

Aus der Professur für Abfall- und Stoffstromwirtschaft  
der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät

These der kumulativen Dissertation

## **A model-based control concept for a demand-driven biogas production**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
an der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der  
Universität Rostock

vorgelegt von  
M. Eng. Eric Mauky  
aus Leipzig

Verteidigung am 16. November 2018

## A - Hintergrund und Zielstellung

Die Lösung des globalen Energieproblems gilt als eine zentrale Herausforderung des 21. Jahrhunderts. So sollen die durch die Nutzung von konventionellen Energieträgern verursachten ökologischen, gesellschaftlichen und gesundheitlichen Probleme minimiert werden. Gleichzeitig stellen die Endlichkeit der fossilen Energieträger sowie die Gefahren der Kernenergie wichtige Gründe für eine Beendigung der Nutzung von fossilen Energieträgern dar. Um der zunehmenden Umweltbelastung langfristig vorzubeugen, sind als direkte Reaktion ein sparsamer Energieverbrauch sowie eine Umstellung auf erneuerbare Energiequellen notwendig. 2015 wurden durch erneuerbare Energien in den OECD Ländern 2,471 TWh elektrische Energie erzeugt, was 23 % der gesamten Produktion entspricht<sup>1</sup>. Mit dem in den letzten Jahren verstärkten Ausbau von hochgradig fluktuierenden erneuerbaren Energien (Windkraft, Photovoltaik) und dem voraussichtlichen Weiterschreiten dieser Entwicklung wird die intelligente Integration dieser neuen Energiequellen in das Energieversorgungssystem zur weiteren Herausforderung.

Biogasanlagen besitzen dabei eine Schlüsselrolle, denn bei Biogas gestaltet sich die Kontrollierbarkeit der Energiebereitstellung anders als bei Wind- und Sonnenenergie. Dort können Laufzeit und Auslastungsgrad des Blockheizkraftwerks (BHKW) und damit Zeit und Menge der Einspeisung elektrischer Energie technisch einfach kontrolliert und schnell geändert werden. Weiterhin besitzt die Biogastechnologie allein durch die Anzahl und installierte Leistung (rund 8000 großtechnischen Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von rund 4000 MW<sub>el</sub> in Deutschland im Jahr 2016<sup>2</sup>) ein bedeutendes Potenzial für eine nachhaltige und versorgungssichere Energiebereitstellung.

Landwirtschaftliche Biogasanlagen in Deutschland basieren in der überwiegenden Zahl auf dem Prinzip des kontinuierlichen vollaufgemischten Rührkesselfermenters (engl. CSTR) und sind ursprünglich für einen gleichmäßig konstanten Energieoutput ausgelegt worden. Für eine bedarfsgerechte Verstromung ist allerdings das dafür nötige Biogas entweder in Gasspeichern vorzuhalten oder bedarfsgerecht zu produzieren. Neben einem erheblichen Gasspeicherzubau oder dem Umbau in mehrstufige Konzepte, welche die Betreiber vor große Investitionen stellen, ist die gezielte Einflussnahme auf den anaeroben Abbauprozess an Bestandsanlagen eine vielversprechende Alternative.

Zielstellung der vorliegenden Arbeit ist daher, die Möglichkeiten und Grenzen der flexiblen Biogasproduktion durch bedarfsgerechtes Substratmanagement zu untersuchen und ein geeignetes Regelungsverfahren zu entwickeln. Folgende inhaltliche Schwerpunkte sind dafür zu bearbeiten:

---

<sup>1</sup> 'Key Renewables Trends - Excerpt from Renewables information', INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, EXCERPT FROM RENEWABLES INFORMATION 2016 edition, 2016.

<sup>2</sup> Liebetrau, J., Daniel-Gromke, J., Denysenko, V., Rensberg, N., Scheftelowitz, M., and Nelles, M., 'Aktuelle Entwicklungen bei der Erzeugung und Nutzung von Biogas', in Biogas Innovationskongress 2016, Osnabrück, 2016, pp. 15–27.

- A.1 Auf Basis von Analysen zur Substratcharakterisierung sind erste Klassifizierungen für die Eignung der Substrate zur flexiblen Biogasproduktion zu eruieren.
- A.2 Anhand von Laborversuchen sind verschiedene Fütterungsstrategien und Substratkombinationen hinsichtlich der zu erreichenden Gasproduktionsdynamik zu untersuchen. Darüber hinaus sind die Auswirkungen der dynamischen Prozessführung auf die prozessbiologische Stabilität zu bewerten.
- A.3 Für die vorausschauende Prozessführung in Abhängigkeit des Energiebedarfs sind geeignete Regelungsmethoden, sowie Optimierungsstrategien zu entwickeln, welche die Mechanismen der flexiblen Biogasbildung ausreichend abbilden und gleichzeitig die Anforderungen eines praktischen Anlagenbetriebs landwirtschaftlicher Biogasanlagen einbeziehen.
- A.4 Die entwickelte Regelungsstrategie ist anhand repräsentativer Versuche im Praxismaßstab zu validieren und hinsichtlich ihrer Aussagekraft und Grenzen zu bewerten.
- A.5 Mithilfe eines Simulationsmodells sind verschiedene Fütterungsstrategien anhand von charakteristischen Stromfahrplänen (aus realen Börsenpreiszeitreihen der EPEX identifiziert) hinsichtlich wirtschaftlicher Kenngrößen zu bewerten.
- A.6 Abschließend sind die durchgeführten Versuche sowohl bezogen auf die Prozessstabilität als auch hinsichtlich der Prozessdynamik vom Labor- bis zum Praxismaßstab zu vergleichen und anhand charakteristischer Prozess- und Zustandsgrößen zu bewerten.

## **B - Hauptaussagen der Arbeit**

Im Rahmen der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurden die Möglichkeiten und Grenzen der bedarfsgerechten Biogasproduktion mit verschiedenen Versuchen im Labor- und Praxismaßstab betrachtet. Die durchgeführten Versuche belegen, dass in einer zeitlichen und in ihrer Zusammensetzung optimierten Substratzugabe ein erhebliches Potenzial zur Flexibilisierung der Gasproduktion liegt, bei gleichzeitig stabilem Prozess. Das entwickelte modellprädiktive Regelungskonzept konnte den Biogasbildungsprozess hinreichend genau führen und die gestellten Anforderungen (u.a. Erfüllung eines Gasbedarfsfahrplans bei gleichzeitigem Gewährleisten eines Gasspeicherfüllstandes in definierten Grenzen) erfüllen. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die verwendete vereinfachte Modellstruktur durch die geringe Anzahl an benötigten Eingangsgrößen sowie Modellparametern und das robuste Systemverhalten für den praxisnahen Einsatz geeignet ist.

Die Hauptaussagen und zentralen Forschungsergebnisse der Arbeit werden im Folgenden zusammengefasst:

- B.1 Durch die gezielte zeitliche Verteilung der Substratbeschickung kann der Biogasbildungsprozess dynamisiert werden. Weiterhin kann durch die gezielte Substratkombination, entsprechend der Zusammensetzung (schnell/langsam abbaubare Kohlenhydrate, Fette, Eiweiße) bzw. durch zeitliche Verteilung unterschiedlich schnell abbaubarer Substrate eine weitere Dynamisierung der Gasproduktion erreicht werden.
- B.2 Die Biogasproduktionsrate kann – unter den gewählten Versuchsbedingungen - im täglichen Verlauf, je nach Substrat und Raumbelastung um bis zu 50 %, bezogen auf die Bemessungsleistung im großtechnischen Maßstab, variiert werden.
- B.3 Neben einer flexiblen Biogasproduktion zeigt sich unter den Versuchsbedingungen auch in den individuellen Säurekonzentrationen, der Gaszusammensetzung sowie dem pH-Wert eine alternierende Prozessreaktion gemäß der Substratbeschickung. Bei Gewährleistung eines ausreichenden Puffersystems führen diese Prozessreaktionen allerdings nicht zu einer langfristigen Prozessstörung.
- B.4 Der Biogasprozess kann unter Verwendung einer modellprädiktiven Regelung vorausschauend anhand eines Bedarfsfahrplanes und unter Berücksichtigung technologischer Grenzen (z.B. Gasspeicherkapazität) dynamisch mit Substrat beschickt werden. Auf Grund der geringen messtechnischen Ausstattung von großtechnischen Biogasanlagen wurde ein vereinfachtes Modell des Biogasprozesses verwendet, welches den Verlauf der Gasproduktionsrate bei ungehemmtem Prozess mit ausreichender Genauigkeit vorausberechnet.
- B.5 Im großtechnischen Versuch konnte die Substratbeschickung bis zu 3 Tage pausiert werden, wodurch eine Reduktion der Gasproduktionsrate um mehr als 60 % möglich wurde. Es zeigten sich bei Wiederanfahren des Prozesses keine negativen Auswirkungen auf die langfristige Prozessstabilität (u.a. FOS und FOS/TAC nicht über kritischem Wert).
- B.6 Durch einen bedarfsgerechten Betrieb einer Biogasanlage mittels Fütterungsmanagement können die Erträge an der Europäischen Strombörse unter aktuellen Bedingungen gegenüber einer konstanten Gasproduktion verdoppelt werden. Es zeigte sich, dass im Vergleich zu einem Gasspeicherzubau oder aufwändigen mehrstufigen Fermenterkonzepten nur geringe Zusatzkosten nötig sind.
- B.7 Der benötigte Gasspeicher kann unter Annahme der in dieser Arbeit ermittelten Prozessdynamik um bis zu 68 % gegenüber einer konstanten Gasproduktionsrate reduziert werden.

## **C - Wissenschaftliche Wertung der Ergebnisse**

Die bisherige Forschung im Bereich der bedarfsgerechten Energiebereitstellung mittels Biogasanlagen befasste sich vorwiegend mit der bedarfsgerechten Verstromungsoptimierung sowie speziellen mehrstufigen Reaktorkonzepten und Betriebsstrategien. Die vorliegende Arbeit hingegen widmet sich der Untersuchung von Möglichkeiten und Grenzen der direkten Beeinflussung des anaeroben Prozesses durch den bedarfsgerechten Substrateinsatz.

Folgende Wertungen können vorgenommen werden:

- C.1 Es konnte erstmals gezeigt werden, dass auch in volldurchmischten Rührkesselreaktoren einer großtechnischen Biogasanlage bedarfsgerecht Biogas produziert werden kann, ohne die Prozessstabilität negativ zu beeinflussen.
- C.2 Insbesondere die Demonstration und Untersuchung der flexiblen Biogasproduktion im großtechnischen Maßstab erlaubte neue Erkenntnisse hinsichtlich Wechselwirkungen und Grenzen im anaeroben Abbauprozess infolge alternierender Prozessbedingungen. Ein noch zu untersuchender Aspekt ist allerdings die gezielte Beeinflussung der mikrobiellen Gemeinschaft („Bioaugmentation“) durch eine dynamische Prozessführung und eine einhergehende Steigerung der Resilienz gegenüber Prozessschwankungen.
- C.3 Es zeigte sich, dass insbesondere die verknüpfte (ganzheitliche) Betrachtung von Prozessen der anaeroben Vergärung, der Gasspeicherung und Verstromung zur Findung von optimalen Betriebsstrategien notwendig ist. In weiteren Untersuchungen sollte der Fokus auf der modelltechnischen Abbildung weiterer Teilprozesse liegen, um in der Zusammenführung dieser Teilmodelle Biogasanlagen sowohl hinsichtlich einer effizienten Substratnutzung, als auch hinsichtlich einer optimalen Bereitstellung von Strom und Wärme entsprechend externer und interner Bedarfe zu beschreiben und zu regeln.
- C.4 Durch die geringe messtechnische Ausstattung an Praxisanlagen mussten in der Arbeit Kompromisse hinsichtlich der Modell- und Regelungskomplexität eingegangen werden. Die entwickelten Methoden zur modellprädiktiven Regelung und der dafür benutzten vereinfachten Modellstruktur erscheinen angesichts des Standes der Wissenschaft und der vorliegenden Erfahrungen zur messtechnischen Ausstattung an Biogasanlagen sachgerecht. Insbesondere das gewählte Messkonzept zur Regelung war den gestellten Anforderungen entsprechend geeignet. Durch eine umfangreichere messtechnische Ausstattung von Biogasanlagen können auch komplexere Prozessmodelle in Regelungen eingesetzt werden, um auch bei Nutzung von störfstoffbelasteten Substraten (mit hohen Stickstoff-, Schwefelgehalten) den Prozess bedarfsgerecht zu führen.

## **D - Allgemeine Bedeutung der Ergebnisse**

In der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass CSTR-basierte Biogasanlagen mit leichten Modifikationen im Betriebsregime deutlich flexibler betrieben werden können, als es Stand der Technik ist. Damit ergeben sich folgenden Möglichkeiten im praktischen Kontext:

- D.1 Ein vorausschauendes Substrat- und Gasmanagement ermöglicht eine, entsprechend dem tatsächlichen Energiebedarf, bedarfsgerechtere Nutzung der verfügbaren Substrate.
- D.2 Hinsichtlich einer bedarfsgerechten und flexiblen Energiebereitstellung von Biogasanlagen lassen sich vereinfachte anaerobe Modelle als belastbare Grundlage für eine Vorhersage oder Optimierung möglicher Betriebsvarianten und profitabler Fahrpläne nutzen.
- D.3 Die flexible Fütterung kann als Alternative oder als Ergänzung zum Speicherzubau betrachtet werden, da sie das benötigte Gasspeichervolumen bei gleicher Verstromung deutlich reduzieren kann.
- D.4 Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass die Erträge an der Europäischen Strombörse unter aktuellen Bedingungen gegenüber einer konstanten Gasproduktion verdoppelt werden können, bei nur geringen Zusatzkosten. Somit können die Ergebnisse auch als Grundlage für die Weiterentwicklung und Ertüchtigung (Repowering) bestehender Biogasanlagen genutzt werden.
- D.5 Ein flexibler Biogasanlagenbetrieb, insbesondere eine flexible Gasproduktion, beeinflusst die Anforderungen, die an technische Komponenten einer Biogasanlage gestellt werden. So sind beispielsweise Substrateintragssysteme hinsichtlich höherer Volumenströme zu modifizieren und auch Messbereiche von Gasvolumenstrommesstechnik zu erweitern. Weiterhin sind Infolge schwankender Gaszusammensetzungen oder häufiger Start/Stopps-Phasen die Verbrennungscharakteristiken am BHKW anzupassen, oder auch die Messkonzepte an Gasspeichern zu optimieren.