrennung der Hydrolyse und Versäuerung der Substrate von der Methanisierung der Zwischenprodukte mittels eines separaten Fermenters eine geeignete Option zur Anpassung an die Flexibilisierung der Biogaserzeugung [2]. Rasch vergärbare oder auch frische Substrate, wie z. B. Getreideschrot, Melasse oder Rübenschnitzel können ebenso wie langsamer oder schwer vergärbare Substrate wie z. B. Ganzpflanzensilage oder Landschaftspflegematerial in einer sogenannten Hydrolysestufe konditioniert werden. Die Konditionierung umfasst dabei die Durchmischung der einzelnen Substrate, die enzymatische Hydrolyse der langkettigen Inhaltsstoffe, die zuverlässige Versäuerung der kurzkettigen Zwischenprodukte und eine vorangeschrittene Acetogenese (Essigsäurebildung). Damit stellt die Hydrolysestufe für die anschließende Methanstufe eine gleichmäßig durchmischte, weitgehend versauerte und deshalb sehr energiereiche Maische bereit. Das sind generell gute Voraussetzungen für eine rasche und effektive Methanisierung, nicht nur für eine flexible Biogaserzeugung.

In der Hydrolysestufe kann die Substratmischung zusätzlich auch thermisch behandelt werden, mit dem Ziel einer Hygienisierung und/oder einer besseren Hydrolyse der Substrate. Darüber hinaus können bereits in der Hydrolysestufe sedimentierbare Störstoffe ausgetragen und dadurch Sinkschichten in der Methanstufe verhindert werden. Eine Separierung der Hydrolyse/Acetogenese von der Methanogenese entbindet aber nicht davon, die Verweilzeitvorgaben im EEG bzw. der TA-Luft einzuhalten.

Neben der Möglichkeit, den Abbau insbesondere

schwer verdaulicher Substrate zu verbessern und diese für die Methanbildung zu konditionieren, bietet eine separate Hydrolysestufe die Möglichkeit der Pufferung, Speicherung und Bevorratung des Substratgemisches. Die Hydrolysestufe kann tagesbedingte mengenmäßige Schwankungen in der Anlieferung von Substraten ebenso abpuffern wie auch qualitative Schwankungen bzw. häufig variierende Substrate. Sie kann problemlos stoßweise mit frischen Substraten beschickt werden, wobei die Entnahme der versauerten Maische typischerweise semikontinuierlich, aber gleichmäßig erfolgt. Die dadurch variierende Füllstandshöhe verdeutlicht die Pufferwirkung der Hydrolysestufe.

Vergleichbar mit der versauerten Maische bei der Flüssigsilierung wird aus der Hydrolysestufe die versauerte Substratmischung bedarfsgerecht entnommen. Bei angepasster Dosierung in die Methanstufe werden die sensiblen methanogenen Archaeen nicht überlastet, auch kurzzeitige Stoßbelastungen beeinträchtigen die Methanisierung in der Regel kaum. Deshalb bieten beide Funktionen der Hydrolysestufe, als Pufferbehälter und als Versäuerungsstufe, gute Voraussetzungen für die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung.

Das in der Hydrolysestufe entstehende „Hydrolysegas“ besteht vor allem aus Kohlendioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2). Bei pH-Werten über etwa 6 entsteht allerdings auch Methan (CH_4), was es im Sinne der oben erläuterten Speicherfunktion sowie aus sicherheitstechnischen Gründen zu vermeiden gilt. Da in der Praxis in der Regel eine Methanbildung nicht sicher ausgeschlossen werden kann und ein Austritt von Hydrolysegas in die Umwelt verhindert werden muss, ist die Hydro-

lysestufe in jedem Fall gasdicht auszuführen. Das dort gebildete Gas kann in geeigneter Weise für eine zusätzliche Methanbildung in das Gassystem der Biogasanlage eingeleitet oder auch extern beispielsweise in neuartigen Anwendungen zur biologische Methanisierung (Power-to-Gas-Ver-

fahren siehe Abschnitt 5.7) verwertet werden.

Weitergehende Informationen zur Umsetzung von Biogasverfahren mit separater Hydrolysestufe finden sich in der Fachinformation „[Empfehlungen zu Verfahren der Hydrolyse in der Praxis](#)“.

5.6 Fermentersysteme für die biologische Flexibilisierung

Bei den in der Praxis am meisten verbreiteten Rührkesselfermentern handelt es sich in der Regel um großvolumige, voll durchmischte Fermenter, die für die kontinuierliche Erzeugung von Biogas geplant und gebaut wurden. Aufgrund der einphasigen Prozessführung und einer weitgehend fehlenden Immobilisierung der aktiven Biomasse sind der organischen Raumbelastung in solchen Gärbehältern relativ enge Grenzen gesetzt. Daher kann es durch rasche Belastungssteigerungen im Zuge einer biologischen Flexibilisierung leicht zu einer Versäuerung und Prozesshemmung kommen (vgl. dazu Kapitel 4.1). Andererseits können selbst großvolumige Rührkesselfermenter wegen der weit verbreiteten, systembedingten Aufstellungsweise als Kaskade von Haupt- und Nachgärbehälter durchaus für die flexible Biogaserzeugung eingesetzt werden (vgl. dazu Kapitel 5.2.1 und 5.2.2).

Standortabhängig müssen Rührkesselfermenter, die für die flexible Biogaserzeugung eingesetzt werden sollen, den individuellen Anforderungen entsprechend betrieben, technisch umgerüstet oder in ein anderes Verfahrenskonzept eingebunden werden. Eine Maßnahme der angepassten Betriebsweise wäre es, mögliche Auswaschungsverluste an aktiver mikrobieller Biomasse z. B. durch Rückführung von Gärs substrat aus dem Nachgärer in den Hauptgärer zu verringern (vgl. dazu Kapitel 5.2.2). Eine technische Umrüstung wäre der Einbau einer Beschickungsvorrichtung für den Nachgärer (vgl. dazu Kapitel 5.2.1). Ein anderes Verfahrenskonzept wäre die Installation einer vorgeschalteten Hydrolysestufe (vgl. dazu Kapitel 5.5). Auch lassen sich leicht abbaubare Substrate, Zwischenprodukte oder Prozessflüs-

sigkeiten (z. B. Perkolat) extern in einem zusätzlichen Hochlastfermenter mit Biomasserückhalt vergären. So kann z. B. bei separierter Schweinegülle oder Zuckerrübensilage die energiereiche, nahezu feststofffreie Flüssigphase zur bedarfsgerechten Biogaserzeugung in einem Schlamm- oder Festbettreaktor verwendet werden [3, 4].

Bei der diskontinuierlichen Feststoffvergärung in sogenannten Garagenfermentern werden die als Schüttgut eingebrachten Feststoffe semikontinuierlich mit Perkolat besprüht, um optimale Abbaubedingungen zu gewährleisten. Das Perkolat enthält auch gelöste, energiereiche Zwischenprodukte und kann somit neben der Zirkulation auch direkt zur flexiblen Biogasproduktion in einem Fest- bzw. Schlammbettreaktor [2, 5] oder einem anaeroben Filter [6] verwendet werden.

In den liegenden Pfropfenstromfermentern soll, räumlich betrachtet, der Beginn der Vergärungsstrecke vorwiegend der Hydrolyse dienen und am Ende der Vergärungsstrecke soll die Methanogenese stattfinden. Prinzipiell würden sich Pfropfenstromfermenter wegen der vorgesehenen räumlichen Differenzierung der Abbauvorgänge gut zur Flexibilisierung der Biogaserzeugung eignen. Allerdings gehen die Vergärungsbereiche der Hydrolyse/Acidogenese und Methanogenese graduell ineinander über, weshalb sich ein zuverlässiges Einsatzstoffmanagement schwierig gestalten kann. Informationen oder gesicherte Erfahrungen zur bedarfsorientierten Flexibilisierung von Pfropfenstromfermentern liegen nicht vor.

Im Rahmen dieser Fachinformation lassen sich

nicht alle verfügbaren oder installierten Fermentersysteme und Fermenterkonstellationen hinsichtlich ihrer Eignung für die biologische Flexibilisierung bewerten. Dazu sind diese zu variantenreich in der technischen Ausführung und zu individuell in der jeweiligen Betriebsweise.

In jedem Fall sind bei einer geplanten Umstellung der Betriebsweise auf die biologische Flexibilisierung die möglichen Ansätze im Einzelfall zu prüfen, d.h. standortbezogen und aktuell.

5.7 Die biologische Methanisierung: Methanbildung aus Wasserstoff und Kohlendioxid

Alternativ zur Beschickung leicht fermentierbarer bzw. hydrolysierter Substratmischungen aus flüssigen und festen Komponenten können auch Wasserstoff (H_2) und Kohlenstoffoxide (CO , CO_2) als gasförmige Komponenten in einem „Power-to-Gas“-Verfahren (PtG) zur schnellen Methanbildung genutzt werden. Unter einem PtG-Verfahren wird die Umwandlung von Strom, vorzugsweise Überschussstrom aus erneuerbaren Energiequellen wie Windkraft oder Photovoltaik, in ein speicherbares Gas, typischerweise Wasserstoff (H_2) oder Methan (CH_4), als Energieträger verstanden. Bei der dem Methanisierungsprozess vorgeschalteten, initialen Elektrolyse werden H_2 und Sauerstoff (O_2) erzeugt. H_2 wird bei der biologischen Methanisierung benötigt und O_2 kann z. B. für die in-situ-Entschwefelung (siehe Fachinformation [„Entschwefelung von Biogas in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“](#)) oder zur Belüftung in der Abwasserreinigung verwendet werden. Bei der biologischen Methanisierung müssen zusätzlich zur Versorgung mit H_2 eine CO - oder CO_2 -Quelle vorhanden sein, hierfür lassen sich Biogas oder das Gas aus der Hydrolysestufe einsetzen.

Im „in-situ“-Verfahren wird H_2 in den Biogasfermenter eingepresst, um diesen mit dem im Gärgemisch vorhandenen CO_2 zu Methan umzusetzen. Dadurch sind Methangehalte von bis zu 80 % im Biogas möglich. Ein wesentlicher Nachteil ist die schlechte Löslichkeit von H_2 , weshalb für die feinblasige Einbringung und aufwendige Rührtechnik relativ viel Energie aufgewendet werden muss. Hinzu kommen thermodynamische Limitierungen im anaeroben Abbau der organischen

Substrate, die bei erhöhten H_2 -Konzentrationen zur Prozessversäuerung führen können. Grundsätzlich handelt es sich bei H_2 um ein schnell verwertbares Substrat, sodass für die „in-situ“-Verfahren lediglich Fermenter in Frage kommen, die deutlich unter Volllast betrieben werden.

Im „ex-situ“-Verfahren wird H_2 in einem separaten Reaktor z. B. im Rieselbettverfahren mit CO_2 und/oder CO zu hochreinem CH_4 umgesetzt [7, 20]. Hierzu können chemisch-physikalische Verfahren mit Katalysatoren oder auch die mikrobielle „hydrogenotrophe“ Methanogenese (siehe hierzu die Fachinformation [„Prozessmodell Biogas“](#)) eingesetzt werden. Eine wichtige Nutzungsoption dieser mikrobiellen Methanisierung ist die Aufbereitung von Biogas oder auch anderen Industrie-Abgasen wie Synthesegas zu annähernd reinem CH_4 in Einspeisequalität. In Kombination mit einer Biogasanlage wird dabei zusätzlich zum Methan im Biogas aus dem CO_2 weiteres Methan produziert. Somit wird bei gleichbleibendem Gasspeichervolumen (aus einem Liter CO_2 wird wieder ein Liter CH_4) der Energieinhalt des Biogases erhöht. Gegenüber dem empfindlichen und eher großindustriell einsetzbaren chemisch-physikalischen PtG-Verfahren ist die biologische Methanisierung auch aufgrund der Flexibilität und der Robustheit gegenüber Verunreinigungen wie Schwefelwasserstoff am Standort einer Biogasanlage vorteilhaft. Dieses Verfahren findet akt. deutschlandweit in einigen Demonstrationsanlagen Anwendung [z. B. 19], birgt aber noch wirtschaftliche und techn. Herausforderungen.

Vor der Umsetzung von Maßnahmen zur biologischen Methanisierung gibt es derzeit neben sicherheitstechnischen allerdings noch rechtliche Fragen zu klären: insbesondere sind die Auswirkungen auf die EEG-Vergütung der gesamten Anlagen sowie den so erzeugten zusätzlichen Strom rechtlich ungeklärt bzw. nicht explizit geregelt. Insbesondere Anlagen, die den NawaRo-Bonus gemäß EEG 2009 (gilt für alle Anlagen mit Inbetriebnahme vor EEG 2012) auch in Kombination mit einem Gülle- und oder Landschaftspflegebonus erhalten, droht bei einem zusätzlichen Einsatz von Wasserstoff, der außerhalb der Biogasanlage erzeugt wurde, aktuell der endgültige Verlust der genannten Boni. Unabhängig davon könnte es bei allen Biogasanlagen, die die EEG-Vergütung in Anspruch nahmen, zu dauerhaften Vergütungsproblemen kommen.

Betreiber, die ihre Biogasanlage im Hinblick auf eine biologische Methanisierung umrüsten bzw. ertüchtigen wollen, sollten daher vor einer Inves-

titionsentscheidung die rechtlichen Auswirkungen auf die Biogasanlage mit einem Fachjuristen erörtern – die Liste Juristischer Beirat Fachverband Biogas (https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de_juristischerbeirat) hilft bei der Auswahl. Im Augenblick spielt die biologische Methanisierung noch keine wesentliche Rolle in der betrieblichen Praxis. Dennoch ist unter dem Einfluss des technischen Fortschritts und der sich ändernden geo- und energiepolitischen Lage von einer außerordentlich günstigen Perspektive für die biologische Methanisierung auch zur Flexibilisierung der Methanerzeugung auszugehen. Der Ausbau der volatilen Stromerzeugung aus Windkraft- und PV-Anlagen wird den Bedarf an flexiblen Erzeugungsanlagen, die den Strom bedarfsorientiert bereitstellen können, weiter erhöhen. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist ein weiteres Ziel, dass die Erzeugung von Strom und Methan über bedarfsgeregelte Biogasanlagen aus Reststoffen und nachwachsenden Rohstoffen zukünftig erheblich an Bedeutung gewinnt.

6. Modellbasierte Prozessoptimierung für eine bedarfsgerechte Biogasproduktion

Um einen flexiblen Anlagenbetrieb für eine bedarfsgerechte Biogasproduktion zu ermöglichen, werden aussagekräftige Verfahren zur Substrat- und Prozesscharakterisierung sowie praxisnahe Methoden für eine automatisierte Prozessüberwachung und -regelung benötigt. Ein erforderliches Mindestmaß an funktionstüchtiger Mess-, Steuer- und Regelungstechnik ist dabei eine grundlegende Voraussetzung für eine flexible und sichere Prozessführung. Nur so können die geforderten substrat- und reaktorspezifischen Methanerträge auch zeitgerecht in entsprechendem Umfang realisiert werden. Entscheidend ist dabei, den zeitlichen Verlauf der Methan- bzw. Biogasproduktion möglichst genau vorherzusagen und dementsprechend die Methanbildner mit der genau bemessenen Menge an Einsatzstoffen in der benötigten Qualität zum optimalen Zeitpunkt zu versorgen. Für eine modellbasierte Prozessoptimierung ist nicht nur die Methanpro-

duktion, sondern die gesamte Biogasproduktion zu berücksichtigen, damit insbesondere die anlagenspezifischen Gasspeicherkapazitäten nicht überschritten werden.

Zur Erfassung der zugeführten Einsatzstoffmengen und damit erzielten Biogasbildungsraten werden robuste Sensoren benötigt, um den zeitlichen Zusammenhang zwischen Beschickung und der daraus resultierenden Biogasproduktion im Detail zu beschreiben. Dabei besitzt auch das real verfügbare Biogasspeichervolumen (einschließlich einer möglichen temperaturbedingten Volumenänderung) einen erheblichen Einfluss auf eine bedarfsgerechte Prozessführung. Entsprechend werden aussagekräftige Verfahren für eine präzise Messung und Vorhersage der Gasspeicherfüllstände sowie geeignete Methoden für ein flexibles Gasspeichermanagement benötigt [8].

Zusätzlich sind praxisnahe und aussagekräftige Indikatoren zur regelmäßigen Prozessüberwachung im regulären Anlagenbetrieb einzusetzen [9]. So lassen sich durch kontinuierliche Überwachung geeigneter Kenngrößen (wie beispielsweise die Online-Messung des Wasserstoffgehalts im erzeugten Biogas) entsprechende Zustandsänderungen und mögliche Prozessstörungen frühzeitig erkennen. Um jederzeit stabile Prozessbedingungen zu garantieren, sind zudem in Abhängigkeit von den verwendeten Substraten konkrete Grenzwerte (Erfahrungswerte) für maximale Fütterungsmengen je Stunde, Tag und Woche zu definieren.

Für die verwendeten Simulationsmodelle und

modellbasierten Automatisierungskonzepte werden weiterhin belastbare Methoden zur Charakterisierung der eingesetzten Substrate benötigt. Neben den anaerob abbaubaren Substratbestandteilen sind dabei auch Informationen zur Abbaukinetik erforderlich, um den zeitlichen Verlauf der flexiblen Biogasproduktion realitätsnah beschreiben und vorhersagen zu können. Entsprechende kinetische Parameter (wie beispielsweise Reaktionskonstanten erster Ordnung) lassen sich dabei nicht direkt über chemische Analysemethoden bestimmen, sondern sind über eine modellbasierte Auswertung von Laborversuchen oder direkt im regulären Praxisbetrieb anhand der verfügbaren Prozessdaten zu ermitteln [10, 11].

6.1 Prozessmodellierung der biologischen Flexibilisierung

Als belastbare Grundlage für eine modellbasierte Prozessflexibilisierung an Biogasanlagen wird ein aussagekräftiges Prozessmodell der Gärstrecke benötigt. Grundsätzlich existieren hierfür zahlreiche Simulationsmodelle, die unterschiedliche Teilprozesse, Zustandsgrößen und Inhibitoren der anaeroben Vergärung im Detail abbilden. Neben etablierten (aber mitunter komplexen) Reaktionsmodellen wie dem Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) sind dabei insbesondere vereinfachte Modellstrukturen für eine praxis-

nahe Simulation der charakteristischen Kenngrößen und Prozessindikatoren der Biogastechnologie geeignet [12].

Entsprechende Vereinfachungen des ADM1 (wie z. B. ADM1-R4) lassen sich zur detaillierten Beschreibung bzw. Vorhersage der bedarfsgerechten Biogasproduktion verwenden (Abb. 4) und zur modellbasierten Prozessregelung für einen bedarfsorientierten Substrateinsatz bei geringem Gasspeicherbedarf einsetzen [13].

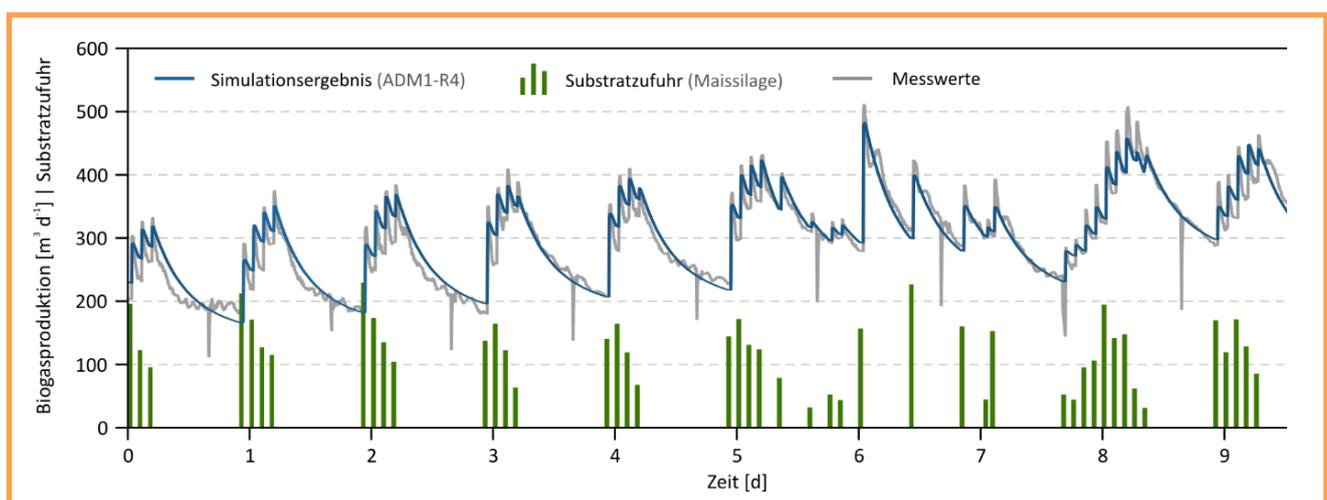


Abb. 4: Messwerte und Simulation der bedarfsgerechten Biogasproduktion bei der biologischen Flexibilisierung (angepasst nach Weinrich et al. [14])

Neben mechanistischen Prozessmodellen auf Basis biochemischer Gesetzmäßigkeiten lassen sich in Abhängigkeit von den verwendeten Substraten und Prozessbedingungen (Raumbelastung und

Verweilzeit) auch praxisnahe Verfahren auf Basis maschinellen Lernens oder linearer Regressionsmodelle zur Prozesssimulation verwenden [21].

6.2 Prozessmodellierung der biologischen Flexibilisierung

Für die Entwicklung einer automatisierten Prozessoptimierung zur bedarfsgerechten Biogasproduktion ist ein vollständiges Anlagenmodell erforderlich, das neben den jeweiligen Fermentern (Gärstrecke) auch die installierten Gasspeicher und Blockheizkraftwerke (BHKW) der jeweiligen Biogasanlage berücksichtigt (Abb. 5).

Zur Modellanwendung (einschließlich der Identifikation unbekannter Modellparameter) werden dabei Informationen zur konkreten Substratzusammensetzung, zu möglichen Witterungseinflüssen und zur Strompreisentwicklung am EPEX-Spotmarkt benötigt.

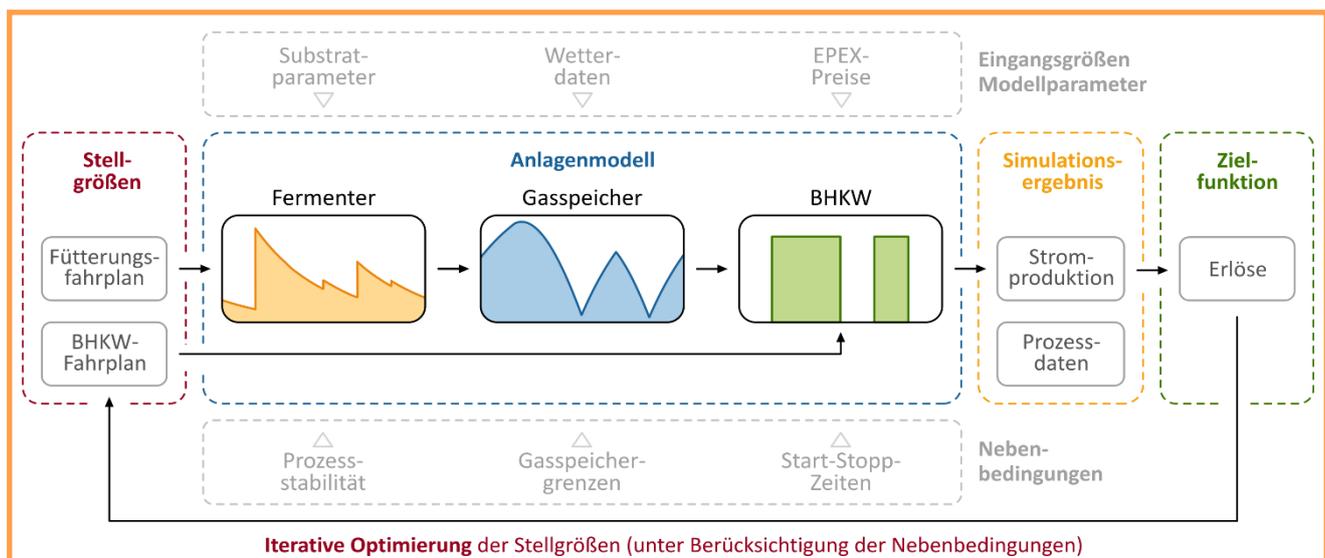


Abb. 5: Allgemeines Funktionsschema einer modellbasierten Prozessoptimierung zur bedarfsgerechten Methanproduktion (Mauky et al. [15])

Ausgehend von einem sinnvollen Startwert für einen möglichen Beschickungs- und BHKW-Fahrplan lassen sich anhand des Anlagenmodells die daraus resultierende Methan- bzw. Stromproduktion sowie zusätzliche Prozessgrößen, wie beispielsweise der pH-Wert oder die Konzentration organischer Säuren, prognostizieren. Auf Basis der jeweiligen Zielfunktion werden nun die Stellgrößen durch das Optimierungsverfahren iterativ angepasst, um beispielsweise maximale Erlöse am EPEX-Spotmarkt zu erzie-

len. Grundsätzlich kann der Biogasprozess anhand der modellbasierten Prozessoptimierung sowohl durch die Menge und den Zeitpunkt der Substratzufuhr als auch durch eine Änderung der Substratzusammensetzung (Co-Vergärung) oder das entsprechende Aufbereitungsverfahren der eingesetzten Substrate beeinflusst werden. Im Rahmen der iterativen Optimierung werden jederzeit erforderliche Nebenbedingungen hinsichtlich der Prozessstabilität, der jeweiligen Gasspeichergrenzen und möglicher Startzyklen- bzw.

Ruhezeiten des BHKW durch das implementierte Optimierungsverfahren berücksichtigt. Für einen automatisierten Einsatz des skizzierten Optimierungsverfahrens (Abb. 5) lässt sich somit ein modellbasiertes Regelungsverfahren zur kontinuierlichen Anpassung der Substrateinsatzmen-

gen und Erstellung optimaler BHKW-Fahrpläne im regulären Anlagenbetrieb realisieren [13, 22]. Im Folgenden wird ein Anwendungsbeispiel der modellbasierten Prozessautomatisierung zur biologischen Flexibilisierung in der großtechnischen Anlagenpraxis beschrieben.

6.3 Großtechnische Anwendung der modellbasierten Prozessoptimierung

In der Anlagenpraxis wird der schwankende Methanbedarf für eine flexible Verstromung zur Erzielung von Zusatzerlösen an der Strombörse in der Regel noch ausschließlich über den vorhandenen Gasspeicher ausgeglichen. Demgegenüber kann die biologische Flexibilisierung und

bedarfsgerechte Methanerzeugung Spielräume zur Flexibilisierung von Bestandsanlagen nutzbar machen, die bei konstanter Fütterung sonst nur mit sehr großen und kostenintensiven Gasspeichervolumina zu realisieren wären [16].

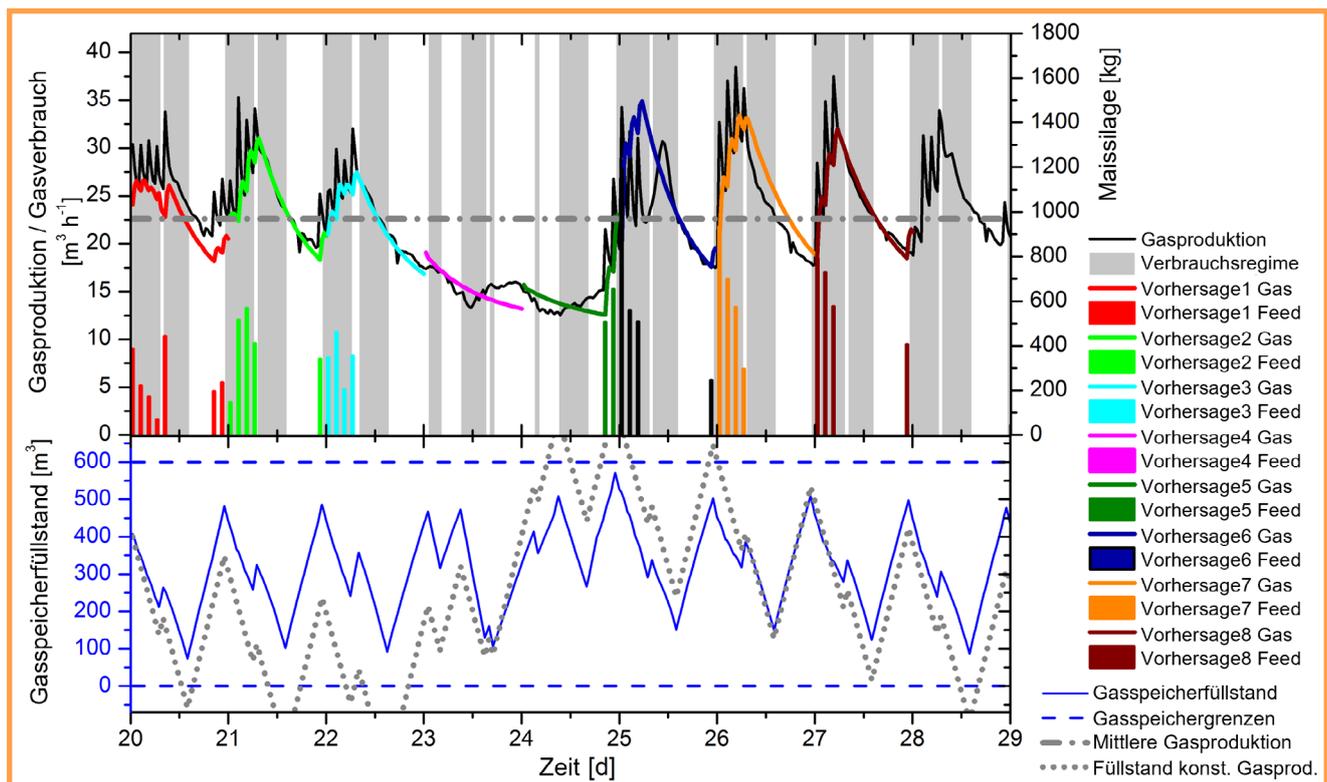


Abb. 6: Ergebnis einer modellbasierten Regelung zur bedarfsgerechten Biogasproduktion (angepasst nach Mauky [13])

Im Rahmen von praxisnahen Versuchen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen wurde nachgewiesen, dass durch ein modellbasiertes Fütterungsmanagement der zur Erfüllung repräsentativer BHKW-Fahrpläne erforderliche Gas-

speicherbedarf um mehr als 40 % reduziert werden konnte (Abb. 6). Auf diese Weise kann durch eine bedarfsgerechte Beschickung eine größere Flexibilität bei gegebenem Gasspeichervolumen erreicht werden.

Eine entsprechende modellbasierte Prozessregelung lässt sich neben dem konkreten Einsatz zur bedarfsgerechten Stromerzeugung im Rahmen der biologischen Prozessflexibilisierung auch im

regulären Praxisbetrieb (bei regelmäßiger Beschickung) verwenden, um die Biogasproduktion während technischer Störungen oder Wartungen gezielt anzupassen

7. Ökonomische Aspekte bei der bedarfsgerechten Biogaserzeugung

Die bedarfsgerechte Stromerzeugung mittels Biogasanlagen macht den Einsatz einer Reihe technischer Komponenten an Bestandsanlagen notwendig. Zudem erweist sich nicht jedes Konzept zur nachträglichen Flexibilisierung von Bestandsanlagen per se als ökonomisch vorteilhaft gegenüber dem Status quo. Daniel-Gromke et al. [17] zeigten, dass sich je nach Wichtung des ökologischen, ökonomischen und energiesystemtechnischen Nutzens unterschiedliche Betriebsweisen (Reduzierung der Beschickung, Flexibilisierung und Gasaufbereitung zu Biomethan) als Präferenz herausstellen können. Insbesondere die Größenklasse der Anlage und die verfügbaren Substrate sind starke Einflussgrößen hinsichtlich der optimalen Betriebsweise.

In Hinblick auf das ökonomische Ergebnis zur Flexibilisierung der Biogasanlage sind bei der Abwägung der Kosten und Nutzen der Umrüstung vor allem die technischen und konzeptionellen Voraussetzungen sowie die Gegebenheiten am Standort (u.a. Verfügbarkeit von Substraten) zu berücksichtigen. Barchmann et al. [16] konnten zeigen, dass sich die flexible Fütterung bzw. die dadurch gesteuerte Gasproduktion als ökonomisch vorteilhaft gegenüber der kontinuierlichen Fütterung erweisen kann, sofern keine zusätzlichen Kosten, z. B. durch eine erweiterte Einbringtechnik oder Erweiterung der Gasspeicherkapazität entstehen. Bei einer geplanten Lastverschiebung hin zu Bereichen größeren Bedarfs steht der Gasspeicher im Fokus der Betrachtung, da die zur Verfügung stehende Gasspeicherkapazität das Potential für die flexible Stromerzeugung bestimmt. Eine bedarfsgerechte Fütterung wiederum zeigt hier einen kostensenkenden Effekt, da sie die erforderliche Gasspeicherkapazität bei entsprechendem Fütterungsre-

gime verringern kann. Die Auswirkungen auf den absolut notwendigen Bruttospeicherbedarf bzw. den über die bereits bestehenden Gasspeicherkapazitäten hinausgehenden Zubau hängen somit im Wesentlichen von den gewählten Verstromungsfahrplänen und dem Fütterungsregime ab. Es zeigte sich in den Untersuchungen von Barchmann et al. [16], dass der Bedarf an zusätzlichem Gasspeichervolumen mittels einer flexiblen Fütterung zum Teil deutlich reduziert werden kann. Entscheidend für die mögliche Dynamik in der Gasproduktion ist hier die Abbaukinetik der Substrate und der Erhalt der Prozessstabilität. Das größte Gasproduktionspotenzial bei der Umsetzung von Fütterungsfahrplänen konnte mit einer Wochenendabsenkung in Kombination mit einer Rationsverschiebung in die erste Wochenhälfte (konstant bleibende Bemessungsleistung über die gesamte Woche im Vergleich zur kontinuierlichen Fütterung) erzielt werden [16].

In jedem Fall müssen vor der Auswahl einer Variante zur biologischen Flexibilisierung der Biogaserzeugung die jeweils anzuwendenden, standortspezifischen Rahmenbedingungen erfasst, geprüft und geklärt werden. Nur so können langfristig genehmigungsrechtlich einwandfreie und erfolgreiche Investitionsentscheidungen getroffen werden.

8. Rechtliche Aspekte bei der bedarfsgerechten Biogaserzeugung

Bei der Umstellung auf eine bedarfsgerechte Biogaserzeugung ist neben den prozessbiologischen Aspekten unbedingt darauf zu achten, dass standortbezogen weiterhin alle rechtlichen Vorgaben für den Bau, den Betrieb und den Vergütungsanspruch eingehalten werden. Mit Stand September 2022 zählen im Hinblick auf die Substrate u. a. die Vorgaben zum „Güllebonus“ bei Anlagen, die vor dem EEG 2012 in Betrieb gingen: der Gülle- bzw. Mistanteil muss täglich mindestens 30 Masse-% betragen, wobei nach dem EEG 2023 anstelle von Gülle oder Mist auch bis zu zehn Masseprozent überjähriges Klee gras eingesetzt werden darf (siehe hierzu [„Hinweise zum Gülleeinsatz in Biogasanlagen“](#)).

Daneben spielen genehmigungsrechtliche Vorgaben eine entscheidende Rolle. Sind z. B. maximale Substratmengen pro Tag genehmigt, dürfen diese nicht überschritten werden. Soll die maximale Menge künftig überschritten werden, ist auch die Genehmigung entsprechend anzupassen. So führt u. a. bei nach dem Baurecht genehmigten Anlagen, die auch Abfallstoffe in einer Menge von weniger als 10 Tonnen pro Tag vergären, die Überschreitung dieser Schwelle zu einer

Genehmigungsbedürftigkeit nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (Anhang 1, 8.6.2.2., 4. BImSchV). Bei Anlagen, die wiederum bereits nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz genehmigt sind und neben Nachwachsenden Rohstoffen auch Gülle (Mist) einsetzen, führt eine Erhöhung auf über 100 Tonnen Tagesinput dazu, dass die Anlagen unter das förmliche Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung fallen. In Abhängigkeit der genehmigungsrechtlichen Einordnung der Substrate und Menge sind die Vorschriften der TA-Luft u.a. zur Mindestverweilzeit zu beachten.

In jedem Fall müssen vor der Auswahl einer Variante zur biologischen Flexibilisierung der Biogaserzeugung die jeweils anzuwendenden, standortspezifischen Rahmenbedingungen erfasst, geprüft und geklärt werden. Im Zweifel sollten rechtssichere Auskünfte eingeholt werden. Dies liegt ausschließlich in der Verantwortung der Betreiber. An dieser Stelle sei nochmals auf die Liste Juristischer Beirat Fachverband Biogas e.V. (https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/de_juristischerbeirat) hingewiesen.

9. Zusammenfassung

Die biologische Flexibilisierung der Biogaserzeugung kann für Betreiber eine hilfreiche Option sein, um ihre Biogasanlagen auch zukünftig wirtschaftlich zu betreiben oder den Erlös aus dem Stromverkauf zu steigern. Die Ansätze für die biologische Flexibilisierung können biologischer, verfahrenstechnischer oder baulicher Art sein und sind auch in Kombination möglich. Die Mehrzahl der Lösungsansätze entspricht dem Stand der Technik und ließe sich auf der überwiegenden Anzahl der Biogasanlagenstandorte auch umsetzen. Für alle Standorte gilt gleichermaßen, dass die anaerobe Biozönose der relevante Leis-

tungsträger ist und daher sämtliche Maßnahmen zur biologischen Flexibilisierung deren Leistungsgrenzen und Adaptationsfähigkeit berücksichtigen müssen. Für eine abgesicherte Investitionsentscheidung sind eine sorgfältig geplante Vorgehensweise und die standortspezifische Erhebung der Rahmenbedingungen unumgänglich. Fragestellungen bezüglich der Genehmigung oder Vergütung sind stets über rechtssichere Auskünfte abzuklären. Die modellbasierte Prozessoptimierung kann als unterstützendes Konzept eine effektive Prozessführung bei gleichzeitig hoher Anlagenverfügbarkeit sicherstellen.

Literatur

- [1] Mauky, E.; Weinrich, S.; Jacobi, H.-F.; Nägele, H.-J.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2017). Demand-driven biogas production by flexible feeding in full-scale – Process stability and flexibility potentials. *Anaerobe*, 46, 86-95. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2017.03.010>.
- [2] Hahn, H.; Krautkremer, B.; Hartmann, K.; Wachendorf, M. (2014). Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 383-393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.085>.
- [3] Hernández Regalado, R.E.; Häner, J.; Baumkötter, D.; Wettwer, L.; Brüggling, E.; Tränckner, J. (2022). Continuous Co-Digestion of Agro-Industrial Mixtures in Laboratory Scale Expanded Granular Sludge Bed Reactors. *Applied Sciences*, 12, 2295. <https://doi.org/10.3390/app12052295>.
- [4] Terboven, C.; Ramm, P.; Herrmann, C. (2017). Demand-driven biogas production from sugar beet silage in a novel fixed bed disc reactor under mesophilic and thermophilic conditions. *Bioresource Technology*, 241, 582-592. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.150>.
- [5] Wall, D.M.; Allen, E.; O'Shea, R.; O'Kiely, P.; Murphy, J.D. (2016). Investigating two-phase digestion of grass silage for demand-driven biogas applications: Effect of particle size and rumen fluid addition. *Renewable Energy*, 86, 1215-1223. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.049>.
- [6] Linke, B.; Rodríguez-Abalde, Á.; Jost, C.; Krieg, A. (2015). Performance of a novel two-phase continuously fed leach bed reactor for demand-based biogas production from maize silage. *Bioresource Technology*, 177, 34-40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.070>.
- [7] Strübing, D.; Huber, B.; Lebuhn, M.; Drees, J.E.; Koch, K. (2017). High performance biological methanation in a thermophilic anaerobic trickle bed reactor. *Bioresource technology*, 245, 1176-1183; <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.088>.
- [8] Stur, M.; Pohl, M.; Krebs, C.; Mauky, E. (2022). Charakterisierung von Biogasspeichern: Einflüsse und Methodenvergleich. *Landtechnik*, 77(1), 21-46. <https://doi.org/10.1515/lt.2022.3274>.
- [9] Henkelmann, G.; Meyer zu Köcker, K.; Lebuhn, M.; Effenberger, M.; Koch, K. (2020). Schlüsselparameter zur Kontrolle des Gärprozesses - Physikalische und chemische Untersuchungen. ALB Bayern e.V. (Hrsg.): *Biogas Forum Bayern*, <https://www.biogas-forum-bayern.de/bif17>
- [10] Weinrich, S.; Astals, S.; Hafner, S.D. und Koch K. (2020): Kinetic modelling of anaerobic batch tests. In: Liebetrau, J. und Pfeiffer, D. (Hrsg.): *Methods to determine parameters for analysis purposes and parameters that describe processes in the biogas sector*. Schriftenreihe des BMU-Förderprogramms "Energetische Biomassennutzung". 7, 349-369.
- [11] Weinrich, S.; Nelles, M. (2021): *Basics of Anaerobic Digestion - Biochemical Conversion and Process Modelling*. DBFZ-Report 40, Schriftenreihe des Deutschen Biomasseforschungszentrums, Leipzig.
- [12] Weinrich, S. (2017): *Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen – Systematische Vereinfachung des ADM1*. Dissertation, Universität Rostock.
- [13] Mauky, E. (2018): *A model-based control concept for a demand-driven biogas production*. Dissertation, Universität Rostock.

- [14] Weinrich, S.; Mauky, E.; Jacobi, H.F. (2017): Simulation of demand-oriented biogas production by a simplified kinetic model. In: German Biogas and Bioenergy Society (Hrsg.): Conference Proceedings Progress in Biogas 4 - Science meets Practice. Stuttgart, 2017, 31.
- [15] Mauky, E.; Winkler, M.; Krebs, C.; Müller, U.; Rabe, D.; Weinrich, S.; Kretzschmar, J. (2021). "Gazelle" weist nach: Modellgestütztes Fütterungsmanagement ermöglicht flexible Prozessführung. *Biogas-Journal*, 24(4), 114-119.
- [16] Barchmann, T.; Mauky, E.; Dotzauer, M.; Stur, M.; Weinrich, S.; Jacobi, H. F.; Liebetrau, J.; Nelles, M. (2016). Erweiterung der Flexibilität von Biogasanlagen – Substratmanagement, Fahrplansynthese und ökonomische Bewertung. *Landtechnik*, 71(6), 233–251. <https://doi.org/10.1515/lt.2016.3146>.
- [17] Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Denysenko, V.; Barchmann, T.; Oehmichen, K.; Beil, M.; Beyrich, W.; Krautkremer, B.; Trommler, M.; Reinholz, T.; Vollprecht, J.; Rühr, C.; (2020). Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht, Abschlussbericht, ISSN 1862-4804, Dessau-Roßlau, Januar 2020.
- [18] Szarka, N.; Scholwin, F.; Trommler, M.; Jacobi, H. F.; Eichhorn, M.; Ortwein, A.; Thrän, D. (2013). A novel role for bioenergy: A flexible, demand-oriented power supply. *Energy*, 61, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.12.053>.
- [19] Fenske, C.F.; Md, Y.; Strübing, D.; Koch, K. (2023). Preliminary gas flow experiments identify improved gas flow conditions in a pilot-scale trickle bed reactor for H₂ and CO₂ biological methanation. *Bioresource Technology*, 128648; <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128648>.
- [20] Fenske, C.F.; Strübing, D.; Koch, K. (2023). Biological methanation in trickle bed reactors-a critical review. *Bioresource Technology*, 129383; <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129383>.
- [21] Dittmer, C.; Krümpel, J.; Lemmer, A. (2021): Modeling and Simulation of Biogas Production in Full Scale with Time Series Analysis. *Microorganisms*, 9, 324. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020324>.
- [22] Dittmer, C.; Ohnmacht, B.; Krümpel, J.; Lemmer, A. (2022). Model Predictive Control: Demand-Orientated, Load-Flexible, Full-Scale Biogas Production. *Microorganisms*, 10, 804. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040804>.



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 |