

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

Thesen der Dissertation

PRAXISNAHE MODELLIERUNG VON BIOGASANLAGEN

SYSTEMATISCHE VEREINFACHUNG DES ANAEROBIC DIGESTION MODEL NO. 1 (ADM1)

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

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) Sören Weinrich aus Leipzig

Verteidigung am 27. Oktober 2017

A Zielstellung der Arbeit

Die Biogastechnologie leistet mit mehr als 8.000 großtechnischen Anlagen und einer installierten elektrischen Leistung von rund 4.389 MW_{el} (Vor-Ort-Verstromung) einen bedeutenden Beitrag für eine nachhaltige Energiebereitstellung in Deutschland. Vor dem Hintergrund der aktuellen energiepolitischen Entwicklungen und des zunehmenden Kostendruckes steigen die Anforderungen an eine präzise und zugleich praxisnahe Substrat- bzw. Effizienzbewertung und Prozessoptimierung von Biogasanlagen. So führen die aktuellen Förderbedingungen bewusst zu einem erheblichen Rückgang im Anlagenzubau und lenken den Anwendungsbereich gezielt auf eine dezentrale sowie flexible Stromerzeugung aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Der andauernde gesellschaftliche und politische Diskurs zeigt deutlich, dass eine dauerhafte Akzeptanz für einen weiteren Ausbau bzw. Bestandsschutz der Biogastechnologie nur unter Berücksichtigung der individuellen Potentiale der unterschiedlichen Substrate und Abfälle sowie der charakteristischen Vorteile ihrer energetischen Nutzung in einer Biogasanlage möglich ist.

Für eine realitätsnahe Anlagenplanung und effiziente Prozessführung ist die Kenntnis über das Abbauverhalten der vielfältigen Substrate bei unterschiedlichen Prozessbedingungen von entscheidender Bedeutung. Dabei bietet die dynamische Modellierung von Biogasanlagen – gemeinsam mit den prozessbegleitenden Messwerten und Laboranalysen – eine belastbare Grundlage für die Abbildung oder Vorhersage der charakteristischen Kenngrößen und Prozessindikatoren. Im Praxisbetrieb kann eine Modellrechnung somit für eine detaillierte Zustandsüberwachung und gezielte Prozessoptimierung verwendet werden oder aber als Fundament für eine automatisierte Prozessführung zur bedarfsgerechten Biogaserzeugung dienen.

Problemfixierung

Seit Ende der 60er Jahre sind eine Vielzahl dynamischer Modelle zur Berechnung unterschiedlicher Kenngrößen der anaeroben Biogaserzeugung entwickelt worden. Die verschiedenen Modellansätze unterscheiden sich dabei stark in der Anzahl der modellierten Zustandsgrößen und Prozessstufen. Einfache Modelle sind mitunter stark an den jeweiligen Prozesszustand gebunden und lassen sich nur begrenzt auf abweichende Substrate oder Betriebsbedingungen übertragen. Komplexe Modelle – wie beispielsweise das *Anaerobic Digestion Model No. 1* (ADM1) – sind häufig strukturell nicht identifizierbar und können bis heute nicht automatisiert an Praxisanlagen eingesetzt werden, da gewöhnlich nur ein Bruchteil der für die Modellanpassung notwendigen Messdaten in der erforderlichen Quantität und Qualität vorhanden ist.

Obwohl bereits detailliertes Wissen und langjährige Erfahrung in der mathematischen Modellierung und Prozessüberwachung der anaeroben Fermentation existiert, lassen sich modellbasierte Zustandsbeobachter oder Regelungsverfahren aufgrund der komplexen Modellstrukturen und der individuellen Anpassung zur Parameteridentifikation oder Substratcharakterisierung nicht standardisiert an landwirtschaftlichen Biogasanlagen einsetzen. Aktuelle Untersuchungen zur Simulation der Vergärung typischer Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger beschränken sich üblicherweise auf den wissenschaftlichen Einsatz des etablierten ADM1 und bieten für die robuste Anwendung im großtechnischen Anlagenbetrieb keine praxisnahen Handlungsansätze. Im Rahmen der Substrat- oder Effizienzbewertung ermöglichen einstufige Modellstrukturen und Bruttobilanzen die kinetische Auswertung von diskontinuierlichen Vergärungsversuchen oder eine allgemeine Massenbilanzierung im stationären Betriebszustand. Die spezialisierten Modellansätze lassen sich jedoch nicht für die Simulation dynamischer Prozesse nutzen.

So fehlt bis heute eine vergleichende Auswertung bzw. Entwicklung geeigneter Modellstrukturen, um eine praxisnahe Prozesssimulation im großtechnischen Anlagenbetrieb bei einfacher Modellanpassung und hinreichend genauen Simulationsergebnissen zu ermöglichen.

Zielstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die systematische Entwicklung vereinfachter Modellstrukturen für die dynamische Prozesssimulation von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Folgende inhaltlichen Schwerpunkte sind dafür zu bearbeiten:

- A.1 Anhand der verfügbaren Literatur zur Entwicklung und Anwendung charakteristischer Prozessmodelle der verfahrenstechnischen Vergärung sollen geeignete Modellstrukturen für die Simulation landwirtschaftlicher Biogasanlagen identifiziert werden.
- A.2 Mithilfe von Bruttobilanzen sind die stöchiometrischen Abbauege (Reaktionen) und vielfältigen Zwischenprodukte (Zustandsgrößen) der komplexen Simulationsmodelle hinsichtlich einer praxisnahen und robusten Anwendung im großtechnischen Anlagenbetrieb systematisch zu vereinfachen.
- A.3 Unter Verwendung typischer Kennzahlen der Biogastechnologie sollen verfügbare Methoden zur Bewertung der fermentierbaren Nährstoffanteile von landwirtschaftlichen Substraten und tierischen Exkrementen ermittelt und für eine aussagekräftige bzw. belastbare Substratcharakterisierung (Modelleingang) verwendet werden.
- A.4 Die implementierten Modellvarianten sind anhand repräsentativer Laborversuche zur Vergärung typischer Energiepflanzen, Wirtschaftsdünger und industrieller Abfallprodukte landwirtschaftlichen Ursprungs (Getreideschlempe) auszuwerten.
- A.5 Für die Modellanpassung (Parameteridentifikation) werden geeignete Methoden auf Basis numerischer Optimierungsverfahren sowie einer umfangreichen Monte-Carlo-Analyse im gesamten Wertebereich der einzelnen Parameter angewendet.
- A.6 Die resultierenden Simulationsergebnisse und identifizierten Modellparameter sind sowohl hinsichtlich der Aussagekraft zur Berechnung der charakteristischen Prozess- und Zustandsgrößen als auch für einen detaillierten Methodenvergleich der entwickelten Modellansätze zu diskutieren; dabei sind die stöchiometrischen Modelleigenschaften der unterschiedlichen Modellvarianten gezielt mit den etablierten Kennzahlen aus der Praxis- und Grundlagenliteratur zu vergleichen.
- A.7 Abschließend werden die entwickelten Simulationsmodelle hinsichtlich Ihrer Aussagekraft und Einsatzmöglichkeiten in der großtechnischen Anlagenpraxis bewertet.

B Hauptaussagen der Arbeit

Auf Basis einer umfangreichen Literaturlauswertung wurden geeignete Modellstrukturen zur Simulation von landwirtschaftlichen Biogasanlagen identifiziert und systematisch vereinfacht. Die entwickelten Modellansätze unterscheiden sich dabei stark in der Anzahl der implementierten Prozessphasen, Komponenten und Parameter. Hingegen umfangreiche Modelle wie das massenbasierte ADM1 oder ANGELIDAKI-Modell einzelne Abbauege und Zwischenprodukte der Acido- und Acetogenese detailliert abbilden, beschreiben stark vereinfachte Modelle die Biogasproduktion direkt über den Abbau einzelner Nährstoffe anhand einer Bruttoreaktion erster Ordnung.

Die modellbasierte Auswertung kontinuierlicher Laborversuche zur Vergärung landwirtschaftlicher Substrate und Reststoffe belegt deutlich, dass die entwickelten Modellvarianten für eine aussagekräftige Simulation der charakteristischen Kenngrößen und Prozessindikatoren der Biogastechnologie geeignet sind. Hinsichtlich der messtechnischen Ausstattung von großtechnischen Biogasanlagen besitzen insbesondere die vereinfachten Modellstrukturen durch die geringe Anzahl an benötigten Modellparametern und das robuste Systemverhalten klare Vorteile für den praxisnahen Einsatz. Dabei ist anhand der individuellen Zielstellung – unter Berücksichtigung des konkreten Anlagenkonzepts und der verfügbaren Messdaten – zu entscheiden, welche Modellteile für die jeweiligen Simulationsaufgaben benötigt werden. So lassen sich einfache Modelle für eine erste Prozesssimulation zur Anlagenauslegung oder einer substratspezifischen Vorhersage der Gasproduktion verwenden, dahingegen komplexe Modellstrukturen für eine detaillierte Abbildung relevanter Zwischenprodukte und wirksamer Prozessinhibitoren einzusetzen sind.

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

- B.1 Das etablierte und CSB-basierte ADM1 lässt sich anhand der charakteristischen Referenzsubstrate in eine massenbasierte Bezugseinheit überführen. Mit der Definition fester Bilanzen und Modellkomponenten wird die Anzahl der stöchiometrischen Modellparameter im Vergleich zum ursprünglichen ADM1 somit bereits um 41 Parameter verringert.
- B.2 Das vollständige ADM1 lässt sich anhand von Bruttoreaktionen systematisch vereinfachen. Mit jedem Reduktionsschritt werden die stöchiometrischen Abbauewege der hydrogenotrophen Methanogenese, Acido- und Acetogenese bis zur acetoklastischen Methanogenese gezielt zusammengefasst. Auf Basis des massenbasierten ADM1 stehen damit vielfältige Modellvarianten (ADM1-R1 bis ADM1-R4) zur Verfügung, welche die Konzentration aussagekräftiger Zwischenprodukte detailliert beschreiben oder aber den gesamten Vergärungsprozess direkt über den Abbau einzelner Nährstoffe anhand einer Bruttoreaktion erster Ordnung simulieren.
- B.3 Durch die gezielte Modellvereinfachung zum ADM1-R4 werden die 31 kinetischen Modellparameter und Inhibierungskonstanten des ursprünglichen ADM1 auf 4 Reaktionskonstanten erster Ordnung reduziert; zusätzlich entfallen 14 von 21 physikochemischen Konstanten zur Beschreibung der Dissoziationsgleichgewichte. Die Anzahl der abgebildeten Prozesse (Zustandsgleichungen) und Modellkomponenten (Zustandsgrößen) wird von 19 auf 4 Reaktionen sowie von 34 auf 10 Komponenten verringert.
- B.4 Die mikrobiellen Biomasseertragskoeffizienten der dynamischen Prozessmodelle sind mit einem Wertebereich zwischen 12,4 und 22,5 je kg Nährstoff wesentlich höher als die üblichen Angaben der praxisnahen Grundlagenliteratur. Für relevante Sterberaten und übliche Verweilzeiten in landwirtschaftlichen Biogasanlagen lässt ein effektiver Biomasseertrag zwischen 3,5 und 9,5 % fermentierbarer Nährstoffe bei der Vergärung typischer Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger (mit geringem Fettanteil) definieren.
- B.5 Werden alle Folgereaktionen des Zerfalls und der Verwertung mikrobieller Biomasse berücksichtigt, entspricht das effektive Biogasbildungspotential der fermentierbaren Kohlenhydrate im ADM1 unter üblichen Reaktions- bzw. Betriebsbedingungen den typischen Literaturangaben zwischen 750 bis 792 l kg⁻¹. Für die fermentierbaren Proteine und Fette lassen sich keine allgemeingültigen Aussagen ableiten, da sich das Biogasbildungspotential in Abhängigkeit von den gewählten Referenzsubstraten mitunter erheblich voneinander unterscheidet.

- B.6 Die resultierenden Nährstoffanteile bei der Modellierung des Zerfalls abgestorbener Mikroorganismen ergeben sich lediglich auf Basis einer geschlossenen Massen- bzw. Elementenbilanz und spiegeln im Detail nicht die reale Zellzusammensetzung wider. Grundsätzlich bestätigen die stöchiometrischen Reaktionsgleichungen dabei einen hohen Proteinanteil an der Trockenmasse der Zelle; der Gehalt an Kohlenhydraten und Fetten sowie der Anteil an charakteristischen Nukleinsäuren (RNA und DNA) lässt sich anhand der Modellstrukturen nicht eindeutig zuordnen.
- B.7 Die Biogasproduktionsrate lässt sich in allen Versuchen und Modellansätzen bei hoher Genauigkeit $R^2 \geq 0,93$ abbilden. Auch der Verlauf des pH-Werts sowie der Konzentration von organischen Säuren oder Ammoniumstickstoff wird anhand der entwickelten Modellstrukturen realitätsnah berechnet; einzelne Prozessstörungen oder Messunsicherheiten lassen sich jedoch nicht eindeutig durch die implementierten Modellvarianten darstellen.
- B.8 Unter Berücksichtigung der Phasenübergangsprozesse und des Dissoziationsgleichgewichts von Kohlenstoffdioxid ist eine realitätsnahe Approximation der Biogasqualität möglich. In den stark vereinfachten Modellansätzen wird der Methangehalt – unter Vernachlässigung der physikochemischen Abhängigkeiten – dabei konsequent unterschätzt.
- B.9 Grundsätzlich sind für die entwickelten Modellvereinfachungen identische Simulationsergebnisse der messbaren Kenngrößen garantiert; die zusätzlichen Prozessphasen des vollständigen ADM1 oder ANGELIDAKI-Modells ermöglichen keine eindeutige und verbesserte Modellabbildung der vorliegenden Versuchsdaten.
- B.10 Die Wahl einer geeigneten Zielfunktion besitzt mitunter einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis der numerischen Parameteroptimierung. So werden Prozessstörungen und Extremwerte, welche nicht eindeutig durch den jeweiligen Modellansatz abgebildet werden können, bei der quadratischen Fehlerberechnung (RMSE) überbewertet, sodass in diesen Fällen nur für den absoluten Fehler (MAE) ein realitätsnahes Simulationsergebnis garantiert ist.
- B.11 Auf Basis der Messwerterfassung und Simulation von durchschnittlichen Tageswerten ergeben sich für die Reaktionskonstanten große Wertebereiche und zahlreiche Abhängigkeiten, welche eine eindeutige Parameteridentifikation erschweren; mathematische Zielfunktionen besitzen ihr Optimum mitunter an den Grenzen der einzelnen Parameterbereiche, sodass für realitätsnahe Parameterwerte in diesem Fall mit den empfohlenen Standardwerten zu rechnen ist.
- B.12 Für eine praxisnahe Prozesssimulation der ausgewerteten Vergärungsversuche ist eine Anpassung der drei Hydrolysekonstanten (k_{ch} , k_{pr} und k_{li}) und der maximalen Wachstumsraten beim Propion- und Essigsäureabbau ($\mu_{m,pro}$ und $\mu_{m,ac}$) ausreichend. Für alle weiteren Modellparameter sind die Standwerte des ADM1 zu verwenden.
- B.13 Die wissenschaftlichen Grundlagen der umfangreichen Untersuchungen zur Bewertung der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS) von WEISSBACH lassen sich als Basis für eine differenzierte Berechnung der fermentierbaren Nährstoffanteile und belastbare Substratcharakterisierung (Modelleingang) von nachwachsenden Rohstoffen oder tierischen Exkrementen (Schweine- bzw. Rindergülle) verwenden. In Abhängigkeit von den implementierten Dissoziationsgleichgewichten und Phasenübergangsprozessen von Kohlenstoffdioxid ist mitunter eine erneute Anpassung einzelner Fermentationsquotienten notwendig.

B.14 Als belastbare Grundlage für eine aussagekräftige Bewertung der identifizierten Modellparameter wurden zahlreiche Untersuchungen zur Identifikation der kinetischen Kenngrößen bei der Vergärung vielfältiger Substrate und Reststoffe ausgewertet. Unter Berücksichtigung von Ausreißern lassen sich typische Wertebereiche der kinetischen Parameter definieren, welche sich mitunter stark von den etablierten Literaturgrenzen unterscheiden.

C Wissenschaftliche Wertung der Ergebnisse

Mit den unterschiedlichen Modellvarianten des etablierten ADM1 schließt die vorliegende Arbeit die Lücke zwischen einfachen Massen- bzw. Stoffbilanzen im stationären Anlagenbetrieb und umfangreichen Reaktionsmodellen zur dynamischen Prozesssimulation von Biogasanlagen. Für den wissenschaftlichen Diskurs stehen damit vielfältige und leistungsstarke Modellstrukturen zu Verfügung, welche sich hinsichtlich aktueller Fragestellung einsetzen, anpassen und auswerten lassen. Von theoretischen Simulationsstudien bis hin zur angewandten Forschung im großtechnischen Anlagenbetrieb bieten die wissenschaftlichen Ergebnisse dabei eine belastbare Grundlage und konkrete Handlungsansätze für zukünftige Forschungsschwerpunkte zu folgenden Kernthemen:

- C.1 Es existiert erstmals eine massenbasierte Modellstruktur des etablierten ADM1, welche sich hinsichtlich der stöchiometrischen Abbauewege und entsprechenden Massen- bzw. Energiebilanzen anhand der etablierten Kenngrößen der Biogastechnologie gezielt anwenden, erweitern und auswerten lässt.
- C.2 Durch die einstufigen Bruttoreaktionen der vereinfachten Modellstrukturen lassen sich zudem die charakteristischen Modelleigenschaften der etablierten Prozessmodelle mit den typischen Richtwerten für die mikrobiellen Biomasseertragskoeffizienten oder stöchiometrischen Biogasbildungspotentiale der fermentierbaren Nährstoffe vergleichen.
- C.3 Die vorliegenden Untersuchungen belegen den erfolgreichen Einsatz der entwickelten Modellvarianten zur dynamischen Prozesssimulation ausgewählter Laborversuche bei der Vergärung typischer Energiepflanzen, Wirtschaftsdünger und industrieller Abfallprodukte landwirtschaftlichen Ursprungs (Getreideschlempe). Entsprechend ist auf Basis der konkreten Prozessbedingungen bzw. wirksamen Inhibitoren sowie der verfügbaren Messdaten eine geeignete Modellstruktur für die individuelle Zielstellung auszuwählen. Dabei sind die einzelnen Modellvarianten anhand weiterer Versuchsdaten zur kontinuierlichen Vergärung vielfältiger Substrate, Reststoffe oder Abfälle bei detaillierter Messwerterfassung (Tagesverlauf) im Labor- und Praxismaßstab zu erproben.
- C.4 Der systematische und aussagekräftige Methodenvergleich belegt die Vor- und Nachteile der implementierten Verfahren zur Berechnung der Gasqualität, des pH-Werts oder wirksamer Inhibitoren, welche sich als wichtige Informationen für die weiterführende Modellentwicklung nutzen lassen.
- C.5 Für die numerische Parameteridentifikation und strukturelle Modellanalyse (Sensitivitätsanalyse) steht eine umfangreiche Datensammlung zur typischen Verteilung und sinnvollen Grenzwerten der charakteristischen Modellparameter im Biogasprozess zur Verfügung, welche sich im Detail mitunter von den bisherigen Literatur- und Standardwerten unterscheiden.

- C.6 Die detaillierte Identifikation der kinetischen Modellparameter verdeutlicht die zahlreichen Abhängigkeiten und individuellen Lösungswege zur Identifikation aussagekräftiger Parameterwerte. Für eine gezielte und automatisierte Parameteranpassung sind sowohl die zahlreichen Verfahren zur numerischen Parameteridentifikation (Zielfunktion und Optimierung) als auch die verfügbaren Methoden zur optimalen Versuchsplanung (OED) systematisch zu evaluieren.
- C.7 Bei Substraten, welche durch einen hohen Anteil an fermentierbaren Kohlenhydraten gekennzeichnet sind, ist eine eindeutige Identifikation der Reaktionskonstanten der geringen Protein- und Fettfraktion nicht möglich. Entsprechend ist eine alternative bzw. empirische Substratfraktionierung – wie beispielsweise schnell, mittel und langsam abbaubare Nährstoffe – zu prüfen.
- C.8 Da auch für die stark vereinfachten Modellvarianten (Bruttoreaktionen erster Ordnung) bei gleicher Parametrierung der Hydrolysekonstanten erster Ordnung identische Simulationsergebnisse der Biogasproduktionsrate garantiert sind, lässt sich bestätigen, dass die enzymatische Hydrolyse bei der weitestgehend störungsfreien Vergärung feststoffreicher und lignozellulosehaltiger Substrate die geschwindigkeitslimitierende Prozessphase im anaeroben Abbauprozess definiert.
- C.9 Die Bestimmung der fermentierbaren Substratbestandteile besitzt einen erheblichen Einfluss auf die Identifikation geeigneter Modellparameter und das resultierende Simulationsergebnis. Auf Basis der bisherigen Untersuchungsergebnisse von WEISSBACH wird eine standardisierbare Labormethode (in-vitro-Methode) für eine direkte und präzise Bestimmung der fermentierbaren Nährstoffanteile beliebiger Substrate und Abfälle benötigt.
- C.10 Die individuellen Referenzsubstrate für die fermentierbaren Proteine und Fette der untersuchten Simulationsmodelle und etablierten Literaturangaben unterscheiden sich mitunter erheblich. Unter Berücksichtigung der konkreten Substrateigenschaften sind praxisnahe Methoden für eine aussagekräftige Bestimmung der stöchiometrischen Zusammensetzung und den daraus resultierenden Abbauwegen der fermentierbaren Proteine und Fette zu entwickeln.
- C.11 Die detaillierte Modellierung des Zerfalls abgestorbener Mikroorganismen besitzt einen erheblichen Einfluss auf das verfügbare Biogasbildungspotential und den effektiven Biomasseertrag. Für eine belastbare Identifikation der kinetischen Wachstums- und Sterberaten sowie der mikrobiellen bzw. stöchiometrischen Biomasseertragskoeffizienten werden aussagekräftige Methoden für eine präzise und differenzierte Bestimmung der Zellkonzentrationen (und Zellaktivitäten) in komplexen Gärmedien benötigt.
- C.12 Die robusten Systemeigenschaften der entwickelten Prozessmodelle bieten zahlreiche Einsatzmöglichkeiten in der angewandten Forschung. So lassen sich die vereinfachten Modellstrukturen als belastbare Grundlage für die Entwicklung modellbasierter Steuerungs- und Regelungskonzepte zur gezielten Prozessoptimierung an großtechnischen Biogasanlagen einsetzen oder als leistungsstarke Reaktionsmodelle – bei kurzen Rechenzeiten – für die Ortsdiskretisierung partieller Differentialgleichungssysteme (NAVIER-STOKES-Gleichungen) zur numerischen Strömungssimulation von Biogasanlagen verwenden.

D Allgemeine Bedeutung der Ergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind vielfältige Prozessmodelle zur dynamischen Simulation von landwirtschaftlichen Biogasanlagen entwickelt und ausgewertet worden. Durch die gezielte Modellvereinfachung des komplexen ADM1 und den umfassenden Modellvergleich bieten sich mit den unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Modellstrukturen zahlreiche Anwendungsgebiete in der angewandten Forschung und großtechnischen Anlagenpraxis:

- D.1 Die massenbasierte Modellgrundlage des etablierten ADM1 ermöglicht erstmals einen direkten Einsatz der dynamischen Simulationsmodelle im großtechnischen Praxisbetrieb sowie eine sachlogische Auswertung auf Basis der charakteristischen Kennzahlen der Biogastechnologie.
- D.2 Eine realitätsnahe Modellrechnung kann dabei als wertvolle Entscheidungshilfe für den Anlagenfahrer dienen oder aber für eine automatisierte Zustandsüberwachung (Softsensor) und gezielte Prozessoptimierung in Echtzeit eingesetzt werden.
- D.3 Die systematische Vereinfachung des massebasierten ADM1 ermöglicht den gezielten und ergänzenden Einsatz unterschiedlich komplexer Modellvarianten bei gleicher stöchiometrischer Modellgrundlage; so lassen sich einstufige Modellstrukturen mit schnellen Rechenzeiten für die Substrateinsatzoptimierung (Substratmanagement) verwenden, hingegen umfangreiche Modelle für eine detaillierte Zustandsanalyse auf Basis einzelner Zwischenprodukte (Prozessindikatoren) einzusetzen sind.
- D.4 Durch die stark reduzierten Systemeigenschaften und die geringe Anzahl an unbekanntem Modellparametern können die vereinfachten Prozessmodelle als robuste Bausteine in modellbasierten Steuer- und Regelungskonzepten an großtechnischen Biogasanlagen integriert werden.
- D.5 Hinsichtlich einer bedarfsgerechten und flexiblen Energiebereitstellung von Biogasanlagen lassen sich die vielfältigen Modelle als belastbare Grundlage für eine realitätsnahe Vorhersage oder numerische Optimierung möglicher Betriebsvarianten und profitabler Fahrpläne einsetzen.
- D.6 Einstufige Modellstrukturen auf Basis einfacher Bruttoreaktionen erster Ordnung können anhand praxisnaher Tabellenkalkulationen für eine realitätsnahe Anlagenplanung oder aussagekräftige Effizienzbewertung im stationären Betriebszustand ausgewertet werden.
- D.7 Die Aussagen über das stöchiometrische Biogasbildungspotential oder den mikrobiellen Biomasseaufbau bei der vollständigen Vergärung der fermentierbaren Nährstoffe lassen sich als wichtige Anhaltspunkte für die andauernde Überarbeitung praxisnaher Richtlinien und Kennzahlen verwenden.
- D.8 Die entwickelten Modellstrukturen bieten somit ein breites methodisches Spektrum, um einen dynamischen aber sicheren Anlagenbetrieb bei stark schwankenden Substratqualitäten bzw. -quantitäten zu ermöglichen und die Biogastechnologie auch in Zukunft gezielt unter den vorhandenen Energieträgern platzieren zu können.