Echtzeitüberwachung von Biogasfermentern

Die Prozesskontrolle durch geeignete Parameter ist unerlässlich für einen stabilen und damit wirtschaftlichen Betrieb einer Biogasanlage. Eine Forschungsgruppe von der Universität Ulm entwickelte eine Sensorik für die Fermentermaische, mit der die Angaben zur Aktivität der Fermenterbiologie direkt auf das Handy des Anlagenbetreibers übermittelt werden.

Von Marian Kazda, Sharif Ahmed, Kerstin Maurus, Andreas Rembold und Lars Seisser

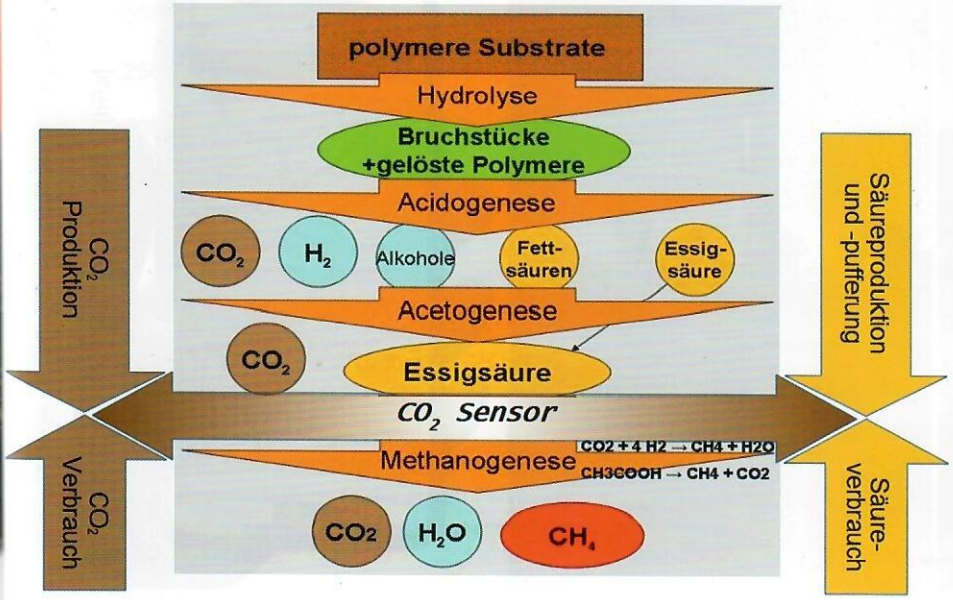
Einblicke in den Gärprozess liefern zurzeit die Überwachung der Gaszusammensetzung und/oder eine Probennahme des Fermenterinhaltes mit anschließender Laboranalyse. Erstere reagiert relativ träge auf Prozessveränderungen während die zweite nur zeitverzögerte Einblicke beziehungsweise Momentaufnahmen erlaubt. Das Ziel des vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Projektes „Automatische Überwachung der Prozessstabilität in Biogasreaktoren mittels CO_2-Partialdruck innerhalb der Reaktorflüssigkeit" (FKZ 2219NR054) war es daher, eine Methode zu etablieren, über die der Biogasprozess und dessen Stabilität direkt überwacht werden können.

Das Gleichgewicht des anaeroben Abbaus zwischen den vier Stufen Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese ist entscheidend für die Prozessstabilität und eine hohe Methanausbeute. Eine Störung des Gleichgewichts kann durch verschiedene Faktoren, wie Temperaturänderung, Hemmstoffe, Nährstoffmangel, Änderung der Substratzufuhr und seiner Zusammensetzung, Anreicherung von Säuren als auch allgemein durch eine Verschlechterung der Lebensbedingungen für die Mikroorganismen eintreten.

Die in vielen Biogasanlagen angestrebte Flexibilisierung führt – neben den technischen Anforderungen – zu periodischen Änderungen der Substratzufuhr, was die Fermenterbiologie deutlich beanspruchen kann. Die Direktvermarktung einerseits als auch die Erfordernisse der Wärmeerzeugung andererseits stellen weitere Herausforderungen für den Anlagenbetrieb und die Prozessüberwachung dar.

Bei einer flexiblen Fahrweise ändern sich häufig die Raumbelastung und die Verweildauer. Beides kann zu einer Prozessstörung führen. Dabei entsteht ein Ungleichgewicht zwischen der Säureproduktion (erste drei Stufen) und dem Säureabbau in der Methanogenese. Die organischen Säuren reichern sich an und durch eine Abnahme des pH-Wertes im Gärsubstrat werden die Lebensbedingungen für die methanogenen Archaeen zunehmend ungünstig. Als Folge nehmen die Methanproduktion und die Methangehalte im Biogas ab. Es besteht deshalb verstärkt die Notwendigkeit, Prozessparameter in einem Bioreaktor zu erfassen, diese zu beurteilen und die Information an den Anlagenbetreiber zeitnah zu übermitteln.

Abbildung 1: Anaerober Abbau der Biomasse und Biogasbildung sowie CO_2-Umsatz als Grundlage für die Erfassung der Maischeaktivität mit einem CO_2 Sensor



Quelle: aus https://de-academic.com/pictures/dewiki/66/Biogas_entstehung.jpg, modifiziert und ergänzt.

CO_2 steht im Mittelpunkt

Die Abbildung 1 zeigt die bekannten vier Stufen des anaeroben Abbaus bis zur Methanbildung. Die ergänzenden Pfeile an der linken Seite veranschaulichen die CO_2-Produktion in den ersten drei Stufen sowie den CO_2-Verbrauch in der Methanbildung. Auf der rechten Seite wird die zweite Quelle des CO_2 im Biogasreaktor veranschaulicht: die Pufferwirkung des Hydrogenkarbonats bei der Säurebildung beziehungsweise durch eine Zufuhr von saurem Substrat (Silage etc.) als auch den späteren Säureverbrauch durch die Methanbildung aus der Essigsäure. Durch die beschriebenen Prozesse ändert sich der CO_2-Partialdruck (pCO_2) in der Fermentermaische. Der CO_2-Sensor direkt im flüssigen Fermenterinhalt integriert alle diese Abläufe und kann damit als ein wichtiger Parameter der Prozessüberwachung genutzt werden.

Das patentierte Messverfahren wurde mittlerweile in ein robustes und praxistaugliches Messsystem umgesetzt. Es besteht aus einer Messlanze mit einem optischen Sensor und der Temperaturerfassung. Die Sensordaten werden von einem angeschlossen Messgerät ausgewertet und an einen Cloud-Speicher übermittelt. Von dort kann der Anlagenbetreiber die Messwerte ortsunabhängig auf seinem mobilen Endgerät (Smartphone) abrufen und die Verläufe darstellen lassen (siehe Abbildung 2).

Umfangreiche Messungen in bisher 18 Biogasanlagen haben die Eignung von pCO_2 als Parameter zur Beurteilung des Biogasprozesses bereits belegt. Ein Praxiseinsatz des optischen pCO_2-Sensors wurde in Biogasanlagen verschiedener Bauart unter Ausnutzung mehrerer Zugänge in den Fermenter erprobt. Da der Sensor in die Reaktorflüssigkeit eingetaucht ist, wird er direkt bei der regelmäßigen Rührung des Fermenterinhaltes von der Fermenterflüssigkeit umströmt. Dadurch sind neben einer Öffnung von mindestens 1 Zoll Durchmesser keine zusätzlichen Ein- und Umbauten am Fermenter erforderlich.

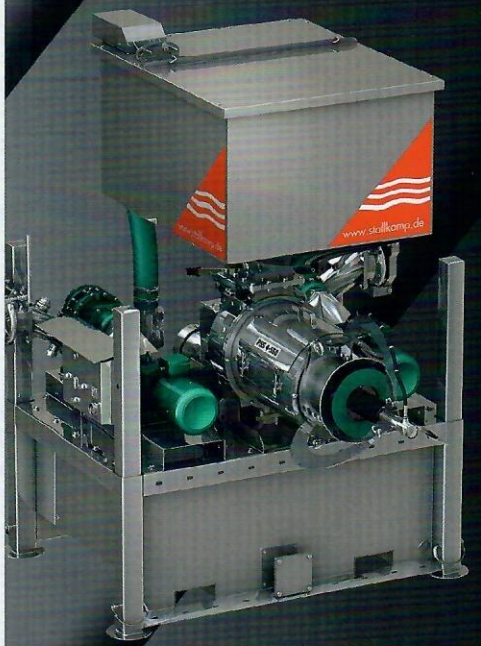
Ergebnisse der Prozessüberwachung

Der Praxisanwendung gingen umfangreiche Tests im Labor voraus. Dort zeigte sich, dass die pCO_2-Werte oft empfindlicher und schneller reagieren als die herkömmlichen Parameter zur Anlagenüberwachung wie FOS/TAC bezie- ▸

Stallkamp

Kraftvoll, zuverlässig, flexibel!

Sie möchten die Transportwürdigkeit oder den TS-Gehalt Ihrer Gärreste erheblich verbessern? Dann sind unsere Pressschneckenseparatoren aus Edelstahl genau das Richtige für Sie. Denn die glänzen mit großen Durchsatzmengen bei hoher Trockensubstanz. Und als mobile Einheit sind sie im Handumdrehen einsetzbar!



| pumpen
| lagern
| rühren
| separieren

Tel. +49 4443 9666-0
www.stallkamp.de

Abbildung 2: Umsetzung der Messung in der Biogaspraxis mit Installation der Messsonden durch die Fermenterdecke

Messsonden schwarz-grau, links im Bild; auch seitliche Einbringung durch vorhandene Öffnungen möglich sowie Messbox (Bild Mitte) mit Datenerfassung und -übermittlung zum Cloud-Speicher. Von dort können die Messwerte und ihre Verläufe am Handy abgerufen werden (rechte Darstellung).

hungsweise die Akkumulation von Säuren. In diesem Beitrag möchten wir uns aber ausschließlich auf die Ergebnisse aus den Praxis-Biogasanlagen konzentrieren. Es werden Messreihen aus vier verschiedenen Biogasanlagen vorgestellt. Die Werte zeigen eine hohe Sensitivität der pCO_2 Messung, die sehr empfindlich auf nur geringfügige Änderungen in der Prozessführung reagiert.

Die Abbildung 3 zeigt die Reaktion des als Maischeaktivität bezeichneten CO_2-Partialdrucks (grün) im flüssigen Fermenterinhalt (F1) auf tägliche Schwankungen der Substratzufuhr. Diese Biogasanlage (500 kW_{el}, doppelt überbaut, Substrate: Schweinemist, Gülle, Maissilage, Silphie) wird morgens mit Substrat beschickt, was zu deutlich erkennbaren Peaks der Maischeaktivität führt, während die Temperatur (rote Kurve) fast gleich bleibt Dies ist nicht bei allen untersuchten Anlagen der Fall. Oftmals – wie bei hoher Zufuhr von Gülle – kann ein Temperaturabfall in der Maische um bis zu 2 Grad Celsius gemessen werden, was insbesondere für die Methanbildung nachteilig ist (siehe auch Abbildung 2 rechts unten).

Abbildung 3: Reaktion der Maischeaktivität (grün) und Maischetemperatur (rot) auf die tägliche Substratzufuhr (jeweils morgens) sowie stark reduzierte Fermenterbeschickung vom Freitag bis Sonntag nachmittags

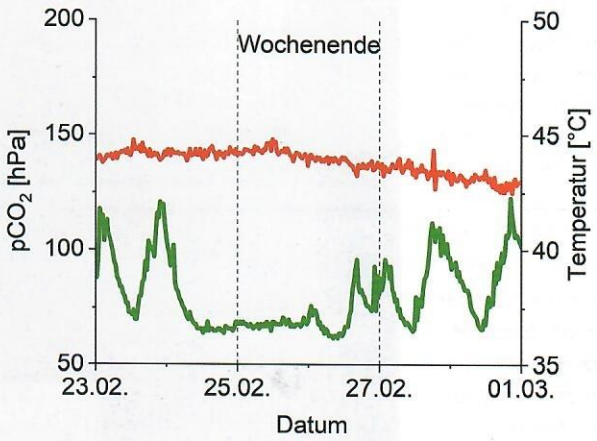


Abbildung 4: Reaktion der pCO_2-Werte auf Aussetzen der Substratzufuhr

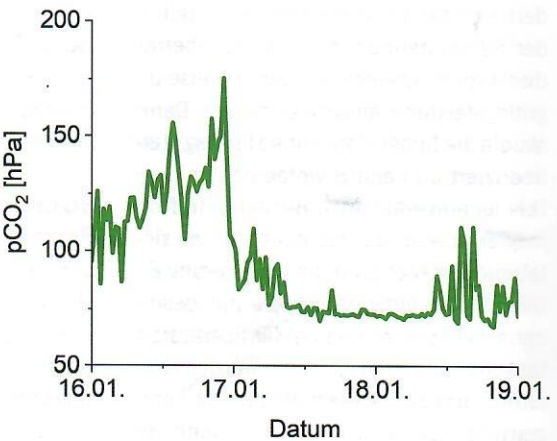


Abbildung 5: Hohe CO_2-Werte in der Fermentermaische als Folge der Prozessüberlastung mit nachfolgender Konsolidierung

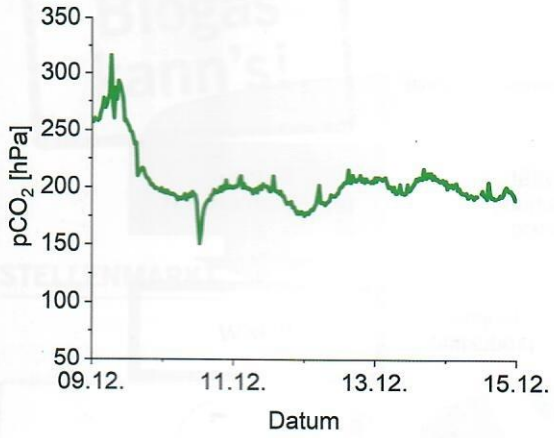
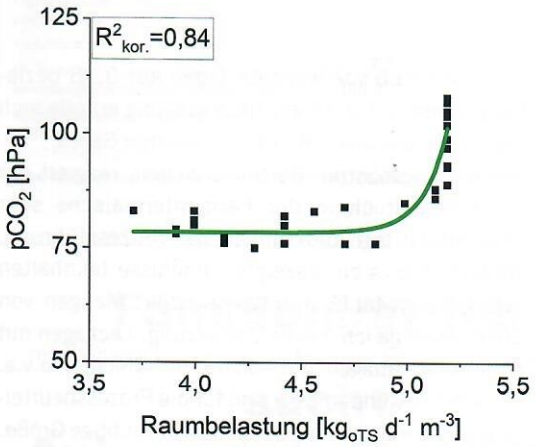


Abbildung 6: Steiler Anstieg der mittleren täglichen pCO_2-Werte bei einer Raumbelastung in der ersten Fermentationsstufe über 5 Kilogramm organische Trockensubstanz (oTS)/m^{-3} und d^{-1}



Nach der Beschickung setzen Mikroorganismen die leicht verfügbaren Bestandteile um, wodurch die Maischeaktivität zunimmt und der pCO_2-Wert steigt. Später wird mehr CO_2 zu Methan umgesetzt, als sich nachbildet und der pCO_2-Wert sinkt. Dieses Muster wiederholt sich täglich. Am Wochenende hat der Anlagenbetreiber wegen der niedrigen Strompreise die Anlageleistung deutlich verringert. Daher wurde die Substratzufuhr ab Freitag stark reduziert und erst Sonntag nachmittags wieder aufgenommen. Bei der betreffenden Biogasanlage wird deutlich, wie sich eine substratgeführte Flexibilisierung auf die Maischeaktivität auswirkt, insbesondere wie eine Reduktion der Substratzufuhr abgebildet wird.

Eine ähnliche Reaktion der Maischeaktivität ist zu beobachten, wenn die Substratzufuhr durch eine Störung aussetzt (Abbildung 4). Bei weiterlaufender Methanogenese produzieren die ersten Stufen des anaeroben Abbaus weniger Zwischenprodukte, was zu einer steilen Abnahme der pCO_2-Werte führt. Dies war der Fall in einer Anlage (Maissilage, Schweinegülle), in der die Abnahme des pCO_2 in der Maische um fast 90 hPa (Hektopascal) besonders stark ausgeprägt war. Danach stabilisierten sich die Werte auf einem niedrigen Niveau zwischen 70 und 75 hPa, bis am Folgetag die Beschickung neu gestartet wurde und die Maischeaktivität wieder zunahm.

Durch hohe Strompreise im Dezember 2022 haben viele Anlagenbetreiber versucht, ihre Stromproduktion deutlich zu erhöhen. Die damit verbundenen erhöhten Fütterungsmengen hatten ▸

BIOGASANALYSE
SSM 6000
der Klassiker für die Analyse von CH_4, H_2S, CO_2, H_2 und O_2 mit und ohne Gasaufbereitung

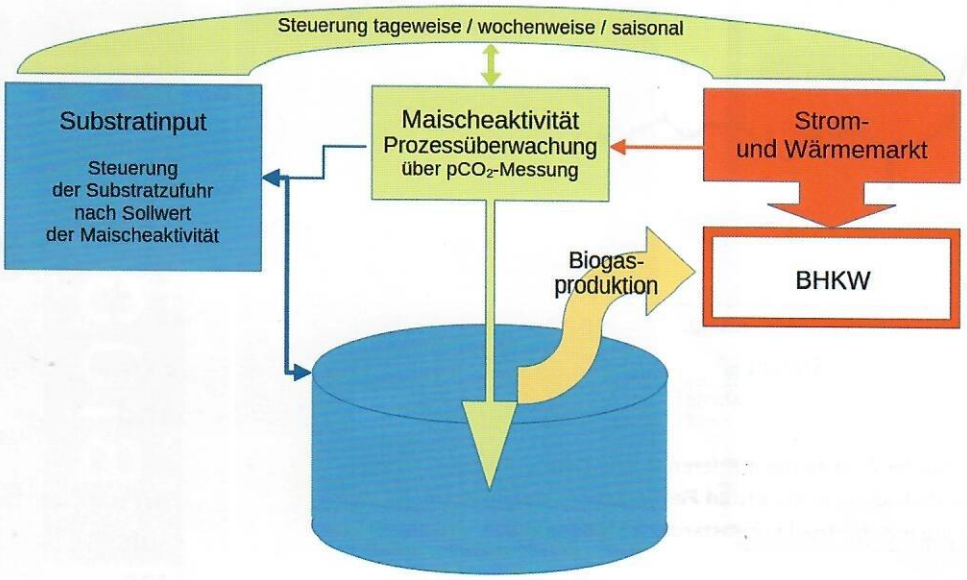
für NO_x, CO und O_2, mehrere Meßstellen (44. BImSchV.)

SSM 6000 ECO

FOS/TAC
automatischer Titrator zur Bestimmung von FOS, TAC und FOS/TAC
TRAS 120
44. BImSchV
sprechen Sie uns an!

Fachverband BIOGAS
GASANALYSENTECHNIK
BIOGASANALYSENTECHNIK
WASSERANALYSENTECHNIK
AGRARMESSTECHNIK
www.pronova.de
* proCAL für SSM 6000, ist die vollautomatische, prüfgaslose Kalibrierung
BIOGAS Convention & Trade Fair
12.12. – 14.12.2023, Messe Nürnberg,
Besuchen Sie uns in Halle 9, Stand F26
PRONOVA
PRONOVA Analysentechnik GmbH & Co. KG
Granatenstraße 19-20 I 13409 BERLIN
Tel +49 30 455085-0 | info@pronova.de

Abbildung 7: Potenzial der neu entwickelten Messtechnik für Prozessüberwachung und Anlagenautomatisierung



oft auch eine Prozessüberlastung zur Folge. So interessierte sich ein Betreiber für unser Messsystem, da er Probleme bei der Gasproduktion (Menge und Qualität) hatte. Nach dem Einbau wurden sehr hohe pCO_2-Werte zwischen 250 und 325 hPa gemessen (siehe Abbildung 5) und ein FOS/TAC Wert von 0,58 ermittelt.

Solch hohe CO_2-Sättigung wurde bislang nur in Laborversuchen bei Prozessstörungen beobachtet. Ausgehend davon wurde dem Betreiber empfohlen, durch gezielte Änderung der Substratmengen den pCO_2-Wert auf einem Niveau von 200 hPa und darunter zu halten. Wie aus der Abbildung 5 ersichtlich, gelang dies rasch und auch die FOS/TAC-Werte nahmen innerhalb von wenigen Tagen auf 0,38 beziehungsweise auf 0,32 ab. Im Nachgang erholte sich dann auch die Qualität des produzierten Gases.

Wie die angeführten Beispiele zeigen, reagiert der CO_2-Partialdruck in der Fermentermaische sehr empfindlich auf Änderungen der Prozessführung. Weitere, hier nicht gezeigte Ereignisse beinhalten Substratwechsel, Einbringung großer Mengen von Gülle, Ausfälle der Fermenterheizung, Leckagen mit Lufteintrag, Auflösung von Schwimmschichten u.v.a. Für den Anlagenbetreiber und für die Prozessbeurteilung ist die Raumbelastung eine sehr wichtige Größe. In einer weiteren Biogasanlage wurde über eine längere Zeit die Substratzufuhr genau aufgenom- ▸

STELLENMARKT

Wir suchen ab sofort **Mitarbeiter (m/w/d) für unsere Biogasanlage**

am Standort Schrobenhausen/Mühlried (Sandhof 8) in Teilzeit (15-20 Stunden/Woche).

Ihre Aufgaben:
- Selbstständige Beschickung, Pflege und Überwachung der Anlage
- Optimierung der Produktionsabläufe
- Kleinere Wartungs- und Reparaturarbeiten
- Regelmäßige Dokumentation

Das bringen Sie mit:
- Erfahrung als Mitarbeiter einer Biogasanlage und/oder in der Landwirtschaft von Vorteil
- Gutes technisches Verständnis und handwerkliches Geschick
- Verständnis für biologische Zusammenhänge und verfahrenstechnische Vorgänge
- Gültige Fahrerlaubnis der Klassen B und L (alt: Klassen 3 und 4)
- Zuverlässige, verantwortungsbewusste und selbstständige Arbeitsweise
- Flexibilität und Teamfähigkeit
- Bereitschaft zur Absolvierung gesetzlich vorgeschriebener Schulungen
- Bereitschaft zur Wochenendarbeit

Das bieten wir Ihnen:
- Intensive Einarbeitung - auch für (Quer-)Einsteiger
- Abwechslungsreiche und interessante Aufgaben mit hoher Eigenverantwortung und flexibler Zeiteinteilung

Wir freuen uns auf Ihre Kurzbewerbung - bevorzugt per E-Mail - oder eine telefonische Kontaktaufnahme.

Inductron®
Energy Power GmbH & Co. KG
Sebastian-Kneipp-Straße 2 • 86529 Schrobenhausen
Tel: 08252 88890 • bewerbung@inductron.com

men und in Beziehung zu den im ersten Fermenter gemessenen pCO_2-Werten gesetzt (siehe Abbildung 6). Die sehr steil ansteigenden pCO_2-Werte bei Überschreitung einer bestimmten Raumbelastung zeigen, dass es ab dann zu einer Entkoppelung zwischen den ersten Abbaustufen und der Methanogenese kommt.

Bei einem längerfristigen Anstieg von pCO_2 in der Maische wird damit frühzeitig eine Effizienzabnahme des Prozesses durch eine schlechtere Gasqualität (weniger Methan und mehr CO_2 im Biogas) angezeigt. Damit sinken die spezifischen Erträge und die Substratausnutzung. Eine weitere Erhöhung der Fütterungsmengen (häufige Maßnahme als Reaktion auf schlechte Gasqualität) würde ohne Betrachtung der CO_2-Dynamik in der Fermentermaische wahrscheinlich zu einer Prozessstörung führen.

Flexibilisierung im Fokus

Mit zunehmendem Ausbau der regenerativen Energien wird die Volatilität der Strompreise steigen. Die Direktvermarktung als auch die Bedingungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes werden die Anlagenbetreiber zwingen, ihre Stromerzeugung in die Hochpreisphasen zu verlegen. Solche Preise zeichnen sich bereits jetzt tageweise morgens und vor allem abends ab. In den Sommermonaten ist zudem mit einem niedrigeren Preisniveau bis zu Negativpreisen an Wochenenden zu rechnen. All dem kann nicht alleine mit dem (genehmigungsaufwändigen) Ausbau der Biogasspeicher begegnet werden und es erfordert eine Flexibilisierung des Substrateinsatzes. Dabei kann die Echtzeit-Überwachung der Maischeaktivität helfen, die Abbaudynamik im Fermenter zu verfolgen und vor bösen Überraschungen zu schützen.

Wärmewende und Nahwärmenetze erfordern zudem eine jahreszeitliche Flexibilisierung. Bei überdurchschnittlichem Wärmebedarf in den Wintermonaten kann dies leicht zu einer Überlastung der Fermenterbiologie führen. Wie die Abbildung 7 auf Seite 120 zeigt, kann über die Erfassung der Maischeaktivität im Fermenter die Substratzufuhr mit den Erfordernissen des Strom- und Wärmemarktes direkt verknüpft werden. Die Einfachheit und die relativ niedrigen Kosten als auch die Robustheit des Messsystems erfüllen erstmalig die Anforderungen an eine Echtzeit-Prozessüberwachung in Biogasanlagen.

Fazit und Ausblick

Die bisherige Überwachung des CO_2-Partialdrucks in der flüssigen Phase des Fermenters erlaubt, die Prozessdynamik in Biogasanlagen zu beurteilen und mögliche Störungen frühzeitig zu erkennen. Die Messeinheit sowie die Datenübertragung per Cloud und die Entwicklung der App für den Endnutzer sind mittlerweile abgeschlossen. Die Anwendung ist so weit fortgeschritten, dass die Produktion und Installation mehrerer baugleicher Messeinheiten (Kleinserie) erfolgreich umgesetzt wurde. Das Team erhält aktuell ein EXIST Gründungsstipendium (03EGS-BW749) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

In weiterer Folge soll eine Einbindung in die Anlagensteuerung von Bestands- und Neuanlagen erfolgen, um über die Verläufe der pCO_2-Messwerte die Substratzufuhr zu optimieren und die Biogasproduktion und -verstromung den Erfordernissen des Strommarktes anzupassen (siehe Abbildung 7). Dies soll ein wichtiger Schritt zur Anlagenautomatisierung sein. Als Zukunftsvision steht eine vollautomatisierte Biogasanlage. ◄

Danksagung: Das Vorhaben „Automatische Überwachung der Prozessstabilität in Biogasreaktoren mittels CO_2-Partialdruck innerhalb der Reaktorflüssigkeit" (FKZ 2219NR054) wurde durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) betreute das Projekt im Rahmen des Förderaufrufs „Flexibilisierung der Biogaserzeugung" innerhalb des Bereichs „Weiterentwicklung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik zur Flexibilisierung von Biogasprozessen".

Autor*innen
Prof. Dr. Marian Kazda
marian.kazda@uni-ulm.de
Dr. Sharif Ahmed
Dr. Kerstin Maurus
M.Eng. Andreas Rembold
M.Sc. Lars Seisser
Universität Ulm
Institut für Botanik
Albert-Einstein-Allee 11
89081 Ulm

AXEL HAGEMEIER
Biogas
Schubbodensanierung in verstärkter Edelstahl-Lösung
Axel Hagemeier GmbH & Co. KG
Am Wasserfeld 8 • 27389 Fintel
Tel.: 04265 / 13 65
Fax: 04265 / 83 94
E-Mail: info@axel-hagemeier.de
Web: www.axel-hagemeier.de