

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Weiterentwicklung eines modellbasierten Prognosetools für die flexible Biogaserzeugung in großtechnischen Biogasanlagen

Teilvorhaben 1: Experimentelle Untersuchungen zum dynamischen Verhalten verschiedener Substrate und Definition von Mindestanforderungen an Prozess-, Mess- und Leittechnik

Teilvorhaben 2: Datenaufbereitung und Weiterentwicklung bestehender Simulationsmodelle unter Berücksichtigung praxisnaher Prozessüberwachungstechnik

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Universität Rostock

Teilvorhaben 2: Deutsches Biomasseforschungszentrum

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2219NR052

Teilvorhaben 2: 2219NR313

Laufzeit:

01.08.2020 bis 31.03.2023

Datum der Veröffentlichung:

03.01.2025

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH



**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

Weiterentwicklung eines modell- basierten Prognosetools für die flexible Biogaserzeugung in groß- technischen Biogasanlagen

Endbericht

Sören Weinrich und Jan Sprafke

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum ge-
meinnützige GmbH

Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-112

www.dbfz.de
info@dbfz.de

Datum: 03.01.2025

| | |
|--------------------|--|
| Zuwendungsgeber | Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, FNR) |
| Projektkoordinator | Universität Rostock Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät Internet: https://www.auf.uni-rostock.de Prof. Dr. mont. Michael Nelles Tel.: +49 (0)381 498-3400 E-Mail: michael.nelles@uni-rostock.de |
| Projektpartner | DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Bereich Biochemische Konversion Torgauer Straße 116 04347 Leipzig Internet: https://www.dbfz.de/prosim Prof. Dr. Ing. Sören Weinrich Tel.: +49 (0)341 2434-341 E-Mail: soeren.weinrich@dbfz.de |
| Erstelldatum: | 03.01.2025 |
| Projektnummer | 2219NR052 (Teilvorhaben Universität Rostock) 2219NR313 (Teilvorhaben DBFZ) |
| Gesamtseitenzahl | 54 |

Inhaltsverzeichnis

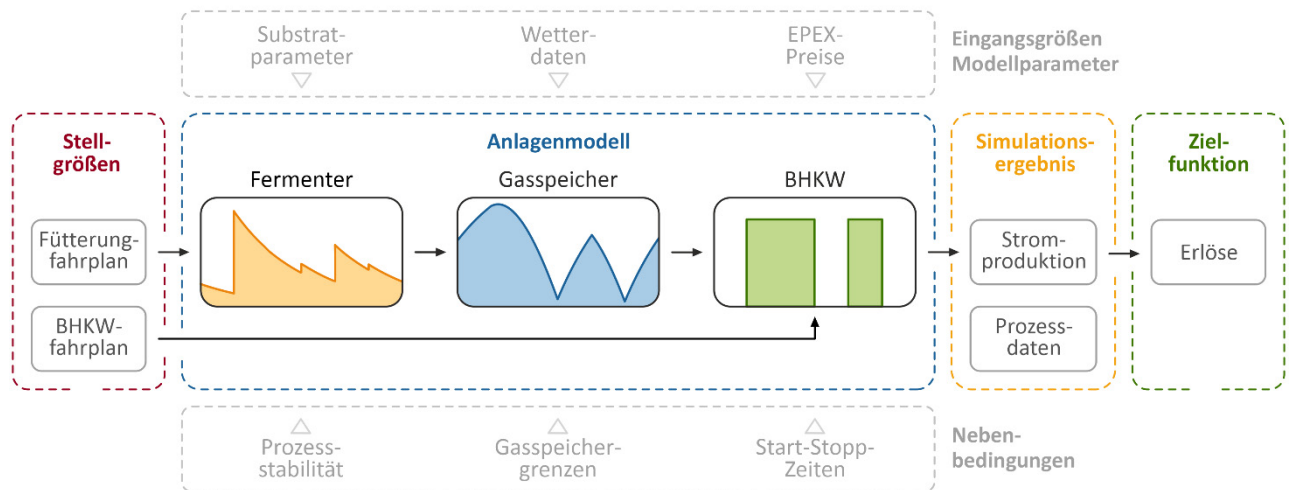
| | |
|---|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis | IV |
| I. Kurzbericht | 5 |
| 1. Aufgabenstellung | 6 |
| 2. Planung des Vorhabens | 7 |
| 2.1 Arbeitspaket 1: Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor | 8 |
| 2.2 Arbeitspaket 2: Herausforderungen bei der Datenbereitstellung in der Praxis | 8 |
| 2.3 Arbeitspaket 3: Weiterentwicklung des praxisnahen Modellansatzes | 9 |
| 2.4 Arbeitspaket 4: Schnittstellendefinition und Datenbereitstellung der Praxisanlagen | 9 |
| 2.5 Arbeitspaket 5: Test des Prognosetools für eine flexible Biogaserzeugung | 10 |
| 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse | 10 |
| 3.1 Arbeitspakete und Meilensteine | 10 |
| 3.2 Zusammenfassung | 12 |
| II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse | 13 |
| 1. Erziele Ergebnisse | 13 |
| 1.1 Arbeitspaket 1: Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor | 13 |
| 1.2 Arbeitspaket 2: Herausforderungen bei der Datenbereitstellung in der Praxis | 17 |
| 1.3 Arbeitspaket 3: Weiterentwicklung des Modellansatzes | 24 |
| 1.4 Arbeitspaket 4: Schnittstellendefinition und Datenbereitstellung der Praxisanlagen | 30 |
| 1.5 Arbeitspaket 5: Test des Prognosetools für eine flexible Biogaserzeugung | 32 |
| 2. Verwertung | 42 |
| 2.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende | 42 |
| 2.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende | 43 |
| 2.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit | 44 |
| 3. Erkenntnisse von Dritten | 45 |
| 4. Veröffentlichungen | 47 |
| 5. Literaturverzeichnis | 48 |
| III. Anhang | 52 |
| A.1 Teilvorhaben 1: Universität Rostock | 52 |
| A.2 Teilvorhaben 2: Deutsches Biomasseforschungszentrum | 53 |

Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Erklärung |
|-----------|---|
| ADM1 | <i>Anaerobic Digestion Model No. 1</i> |
| AP | Arbeitspaket |
| BGP | Biogaspotential |
| BHKW | Blockheizkraftwerk |
| BMEL | Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft |
| BMP | Biochemisches Methanpotential |
| BMWK | Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf |
| CSTR | <i>Continuous stirred-tank reactor</i> |
| DBFZ | Deutsches Biomasseforschungszentrum |
| EEG | Erneuerbare Energien Gesetz |
| EPEX | <i>European Power Exchange</i> |
| FBGA | Forschungsbiogasanlage |
| FM | Frischmasse |
| FMA | Futtermittelanalyse |
| FoTS | Fermentierbare organische Trockensubstanz |
| GPS | Ganzpflanzensilage |
| IBKE | Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie |
| KTBL | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft |
| LfL | Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft |
| ME | <i>Model efficiency</i> |
| MPC | <i>Model predictive control</i> |
| oTS | Organische Trockensubstanz |
| PC | <i>Personal Computer</i> |
| SAB | Sächsische Aufbaubank |
| TS | Trockensubstanz |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |
| VDLUFA | Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten |

I. Kurzbericht

Modellbasierte Verfahren zur Automatisierung flexibler Anlagenkonzepte zur bedarfsorientierter Biogas- und Stromproduktion sind in der Wissenschaft seit langem bekannt [1–3]. Als zentrales Element werden dabei aussagekräftige Modellstrukturen für eine realitätsnahe Simulation der konkreten Betriebs- und Prozessbedingungen benötigt (Abbildung 1).



iterative Optimierung der Stellgrößen (unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen)

Abbildung 1: Charakteristische Elemente der modellbasierten Prozessregelung zur bedarfsgerechten Biogasproduktion [4]

Durch die zahlreichen Einflussfaktoren und eine Vielzahl an unbekanntem Modellparameters lassen sich etablierte Prozessmodelle wie das *Anaerobic Digestion Model No. 1* (ADM1) [5] jedoch häufig nicht direkt in der großtechnischen Anlagenpraxis verwenden. Im Rahmen der Forschung am DBFZ wurden in der Vergangenheit vielfältige Modellstrukturen für den praxisnahen Einsatz in modellbasierten Regelungskonzepten entwickelt und erprobt (RegEnFix, 100143221, SAB; Gazelle, 100267056, SAB; BioSim, 2219NR333, BMEL; FlexApp, 2219NR333, BMEL). Neben konkreten Modellvereinfachungen auf Basis des ADM1 [6,7] oder künstlichen neuronalen Netzen [8,9], wurde dabei auch empirische Reaktionsmodelle auf Basis einer Reaktion erster Ordnung zur Substrat- und Prozessbewertung in unterschiedlicher Forschungsvorhaben (SubEval, 22034614, BMEL; Eliras, 03KB106A, BMWK; RestFlex, 22041818, BMEL) verwendet. Die konkrete Weiterentwicklung und Evaluation der empirischen Modellstrukturen zur Vorhersage der Biogasproduktion im regulären Praxisbetrieb von Biogasanlagen wurde bisher noch nicht im Detail untersucht.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die *Weiterentwicklung eines modellbasierten Prognosetools für die flexible Biogaserzeugung in großtechnischen Biogasanlagen*. Zur Vorhersage der dynamischen Biogasproduktion sollen dabei empirische Reaktionsmodelle hinsichtlich der konkreten Anforderungen für eine bedarfsgerechte Biogas- bzw. Strombereitstellung an Bestandsanlagen evaluiert und angepasst werden. Um eine direkte Anwendung in der großtechnischen Anlagenpraxis zu ermöglichen, sind etablierte Anlagen- und Prozessdaten sowie typische Anlagenkonfigurationen und flexible Betriebsweisen zu berücksichtigen. Weiterhin müssen sich der Aufwand und die damit verbundenen Kosten der praktischen Anwendung in einem vertretbaren Rahmen bewegen.

Auf Basis der Forschungsergebnisse können belastbare Aussagen zu den konkreten Möglichkeiten und Herausforderungen der praxisnahen Prozesssimulation ermittelt werden. Somit bieten die Projektinhalte eine belastbare Grundlage, um wissenschaftliche Methoden zur Prozesssimulation und -überwachung mittelfristig im regulären Praxisbetrieb an großtechnischen Biogasanlagen zu etablieren.

1. Aufgabenstellung

Im Rahmen des Verbundvorhabens soll ein praxisnahes Prognosetool für den flexiblen Betrieb von Biogasanlagen entwickelt werden (Abbildung 2). Unter Berücksichtigung der eingesetzten Substratmengen sowie verfügbarer Prozessdaten und etablierter Laboranalysen sollen geeignete Methoden zur Anwendung einfacher Reaktionsmodelle in der großtechnischen Anlagenpraxis geschaffen werden. Neben der Modellerweiterung zur Simulation unterschiedlicher Substrate und Betriebsbedingungen müssen zudem geeignete Methoden für eine verlässliche Schätzung der unbekanntenen Modellparameter implementiert werden. Die resultierenden Simulationsergebnisse lassen sich dann für eine verlässliche Vorhersage der dynamischen Biogasproduktion verwenden oder als belastbare Grundlage für modellbasierte Regelungskonzepte zur bedarfsgerechten Strombereitstellung nutzen.

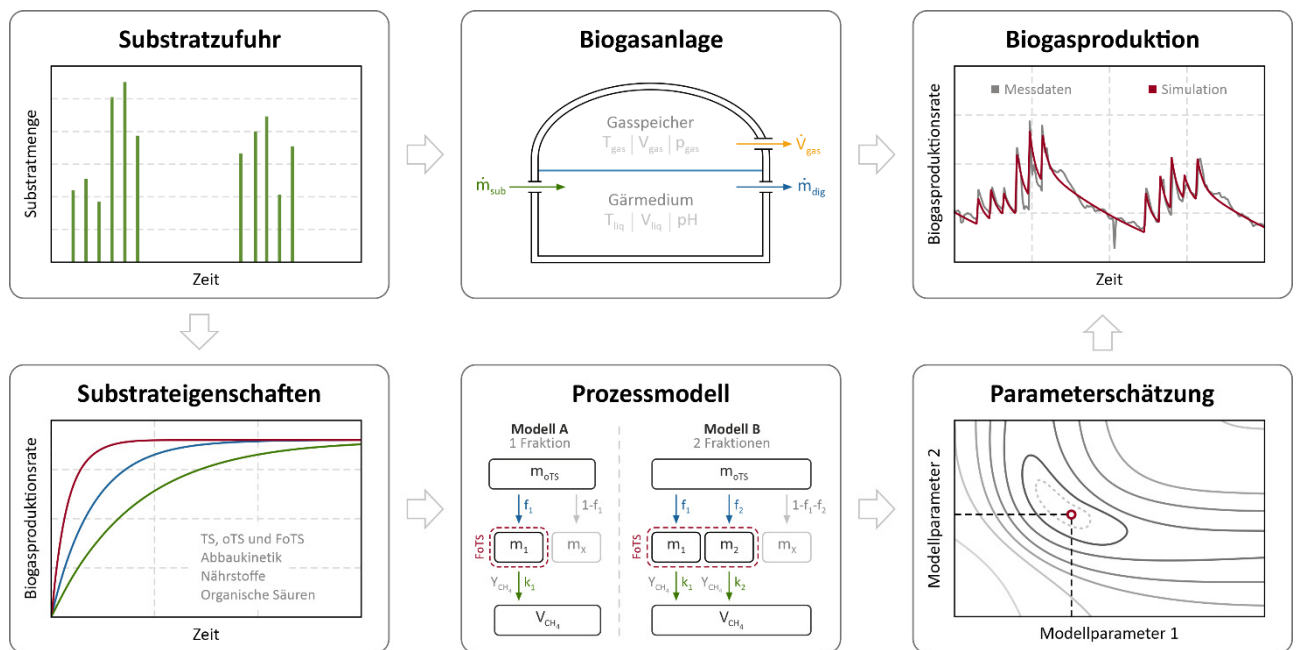


Abbildung 2: Arbeitsinhalte und Methoden zur Vorhersage der bedarfsgerechten Biogasproduktion

Anhand der Projektergebnisse sollen repräsentative Aussagen zu den Möglichkeiten und Herausforderungen modellbasierter Simulationsverfahren in der großtechnischen Anlagenpraxis ermittelt werden. Dabei ist insbesondere die Datenverfügbarkeit und -qualität an großtechnischen Biogasanlagen sowie die Aussagekraft der verwendeten Modellstrukturen im Detail zu evaluieren. Eine Betreiberumfrage sowie die Erfahrungen aus den Praxisversuchen bieten zudem wertvolle Informationen zum aktuellen Stand der Messtechnik von landwirtschaftlichen Bestandsanlagen in Deutschland.

Im Rahmen der zuvor definierten Arbeitsinhalte sollen im Verbundvorhaben folgende wissenschaftliche und technischer Arbeitsziele erreicht werden:

- Anwendung und Evaluation geeigneter Methoden zur experimentellen Bestimmung des Biogaspotenzials und der Abbaukinetik von Substraten für die Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion an landwirtschaftlichen Biogasanlagen auf Basis eines einfachen Reaktionsmodells.
- Ermittlung der erforderlichen Daten (aus dem Prozessleitsystem und zusätzlichen Laboranalysen) für die Simulation der flexiblen Biogaserzeugung im großtechnischen Anlagenbetrieb.
- Entwicklung praxistauglicher Strategien zur Minimierung möglicher Unsicherheiten der verfügbaren Daten für eine präzise Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion an Praxisanlagen.
- Definition geeigneter Schnittstellen zur Übertragung erforderlichen Anlagendaten (möglichst automatisiert und unter Verwendung typischer Datenformate an Biogasanlagen).
- Erfolgreicher Test des Prognosetools zur flexiblen Biogaserzeugung an großtechnischen Biogasanlagen. Die Ergebnisse zeigen, mit welcher Genauigkeit die Vorhersage der bedarfsgerechten Biogaserzeugung im flexiblen Anlagenbetrieb anhand der entwickelten Methoden möglich ist.

2. Planung des Vorhabens

Die unterschiedlichen Arbeitspakete im Verbundvorhaben sind in Abbildung 3 zusammengefasst. Die konkrete Planung des Vorhabens erfolgt im Folgenden anhand der ausführlichen Beschreibung des konkreten Arbeitsplans der einzelnen Arbeitspakete.



Abbildung 3: Arbeitspakete im Verbundvorhaben FlexiMod

2.1 Arbeitspaket 1: Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor

In diesem Arbeitspaket wird das Abbauverhalten der an den ausgewählten Praxisanlagen eingesetzten Substrate anhand zeitlich hoch aufgelöster Batchversuche im Biogaslabor der Universität Rostock bestimmt. Zusätzlich werden anhand der erweiterten Modellstruktur (AP 3) das theoretische Biogasbildungspotential und die Reaktionskonstanten für eine detaillierte Auswertung der Abbaukinetik bestimmt.

Vorherige Untersuchungen der Universität Rostock im Vorhaben „Entwicklung eines Prognosemodells zur Zusammenstellung optimierter Fütterungsrationen für Biogasanlagen“ (FKZ: 22412012, BMEL) haben gezeigt, dass eine Simulation der Biogaserzeugung aus mehreren Substraten durch Addition der substratspezifischen Reaktionsgleichungen unter Verwendung der im Labor ermittelten Modellparameter der Einzelsubstrate gut möglich ist. Eine wichtige Erkenntnis aus dem Vorhaben war, dass die Versuchsmethodik einen großen Einfluss auf die kinetischen Modellparameter hat. Deshalb soll vor dem Beginn der eigentlichen Versuchsreihen eine standardisierte Versuchsmethode für alle im Rahmen des Verbundvorhabens durchgeführten Messungen definiert werden. In der Methode sind typischen Einflussgrößen wie beispielsweise die Gärtemperatur, das Substrat-Inokulum-Verhältnis, die Versuchsdauer (Abbruchkriterium) oder die Rührintervalle definiert. Durch einheitliche Versuchsbedingungen soll eine durchgängige Vergleichbarkeit der experimentellen Daten innerhalb des Forschungsvorhabens gewährleistet werden.

Die ermittelten Reaktionskonstanten werden in den weiterführenden Arbeitspaketen (AP 3 und 5) bezüglich ihrer Eignung als Modellparameter für das Prognosetool bei einer flexiblen Biogaserzeugung im regulären Anlagenbetrieb evaluiert.

2.2 Arbeitspaket 2: Herausforderungen bei der Datenbereitstellung in der Praxis

Im AP 2 sollen die wesentlichen Herausforderungen bei der praxisnahen Bereitstellung der relevanten Prozessdaten für das modellbasierte Prognosetool identifiziert und bewertet werden. Ziel ist eine Optimierung der Datenbereitstellung bei hoher Vorhersagegenauigkeit und begrenztem Aufwand der (zusätzlichen) Datenerfassung im Praxisbetrieb an Biogasanlagen.

Zunächst findet zwischen den Projektpartnern eine detaillierte Abstimmung zu den Anforderungen des Simulationsmodells hinsichtlich der verfügbaren Labor- und Praxisdaten statt. Hier werden konkrete Eigenschaften zur Messgenauigkeit, zeitlichen Auflösung oder Formatierung formuliert. Im weiteren Projektverlauf werden die Anforderungen mit den verfügbaren Daten an Praxisanlage abgeglichen und Unterschiede in der Datenqualität und -quantität notiert. Auf Basis der möglichen Abweichungen werden Herausforderung und Lösungskonzepte (z. B. Nachrüstung von Messtechnik oder zusätzliche Dokumentation im Betriebstagebuch) erarbeitet.

Zusätzlich soll eine Betreiberbefragung zur Verfügbarkeit der erforderlichen Prozessdaten an ausgewählten Praxisanlagen erfolgen, um ein repräsentativeres Bild zur Automatisierungstechnik des vorhandenen Anlagenbestands erhalten. Die Befragungen wird vor Ort an den jeweiligen Biogasanlagen durchgeführt, um ein möglichst konkretes Bild von der Datenbereitstellung im regulären Anlagenbetrieb zu erhalten. Die Ergebnisse der Befragungen werden hinsichtlich der Anwendung vereinfachter Prozessmodelle ausgewertet. Dabei sollen mögliche Herausforderungen definiert und erste Lösungsansätze entwickelt werden.

Des Weiteren wird die Datenbereitstellung der in AP 1 durchgeführten Laborversuchen im Hinblick auf den Einsatz als Eingangsparameter für das Prognosetool bewertet. Dabei werden insbesondere die potenziellen Messunsicherheiten sowie die zeitliche Verfügbarkeit und der Aufwand bei der Durchführung von Batchversuchen dargestellt.

2.3 Arbeitspaket 3: Weiterentwicklung des praxisnahen Modellansatzes

Als Grundlage für das praxisnahe Prognosetool sollen im AP 3 geeignete Modellstrukturen zur Simulation der bedarfsgerechten Biogas- bzw. Methanproduktion weiterentwickelt werden. Entsprechend sind die am DBFZ entwickelten empirischen Modellstrukturen (unter Annahme einer Reaktion erster Ordnung) gezielt für den Einsatz im regulären Anlagenbetrieb zur Vorhersage der flexiblen Biogaserzeugung anzupassen bzw. zu erweitern.

Anhand der Anzahl an unterschiedlich schnell abbaubaren Fraktionen der fermentierbaren Substratbestandteile lassen sich dabei verschiedene Modellstrukturen definieren (siehe Abbildung 14). Weiterhin können auch unterschiedliche Verfahren zur Identifikation der unbekanntem Modellparameter verwendet werden. Für die Anwendung im regulären Praxisbetrieb ist jedoch nicht bekannt, wie sich die unbekanntem Modellparameter anhand der verfügbaren Verfahren beim flexiblen Substrateinsatz und veränderlicher Raumbelastung verlässlich bestimmen lassen. So lässt sich das Biogasbildungspotential oder die Abbaukinetik sowohl anhand typischer Batchversuche (AP 1) bestimmen oder durch einen direkten Vergleich mit historischen Prozessdaten der Praxisanlage (AP 5) ermitteln.

Abschließend werden die Simulationsergebnisse hinsichtlich ihrer Aussagekraft zur Prozessbeschreibung an großtechnischen Biogasanlagen evaluiert. Es werden Empfehlungen hinsichtlich der konkreten Modellstruktur und Parameterschätzung zur Bestimmung der substratspezifischen Parameter formuliert. Um die Biogasbildung der unterschiedlichen Fermenter im Detail beschreiben und bewerten zu können, ist eine Gasmengenerfassung nach jeder Vergärungsstufe der jeweiligen Praxisanlage erforderlich. Dabei sind somit auch der Aufwand der Datenbereitstellung und die Anwendbarkeit im regulären Anlagenbetrieb zu berücksichtigen.

2.4 Arbeitspaket 4: Schnittstellendefinition und Datenbereitstellung der Praxisanlagen

In diesem Arbeitspaket werden die Datenschnittstellen zwischen der Biogasanlage bzw. dem Biogaslabor und der Simulationsumgebung der implementierten Modellstruktur definiert. Es wird formuliert, welche Daten mit welcher Genauigkeit und Regelmäßigkeit (Abtastrate) als wichtige Eingangs- oder Prozessdaten an das Prognosetool übergeben werden müssen. Eine vollautomatische Datenübertragung war im Rahmen des Forschungsvorhabens dabei nicht geplant. Allerdings soll der Aufwand für den Anlagenbetreiber möglichst gering sein.

Zusätzlich wird die Datenbasis zur Modellvalidierung (AP 5) durch weitere Versuche aus vorherigen bzw. aktuellen Forschungsvorhaben am DBFZ ergänzt. Hier werden insbesondere Prozessdaten zur Vergleichbarkeit von Labor- und Praxisversuchen sowie Messdaten aus dem flexiblen Anlagenbetrieb zur bedarfsgerechten Biogasproduktion verwendet.

2.5 Arbeitspaket 5: Test des Prognosetools für eine flexible Biogaserzeugung

In diesem Arbeitspaket wird das weiterentwickelte Reaktionsmodell (AP 3) hinsichtlich der Prognosegenauigkeit zur flexiblen Biogas- oder Methanerzeugung im regulären Anlagenbetrieb evaluiert. In einem begrenzten Zeitraum erfolgt dafür an ausgewählten Praxisanlagen eine Anpassung der Substratzufuhr. Dabei erfolgt die Substratflexibilisierung sowohl durch eine Anpassung der täglichen Raumbelastung (Substratmengen) als auch eine Änderung der Substrattypen bzw. -mischung. Letzteres ermöglicht die Validierung des Modells hinsichtlich der Anwendung von Substraten mit unterschiedlicher Abbaukinetik. So sollen in mindestens einer der potentiellen Praxisanlagen schnell abbaubare Substrate wie z. B. Zuckerrüben eingesetzt werden.

Ziel des Tests ist eine Genauigkeit der Simulationsergebnisse von +/- 5% der prognostizierten Gasmen- gen im Vergleich zu den real erzeugten und messtechnisch erfassten Gasmen- gen über einen Zeitraum von 4 Stunden. Wird dieses Ziel nicht erreicht, werden in weiterführenden Untersuchungen in AP 2 und AP 3 Möglichkeiten herausgearbeitet, um die Modellgenauigkeit und Simulationsgüte zu erhöhen. Das bedeutet, dass nun konkrete Lösungsansätze zur Verbesserung der Datengrundlage (AP 2) identifiziert und soweit wie möglich umgesetzt werden. Auch eine Änderung der Modellstruktur (AP 3) für ein besseres Simulationsergebnis können in diesem Fall umgesetzt werden. Auf Basis dieser Anpassungen erfolgt ein erneuter Test des Prognosetools im flexiblen Anlagenbetrieb.

Auf Basis der Ergebnisse erfolgt eine abschließende Bewertung der Möglichkeiten und Grenzen bei der Anwendung empirischer Reaktionsmodelle zur Vorhersage der flexiblen Biogaserzeugung in großtechni- schen Biogasanlagen.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

Die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse im Verbundvorhaben werden anhand der Zielrich- tung der Arbeitspakete und Meilensteine dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine Zusammenfassung der we- sentlichen Projektergebnisse.

3.1 Arbeitspakete und Meilensteine

Die erzielten Projektergebnisse sind für die Arbeitspakete und Meilensteine auf Basis der geänderten Projektplanung im Rahmen der Mittelverschiebung vom 16. März 2022 in Tabelle 1 und Tabelle 2 zu- sammenfasst.

Tabelle 1: Zielerreichung der geplanten Arbeitspakete

| Arbeitspakete | Bearbeitungszeitraum | Zielerreichung |
|---|----------------------|--|
| AP1: Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor | 08/2020 bis 10/2022 | <ul style="list-style-type: none"> • Zum Projektbeginn wurden geeignete Methoden zur Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetik definiert. • An zwei großtechnischen Biogasanlagen konnten repräsentative Proben entnommen sowie experimentelle Batchversuche (und zusätzlicher Laboranalysen) durchgeführt werden. • Die Versuchsergebnisse wurde zusammengefasst, analysiert und anhand der implementierten Reaktionsmodelle (AP 3) evaluiert. ▶ Das Arbeitspaket 1 konnte wie ursprünglich geplant vollständig bearbeitet werden. |
| AP2: Herausforderungen bei der Datenbereitstellung in der Praxis | 08/2020 bis 12/2022 | <ul style="list-style-type: none"> • Zum Projektbeginn wurden die erforderliche Datenbasis zur Modellanwendung an großtechnischen Biogasanlagen definiert. • Für belastbare Aussagen zur installierten Messtechnik an typischen landwirtschaftlichen Biogasanlagen wurde eine Betreiberbefragung (n = 26) durchgeführt und ausgewertet. • Mögliche Messunsicherheiten wurden im Rahmen der Projektbearbeitung identifiziert und konkrete Lösungen zur Minimierung der jeweiligen Messfehler formuliert. ▶ Das Arbeitspaket 2 konnte wie ursprünglich geplant vollständig bearbeitet werden. |
| AP3: Weiterentwicklung des Modellansatzes | 08/2020 bis 01/2023 | <ul style="list-style-type: none"> • Die empirischen Reaktionsmodelle wurden hinsichtlich der direkten Anwendung in der großtechnischen Anlagenpraxis bei unterschiedlichen Substraten und wechselnden Prozessbedingungen weiterentwickelt. • Auf Basis der verschiedenen Labor- und Praxisversuche (AP 1 und AP 5) konnte die dynamische Biogas- bzw. Methanproduktion im flexiblen Anlagenbetrieb präzise simuliert werden. • Für die weitere Modellanwendung konnten geeignete Verfahren zur Messdatenaufbereitung und Parameterschätzung definiert werden. ▶ Das Arbeitspaket 3 konnte wie ursprünglich geplant vollständig bearbeitet werden. |
| AP4: Schnittstellendefinition | 09/2022 bis 12/2022 | <ul style="list-style-type: none"> • Durch wiederholte personelle Wechsel der Projektmitarbeiter konnte keine Schnittstellen für eine automatisierte Datenübertrag definiert werden. • Zur Methodvalidierung wurde zusätzlich auf bestehenden Datensätze des DBFZ zurückgegriffen (AP 5). • Es wurde erforderliche Betriebsparameter, Prozessdaten und Laboranalysen zur Modellanwendung definiert. ▶ Das Arbeitspaket 4 konnte mit Abweichungen zur ursprünglichen Projektplanung vollständig bearbeitet werden. |
| AP5: Test des Prognosetools für eine flexible Biogaserzeugung | 09/2022 bis 03/2023 | <ul style="list-style-type: none"> • Durch betriebsbedingte Einschränkungen aufgrund der Energiekrise und personelle Änderungen in der Projektbearbeitung konnte die Validierung der verwendeten Methoden an den ausgewählten Praxisanlagen nur eingeschränkt umgesetzt werden. • Um dennoch aussagekräftige Ergebnisse zur Anwendung der entwickelten Modellstrukturen zu erhalten, wurde die Datenbasis durch zusätzliche Versuche zur bedarfsgerechten Biogasproduktion aus vorherigen Forschungsvorhaben des DBFZ ergänzt. • Die detaillierte Auswertung der Modelleigenschaften und identifizierten Modellparameter erfolgte für unterschiedlichen Raumbelastungen, Substrattypen und -mischungen. • Auf Basis der Projektergebnisse konnten abschließend konkrete Potentiale und Grenzen bei der modellbasierten Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion an Praxisanlagen definiert werden. ▶ Das Arbeitspaket 5 konnte mit Abweichungen zur ursprünglichen Projektplanung vollständig bearbeitet werden. |

Tabelle 2: Zielerreichung der geplanten Meilensteine

| Meilensteine | Fälligkeit | Zielerreichung |
|-----------------------------|------------|--|
| M1: Abbaukinetiken | 05/2021 | <ul style="list-style-type: none"> Die charakteristische Abbau- bzw. Biogasbildungskinetik der eingesetzten Substrate wurden experimentell in zwei unterschiedlichen Versuchsreihen (Biogasanlagen) bestimmt. ► Der Meilenstein 1 wurde gemäß der Projektplanung erreicht. |
| M2: Modellerstellung | 05/2022 | <ul style="list-style-type: none"> Bestehende Reaktionsmodelle wurden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit im regulären Anlagenbetrieb weiterentwickelt Es wurden geeignete Methoden zur Identifikation unbekannter Modellparameter (Biogas- bzw. Methanpotential und Reaktionskonstanten) implementiert. ► Der Meilenstein 2 wurde gemäß der Projektplanung erreicht. |
| M3: Optimierung | 09/2022 | <ul style="list-style-type: none"> Eine Liste von Lösungsvorschlägen zur Minimierung der Unsicherheiten bei der Messdatenerfassung wurde erarbeitet. Quantitative Auswirkungen auf die Fehlerreduzierung konnten an den jeweiligen Praxisanlagen nicht ermittelt werden. Es liegt jedoch eine qualitative Bewertung der Lösungsvorschläge vor. ► Der Meilenstein 3 wurde gemäß der Projektplanung erreicht. |
| M4: Praxisanwendung | 03/2023 | <ul style="list-style-type: none"> Die entwickelte Modellstruktur wurde zur Simulation der dynamischen Biogas- bzw. Methanbildung an unterschiedlichen Labor- und Praxisanlagen erfolgreich getestet. Es wurden Anforderungen an die Messtechnik großtechnischer Biogasanlagen definiert. ► Der Meilenstein 4 wurde gemäß der Projektplanung erreicht. |

3.2 Zusammenfassung

Im Verbundvorhaben wurde bestehende Reaktionsmodelle erster Ordnung hinsichtlich ihrer Anwendung im großtechnischen Anlagenbetrieb weiterentwickelt und evaluiert. Für die praxisnahe Anwendung müssen lediglich die Masse und der Zeitpunkt der Beschickung, der Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS) der eingesetzten Substrate und die Biogas- bzw. Methanproduktionsrate aus dem Leitsystem bzw. Betriebstagebuch der großtechnischen Biogasanlage bekannt sein. Zur Modellanwendung wurden dabei standardisierte Dateiformate für die Übertragung der erforderlichen Anlagen- und Prozessdaten geschaffen. Die Projektergebnisse zeigen, dass anhand der entwickelten Modellstrukturen eine präzise und effiziente Abbildung der bedarfsgerechten Biogas- bzw. Methanproduktion im Labor- und Praxismaßstab möglich ist. Durch die semi-mechanistische Modellstruktur und die zugrundeliegenden Massenbilanzen (und biochemischen Gesetze) ist dabei jederzeit plausibles Funktionsverhalten garantiert. Zudem besitzen die identifizierten Modellparameter wichtige Informationen für eine aussagekräftige Prozess- und Substratcharakterisierung. So konnte anhand der detaillierten Analyse der Simulationsergebnisse und identifizierten Modellparameter gezeigt werden, dass die charakteristischen Abbaueigenschaften der unterschiedlichen Versuchsanlagen im Labor- und Praxismaßstab auch bei gleichen Substratqualitäten nicht direkt übertragbar sind. Durch erhebliche Messunsicherheiten bei der Gasmengenerfassung und Gasspeicherfüllstandsmessung ist somit eine direkte Anwendung der Prozessmodelle an Bestandsanlagen häufig jedoch nicht möglich. Entsprechend werden alternative Messverfahren oder Konzepte zur Messwertvalidierung an großtechnischen Biogasanlagen benötigt. In Kombination mit den entwickelten Modellstrukturen können auch lernbasierte Verfahren zur besseren Übertragbarkeit von Laborversuchen auf Praxisanlagen eingesetzt werden. Das Forschungsvorhaben ist damit ein wichtiger Baustein, um modellbasierten Methoden zur automatisierten Zustandsüberwachung und Prozessführung im regulären Betrieb von Biogasanlagen zu etablieren.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Die ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse erfolgt anhand der konkreten Arbeitsinhalte der einzelnen Arbeitspakete gemäß der ursprünglichen Projektplanung in Abbildung 3.

1.1 Arbeitspaket 1: Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor

Für die experimentelle Ermittlung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor der Universität Rostock wurde das *ANKOM Gas Production System* (ANKOM Technology) verwendet. Das Messsystem besteht aus einzelnen Gärfラスchen mit einem Nennvolumen von 500 ml und einem zusätzlichen Druckmesskopf (Abbildung 4, links). Der Sensor misst den Druckanstieg (bei konstantem Volumen) im Inneren der Gärfラスche und überträgt die Daten drahtlos per Bluetooth an den PC. Die Gärfラスen werden im Wasserbad bzw. in einer Wärmekammer auf konstante Vergärungstemperaturen bei 38 °C temperiert und einmal täglich mittels Magnetrührer durchmischt (Abbildung 4, rechts). Unter Berücksichtigung des Umgebungsdrucks lässt sich dann über den kumulativen Druckanstieg auf die gebildete Biogasmenge schließen. Die zeitliche Auflösung der resultierenden Messwerte beträgt 30 Minuten (wobei systemseitig kürzere Abtastzeiten möglich sind).



Abbildung 4: Versuchsaufbau für die Durchführung der diskontinuierlichen Vergärungsversuche (Batchtest)

Die Versuchsdurchführung erfolgt gemäß VDI Richtlinie 4630 [10]. Die Probeneinwaage ist abhängig von der organischen Trockensubstanz (oTS) der Substrate sowie vom eingesetzten Inokulum. Dabei wird grundsätzlich ein Substrat-Inokulum-Verhältnis unterhalb 0,5 (bezogen auf jeweilige Masse an oTS) eingehalten. Als Inokulum wurde aktiver Gärrest der großtechnischen Biogasanlagen verwendet. Um die Rührfähigkeit mittels Magnetrührer zu gewährleisten, wurde das Gärmedium zusätzlich mit 100 ml Reinwasser verdünnt. Jede Substratprobe sowie das Inokulum (Nullprobe) und mikrokristalline Zellulose (Standard) wurden in dreifacher Wiederholung untersucht. Der jeweilige Gasertrag wird unter Berücksichtigung der mitgeführten Nullversuche auf die Masse an oTS der eingesetzten Substrate bezogen, um somit die spezifische Biogasproduktion für jede Probe zu ermitteln.

Im Rahmen des Forschungsvorhaben wurden die eingesetzten Substrate von zwei großtechnischen Biogasanlagen in Schleswig-Holstein im Batchversuch an der Universität Rostock untersucht. Der resultierende Verlauf der Biogasproduktion über eine Versuchslaufzeit von 30 Tagen wurde dann zu Anwendung der entwickelten Reaktionsmodelle verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der charakteristischen Modellstrukturen (siehe Abbildung 14) sowie der verwendeten Verfahren zur Identifikation der unbekanntenen Modellparameter ist in der Ergebnisdiskussion im Arbeitspaket 3 (Kapitel 1.3) enthalten. Die technische Ausstattung der Versuchsanlagen wird im Arbeitspaket 4 (Kapitel 1.4) dargestellt.

Biogasanlage DKB

Die großtechnische Biogasanlage DKB in Weesby (in der Nähe von Flensburg und Niebüll) verfügt mit jeweils einem Hauptfermenter und Nachgärer eine relatives einfaches Anlagenkonzept. Der Hauptfermenter wird vorwiegend mit Maissilage, Schweinegülle und Ganzpflanzensilage beschickt. Zusätzlich werden saisonal weitere Substrate wie Zuckerrübenschntzel oder Getreideschrot eingesetzt.

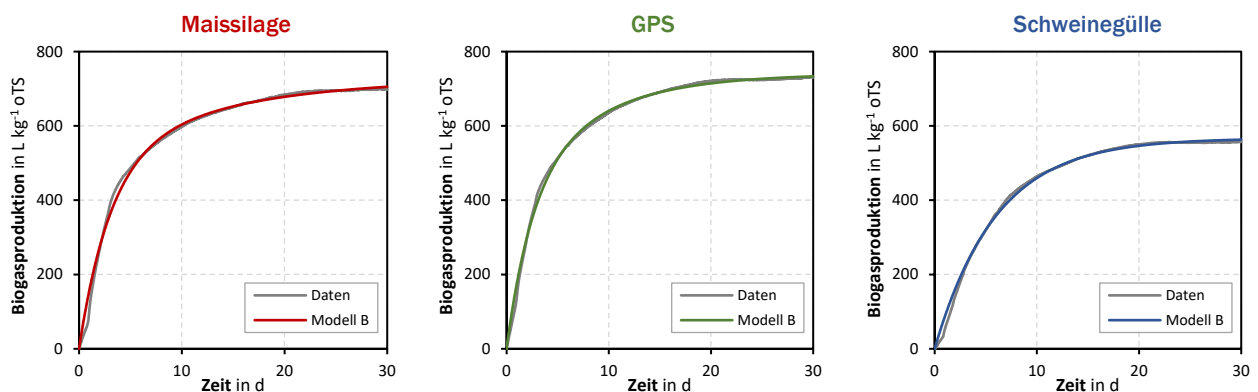


Abbildung 5: Modellbasierte Auswertung der Batchversuche von den eingesetzten Substraten an der Biogasanlage DKB

Die einzelnen Biogasverlaufskurven in Abbildung 5 sowie die Anpassungsgüte ($ME > 0,99$) in Tabelle 3 bestätigen eine hohe Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen der verwendeten Modelle (A und B) und den jeweiligen Messwerten der Batchversuche. Somit erlauben die identifizierten Modellparameter Rückschlüsse auf die charakteristischen Eigenschaften der untersuchten Substrate.

Tabelle 3: Identifizierte Parameter der verwendeten Reaktionsmodelle für die Substrate der Biogasanlage DKB^a

| Substrate | Modell A 1 Fraktion | | | | Modell B 2 Fraktionen | | | | | |
|---------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|
| | f_1 [-] | k_1 [d ⁻¹] | BGP [L kg ⁻¹] | ME [-] | f_1 [-] | f_2 [-] | k_1 [d ⁻¹] | k_2 [d ⁻¹] | BGP [L kg ⁻¹] | ME [-] |
| Maissilage | 0,85 | 0,23 | 687 | 0,99 | 0,28 | 0,62 | 0,08 | 0,33 | 728 | 0,99 |
| GPS | 0,89 | 0,24 | 719 | 0,99 | 0,41 | 0,50 | 0,13 | 0,40 | 741 | 1,00 |
| Schweinegülle | 0,70 | 0,17 | 567 | 1,00 | 0,35 | 0,35 | 0,17 ^b | 0,17 ^b | 567 | 1,00 |

a) Fraktionsanteil f_i , Reaktionskonstante erster Ordnung k_i , biochemisches Methanpotential (BMP) und Modelleffizienz (ME)

b) Durch identische Reaktionskonstanten ($k_1 = k_2 = 0,17 \text{ d}^{-1}$) ist das Funktionsverhalten der Modelle A und B identisch. Dies wird auch durch das gleiche Biogaspotential von $567 \text{ L kg}^{-1} \text{ oTS}$ bestätigt.

Auf Basis des Modells B sind Maissilage und Ganzpflanzensilage durch hohe Biogasbildungspotentiale von 728 und 741 L Biogas je kg oTS gekennzeichnet. Die entsprechenden Richtwerte für die Biogaserträge im kontinuierlichen Anlagenbetrieb des KTBL liegen mit 650 L Biogas je kg oTS für Maissilage und

620 L Biogas je kg oTS für Ganzpflanzensilage unterhalb der gemessenen Biogasbildungspotentiale [11]. Da das Biogasbildungspotential laut Definition den maximalen Biogasertrag eines Substrats darstellt, sind die im Batchversuch ermittelten Potentiale bzw. die KTBL-Richtwerte zu den Biogaserträgen grundsätzlich als plausibel einzuschätzen. Schweinegülle ist durch ein niedrigeres Biogasbildungspotential von 567 L Biogas je kg oTS charakterisiert. Der Biogasertrag für den großtechnischen Anlagenbetrieb ist laut KTBL mit 420 L Biogas je kg oTS definiert und somit ebenfalls entsprechend niedriger als das Biogasbildungspotential im Batchversuch.

Die ermittelten Reaktionskonstanten im Modell A und B befinden sich in einem für Batchversuche typischen Wertebereich zwischen 0,08 und 0,40 d⁻¹ [12]. Dabei lässt sich im Modell A auch die Abbaugeschwindigkeit anhand der einzelnen Reaktionskonstante für jedes Substrat direkt miteinander vergleichen. Maissilage und Ganzpflanzensilage sind dabei durch vergleichsweise schnellere Abbaukinetiken von 0,23 und 0,24 d⁻¹ gekennzeichnet, hingegen Schweinegülle mit 0,17 d⁻¹ eine geringfügig niedrigere Reaktionskonstante aufweist. Da Gülle im Allgemeinen einen höheren Anteil an schwer bzw. langsam abbaubaren Substratbestandteilen enthält ist dieser Unterschied grundsätzlich als plausibel einzuschätzen [13].

Biogasanlage Blokken

Die großtechnische Biogasanlage Blokken (auch in Weesby) verfügt ebenfalls lediglich über einen einzelnen Hauptfermenter und Nachgärer. Der Hauptfermenter wurden im Versuchszeitraum vorwiegend mit Maissilage, Rindergülle und Grassilage beschickt. Zusätzlich werden saisonal auch hier weitere Substrate wie Ganzpflanzensilage, Zuckerrübenschnitzel oder Getreideschrot eingesetzt.

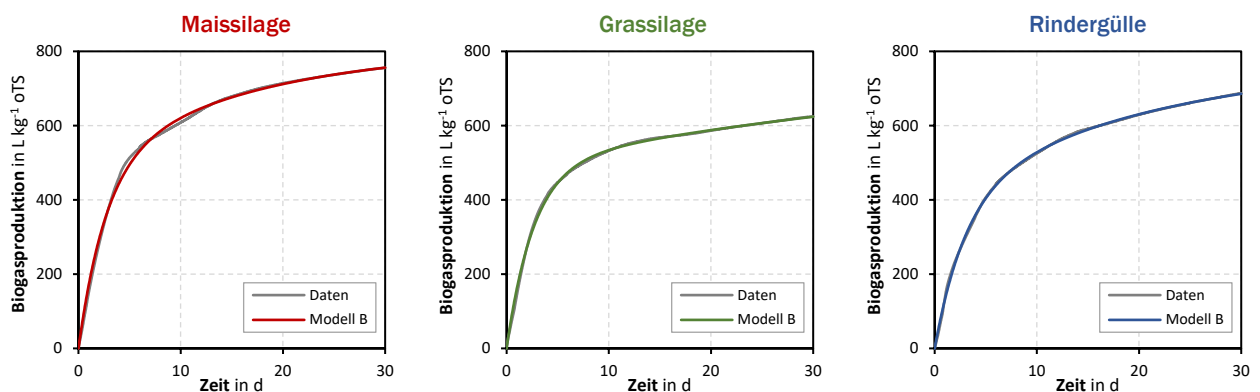


Abbildung 6: Modellbasierte Auswertung der Batchversuche von den eingesetzten Substraten an der Biogasanlage Blokken

Auch hier bestätigen die einzelnen Biogasverlaufskurven in Abbildung 6 sowie die Anpassungsgüte (ME > 0.98 für Modell A bzw. ME = 1.00 für Modell B) in Tabelle 4 eine hohe Übereinstimmung zwischen den Simulationsergebnissen der verwendeten Modelle und den jeweiligen Messwerten der Batchversuche. Dabei weist der Verlauf der kumulativen Biogasproduktion auch zum Versuchsende weiterhin einen geringfügigen, aber konstanten Anstieg auf. Entsprechend wird auch das Abbruchkriterium der VDI Richtlinie 4630 (tägliche Biogasproduktionsrate kleiner 0,5 % der Gesamtgasproduktion an drei aufeinanderfolgenden Tagen) bei der diskontinuierlichen Vergärung von Rindergülle nicht innerhalb des festgelegten Versuchszeitraums erreicht.

Tabelle 4: Identifizierte Parameter der verwendeten Reaktionsmodelle für die Substrate der Biogasanlage Blokken^a

| Substrate | Modell A 1 Fraktion | | | | Modell B 2 Fraktionen | | | | | |
|-------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|
| | f_1 [-] | k_1 [d ⁻¹] | BGP [L kg ⁻¹] | ME [-] | f_1 [-] | f_2 [-] | k_1 [d ⁻¹] | k_2 [d ⁻¹] | BGP [L kg ⁻¹] | ME [-] |
| Maissilage | 0,89 | 0,22 | 724 | 0,98 | 0,40 | 0,60 | 0,06 | 0,38 | 809 ^b | 1,00 |
| Grassilage | 0,73 | 0,27 | 592 | 0,98 | 0,39 | 0,61 | 0,02 | 0,38 | 809 ^b | 1,00 |
| Rindergülle | 0,81 | 0,18 | 656 | 0,98 | 0,46 | 0,49 | 0,05 | 0,34 | 773 | 1,00 |

a) Fraktionsanteil f_i , Reaktionskonstante erster Ordnung k_i , biochemisches Methanpotential (BMP) und Modelleffizienz (ME)

a) Obere Parametergrenze auf Basis des stöchiometrischen Biogaspotentials von 809 L kg⁻¹ FoTS nach Weißbach [14].

In Abhängigkeit von der verwendeten Modellstruktur (A oder B) sind die einzelnen Substrate mitunter durch stark abweichende Biogasbildungspotentiale gekennzeichnet. So liegen die ermittelten Potentiale im Modell A zum Teil weit unterhalb der ermittelten Kenngrößen im Modell B. Im Vergleich zum Modell B (ME = 1,00) ist die Modellgüte im Modell A jedoch durch das begrenzte Funktionsverhalten auch durch eine geringere Genauigkeit (ME = 0,98) gekennzeichnet. Trotz der realitätsnahen Simulationsergebnisse sind jedoch auch die Modellparameter im Modell B ebenfalls kritisch zu hinterfragen. So wird bei Mais- und Grassilage das maximale stöchiometrische Biogaspotential von 809 L kg⁻¹ FoTS nach Weißbach erreicht [15]. In diesem Fall wird angenommen, dass die gesamte oTS ausschließlich aus anaerob abbaubaren Bestandteilen besteht. Dies lässt sich durch detaillierte Untersuchungen zu den fermentierbaren Substratbestandteilen von nachwachsenden Rohstoffe nicht bestätigen [14]. So zählen insbesondere die Strukturkohlenhydraten (z. B. Lignocellulose bzw. Lignin) zu den schwer bzw. nicht anaerob abbaubaren Pflanzenbestandteilen.

Um den verbleibenden Anstieg der Gasproduktion zum Versuchsende abzubilden wird in allen Versuchen im Modell B eine vergleichsweise langsame Reaktionskinetik zwischen 0,02 und 0,6 d⁻¹ für eine Substratfraktion identifiziert. Da das etablierte Abbruchkriterium zumindest bei den beiden Silagen innerhalb der 30 Versuchstage erreicht wird, stellt sich die Frage, inwieweit überhaupt zwischen nicht und sehr langsam abbaubaren Substratbestandteilen zu unterscheiden ist. In jeden Fall liegen die KTBL-Biogaserträge mit 650, 600 und 380 L kg⁻¹ oTS für Maissilage, Grassilage und Rindergülle weit unter den im Batchversuch ermittelten Potentialen [11]. Zudem ist auffällig, dass auf Basis des experimentellen Endwerts nach 30 Versuchstagen bei Rindergülle sogar mit einem höheren spezifischen Gaspotentials als bei Grassilage zu rechnen ist. Dies lässt sich anhand der üblichen Erfahrungswerte oder der KTBL-Biogaserträge nicht bestätigen.

Die kinetischen Modellparameter im Modell A weisen einen langsameren Abbau der Rindergülle im Vergleich zur Mais- und Grassilage nach. Die einzelnen Reaktionskonstanten befinden sich auch hier zwischen 0,18 und 0,27 d⁻¹ im typischen Wertebereich von Batchversuchen [12]. Um den spezifischen Verlauf der Gasproduktion abzubilden sind die kinetischen Modellparameter im Modell B durch eine schnelle und langsame Reaktionskonstante zwischen 0,02 und 0,6 d⁻¹ sowie zwischen 0,34 und 0,38 d⁻¹ gekennzeichnet.

Die konkrete Anlagenstruktur sowie die resultierenden Simulationsergebnisse und Messdaten im kontinuierlichen Anlagenbetrieb werden im Rahmen der Ergebnisdarstellung zur Modellanwendung in Kapitel 1.4 und 1.5 diskutiert.

1.2 Arbeitspaket 2: Herausforderungen bei der Datenbereitstellung in der Praxis

Zur Identifikation wesentlicher Herausforderungen bei der Datenbereitstellung wurde Arbeitspaket 2 eine Betreiberbefragung durchgeführt. Neben der Erfassung des bestehenden Substratinputs sowie der Identifikation der wichtigsten Anlagenparameter, wurden zudem der aktuelle Stand der Technik zur Messwertfassung der Gas- und Energiemengen sowie der Gasspeicher- und Fermenterfüllstände abgefragt. Ziel war es, ein möglichst repräsentatives Bild von der Praxis hinsichtlich der Verfügbarkeit der für das modellbasierte Prognosetool benötigten Daten zu erhalten.

Erfassung der Anlagenparameter

Für die Befragung wurden insgesamt 26 Anlagen (Inbetriebnahme zwischen 2001 und 2013) mit einem beheizten Gärvolumen von 120 bis 8.400 m³ sowie einem gasdichten Gesamtvolumen von 1.300 bis 17.600 m³ aus dem Anlagenbestand des Instituts für Biogas Kreislaufwirtschaft und Energie (IBKE) ausgewählt. Die Befragung wurde gemeinsam mit den Anlagenbetreibern direkt vor Ort durchgeführt, sodass insgesamt 26 Rückmeldungen (bei einer Beteiligung von 100 %) vorliegen. In Tabelle 5 wird die Anzahl der befragten Biogasanlagen – kategorisiert nach der installierten elektrischen Leistung – dargestellt.

Tabelle 5: Anzahl und Anteil der Rückmeldungen der befragten Biogasanlagen hinsichtlich der installierten Leistung^a

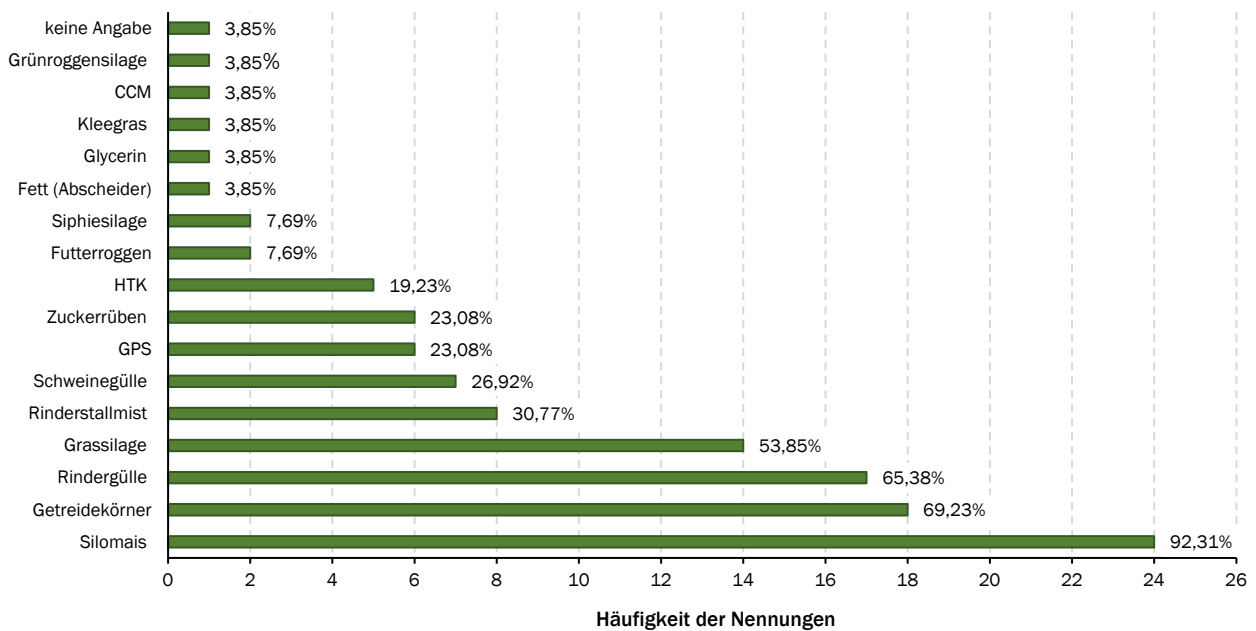
| Installierte elektrische Leistung [kW] | Anzahl [-] | Anteil [%] |
|--|------------|------------|
| 0 – 250 | 5 | 19,2 |
| 250 – 750 | 12 | 46,2 |
| 750 – 1.250 | 4 | 15,4 |
| 1.250 – 1.750 | 2 | 7,7 |
| > 1.750 | 1 | 3,8 |
| Keine Angabe | 2 | 7,7 |

a) Mehrfachnennung möglich. Datenbasis: Betreiberbefragung FlexiMod (n = 26).

Anhand der Tabelle wird deutlich, dass überwiegend Anlagen im Leistungsbereich zwischen 250 und 750 kW befragt wurden. Hierbei gaben ca. 61 % der Anlagenbetreiber an, über mindestens einen Hauptfermenter zu verfügen, wohingegen acht und somit rund 31 % die doppelte Anzahl rückmeldeten. Zudem gaben 46 % der Anlagenbetreiber an einen einzelnen Nachgärer zu betreiben. Gleichwohl lag der prozentuale Anteil jener Betreiber die keine Nachgärer benannten bei 31 %. Lediglich 4 % gaben an insgesamt zwei Nachgärer zu besitzen (wohingegen 19 % ausschließlich auf die Nutzung von Gärproduktlagern verwiesen).

Ein ähnliches Bild ergab sich für die Angaben bezüglich der Gärproduktlager. So gaben 35 % der Befragten zur Kenntnis über ein Gärproduktlager zu verfügen, wohingegen 27 % auf eine Nachbehandlung in Nachgärern verwiesen. Mit 31 % war der Anteil jener Anlagenbetreiber die keine Gärproduktlager benannten, gleichermaßen stark ausgeprägt.

Neben den technischen Anlagenparametern wurden die Anlagenbetreiber auch hinsichtlich des Substratinputs befragt. Die Verteilung der eingesetzten Substrate ist Abbildung 7 dargestellt.



Mehrfachnennung möglich. Datenbasis: FlexiMod Betreiberbefragung (n = 26).

Abbildung 7: Anzahl und Anteil der Rückmeldungen der befragten Biogasanlagen hinsichtlich des Substratinputs

Hinsichtlich der Substratarten ist eine klare Tendenz in Richtung nachwachsender Rohstoffe und Wirtschaftsdüngern zu erkennen. So gaben rund 54 bzw. 92 % der Anlagenbetreiber an, vorrangig Energiepflanzen, wie beispielsweise Getreide bzw. Getreidekörner sowie Gras- und Maissilagen zu verwenden. Daneben zählen tierische Exkrememente wie Rindermist, Schweine- und Rindergülle mit 27 bis 65 % zu den primären Eingangsstoffen. Weiterhin finden andere Silagen oder Kulturpflanzen (z. B. Ganzpflanzensilage oder Zuckerrüben) einen regelmäßigen Einsatz. Dieser Trend entspricht weitestgehend dem bundesweiten Substratinput. So gaben in einer in 2020 veröffentlichten Betreiberbefragung 406 aller Anlagenbetreiber an, zu 49 % bzw. 46 % Wirtschaftsdüngern bzw. nachwachsenden Rohstoffen in landwirtschaftlichen Biogasanlagen einzusetzen.

Erfassung der Substrateigenschaften

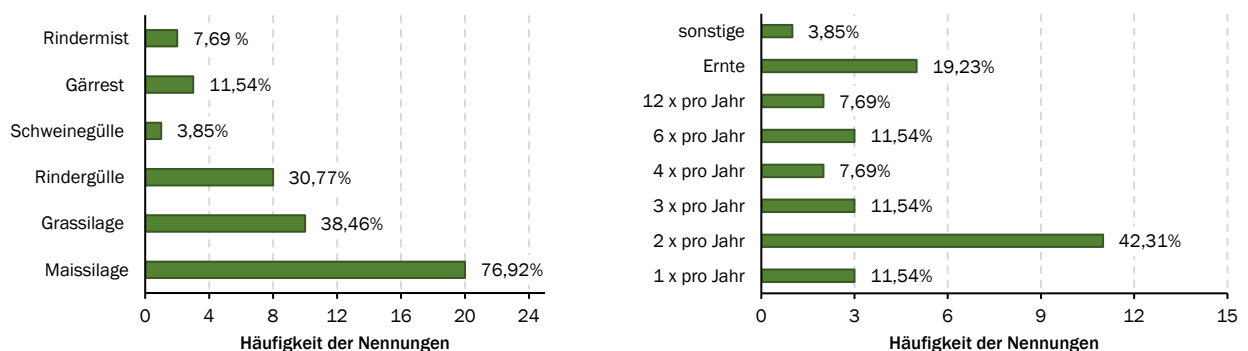
Im Rahmen der Betreiberbefragung wurde erhoben, ob und mit welcher Häufigkeit Substratanalysen, wie der Gehalt an Trockensubstanz (TS) bzw. oTS sowie Daten bezüglich der Substratzusammensetzung auf Basis der Futtermittelanalyse (FMA), erfasst werden. Weiterhin wurde erfragt, ob die Substrate zur externen Analyse an Labore vergeben werden.

Für die Auswertung der TS-Bestimmung lagen insgesamt 26 Antworten vor. Demnach gaben 69 % der Anlagenbetreiber an, die Analyse generell in einem Labor durchführen zu lassen, wohingegen der Anteil jener Analysen, welche unmittelbar vor Ort erfolgen, mit 4 % zu vernachlässigen ist. Rund 27 % machten jedoch keine Angaben zur konkreten Örtlichkeit der TS-Bestimmung.

Wie in Abbildung 8 gezeigt, zählen Gras- vor allem aber Maissilagen zu den an den häufigsten untersuchten Substraten, wobei die TS-Analyse in der Regel zweimal pro Jahr oder zum Zeitpunkt der Ernte erfolgt. Bezogen auf die eingesetzten Mengen an tierischen Exkrementen, liegt der Anteil an Rindergülle mit ca. 31 % deutlich über dem Anteil an Schweinegülle oder Rindermist. Rund 12 % der Anlagenbetreiber gaben an, Rindergülle zwei oder dreimal im Jahr hinsichtlich des Trockensubstanzgehalts zu analysieren.

Hinsichtlich der eingesetzten Substrate (Abbildung 7) war eine derartige Verteilung zu erwarten. Interessanterweise scheint die TS-Analyse von Getreidekörnern, trotz der verhältnismäßig hohen Rückmeldung (69 %), zu entfallen. So machte keiner der insgesamt 26 Anlagenbetreiber Angaben, ob und wie häufig die Analyse für diese Substrat erfolgt. Es ist daher zu vermuten, dass sich Betreiber aufgrund der hohen Lagerstabilität von Getreidekörnern vorrangig auf Richt- bzw. Literaturwerte beziehen.

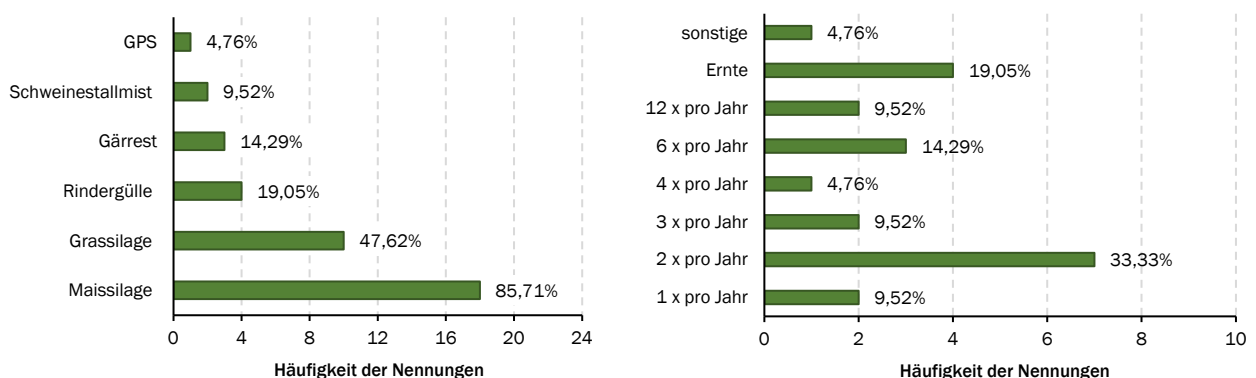
Bezüglich der oTS-Bestimmung gaben 21 Anlagenbetreiber an, die Substrate in regelmäßigen Abständen zu analysieren. Fünf Betreiber machten diesbezüglich hingegen keine Angaben. Es ist somit davon auszugehen, dass die oTS in diesen Fällen zur Substratcharakterisierung nicht herangezogen wird. Dabei gab die Mehrzahl (76 %) der 21 Anlagenbetreiber an, die Analyse generell in einem Labor durchführen zu lassen, wohingegen der Anteil der Vorortanalysen mit ca. 5 % zu vernachlässigen sind. Rund 19 % machten diesbezüglich keine Angaben.



Mehrfachnennung möglich. Datenbasis: FlexiMod Betreiberbefragung (n = 26).

Abbildung 8: Anzahl und Anteil der Rückmeldungen zur Substratart und Häufigkeit der TS-Bestimmung

Die Art der Substrate sowie die Häufigkeit der TS-Analytik spiegelt sich bei der Bestimmung der oTS wider. Im Mittel benennen Anlagenbetreiber drei Substratarten (Mais-, Grassilage, Rindergülle) die hinsichtlich des Parameters untersucht werden. In diesem Kontext wird zu 33 % eine zweimalige Analyse oder der Zeitpunkt der Erntezeitpunkt favorisiert (Abbildung 9). Eine detaillierte Analyse der fermentierbaren organischen Trockensubstanz (FoTS) wurde hingegen von keinen Anlagenbetreiber genannt.



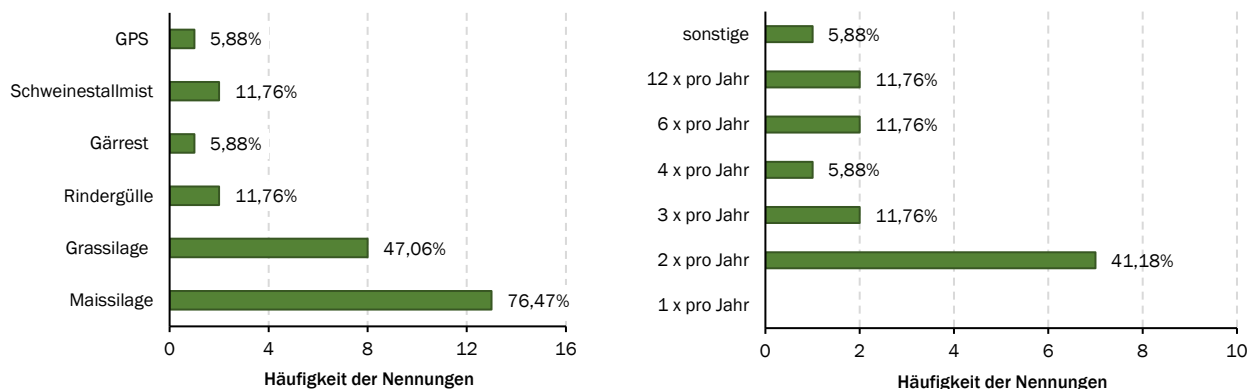
Mehrfachnennung möglich. Datenbasis: FlexiMod Betreiberbefragung (n = 21).

Abbildung 9: Anzahl und Anteil der Rückmeldungen zur Substratart und Häufigkeit der oTS-Bestimmung

Im Rahmen der Datenerhebung zur Futtermittelanalyse (FMA) gaben 17 Anlagenbetreiber an, die Substrate in regelmäßigen Abständen hinsichtlich der konkreten Nährstoffzusammensetzung zu untersuchen. Dabei wurde nicht zwischen Weender und der erweiterten Analyse nach van Soest unterschieden. Dem gegenüber standen 9 Befragungsteilnehmer, die diesbezüglich keine Angaben machten.

In Analogie zur TS-Bestimmung und oTS-Bestimmung wird die FMA mit rund 71 % überwiegend in Laboren durchgeführt. Der verbleibende (hohe) Anteil von 29 % ist durch die Kategorie „keine Angaben“ und den geringen Stichprobenumfang von 17 Biogasanlagen gekennzeichnet. Die Durchführung einer FMA unmittelbar vor Ort wurde von keinem der Anlagenbetreiber benannt. Letzteres ist durch den hohen apparativen, personellen und zeitlichen Mehraufwand sowie die hohen Investitionskosten begründet.

Im Wesentlichen beschränkt sich die FMA auf Mais- und Grassilage (Abbildung 10). Tierische Exkremente, wie beispielsweise Rindergülle, scheinen mit 12 % hingegen eine untergeordnete Rolle zu spielen. Bei rund 42 % der Anlagenbetreiber beschränkt sich die Häufigkeit der FMA auf einen halbjährlichen Turnus.



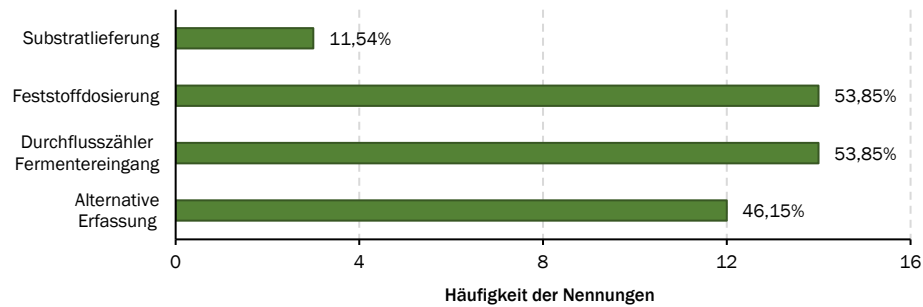
Mehrfachnennung möglich. Datenbasis: FlexiMod Betreiberbefragung (n = 17).

Abbildung 10: Anzahl und Anteil der Rückmeldungen zur Substratart und Häufigkeit der FMA

Erfassung der Substratmengen

Neben den Anlagen- und Substratparameter wurde im Rahmen der Betreiberbefragung die Häufigkeit der Substratzugabe in die Fermenter sowie die Vorgehensweise bei der Erfassung und Dokumentation der Substratmengen erfragt. Hierbei gaben 42 % der Anlagenbetreiber an, die Fermenter kontinuierlich (öfter als 10-mal am Tag) mit Substrat zu beschicken. Rund 31 % meldeten, dass die Substratzugabe zwei- bis zehnmal am Tag erfolgt, wohingegen 27 % aller Befragten diesbezüglich keine Angaben machten.

Die Erfassung der Substratmengen erfolgt substratspezifisch an verschiedenen Stellen der Biogasanlage (Abbildung 11). So gaben 12 % der Anlagenbetreiber an, die Gesamtmasse der Eingangsstoffe lediglich bei der Anlieferung mittels einer Waage zu dokumentieren. Die Dosierung und Erfassung fester Substrate, wie beispielsweise Getreidekörner oder Mais- und Grassilage, erfolgt größtenteils (54 %) über einen Feststoffbeschicker, welcher mit einer entsprechenden Wiegeeinrichtung ausgestattet ist. Gleichermäßen hoch ist der apparative Anteil an Durchflusszählern (54 %) über die die Mengen flüssiger Substrate (wie Gülle und/oder Rezirkulat) am Fermentereingang erfasst werden.



Mehrfachnennung möglich. Datenbasis: FlexiMod Betreiberbefragung (n = 17).

Abbildung 11: Anzahl und Anteil der Rückmeldungen zur Erfassung der Substratmengen

Einen nicht unerheblichen Anteil stellen alternative Erfassungsmöglichkeiten dar (Abbildung 11). So geben rund 46 % der Anlagenbetreiber an, die Masse fester oder flüssiger Substrate zusätzlich oder fast ausschließlich über die Wiegung der Radladerschaufeln, die Rückrechnung auf den Tierbestand, die Anzahl der Gülletankwagen oder die Pumpenleistung zu erfassen. Dabei werden sämtliche Substrate zu rund 69 % im elektronischen Betriebstagebuch dokumentiert. Lediglich 15 % der Anlagenbetreiber gaben an, die Eingangsstoffe zumindest nicht auf elektronischen Weg zu erfassen. Als Alternative wurde hier mitunter die schriftliche Dokumentation mittels Papiertabellen genannt. Weitere 15 % machten diesbezüglich keine weiteren Angaben. Eine Kalibrierung der Messeinrichtungen in monatlichen oder jährlichen Intervallen scheint tendenziell nicht zu erfolgen. Über Unstimmigkeiten bei der Aufzeichnung der Fütterungsmengen wird ebenso nicht berichtet. Bezüglich der zeitlichen Auflösung gaben rund 54 % aller Befragten an, dass die Substratmengen hierbei als exportierbare Tageswerte vorliegen. Weitere 42 % (11 Anlagenbetreiber) ließen die Fragestellung hingegen unbeantwortet.

Erfassung der Gasspeicher- und Fermenterfüllstände

Bei der Ermittlung von Gasspeicherfüllständen kommen verschiedene Messverfahren zum Einsatz. In der Befragung von insgesamt 26 Anlagenbetreibern werden dabei üblicherweise das Seilzugverfahren (69 %), die hydrostatische Druckmessung (4 %) sowie die Gasspeicherinnendruckmessung (4 %) eingesetzt. Sofern angegeben, erfolgt die Erfassung der Gasspeicherfüllstände beim Seilzugverfahren weitestgehend stufenlos. Lediglich vier Anlagenbetreiber beschrieben eine vierstufige Messwerterfassung, wohingegen die gleiche Anzahl an Befragten keine Angaben hinsichtlich der Abstufungen bzw. Auflösung machten.

Weiterhin beschrieben rund 27 % der Anlagenbetreiber alternative Messsysteme wie die Ermittlung der Durchflussmenge im Fermenter oder den Einsatz von Druckmesssonden, welche vermutlich der Gasspeicherinnendruckmessung zuzuordnen sind. Eine genaue Aussage zur elektronischen Speicherung der Gasspeicherfüllstände konnte aufgrund des verhältnismäßig hohen Anteils fehlender Angaben (58 %) nicht eindeutig spezifiziert werden. Lediglich 31 % der befragten Anlagenbetreiber gaben an die Füllstände als Zahlenwerte zu dokumentieren. Weitere 12 % nannten hingegen die Speicherung eines mittleren Tageswerts.

Erfassung der Gas- und Energiemengen

Vor dem Hintergrund der Gas- und Energiemengenerfassung wurden die Betreiber zunächst zur späteren Verwertung des Biogases befragt. In diesem Zusammenhang gaben alle 26 Anlagenbetreiber an, Biogas vorrangig zur Wärme- und Energieerzeugung mittels Blockheizkraftwerk (BHKW) zu nutzen. Jeweils 15 %

benannten die zusätzliche Verwertung bzw. Vernichtung mittels Heizkessel oder Gasfackel. Die Aufbereitung auf Erdgasqualität wird hingegen nur in rund 8 Prozent der Fälle genannt.

Eine Erfassung der Rohgasmengen wird dabei in wenigstens 46 % der Fälle realisiert, wobei diese überwiegend nach dem Aktivkohlefilter oder vor dem BHKW erfolgt. Mindestens 11 % der Anlagenbetreiber gaben an die Rohgasmengen nicht zu messen, wohingegen rund 42 % sich zu der Fragestellung nicht äußerten.

Demgegenüber stehen die produzierten Energiemengen, deren Messmethoden und Anwendungshäufigkeiten in Abbildung 12 dargestellt sind. Hierbei gaben rund 27 % aller Anlagenbetreiber an die Energiemengen wenigstens über die monatliche Abrechnung seitens des Netzbetreibers, oftmals aber in Kombination mit einem Einspeisezähler (23 %) zu erfassen. Daneben wird die Erfassung der Energiemengen durch die Zählerstände am BHKW (19 %) oder Transformator (23 %) bevorzugt.

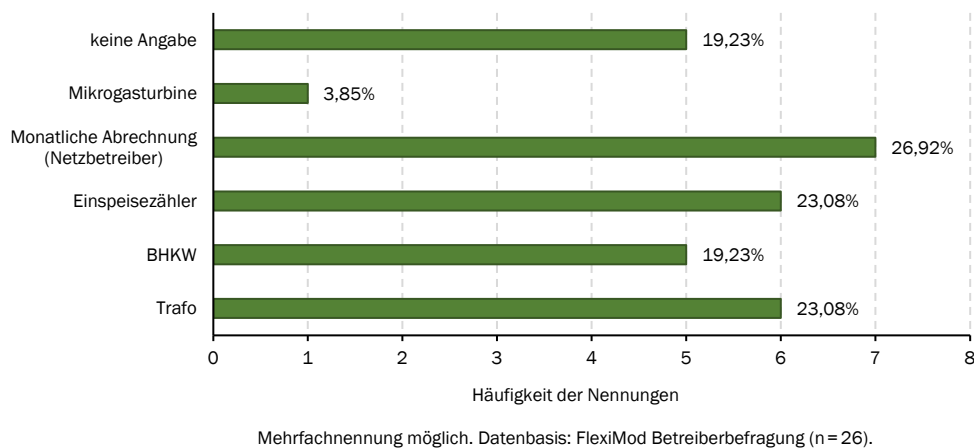


Abbildung 12: Anzahl und Anteil der Rückmeldungen zur Erfassung der Energiemengen

Den Messmethoden entsprechend werden die Daten in 27 % der Fälle über die monatliche Abrechnung des Netzbetreibers dokumentiert. Weiterhin gaben rund 19 % der Anlagenbetreiber an, zur Dokumentation herstellereigene Softwarepakete zu nutzen (Auswertung nicht dargestellt). Angesichts des hohen Anteils fehlender Angaben (54 %) bezüglich der Datenspeicherung bzw. -verfügbarkeit, sind die bereitgestellten Informationen jedoch kritisch zu hinterfragen. Hinsichtlich der konkreten Datenauflösung (z. B. stündlich oder täglich) lieferte keiner der Anlagenbetreiber eine Aussage.

Lösungsvorschläge zur Fehlerminimierung

Auf Basis der Betreiberumfrage und der weiterführenden Erfahrungen im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten konkrete Herausforderungen und Lösungsvorschläge bei der Anwendung von Prozessmodellen im regulären Praxisbetrieb von großtechnischen Biogasanlagen ermittelt werden. Für die dynamische Simulation der bedarfsgerechten Biogasproduktion anhand vereinfachter Reaktionsmodelle sind dabei lediglich drei Kenngrößen erforderlich:

1. Substratmasse und Zeitpunkt der Beschickung
2. Gehalt an organischer Trockensubstanz der eingesetzten Substrate
3. Biogas- oder Methanproduktion im großtechnischen Anlagenbetrieb

Dabei ist insbesondere die Messung der Gasproduktion an Praxisanlagen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Im Folgenden werden mögliche Lösungsvorschläge zur Fehlerminimierung bei der Erfassung der erforderlichen Messdaten zur praxisnahen Modellanwendung gesammelt und diskutiert.

Substratmasse

Eine kontinuierliche, automatisierte und digitale Erfassung der eingesetzten Substratmengen ist bis heute nicht Stand der Technik an Bestandsanlagen. Zudem können fehlerhafte Messsysteme oder Abschätzungen (z. B. anhand der Radladerschaufeln oder dem Viehbestand) zu größeren Ungenauigkeiten führen. Eine regelmäßige Kalibrierung oder Wartung der Sensorik bei der kontinuierlichen Erfassung der Substrateinsatzmengen scheint in der Regel nicht zu erfolgen. Für die modellbasierte Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion besitzt die Masse (und der Zeitpunkt) der eingesetzten Substrate einen erheblichen Einfluss auf das Simulationsergebnis. Entsprechend sollte eine gewissenhafte bzw. automatisierte Erfassung der Substratmengen erfolgen. Zur Identifikation von Fehlern lassen sich einfach Massenbilanzen auf Basis der KTBL-Biogaserträge durchführen, um zumindest grobe Messfehler oder Ungenauigkeiten zu identifizieren.

Zeitpunkt der Substratzufuhr

In der Regel werden lediglich tägliche Gesamtmassen der eingesetzten Substrate in den Betriebsbüchern hinterlegt. Zur Simulation des Tagesverlaufs der bedarfsgerechten Biogasproduktion ist dabei eine zusätzliche Angabe der konkreten Uhrzeit der Substratzufuhr erforderlich (siehe z. B. Abbildung 18). Bei einer präzisen Gasmengenerfassung erlaubt mitunter auch der Biogas- bzw. Methanvolumenstrom Rückschlüsse auf den jeweiligen Zeitpunkt der Substratzufuhr. So wurde auch im vorliegenden Forschungsvorhaben der Zeitpunkt der Substratzufuhr korrigiert, wenn der charakteristische Anstieg der Gasproduktion nach der Substratzugabe nicht mit dem jeweiligen Fütterungszeitpunkt übereinstimmte. Entsprechende Verfahren werden dabei auch bei der Messdatenaufbereitung zur Prozesssimulation mithilfe künstlicher neuronaler Netze eingesetzt, um das charakteristische Funktionsverhalten (Zusammenhang zwischen Fütterung und Gasproduktion) bei der Biogasproduktion zu erlernen [9]. Bei den einstufigen Reaktionsmodellen ist dies insbesondere wichtig, da durch das zugrundeliegende Funktionsverhalten bei jeder Fütterung mit der dazugehörigen maximalen Biogasproduktionsrate zu rechnen ist (siehe z. B. Abbildung 21). Für einen verzögerten Abbau sind dabei erweiterte Modellanpassungen (z. B. auf Basis einer Folgereaktion) oder zusätzliche Anpassungen auf Basis lernbasierter Verfahren erforderlich.

Biogas- oder Methanproduktion

In der Praxis erfolgt die Gasmengenerfassung in der Regel nach dem Aktivkohlefilter oder vor dem BHKW. Üblicherweise wird aber über die eingespeisten Energiemengen auf den erforderlichen Biogas- bzw. Methanvolumenstrom zurückgerechnet. Bei konstantem BHKW-Betrieb dient der Gasspeicherfüllstand damit als einzige Möglichkeit den dynamischen Verlauf der Biogasproduktion an großtechnischen Anlagen zu erfassen. In Abhängigkeit von der technischen Bauart des Gasspeichers und den verwendeten Messsystemen ist dabei ebenfalls mit starken Unsicherheiten bei der Füllstandsmessung zu rechnen [16]. Zum einen ist die Auflösung der Gasspeicherfüllstände häufig stark begrenzt (z. B. nur 3 Bereiche von leer, mittelvoll bis voll), zum anderen lässt sich auf Basis des jeweiligen Messwerts (z. B. im Seilzugverfahren) nur in einem eingeschränkten Wertebereich auf den realen Gasspeicherfüllstand schließen. Am DBFZ wurden für diesen Fall Gasspeicherversuche entwickelt, welche es ermöglichen, den konkreten Messwert mit dem tatsächlich genutzten

Gasspeichervolumen zu korrelieren. Da dieses Messverfahren jedoch einen Eingriff in den regulären Anlagenbetrieb darstellt, werden weiterhin alternative und präzise Messverfahren zur Gasspeicherfüllstandsmessung in der großtechnischen Anlagenpraxis benötigt.

Übertragbarkeit von Laborversuchen auf Praxisanlagen

Falls eine präzise Messung der Gasproduktionsraten (insbesondere bei komplexen Anlagenstrukturen mit einer Vielzahl an unterschiedlichen Fermentern) nicht möglich ist, muss anhand von Labormessungen auf das Abbauverhalten in großtechnischen Anlagenbetrieb geschlossen werden. Da jedoch eine direkte Übertragung der unterschiedlichen Kenngrößen aus Batchversuche bzw. kontinuierlichen Laborversuchen bis heute nicht eindeutig nachgewiesen wurde, müssen alternative Konzepte für eine aussagekräftige Verwendung von Labormessungen zur Beschreibung des großtechnischen Anlagenverhaltens entwickelt werden. In diesem Zusammenhang können beispielsweise lernbasierte Verfahren auf Basis maschinellem Lernen hinsichtlich der Abweichungen zwischen Labor- und Praxismessungen trainiert werden. Dafür sind weitere Untersuchungen im direkten Parallelbetrieb von Labor- und Praxisanlagen erforderlich.

1.3 Arbeitspaket 3: Weiterentwicklung des Modellansatzes

Für eine möglichst realitätsnahe Simulation der bedarfsgerechten Biogasproduktion im Praxismaßstab sind weitere Anpassungen in den bestehenden Reaktionsmodellen am DBFZ erforderlich. Zur grundlegenden Prozessbeschreibung vereinfachter Reaktionsmodelle der anaeroben Vergärung sind die charakteristischen Substratkomponenten und ihre biochemische Umsetzung zu Biogas bzw. Methan in Abbildung 13 dargestellt.

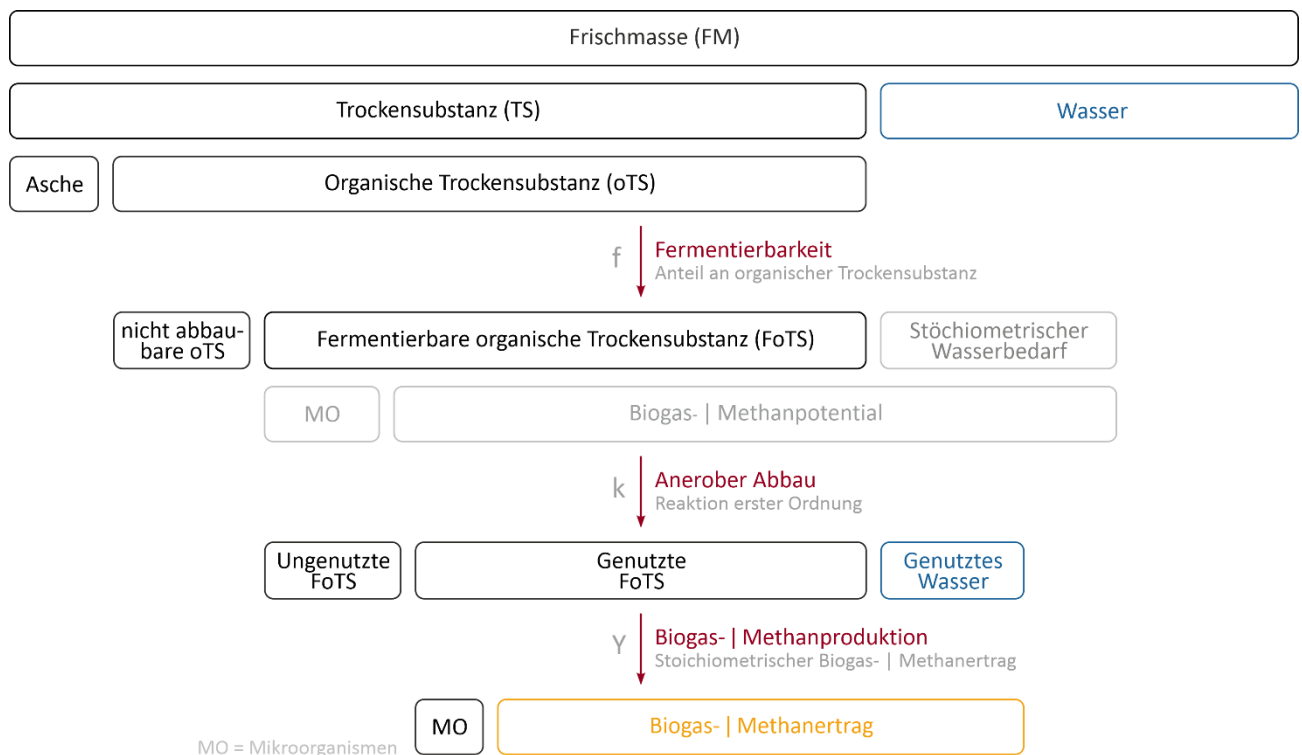


Abbildung 13: Biochemische Abbauege der Substratbestandteile für die Entwicklung von vereinfachten Reaktionsmodellen

Im Allgemeinen wird der Anteil an TS und oTS als Referenzwert für die Substratcharakterisierung und Prozessbewertung an Biogasanlagen verwendet. Gemäß der ursprünglichen Definition und der etablierten Messverfahren auf Basis des Massenverlustes nach Trocknung und Verbrennung kann der oTS-Gehalt jedoch auch anaerob nicht abbaubare Stoffe (wie beispielsweise Lignin) enthalten. Für die direkte Anwendung von biochemischen Reaktionsmodellen muss somit der Anteil der fermentierbaren organische Trockensubstanz (FoTS) bestimmt werden.

Die Bestimmung der FoTS auf Basis von Schätzgleichungen unter Verwendung der Futtermittelanalyse hat sich in der Praxis bis heute nicht etabliert bzw. führt häufig zu einer Unterschätzung des fermentierbaren Substratbestandteile der eingesetzten Substrate [6,15]. Dabei lässt sich der genutzte Anteil an FoTS auch in Abhängigkeit von den konkreten Betriebsbedingungen (Verweilzeit und Raumbelastung) und der charakteristischen Abbauraten abschätzen. So kann anhand stöchiometrischer Berechnungen von der umgesetzten FoTS (unter Berücksichtigung des stöchiometrischen Wasserbedarfs und des Substratanteils für mikrobielle Wachstumsprozesse) auf den Biogas- oder Methanertrag im kontinuierlichen Betrieb geschlossen werden. Unter der Annahme einer vollständigen Substratumsetzung der verfügbaren FoTS kann auch damit auch das Biogas- oder Methanpotenzial der eingesetzten Substrate bestimmt werden (Abbildung 13).

Modellstruktur

Zur Simulation der flexiblen bzw. dynamischen Methanproduktion in Labor- und Praxisanlagen wurden empirische Reaktionsmodelle auf Basis einer Reaktion erster Ordnung weiterentwickelt (Abbildung 14).

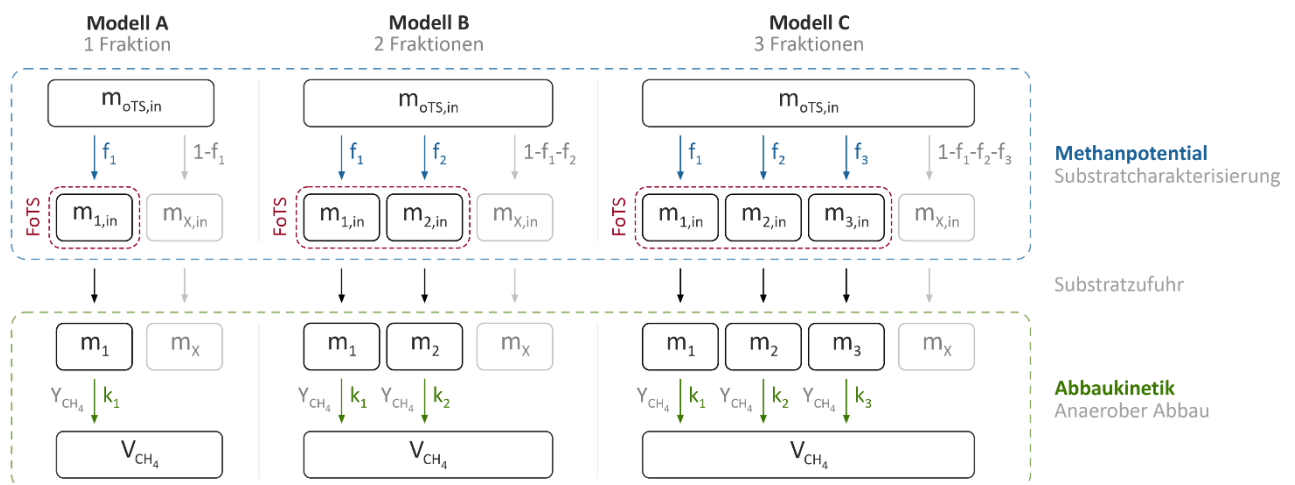


Abbildung 14: Charakteristische Modellstrukturen vereinfachter Reaktionsmodelle auf Basis einer Reaktion erster Ordnung

In jedem Modell wird die zugeführte Masse an oTS durch zusätzliche Fraktionsparameter f_i in unterschiedliche Fraktionen unterteilt. Die Summe aller Fraktionen definiert den Gesamtgehalt an FoTS der eingesetzten Substratmischung, während die verbleibende Masse m_x die nicht-abbaubare oTS darstellt. Für jede Fraktion wird der anaerobe Abbau über die Zeit durch eine Reaktionskonstante erster Ordnung k_i beschrieben. In Abhängigkeit der gewählten Modellstruktur (Modell A bis C) lassen sich damit unterschiedliche Substratbestandteile, wie beispielsweise schnell-abbaubare Zucker oder langsam-abbaubare Faserstoffe oder Strukturkohlenhydrate im Detail beschreiben. Durch den stöchiometrischen Ertragskoeffizienten Y_{CH_4} von 420 L Methan bzw. 809 L Biogas je kg FoTS lässt sich von der abgebauten Substratmenge auf die Methan- bzw. Biogasproduktionsrate schließen [14].

Während der Modellanwendung bzw. Parameterschätzung müssen die unbekannte Modellparameter (f_i und k_i) zur Charakterisierung der fermentierbaren Substratbestandteile und der zugrundeliegenden Abbaukinetik bestimmt werden. Dabei werden die Reaktionskonstanten durch die mikrobielle Gemeinschaft im Gärmedium definiert, hingegen die Fraktionsparameter von der Nährstoffzusammensetzung der verwendeten Substrate abhängen. So sind beispielsweise bei der Simulation der Co-Vergärung von Maissilage und Rindergülle in einem einzelnen Fermenter anhand der Modellstruktur B insgesamt vier Fraktionsparameter (jeweils zwei Fraktionsparameter pro Substrat) und zwei Reaktionskonstanten erster Ordnung zu ermitteln.

Analytische Lösung und Diskretisierung

Landwirtschaftliche Biogasanlagen werden in der Regel quasi-kontinuierlich betrieben. Das bedeutet, dass die Substratzufuhr stündlich oder alle zwei Stunden in regelmäßigen Abständen erfolgt. Beim dynamischen Anlagenbetrieb zur bedarfsorientierte Biogasproduktion werden die Substrate hingegen flexibel bzw. unregelmäßig, mit Fütterungspausen von bis zu drei Tagen beschickt [2].

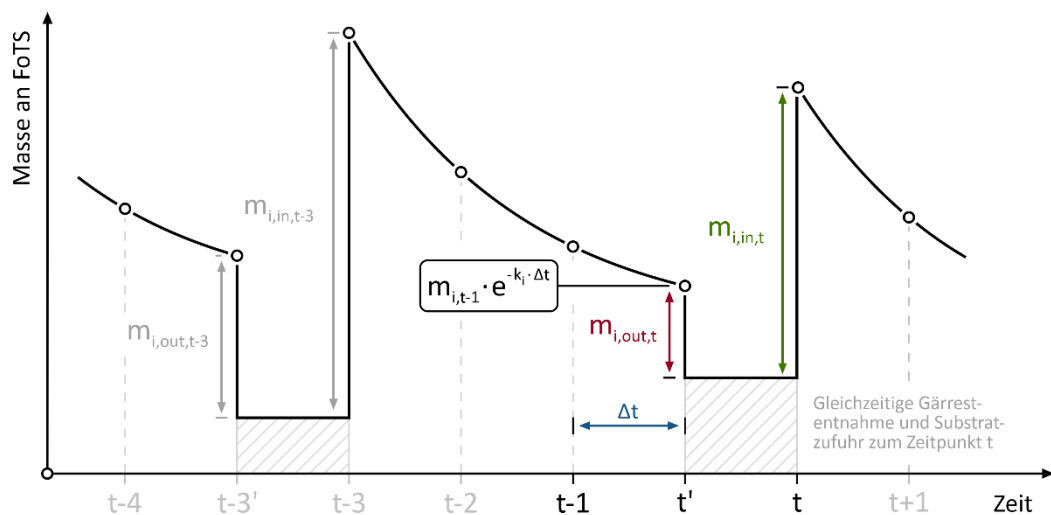


Abbildung 15: Diskrete Berechnung der Masse an FoTS im dynamischen Anlagenbetrieb

Zur direkten Berechnung der dynamischen Biogas- bzw. Methanproduktion (ohne Anwendung numerischer Lösungsverfahren) können die Modellgleichungen zwischen einzelnen Fütterungsereignissen analytisch gelöst werden (Abbildung 15). Zusätzlich wird das resultierende Gleichungssystem für die Modellimplementierung und Anpassung anhand der verfügbaren Messdaten diskretisiert. Die Substratzufuhr und die Gärrestentnahme erfolgen unter Vernachlässigung möglicher Zu- oder Abfuhrgeschwindigkeiten zeitgleich und spontan (schlagartig). Somit kann in Abhängigkeit von der Schrittweite Δt der anaerobe Abbau der fermentierbaren Fraktionen im Fermenter sowie die daraus resultierende Methanproduktion zu jedem diskreten Zeitpunkt berechnet werden.

Volumenkorrektur

Die allgemeine Theorie zur Modellierung anaerober Prozesse beruht üblicherweise auf der Annahme eines konstanten Reaktionsvolumens (Fest-Flüssig-Volumen des Gärmediums). In umfangreichen Modellstrukturen wie dem ADM1 ist dies eine notwendige Bedingung, da sich durch die funktionellen Abhängigkeiten bei veränderlichem Reaktionsvolumen das Gleichungssystem (durch die Anwendung der

Substratzufuhr

Empirische Reaktionsmodelle unter Verwendung einer Reaktion erster Ordnung wurden ursprünglich nur für die Simulation und Parameterschätzung bei der diskontinuierlichen Vergärung einzelner Substrate bzw. Substratmischungen in Batchversuchen verwendet [12,17,18]. Im Rahmen anwendungsorientierter Forschungsvorhaben am DBFZ (SubEval, 22034614, BMEL; RestFlex, 22041818, BMEL) wurde die Modelle dabei auch für den Einsatz im quasi-kontinuierlichen Betrieb bei konstanter Substratzusammensetzung weiterentwickelt. Für die Anwendung im regulären Anlagenbetrieb muss jedoch auch eine Simulation bei veränderlichen Substraten bzw. Substratmischungen möglich sein.

In Abhängigkeit von dem gewählten Modellansatz (A, B oder C) setzt sich die FoTS der einzelnen Substrate dabei aus unterschiedlichen Anteilen der charakteristischen Fraktionen (1, 2 oder 3 Fraktionen) zusammen. Die Summe der einzelnen Fraktionen definiert die gesamte FoTS des jeweiligen Substrats. Für die Berechnung der zugeführten Gesamtmasse jeder Fraktion werden die substratspezifischen Massen an oTS mit den jeweiligen Fraktionsparameter multipliziert und über alle Substrate gemäß Abbildung 17 summiert.

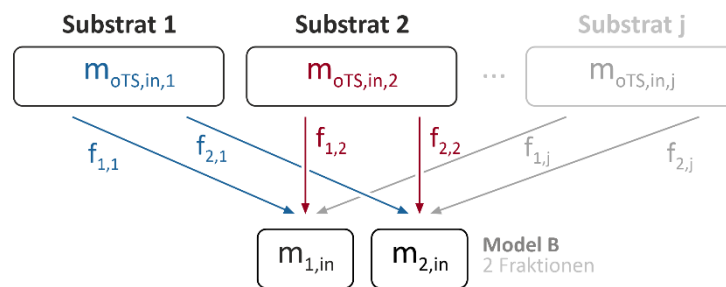


Abbildung 17: Schematische Vorgehensweise zur Berechnung der zugeführten FoTS beim Einsatz unterschiedlicher Substrate

Somit ist es möglich, beliebig viele Substrate zu jedem Zeitschritt im Modelleingang zu berechnen. Da jedoch die substratspezifischen Fraktionsparameter in der Regel nicht bekannt sind und im Rahmen der Parameterschätzung ermittelt werden, ist eine verlässliche Bestimmung nur bei geringer Anzahl an Substraten (bzw. unbekanntem Fraktionsparametern) möglich. Im Praxisbetrieb wird häufig nur eine Feststoffmischung gemeinsam mit Wirtschaftsdüngern als Substrat verwendet, sodass sich bei geeigneten Betriebsbedingungen die substratspezifischen Fraktionsanteile verlässlich bestimmen lassen.

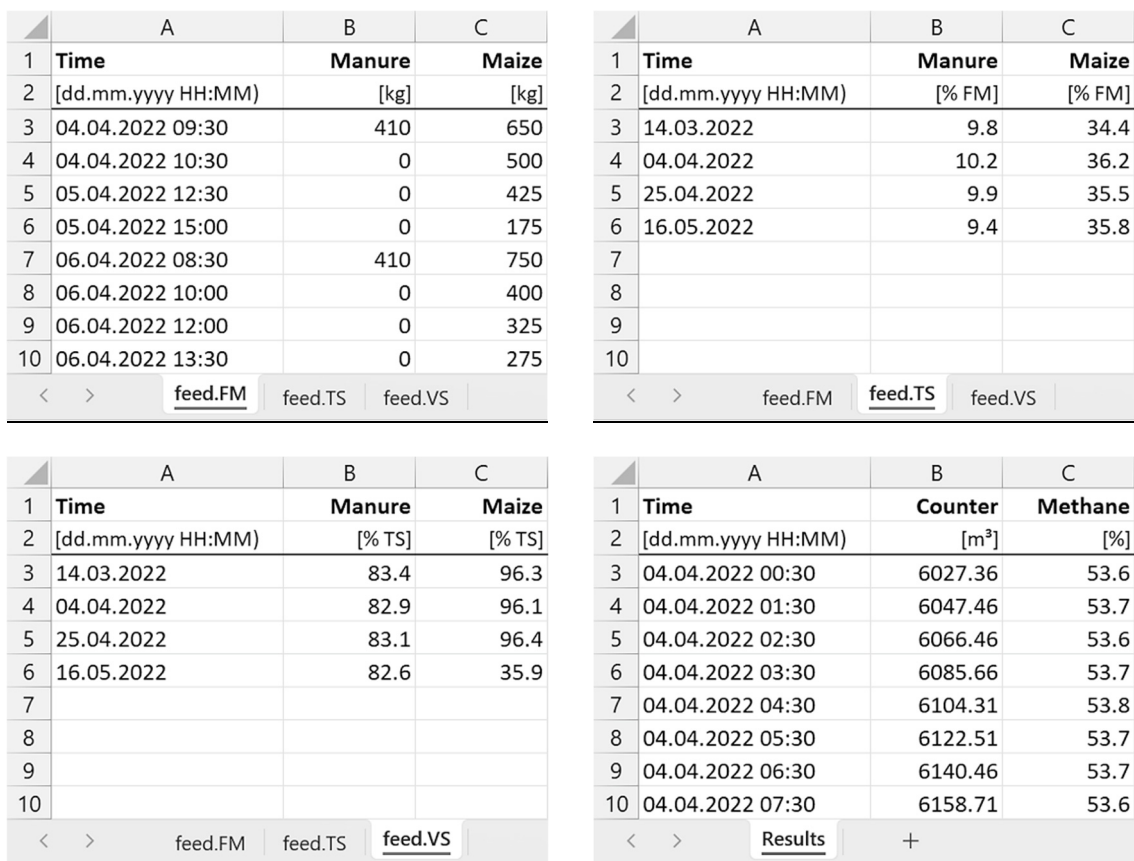
Implementierung und Parameteridentifikation

Die unterschiedlichen Modellstrukturen sowie die zugehörigen Verfahren zur Prozesssimulation, Parameterschätzung und Standardfunktionen bzw. Schnittstellen zur strukturierten Aufbereitung der Mess- und Analyseergebnisse wurden in der Softwareumgebung MATLAB (The MathWorks, Inc., USA) implementiert. Die Bestimmung der unbekanntem Modellparameter erfolgt anhand der Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit der Optimierungsfunktion f_{mincon} (*Trust Region Reflective Algorithm*). Um physikalisch sinnvolle Parameterwerte zu erhalten, wurde der Wertebereich der Modellparameter auf die Menge der positiven reellen Zahlen beschränkt. Für eine quasi-globale Auswertung der Zielfunktion wird die Parameterschätzung für unterschiedliche Startwerte der unbekanntem Modellparameter wiederholt [19]. Die einzelnen Initialwerte werden dabei zufällig aus dem typischen Wertebereich der jeweiligen Modellparameter ermittelt und mit dem lokalen Optimierungsverfahren ausgewertet. Die daraus resultierenden Parameterschätzungen werden als Startwerte für einen weiteren Optimierungslauf verwendet, um die

Konvergenz in der Nähe des Zielwerts zu gewährleisten [20]. Schließlich wird der optimale Parametersatz (niedrigster quadratischer Fehler) aus allen Startwerten und Iteration ausgewählt.

Messdatenaufbereitung

Für die Anwendung der implementierten Modellstrukturen wird eine begrenzte Anzahl an Prozess- und Substratdaten benötigt. Dabei müssen für das Simulationsmodell sowohl die TS- und oTS-Gehalte als auch die eingesetzten Massen der verwendeten Substrate bzw. Substratmischungen sowie die jeweiligen Fermentervolumina bekannt sein. Zusätzlich werden weitere Kenngrößen zum stöchiometrischen Biogas- und Methanpotential sowie Aussagen zur Dichte der Substrate und Gärmedien benötigt. Diese Kenngrößen beruhen auf Literatur- bzw. Erfahrungswerten und müssen im Rahmen der Modellanwendung nicht weiter angepasst werden. Zur Identifikation der unbekanntenen Modellparameter wird die gemessene Biogas- oder Methanproduktion mit der simulierten Gasmenge verglichen. Entsprechend müssen auch Messwerte der Gasproduktion an das Optimierungsverfahren übergeben werden. Für den Datenaustausch wurden einzelne Vorlagen in der Tabellenkalkulationssoftware Excel (Microsoft Corporation, USA) für eine eindeutige und standardisierte Übertragung der Anlagendaten erstellt (Abbildung 18). Durch die strukturierte Datenformatierung lassen sich grundsätzlich auch andere tabellarische Dateiformate (wie z. B. csv-Dateien) verwenden.



| | A | B | C |
|----|--------------------|---------------|--------------|
| 1 | Time | Manure | Maize |
| 2 | [dd.mm.yyyy HH:MM) | [kg] | [kg] |
| 3 | 04.04.2022 09:30 | 410 | 650 |
| 4 | 04.04.2022 10:30 | 0 | 500 |
| 5 | 05.04.2022 12:30 | 0 | 425 |
| 6 | 05.04.2022 15:00 | 0 | 175 |
| 7 | 06.04.2022 08:30 | 410 | 750 |
| 8 | 06.04.2022 10:00 | 0 | 400 |
| 9 | 06.04.2022 12:00 | 0 | 325 |
| 10 | 06.04.2022 13:30 | 0 | 275 |

| | A | B | C |
|----|--------------------|---------------|--------------|
| 1 | Time | Manure | Maize |
| 2 | [dd.mm.yyyy HH:MM) | [% FM] | [% FM] |
| 3 | 14.03.2022 | 9.8 | 34.4 |
| 4 | 04.04.2022 | 10.2 | 36.2 |
| 5 | 25.04.2022 | 9.9 | 35.5 |
| 6 | 16.05.2022 | 9.4 | 35.8 |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |

| | A | B | C |
|----|--------------------|---------------|--------------|
| 1 | Time | Manure | Maize |
| 2 | [dd.mm.yyyy HH:MM) | [% TS] | [% TS] |
| 3 | 14.03.2022 | 83.4 | 96.3 |
| 4 | 04.04.2022 | 82.9 | 96.1 |
| 5 | 25.04.2022 | 83.1 | 96.4 |
| 6 | 16.05.2022 | 82.6 | 35.9 |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |

| | A | B | C |
|----|--------------------|-------------------|----------------|
| 1 | Time | Counter | Methane |
| 2 | [dd.mm.yyyy HH:MM) | [m ³] | [%] |
| 3 | 04.04.2022 00:30 | 6027.36 | 53.6 |
| 4 | 04.04.2022 01:30 | 6047.46 | 53.7 |
| 5 | 04.04.2022 02:30 | 6066.46 | 53.6 |
| 6 | 04.04.2022 03:30 | 6085.66 | 53.7 |
| 7 | 04.04.2022 04:30 | 6104.31 | 53.8 |
| 8 | 04.04.2022 05:30 | 6122.51 | 53.7 |
| 9 | 04.04.2022 06:30 | 6140.46 | 53.7 |
| 10 | 04.04.2022 07:30 | 6158.71 | 53.6 |

Abbildung 18: Formatierung der erforderlichen Eingangsdaten (Substrat) und Messwerte (Biogas) zur Modellanwendung

Die entsprechenden Messwerttabellen lassen sich dann durch geeignete Prozeduren in MATLAB importieren und für die Modellanwendung weiterverarbeiten. Für realitätsnahe Simulationsergebnisse und aussagekräftige Modellparameter wurden dabei weitere Schritte zur automatisierten Datenaufbereitung implementiert.

Entfernen von Extremwerten

Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der gemessenen Biogasvolumenströme können die gespeicherten Daten in Abhängigkeit von der jeweiligen Messmethode einzelne Extremwerte enthalten (zum Beispiel durch Druckschwankungen bei der Substratzufuhr). Entsprechende Extremwerte können im Rahmen der Parameterschätzung bei der Berechnung der mittleren quadratischen Abweichung einen erheblichen Einfluss auf das Optimierungsergebnis und die identifizierten Parameterwerte besitzen. Somit werden einzelne Extremwerte anhand fester Grenzwerte (z. B. maximaler Gasvolumenstrom) aus den Messdaten entfernt.

Korrektur der Fütterungszeitpunkte

Durch das zugrundeliegenden Funktionsverhalten der implementierten Modellstrukturen wird immer zum Zeitpunkt der Substratzugabe die maximale Biogasproduktion bestimmt. Für optimale Simulationsergebnisse sollten somit die Zeitpunkte der maximalen Gasproduktion mit den Fütterungszeitpunkten übereinstimmen. In Abhängigkeit von den jeweiligen Messsystemen, Datenloggern oder Protokollführung an der jeweiligen Biogasanlage kann es jedoch auch passieren, dass die eingesetzten Substratmenge erst nach der abgeschlossenen Fütterung im elektronischen Betriebstagebuch abgelegt werden. In diesem Fall ist der Fütterungszeitpunkt auf den Beginn der Substratzufuhr zu verschieben.

Korrektur auf Standardbedingungen

Soweit keine automatische Korrektur der Biogas- und Methanvolumenströme auf Standardbedingungen erfolgt, müssen in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und dem Atmosphärendruck die gebildeten Gasmengen auf Standardbedingungen korrigiert werden.

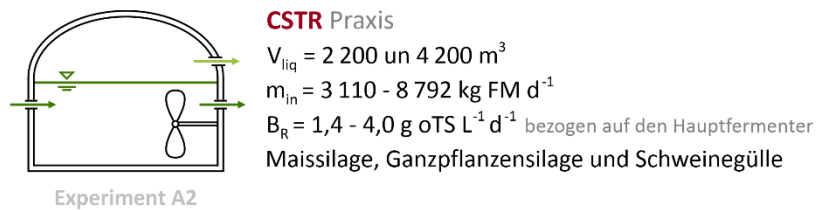
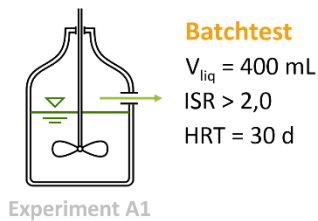
1.4 Arbeitspaket 4: Schnittstellendefinition und Datenbereitstellung der Praxisanlagen

Um die praxisnahe Anwendung der erweiterten Modellstrukturen zur Simulation der flexiblen Biogas- bzw. Methanproduktion in verschiedenen Größenordnungen und Betriebsbedingungen zu evaluieren, wurden drei Datensätze (A, B und C) im Labor- und Praxismaßstab verwendet. Die wesentlichen Eigenschaften und Prozessbedingungen der unterschiedlichen Versuchsreihen bei der Vergärung landwirtschaftlicher Substrate sind in Abbildung 19 zusammengefasst. Dabei wurden die Versuche A und B im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhaben durchgeführt, während Versuch C in vorherigen Untersuchungen zur flexiblen Strombereitstellung von Biogasanlagen am DBFZ erfasst wurde.

Durch den unplausiblen Verlauf der Batchversuche bzw. daraus resultierenden Modellparametern sowie Probleme bei der Messdatenerfassung an der großtechnischen Biogasanlagen Blöcken werden im Folgenden nur die Versuchsdaten der Biogasanlage DKB ausgewertet und dargestellt (siehe Praxisversuch A in Abbildung 19)

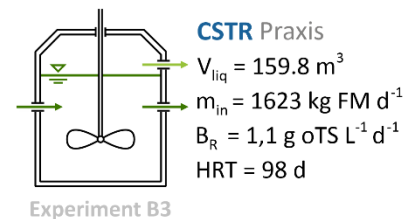
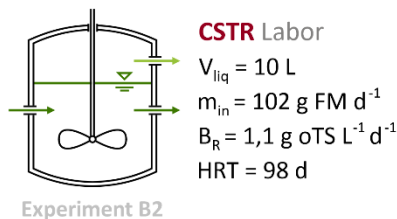
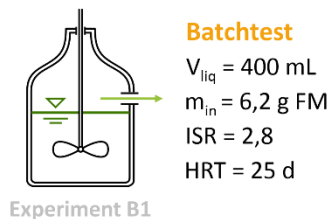
(A) Praxisversuche Großtechnische Biogasanlagen DKB

Diskontinuierliche Vergärung der Einzelsubstrate im Batchtest



(B) Methodenvergleich Unterschiedliche Fermentergrößen und Betriebsbedingungen

Identische Substratzusammensetzung an Maissilage und Rindergülle in allen Experimenten



(C) Flexibler Anlagenbetrieb Bedarfsgerechte Methanproduktion

Unterschiedliche Substratzusammensetzung in jedem Experiment

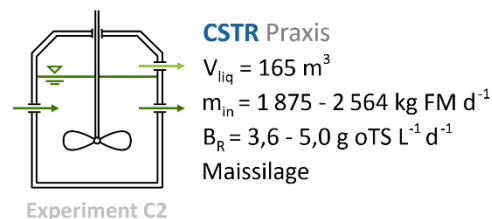
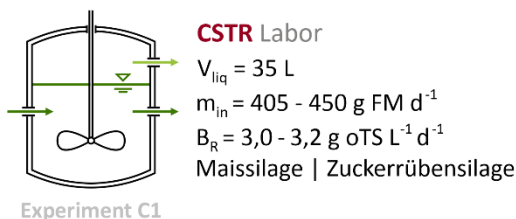


Abbildung 19: Versuchsaufbau der unterschiedlichen Experimente

Versuchs A: Praxisversuche

Die großtechnische Biogasanlage DKB in Weesby wurde als Versuchsanlage im Verbundvorhaben ausgewählt. Die Anlage ist durch ein einfaches und vergleichbares Anlagenkonzept gekennzeichnet, um mögliche Fehlerquellen und Unsicherheiten bei der Anlagenbilanzierung zu minimieren. So besitzt die Biogasanlage einen Hauptfermenter (2.200 m³) mit Doppelmembrangasspeicher (1.203 m³) sowie ein Gärproduktlager (4.200 m³) mit einem weiteren Doppelmembrangasspeicher (2.270 m³). Die installierte elektrische Leistung beträgt 380 kW, bei einer Feuerungswärmeleistung von 1.005 kW. Zur Biogasproduktionsmessung ist ein Gasmengenzähler vor dem BHKW sowie eine entsprechende Strommengenerfassung nach dem BHKW installiert. Zusätzlich wurde zusätzliche Messtechnik für eine besser zeitlich aufgelöste Füllstandsüberwachung des Gasspeichers und die Korrektur des gespeicherten Gasvolumens unter Berücksichtigung der konkreten Gastemperatur im Rahmen des Forschungsvorhabens eingebaut. Im Versuchszeitraum von über 200 Tagen wurde die Anlagen bei einer Raumbelastung zwischen 1,4 und 4,0 g oTS L⁻¹ d⁻¹ (bezogen auf den Hauptfermenter) mit Maissilage, Schweinegülle und Ganzpflanzensilage und beschickt.

Versuch B: Methodenvergleich

Für belastbare Aussagen zur Verwendung von Laborversuchen als Grundlage für die dynamische Simulation großtechnischer Biogasanlagen wurde die mesophile Co-Vergärung von Maissilage und Rindergülle im diskontinuierlichen (Batch) und quasi-kontinuierlichem Anlagenbetrieb im Labor- und Praxismaßstab untersucht (Abbildung 19). Um eine einheitliche Basis für einen Methodenvergleich zu etablieren, wurde in allen Versuchen die gleiche Substratmischung verwendet (Tabelle 6). Die ermittelten Modellparameter (Reaktionskonstanten und Fraktionsparameter) ermöglichen damit einen direkten Vergleich des Prozessverhaltens in verschiedenen Versuchssystemen und erlauben somit auch Aussagen zur Verwendung von Batchversuchen für die Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion an großtechnischen Biogasanlagen.

Tabelle 6: Eigenschaften (TS und oTS) der verwendeten Substrate in Versuch B und C^a

| | | Versuch B | | | Versuch C1 | | Versuch C2 |
|-----|--------|-----------|-------|-----------------------|------------|-------|------------|
| | | Mais | Gülle | Mischung ^b | Mais | Rüben | Mais |
| TS | [% FM] | 28,5 | 7,4 | 12,7 | 32,6 | 19,4 | 33,3 |
| oTS | [% TS] | 94,5 | 76,3 | 86,3 | 95,6 | 82,2 | 96,3 |

a) Abkürzungen der Substratnamen für Maissilage (Mais), Rindergülle (Gülle) und Zuckerrübensilage (Rüben)

b) Resultierende Substratmischung bei der Co-Vergärung von Maissilage und Rindergülle (3:2 auf Basis von oTS)

Versuch C: Flexibler Anlagenbetrieb

Als Grundlage für die Modellvalidierung im flexiblen Anlagenbetrieb wurden experimentelle Untersuchungsergebnisse zur bedarfsorientierten Biogasproduktion aus dem Forschungsvorhaben RegEnFlex (FKZ 10014322, SAB) verwendet. Dabei wurden im Experiment C1 verschiedene Fütterungsstrategien und Substrattypen für die flexible Biogasproduktion in kontinuierlichen Laborversuchen untersucht [21]. Im Experiment C2 wurde ein Algorithmus zur modellbasierten Prozessregelung (*Modell Predictive Control*, MPC) implementiert und im großtechnischen Betrieb evaluiert [22,23]. Die zugrunde liegenden Messdaten der Methanproduktionsraten und Substrateigenschaften (Tabelle 6) beider Untersuchungen werden für die Modellauswertung im vorliegenden Verbundvorhaben genutzt.

1.5 Arbeitspaket 5: Test des Prognosetools für eine flexible Biogaserzeugung

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Versuchsreihen zur modellbasierten Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion werden im Folgenden ausführlich dargestellt und diskutiert. Abschließend werde die konkreten Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Anwendung entsprechender Reaktionsmodelle in der großtechnischen Anlagenpraxis definiert.

Versuch A: Praxisversuche:

Die Simulation der Biogasproduktion an der Biogasanlage DKB erfolgt auf Basis der ermittelten Modellparameter im Batchversuch. Weitere Anlagendaten wurden dabei aus dem Betriebstagebuch (einschließlich zusätzlicher Datenlogger) oder den projektspezifischen Analysen der Substrate und Gärmedien bereitgestellt. Die Simulationsergebnisse in Abbildung 20 zeigen deutlich, dass die Biogasproduktionsrate auf Basis der im Batchversuch ermittelten Kennzahlen nicht ausreichend abgebildet werden kann. Vermutlich ist dies vor allem auf die niedrigen Reaktionskonstanten (zwischen 0,08 und 0,40 d⁻¹ in Tabelle 3) zurückzuführen. Dies wird auch durch Ergebnisse aus anderen Forschungsvorhaben (RestFlex BMEL, 22041818, BMEL; SubEval, 22034614, BMEL) bestätigt. Hier werden im Vergleich zum Batchversuch ebenfalls erheblich (Faktor 10) höhere Reaktionskonstanten im kontinuierlichen Anlagenbetrieb identifiziert. Wird die gemessene Biogasproduktion zur Anpassung der Modellparameter verwendet, lässt sich

zumindest für den ersten Teil der Versuchsreihe (bis Tag 100) eine sehr gute Übereinstimmung mit den Prozessdaten der großtechnischen Biogasanlage erzielen. Im zweiten Teil der Versuchsreihe führen mitunter Messfehler bei der Gasspeicherfüllstandserfassung sowie veränderliche Substratqualitäten zu möglichen Abweichungen zwischen der simulierten und gemessenen Biogasproduktionsrate.

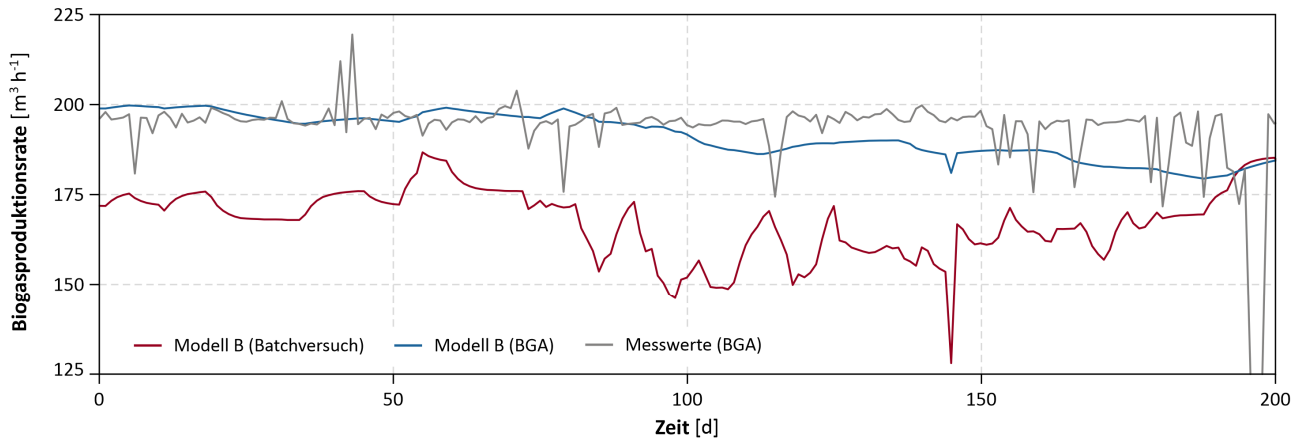


Abbildung 20: Modellbasierte Auswertung der Biogasproduktion an der großtechnischen Biogasanlage DKB

Versuch B: Methodenvergleich

Grundsätzlich sind die entwickelten Modellstrukturen (Modell A bis C) in der Lage, das Funktionsverhalten der gemessenen Methanproduktionsrate im diskontinuierlichen (Batch) und quasi-kontinuierlichen Betrieb der unterschiedlichen Labor- und Praxisanlagen im Detail abzubilden (Abbildung 21). Dabei war es lediglich mit dem Model A anhand einer einzelnen Fraktion an FoTS und der entsprechenden Reaktionskonstante erster Ordnung nicht möglich, den Verlauf der Methanproduktionsrate im quasi-kontinuierlichen Anlagebetrieb an der großtechnischen Forschungsbiogasanlage (Versuch B3) im Detail zu beschreiben ($ME = 0,66$). Alle anderen Modelle sind durch einen geringen Modellfehler ($ME \geq 0,84$) gekennzeichnet. Im Vergleich zum Model A (1 Fraktion) führt die Anwendung von Modell B (2 Fraktionen) in allen Versuchen zu einer höheren Modellgenauigkeit, während durch das Modell C (3 Fraktionen) die Simulationsergebnisse nicht weiter verbessert werden können (Ergebnisse nicht dargestellt).

Die identifizierten Modellparameter und daraus resultierende Modellgüte sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Dabei sind die Schätzwerte für die anaerobe Abbaubarkeit bzw. den Gesamtgehalt an FoTS (Summe aller Fraktionsanteile) und das daraus resultierende Methanpotential zwischen 364 bis 384 L CH₄ kg⁻¹ oTS der verwendeten Substratmischung in allen Versuchen und Modellen annähernd identisch.

Tabelle 7: Identifizierte Modellparameter der Modelle A und B im Versuch B^a

| Versuch | Modell A 1 Fraktion | | | | Modell B 2 Fraktionen | | | | | |
|--------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|
| | f_1 [-] | k_1 [d ⁻¹] | BMP [L kg ⁻¹] | ME [-] | f_1 [-] | f_2 [-] | k_1 [d ⁻¹] | k_2 [d ⁻¹] | BMP [L kg ⁻¹] | ME [-] |
| B1 – Batchversuch | 0,89 | 0,36 | 374 | 0,98 | 0,57 | 0,35 | 0,20 | 1,3 | 384 ^b | 1,00 |
| B2 – CSTR (Labor) | 0,87 | 1,30 | 364 | 0,84 | 0,49 | 0,43 | 0,04 | 2,6 | 384 ^b | 0,87 |
| B3 – CSTR (Praxis) | 0,89 | 1,80 | 373 | 0,66 | 0,69 | 0,22 | 0,18 | 8,6 | 384 ^b | 0,87 |

a) Fraktionsanteil f_i , Reaktionskonstante erster Ordnung k_i , biochemisches Methanpotential (BMP) und Modelleffizienz (ME)

b) Obere Parametergrenze von 384 L CH₄ kg⁻¹ oTS auf Basis der gemessenen Methanproduktion im Batchversuch.

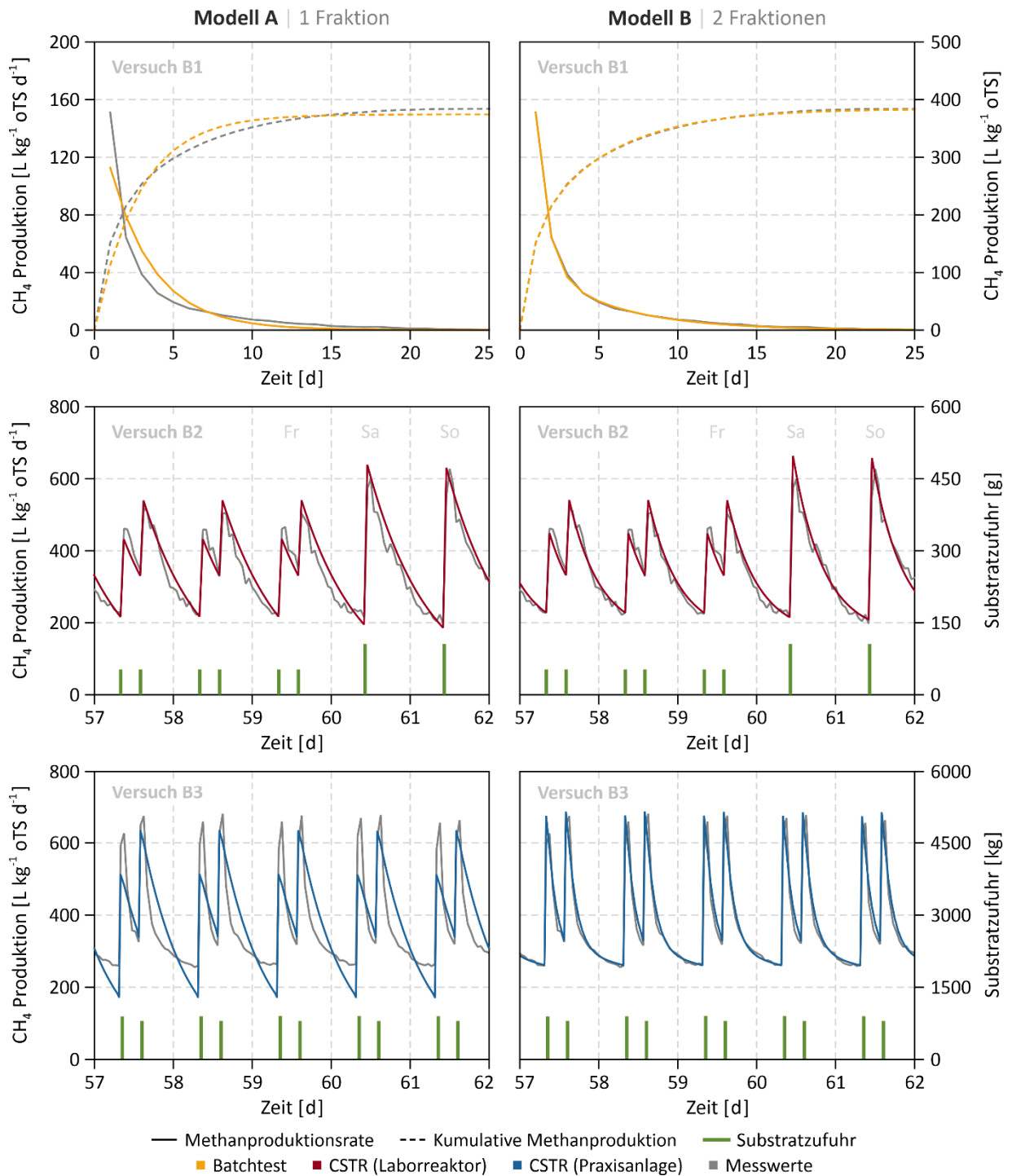


Abbildung 21: Simulationsergebnisse unterschiedlicher Betriebsweisen und Versuchssysteme im Versuch B

Aufgrund der experimentellen Bestimmung des BMP im Batchversuch wurde jedoch die obere Parametergrenze der geschätzten BMP auf $384 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ begrenzt, da im Modell B eine unbegrenzte Parameteranpassung in einem unrealistisch hohem Methanpotential von $420 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ oTS}$ ($\text{FoTS} = \text{oTS}$) resultierte. So besteht Rindergülle hauptsächlich aus langsam und nicht abbaubaren Reststoffen, da leicht verdauliche Nährstoffe bereits im Rinderpansen verstoffwechselt wurden. Maissilage enthält neben schnell abbaubaren Inhaltsstoffen (z. B. Stärke) auch einen erheblichen Anteil an langsam abbau-

baren Strukturkohlenhydraten (z. B. Zellulose, Hemizellulose oder Lignin). Eine Erhöhung der FoTS bzw. des resultierenden Methanpotentials bis zur vollständigen anaeroben Abbaubarkeit (FoTS = oTS und 420 L CH₄ kg⁻¹ oTS) ist somit nicht plausibel.

Durch die geringe Anzahl an unbekanntenen Parametern ist anhand des Modells A eine eindeutige Bewertung und ein direkter Vergleich der unterschiedlichen Versuchssysteme möglich. Wie in Tabelle 7 und Abbildung 22 dargestellt, sind die ermittelten Methanpotentiale (bzw. der Gesamtgehalt an FoTS) der unterschiedlichen Betriebsweisen und Reaktorgrößen fast identisch. Dabei wird der experimentelle Grenzwert von 384 L CH₄ kg⁻¹ oTS in allen Versuchen nicht erreicht. Die kinetische Reaktionskonstante ist im Batchversuch (0,36 d⁻¹) deutlich geringer als in der quasi-kontinuierlich betriebenen Labor- und Praxisanlage (1,3 bis 1,8 d⁻¹). Hier ist aber zu berücksichtigen, dass im großtechnischen Versuch B3 nur eine geringe Anpassungsgüte (*ME* = 0,66) mit dem Modell A erreicht wurde. Entsprechend sind die resultierenden Modellparameter auch nur bedingt für eine aussagekräftige Substrat- und Prozessbewertung zu verwenden. Der charakteristische Unterschied der Geschwindigkeitskonstanten im diskontinuierlichen (Batch) und quasi-kontinuierlichen (CSTR) Betrieb der Laborreaktoren bleibt jedoch weiterhin bestehen.

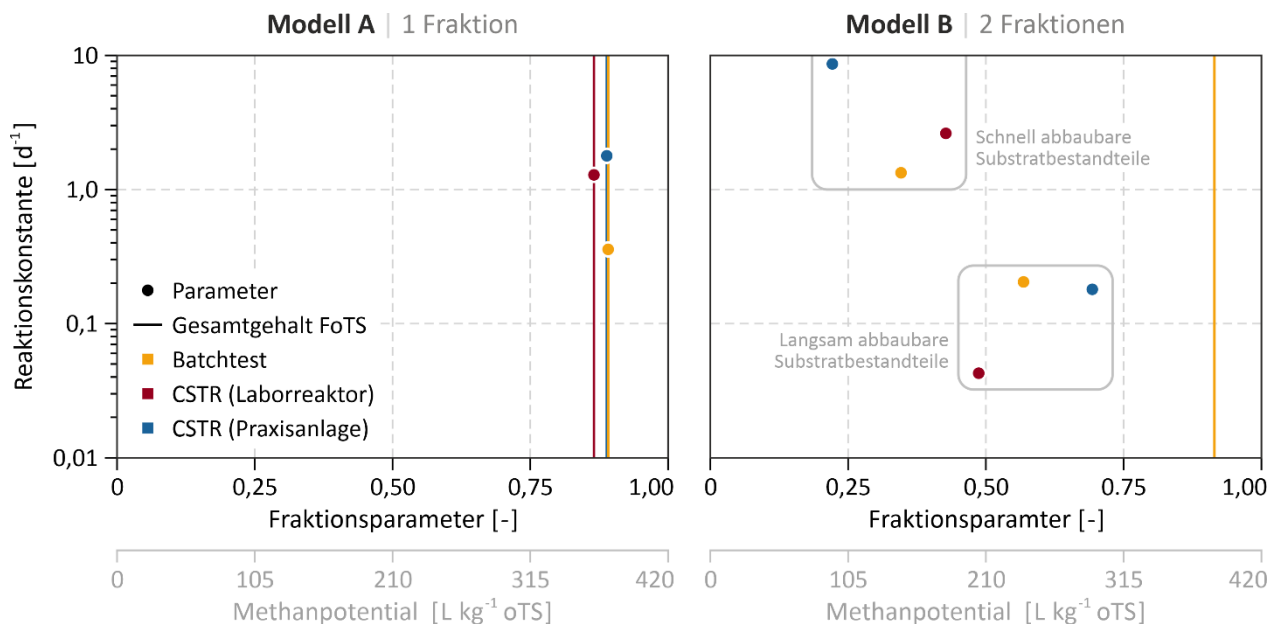


Abbildung 22: Identifizierte Modellparameter unterschiedlicher Betriebsweisen und Versuchssysteme im Versuch B

Durch die unterschiedlichen Fraktionsanteile lassen sich die identifizierten Reaktionskonstanten der einzelnen Versuchssystem im Modell B nicht direkt bewerten oder miteinander vergleichen. Dabei bewegen sich die kinetischen Parameter aus den Batchversuchen im typischen Wertebereich entsprechender Substrate [24].

Die beiden Parameterkombinationen der kontinuierlichen Labor- und Praxisanlage weisen hingegen einen vergleichsweise großen Abstand der beiden Reaktionskonstanten für schnell und langsam abbaubare Substratbestandteile auf. Insbesondere die großtechnischen Versuche an der Praxisanlage sind dabei durch eine ungewöhnlich hohe Reaktionskonstante (8,6 d⁻¹) in der Nähe der implementierten Parametergrenze von 10 d⁻¹ gekennzeichnet. Die Summe der Fraktionsanteile (Gesamtgehalt an FoTS) bzw. das resultierende Methanpotential befindet sich für alle Versuche am experimentellen Grenzwert von 384 L CH₄ kg⁻¹ oTS.

Um eine direkte Vergleichbarkeit zur Abbaugeschwindigkeit im Modell B zu erhalten wurden die Fraktionsanteile bei identischen Reaktionskonstante neu bestimmt. Die resultierenden Reaktionskonstanten von 0,14 und 4,2 d⁻¹ in Tabelle wurden dabei aus dem arithmetischen Mittelwert der einzelnen Modellparameter in Tabelle 7 gebildet. Anhand der unterschiedlichen Fraktionsanteile der einzelnen Versuche lassen sich die unterschiedlichen Anteile der zugrundeliegenden schnell- und langsam abbaubaren Substratbestandteile der einzelnen Versuche bzw. Substrate bewerten und vergleichen. Im Vergleich zur ursprünglich Anpassung bei unbekanntem Fraktionsanteile und Reaktionskonstanten in Tabelle 7 sind die resultierenden Parameterkombinationen in Tabelle 8 durch die zusätzlich Einschränkung durch eine niedrigere Modellgenauigkeit gekennzeichnet.

Tabelle 8: Identifizierte Modellparameter bei festen Reaktionskonstanten ^a

| Versuch | Modell B 2 Fraktion | | | | | |
|--------------------|---------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|
| | f_1 [-] | f_2 [-] | k_1 [d ⁻¹] | k_2 [d ⁻¹] | BMP [L kg ⁻¹] | ME [-] |
| A1 – Batchversuch | 0,48 | 0,43 | | | 384 ^c | 0,96 |
| A2 – CSTR (Labor) | 0,63 | 0,26 | 0,14 ^b | 4,2 ^b | 375 | 0,85 |
| A3 – CSTR (Praxis) | 0,53 | 0,38 | | | 384 ^c | 0,80 |

- a) Fraktionsanteil f_i , Reaktionskonstante erster Ordnung k_i , biochemisches Methanpotential (BMP) und Modelleffizienz (ME)
 b) Arithmetischer Mittelwert der Reaktionskonstanten in Tabelle 7.
 c) Obere Parametergrenze von 384 L CH₄ kg⁻¹ oTS auf Basis der gemessenen Methanproduktion im Batchversuch.

Grundsätzlich ist im Batchversuch mit gleichen Anteilen an schnell- und langsam abbaubaren Inhaltstoffen zu rechnen, hingegen im quasi-kontinuierlichen Anlagenbetrieb ein größerer Anteil an langsam abbaubaren Substratbestandteilen nachgewiesen wird. Dieses Verhalten lässt sich auch anhand der Methanproduktionsraten der einzelnen Fraktionen in Abbildung 23 bestätigen. So ist das Verhältnis aus schnell und langsam abbaubaren Inhaltstoffen im Batchversuch (über die gesamte Versuchsdauer von 18 Tagen) vergleichsweise ausgeglichen, hingegen der Anteil an Methan aus langsam abbaubaren Substratbestandteile in den quasi-kontinuierlichen Praxisversuchen überwiegt.

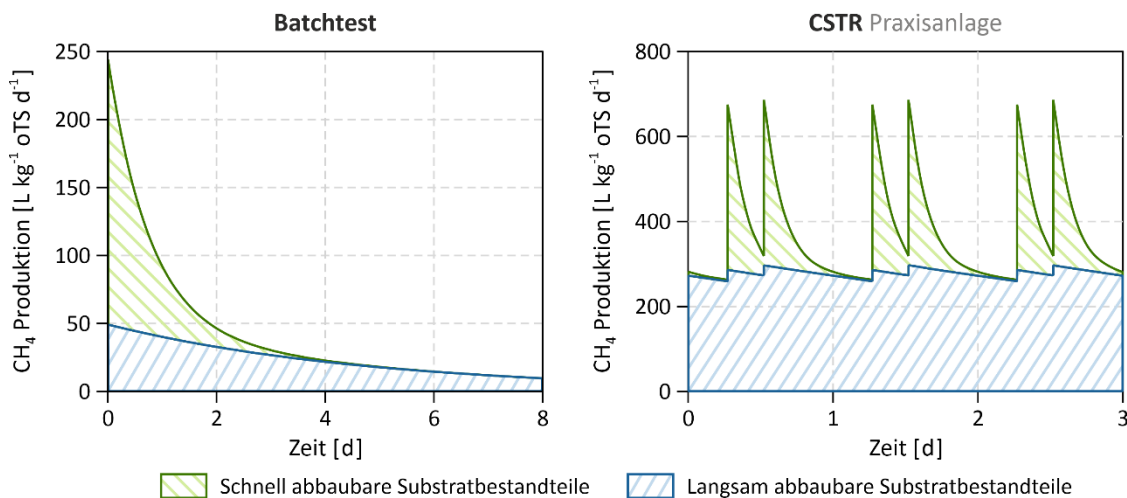


Abbildung 23: Methanproduktionsrate aus schnell und langsam abbaubaren Substratbestandteilen im Modell B

Auf Basis der ermittelten Modellparameter im Modell B (Tabelle 7) lässt sich der theoretische Verlauf der spezifischen Methanproduktionsrate in den unterschiedlichen Betriebsarten gemäß Abbildung 24 beschreiben. Dabei werden die charakteristischen Modellparameter, welche im diskontinuierlichen und kontinuierlichen Betrieb der unterschiedlichen Labor- und Praxisanlagen ermittelt wurden, zur Simulation eines Batchversuchs oder kontinuierlichen Reaktors (CSTR) verwendet.

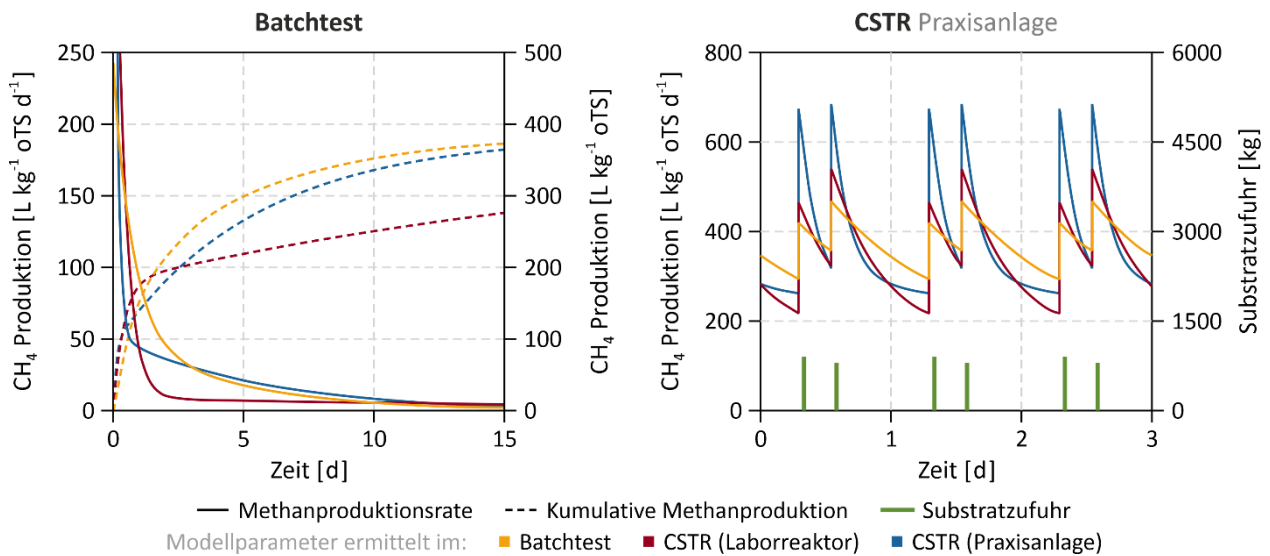


Abbildung 24: Theoretische Simulationsergebnisse auf Basis der identifizierten Modellparameter im Versuch B

Somit ist die Methanproduktionsrate auf Basis der ermittelten Modellparameter aus dem Batchversuch mit der ursprünglichen Modellanpassung in Abbildung 21 identisch, hingegen die weiteren Verläufe anhand der Modellparameter aus den kontinuierlichen Prozessen lediglich als theoretische Simulationsergebnisse eines hypothetischen Batchversuchs vorliegen. Dabei zeigen die Simulationsergebnisse auf Basis der Modellparameter aus dem Batchversuch sowie der großtechnischen Forschungs- bzw. Praxisanlage (CSTR) den typischen Verlauf der Methanproduktion fachgerechter Batchversuche [25]. Entsprechend ist auch das Abbruchkriterium nach 17 oder 19 Tagen auf Basis der Modellparameter aus dem Labor- oder Praxisversuch (Batch oder CSTR) erreicht. Die Simulationsergebnisse der theoretischen Methanproduktion anhand der Parameterschätzungen aus dem kontinuierlichen Laborreaktor (CSTR) zeigen jedoch ein eher ungewöhnliches Funktionsverhalten. Aufgrund des großen Anteils langsam abbaubarer FoTS (in Kombination mit einer hohen Reaktionskonstante für schnell abbaubare Inhaltsstoffe) zeigt die kumulative Methanproduktion zwei charakteristische Phasen: die schnelle Methanproduktion innerhalb des ersten Tages sowie eine niedrige und nahezu konstante Methanentwicklung für den weiteren Versuchsverlauf. Somit war das Abbruchkriterium des simulierten Batchversuchs auf Basis der Modellparameter aus dem kontinuierlichen Laborversuch erst nach 28 Tagen erfüllt.

Die Simulationsergebnisse für den kontinuierlichen Praxisbetrieb (CSTR) in Abbildung 24 sind dabei nicht ganz so eindeutig zu bewerten. Durch den geringeren Abstand der identifizierten Reaktionskonstante aus dem Batchversuch (Modell B in Tabelle 7 und Abbildung 22) ist auch die Gasproduktion im kontinuierlichen Betrieb (CSTR) durch eine geringere Dynamik gekennzeichnet. Weiterhin nimmt die Reaktionskonstante für schnell abbaubare Inhaltsstoffe ausgehend vom Batchversuch bis zur kontinuierlichen Labor- und Praxisanlage weiter zu, sodass auch der anaerobe Abbau und die daraus resultierende Methanproduktionsrate zu den konkreten Fütterungszeiten entsprechend schneller (höher und steiler) verläuft.

Grundsätzlich können die charakteristischen Modellparameter für eine detaillierte Substrat- und Prozessbewertung verwendet werden. Aufgrund der empirischen Modellstruktur, unter Annahme einer einfachen Reaktion erster Ordnung, besitzen die Modellparameter jedoch nur eine begrenzte mechanistische Aussagekraft. So beschreiben die geschätzten Parameter vielmehr mathematische Abhängigkeiten zur dynamischen Simulation der Methanproduktion als intrinsische Substrateigenschaften oder spezifische Prozesseigenschaften der anaeroben Biogas- bzw. Methanbildung.

Insbesondere die Anwendung von Modell C führt mit drei Fraktionen und sechs unbekanntem Modellparametern (bei einer Substratmischung) häufig zu Parameterschätzungen am Rande oder außerhalb sinnvoller Parametergrenzen der üblichen Literaturwerte. Auch wenn sich dadurch die Messwerte mitunter sehr genau beschreiben lassen, ist dies ein Hinweis, dass entweder die Modellstruktur oder das Identifikationsverfahren (einschließlich der verfügbaren Datenqualität) nicht für zuverlässige, eindeutige und universelle Parameterschätzungen geeignet sind.

Aktuelle Untersuchungen zur Aussagekraft von Batchversuchen aus einem internationalen Ringversuch bestätigen, dass bei der Verwendung von einfachen Reaktionsmodelle mit sehr großer Streuung der kinetischen Modellparameter zu rechnen ist [26]. Das laborspezifische Methanpotential lässt sich hingegen – unter Berücksichtigung konkreter Anforderungen und Validierungskriterien – mit geringen Abweichungen bestimmen. Inwieweit die Reaktionskonstanten aus Batchversuchen zur Simulation kontinuierlicher und dynamischer Vergärungsprozesse geeignet sind, bleibt somit weiterhin unklar.

Auch wenn ein direkter Vergleich zwischen unterschiedlichen Laboren nicht möglich ist, können Parameterschätzungen innerhalb einer einzigen Versuchsreihe jedoch für einen direkten Vergleich verschiedener Substrattypen (einschließlich Substratvorbehandlung) oder unterschiedlicher Betriebsweisen verwendet werden. Für detailliertere Prozessbeschreibung (einschließlich möglicher Inhibitoren) sind umfangreichere Modellstrukturen unter Verwendung variabler Kinetiken oder dem etablierten ADM1 erforderlich. Zusätzlich können auch lernfähige Verfahren auf Basis von maschinellem Lernen (wie beispielsweise künstliche neuronale Netze) zur Simulation und Übertragung von Batchversuchen zur Beschreibung kontinuierlichen im Labor- und Praxismaßstab verwendet werden.

Versuch C: Flexibler Anlagenbetrieb

Im Rahmen von Laborversuchen (Experiment C1) wurde der flexible Substrateinsatz zur bedarfsgerechten Stromproduktion bei der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen untersucht [21]. Dabei wurde Maissilage als Basissubstrat verwendet, hingegen Zuckerrübensilage durch den hohen Anteil an schnellabbaubare Inhaltsstoffen (wie beispielsweise Saccharose) gezielt zur Ausgestaltung der dynamischen Methanbildung eingesetzt wurde (Abbildung 25). Entsprechend setzt sich der Fütterungsplan aus der täglichen Substratzugabe von Maissilage sowie zwei oder vier zusätzlichen Fütterungen von Zuckerrübensilage zusammen. Die konkreten Substratmengen wurden durch Erfahrungswerte im Rahmen der ursprünglichen Versuchsplanung heuristisch vorgegeben [2].

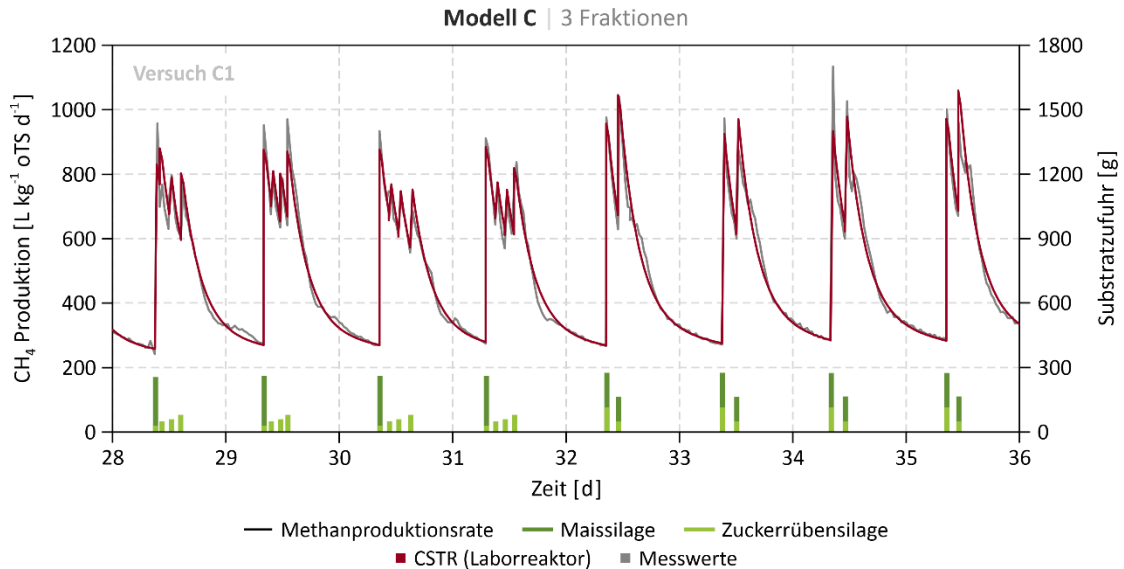


Abbildung 25: Simulationsergebnisse der bedarfsorientierten Methanproduktion im Labormaßstab

Auf Basis der Modellerweiterung (siehe Abbildung 17 in Kapitel 1.3) ist es nun möglich, gezielt zwei Substrate mit unterschiedlichen Fraktionsanteilen im Modell zu beschreiben. Dies resultiert im Modell A in drei unbekanntem Modellparametern (jeweils ein Fraktionsanteil von Mais- und Zuckerrübensilage sowie eine Reaktionskonstante) und in Modell B in sechs unbekanntem Modellparametern (jeweils zwei Fraktionsanteile für Mais- und Zuckerrübensilage sowie zwei Reaktionskonstanten), welche im Rahmen der Modellanpassung anhand der implementierten Schätzverfahren gemäß Tabelle 9 ermittelt werden.

Tabelle 9: Identifizierte Parameter und Anpassungsgüte zur Simulation von Experiment C^a

| Versuch – Substrate | Modell A 1 Fraktion | | | | Modell B 2 Fraktionen | | | | | |
|---------------------|---------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|-----------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------|
| | f_1 [-] | k_1 [d ⁻¹] | BMP [L kg ⁻¹] | ME [-] | f_1 [-] | f_2 [-] | k_1 [d ⁻¹] | k_2 [d ⁻¹] | BMP [L kg ⁻¹] | ME [-] |
| C1 – Maissilage | 0,94 | 2,1 | 394 ^b | 0,71 | 0,58 | 0,36 | 0,001 ^c | 5,0 | 394 ^b | 0,89 |
| C1 – Zuckerrüben | 0,93 | | 393 ^b | | 0,10 | 0,84 | | | 393 ^b | |
| C2 – Maissilage | 0,77 | 0,36 | 323 | 0,85 | 0,47 | 0,31 | 0,035 | 1,4 | 325 | 0,91 |

a) Fraktionsanteil f_i , Reaktionskonstante erster Ordnung k_i , biochemisches Methanpotential (BMP) und Modelleffizienz (ME)

b) Obere Parametergrenze von 394 bzw. 393 L CH₄ kg⁻¹ oTS auf Basis der gemessenen Methanproduktion im Batchversuch.

c) Untere Parametergrenze von 0,001 d⁻¹ für die unbekanntem Reaktionskonstante erster Ordnung.

Durch das eingeschränkte Funktionsverhalten ist im Modell A mit einer einzelnen Fraktion an abbaubarer FoTS nur mit einer geringen Anpassungsgüte (ME = 0,71) zu rechnen. Dabei lässt sich bereits mit zwei Fraktionen im Modell B ein erheblich besseres Simulationsergebnis (ME = 0,89) erzielen. Zusätzliche Fraktionen (wie im Modell C) führen dabei zu keiner weiteren Verbesserung der Simulationsergebnisse.

Um sinnvolle Modellparameter zu garantieren wurde der Gesamtanteil an FoTS (Summe der Einzelfraktionen) durch das theoretische Methanpotential (394 L CH₄ kg⁻¹ oTS für Maissilage und 393 L CH₄ kg⁻¹ oTS für Zuckerrübensilage) der einzelnen Substrate begrenzt. Entsprechend wird in allen Modellen die maximal verfügbare FoTS mit $f_1 = 0,94$ und $f_2 = 0,93$ ermittelt.

Durch den Einsatz von Zuckerrübensilage ist die Bruttoreaktionskonstante im Modell A ist vergleichsweise hoch. Für präzise Simulationsergebnisse im Model B werden dabei zwei unterschiedliche Reaktionskonstante an der unteren und oberen Grenze ($k_1 = 0,001$ und $k_2 = 5 \text{ d}^{-1}$) der mögliche Funktionswerte ermittelt. Hingegen bei Maissilage der Anteil an Langsam abbaubaren Substratbestandteile leicht überwiegt (62 % der FoTS), ist die Zuckerrübensilage eindeutig durch einen größeren Anteil an schnell abbaubaren Inhaltsstoffen (89 % der FoTS) gekennzeichnet. Dies entspricht dem typischen Abbauverhalten bei der Substrate [24].

Die stark verzerrten Modellparameter an den Grenzen der sinnvollen Wertebereiche deuten dabei auf eine nicht repräsentative Modellstruktur hin. Im Vergleich zu detaillierten Modellstrukturen auf Basis detaillierter stöchiometrischer Abbaupfade wird somit deutlich, dass die entwickelten Modellvarianten letztendlich nur eine starke Vereinfachung bzw. empirische Näherungen (ähnlich einer Regression) des eigentlich Systemverhaltens darstellen. Somit lässt sich das Modell für eine realitätsnahe Simulation oder Vorhersage der dynamischen Methanproduktionsrate im flexiblen Anlagenbetrieb verwenden; eine belastbar Substrate- und Prozesscharakterisierung auf Basis der identifizierten Modellparameter ist dabei nur bedingt sinnvoll möglich.

Grundsätzlich lassen sich die Modelle durch die zugrunde liegenden Bilanzgleichungen unter Berücksichtigung der Massenerhaltung dennoch für eine Plausibilitätsprüfung der vorhandenen Messwerte verwenden. Somit können Modellparameter in der Nähe der üblichen bzw. sinnvollen Grenzwerte auch Hinweise über mögliche Messfehler liefern. In diesem Sinne ist die Genauigkeit der Methanproduktionsrate durch die hohen Methanpotential der beiden Substrate und die schnellen Reaktionskonstanten im Experiment C1 kritisch zu hinterfragen.

Aufbauend auf den Laborversuchen wurde im Experiment C2 die bedarfsgerechte Methanbereitstellung auch im großtechnischen Anlagenbetrieb an der Forschungsbiogasanlage (FBGA) des DBFZ untersucht. Die Substratzufuhr wurde dabei ursprünglich durch ein modellbasiertes Regelungsverfahren (*Model Predictive Control*, MPC) auf Basis einer vereinfachten Modellstruktur des etablierten ADM1 ermittelt [22,23].

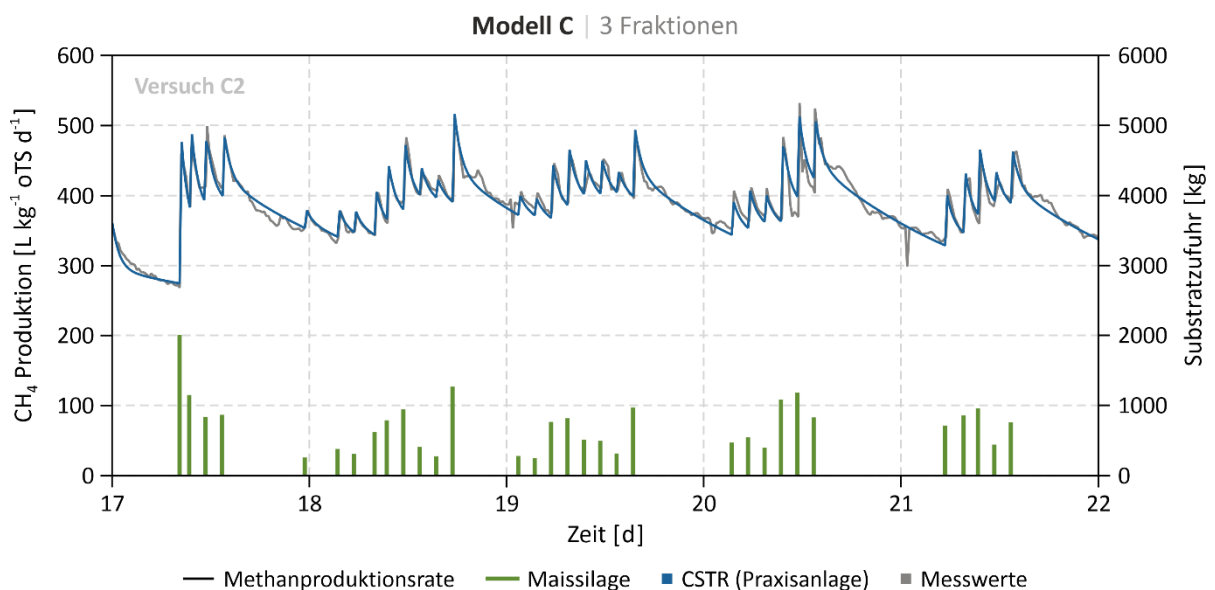


Abbildung 26: Simulationsergebnisse der bedarfsorientierten Methanproduktion im Praxismaßstab

Grundsätzlich ist bereits das Modell A durch eine gute Modellgenauigkeit ($ME = 0,85$) gekennzeichnet (Tabelle 9). Dennoch führt Model B auch hier zu einer erkennbaren Verbesserung der Simulationsergebnisse ($ME = 0,91$). Im Vergleich zu den labortechnischen Untersuchungen zur Vergärung von Mais- und Zuckerrübensilage liegt dem großtechnischen Versuch unter Berücksichtigung der konkreten Raumbelastung im Durchschnitt auch ein geringerer spezifischer Methanertrag zu Grunde. Dies spiegelt sich auch in den identifizierten Modellparameter wider.

So befindet sich das Methanpotential für Maissilage mit $325 \text{ L kg}^{-1} \text{ oTS}$ (und einem Fraktionsanteil von $0,77 \text{ g FoTS g oTS}$) im mittleren Bereich der verfügbaren Literaturwerte. So sind sowohl niedriger Methanpotentiale von als auch höhere Methanpotentiale bekannt.

Die kinetischen Reaktionskonstante im Model A entspricht vergleichbaren Untersuchungen zur Abbaukinetik von Maissilage. Die beiden Reaktionskonstanten im Model B sind mit Literatur- und Erfahrungswerten bei der Simulation nachwachsenden Rohstoffen vergleichbar. In diesem Sinne bilden die ermittelten Modellparameter auch eine belastbare Grundlage zur Substrat- und Prozesscharakterisierung. Entsprechend sind die entwickelten Modellierungsverfahren auch für eine verlässliche Vorhersage der flexiblen Methanproduktion an großtechnischen Biogasanlagen geeignet.

Potentiale und Grenzen der modellbasierten Vorhersage der bedarfsgerechten Biogasproduktion

Auf Basis der Projektergebnisse konnten abschließend konkrete Potentiale und Grenzen bei der modellbasierten Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion an Praxisanlagen definiert werden.

Potentiale

Die entwickelten Modellstrukturen ermöglichen eine präzise Simulation der Biogas- oder Methanproduktion bei schnellen Rechenzeiten und robuster Parameteridentifikation. Zur Anwendung werden nur die Massen, Beschickungszeitpunkte und oTS-Gehalte der eingesetzten Substrate sowie die Messung der Biogas- oder Methanproduktionsrate benötigt. Zudem ist durch die semi-mechanistische Modellstruktur und die zugrundeliegenden Massenbilanzen (und biochemischen Gesetze) jederzeit plausibles und belastbares Funktionsverhalten garantiert. Zudem können die resultierenden Modellparameter zum Biogasbildungspotential oder der Abbaukinetik gezielt zur Prozess- und Substratcharakterisierung interpretiert werden.

Grenzen

Durch das stark vereinfachte Prozessverhalten lässt sich anhand der aktuellen Modellstruktur keine Prozessinhibierung simulieren oder vorhersagen. Stabile Prozessbedingungen lassen sich dennoch durch die Begrenzung der stündlichen, täglichen und wöchentlichen Fütterungsmengen einzelner Substrate garantieren. Zusätzlich werden physikochemische Reaktionen (z. B. zur Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid) in der beschriebenen Modellvariante vernachlässigt. Dabei konnten in weiterführenden Untersuchungen (BioSim, 2219NR333, BMEL; FlexApp, 2219NR333, BMEL) bereits entsprechende Funktionsterme in den praxisnahen Reaktionsmodellen erfolgreich ergänzt werden [27]. Die größte Herausforderung bei der Anwendung im großtechnischen Anlagenbetrieb ist die Verfügbarkeit präziser Messdaten der Biogasproduktion und/oder Gasspeicherfüllstände. Da sich die Laboranalysen und -versuche nicht direkt zur Beschreibung der Praxisanlagen verwenden lassen, werden zur Modellanpassung weiterhin belastbare Daten zur Parameteridentifikation im regulären Anlagenbetrieb benötigt.

Entsprechend sind alternative Messverfahren oder Konzepte zur Messwertvalidierung an großtechnischen Biogasanlagen zu entwickeln. Auch könnten lernbasierte Verfahren zur besseren Übertragbarkeit von Laborversuchen auf Praxisanlagen eingesetzt werden. Hier lassen sich auch hybride Modellierungsverfahren durch die Kombination der entwickelten Prozessmodelle mit phänomenologischen Modellierungsmethoden auf Basis maschinellem Lernen verwenden.

2. Verwertung

Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde ein praxisnahes Prozessmodell für die Prognose der flexiblen Biogasproduktion an großtechnischen Biogasanlagen weiterentwickelt und anhand unterschiedlicher Messdaten von Labor- und Praxisanlagen evaluiert. Gemäß der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung war zu keinem Zeitpunkt geplant, eine kommerziell anwendbare Software zu entwickeln. Vielmehr sollen die Projektergebnisse für wissenschaftliche und technische Anwendungen einer breiten Öffentlichkeit (wie z. B. Wissenschaftlern und Anlagenbetreibern) zur Verfügung gestellt werden. Entsprechend wurden keine Schutzrechte (Patente oder Marken) angemeldet. Die wirtschaftlichen, wissenschaftlichen und technischen Verwertungsmöglichkeiten werden im Folgenden erläutert.

2.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Schaffung neuer und Sicherung bestehender Märkte

Für großtechnische Biogasanlagen bietet das Prognosetool eine praxistaugliche Hilfestellung, um langfristig einen effizienten und bedarfsgerechten Anlagenbetrieb zu realisieren. So lassen sich insbesondere für Bestandsanlagen, deren EEG-Vergütung in den nächsten Jahren ausläuft, durch eine flexible Biogasproduktion neue Vermarktungsmöglichkeiten am Strommarkt (z. B. *Day-Ahead*-Markt der europäischen Strombörse *EPEX Spot*) erschließen. Im Vergleich zur bedarfsgerechten Strombereitstellung durch die Zwischenspeicherung des kontinuierlich erzeugten Biogases, können insbesondere bei langen Speicherintervallen zusätzliche Kosten für die erforderlichen Gasspeichervolumina eingespart werden [28].

Sicherung vorhandener und Schaffung neuer Arbeitsplätze in Deutschland

Mit einer flexiblen Biogasbereitstellung durch eine modellbasierten Substrateinsatzplanung auf Basis der entwickelten Simulationsmodelle lassen sich – ggf. in Kombination mit anderen innovativen technologischen Neuerungen und Geschäftsideen – der Weiterbetrieb von Bestandsanlagen auch nach Auslauf der bisherigen EEG-Vergütung ermöglichen und damit Arbeitsplätze sichern. Anlagenhersteller können praxisnahe Modellstrukturen als belastbare Grundlage für eine zunehmende Automatisierung der anaeroben Biogaserzeugung verwenden. In Kombination mit zusätzlichen Modellierungs- und Optimierungsverfahren (z. B. maschinellem Lernen) können neue Arbeitsplätze zur Entwicklung digitaler Lösungen für eine modellbasierte Zustandsüberwachung und Prozessführung geschaffen werden.

Vorbereitung von Marktpotenzialen

Durch die zunehmende Entwicklung von integrierten Prozessen zur kombinierten stofflichen und energetischen Nutzung von organischen Rest- und Abfallstoffen gewinnt der bedarfsgerechte Betrieb von Biogasanlagen in Zukunft erheblich an Bedeutung. Bei fluktuierender Energiebereitstellung durch einen hohen Anteil erneuerbarer Energien ist die flexible Biogasproduktion über längere Zeitspannen von

mehreren Tagen kostengünstiger als eine Zwischenspeicherung des Biogases. Zusätzlich wird auch die Digitalisierung und Automatisierung unterschiedliche Prozesse und Komponenten an Biogasanlagen in Zukunft steigen. Durch das komplexe (nicht lineare) Systemverhalten bieten modellbasierte Verfahren klare Vorteile gegenüber klassischen Steuerungs- und Regelungskonzepten. Die Projektergebnisse lassen sich von den Verbundpartnern somit gezielt zur Vorbereitung entsprechender Marktpotentiale und technischer Lösungen verwenden.

Effizienzsteigerung in der Wertschöpfungskette und nachhaltigeres Wirtschaften

Anhand der im Verbundvorhaben entwickelten Prozessmodelle lassen sich die Abweichungen zwischen der geplanten bzw. erforderlichen und der real erzeugten Biogasmenge reduzieren. Dadurch können die Erlöse (Einhaltung eines wirtschaftlich optimalen Fahrplans) gesteigert und die Kosten (Minimierung der eingesetzten Substratmengen und des erforderlichen Gasspeichervolumens) der Anlage minimiert werden. So lassen sich der optimale Fahrplan bei einer bedarfsgerechten Strombereitstellung durch Biogasanlagen einhalten oder der optimale Substrateinsatz im Rahmen einer technischen Störung oder Wartung mithilfe entsprechender Modellrechnungen ermitteln. Zudem können durch den Vergleich der berechneten Biogasproduktion mit den konkreten Messwerten im Betriebstagebuch wertvolle Aussagen zur Effizienz der Vergärungsprozesse ermittelt werden.

2.2 Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Schaffung von *Know-How* und Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens haben die Projektpartner zahlreiche Erkenntnisse zur praxisnahen Anwendung von vereinfachten Reaktionsmodellen im regulären Praxisbetrieb von großtechnischen Biogasanlagen gewonnen. Neben der Modellentwicklung und Identifikation unbekannter Modellparameter sind gezielt die Möglichkeiten und Herausforderungen bei der Datenbereitstellung an großtechnischen Biogasanlagen ermittelt worden. Die entwickelten Verfahren und implementierten Modellstrukturen werden dabei bereits von den Projektpartnern in aktuellen bzw. weiterführenden Forschungsvorhaben am DBFZ (BioSim, 2219NR333, BMEL; FlexApp, 2219NR333, BMEL), zusätzlichen Beratungsaktivitäten oder Lehrveranstaltungen an der Fachhochschule Münster verwendet. Vorträge auf nationalen und internationalen Tagungen bestätigen die wissenschaftliche Konkurrenzfähigkeit der beteiligten Verbundpartner. Die bedarfsgerechte Energiebereitstellung aus erneuerbaren Ressourcen sowie die integrierte stoffliche und energetische Nutzung von Rest- und Abfallbiomasse wird auch in anderen Ländern in Zukunft erheblich an Bedeutung gewinnen. Damit fördern die Projektergebnisse auch die Wettbewerbsfähigkeit des Wissenschafts- und Technologiestandorts Deutschlands.

Transfer zu Nutzergruppen

Durch den kontinuierlichen Kontakt zu Anlagenherstellern und -betreibern sowie durch weiterführende Forschungsvorhaben zur großtechnischen Anwendung modellbasierter Regelungskonzepte (FlexApp, 2219NR333, BMEL) erfolgt eine kontinuierliche Übertragung der Projektergebnisse zu weiteren Nutzergruppen. Zusätzlich werden die Projektinhalte auch auf wissenschaftlichen Tagungen vorgestellt oder in gemeinsamen Untersuchungen mit weiteren Forschungsinstituten angewendet. So konnten die entwickelten Modellstrukturen bereits in einem Promotionsvorhaben an der Ruhr-Universität Bochum erfolgreich zur Prozesssimulation der bedarfsgerechten Biogasproduktion in einem Bioenergiedorf eingesetzt werden [29].

Erschließung des Anwendungspotenzials

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens beinhalte wichtige Erkenntnisse zu der Entwicklung theoretischer Prozessmodelle sowie deren Anwendbarkeit für die Vorhersage der flexiblen Biogasproduktion in der Praxis. Damit wird ein erster Schritt zur potenziellen Erschließung des Anwendungspotenzials der flexiblen Biogasbereitstellung in hunderten bis einigen tausenden Biogasanlagen in Deutschland geschaffen. Weiterführende Folgeprojekte (ggf. mit Industriebeteiligung) können die implementierten Simulationsmodelle für eine modellbasierte Regelung der eingesetzten Substrate nutzen und im Rahmen weiterführender Praxisversuche im regulären Anlagenbetrieb etablieren.

Verzahnung von Forschungs- und Funktionstechnologien

Mit der Weiterentwicklung der vereinfachten Modellstrukturen sowie der Validierung im Labor- und Praxismaßstab wurde eine direkte Verzahnung von Forschungs- und Funktionstechnologien im Verbundvorhaben geschaffen. Die Forschungsergebnisse bieten damit eine aussagekräftige Grundlage für die weiterführende Implementierung der entwickelten Prozessmodelle in modellbasierten Regelungskonzepten an großtechnischen Biogasanlagen.

2.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Verstetigung der Organisation

Die beteiligten Projektpartner (Universität Rostock und DBFZ) nutzen die unterschiedlichen Erkenntnisse des gemeinsamen Verbundvorhabens zu weiterführenden Forschungszwecken. Entsprechend werden die Projektergebnisse sowohl in aktuellen Forschungsvorhaben zur modellbasierten Prozessregelung als auch im Rahmen der Projektplanung zukünftiger Forschungsvorhaben berücksichtigt. Dies betrifft insbesondere die grundsätzliche Entwicklung und Anwendung praxisnaher Modellstrukturen (einschließlich der Identifikation unbekannter Modellparameter) sowie deren Anwendung zur bedarfsgerechten Biogaserzeugung an Praxisanlagen. Somit können die Projektergebnisse sowohl an der Universität Rostock als auch am DBFZ den bereits etablierten Forschungsschwerpunkt an beiden Einrichtungen verstetigen. Die beteiligten KMU (IBKE und IE) können auf Basis der Ergebnisse des Forschungsvorhabens ihr Beratungsangebot für Biogasanlagenbetreiber erweitern.

Schaffung (und Kooperation zur Verbreitung) von weiterem *Know-How*

Die Projektergebnisse werden sowohl zur praxisnahen Forschung als auch für Beratungsleistungen in der großtechnischen Anlagenpraxis genutzt. Somit ist sichergestellt, dass auch nach Vorhabensende eine Weiterentwicklung der Forschungsinhalte erfolgt. Dabei werden bereits in weiterführenden Forschungsvorhaben (BioSim, 2219NR333, BMEL; FlexApp, 2219NR333, BMEL) als auch in der praktischen Anwendung neue Erkenntnisse hinzugewonnen, welche zur kontinuierlichen Verbesserung der modellbasierten Vorhersage der Biogas- bzw. Methanproduktion im flexiblen Anlagenbetrieb führen. Zusätzlich führen Vorträge auf Fachkonferenzen oder Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften zu einer Verbreitung ausgewählte Projektergebnisse.

Kontaktaufnahme mit potenziellen Akteuren für die weitere Umsetzung der Ergebnisse

Im Rahmen zukünftiger Untersuchungen soll in direktem Kontakt mit Anlagenherstellern oder Firmen zur Prozessautomatisierung der Einsatz entsprechender Modelle geprüft und gezielt für den Einsatz in praxisnahen Automatisierungskonzepten überarbeitet werden. Hier können beispielsweise bestehende Modellstrukturen durch datenbasierte Verfahren auf Basis maschinellem Lernen erweitern werden, um die Übertragbarkeit von Laborversuchen auf den Praxisbetrieb zu verbessern.

Weiterhin lassen sich die Projektergebnisse auch für die Entwicklung zukünftiger Anlagen- und Betriebskonzepte zur bedarfsgerechte Energiebereitstellung aus Biogasanlagen verwenden. Im Hinblick auf die zukünftigen Entwicklungen der technisch-ökonomischen Rahmenbedingungen im Energiesystem sind die konkreten Betriebsweisen und die Anlagenkonzepte von Biogasanlagen kontinuierliche weiterzuentwickeln. Dabei können die Ergebnisse des Verbundvorhabens sowohl in weiteren Forschungsprojekten als auch in der praktischen Anwendung Teil einer Gesamtlösung werden.

3. Erkenntnisse von Dritten

Entwicklung praxisnaher Modellstrukturen

Grundsätzlich existieren vielfältige Modellansätze zur Simulation anaerober Abbauprozesse. Dabei beinhalten die meisten Modellstrukturen repräsentative Referenzsubstanzen (für Kohlenhydrate, Proteine und Fette) um die Biogasbildung anhand konkreter biochemischer Reaktionsgleichungen und zusätzlicher Inhibierungsfunktionen oder physikochemischer Prozesse (Phasenübergangsprozesse und pH-Wertberechnung) zu beschreiben. Für die praxisnahe Anwendung haben sich jedoch insbesondere vereinfachte Modellstrukturen mit einer begrenzten Anzahl an unbekanntem Modellparametern und robustem Systemverhalten etabliert. Hier sind sowohl massebasierte Vereinfachungen des etablierten ADM1 [7] sowie vergleichbaren Modellstrukturen auf Basis des chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) bekannt [30].

Entsprechend der im Verbundvorhaben entwickelten Modellierungsverfahren lassen sich auch praxisnahe Modellstrukturen auf Basis der FoTS und einfacher Reaktionskinetiken erster Ordnung zur Simulation der Biogasproduktionsrate bei der Vergärung landwirtschaftlicher Substrate verwenden (siehe Abbildung 14). Entsprechende Modelle lassen sich für den diskontinuierlichen Betrieb analytisch lösen und werden häufig zur Bestimmung der kinetischen Parameter in Batchversuchen verwendet [12,17,18]. Dabei existieren nur vereinzelt Untersuchungen, welche vergleichbare Modellansätze zur Simulation kontinuierlich betriebener Biogasprozesse einsetzen [31,32].

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde dabei eine Untersuchung von Lafratta et al. (2021) zur Anwendung vergleichbarer Simulationsmodelle auf Basis einfacher Reaktionen erster Ordnung bekannt [33]. Neben der Hydrolyse und Acido- bzw. Acetogenese wird dabei auch die acetoklastische Methanbildung in der dreistufigen Modellstruktur abgebildet. Somit lassen sich auch wertvolle Aussagen zur Prozessstabilität mit dem entwickelten Modellansatz ermitteln. Da die entwickelte Modellstruktur jedoch nur für den quasi-stationären Betrieb bei periodischer Fütterung entwickelt wurde, lassen sich die entsprechenden Methoden nicht zur Vorhersage der bedarfsgerechten Biogasproduktion bei flexiblem Substrateinsatz verwenden. Somit sind aktuell keine vergleichbaren Untersuchungen zur Simulation flexibler Betriebskonzepte von Biogasanlagen auf Basis einfacher Reaktionsmodelle erster Ordnung bekannt.

Anwendung praxisnaher Prozessmodelle

Neben mechanistischen Modellstrukturen unter Verwendung von bekannten biochemischen Abhängigkeiten und Gesetzen, lassen sich auch phänomenologischer oder empirische Modellierungsverfahren zur nicht linearen Vorhersage der dynamischen Biogasproduktion verwenden. Mit maschinellem Lernen existieren dabei vielfältigen Methoden, welche in Abhängigkeit von den konkreten Betriebsparametern eine detaillierte Simulation unterschiedlicher Kenngrößen im anaeroben Biogasprozesse erlauben [34–36].

So wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der Universität Hohenheim (PowerLand, 22404717, BMEL) ein multiples lineares Regressionsmodell zur Vorhersage der flexiblen Gasproduktion an der großtechnischen Forschungsbiogasanlage „Unterer Lindenhof“ entwickelt [37]. Durch die einfache Modellstruktur konnte das Regressionsmodell erfolgreich für die Substrateinsatzoptimierung zur bedarfsgerechten Biogas- bzw. Strombereitstellung bei geringen Rechenzeiten eingesetzt werden [1].

Im Vergleich zu den verwendeten Modellierungsverfahren im vorliegenden Verbundvorhaben lassen sich hier unterschiedliche Vor- und Nachteile der verwendeten Methoden definieren. Durch die kontinuierliche Anpassung anhand der verfügbaren Prozessdaten, wird hier eine präzise Vorhersage der Biogasproduktion für die nächsten Betriebstage ermöglicht. Dabei muss beim Einsatz von unbekanntem Substraten bzw. Substratmischungsverhältnissen mit einer neuen Lernphase (ohne belastbare Simulationsergebnisse) gerechnet werden. Weiterhin lässt sich das Regressionsmodell ohne eine präzise Gasmengenerfassung im kontinuierlichen Anlagenbetrieb nicht verwenden. Auch sind bisher keine biochemischen oder physikalischen Grenzwerte (z. B. auf Basis einer Massenbilanz) hinterlegt, welche das Funktionsverhalten des Modells in sinnvollen Wertebereichen hält, sodass auch Messfehler mitunter zur Anpassung der Modellparameter verwendet werden.

Grundsätzlich zeigen beide Ansätze, dass keine komplexen mathematischen Funktionen zur Beschreibung der dynamischen Biogas- oder Methanproduktion aus landwirtschaftlichen Rest- und Abfallstoffen erforderlich sind. Dabei ist in Zukunft eine sinnvolle Kombination von wissens- und lernbasierten Verfahren (hybride Modellstrukturen) zu evaluieren, um sowohl bekanntes Prozesswissen bei der Modellentwicklung zu berücksichtigen, aber auch entsprechende Abweichungen zwischen der simulierten und gemessenen Biogasproduktion im regulären Anlagenbetrieb kontinuierlich zu verringern.

Aussagekraft von Batchversuchen

Neben der grundsätzlichen Methodenentwicklung und Überarbeitung der verfügbaren Richtlinien zur Versuchsdurchführung und -auswertung (z. B. VDI 4630) haben sich insbesondere Ringversuche als eine wertvolle Informationsquelle zur Vergleichbarkeit und Aussagekraft von Batchversuchen etabliert. In Deutschland werden sowohl vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) in Kooperation mit dem Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) als auch von der Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) jährlich Ringversuche für die landwirtschaftliche Biogaspraxis angeboten.

Zusätzlich wurde in den vergangenen Jahren in einem Verbund von 37 internationalen Forschungseinrichtungen (einschließlich des DBFZ) ein umfangreicher Ringversuch auf Basis einer einheitlichen Methodenvorschrift zur Versuchsdurchführung von Batchversuchen etabliert [38,39]. Durch die vielfältigen Teilnehmerlabore aus unterschiedlichen Ländern (mit unterschiedlicher fachlicher Ausrichtung) konnten mitunter erhebliche Abweichungen zwischen den Laboren nachgewiesen werden. Die detaillierte wissenschaftliche Auswertung zeigt, dass sich keine eindeutigen oder einzelnen Einflussfaktoren identifizieren

lassen, welche die allgemeinen Messunsicherheiten von Batchversuchen entscheidend verringern [40]. Dabei konnten geringfügige statistische Abhängigkeiten bei den verwendeten Versuchssystemen, der Versuchsdauer sowie der Einfluss möglicher Berechnungsfehler nachgewiesen werden. Der Austausch und Einsatz von identischem Impfmateriale (Inokulum) führte jedoch nicht zu einheitlicheren Ergebnissen der teilnehmenden Labore. Dennoch konnten durch die Kombination einzelner Kriterien konkrete Anforderungen (wie z. B. Sollwertbereich für das Methanpotential von mikrokristalliner Cellulose) definiert werden, welche die Auswahl der validierten Labore einschränkt und damit die Angabe eines engeren Wertebereichs der Ringversuchsergebnisse erlaubt [38]. Anhand der überarbeiteten Validierungskriterien wird somit eine präzise Bestimmung des Methanpotentials in Batchversuchen ermöglicht.

Anhand der charakteristischen Verlaufskurven der Methanproduktion im internationalen Ringversuch wurde in aktuellen Untersuchungen mit dem Verbundpartner am DBFZ eine detaillierte Auswertung zur Vergleichbarkeit der Abbaukinetik aus Batchversuchen durchgeführt [26]. Entsprechend der Ergebnisse zum maximalen Methanpotential (BMP) konnten auch hier keine wesentlichen Einflussgrößen zur Reduzierung der Abweichungen zwischen den teilnehmenden Laboren ermittelt werden. Dabei ließen sich keine eindeutigen Validierungskriterien für eine einheitliche Bestimmung der Abbaukinetik in der Batchversuchen ermitteln. Die vielfältigen Ergebnisse aus dem internationalen Ringversuche sind in einer umfangreichen Methodensammlung (inkl. Grundlagen, Literatur und Software) über die Webseite www.dbfz.de/BMP zur kostenlosen Verwendung für unterschiedlicher Nutzergruppen frei verfügbar.

Weiterhin ist auch die Übertragbarkeit der im Batchversuch ermittelten Kinetiken bis heute nicht eindeutig nachgewiesen. Vergleichende Untersuchungen haben ähnliche oder niedrigere Reaktionsraten erster Ordnung im Batchversuch nachgewiesen [41–43]. Im Rahmen der vorliegenden Projektergebnisse konnte hingegen höhere Abbaugeschwindigkeit im Batchversuch ermittelt werden (Tabelle 8). Im Allgemeinen kann somit davon ausgegangen werden, dass sich die kinetischen Ergebnisse von Batchversuchen nicht direkt für den Einsatz an großtechnischen Biogasanlagen verwenden lassen. Entsprechend werden adaptive und lernbasierte Verfahren benötigt, um die Übertragbarkeit der Laborergebnisse hinsichtlich einer der sinnvollen Anwendung im großtechnischen Anlagenbetrieb zu verbessern.

4. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Forschungsvorhaben konnte einzelne Beiträge zur großtechnischen Anwendung der entwickelten Modellstrukturen auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt und diskutiert werden. Zusätzlich wurde das entwickelte Reaktionsmodell in einer Gemeinschaftspublikation im Rahmen eines Promotionsverfahrens an der Ruhr-Universität Bochum (Körper et al.) angewandt.

- Winkler, M.; Weinrich, S: Modellbasierte Ermittlung des biochemischen Methanpotenzials und der Abbaukinetik in Batch- und kontinuierlich betriebenen Biogasreaktoren in unterschiedlichen Maßstäben. Ifak 29. SIMBA-Anwendertreffen. Blankenburg, Mai 2023.
- Winkler, M.; Weinrich, S: Comparative Model-based Estimation of Biochemical Methane Potential and Degradation Kinetics in Batch and Continuous Operation at two Scales. 6th International conference on monitoring and process control of anaerobic digestion processes. Leipzig, März 2023.
- Körper, M.; Weinrich, S.; Span, R.; Gerber, M. (2022): Demand-oriented biogas production to cover residual load of an electricity self-sufficient community using a simple kinetic model. *Bioresource Technology*, 361, 127664.

- Weinrich, S.; Delory, F.; Astals, S.; Koch, K.; Hafner, S.D.: Simple kinetic models for clear comparison of anaerobic digestion at different scales and operating conditions. 17th IWA World Conference on Anaerobic Digestion, Ann Arbor, USA, Juni 2022.
- Grope, J.; Weinrich, S.; Nelles, M.; Scholwin, F.: Simulating biogas production in agricultural biogas plants based on a first-order reaction model. 5th International conference on monitoring and process control of anaerobic digestion processes. Online, März 2021.

Durch den Abbruch der projektbegleitenden Promotionsvorhaben konnten die Inhalte des Forschungsvorhabens jedoch nicht im ursprünglich geplanten Umfang veröffentlicht werden. Grundsätzlich sind jedoch weitere Veröffentlichungen zur detaillierten Beschreibung der entwickelten Modellstrukturen und den experimentellen Versuchen zur Modellvalidierung in wissenschaftlichen Fachzeitschriften geplant. Zudem wird der Quelltext der implementierten Modelle über öffentliche Plattformen (z. B. *GitHub*) zur kostenlosen Verwendung von vielfältigen Nutzergruppen bereitgestellt.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Dittmer, C., Ohnmacht, B., Krümpel, J., Lemmer, A. (2022). Model Predictive Control: Demand-Orientated, Load-Flexible, Full-Scale Biogas Production. *Microorganisms* 10(4), 804.
- [2] Mauky, E. (2018). A model-based control concept for a demand-driven biogas production. Dissertation. Universität Rostock.
- [3] Gaida, D. (2014). Dynamic real-time substrate feed optimization of anaerobic co-digestion plants. Dissertation. Leiden University.
- [4] 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, 114–119.
- [5] Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W., Siegrist, H., Vavilin, V. A. (2002). The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). *Water Science and Technology* 45(10), 65–73.
- [6] Weinrich, S., Mauky, E., Schmidt, T., Krebs, C., Liebetrau, J., Nelles, M. (2021). Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) - Laboratory experiments and model application. *Bioresource technology* 333, 125104.
- [7] Weinrich, S., Nelles, M. (2021). Systematic simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) - Model development and stoichiometric analysis. *Bioresource technology* 333, 125124.
- [8] Meola, A., Weinrich, S. (2023). Hybrid modelling of dynamic anaerobic digestion process in full-scale with LSTM NN and BMP measurements. European Symposium on Artificial Neural Networks, Computational Intelligence and Machine Learning (ESANN 2023), Brügge, Belgien.

- [9] Meola, A., Winkler, M., Weinrich, S. (2023). Metaheuristic optimization of data preparation and machine learning hyperparameters for prediction of dynamic methane production. *Bioresource technology* 372, 128604.
- [10] Verein Deutscher Ingenieure (2016). *Vergärung organischer Stoffe - Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche*. Beuth Verlag, Berlin.
- [11] Amon, T., Bischoff, M., Clemens, J., Heuwinkel, H., Keymer, U., Meißauer, G., Oechsner, H., Paterson, M., Reinhold, G., Roth, U., Schelle, H., Weiland, P., Welsch, W., Wulf, S., Zerr, W. (2015). *Gasaubeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. KTBL, Darmstadt.
- [12] Weinrich, S., Astals, S., Hafner, S. D., Koch K. (2020). Kinetic modelling of anaerobic batch tests. In Liebetrau, J., Pfeiffer, D. (Hrsg.): *Collection of Measurement Methods for Biogas*. Leipzig, 349–369.
- [13] Weißbach, F. (2011). Das Gasbildungspotenzial von Schweinegülle bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 66(6), 460–464.
- [14] Weißbach, F. (2008). Zur Bewertung des Gasbildungspotenzials von nachwachsenden Rohstoffen. *Landtechnik* 63(6), 356–358.
- [15] Weißbach, F. (2009). Das Gasbildungspotenzial von Halm- und Körnerfrüchten bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 64(5), 317–321.
- [16] Stur, M., Pohl, M., Krebs, C., Mauky, E. (2022). Charakterisierung von Biogasspeichern: Einflüsse und Methodenvergleich. *Landtechnik* 77(1), 21–46.
- [17] Brulé, M., Oechsner, H., Jungbluth, T. (2014). Exponential model describing methane production kinetics in batch anaerobic digestion: a tool for evaluation of biochemical methane potential assays. *Bioprocess and biosystems engineering* 37(9), 1759–1770.
- [18] Pererva, Y., Miller, C. D., Sims, R. C. (2020). Existing Empirical Kinetic Models in Biochemical Methane Potential (BMP) Testing, Their Selection and Numerical Solution. *Water* 12(6), 1831.
- [19] György, A., Kocsis, L. (2011). Efficient Multi-Start Strategies for Local Search Algorithms. *Journal of Artificial Intelligence Research* 41, 407–444.
- [20] Donoso-Bravo, A., Mailier, J., Ruiz-Filippi, G., Vande Wouwer, A. (2013). Identification in an anaerobic batch system: global sensitivity analysis, multi-start strategy and optimization criterion selection. *Bioprocess and biosystems engineering* 36(1), 35–43.
- [21] Mauky, E., Jacobi, H. F., Liebetrau, J., Nelles, M. (2015). Flexible biogas production for demand-driven energy supply–feeding strategies and types of substrates. *Bioresource technology* 178, 262–269.

- [22] Mauky, E., Weinrich, S., Nägele, H.-J., Jacobi, H. F., Liebetrau, J., Nelles, M. (2016). Model Predictive Control for Demand-Driven Biogas Production in Full Scale. *Chemical Engineering and Technology* 39(4), 652–664.
- [23] 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.
- [24] Weinrich, S. (2018). Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen. Dissertation. Universität Rostock.
- [25] Koch, K., Hafner, S. D., Weinrich, S., Astals, S. (2019). Identification of Critical Problems in Biochemical Methane Potential (BMP) Tests From Methane Production Curves. *Frontiers in Environmental Science* 7, 178.
- [26] Hafner, S. D., Astals, S., Holliger, C., Koch, K., Nielsen, L., Refsahl, L., Weinrich, S. (2022). Assessing the value of kinetic results from biochemical methane potential tests: Reproducibility from a large inter-laboratory study. *Cleaner Chemical Engineering* 4, 100065.
- [27] Winkler, M., Weinrich, S. (2024). Extended Two-step Process Model for Simulation of Dynamic Biogas Production in Agricultural Anaerobic Digestion Plants. IWA World Conference on Anaerobic Digestion (IWA AD18), Istanbul, Türkei.
- [28] 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(5), 233–251.
- [29] Körber, M., Weinrich, S., Span, R., Gerber, M. (2022). Demand-oriented biogas production to cover residual load of an electricity self-sufficient community using a simple kinetic model. *Biore-source technology* 361, 127664.
- [30] Bernard, O., Hadj-Sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A., Steyer, J. P. (2001). Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnology and bioengineering* 75(4), 424–438.
- [31] López, I., Passeggi, M., Borzacconi, L. (2015). Validation of a simple kinetic modelling approach for agro-industrial waste anaerobic digesters. *Chemical Engineering Journal* 262, 509–516.
- [32] Janke, L., Weinrich, S., Leite, A. F., Schüch, A., Nikolausz, M., Nelles, M., Stinner, W. (2017). Optimization of semi-continuous anaerobic digestion of sugarcane straw co-digested with filter cake: Effects of macronutrients supplementation on conversion kinetics. *Biore-source technology* 245, 35–43.
- [33] Lafratta, M., Thorpe, R. B., Ouki, S. K., Shana, A., Germain, E., Willcocks, M., Lee, J. (2021). Development and validation of a dynamic first order kinetics model of a periodically operated well-mixed vessel for anaerobic digestion. *Chemical Engineering Journal* 426, 131732.

- [34] Cruz, A. I., Chuenchart, W., Long, F., Surendra, K. C., Renata Santos Andrade, L., Bilal, M., Liu, H., Tavares Figueiredo, R., Khanal, S. K., Fernando Romanholo Ferreira, L. (2022). Application of machine learning in anaerobic digestion: Perspectives and challenges. *Bioresource technology* 345, 126433.
- [35] Khan, M., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Kumar Khanal, S. (2023). Applications of artificial intelligence in anaerobic co-digestion: Recent advances and prospects. *Bioresource technology* 370, 128501.
- [36] Ling, J. Y. X., Chan, Y. J., Chen, J. W., Chong, D. J. S., Tan, A. L. L., Arumugasamy, S. K., Lau, P. L. (2024). Machine learning methods for the modelling and optimisation of biogas production from anaerobic digestion: a review. *Environmental science and pollution research international* 31(13), 19085–19104.
- [37] Dittmer, C., Krümpel, J., Lemmer, A. (2021). Modeling and Simulation of Biogas Production in Full Scale with Time Series Analysis. *Microorganisms* 9(2), 324.
- [38] Holliger, C., Astals, S., Laclos, H. F. de, Hafner, S. D., Koch, K., Weinrich, S. (2021). Towards a standardization of biomethane potential tests: a commentary. *Water Science and Technology* 83(1), 247–250.
- [39] Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., Wilde, V. de, Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., Laclos, H. F. de, Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., Heerenklage, J., Horvath, I. S., Jenicek, P., Koch, K., Krautwald, J., Lizasoain, J., Liu, J., Mosberger, L., Nistor, M., Oechsner, H., Oliveira, J. V., Paterson, M., Pauss, A., Pommier, S., Porqueddu, I., Raposo, F., Ribeiro, T., Rüscher, F., Strömberg, S., Torrijos, M., van Eekert, M., van Lier, J., Wedwitschka, H., Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology* 74(11), 2515–2522.
- [40] Hafner, S. D., Fruteau de Laclos, H., Koch, K., Holliger, C. (2020). Improving Inter-Laboratory Reproducibility in Measurement of Biochemical Methane Potential (BMP). *Water* 12(6), 1752.
- [41] Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E., Peck, M. W. (1993). Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass and Bioenergy* 5(1), 95–111.
- [42] Batstone, D. J., Tait, S., Starrenburg, D. (2009). Estimation of hydrolysis parameters in full-scale anaerobic digesters. *Biotechnology and bioengineering* 102(5), 1513–1520.
- [43] Jensen, P. D., Hardin, M. T., Clarke, W. P. (2009). Effect of biomass concentration and inoculum source on the rate of anaerobic cellulose solubilization. *Bioresource technology* 100(21), 5219–5225.

III. Anhang

A.1 Teilvorhaben 1: Universität Rostock

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Die Ziele des Teilvorhabens im vorliegenden Verbundvorhaben wurden weitestgehend erreicht. Die Kombination von Batchversuchen im Labormaßstab und der Prozessmodellierung war sehr erfolgreich. Die ermittelten Parameter waren für eine Modellentwicklung sehr gut geeignet und die entwickelte standardisierte Versuchsmethode ist als erfolgreich anzusehen. Auftretende Herausforderungen konnten durch den Austausch im Konsortium gelöst werden. Die praktische Anwendbarkeit der Methode und deren Überführung in den realen Anlagenbetrieb ist möglich. Die Expertise der Universität Rostock auf dem Gebiet der praxisorientierten Modellierung wurde durch das Projekt wesentlich verbessert.

Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens

Die Universität Rostock war in fast allen Arbeitspaketen involviert. Durch die unerwartete Kündigung des wissenschaftlichen Mitarbeiters an der Professur Abfall- und Stoffstromwirtschaft wurde unter den Projektpartnern einvernehmlich beschlossen die geplanten Tätigkeiten in den zu bearbeitenden Arbeitspaketen an das Deutsche Biomasseforschungszentrum zu übertragen.

Arbeitspaket 1: Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor

- Abstimmung zur Probenahme und Durchführung der Batchversuche
- Organisation der Probennahme
- Durchführung der Batchversuche
- Zusammenfassung und Bewertung der Versuchsergebnisse

Arbeitspaket 2: Herausforderungen bei der Datenbereitstellung in der Praxis

- Abstimmung zu den erforderlichen Daten
- Klärung von Unsicherheiten bei den relevanten Laborversuchen
- Analyse und Lösungsvorschläge zur Fehlerminimierung der Datenbereitstellung an Praxisanlagen

Arbeitspaket 3: Weiterentwicklung des praxisnahen Modellansatzes

- Datenbereitstellung aus den Praxisanlagen

Arbeitspaket 5: Test des Prognosetools für eine flexible Biogaserzeugung

- Lösungsfindung bei unzureichenden Testergebnissen
- Definition der Möglichkeiten und Grenzen des Tools

Wesentlichen Ergebnisse des Teilvorhabens

Die entwickelte Standardmethode lässt sich auf andere Substrate anwenden und bietet erhebliches Potenzial bei der Implementierung von Wirtschaftsdüngern in laufende Biogaserzeugungsstrukturen.

A.2 Teilvorhaben 2: Deutsches Biomasseforschungszentrum

Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Das DBFZ war im Verbundvorhaben zur *Weiterentwicklung eines modellbasierten Prognosetools für die flexible Biogaserzeugung in großtechnischen Biogasanlagen (FlexiMod)* ursprünglich mit der *Datenaufbereitung und Weiterentwicklung bestehender Simulationsmodelle unter Berücksichtigung praxisnaher Prozessüberwachungstechnik* betraut. Entsprechend wurden bestehende Prozessmodelle hinsichtlich ihrer Anwendung im großtechnischen Praxisbetrieb überarbeitet und anhand unterschiedlicher Versuchsdaten im Labor- und Praxismaßstab evaluiert. Ein besonderer Schwerpunkt waren Untersuchungen zur Aussagekraft und Übertragbarkeit von Labormessungen zur Beschreibung der dynamischen Biogasproduktion im großtechnischen Anlagenbetrieb. Zusätzlich wurden dem DBFZ im Laufe der Projektbearbeitung weiteren Aufgaben der Universität Rostock übertragen. Dies beinhaltete damit auch die experimentelle Betreuung der unterschiedlichen Labor- und Praxisversuche am DBFZ als auch die Definition von Mindestanforderungen an Prozess-, Mess- und Leittechnik. Zusätzlich wurde gemeinsam mit dem Institut für Biogas, Kreislaufwirtschaft und Energie (IBKE) eine Betreiberumfrage zur messtechnischen Ausstattung und Verfügbarkeit zusätzlicher Laboranalysen an 26 Praxisanlagen durchgeführt und ausgewertet.

Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens

Gemäß der ursprünglichen bzw. erweiterten Arbeitsplanung im Verbundvorhaben wurden im Rahmen des Teilvorhabens am DBFZ die folgenden Inhalte in den Arbeitspaketen bearbeitet:

Arbeitspaket 1: Bestimmung der substratspezifischen Abbaukinetiken im Labor

- Abstimmung zur Probenahme und Durchführung der Batchversuche an der Universität Rostock
- Modellbasierte Auswertung und Bewertung der Versuchsergebnisse

Arbeitspaket 2: Herausforderungen bei der Datenbereitstellung in der Praxis

- Konzeptionierung und Auswertung der Betreiberbefragung zur Messtechnik an BGA
- Analyse und Lösungsvorschläge zur Fehlerminimierung der Datenbereitstellung an Praxisanlagen

Arbeitspaket 3: Weiterentwicklung des praxisnahen Modellansatzes

- Überarbeitung der Modellstruktur zur praxisnahen Prozesssimulation an Biogasanlagen
- Implementierung von Methoden zur Parameterschätzung und Simulation

Arbeitspaket 4: Schnittstellendefinition und Datenbereitstellung der Praxisanlagen

- Definition der Datenübertragung bzw. -bereitstellung
- Definition erforderlicher Laboranalysen

Arbeitspaket 5: Test des Prognosetools für eine flexible Biogaserzeugung

- Test unterschiedlicher Raumbelastungen und Substrate im Labor- und Praxismaßstab
- Definition der Möglichkeiten und Grenzen der Prozessmodelle hinsichtlich der Anwendung im flexiblen Anlagenbetrieb

Wesentlichen Ergebnisse des Teilvorhabens

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden am DBFZ die folgenden Projektergebnisse erzielt:

- Vereinfachte Reaktionsmodelle wurden hinsichtlich der Anwendung an großtechnischen Biogasanlagen erweitert und evaluiert. Die Modelle ermöglichen eine präzise und effiziente Abbildung der bedarfsgerechten Biogas- bzw. Methanproduktion im Labor- und Praxismaßstab und können als belastbare Grundlage zur modellbasierten Prozessführung im flexiblen Anlagenbetrieb eingesetzt werden.
- Durch die semi-mechanistische Modellstruktur lassen sich die Modellparameter (bei guter Anpassungsgüte) auch zur Substrat- und Prozesscharakterisierung verwenden. Die interpretierbare Modellstruktur und das eingeschränkte Funktionsverhalten (z. B. durch die zugrundeliegende Massenbilanz) besitzen damit Vorteile zu rein empirischen Verfahren auf Basis von maschinellem Lernen oder nichtlinearer Regression.
- Zur praxisnahen Modellanwendung wurden standardisierte Dateiformate für die Übertragung der erforderlichen Anlagen- und Prozessdaten entwickelt.
- Anhand der Prozessmodelle wurden Batchversuche der Universität Rostock ausgewertet und hinsichtlich der relevanten Modellparameter evaluiert. Die resultierenden Parameterwerte enthalten wichtige Informationen über die kinetischen Abbaueigenschaften der eingesetzten Substrate.
- Auf Basis der Modellparameter aus den diskontinuierlichen Batchversuchen wurde die flexible Biogasproduktion in kontinuierlichen Labor- und Praxisanlagen simuliert. Die Analyse der Simulationsergebnisse und identifizierten Modellparameter zeigt, dass die charakteristischen Abbaueigenschaften der unterschiedlichen Versuchs- bzw. Praxisanlagen nicht direkt übertragbar sind.
- Die Ergebnisse der Betreiberumfrage zur messtechnischen Ausstattung und Verfügbarkeit zusätzlicher Laboranalysen an Praxisanlagen geben wichtige Hinweise zum aktuellen Stand der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik an großtechnischen Praxisanlagen.
- Als Anforderungen für die praxisnahe Modellanwendung müssen lediglich drei Kenngrößen aus dem Leitsystem bzw. Betriebstagebuch der Praxisanlage bekannt sein:
 1. Substratmasse und Zeitpunkt der Beschickung
 2. Gehalt an organischer Trockensubstanz der eingesetzten Substrate
 3. Biogas- oder Methanproduktion im großtechnischen Anlagenbetrieb

Durch erhebliche Messunsicherheiten bei der Gasmengenerfassung und Gasspeicherfüllstandsmessung ist eine direkte Anwendung der Prozessmodelle an Bestandsanlagen damit häufig noch nicht möglich. Entsprechend werden geeignete Verfahren zur Messwertkorrektur bzw. Übertragbarkeit von Laboranalysen und -versuchen auf großtechnische Anlagen benötigt.