

## 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 Fermentermasse, mit der die Angaben zur Aktivität der Fermenterbiologie direkt auf das Handy des Anlagenbetreibers übermittelt werden.**

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

Einblick in den Gärprozess liefern zur Zeit die Überwachung der Gaszusammensetzung und/oder eine Probennahme des Fermenterinhalt mit anschließender Laboranalyse. Erstere reagiert relativ träge auf Prozessveränderungen während die zweite nur zeitverzögerte Einblicke bzw. 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<sub>2</sub>-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, wie 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 wie 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 Säureproduktion (erste drei Stufen) und 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.

CO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>-Produktion in den ersten drei

Stufen sowie den CO<sub>2</sub>-Verbrauch in der Methanbildung. Auf der rechten Seite wird die zweite Quelle des CO<sub>2</sub> im Biogasreaktor veranschaulicht: die Pufferwirkung des Hydrogenkarbonats bei Säurebildung bzw. durch eine Zufuhr von saurem Substrat (Silage etc.) wie auch den späteren Säureverbrauch durch die Methanbildung aus der Essigsäure. Durch die beschriebenen Prozesse ändert sich der CO<sub>2</sub>-Partialdruck (pCO<sub>2</sub>) in der Fermentermasse. Der CO<sub>2</sub>-Sensor direkt im flüssigen Fermenterinhalt integriert alle diese Abläufe und kann damit als ein wichtiger Parameter der Prozessüberwachung genutzt werden.

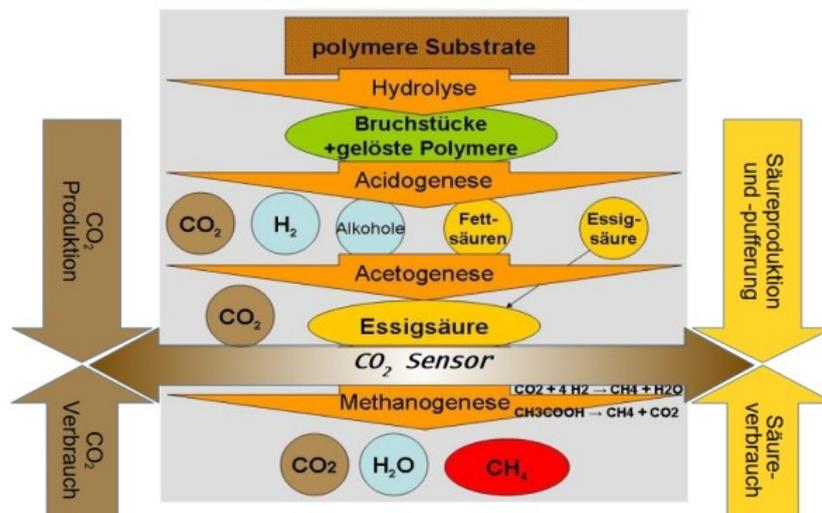


Abb. 1: Anaerober Abbau der Biomasse und Biogasbildung sowie CO<sub>2</sub>-Umsatz als Grundlage für die Erfassung der Maischeaktivität mit einem CO<sub>2</sub> Sensor  
(aus [https://de-academic.com/pictures/dewiki/66/Biogas\\_entstehung.jpg](https://de-academic.com/pictures/dewiki/66/Biogas_entstehung.jpg), modifiziert und ergänzt)

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 angeschlossenen 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).



Abb. 2: Umsetzung der Messung in der Biogaspraxis mit Installation der Messsonden durch die Fermenterdecke (schwarz-grau, links im Bild; auch seitliche Einbringung durch vorhandene Öffnungen möglich) sowie Messbox (Bildmitte) mit Datenerfassung und -übermittlung zum Cloud-Speicher. Von dort können die Messwerte und ihre Verläufe am Handy abgerufen werden (rechte Abbildung).

Umfangreiche Messungen in bisher 18 Biogasanlagen haben die Eignung von  $p\text{CO}_2$  als Parameter zur Beurteilung des Biogasprozesses bereits belegt. Ein Praxiseinsatz des optischen  $p\text{CO}_2$ -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 Fermenterinhalt 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  $p\text{CO}_2$ -Werte oft empfindlicher und schneller reagieren als die herkömmlichen Parameter zur Anlagenüberwachung wie FOS/TAC bzw. 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  $p\text{CO}_2$  Messung, die sehr empfindlich auf nur geringfügige Änderungen in der Prozessführung reagiert.

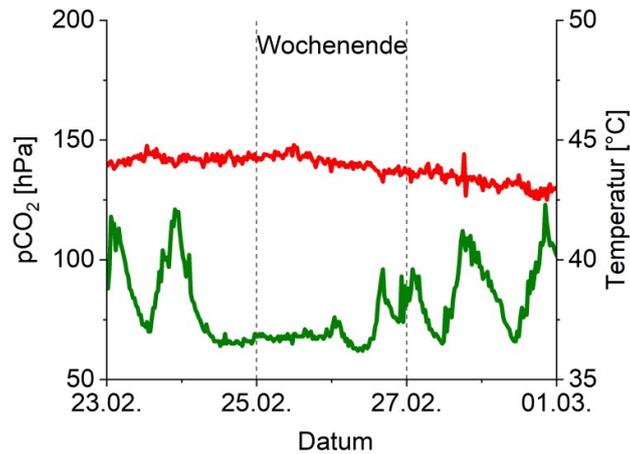


Abb. 3: Reaktion der Maischeaktivität auf die tägliche Substratzufuhr (jeweils morgens) sowie stark reduzierte Fermenterbeschickung vom Freitag bis Sonntag nachmittags

Die Abbildung 3 zeigt die Reaktion des als Maischeaktivität bezeichneten CO<sub>2</sub>-Partialdrucks im flüssigen Fermenterinhalt (F1) auf tägliche Schwankungen der Substratzufuhr. Diese Biogasanlage (500 kWel, doppelt überbaut, Substrate Schweinemist, Gülle, Maissilage, Silphie) wird morgens mit Substrat beschickt, was zu deutlich erkennbaren Peaks der Maischeaktivität führt. Nach der Beschickung setzen Mikroorganismen die leicht verfügbaren Bestandteile um, wodurch die Maischeaktivität zunimmt und der pCO<sub>2</sub>-Wert steigt. Später wird mehr CO<sub>2</sub> zu Methan umgesetzt, als sich nachbildet und der pCO<sub>2</sub>-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.

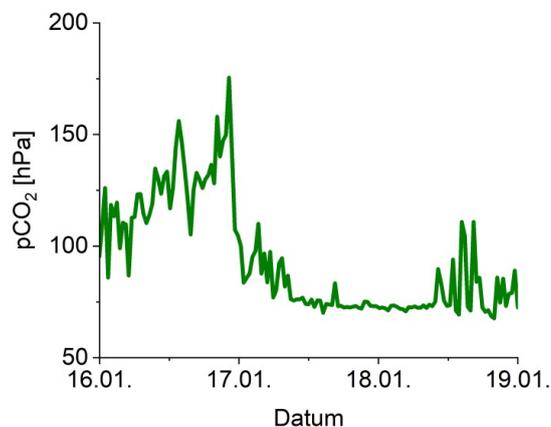


Abb. 4: Reaktion der pCO<sub>2</sub>-Werte auf Aussetzen der Substratzufuhr

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  $p\text{CO}_2$ -Werte führt. Dies war der Fall in einer Anlage (Maissilage, Schweinegülle), in der die Abnahme des  $p\text{CO}_2$  in der Maische um fast 90 hPa 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.

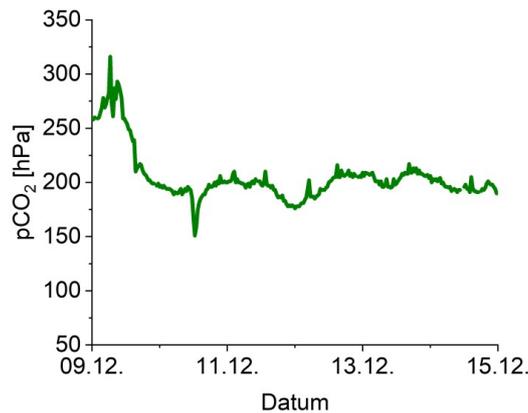


Abb. 5: Hohe  $\text{CO}_2$ -Werte in der Fermentermaische als Folge der Prozessüberlastung mit nachfolgender Konsolidierung

Durch hohe Strompreise im Dezember 2022 haben viele Anlagenbetreiber versucht, ihre Stromproduktion deutlich zu erhöhen. Die damit verbundenen erhöhten Fütterungsmengen hatten oft auch eine Prozessüberlastung zur Folge gehabt. So interessierte sich ein Betreiber für unser Messsystem, da er Probleme bei der Gasproduktion (Menge und Qualität) hatte. Nach dem Einbau wurden sehr hohe  $p\text{CO}_2$  Werte zwischen 250 und 325 hPa gemessen (Abbildung 5) und ein FOS/TAC Wert von 0,58 ermittelt. Solche hohe  $\text{CO}_2$ -Sättigung wurde bislang nur in Laborversuchen bei Prozessstörungen beobachtet. Ausgehend davon, wurde dem Betreiber empfohlen, durch gezielte Änderung der Substratmengen den  $p\text{CO}_2$ -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 bzw. auf 0,32 ab. Im Nachgang erholte sich dann auch die Qualität des produzierten Gases.

Wie die angeführten Beispiele zeigen, reagiert der  $\text{CO}_2$ -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.

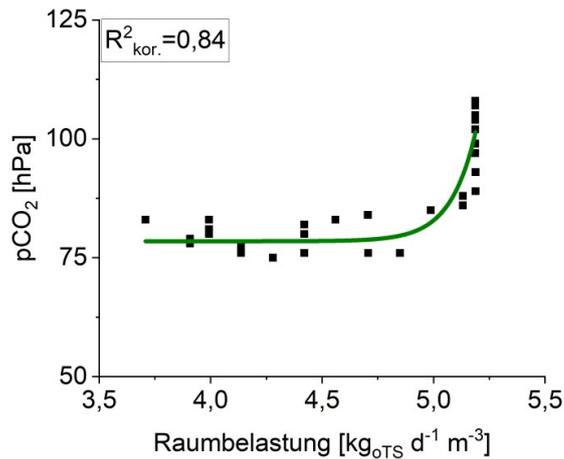


Abb. 6: Steiler Anstieg der mittleren täglichen pCO<sub>2</sub>-Werte bei einer Raumbelastung in der ersten Fermentationsstufe über 5 kg oTS m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>

Für den Anlagenbetreiber und für die Prozessbeurteilung ist die Raumbelastung eine sehr wichtige Größe. In einer weiteren Biogasanlage wurde über einen längeren Zeit die Substratzufuhr genau aufgenommen und in Beziehung zu den im ersten Fermenter gemessenen pCO<sub>2</sub>-Werten gesetzt (Abbildung 6). Die sehr steil ansteigenden pCO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub> in der Maische wird damit frühzeitig eine Effizienzabnahme des Prozesses durch schlechtere Gasqualität (weniger Methan und mehr CO<sub>2</sub> im Biogas) angezeigt. Damit sinken die spezifische Erträge und die Substratausnutzung. Eine weitere Erhöhung der Fütterungsmengen (häufige Maßnahme als Reaktion auf schlechte Gasqualität) würde ohne Betrachtung der CO<sub>2</sub> Dynamik in der Fermentermätsche wahrscheinlich zu einer Prozessstörung führen.

### Flexibilisierung im Fokus

Mit zunehmendem Ausbau der regenerativen Energien wird die Volatilität der Strompreise steigen. Die Direktvermarktung wie auch die Bedingungen des EEG 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 aufzeigt, 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 wie auch

die Robustheit des Messsystems erfüllen erstmalig die Anforderungen an eine Echtzeit-Prozessüberwachung in Biogasanlagen.

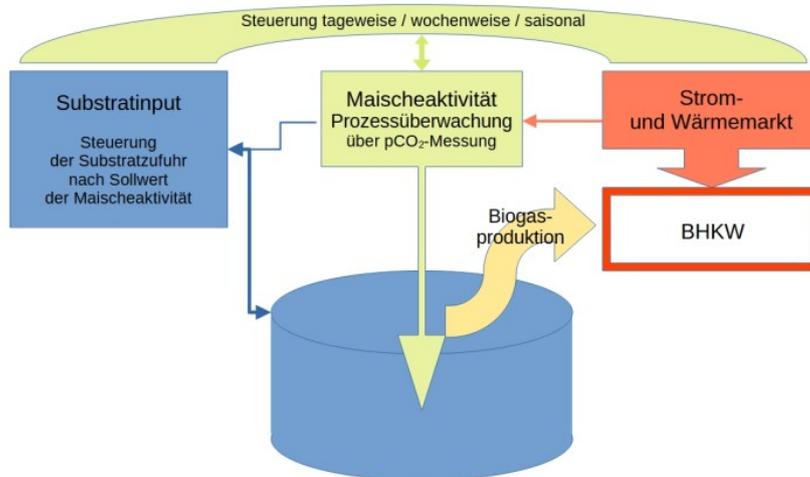


Abb. 7: Potential der neu entwickelten Messtechnik für Prozessüberwachung und Anlagenautomatisierung

#### Fazit und Ausblick

Die bisherige Überwachung des CO<sub>2</sub>-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 (03EGSBW749) 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<sub>2</sub>-Messwerte die Substratzufuhr zu optimieren und die Biogasproduktion und -verstromung den Erfordernissen des Strommarktes anzupassen (Abbildung 7). Dies soll ein wichtiger Schritt zu Anlagenautomatisierung sein. Als Zukunftsvision steht eine vollautomatisierte Biogasanlage.

Danksagung: Das Vorhaben „Automatische Überwachung der Prozessstabilität in Biogasreaktoren mittels CO<sub>2</sub>-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