

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Upgrading von Bestandsbiogasanlagen hin zu flexiblen Energieerzeugern durch eine bedarfsorientierte Dynamisierung der Biogasproduktion (UBEDB);

Teilvorhaben 1: Versuchsdurchführung im Demonstrationsbetrieb und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Teilvorhaben 2: Versuchsdurchführung im Labormaßstab



Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.

Teilvorhaben 2: Landesbetrieb Hessisches Landeslabor (LHL)

Förderkennzeichen:

22401614, 22400415

Laufzeit:

01.07.2015 bis 28.02.2018

Monat der Erstellung:

05/2018

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 beim Autor.

Projekt- und Autorenteam:

Fraunhofer IEE:

Lena Vogel, Koshin Sugai, Frank Schünemeyer, Dr. Bernd Krautkremer, Dr. Henning Hahn

LHL:

Dr. H. Fabian Jacobi

MR Kommunalservice GmbH Kassel:

Corinna Niemeier, Klaus Anduschus, Arnd Osterfeld

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Einführung	1
1 Ziele	2
1.1 Thema und Zielsetzung des Forschungsvorhabens	2
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Zusammenarbeit mit Dritten	4
2 Methodik der Versuchsdurchführung und Analyse	6
2.1 Beschreibung der Laborversuche	6
2.1.1 Dynamik der Biogasproduktion, Bewertung der Substrate	6
2.1.2 Versuchsplan / Versuchsdurchführung	7
2.1.3 Ermittlung des Gasspeicherbedarfs / Verbrauchsszenarien	7
2.1.4 Simulation der Gasproduktionsraten	8
2.2 Flexible Gasproduktion im großtechnischen Maßstab	11
2.2.1 Beschreibung der Versuchsanlage	11
2.2.2 Substrateinsatz und Fütterungsplan	13
2.2.2.1 Versuchsplan	13
2.2.2.2 Charakterisierung der eingesetzten Substrate	15
2.2.3 Kontinuierliche Optimierung der flexiblen Gasproduktion mittels Simulation	21
2.2.4 Versuchsbegleitende Laboranalysen	22
2.2.5 Leistungskennzahlen zur Bewertung der flexiblen Gasproduktion	22
2.3 Auswertung der Gasproduktionsversuche	24
2.4 Ökonomische Analyse der flexiblen Biogasproduktion	25
2.4.1 Methodik der Wirtschaftlichkeitsanalyse	25
2.4.2 Betrachteter Verstromungs-/Gasproduktionsfahrplan	25
2.4.3 Betrachtete Modellanlagen/Anlagenkonzepte	27
2.4.4 Ökonomische Rahmenbedingungen	29
2.5 Überführung der Erkenntnisse in die Praxis	30
3 Ergebnisse	31
3.1 Flexible Gasproduktion im Labor	31
3.1.1 Versuchsergebnisse aus den Laboruntersuchungen und Wahl der eingesetzten Substrate	31
3.1.1.1 Versuch 1 (Referenzszenario herkömmliche Substrate: Mais, Gülle) ...	31
3.1.1.2 Versuche 2&3 (Wirtschaftsdünger, Zuckerrübe im Nachgärer)	35
3.1.1.3 Versuch 4 (Gülle Klee gras-Luzerne)	38
3.1.1.4 Versuch 5 (Gülle-Wildpflanzenmischung)	41
3.1.1.5 Versuch 6 (Gülle-Silphie-Getreideschrot)	44
3.1.2 Kinetik der verschiedenen Substrate	47

3.1.3	Leistungskennzahlen	49
3.1.4	Alternativszenarien Dauerläufer.....	51
3.1.5	Fazit Laborversuche.....	52
3.2	Versuchsergebnisse aus dem flexiblen Demonstrationsbetrieb	53
3.2.1	Rinderfestmist und Zuckerrüben	53
3.2.2	Silphie und Getreideschrot.....	54
3.2.3	Gülle und Maissilage	55
3.2.4	Laborergebnisse und Gasqualität im Fermenter.....	57
3.2.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.....	58
3.3	Ökonomische Bewertung der flexiblen Biogasproduktion	61
3.3.1	Ökonomie der Referenzanlage	61
3.3.2	Ökonomie der flexiblen Verstromungskonzepte	63
3.4	Praxisbeispiel: Flexible Gasproduktion im kommerziellen Anlagenbetrieb	65
3.4.1	Anlagenbeschreibung Biogasanlage „Biogas Weidenhof Buckert GbR“	66
3.4.2	Beschreibung des Verstromungsbetriebs	67
3.4.3	Fütterungsmanagement und flexible Gasproduktion	68
3.5	Lessons learned	69
3.5.1	Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb	69
3.5.2	Checkliste – flexible Gasproduktion in der Praxis.....	70
4	Zusammenfassung der wesentlichen Projekterkenntnisse	71
5	Literaturverzeichnis	73
	ANHANG.....	76
	Fütterungspläne	76

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gasverbrauchsszenarien. Angaben in % der durchschnittlichen Gasproduktion = % des durchschnittlichen Gasverbrauches. In Summe wird in allen Szenarien gleich viel Gas benötigt, lediglich die zeitliche Verteilung des Verbrauches variiert.	8
Abbildung 2: Luftbild Biogasanlage am Hessischen Biogasforschungszentrum	11
Abbildung 3: Fütterungssystem des Forschungsfermenters.....	12
Abbildung 4: Schema Biogasanlage mit Systemgrenzen des Versuches	12
Abbildung 5: Übersicht und zeitlicher Ablauf des Substrateinsatzes zur flexiblen Gasproduktion	14
Abbildung 6: Beispiel für einen wöchentlichen Fütterungsplan im Versuch mit Silphie und Getreideschrot	15
Abbildung 7: Zusammensetzung der Gülle im Versuchszeitraum	15
Abbildung 8: Eigenschaften Maissilage im Verlauf der drei Teilversuche	17
Abbildung 9: Zerkleinerung und Mischen von Rinderfestmist und Zuckerrübe	18
Abbildung 10: Eigenschaften des Gemisches aus Rinderfestmist und Zuckerrüben	18
Abbildung 11: Eigenschaften von Silphie.....	19
Abbildung 12: Eigenschaften des Getreides.....	20
Abbildung 13: Strompreisentwicklung und Verstromungsblöcke im Tagesverlauf am Intra-Day-Markt in den Jahren 2014-2016*	26
Abbildung 14: Strompreisentwicklung und Verstromungsblöcke im Wochenverlauf*	26
Abbildung 15: Verteilung der Fütterungsrationen auf die Wochentage (nur Mais).....	32
Abbildung 16: Verlauf Gasproduktion Versuchswoche & simulierte Produktion.....	33
Abbildung 17: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicherfüllstände bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet und zwar für kontinuierliche Fütterung (simulierte konstante Gasproduktion) und flexible Fütterung (tatsächlich erhobene Daten).	33
Abbildung 18: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet.	34
Abbildung 19: Verlauf der Gasproduktion des Fermenters: gemessene und simulierte Produktion. Messwerte über 3h gemittelt. Die regelmäßigen Schwankungen geringer Intensität sind auf die Fermenterbeheizung und die resultierende zyklisch vermehrte Ausgasung zurückzuführen.	35
Abbildung 20: Verlauf der Gasproduktion des Nachgärers: gemessene und simulierte Produktion. Messwerte über 3h gemittelt. Die regelmäßigen Schwankungen sind auf die Fermenterbeheizung zurückzuführen.	36
Abbildung 21: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher für die Gesamtanlage (Fermenter und Nachgärer) bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Gasspeicherfüllstand bei kontinuierlicher Fütterung (simuliert) in grün, bei flexibler	

Fütterung (simuliert) in blau und basierend auf den gemessenen Daten bilanziert in rot.....	36
Abbildung 22: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher für die Gesamtanlage (Fermenter und Nachgärer) bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW.....	37
Abbildung 23: Verlauf der Säurewerte (in mg/l) in einer exemplarischen Woche im Fermenter. (V02RIII).	37
Abbildung 24: Verlauf Gasproduktion exemplarische Versuchswoche & simulierte Produktion Klee gras-Luzerne und Gülle. (V04RIII).	39
Abbildung 25: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V04RIII).	39
Abbildung 26: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V04RIII).....	40
Abbildung 27: Verlauf simulierte und gemessene Gasproduktion im Wochenmittel. Bei korrekt identifizierter Kinetik, gleichbleibender Substratqualität und ohne Prozessstörungen liegen beide Verläufe deckungsgleich übereinander.....	41
Abbildung 28: Verlauf Gasproduktion Versuchswoche & simulierte Produktion. Messwerte über 3h gemittelt. Die regelmäßigen Schwankungen sind auf die Fermenterbeheizung zurückzuführen. (V05RI).....	42
Abbildung 29: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V5RI)	43
Abbildung 30: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V5RI).....	43
Abbildung 31: Verlauf Gasproduktion Versuchswoche & simulierte Produktion. (V06RV).....	44
Abbildung 32: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V06RV).	45
Abbildung 33: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet.	45
Abbildung 34: Simulierte Batch-Abbaukurven der einzelnen Substrate anhand der verwendeten	

Kinetikdaten (s. Tabelle 13). Die Kinetikdaten beziehen sich auf die im Versuch gemessenen Gasmengen. Links für 30 Tage, rechts ein Ausschnitt der in diesem Versuch besonders relevanten ersten Tage.	47
Abbildung 35: Speicherbedarf für die verschiedenen Szenarien (Mittelwerte über alle Versuche).	49
Abbildung 36: Reduktion des Gasspeicherbedarfs (dargestellt in h durchschnittlicher Biogasproduktion) durch Einsatz verschieden großer Dauerläufer und angepassten Spitzenleistungs-BHKW mit entsprechend verschieden großen Anteilen am Gasverbrauch für eine Anlage mit insgesamt 250kW Durchschnittsleistung.	51
Abbildung 37: Gasspeichereinsparung Umstellungswoche 3, Versuch 1, Rinderfestmist und Zuckerrüben.....	53
Abbildung 38: Vergleich Gasspeichereinsparung Umstellungs- und Versuchsphase Versuch 1, Rinderfestmist und Zuckerrüben	54
Abbildung 39: Gasspeichereinsparung Versuchswoche 4, Versuch 2, Silphie und Getreideschrot	54
Abbildung 40: Vergleich Gasspeichereinsparung Umstellungs- und Versuchsphase Versuch 2, Silphie und Getreideschrot	55
Abbildung 41: Gasspeichereinsparung Versuchswoche 6, Versuch 3, Gülle und Mais	56
Abbildung 42: Vergleich Gasspeichereinsparung Umstellungs- und Versuchsphase Versuch 3, Gülle und Maissilage	56
Abbildung 43: Fütterungsmengen und Gasproduktion Versuchsphase – Versuch 3	57
Abbildung 44: Laborergebnisse Forschungsfermenter im Verlauf der drei Versuche	57
Abbildung 45: Gasqualität im Fermenter im Verlauf der drei Versuche.....	58
Abbildung 46: Bruttogasspeicherkapazität der betrachteten Anlagenkonzepte	63
Abbildung 47: Verstromungsfahrplan der einzelnen Anlagenkonzepte im Laufe einer Woche..	63
Abbildung 48: Biogasanlage „Biogas Weidenhof Buckert GbR“ mit flexibler Gasproduktion von Herrn Buckert (Bildquelle: MR GmbH Kassel)	66
Abbildung 49: Fütterungsplan Versuchsphase, Versuch Rinderfestmist und Zuckerrüben	76
Abbildung 50: Fütterungsplan Umstellungsphase, Versuch Silphie und Getreideschrot	76
Abbildung 51: Fütterungsplan Versuchsphase, Versuch Silphie und Getreideschrot	77
Abbildung 52: Fütterungsplan Umstellungsphase, Versuch Gülle und Maissilage	77
Abbildung 53: Fütterungsplan Versuchsphase, Versuch Gülle und Maissilage	77

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsplan mit Substratvarianten (Labor).....	7
Tabelle 2: Eingesetzte Substratmengen während der Versuche.....	14
Tabelle 3: Fütterungsplan Beispielhaft, Umstellungswoche 3 des 1. Versuches	21
Tabelle 4: Substrateigenschaften	21
Tabelle 5: Übersicht über die Laboranalysen	22
Tabelle 6: Ökonomische Parameter der untersuchten Anlagenkonzepte	29
Tabelle 7: Kosten und Zusammensetzung der eingesetzten Biomasse der Modellanlagen .	30
Tabelle 8: Fütterungsplan und resultierende Parameter Versuch 1 (Maissilage). BR: Raumbelastung, HRT: hydraulische Verweilzeit.	32
Tabelle 9: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 2 (Fermenter und Nachgärer).....	35
Tabelle 10: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 4 (Kleegras-Luzerne).....	38
Tabelle 11: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 5.	41
Tabelle 12: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 6	44
Tabelle 13: Charakterisierung der Abbaugeschwindigkeit der eingesetzten Substrate: prozentuale Verteilung der Fraktionen und die für die jeweilige Fraktion angesetzten k-Werte.	47
Tabelle 14: Vergleich: Gasspeicherbedarf für das Wochenende in h durchschnittlicher Gasproduktion für die Szenarien mit („30%“) und ohne Dauerläufer	49
Tabelle 15: Vergleich: Gasspeichereinsparung, immer im Vergleich zur jeweiligen kontinuierlicher Gasproduktion für die Szenarien mit („30%“) und ohne Dauerläufer	49
Tabelle 16: Vergleich: Anteil der Gasproduktion in der Arbeitswoche (4,5 Tage \pm 64% der Wochenstunden und damit der Referenzgasproduktion bei kontinuierlicher Gasproduktion)	50
Tabelle 17: Vergleich: Gasproduktionsvariabilität (maximale und minimale Gasproduktionsrate im Vergleich zur Durchschnittsproduktion) – stark gerundete Werte.	50
Tabelle 18: Vergleich Leistungskennzahlen ausgewählter Versuchswochen der drei Versuche	59
Tabelle 19: Annuität der Bestandsanlage im Grundlastbetrieb	62
Tabelle 20: Annuität der untersuchten Anlagenkonzepte zur flexiblen Verstromung	64
Tabelle 21: Auszug aus dem Fütterungstagebuch der Biogasanlage	68

Abkürzungsverzeichnis

Ammonium – N	Ammoniumstickstoff
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BiKo	Biogutvergärungs- und Kompostierungsanlagen
BR	Raumbelastung
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EK	Einsatzstoffvergütungsklasse
EQ	Essigsäureäquivalent
fEE	fluktuierende Erneuerbare Energien
FM	Frischmasse
Fm/Zr	Festmist/Zuckerrübe
Gesamt - N	Gesamtstickstoff
GPS	Ganzpflanzensilage
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HAWK	Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen
HBfZ	Hessisches Biogas-Forschungszentrum
HRT	Hydraulische Verweilzeit
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
kW	Kilowatt
kW _{el}	Kilowatt elektrisch
k-Wert	Abbaukinetik 1. Ordnung
kWh _{el}	Kilowattstunde elektrisch
kWh _{th}	Kilowattstunde thermisch
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LHL	Landesbetrieb Hessisches Landeslabor
LLH	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
mbar	Millibar
MR	Maschinenring Kommunalservice GmbH Kassel
MW _{el}	Megawatt elektrisch
NawaRo	Nachwachsende-Rohstoffe

OptiFlex	Optimierung des Betriebs und Designs von Biogasanlagen für eine bedarfsgerechte, flexibilisierte und effiziente Biogasproduktion unter Berücksichtigung der Prozessstabilität als Post-EEG Strategie
oTM	organische Trockenmasse
P_{Bem}	Bemessungsleistung
P_{Inst}	installierte Leistung
ppm	parts per million (Teile pro Million)
PV-Anlagen	Photovoltaikanlagen
TM	Trockenmasse
UBEDB	Upgrading von Bestandsbiogasanlagen hin zu flexiblen Energieerzeugern durch eine bedarfsorientierte Dynamisierung der Biogasproduktion

Einführung

Der vorliegende Schlussbericht stellt die Ergebnisse des Verbundvorhabens „Upgrading von Bestandsbiogasanlagen hin zu flexiblen Energieerzeugern durch eine bedarfsorientierte Dynamisierung der Biogasproduktion (UBEDB)“ dar. Dabei fasst er die Schlussberichte der beiden „Teilvorhaben Versuchsdurchführung im Demonstrationsbetrieb und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Teilvorhaben 1)“ und „Versuchsdurchführung im Labormaßstab (Teilvorhaben 2)“ zusammen.

Zu Beginn werden in Kapitel 1 der Hintergrund und die Zielsetzung, die dem Vorhaben zu Grunde liegen, vorgestellt. Dabei wird auf den aktuellen Stand der Technik/Wissenschaft sowie auf die Zusammenarbeit mit Dritten eingegangen. Im Kapitel 2 wird die methodische Herangehensweise beschrieben mit der die Versuchsdurchführung und Auswertung erfolgte. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3 aufgeteilt nach erzielter flexibler Biogasproduktion im Labor und großtechnischen Maßstab sowie der zugrunde liegenden Ökonomie, einem Praxisbeispiel aus dem kommerziellen Biogasanlagenbetrieb sowie den Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb, ergänzt mit einer Checkliste für Anlagenbetreiber, dargestellt. Kapitel 4 fasst die wesentlichen Projektergebnisse zusammen. Die Verwertung der Projektergebnisse, Erkenntnisse von Dritten und die im Rahmen des Vorhabens erstellten Veröffentlichungen sind in den Kapiteln 5-7 aufgezeigt.

1 Ziele

1.1 Thema und Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Biogasanlagen wurden historisch bedingt durch eine EEG vergütete Stromeinspeisung gefördert, die eine fixe Einspeisevergütung pro produzierter kWh_{el} verspricht. Daher wurden Biogasanlagen auf möglichst viele Volllaststunden ausgelegt und können dadurch im Mittel 7 000 – 8 000 Vollbetriebsstunden pro Jahr an Grundlaststrom zuverlässig bereitstellen. Dafür produzierten Biogasanlagen ziemlich kontinuierlich Biogas.

Ist es jedoch möglich den deutschen Bestandsbiogasanlagenpark zu ertüchtigen, um am Bedarf orientiert Strom zu erzeugen, können diese einen wesentlichen Beitrag für die Systemintegration größerer Mengen EE in das Stromnetz leisten. Eine Zusammenfassung von Ergebnissen aus aktuell abgeschlossenen und laufenden Forschungsprojekten in Hahn et al. [1] und Holzhammer et al. [2, 3] zeigt die vielfältigen positiven Effekte des Ausgleichs von Stromdefiziten durch Biogasanlagen auf heutige und zukünftige Energieversorgungsstrukturen auf.

Erste Ansätze zur bedarfsorientierten Stromproduktion gehen von einer vorübergehenden Speicherung des erzeugten Biogases am Ort der Anlage aus. Die Flexibilität des Einspeisebetriebes ist hierbei von der Größe des Gasspeichers und der Reaktionsschnelligkeit der (zusätzlich) installierten BHKWs abhängig. Kapazitätserweiterungen der Gasspeicherung vor Ort sind jedoch aus kosten-, sicherheitstechnischen und genehmigungsrechtlichen Gründen nur eingeschränkt möglich. Eine Verlagerung des Stromerzeugungspotentials über mehrere Tage ist dadurch ohne die Überwindung von aufwändigen genehmigungsrechtlichen Hürden nicht möglich.

Bei genauer Betrachtung der Anlagentechnik und der Prozessbiologie bieten jedoch auch Bestandsbiogasanlagen die Möglichkeit mit geringer oder gänzlich ohne Modifikationen der Anlagentechnik bedarfsorientiert elektrische Energie bereitzustellen. Durch eine bedarfsorientierte Dynamisierung des biologischen Gasbildungsprozesses kann die zeitliche Flexibilität der elektrischen Energieerzeugung noch deutlich über die begrenzten Kapazitäten der Gasspeicherung erweitert werden und eine insgesamt höhere Flexibilität bewirken. Dies kann z.B. in Starkwindzeiten oder in Zeiten von Windflauten erforderlich sein. Allerdings war in der Vergangenheit die Maximierung der Anlagenauslastung durch eine möglichst kontinuierliche, stabile Biogasproduktion das Ziel von Forschung und Praxis. Die Möglichkeiten die Biogasproduktion durch ein gezieltes Fütterungsmanagement bedarfsorientiert zu dynamisieren, gilt es daher noch zu untersuchen. Denn Störungen des biologischen Prozesses und damit einen betrieblichen Ausfall von Biogasanlagen gilt es zu vermeiden.

Mais ist als vornehmlich eingesetzte Kultur für den Biomasseanbau für Biogasanlagen aus verschiedenen Gründen in die Kritik geraten. Ein weiterer Ausbau der Flächen ist zu vermeiden. Es gilt daher auch alternative Ressourcen zu Mais zu suchen, um die Flächennutzungssituation zu verbessern. Eine durch entsprechendes Fütterungsmanagement flexibilisierte Biogasproduktion benötigt Substrate, welche eine hohe Dynamik in der Biogasproduktion erlauben. Hierzu eignen sich insbesondere Substrate, deren Inhalts- bzw. Speicherstoffe leicht verfügbar und entsprechend schnell umsetzbar sind. Eine Untersuchung entsprechender Substrate auf deren Eignung und die Initiierung des Einsatzes derselben würde der gewünschten Substratdiversifizierung Vorschub leisten. Darüber hinaus stellt dies einen Ansatz darstellen die Biogasproduktion ohne großen technischen Zusatzaufwand dem Strombedarf anzupassen.

Vor diesem Hintergrund beschreibt der vorliegende Bericht die Ergebnisse eines Forschungsprojekts, das sich zur Aufgabe macht die Möglichkeiten der bedarfsorientierten, dynamischen Biogasproduktion, die ohne Modifikation der Anlagentechnik von Bestandsbiogasanlagen auskommen, auf einer großtechnischen Forschungsbiogasanlage (Rührkesselfermenter 360 m³) des IEE (ehemals IWES) zu untersuchen (Teilvorhaben 2), um dadurch Fütterungsempfehlungen für Bestandsbiogasanlagen ableiten zu können.

Dafür wurden Leistungsparameter der dynamischen Biogasproduktion in Laboranlagen mit im landwirtschaftlichen Umfeld anfallenden Substraten ermittelt (Teilvorhaben 1) und zum Abfahren von am Strombedarf ausgerichteten Gasproduktionsprofilen auf die großtechnische Biogasanlage übertragen. Basierend auf den erzielten Ergebnissen wird die Auswirkung der dynamisierten Gasproduktion auf die Wirtschaftlichkeit von Bestandsbiogasanlagen untersucht und bewertet.

1.2 Stand der Technik

Die Biogastechnologie zählt zu den etablierten Verfahren der Gewinnung regenerativer Energie aus Biomasse. Eigene Messreihen belegen die hohe technische Verfügbarkeit (> 95%) der Biogasanlagen und damit gegebene Zuverlässigkeit und Eignung für die Erbringung von Systemdienstleistungen [4].

Biogasanlagen speisten in der Vergangenheit aufgrund der fixen Vergütung der elektrischen Arbeit durch das EEG und aus prozessbiologischen Gründen relativ konstant ins Stromnetz ein. Grundsätzlich sind sie jedoch auch in der Lage, dem Netzbetreiber Systemdienstleistungen durch die schnelle Regelbarkeit des biogasbetriebenen Blockheizkraftwerks (BHKW) zur Verfügung zu stellen und Biogas am Strombedarf (bzw. der Residuallast) orientiert zu produzieren. Erste Anreize für Biogasanlagenbetreiber wurden hierfür bereits im EEG 2012 mit der Einführung einer Markt- und Flexibilitätsprämie gegeben. Seit dem EEG 2014 ist das Vorhalten von Überkapazitäten für Biogasanlagen >150 kW_{el} verpflichtend.

Um eine flexible, am Bedarf orientierte Stromproduktion zu gewährleisten, ist es erforderlich elektrische Überkapazitäten bereit zu stellen. Dies ist durch zusätzlich Verstromungskapazitäten praktisch einfach umsetzbar. Grundvoraussetzung, diese auch flexibel betreiben zu können, ist jedoch eine ausreichende und sichere Gasversorgung immer dann zu gewährleisten, wenn ein Bedarf zur Verstromung besteht.

Hierfür gibt es **prinzipiell zwei Möglichkeiten** Biogas für eine steuerbare Verstromung bereitzustellen: entweder wird Biogas den Bedürfnissen entsprechend **gezielt (steuerbar) erzeugt** oder bis zum Verbrauch **zwischengespeichert**, bis es anschließend in dem dafür vorgesehenen BHKW verstromt wird [5][6].

Biogasanlagen, die heute ihre Gasproduktion am Strombedarf ausrichten und damit eine insgesamt höhere Flexibilität, d.h. ein Stromverlagerungspotenzial über mehrere Tage hinaus bereitstellen können, befinden sich heute noch überwiegend im Forschungsstadium. Erste Erfahrungen von kommerziellen Anlagen liegen jedoch zum Teil schon vor. Eine davon wird im vorliegenden Schlussbericht vorgestellt (siehe Kapitel 3.4).

Bei einer **bedarfsgerechten Fütterung** lässt sich der Biogasprozess einerseits durch die Variation von Substraten und andererseits durch die Variation der zugeführten Substratmenge und der Fütterungsintervalle steuern, wobei die Prozessstabilität nicht gefährdet werden darf. In der Vergangenheit stand dahingegen eine kontinuierliche Biogasproduktion im Zentrum des Interesses, so dass derartige Betriebsansätze zur flexiblen Gasproduktion bislang kaum Einzug in die Praxis finden.

Durch die steigenden Anforderungen an Biogasanlagen immer marktorientierter und damit flexibler verstromen zu müssen, ist in den letzten Jahren auch die flexible Biogasproduktion immer mehr in das Interesse der Forschung gerückt. Im Folgenden sind aktuelle Forschungsansätze, die den Fördernehmern bekannt sind, und deren Abgrenzung zu dem vorliegenden Vorhaben dargestellt.

Die Möglichkeit die Biogasproduktion variabel an den Bedarf anzupassen wird durch den Einsatz desintegrativer Verfahren (Ultraschall, vorgeschaltete Hydrolyse, Fest-Flüssig Separation) in dem aktuellen Forschungsprojekt PROKOSYS (FKZ 03KB072) untersucht. Darüber hinaus sind Laborversuchsergebnisse, die tägliche Gasproduktion durch den gezielten Einsatz von Schlempe aus der Bioethanolproduktion sowie mittels Variation der Fütterungshäufigkeit und Substratzusammensetzung der Substrate Mais- und Zuckerrübensilage zu steuern, bereits veröffentlicht [7]. Das Spektrum der hierbei eingesetzten Substrate war jedoch begrenzt auf den Einsatz üblicher Energiepflanzen. Das DBFZ untersucht des Weiteren die bedarfsgerechte Biogasproduktion in großtechnischen Anlagen durch den optimierten Einsatz von Mühlennachprodukten [8]. Neben den Untersuchungen des DBFZ gibt es aktuell ein Projekt der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Diese führten Untersuchungen zum Intervallbetrieb einer Biogasanlage in Bayern durch. Neben dem Start-Stopp-Verhalten von BHKWs und der Betrachtung des Prozesswärmeverhaltens lag ein Schwerpunkt dieses Projektes auf den Auswirkungen der diskontinuierlichen Fütterung auf den biologischen Prozess. (FKZ N/14/13). Eine Übertragung in die Praxis konventioneller Anlagen und die Beratung fanden hier ebenfalls nicht statt. Hier grenzt sich das Forschungsvorhaben durch die Erprobung und Erweiterung des Substratspektrums ab. Zur Dynamisierung des Biogasproduktionsprozesses werden Kulturen mit besonderer Zusammensetzung und damit eigenen Abbaucharakteristika eingesetzt und deren Vorteilhaftigkeit erprobt werden. Die enge Zusammenarbeit mit dem Partner Maschinenring GmbH, der für einen Übertrag der gewonnenen Erkenntnisse in die Beratung von Biogasanlagenbetreibern verantwortlich ist, soll noch während des Projektes zu einer ersten Übertragung der Erkenntnisse in die Anlagenpraxis führen. Auf die bisher gewonnenen und publizierten Erkenntnisse des

Projektes wird das beantragte Forschungsvorhaben aufbauen. Weitere Versuchsergebnisse zur flexiblen Biogasproduktion, die durch ein angepasstes Fütterungsmanagement mit Maissilage, Roggensilage und Zuckerrüben im Technikum erzielt wurden, wurden von Sonnleitner [9] auf verschiedenen Fachtagungen vorgestellt. Bisher jedoch ohne hinreichend wissenschaftlich veröffentlicht zu werden. Des Weiteren untersucht das Forschungsvorhaben OptiFlex (FKZ: 03KB073) den technisch-ökonomisch optimierten Betrieb von flexiblen Biogasanlagen. Allerdings wird hier die Beeinflussung des Fütterungsmanagements nur theoretisch beachtet.

Durch das Fraunhofer IEE und die HAWK wird darüber hinaus die flexible Biogasproduktion mit vielversprechenden Ergebnissen, durch ein angepasstes 2-stufiges Anlagenkonzept mit vorgeschalteter Hydrolyse, Fest-Flüssig-Trennung und einer gezielten Fütterung eines Festbettfermenters mit schnell abbaubarem, flüssigem Substrat im großtechnischen Maßstab untersucht (siehe z.B. [10, 11]).

Eine „Post-EEG-Strategie“ wird im Rahmen des im Jahr 2017 angelaufenen OptiFlex-Projektes „Optimierung des Betriebs und Designs von Biogasanlagen für eine bedarfsgerechte, flexibilisierte und effiziente Biogasproduktion unter Berücksichtigung der Prozessstabilität als Post-EEG Strategie (OptiFlex)“ verfolgt. Das Vorhaben möchte einen Beitrag dazu leisten, Biogasanlagen effizienter und zukunftsfähiger – flexibel - zu machen. Dafür wird unter anderem auf den Erkenntnissen aus dem vorliegenden Forschungsvorhaben und anderen (oben genannten) aufgebaut, um weitere Regelalgorithmen für alle zentralen und peripheren Anlagenkomponenten zur Automatisierung des Last- und Stromerzeugungsmanagements (inkl. flexibler Gasproduktion – Fütterungsmanagement) zu entwickeln. Neben den Rührwerken betrifft dies auch Einrichtungen zum Substrataufschluss, die definierte Substrateigenschaften bereitstellen müssen.

Im Gegensatz zu den vorherigen Forschungsvorhaben wurde in dem Projekt UBEDB darauf abgezielt, die bedarfsorientierte, dynamische Biogasproduktion ohne aufwändige technische Umrüstungen, welche für den Biogasanlagenbetreiber immer auch mit Zusatzinvestitionen einhergehen, praktisch zu untersuchen. Dabei wurde insbesondere der Einsatz von Substraten, die im Umfeld typischer landwirtschaftlicher Biogasanlagen anfallen und über den Einsatz von Zuckerrüben hinausgehen, fokussiert und in Zusammenarbeit mit dem MR Kassel in den kommerziellen Biogasanlagenbetrieb überführt.

Wodurch die Ergebnisse der Untersuchungen die Übertragbarkeit auf den aktuellen Bestandsbiogasanlagenpark gewährleisten und einen Beitrag zur Lösung der Energieverteilungsproblematik der Zukunft sowie konkrete Ansätze für die Ausweitung des eingesetzten Biomassespektrums und Anreize zum Anbau alternativer Kulturen bringen.

1.3 Zusammenarbeit mit Dritten

Die Versuchsdurchführung wurde durch den am Forschungsstandort ansässigen Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) begleitet. Über die Projektlaufzeit fand mit Experten des Landesbetriebs fachlicher Austausch statt. Darüber hinaus unterstützte der LLH die Versuchsdurchführung an der großtechnischen Anlage durch die Bereitstellung von Biogassubstraten sowie die Substratlogistik (Zwischenlagerung) von extern zugekauften Substraten.

Durch die aktive Teilnahme an Fachtagungen, Netzwerktreffen und auf Messen fand während der gesamten Projektlaufzeit fachlicher Austausch mit verschiedensten Branchenexperten zu den im Laufe des Vorhabens gewonnenen Erkenntnissen statt. Synergieeffekte entstanden während der Projektlaufzeit mit anderen Forschungsprojekten, die parallel am Fraunhofer IEE (ehemals IWES) durchgeführt wurden. Im Wesentlichen waren das folgende Projekte:

BiKoFlex (FKZ: 0325818)

Das Forschungsvorhaben fokussiert die Untersuchung der Rolle eines flexibilisierten Strommanagements von Biogutvergärungs- und Kompostierungsanlagen (BiKo) zur Integration der fluktuierenden Erneuerbaren Energien (fEE). Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH bearbeitet. Fachlicher Austausch fand im Rahmen der Stromvermarktung von Biogasanlagen sowie zu erzielbaren Erlösen bei der Anbietung von Regelenergieleistungen statt.

ReBi 2.0 (FKZ: 22400114)

Das Vorhaben ReBi 2.0 zielt auf die flexible Gasproduktion mit einem angepassten Anlagenkonzept ab. Erkenntnisse aus dem Projekt UBEDB werden in die Fütterungsstrategie und Auswertung der Versuchsergebnisse dieses Projektes einfließen. Ebenso werden die Erkenntnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse in der Projektbearbeitung Berücksichtigung finden.

2 Methodik der Versuchsdurchführung und Analyse

Das vorliegende Kapitel 2 beschreibt die methodische Vorgehensweise zur Analyse und Bewertung der flexiblen Biogasproduktion im Labor und der großtechnischen Anlage. Darüber hinaus werden die Versuchsbiogasanlage (Labor & großtechnisch), der Versuchs- und Analyseplan sowie die Methodik und Rahmenbedingungen der Wirtschaftlichkeitsanalyse beschrieben.

2.1 Beschreibung der Laborversuche

2.1.1 Dynamik der Biogasproduktion, Bewertung der Substrate

Die flexible Produktion von Biogas ist nicht Stand der Praxis. In der Vergangenheit wurde große Sorgfalt darauf verwendet die Biogasproduktion zu vergleichmäßigen und die Substrateinbringung entsprechend kleinteilig zu takten. Erfahrungen hinsichtlich der Dynamik des Biogasprozesses entstehen in der Praxis daher in der Regel nur durch Störfälle, in denen z.B. die Substratzuführung nicht entsprechend der Planung funktioniert. Die tatsächliche Bewertung der Dynamik des Biogasprozesses ist dabei aber nur in seltenen Fällen möglich, da die Erfassung der Gasproduktion nur an wenigen Anlagen fermenterspezifisch stattfindet und eine exakte, zeitlich hochaufgelöste Erfassung durch die naturgemäße Ungenauigkeit der Erfassung bei Folienspeichern und deren Pufferfunktion dieses weiter verhindert.

Die Ableitung von Biogasproduktionskinetiken aus den in vielen Laboren und Forschungsprojekten durchgeführten Batchversuchen zur Bestimmung des Gasertragspotentials hat sich als unrealistisch herausgestellt, da der kontinuierliche Prozess hinsichtlich der Populationsdichte der Mikroorganismen und der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft sowie der Substratverfügbarkeit gänzlich anders aufgestellt ist, als ein Batchversuch. Die Ableitung von Abbaukinetiken muss daher aus kontinuierlichen Prozessen erfolgen. Um eine solche Bewertung vorzunehmen, wurde der Ansatz gewählt die aufgezeichneten Gasproduktionsdaten mittels einer Simulation nachzuvollziehen und die die Dynamik beschreibenden Parameter der Simulation substratspezifisch dahingehend zu optimieren, dass sie die realen Daten möglichst deckungsgleich abbilden können.

Für die Simulation des anaeroben Abbauprozesses sind in der Literatur eine Vielzahl von Lösungen fast beliebiger Komplexität beschrieben [12]. Vornehmlich wird hierbei in wissenschaftlichen Arbeiten insbesondere in der Simulation von klärtechnischen Prozessen das ADM1 [13] verwendet, welches eine größere Anzahl von Eingangsparametern benötigt und verschiedene Abbauprozesse abbildet. Die tatsächliche Nutzung dieses Modells scheidet aber häufig an der Menge der verfügbaren Daten und deren Qualität. Weniger komplexe Modelle sind im Unterschied zum ADM1 schlechter in der Lage langfristige Änderungen im Prozess sowie prozessbiologische Störungen nachzuvollziehen und korrekt wiederzugeben. Solche Änderungen waren im vorliegenden Projekt für die Simulation nicht von Interesse. Daher, und um die Komplexität gering zu halten, wurde in diesem Projekt ein stark vereinfachter Modellierungsansatz gewählt, in dem jedem Substrat drei unterschiedlich schnell abbaubare Fraktionen zugeordnet und sowohl die Abbaugeschwindigkeit dieser Fraktion in Form einer Funktion 1. Ordnung als auch die anteilige Größe dieser Fraktion als Variablen eingesetzt wurden. Für jedes Substrat waren damit diese 6 Variablen zu optimieren, das Gasertragspotential zu identifizieren und zusätzlich der organische Trockensubstanzgehalt zu bestimmen und einzubringen.

2.1.2 Versuchsplan / Versuchsdurchführung

Entsprechend des Antrages bzw. der hier unter 3.1.1 weiter aufgeführten Punkte wurde die Wahl der Substrate wie in der folgenden Tabelle dargestellt getroffen und durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsplan mit Substratvarianten (Labor)

Substrat	Versuch	1	2	3	4	5	6
Mais		x	x				
Gülle		x	x		x	x	x
Zuckerrübe (ZR)			(x)	x			
Rinderfestmist			x				
Überlauf / Nachgärer				x			
Kleegras-Luzerne					x		
Wildpflanzenmischung						x	
Silphie							x
Getreideschrot							x

Die Versuchsdurchführung erfolgte jeweils in dreifachen Parallelansätzen in 30 oder 150l fassenden Reaktoren mit automatischer Umwälzung bei einer Temperaturierung auf $39\pm 2^\circ\text{C}$ und Gasmengenerfassung. Die Beschickung mit Substrat erfolgte manuell einmal täglich und entsprechend der Zielstellung mit unterschiedlichen täglichen Gesamtmengen und darin unterschiedlichen Anteilen der verschiedenen Cosubstrate. Die Verteilung wurde mit dem Ziel angepasst, die Gasproduktion innerhalb der Woche so zu verlagern, dass die Wochenendproduktion minimiert wird. Detaillierte Fütterungspläne sind den jeweiligen Versuchsbeschreibungen zu entnehmen.

2.1.3 Ermittlung des Gasspeicherbedarfs / Verbrauchsszenarien

Zur Ermittlung der optimalen Gasproduktionsverteilung wurden exemplarisch Verbrauchsszenarien erstellt. Dazu waren für folgende Punkte Annahmen zu treffen:

1. Wie soll die Verteilung der Stromproduktion auf die Woche verteilt werden?
2. Inwiefern sind lange Zeiträume ohne Verbrauch (Wochenende) einzuplanen?
3. In welchem Verhältnis stehen die Gasproduktionskapazitäten zu den Gasverbrauchskapazitäten, d.h. in welchem Zeitraum (h) soll die Verstromung der täglich zu verbrauchenden Gasmenge stattfinden?
4. Soll neben dem Spitzenverbrauch auch ein kontinuierlicher Verbrauch von Gas stattfinden (Bedienung von Wärmesenken, Fermenterbeheizung, Reduktion der nötigen Gasspeicherkapazitäten)?

Für die durchgeführten Versuche wurden folgende Szenarien ausgewählt:

1. wöchentlicher Gasverbrauch für 12h, Aussetzen des Gasverbrauches am Wochenende
2. wöchentlicher Spitzengasverbrauch für 12h bei gleichzeitigem, geringen aber kontinuierlichen Grundverbrauch.

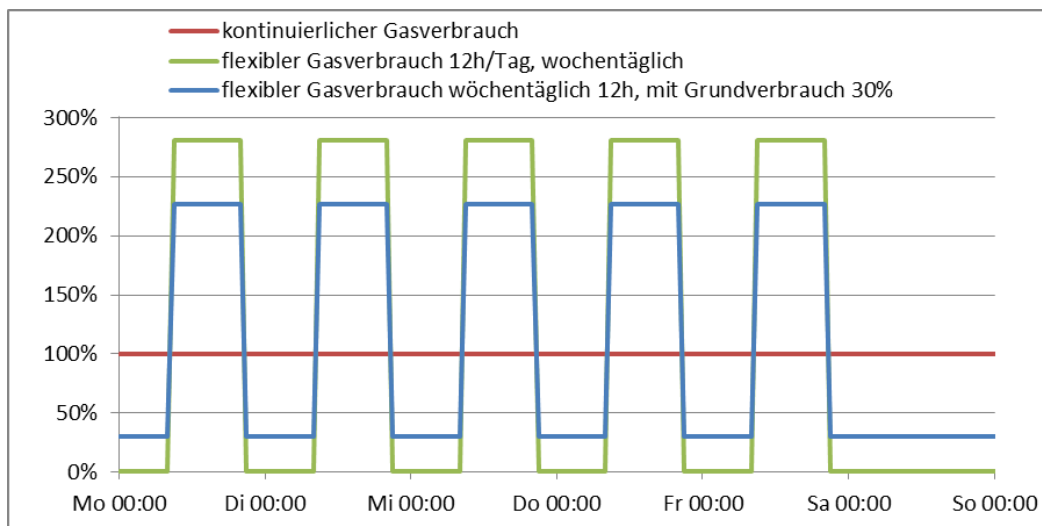


Abbildung 1: Gasverbrauchsszenarien. Angaben in % der durchschnittlichen Gasproduktion = % des durchschnittlichen Gasverbrauches. In Summe wird in allen Szenarien gleich viel Gas benötigt, lediglich die zeitliche Verteilung des Verbrauches variiert.

Aus diesen Vorgaben für den Gasverbrauch und den experimentell und darauf basierend durch Simulation ermittelten Gasproduktionsraten kann die im Speicher verbleibende Gasmenge kontinuierlich bilanziert werden. Daraus ergeben sich wiederum maximale Speicherfüllstände, die die Größe des für dieses Szenario notwendigen Gasspeichers definieren. In der Folge können dann die benötigten Gasspeichergrößen für eine optimierte, flexibilisierte Gasproduktion mit denen für eine nicht flexibilisierte, d.h. kontinuierliche gleichmäßige Gasproduktion verglichen werden.

Eine benötigte Speichergröße, dargestellt als Volumen, z.B. in m^3 , ist immer in Relation zur Anlagengröße zu verstehen. Um die Speichergröße in einer Einheit darstellen zu können, die unabhängig von der Anlagengröße ist, wird im Folgenden häufig die Größe des Gasspeichers in „h kontinuierlicher“ oder „h durchschnittlicher“ Biogasproduktion angegeben. Diese Einheit bezieht sich also auf die in der Anlage durchschnittlich produzierte Menge Gas und die Speichergröße stellt dar, wie lange es dauert, bis der Speicher bei dieser durchschnittlichen bzw. kontinuierlichen Gasproduktionsrate gefüllt ist. Zur Verdeutlichung sei auf das Wochenende eingegangen. Das Wochenende hatte in den verwendeten Szenarien eine Dauer von 60h (Fr. 20 Uhr bis Mo 8 Uhr). Für die Überbrückung des Wochenendes ist demnach bei kontinuierlicher Produktion ein Gasspeicher in der Größe von 60h nötig. Werte unterhalb von 60h bedeuten eine Verlagerung der Gasproduktion aus dem Wochenende in die Wochentage und damit eine Reduktion des notwendigen Speicherbedarfs.

2.1.4 Simulation der Gasproduktionsraten

Begleitend zu den Laborversuchen wurde die Simulationen der Biogasproduktion im zeitlichen Verlauf durchgeführt. Dies fand aus folgenden Gründen statt:

1. Identifikation der unterschiedlichen Abbaugeschwindigkeiten der verschiedenen Substrate und Vergleich derselben auf Basis dieser Daten.
2. Simulation von Fütterungsszenarien zur schnellen Optimierung der Fütterungsstrategie und zur Einsparung von Versuchsaufwand und –zeit im Labor und in der Versuchsbiogasanlage in TP2.

Jedes Substrat besteht aus einer Vielzahl unterschiedlichster Verbindungen. Diese lassen sich z.B. durch die bekannten Methoden der Futtermittelanalytik beschreiben. Diese Beschreibung ermöglicht bereits eine Abschätzung des Abbauverhaltens. Auf eine eingehendere Untersuchung und Klassifizierung der Komponenten wurde bewusst verzichtet, da der Aufwand für die Untersuchungen und insbesondere für die aufwändige Weiterverarbeitung der Daten nicht praxisnah ist. Ziel war eine möglichst simpler und ohne die Notwendigkeit für aufwändige Untersuchungen und ggf. in eine allgemein verfügbare Software übertragbare Simulation für die Beschreibung des Abbauverhaltens. Daher wurde zur Beschreibung des Abbauverhaltens jedes Substrat als aus drei verschieden schnell abbaubaren Fraktionen bestehend definiert, denen jeweils

eigene Kinetikparameter zugeordnet wurden. Die gewählte Abbaufunktion ist die einer Kinetik erster Ordnung. Es ist hierbei zu beachten, dass die Kinetik für die Gasbildung innerhalb der Verweildauer im Versuchsreaktor steht, nicht für die erschöpfende Ausgasung. Ziel ist es nicht gewesen den vollständigen Abbau darzustellen, sondern die simulierte Abbaugeschwindigkeit unter den Gegebenheiten möglichst genau an die Messdaten anzupassen, um den Einsatz der Substrate optimal planen zu können. Gleiches gilt für das dem Substrat zugeordneten Gasertragspotential.

Die Simulation wurde in Excel realisiert und berücksichtigte folgende Inputgrößen eines jeden Substrates:

- Biogasertragspotential des Substrates
- organische Trockensubstanz (oTS) des Substrates als Maß für die zum Abbau verfügbaren Anteile
- Fraktionierung der oTS des Substrates in
 - o drei unterschiedlich schnell abbaubare Fraktionen
 - mit jeweils eigener Kinetik (1. Ordnung)
 - mit unterschiedlichem prozentualen Anteil am Substrat (bzw. der oTS)
- stundengenaue Fütterungszeitpunkte und –mengen von mehreren verschiedenen Substraten
- Gasspeichergröße
- Reaktorvolumen
- Verstromungsszenario mit
 - o Höhe des Verbrauchs
 - o Dauer des Verbrauchs im Wochenverlauf, stundengenau

Die Simulation lieferte folgende Ausgabegrößen sowohl für die flexible, als auch für die kontinuierliche Betriebsweise:

- stundengenaue Biogasproduktionsrate
- Füllstände im Wochenverlauf für einen virtuellen Gasspeicher auf Basis
 - o der gemessenen Biogasproduktionsmengen
 - o der simulierten Biogasproduktionsmengen bei
 - flexibler
 - kontinuierlicher Fütterung

Die Eingangsgrößen der Simulation wurden jeweils auf die Versuchsbedingungen angepasst und ggf. händisch optimiert (Fraktionierung und Kinetiken). Das Biogasertragspotential wurde auf die (im Reaktor) erzielten Werte angepasst und weicht daher tw. von vergleichbaren Tabellenwerten ab, da es nur die erreichten Mengen für das eingesetzte Substrat unter den vorherrschenden Bedingungen (Raumbelastung, hydraulische Verweilzeit) widerspiegelt.

Die Simulation wurde so realisiert, dass jede oTS-Fraktion (in der Berechnung dargestellt als das ihr entsprechende Biogaspotential) einzeln für sich genommen stündlich bilanziert (Zugang durch Fütterung – Verbrauch durch Abbau) und die sich daraus ergebende produzierte Biogasmenge berechnet wurde.

Die verwendete Abbaufunktion 1. Ordnung lässt sich wie folgt darstellen:

$$v = -\frac{\partial BP_t}{\delta t} = k * BP_t$$

umgeformt zu

$$BP_t = BP_0 * e^{-kt}$$

mit der Reaktionsgeschwindigkeit v , der (im Reaktor) in Form des Substrates zur Verfügung stehenden Biogaspotentialmenge BP zu den gegebenen Zeitpunkten 0 und t , sowie der Abbaurate k (d^{-1}).

Daraus lässt sich die während eines Intervalls (der Dauer x) abgebaute Menge an Biogaspotential und damit die Menge freigesetzten Biogases (Y) für jede betrachtete Fraktion jedes betrachteten Substrates berechnen:

$$Y_x = BP_t - BP_{t-x}$$

Das im Reaktor verbleibende Biogaspotential BP_t wurde dementsprechend kontinuierlich bilanziert. Fütterungen wurden dem verbleibenden Potential zum nächsten folgenden Inkrementszeitpunkt hinzugerechnet.

Alle Fraktionen aller Substrate wurden getrennt berechnet und die produzierten Biogasmengen für jedes Inkrement addiert.

Die Anpassung der Parameter eines Substrates erfolgte durch wiederholte Stoßbelastungen mit nur dem einen Substrat. Die Parameter der Simulation wurden darauffolgend hinsichtlich der Dynamik und der produzierten Gasmengen an die Messdaten angepasst.

2.2 Flexible Gasproduktion im großtechnischen Maßstab

Die flexible Biogasproduktion wurde über einen Zeitraum von 8 Monaten mit 3 unterschiedlichen Substratzusammensetzungen an der großtechnischen Versuchsbiogasanlage des Fraunhofer IEE durchgeführt. Nachfolgend werden zum Verständnis der in Kapitel 3 dargestellten Ergebnisse die Versuchsbiogasanlage und die vor Ort der Versuchsdurchführung vorliegenden Rahmenbedingungen, die angestrebte Flexibilität der Gasproduktion, der Substrateinsatz und Fütterungsplan, die begleitende Laboranalytik sowie die Leistungskennzahlen zur Bewertung und Analyse der Gasproduktion beschrieben.

2.2.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Die Biogasanlage, an der das Projekt UBEDB durchgeführt wird, ist die Versuchsbiogasanlage des Fraunhofer IEE in Bad Hersfeld. Diese wird nachfolgend beschrieben.

Die Biogasanlage besteht aus einer Güllevorgrube, zwei Fermentern, einem Nachgärer bzw. Gärrestlager und einem Endlager. An der Biogasanlage sind zwei BHKWs mit einer Gesamtleistung von 200 kW_{el} installiert. Die Bemessungsleistung beträgt 160 kW_{el}. Die beiden Fermenter sind in unterschiedlicher Bauweise errichtet. Der Bestandsfermenter hat ein Nettovolumen von ca. 611 m³ und ist mit einem Gasspeicherfoliendach ausgestattet. Der Forschungsfermenter, an dem die Gasproduktionsversuche durchgeführt werden, hat ein Nettovolumen von ca. 366 m³ und ist ein zylindrischer Hochbehälter mit einer Betondecke (siehe Abbildung 2, rote Markierung). Der Nachgärer ist gleichzeitig auch Gärrestlager mit einem Gasspeicherfoliendach und einem Nettofaulraumvolumen von ca. 2.690 m³. Darüber hinaus ist ein nicht abgedecktes Endlager, aus dem das Gärsubstrat zur Ausbringung auf landwirtschaftliche Flächen entnommen wird, ein weiterer Anlagenbestandteil.



Abbildung 2: Luftbild Biogasanlage am Hessischen Biogasforschungszentrum

Das Einbringsystem des Forschungsfermenters ist eine Nassfütterung über einen Quickmix der Firma Vogelsang (siehe Abbildung 3). Über einen Feststoffdosierer werden die festen Substrate eingewogen und anschließend im Quickmix mit Gülle vermischt. Danach wird das angemischte Substrat über eine Pumpe in den Fermenter eingebracht.



Abbildung 3: Fütterungssystem des Forschungsfermenters

Die Durchmischung im Forschungsfermenter erfolgt über ein zentral im Betondeckel sitzendes Rührwerk mit zwei horizontal ausgerichteten Rührwerksflügeln. Zusätzlich ist ein Schnellläufer im Behälter eingebaut, um Schwimmschichten zu vermeiden.

Die Weiterleitung des Substrates aus dem Forschungsfermenter in das nebenstehende Gärrestlager erfolgt über einen automatischen Überlauf. Dementsprechend kommt es beim Übersteigen eines bestimmten Füllstands im Behälter zum Überfließen des Fermentersubstrates in das Gärrestlager. Zudem besteht die Möglichkeit, Substrat aus dem Fermenter mittels Pumpe zu entnehmen und in den Nachgärer zu überführen, was im Normalbetrieb allerdings nicht erfolgt.

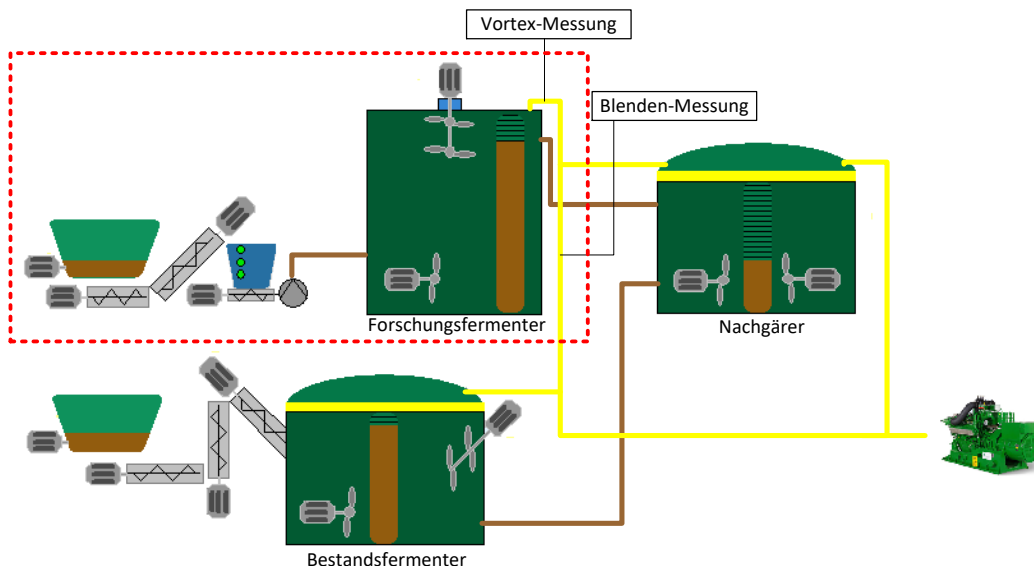


Abbildung 4: Schema Biogasanlage mit Systemgrenzen des Versuches

Die Systemgrenzen der Versuchsdurchführung sind in Abbildung 4 in rot dargestellt. Diese zeigen, dass die Dokumentation der Massen- und Volumenströme von der Fütterung bis zu den Gasmengenmessungen erfolgt.

Essentiell für das Forschungsprojekt ist die am Fermenter installierte Gasvolumenstrommesstechnik (siehe Abbildung 4), da die produzierte Gasmenge dem Strombedarf bestmöglichst entsprechen soll und die Grundlage für die Ermittlung der erforderlichen Gasspeicherkapazität darstellt.

Die Erfassung der Gasproduktion am Forschungsfermenter erfolgt über zwei Gasmesseinrichtungen. Um auch geringe Gasvolumenströme erfassen zu können, wurde ein Vortex Strömungssensor zusätzlich zum vorhandenen Differenzdruckverfahren an der Anlage während des Projektes installiert. Beide Verfahren werden nachfolgend kurz beschrieben.

Die für das Projekt neu installierte Messeinrichtung befindet sich am Deckel des Behälters in der Biogasleitung zum Gärrestlager hin. Der Vortex Strömungssensor VA Di 50 arbeitet nach dem Prinzip der Wirbelstromdruckflussmessung und erfasst Volumenströme von 0 – 150 m³/h.

Die zweite Gasmesseinrichtung befindet sich an der Gasleitung des Fermenters, die das Biogas in die Sammelleitung der Biogasanlage einspeist. Diese Volumenstrommessung der Marke Siemens Sitrans P DS III arbeitet nach dem Prinzip der Differenzdruckmessung mit Messblende. Sie ist für Volumenströme von 0 – 500 m³/h geeignet. Neben diesen beiden Einrichtungen zur Gasmengenbestimmung erfolgt an der Biogasanlage standardmäßig die Analyse der Gasqualität im Fermenter.

Für die flexible Biogasproduktion wurde zudem eine neue Überdrucksicherung am Forschungsfermenter nachgerüstet. Die bisherige Überdrucksicherung nach dem Wassertassen-Prinzip der Firma MT Energie konnte bis zu einem maximalen Überdruck von 5 mbar eingestellt werden. Dies reicht aufgrund der festen Behälterdecke für flexible Biogasproduktion nicht aus, da vor allem am Wochenanfang in Folge einer Stoßfütterung höhere Drücke im Forschungsfermenter entstehen können. Diese hohen Drücke entstehen durch die vermehrte Gasproduktion in Folge der geballten Fütterung und vor allem durch das notwendige Rühren währenddessen. Werden die erhöhten Gasmengen über die Überdrucksicherung abgeblasen, können diese messtechnisch nicht mehr erfasst werden.

Aus diesem Grund wurde die Überdrucksicherung zu Beginn der Versuchsdurchführung durch eine mechanische Überdrucksicherung mit Gewichtskugeln ersetzt, die auf einen Überdruck von bis zu 20 mbar eingestellt wurde.

2.2.2 Substrateinsatz und Fütterungsplan

In den folgenden Unterkapiteln ist der Versuchs- und Fütterungsplan beschrieben. Dieser soll einen Überblick über die ausgewählten Substrate und in die Methodik der Zusammensetzung der Fütterungschargen geben sowie der analytischen Versuchsbegleitung und –auswertung bieten.

2.2.2.1 Versuchsplan

Im Rahmen des Projektes erfolgten drei Teilversuche, welche in Abbildung 5 dargestellt sind. Im ersten Versuch wurde die Substratkombination aus Gülle, Maissilage, Rinderfestmist und Zuckerrüben untersucht. Im zweiten Teilversuch kam eine Kombination aus Gülle, durchwachsener Silphie und Getreideschrot zum Einsatz und im dritten Teilversuch Gülle und Maissilage.

April	Mai	Juni
KW: 15-26		
Zuckerrübe, Mais, Festmist, Gülle		
Juli	August	September
KW: 27-38		
Silphie, Getreideschrot, Gülle		
Oktober	November	Dezember
KW:39-51		
Mais, Gülle		

Abbildung 5: Übersicht und zeitlicher Ablauf des Substrateinsatzes zur flexiblen Gasproduktion

Der Zeitrahmen für die jeweiligen Versuche sind acht Wochen. Eine Umstellungsphase von 4 Wochen bietet den Mikroorganismen Zeit sich auf eine geänderte Substratration einzustellen. Des Weiteren zeigt Tabelle 2 eine Übersicht über die in den jeweiligen Versuchen eingebrachten Mengen der einzelnen Substrate.

Tabelle 2: Eingesetzte Substratmengen während der Versuche

	<i>Substrate</i>	<i>Gesamt mengen [t FM]</i>
Versuch 1	Gülle	76
	Maissilage	101
	Rinderfestmist/Zuckerrüben (3:2)	62
Versuch 2	Gülle	186
	Maissilage	26
	Silphie	206
	Getreideschrot	8
Versuch 3	Gülle	216
	Maissilage	146

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für einen Fütterungsplan im Wochenverlauf des zweiten Versuches mit Silphie, Gülle und Getreideschrot. Wie aus dieser Graphik ersichtlich wurde an den Wochentagen konstant die gleich Menge an Gülle gefüttert, während die Menge an Silphie im Wochenverlauf reduziert wurde. Das Getreideschrot kam dabei erst am Donnerstag und am Freitag mit ansteigenden Mengen zum Einsatz. Die gesamten Fütterungspläne der Umstellungs- und Versuchsphasen sind im Anhang 2 abgebildet.

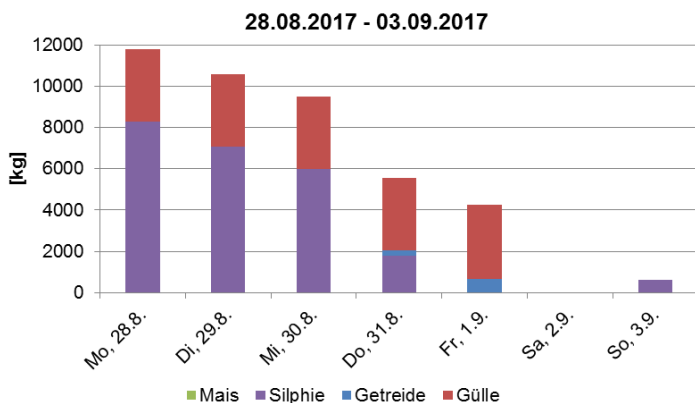


Abbildung 6: Beispiel für einen wöchentlichen Fütterungsplan im Versuch mit Silphie und Getreideschrot

2.2.2.2 Charakterisierung der eingesetzten Substrate

Die Trockenmasse (TM), organische Trockenmasse (oTM) und der Glührückstand der eingesetzten Biomasse und des Gärsubstrates wurde wöchentlich erfasst. Die Untersuchungen auf TM und oTM dienen hierbei der Bestimmung des noch im Fermenter vorhandenen Potentials an verfügbarer, vergärbare Substanz. Dadurch lassen sich Schlüsse auf das noch vorhandene Gaspotential im Fermenter ziehen. Der Glührückstand stellt im Gegenzug dazu den Gehalt an anorganischen Bestandteilen im Substrat dar und gibt somit Aufschluss über die nicht verwertbaren Bestandteile. Er dient als Kontrolle für die Qualität der Substrate. Parallel zu diesen genannten Analysen erfolgte bei der Untersuchung des Fermentersubstrates die Bestimmung des pH-Wertes, des Essigsäureäquivalentes (EQ), des Gesamtstickstoff- und des Ammoniumstickstoffgehalts.

Gülle

Die Gülle, die in der Biogasanlage des HBFZ eingesetzt wird, besteht aus einer stetig variierenden Mischung aus Rinder- und Schweinegülle. Dies ist an den Laborergebnissen zur Trockenmasse, der organischen Trockenmasse und dem Glührückstand über die drei Teilversuche hinweg zu erkennen (siehe Abbildung 7). Während Schweinegülle im Durchschnitt einen niedrigen TM-Gehalt von ca. 6 % aufweist, besitzt die Rindergülle im Durchschnitt einen höheren TM-Gehalt von ca. 10 %. [14]

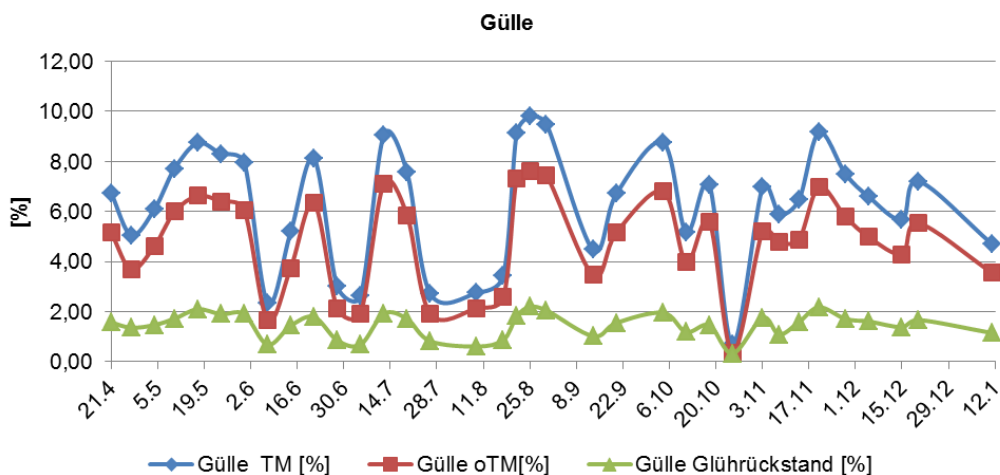


Abbildung 7: Zusammensetzung der Gülle im Versuchszeitraum

Wie aus Abbildung 7 erkennbar schwankt der TM-Gehalt von April 2017 bis Dezember 2017 zwischen 0,69 % und 9,82 %. Im ersten Teilversuch lag er im Durchschnitt bei 6,32 %, im zweiten Teilversuch bei 6,59 % und im dritten Teilversuch bei 6,30 %. Ähnlich verhalten sich die Werte der oTM. Diese schwankten im Verlauf des Projektes zwischen 7,62 % und 0,36 %. Im Versuch mit Rinderfestmist und Zuckerrübe liegt der Mittelwert bei

4,81 %, im Versuch mit Silphie und Getreideschrot bei 5,22 % und im letzten Teilversuch mit Maissilage bei 4,83 %. Der Glührückstand schwankt im Vergleich dazu nur gering zwischen 2,20 % und 0,33 % von April bis Dezember 2017. Die Mittelwerte liegen in den Teilversuchen bei 1,51 % im Ersten, 1,50 % im Zweiten und 1,47 % im Dritten.

Die hohen Schwankungen ergeben sich aus den Waschvorgängen im Schweinestall und dem damit einhergehenden hohen Wasseranteil in der Schweinegülle. Im Abstand von ca. 3-6 Wochen erfolgt die Reinigung der Schweineställe, wodurch erhebliche Mengen Wasser die Schweinegülle verdünnen. Zusätzlich wird in unregelmäßigen Zeitabständen Rindergülle in die Vorgrube der Biogasanlage gepumpt. Die Einleitung von Rindergülle in die Vorgrube erfolgt nur, sobald die vorhandene Menge in der Vorgrube für die benötigten Mengen beider Fermenter nicht ausreicht. Für die Verarbeitung der Gülle in der Biogasanlage zur dynamisierten Fütterung muss diese keiner zusätzlichen Vorbehandlung unterzogen werden.

Diese Umstände gilt es bei der Analyse der Gasproduktion zu beachten!

Maissilage

Der Mais ist ein an Biogasanlagen häufig eingesetztes Substrat und dient, wie die Gülle, ebenfalls als Basissubstrat für den Flexibilisierungsversuch. In Abbildung 8 sind die Eigenschaften der Maissilage im Verlauf der drei Versuche dargestellt.

Der TM-Gehalt der Maissilage schwankt über den Versuchszeitraum zwischen 45,81 % und 23,84 %. Gleiches gilt für den oTM-Gehalt, dieser variiert zwischen 44,27 % und 22,77 %. Der Glührückstand schwankt nur gering zwischen 1,90 % und 0,97 %.

Der TM-Gehalt der eingesetzten Maissilage im Teilversuch 1 liegt im Mittel bei 41,59 %. Der oTM-Gehalt in der Frischmasse beläuft sich im Mittel auf 40,17 % und der Glührückstand liegt im Schnitt bei 1,43 %. Die Qualität der Maissilage betreffend sollte der TM-Gehalt im Optimum zwischen 35 % TM bis 40 % TM liegen. Während der Glührückstand, oder auch Rohasche genannt, unter 10 % im Optimum liegen sollte. [15] 226 ff. Demzufolge liegt der TM-Gehalt im Durchschnitt minimal über dem Optimum, während der Glührückstand optimal ist, wodurch von einer Maissilage mit sehr guter Qualität im ersten Teilversuch gesprochen werden kann.

Im Verlauf des zweiten Teilversuches wurde eine andere Maissilagencharge mit geringerem TM und oTM-Gehalt eingesetzt. Dies ist auch anhand von Abbildung 8 durch die abfallenden Werte von TM und oTM zum 28.07.2017 hin zu erkennen. Im zweiten Teilversuch lagen der TM-Wert im Mittel bei 29,79 % und der OTM-Gehalt bei 28,26 %, während der Glührückstand im Durchschnitt bei 1,53 % lag.

Im dritten Versuch wurde eine weitere Maissilagencharge verwendet. Diese wurde in einem Freihafen gelagert und die wöchentlich benötigten Mengen wurden an die Biogasanlage umgelagert. Der TM-Gehalt dieser Maissilage lag im Durchschnitt bei 34,41 % und der oTM-Gehalt lag bei 33,19 %. Der Glührückstand befand sich im Mittel bei 1,22 %.

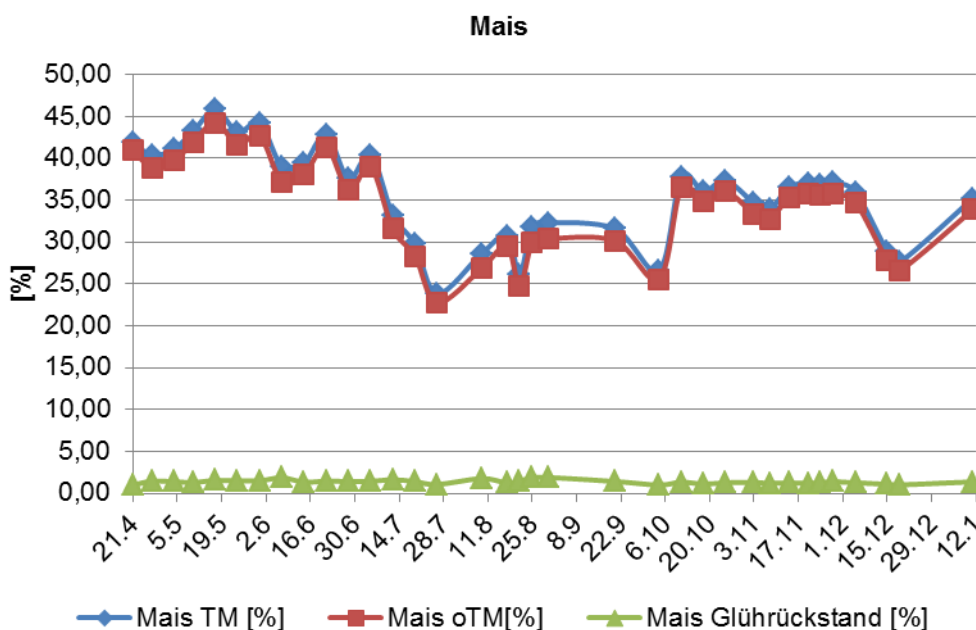


Abbildung 8: Eigenschaften Maissilage im Verlauf der drei Teilversuche

Zusätzlich zu diesen Substraten, Gülle und Maissilage, kommen im ersten Teilversuch die Biomassen Festmist und Zuckerrübe zum Einsatz. Die Auswahl begründet sich im Falle des Festmists durch die Verfügbarkeit in der Landwirtschaft. Durch den Anteil an Stroh im Festmist und somit des Anteils an Zellulose, zählt Festmist zu den schwer vergärbaren Substraten [16], jedoch als Reststoff mit hoher Praxisrelevanz.

Festmist-Zuckerrübenmix

Für den Einsatz von Zuckerrüben spielt die Verfügbarkeit für Biogasanlagen ebenfalls eine Rolle, wesentlicher ist aber, dass die Zuckerrübe ein schnell vergärbares Substrat darstellt, durch deren Einsatz innerhalb kürzester Zeit die Gasproduktion gesteigert werden kann. Für die Vergärbarkeit ist dabei vor allem der Anteil an Kohlenhydraten von Bedeutung. Diese zählen auf Grund ihrer guten Verdaulichkeit zu den schnell vergärbaren Bestandteilen [16]. Die Zuckerrübe besitzt mit einem Gehalt von 64,7 % Zucker und Stärke der TM einen doppelt so hohen Anteil an schnell vergärbaren Bestandteilen im Vergleich zur Maissilage, welche einen Anteil an Kohlenhydraten von 28 % der TM besitzt [17].

Für die Nutzung des Einbringsystems „Quickmix“ an der Forschungsbiogasanlage müssen die Substrate bestimmte Eigenschaften aufweisen. Der angelieferte Rinderfestmist war aufgrund der großen Halmlänge des Strohs von bis zu 30 cm nicht für das an der Forschungsbiogasanlage vorhandene Einbringsystem geeignet. Des Weiteren befanden sich, durch die zeitliche Verzögerung im Projekt, die Zuckerrüben zum Teil in einem schlechten Zustand und waren daher für das vorhandene Einbringsystem nicht geeignet. Beide Substrate wurden daher mechanisch zerkleinert. Da die Zuckerrübe im zerkleinerten Zustand zu einem hohen Flüssigkeitsverlust neigt, wurden die beiden Substrate zusammen zerkleinert und eingelagert. Auf diese Weise kann der Sickersaft der Zuckerrüben in den Strohfasern des Festmists gebunden werden, damit dieser nicht ungenutzt verloren geht. Dementsprechend wurden beide Substrate, 60 t Festmist und 40 t Zuckerrüben, in einem Verhältnis 3:2 Festmist: Zuckerrübe (Fm/Zr) zusammen zerkleinert (siehe Abbildung 9) und vermischt miteinander in einem betonierten Fahrsilo gelagert.



Abbildung 9: Zerkleinerung und Mischen von Rinderfestmist und Zuckerrübe

Der Nachteil der Mischung beider Substrate ist, dass die Vorteile der unterschiedlichen Gasproduktionsraten von Festmist und Zuckerrüben schlechter genutzt werden können. Die Planung war, dass das schwer vergärbare Substrat in Form von Festmist zu Wochenanfang gefüttert wird und die leicht vergärbaren Zuckerrüben zum Wochenende hin. Dies konnte in dieser Form nicht durchgeführt werden.

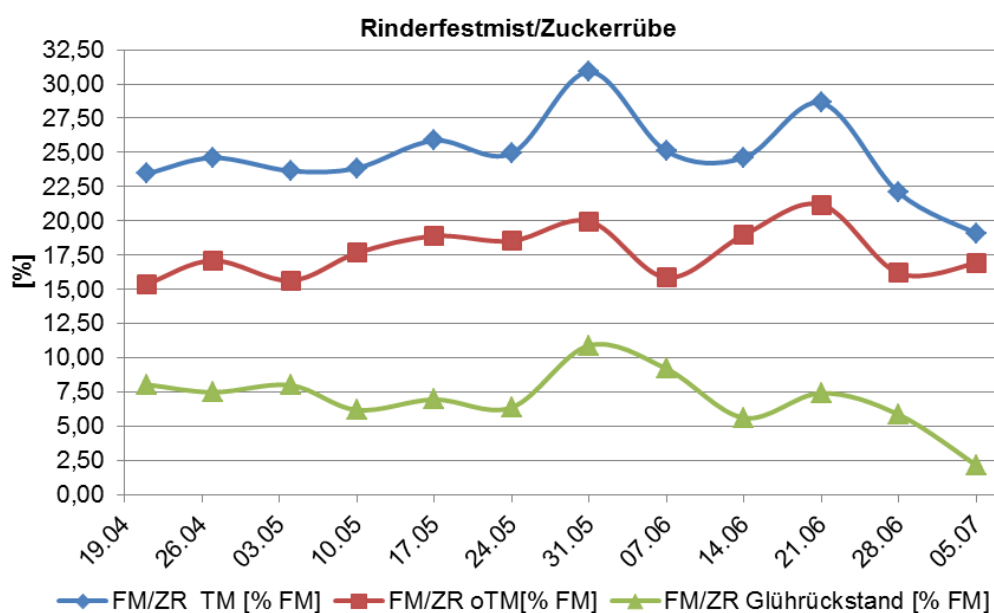


Abbildung 10: Eigenschaften des Gemisches aus Rinderfestmist und Zuckerrüben

Bei dem Gemisch schwankte der Trockenmasseanteil zwischen 19,10 % und 30,89 %, wie in Abbildung 10 ersichtlich. Im Mittel lag der TM-Gehalt bei 24,73 %. Die oTM lag im Durchschnitt bei 17,70 % und variierte zwischen 15,40 % und 21,19 %. Der Glührückstand bewegte sich zwischen 2,17 % und 10,91 %, bei einem Mittelwert von 7,03 %. Bei diesem Gemisch von Festmist und Zuckerrübe liegen die Werte der TM um ca. 1 % höher als die gegebenen, optimalen Literaturwerte der KTBL und bei der oTM um 16 % niedriger als die der Literaturwerte [14]. Das bedeutet, dass dieses Gemisch auf Grund des niedrigen oTM-Gehaltes ein geringeres Gaspotential besitzt und somit qualitativ nicht optimal ist.

Silphiesilage

Im zweiten Versuch werden neben Gülle die durchwachsene Silphie und Getreideschrot eingesetzt. Dabei dient die Silphie als Grundsubstrat, während das Getreide aufgrund seiner sehr schnellen Abbaubarkeit für eine hohe Flexibilität sorgen soll. In der Umstellungsphase wurde zusätzlich noch Maissilage eingebracht, die im Laufe der Umstellungsphase reduziert wurde, da die dynamisierte Fütterung mit Silphie und Getreideschrot ohne Maissilage untersucht werden sollte.

Die Silphie wurde für den Versuch auf einem Freihaufen gelagert und zum Versuchsbeginn in ein Fahrsilo an der Biogasanlage umsiliert. Des Weiteren reichte diese Menge Silphie nicht für den gesamten Versuch aus, weswegen ab dem 22.08.2017 eine Silage bestehend aus Silphie und Wildpflanzen genutzt werden musste.

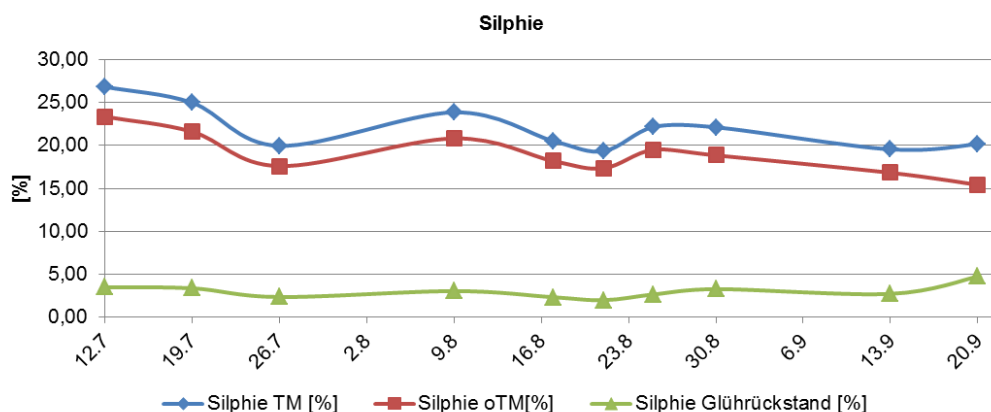


Abbildung 11: Eigenschaften von Silphie

Wie in Abbildung 11 ersichtlich schwankte der TM-Gehalt zwischen 19,36 % und 26,86 %, im Mittel betrug er 21,97 %. Die oTM variierte von 15,43% bis 23,38 % und lag im Durchschnitt bei 18,97 %. Der Glührückstand lag im Mittel bei 3,0 % und schwankte zwischen 1,99 % und 4,76 %.

Die Silphie wurde für den Einsatz in der Biogasanlage vorgesehen und dementsprechend mit kurzer Schnittlänge von 1,5 – 2 cm gehäckselt, sodass sie keiner weiteren Vorbehandlung vor der Einbringung in den Quickmix unterzogen werden musste.

Getreideschrot

Neben der Silphie wurde im zweiten Versuch Getreideschrot als Fütterungskomponente eingesetzt. Hierfür wurde die am LLH vorhandene Gerste mittels einer mobilen Mühle zerkleinert. Anschließend wurde das zerkleinerte Getreide in einem Silo, zum Schutz vor Witterungseinflüssen mit einer Plane abgedeckt, gelagert.

Für die Umstellungsphase wurde die Menge von 3 t Gerste geschrotet. Bei der rationsweisen Einbringung der täglichen Mengen in den Fermenter kam es daraufhin zu erheblicher Schaumbildung, welche durch den Einsatz von Rapsöl (10 l/d) als Entschäumer beseitigt werden musste. Daraufhin wurde die zweite Teilmenge der Gerste am 16.08.2017 gequetscht anstatt geschrotet. Somit konnte das Problem der Schaumbildung behoben werden. Die Eigenschaften des Getreides sind in Abbildung 12 dargestellt.

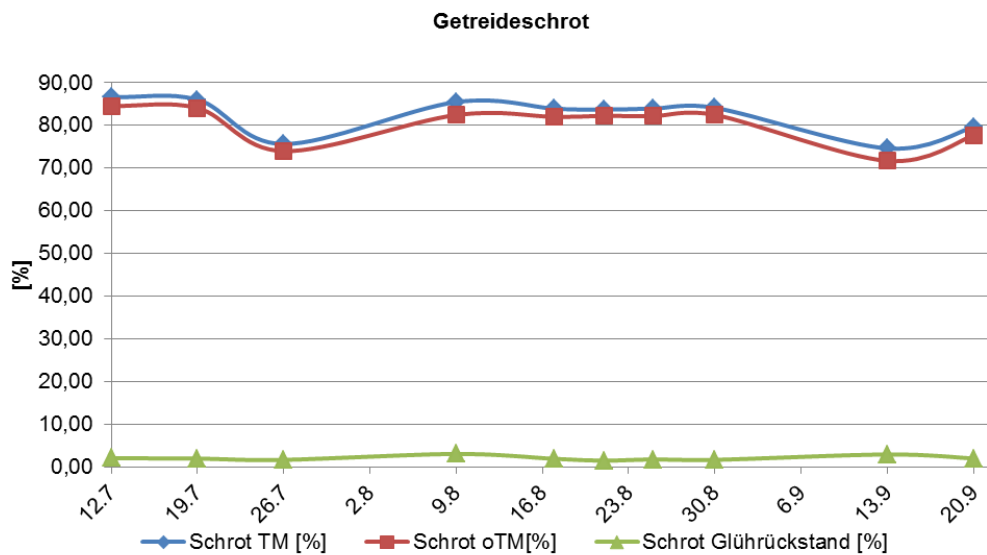


Abbildung 12: Eigenschaften des Getreides

Anhand von Abbildung 12 kann man erkennen, dass der TM-Gehalt des Getreides zwischen 86,60 % und 74,60 % schwankt. Im Mittel lag dieser bei 82,35 %. Die oTM variierte von 84,53 % bis 71,68 % und lag im Durchschnitt bei 80,30 %. Der Glührückstand befand sich im Mittel bei 2,05 % und variierte dabei zwischen 3,04 % und 1,49 %. Anhand der Graphik ist dabei ebenfalls erkennbar, dass die Form der Zerkleinerung keinen Einfluss auf die Qualität des Getreides hat.

2.2.3 Kontinuierliche Optimierung der flexiblen Gasproduktion mittels Simulation

Wie bereits erläutert erfolgte zu Beginn des Projektes die Festlegung des Strom- und Gasproduktionsfahrplanes (vgl. Kapitel 2.4.2). Anschließend die Simulation der Gasproduktion als Grundlage für die Erstellung der Fütterungspläne. Das bedeutet, dass mittels der Simulationen der dynamisierte Fütterungsplan erstellt und anschließend angepasst und optimiert wird. Die Simulationen basieren dabei auf den Fütterungsmengen in kg FM/d, der Abbaukinetik 1. Ordnung (k-Wert) [d⁻¹], dem TM-Gehalt in %, dem oTM-Gehalt in der TM in %, dem Biogasertrag in m³/kg oTM und dem Biogaspotential in kg/m³. In Tabelle 3 ist beispielhaft ein Fütterungsplan für eine Woche dargestellt. Dieser beinhaltet, neben den einzelnen Mengen an Gülle, Fm/Zr und Mais, die Gesamtstoffmenge, die hydraulische Verweilzeit (HRT) und die Raumbelastung (BR).

Tabelle 3: Fütterungsplan Beispielhaft, Umstellungswoche 3 des 1. Versuches

<i>Zeitraum</i>	<i>Gülle</i>	<i>Fm/Zr</i>	<i>Mais</i>	<i>Gesamtfeststoffmenge</i>	<i>HRT</i>	<i>BR</i>
<i>Umstellung:</i>		<i>(3/2)</i>				
<i>Woche 3:</i>						
<i>24.4. -30.4.</i>	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[d]	[kg oTS/m ³ d]
Mo	1506	1610	4805	6415	34	6,5
Di	1506	1610	3156	4766	43	4,6
Mi	1506	1610	3156	4766	43	4,6
Do	1506	1610	3156	4766	43	4,6
Fr	1506	1610	1506	3116	60	2,7
Sa	0	0	0	0	0	0,0
So	0	0	300	300	0	0,3
Mittel	1076	1150	2297	3447	60	3,3
Summe, Woche	7532	8048	16079	24128		

Zur Berechnung der Kinetik wurden für die Kenndaten von Biogasertrag und Biogasdichte Literaturwerte des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) verwendet (siehe Tabelle 4). Die TM - und oTM – Gehalte der einzelnen Substrate wurden hingegen im Labor untersucht und entsprechen demnach realen Werten.

Tabelle 4: Substrateigenschaften

	<i>TM</i>	<i>oTM</i>	<i>Gehalt</i>	<i>Biogasertrag</i>	<i>Biogasertrag</i>
	[%]	[%TM]		[l/kg oTM]	[m ³ /kg oTM]
Gülle	6	76		420	0,42
Mais 1. Versuch	42	97		650	0,65
Mais 2. Versuch	30	95		650	0,65
Mais 3. Versuch	34	96		650	0,65
Festmist	25	85		450	0,45
Zuckerrüben	23	92		700	0,7
Fm/Zr	24	88		550	0,55
Silphie	22	86		480	0,48
Getreideschrot	82	98		730	0,73

Für die Optimierung der Gasproduktion werden geplante Fütterungsmengen in die Simulationen eingearbeitet und können anschließend ausgewertet und angepasst werden. Abschließend werden die tatsächlichen Fütterungswerte, die gemäß Betriebsdokumentation in die Anlage eingebracht wurden, eingearbeitet, um eine Verifizierung der Simulationen vornehmen zu können. Diese Fütterungsdaten wurden während der Versuche anhand der Messdaten kontinuierlich angepasst.

2.2.4 Versuchsbegleitende Laboranalysen

Zur kontinuierlichen Versuchsauswertung wurden über den kompletten Versuchszeitraum Laboranalysen zur Prozessüberwachung durch das LHL durchgeführt. Der Analyseplan zur Prozessüberwachung ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht über die Laboranalysen

	<i>Laboranalysen pro Woche</i>				
	TM/oTM [%]	EQ [mg/kg]	pH	Gesamt - N [kg/t FM]	Ammonium - N [kg/t FM]
<i>Regeluntersuchung</i>					
Inputsubstrate	1	-	-	-	-
Fermentersubstrat	1	1	1	1/4	1/4
<i>Intensivwoche</i>					
Inputsubstrate	5				
Fermentersubstrat	5	20	20	-	-

Die wöchentlichen Analysen bestehen darin, die jeweiligen Inputsubstrate auf deren TM, oTM und den Glührückstand zu untersuchen. Des Weiteren wird das Gärsubstrat aus dem Fermenter auf diese Gehalte hin untersucht. Zusätzlich erfolgt im Abstand von vier Wochen eine Kontrolle des Essigsäureäquivalentes (EQ), des Gesamtstickstoffs und des Ammoniumstickstoffs im Fermentersubstrat.

Neben diesen wöchentlichen Untersuchungen erfolgt eine gesonderte Analyse des Forschungsfermenters innerhalb einer Intensivwoche. Die Intensivwoche fußt auf der gesonderten Betrachtung des Forschungsfermenters durch vier tägliche Probenentnahmen aus dem Fermenter über eine Woche hinweg. Somit soll gezielt vor allem der Verlauf der EQ-Werte in Abhängigkeit der dynamischen Fütterung überprüft werden. Im Folgenden werden die Laboranalysen kurz erläutert.

2.2.5 Leistungskennzahlen zur Bewertung der flexiblen Gasproduktion

Folgende Leistungskennzahlen wurden festgelegt um die Flexibilität der Gasproduktion analysieren und bewerten zu können. Darüber hinaus erlauben die gebildeten Leistungskennzahlen auch einen Vergleich der verschiedenen Versuchswochen mit unterschiedlichen Substraten sowie den Vergleich der Laborversuche mit den großtechnischen Versuchen.

Einsparung Gasspeicherpotential

Diese Kennzahl gibt an, wie viel Volumenprozent des Gasspeichers bei der flexiblen Gasproduktion im Vergleich zu einer kontinuierlichen Gasproduktion, bei in Kapitel 2.4.2 dargestelltem Verstromungsplan, eingespart wird.

Verlagerung der Gasproduktion wöchentlich

Diese Kennzahl stellt den Prozentsatz dar, um den die Gasproduktion in der flexiblen Fahrweise von dem Wochenende auf die Tage unter der Woche (Montag 8 Uhr bis Freitag 20 Uhr) verschoben wird. Als Referenz dient hierbei die kontinuierliche Gasproduktion, welche unter der Woche bei 64% liegt.

Verlagerung der Gasproduktion täglich

Diese Kennzahl stellt die Prozentzahl dar, um welche die Gasproduktion in der flexiblen Fahrweise am Tag verlagert wird. Hierbei wird die Verschiebung in den Stunden von 12.00 bis 24.00 Uhr eines Tages betrachtet, die repräsentativ für den Verstromungszeitraum von 8 h am Tag steht. Da die Fütterung erst nach 9.00 Uhr beginnt und eine Reaktionszeit für die Mikroorganismen einkalkuliert werden muss, wurde der Betrachtungszeitraum anders gewählt als vom Strommarkt verlangt.

Variation der Gasproduktion

Dieser Kennwert gibt an, welche minimale und maximale Gasproduktionsrate, in Prozent, in einer Woche erreicht wird im Verhältnis zur durchschnittlichen Gasproduktion der jeweils betrachteten Woche.

2.3 Auswertung der Gasproduktionsversuche

Die Ermittlung des Gasspeicherbedarfs dient dazu einen Nachweis zu erbringen, ob die Fragestellung der flexiblen Gasproduktion und somit Stromproduktion über eine flexible Fütterung ohne eine Erweiterung der Speicherkapazitäten grundsätzlich überhaupt möglich ist.

Zur Ermittlung des Gasspeicherbedarfs wurde die reale Biogasproduktion zu Grunde gelegt. Von der tatsächlichen Gasproduktion ausgehend, wurde die kontinuierliche Gasproduktion als Durchschnittswert über den jeweils betrachteten Zeitraum ermittelt. Über den Gasverbrauch in den festgelegten Verstromungszeiten lässt sich der Gasspeicherfüllstand empirisch ermitteln. Der Gasverbrauch ergibt sich aus der Annahme, dass pro Tag in einem festgelegten Zeitraum zweimal über vier Stunden das BHKW betrieben wird und somit ein Biogasverbrauch entsteht. Dabei stellt das Wochenende eine Ausnahme dar. An diesen beiden Tagen findet keine Stromproduktion statt und somit auch kein Biogasverbrauch. Grund hierfür sind die bereits erwähnten niedrigen Strompreise am Wochenende.

Ziel ist es, über die Fütterung den Gasspeicher zum Freitagabend hin möglichst zu leeren. Über das Wochenende kann der Gasspeicher ohne Verstromungszeiten langsam wieder gefüllt werden und erreicht somit am Montag, nach den ersten Fütterungen, den höchsten Füllstand. Der jeweilige Füllstand ergibt sich dabei aus der produzierten Biogasmenge und dem Gasverbrauch, anhand der Anzahl der Verstromungsstunden im spezifischen Betrachtungszeitraum.

Für die Analyse des Gasspeicherbedarfs erfolgt die Betrachtung jeweils anhand einer Beispielwoche aus einem der drei Teilversuche. Zu Beginn der jeweiligen Gasspeicherbetrachtung wird ein spezifischer Gasspeicherfüllstand als Ausgangswert gewählt. Dieser sollte am Freitagabend bei Null liegen. Zu beachten ist aber, dass der niedrigste Gasspeicherfüllstand im betrachteten Zeitraum größer gleich Null sein soll, da in der Realität ein negativer Füllstand nicht möglich ist. Aus diesem Grund muss der Ausgangswert für den Gasspeicherfüllstand größer Null gesetzt werden, soweit das der niedrigste Gasspeicherfüllstand größer Null ist.

Diese wöchentliche Betrachtung beginnt jeweils immer am Samstagmorgen und erstreckt sich bis zum darauffolgenden Freitagabend.

2.4 Ökonomische Analyse der flexiblen Biogasproduktion

Ziel der ökonomischen Analyse ist es die Auswirkungen einer flexibilisierten Gasproduktion von Bestandsbiogasanlagen auf deren Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Hierfür werden in diesem Kapitel die Methodik der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die gewählten Modellanlagen und betrachteten Szenarien sowie die ökonomischen Rahmenbedingungen beschrieben. Die Ergebnisse sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

2.4.1 Methodik der Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Annuitätenmethode stellt ein häufig verwendetes Verfahren dar, welches zur Investitionskostenentscheidung eingesetzt wird [20, 21]. Mithilfe des Annuitätsfaktors können Grundinvestitionskosten und laufende, sich ändernde Zahlungen in durchschnittliche Zahlungen während des Betrachtungszeitraumes transformiert werden. Die Annuität stellt somit den ermittelten, periodisch konstanten Betrag dar und kann als ein Zins- und Tilgungsanteil für rückzahlendes Kapital betrachtet werden.

Datenbasis für die Wirtschaftlichkeitsanalyse bilden Kostendaten des KTBL [22], Faustzahlen für Biogasanlagen [23], die ASUE [24], Gaserträgen für Biogassubstrate [22, 25], aktuelle Marktpreisdaten für Biogassubstrate [26], eine Marktpreiserhebung für Wärmespeicher [27], Experteninterviews mit Anlagenherstellern und anderen Branchenexperten (z.B. [28][29]), die mit Erfahrungswerten der Forschungsnehmer und des Unterauftragnehmers (MR Kommunalservice GmbH Kassel) ergänzt wurden. Erlöse wurden durch die Analyse historischer Strompreisdaten der EPEX SPOT generiert und mit Erfahrungswerten zu Regelergieerlösen sowie den festgelegten EEG-Vergütungen vervollständigt.

2.4.2 Betrachteter Verstromungs-/Gasproduktionsfahrplan

Richtungsweisend für die flexible Gasproduktion ist der Verstromungsfahrplan, der sich nach den Zeiten mit hohen bzw. niedrigen Strompreisen am Strommarkt richtet. Heute bekommen Anlagenbetreiber einer flexibel verstromenden Biogasanlage den Verstromungsfahrplan in der Regel auf Basis der Preisprognose des Stromhändlers, abgestimmt mit den individuellen technischen Restriktionen der Biogasanlagen bzw. der möglichen Verstromungsflexibilität.

Um geeignete Verstromungsfahrpläne für die Versuche zu generieren, wurde der Strommarkt EPEX SPOT der letzten Jahre auf Basis historischer Werte analysiert. Die Analyse basiert auf Marktpreisdaten des Intra-Day-Marktes.

Das Ergebnis der Analyse der letzten drei Jahre ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 abgebildet. Da eine kurzfristige Flexibilität, im Laufe eines Tages, in der Praxis kommerziell heute schon verbreitet und mittels einer Gasspeichererweiterung technisch umsetzbar ist, wird mit der flexiblen Gasproduktion im vorliegenden Vorhaben darauf abgezielt, eine höhere Verstromungsflexibilität zu erreichen. Durch die unten aufgeführten Analysen wird ersichtlich, dass aufgrund der Tiefpreiszeiten am Wochenende, durch einen wochenflexiblen Verstromungsbetrieb in der Vergangenheit Mehrerlöse gegenüber einem tagesflexiblen Verstromungsbetrieb erzielt werden konnten. Dies entspricht auch den Erkenntnissen der Studie von Barchmann et al. [30] sowie von Hahn et al. [31], der einen Kostenvergleich zwischen Gasspeicherung und flexibler Gasproduktion erstellt hat.

Die grün hinterlegten Verstromungsblöcke wurden so gewählt, dass diese in den Hochpreiszeiten im 3-Jahresdurchschnitt liegen. Ziel der flexiblen Gasproduktion ist es die Gasproduktion zu einem möglichst hohen Teil in diese Phasen zu verlagern, um in diesen Zeiten ausreichend Gas zur Verstromung verfügbar zu haben und die im Gegensatz zu Anlagen mit kontinuierlicher Gasproduktion benötigten Gasspeicherkapazitäten auf ein erforderliches Minimum zu reduzieren. Wirtschaftlich soll dies die zur Flexibilisierung der Anlage erforderlichen Investitionen und damit die Stromgestehungskosten zur Darbietung der Flexibilität reduzieren und letztendlich die Gewinnerwartungen des Anlagenbetriebs verbessern.

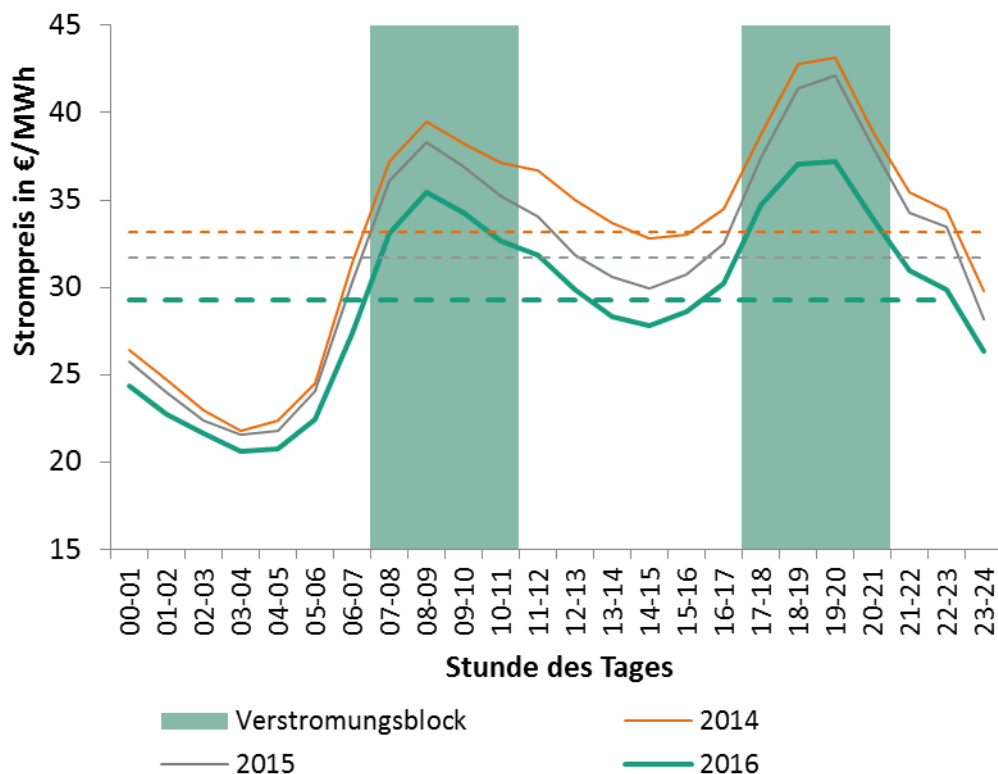


Abbildung 13: Strompreisentwicklung und Verstromungsblöcke im Tagesverlauf am Intra-Day-Markt in den Jahren 2014-2016*
 (Quelle: Marktpreisdaten EPEX SPOT, Intra-Day-Markt 2014-2016)

Legende: * gestrichelte Linien sind die jeweiligen Monatsmittelwerte

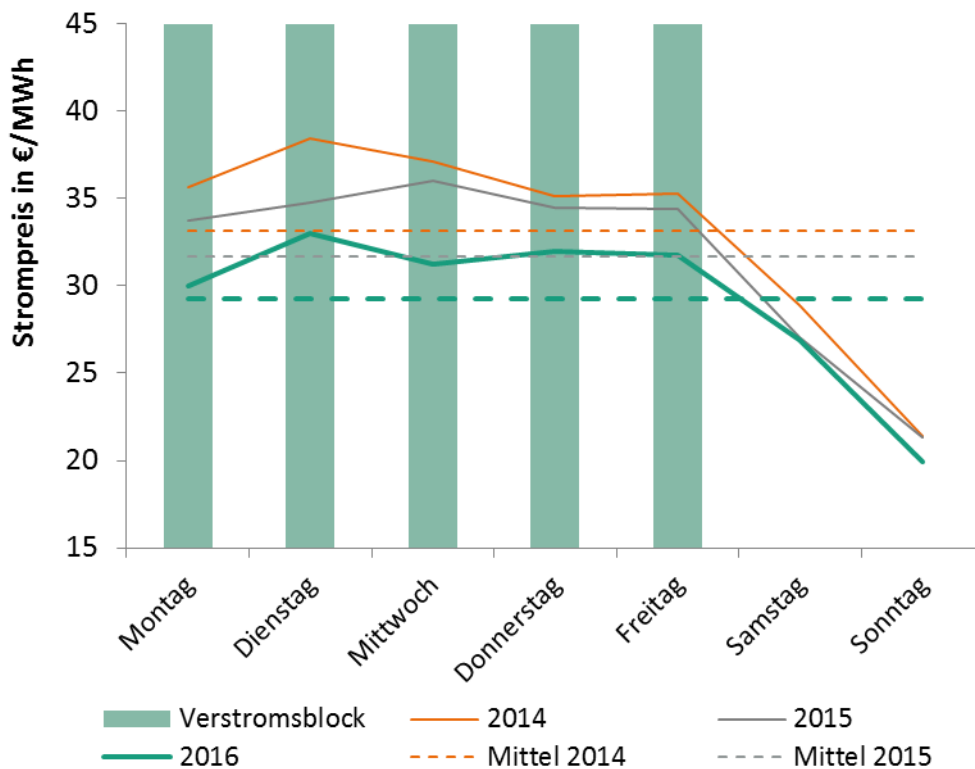


Abbildung 14: Strompreisentwicklung und Verstromungsblöcke im Wochenverlauf*
 (Quelle: Marktpreisdaten EPEX SPOT, Intra-Day-Markt 2014-2016)

Legende: * gestrichelte Linien sind die jeweiligen Monatsmittelwerte

2.4.3 Betrachtete Modellanlagen/Anlagenkonzepte

Die ökonomische Analyse des Fütterungsmanagements zur bedarfsorientierten Gasproduktion erfolgt anhand einer repräsentativen und in Deutschland, in der Landwirtschaft, weit verbreiteten 500 kW_{el} P_{Bem} NawaRo-Modellbiogasanlage (600 kW_{el} P_{Inst}). Für die Betrachtung der ökonomischen Auswirkung auf die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs wird davon ausgegangen, dass der Anlagenbetreiber vor der Entscheidung steht, seinen Anlagenbetrieb zu flexibilisieren. Für die weitere Betrachtung wird von dem Fall ausgegangen, dass die Flexibilisierung der Anlage im Jahr 10 der Anlagenlaufzeit, für eine betrachtete Restlaufzeit von 10 Jahren, geschehen soll. Die mit der Kapazitätserweiterung des bestehenden BHKWs verbundenen Investitionen möchte ein Anlagenbetreiber jedoch nur tätigen, wenn die Rentabilität des eingesetzten Kapitals ausreichend ist. Dies wird bei einer Investitionsbeurteilung mittels Annuitätenmethode (vgl. Kapitel 2.4.1) durch eine Annuität > 0 nachgewiesen. Für die Flexibilisierung der Anlage hat der Anlagenbetreiber (bzw. der Investor) verschiedene technische Möglichkeiten. Diejenigen, die im Rahmen des Projektes mit dem Fokus der wirtschaftlichen Bewertung der flexiblen Gasproduktion näher betrachtet wurden, werden im Folgenden beschrieben. Einen Überblick über die betrachteten Fälle, die im Anschluss näher beschrieben werden, gibt die folgende Auflistung:

Referenzanlage:

- 600 kW_{el} P_{Inst} NawaRo-Biogasanlage als Referenz

Fall 1:

- Kontinuierliche Gasproduktion und Gasspeichererweiterung - Flexibilisierung der Ausgangsanlage auf 2,1 MW_{el} P_{Inst} (konventioneller Referenzfall)

Fall 2a:

- Flexible Gasproduktion und Gasspeichererweiterung - Flexibilisierung der Ausgangsanlage auf 2,1 MW_{el} P_{Inst}

Fall 2b:

- Flexible Gasproduktion jedoch ohne Gasspeichererweiterung - Flexibilisierung der Ausgangsanlage auf 2 MW_{el} P_{Inst}

Beschreibung der Referenzanlage

Die Modellanlage, die in den folgenden weiteren Betrachtungen als Referenz dienen soll, ist eine 500 kW_{el} P_{Bem} NawaRo-BGA mit Erstinbetriebnahme im Jahr 2012 und demzufolge einer Vergütung des Stroms nach EEG 2012. Für den Referenzfall wird angenommen, dass die Anlage eine installierte Leistung von 550 kW_{el} hat und mit diesen 8.000 Volllaststunden erreicht. 30 % der auskoppelbaren Abwärme werden extern genutzt und mit 2 ct/kWh_{th} vergütet. Die eingesetzte Biomasse besteht aus Gülle, Getreide-GPS und Maissilage. Die Gasproduktion geschieht nahezu kontinuierlich. Der Gasspeicher (Doppelmembrangasspeicher) auf den Gärbehältern hat, zum Ausgleich von Gasproduktionsschwankungen und zur Überbrückung von Wartungszeiten, eine Speicherkapazität von ca. 11 Std. (bzw. 4.638 m³) bei kontinuierlicher Gasproduktion (Korrekturfaktor Messungenauigkeiten interner Gasspeicher 1,8 vgl. [31]).

Fall 1: Kontinuierliche Gasproduktion und Gasspeichererweiterung - Flexibilisierung der Ausgangsanlage auf 2,1 MW_{el} P_{Inst} (konventioneller Referenzfall)

Im ersten betrachteten Fall wird nicht in die Gasproduktion der Ausgangsanlage eingegriffen. Diese wird wie heute üblich flexibilisiert, in dem der Gasspeicher ausreichend erweitert wird. Es wird entsprechend der in Kapitel 2.4.2 betrachteten Verstromungsfahrpläne Strom produziert und Gas verbraucht bzw. zwischengespeichert. Demzufolge wird die Verstromungskapazität auf 2,1 MW_{el} P_{Inst} erweitert. Die hierfür

erforderliche Erweiterung des Gasspeichers (inkl. Gasstrecke) erfolgt durch einen entsprechend dimensionierten externen Gasspeicher [32]. Hierbei wird ein Korrekturfaktor, der Messungenauigkeiten etc. berücksichtigt, von 1,2, zwischen für die Verstromung erforderlichem nutzbarem und tatsächlichem Gasspeicher, angesetzt (vgl. [31]). Um auch bei einem hochflexiblen Verstromungsbetrieb die Abwärmenutzung zu gewährleisten, werden die Kosten für die Investition in einen Wärmespeicher berücksichtigt [27]. Der Betrieb des Nahwärmenetzes etc. wird nicht näher betrachtet. Dies rechtfertigt den geringen Wärmeerlös (vgl. Tabelle 6). Der Arbeitsaufwand für den Betrieb der Anlage bleibt unverändert. Aufgrund der zusätzlichen, externen Gasspeicherkapazitäten wird der Eigenstromverbrauch der Anlagen um 1% von 9 auf 10 % der Jahresbruttostromproduktion erhöht. Darüber hinaus werden die Kosten für ein Anlagenzertifikat, Planung und Genehmigung (inkl. Kosten für den Umweltgutachter) berücksichtigt. Der durch die flexible Verstromung nach in Abbildung 14 erstellte Verstromungsfahrplan erfolgt auf Basis der Preisanalyse nach EPEX-Spot. Die erzielten Mehrerlöse werden unter Stromhändler und Anlagenbetreiber gleichermaßen aufgeteilt.

Fall 2a: Flexible Gasproduktion und Gasspeichererweiterung - Flexibilisierung der Ausgangsanlage auf 2,1 MW_{el} P_{Inst}

Im Gegensatz zu der Betrachtung in Fall 1 wird im Fall 2a die Gasproduktion dem Bedarf (bzw. der geplanten Verstromung) angepasst. Die Fütterung erfolgte dementsprechend, wie in den im Vorhaben durchgeführten Versuchen. Durch eine flexible Gasproduktion kann der Gasspeicherbedarf bei gegebener Verstromungsflexibilität reduziert werden. In Anlehnung an die Versuchsergebnisse werden in Fall 2a (hoch) 40 % Einsparung des nutzbaren Gasspeicherbedarfs (frei von Korrekturfaktoren) aus den Versuchsergebnissen abgeleitet (vgl. Abbildung 41). In Fall 2a (gering) werden lediglich 20 % Einsparung angenommen.

Dies ist in der ökonomischen Kalkulation mit reduzierten Investitionskosten für die externe Gasspeichererweiterung (inkl. Gasstrecke) berücksichtigt. Der personelle Mehraufwand bleibt unverändert zu Fall 1, weil z.B. bei gegebenem Verstromungsplan am Wochenende im Gegensatz zu Fall 1 keine Fütterung erforderlich ist, wird angenommen, dass dadurch der höhere Aufwand für das Substratmanagement und die Prozessüberwachung kompensiert werden kann. Auf Seite der erzielten Erlöse ergeben sich, durch den gegenüber Fall 1 unveränderten Verstromungsbetrieb, keine Änderungen.

Fall 2b: Flexible Gasproduktion jedoch ohne Gasspeichererweiterung - Flexibilisierung der Ausgangsanlage auf 1,8 MW_{el} P_{Inst}

Im Fall 2b wird der Gasspeicher der Bestandsanlage aus Fall 1 nicht erweitert. Auf Basis der Versuchsergebnisse der flexiblen Biogasproduktion an der großtechnischen Anlage wird abgeleitet, welche Flexibilität mit der vorhandenen Gasspeicherkapazität erzielt werden kann. Investitionskosten in die Erweiterung der Gasspeicherkapazität entfallen in diesem Fall. Die Kosten für die Erweiterung der Verstromungskapazität fallen entsprechend der zusätzlich installierten elektrischen Leistung, der Erweiterung der Gasstrecke, des Anlagenzertifikats, Planung und Genehmigung an. Wie in Fall 2a wird von keinem höheren Arbeitsaufwand für den Betrieb der Anlage ausgegangen.

Ebenfalls wie in Fall 2a wird die Reduktion der Gasproduktion in den Zeiten ohne Verstromung um 40 % (hoch) und 20 % (gering) angenommen und die Auswirkung der Flexibilität der Gasproduktion bewertet.

2.4.4 Ökonomische Rahmenbedingungen

In Tabelle 6 sind die ökonomischen Rahmenbedingungen dargestellt, die der Wirtschaftlichkeitsanalyse zugrunde liegen. In Tabelle 7 wurden die Kosten und Eigenschaften der eingesetzten Biomasse in den Modellanlagen dargestellt.

Tabelle 6: Ökonomische Parameter der untersuchten Anlagenkonzepte

	Einheiten	
Betrachtungszeitraum	a	20 bzw. 10
Ek-anteil	% von Bruttoinvest	10
FK-anteil	% von Bruttoinvest	90
Nutzungsdauer		
Bauwerke	a	20
Maschinen/Technologie	a	10
Planung und Genehmigung	% von Bruttoinvest	8
Reperatur und Wartung		
Bauwerke	%/a	1
Maschinen/Technologie	%/a	4-7
Arbeitszeit	h d ⁻¹	4
Vergütung Lohnstunde	€ h ⁻¹	30
Stromeinkauf (el.)	€ kWh ⁻¹ _{el}	0,18
Substratverluste (Lagerverluste)	% von FM	8
Anteil Maissilage	Massen-%	50
Anteil Rindergülle	Massen-%	10
Anteil Getreide-GPS	Massen-%	40
Rindergülle, frei Eintrag	€/t FM	0,0
Getreide-GPS, frei Eintrag	€/t FM	39,6
Maissilage, frei Eintrag	€/t FM	40,4
Eigenkapitalanteil	%	10,0
Fremdkapitalanteil	%	90,0
Eigenkapitalzins	%/a	6,0
Fremdkapitalzins	%/a	5,0
Kalkulatorischer Mischzinssatz	%/a	5,1
Preissteigerung Kapitalkosten	% a ⁻¹	1
Preissteigerung alle anderen Kosten	% a ⁻¹	1
Planung und Genehmigung	% von Bruttoinvest	8 bzw. 5
Versicherung und Verwaltung ¹	% von Bruttoinvest	1,0
Rückbau ²	% von Bruttoinvest	5,0
Erlöse		
externe Wärmenutzung	% von nutzbarer Abwärme	30
Wärmeerlös	€/kWh H _i	0,02
Stromvergütung nach EEG 2012	€/kWh _{el}	0,193
Flexprämie	€/kWh _{el}	berechnet
Regelenergiebereitstellung	€/a	10.000

¹ Ohne Berücksichtigung der Planungskosten sowie des Rückbaus

² Ohne Berücksichtigung von Planungs- und Genehmigungskosten

Tabelle 7: Kosten und Zusammensetzung der eingesetzten Biomasse der Modellanlagen

	Einheiten	
Energieertrag Mais	kWh Hi/t FM	1.123
Energieertrag Getreide-GPS	kWh Hi/t FM	1.092
Energieertrag Gülle	kWh Hi/t FM	165
Energieertrag Substratmix	kWh Hi/t FM	1.015
Substratverluste (Lagerverluste)	% von FM	8
Pauschale Kosten Einsilierung	€/t FM	2
Maissilage, frei Silo	€/t FM	36
Maissilage, frei Eintrag	€/t FM	40
Anteil Maissilage	Massen-%	50
Anteil Rindergülle	Massen-%	10
Anteil Getreide-GPS	Massen-%	40
Rindergülle, frei Eintrag	€/t FM	0
Getreide-GPS, frei Silo	€/t FM	35
Getreide-GPS, frei Eintrag	€/t FM	40

Quelle: Energieerträge Biomasse nach [22, 25], Kosten für Biomasse [26], Substratverluste [23]

2.5 Überführung der Erkenntnisse in die Praxis

Der Maschinenring Kommunalservice GmbH Kassel (MR) unterstützte das Projektkonsortium bei der Substratauswahl, der Versuchsplanung, der Ausarbeitung der Gasproduktionsfahrpläne sowie der Definition von Referenzbiogasanlagen für die ökonomische Analyse. Damit sorgte der MR, durch die jahrelange Erfahrung in der Beratung von Biogasanlagenbetreibern und Planung von Biogasanlagen, über die gesamte Projektlaufzeit für einen hohen Praxisbezug. Innovative Anlagenbetreiber wurden durch Fütterungsempfehlungen zur Dynamisierung der Biogasproduktion während der Projektlaufzeit begleitet. Ein Erfahrungsaustausch der Anlagenbetreiber fand im Rahmen von Arbeitskreistreffen statt. Die Erfahrung mit der flexiblen Gasproduktion einer der begleiteten Anlagen ist in Kapitel 3.4 dargestellt.

3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der flexiblen Gasproduktion im Labor (Kapitel 3.1), aus dem großtechnischen Betrieb (Kapitel 3.2), der Wirtschaftlichkeitsanalyse (Kapitel 3.3) sowie erste Erfahrungen eines Anlagenbetreibers mit der flexiblen Gasproduktion (Kapitel 3.4) dargestellt. Aus dem Kapitel 3.5 werden, als „Lessons Learned“ Erfahrungen aus dem Demobetrieb zusammengefasst und in eine Checkliste überführt. Beides soll die weitere Forschungsarbeit aber auch kommerzielle Anlagenbetreiber bei der flexiblen Gasproduktion Ihrer Anlage unterstützen.

3.1 Flexible Gasproduktion im Labor

3.1.1 Versuchsergebnisse aus den Laboruntersuchungen und Wahl der eingesetzten Substrate

In der Antragsphase wurde der Einsatz insbesondere ökologisch wertvoller Substrate geplant. Konkret sind Substrate aus dem Zwischenfruchtanbau im Vorfeld der Antragstellung als Zielsubstrate angedacht gewesen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Greeningregularien noch nicht fest verankert und es bestand die Aussicht, dass hier auch neue, ökologisch wertvolle Substrate insbes. Zwischenfrüchte das Substratspektrum würden ergänzen können. Aufgrund der zu Beginn der Projektlaufzeit beschlossenen Regularien ist klar, dass diese Substrate der Biogasbranche nicht zur Verfügung stehen (Nutzungsverbot von Zwischenfrüchten bzw. Ernteverbot bis ins Folgejahr). Zudem hat sich in der praktischen Umsetzung auch die Beschaffung der für die Forschungsbiogasanlage notwendigen Mengen (Teilprojekt 1) als problematisch herausgestellt. Aus diesem Grund musste auf verfügbarere Substrate ausgewichen werden. Diese Notwendigkeit wurde auf die Laborversuche übernommen, da diese ja die Vorversuche darstellen und daher hier die gleichen Substrate verwendet werden müssen. Daher kam es nicht zum Einsatz von Substraten wie Ackerbohne, Senf und anderen entweder früh geschnittenen und damit leicht verdaulichen oder besondere Speicherstoffe beinhaltenden Substraten aus dem Bereich Zwischenfrucht / Greening.

Dennoch sind mit alternativen Substraten wie Klee gras-Luzerne Mischungen, nachwachsender Silphie und Wildpflanzenmischungen neben Wirtschaftsdüngern und herkömmlichen Substraten auch Substrate mit besonderem ökologischen Vorteil zum Einsatz gekommen und auf ihr Potential zur flexiblen Biogaserzeugung getestet worden.

3.1.1.1 Versuch 1 (Referenzszenario herkömmliche Substrate: Mais, Gülle)

In diesem ersten Versuch wurde das häufigste pflanzliche Substrat Maissilage eingesetzt, um Vergleichsdaten für die übrigen Szenarien bereitzustellen.

Die täglichen Fütterungsmengen wurden iterativ dahingehend verändert, dass eine minimale Gasproduktion am Wochenende bei stabiler Prozessführung und hohen Raumbelastungen am Wochenanfang realisiert werden konnten. Dies wurde zunächst experimentell und im späteren Verlauf sowie in den folgenden Versuchen zunehmend gestützt durch die Simulation durchgeführt. Die daraus ermittelte Verteilung der Fütterungsgaben ist in der folgenden Abb. zu sehen und zieht sich in ähnlicher Form durch alle Versuche. Prinzipiell wurde auch in den Folgeversuchen versucht, die Hauptmenge der Substrate zum Wochenbeginn zu füttern. Abhängig vom Substrat bzw. der Substratkombination ergeben sich jedoch hinsichtlich der prozentualen Verteilung unterschiedliche Ausprägungen dieses Musters.

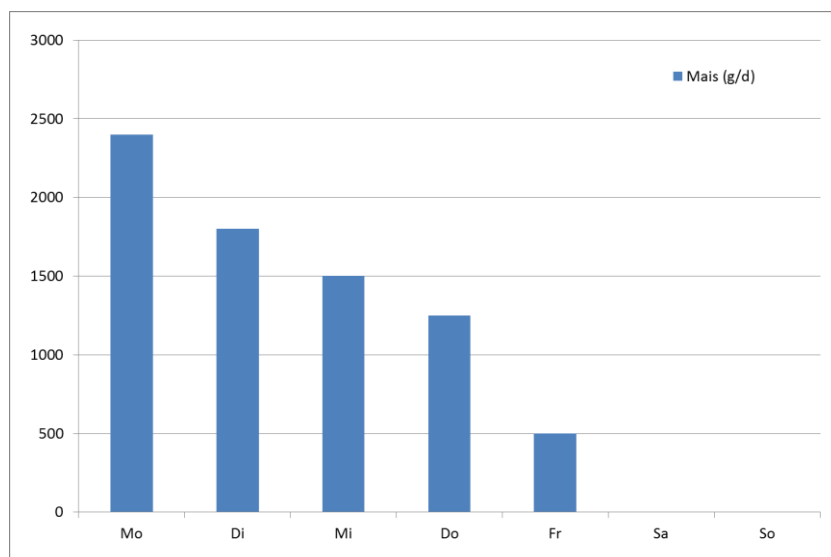


Abbildung 15: Verteilung der Fütterungsrationen auf die Wochentage (nur Mais)

Diese Fütterungsverteilung entspricht den in der folgenden Tabelle dargestellten Parametern für die Faulraumbelastung (BR) und die hydraulische Verweilzeit (HRT) bezogen auf den jeweiligen Wochentag bzw. im Mittel.

Tabelle 8: Fütterungsplan und resultierende Parameter Versuch 1 (Maissilage). BR: Raumbelastung, HRT: hydraulische Verweilzeit.

	Fütterung (g/d)	HRT (d)	BR (g oTS * l⁻¹ * d⁻¹)
Mo	3185	47	7,2
Di	2470	61	5,6
Mi	2210	68	5,0
Do	1820	82	4,1
Fr	0	-	0,0
Sa	0	-	0
So	0	-	0
Mittel	1384	108	3,1

In Abbildung 16 ist ersichtlich, wie der Verlauf der Gasproduktionsrate sich im Wochenverlauf in Abhängigkeit der Fütterung ändert. Durch die forcierte Fütterung zu Wochenbeginn treten hier die höchsten Gasproduktionsraten auf.

Mit Abnahme der Fütterung sinkt die Gasproduktion zum Wochenende hin. Simulierte und gemessene Werte (hier Mittelwerte aus 3,5h zur Glättung von technisch bedingten Artefakten (Rührwerksbetrieb, Heizbetrieb)) liegen gut übereinander. Auffällig und auch in anderen Versuchswochen zu beobachten ist die Verteilung der Gasproduktion am Montag auf einen Peak direkt zum Zeitpunkt der Fütterung sowie eine Peak am späten Abend. Die hohe Dosierung der Substratmenge im Zusammenhang mit der vorangehenden Fütterungspause (~2,5Tage) führt zu einer Belastung der Biologie, die sich in der verzögerten Gasproduktion widerspiegelt. Vorversuche haben gezeigt, dass dieser Peak durch die Vorabdosierung einer geringen

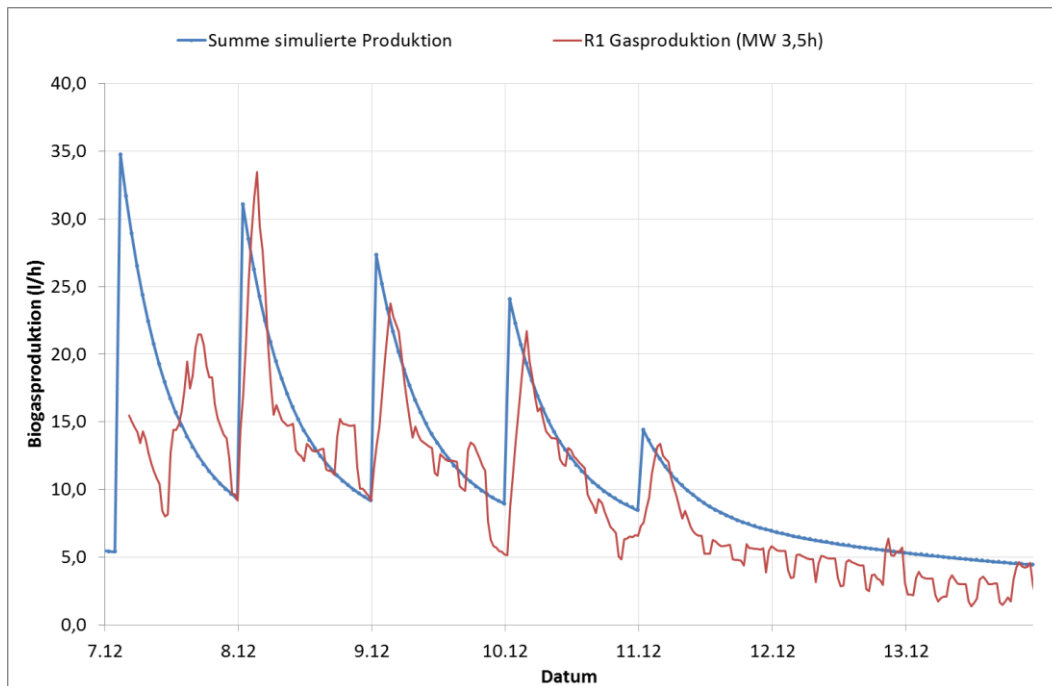


Abbildung 16: Verlauf Gasproduktion Versuchswoche & simulierte Produktion

Menge Substrates vermindert werden kann. Eventuell führt dies zu einer Erhöhung der Stoffwechselaktivität der Mikroorganismen, welche dann die zugeführten Mengen besser bewältigen können. Dieser Effekt ist auch auf die Taktung der *manuellen und damit arbeitsaufwändigen Fütterung im Labor* zurückzuführen und im Laborbetrieb kaum anders zu lösen. Eine mehrmalige Fütterung kleinerer Dosen täglich ist nicht mit den vorhandenen personellen Kapazitäten umsetzbar gewesen. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine häufigere und über den Tag verteilte Fütterung, wie in Praxisanlagen üblich, diesen Effekt vollends ausschließen kann.

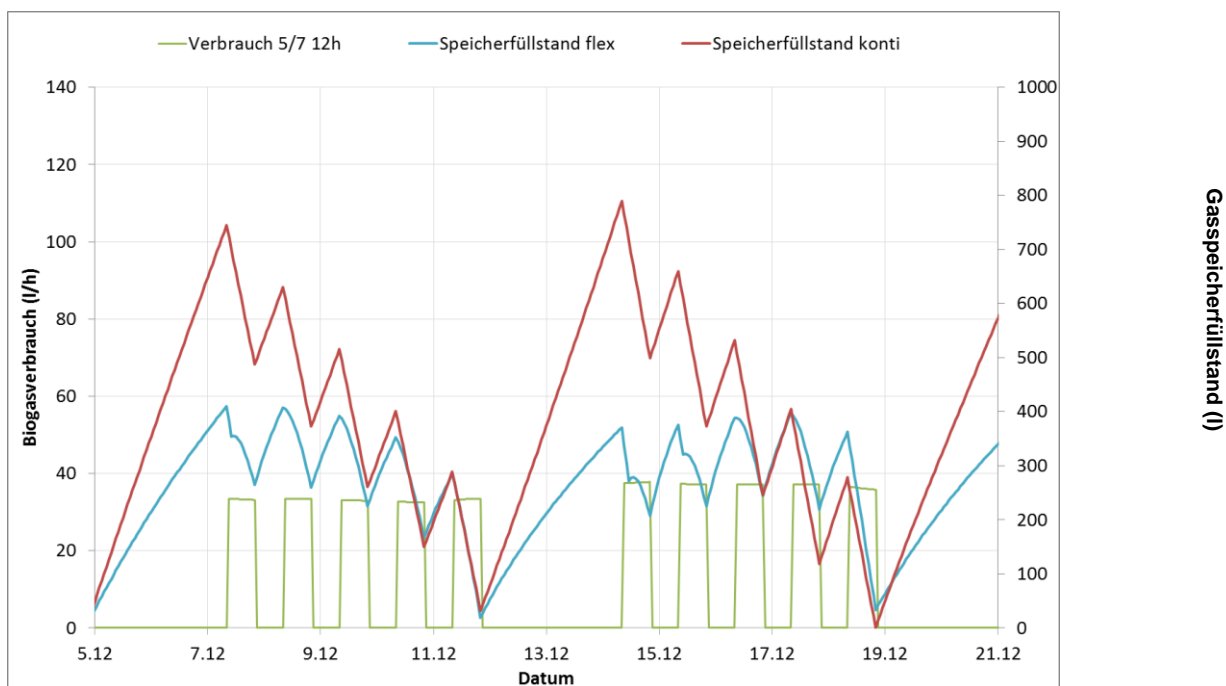


Abbildung 17: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicherfüllstände bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet und zwar für kontinuierliche Fütterung (simulierte konstante Gasproduktion) und flexible Fütterung (tatsächlich erhobene Daten). Bei einer durchschnittlichen Gasproduktion von ca. 13l/h ergeben sich für die gewählte Kombination für den Verbrauch (12h/d an 5 von 7 Tagen) sehr große Gasspeicherkapazitäten, um die lange, verbrauchsfreie Phase

zu überbrücken. Für die kontinuierliche Gasproduktion wäre ein Gasspeicher mit einem Fassungsvermögen von 2,5 Tagen (Freitag 20 Uhr bis Montag 8 Uhr = 60 Stunden) der durchschnittlichen Gasproduktion nötig, bei der flexiblen Produktion vermindert sich diese Größe immerhin auf etwa 30h, was immer noch keine praxisübliche Größe ist. Aus diesen Gründen wurden verschiedene Szenarien für den Gasverbrauch durchexerziert. Im Folgenden ist die Variante für den Einsatz eines Dauerläufers mit 30% der gesamten Gasproduktion dargestellt.

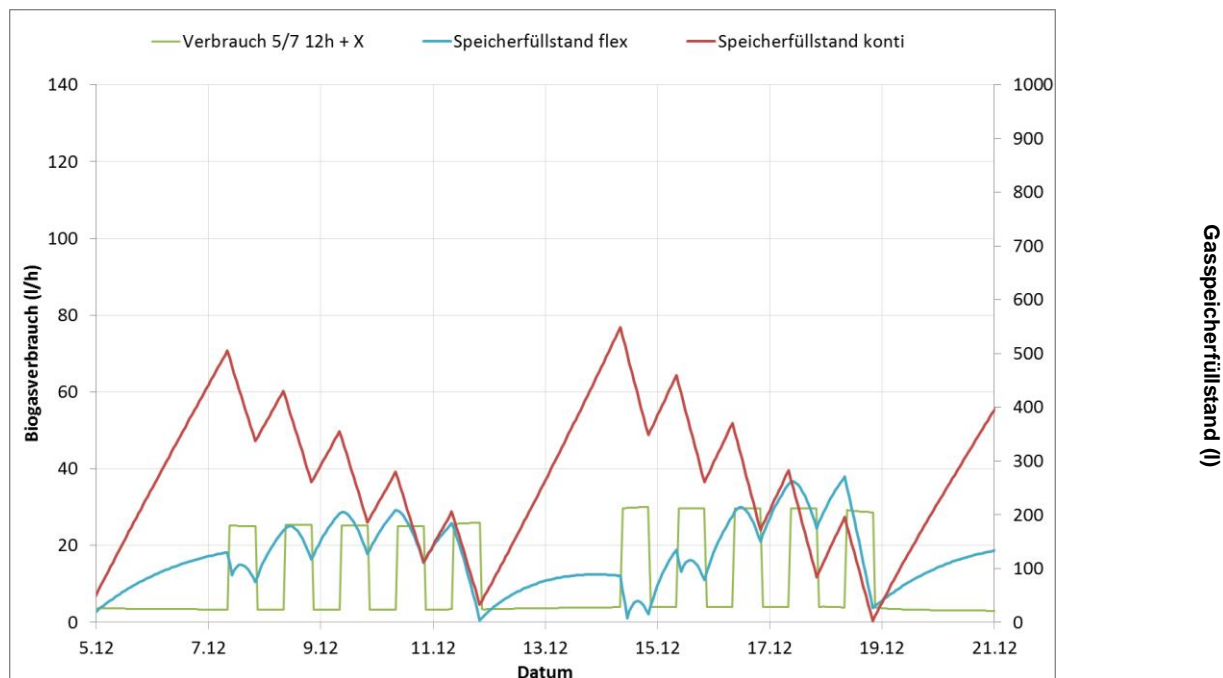


Abbildung 18: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet.

Auch hierbei zeigt sich, dass der Einsatz einer flexibilisierten Gasproduktion den notwendigen Speicherbedarf massiv reduzieren kann (von ca. 41 auf ca. 21h). Andererseits liegt auch dieser Speicherbedarf noch außerhalb der üblichen Größen für Gasspeicher. Während beim erstgenannten Szenario der Gasspeicherbedarf durch die Produktion am Wochenende definiert wird, kann der Verbrauch während des Wochenendes beim zweiten Szenario bereits den kritischen Punkt verschieben. Dieser liegt in diesem Fall am 5. Tag einer Woche, an dem bereits keine Fütterung mehr stattfindet, aber der volle Verbrauch liegt. Für ein solches Verstromungsszenario wäre ein anderer Fütterungsplan angebracht gewesen. Dieser wurde aber im ersten Versuch nicht realisiert.

3.1.1.2 Versuche 2&3 (Wirtschaftsdünger, Zuckerrübe im Nachgärer)

In der Versuchskombination 2&3 wurde im Unterschied zu allen anderen Varianten der Einsatz des Fermenters auch der eines Nachgärers experimentell durchgeführt. Dadurch ist der gezielte Einsatz von schnell abbaubarem Substrat im Nachgärer möglich, ohne den Hauptfermenter zusätzlich zu belasten und ohne den weitgehenden Abbau der eingesetzten Substrate zu gefährden.

Tabelle 9: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 2 (Fermenter und Nachgärer).

	Fermenter					Nachgärer			
	Gülle (g)	Mais (g)	Mist (g)	HRT (d)	BR (g oTS / l)	ZRübe (g)	Überlauf (g)	HRT (d)	BR (g oTS / l)
Mo	1100	2200	3300	23	10,0	250	5400	27	2,9
Di	1100	1100	2200	34	6,0	250	3700	38	2,1
Mi	1100	1100	0	68	3,1	250	1800	73	1,2
Do	1100	1100	0	68	3,1	500	1800	65	1,5
Fr	1100	0	0	136	0,6	750	1000	86	1,5
Sa	0	0	0	-	0,0	0	0	-	0,0
So	0	0	0	-	0,0	0	0	-	0,0
Mittel	786	786	786	64	3,2	286	1957	67	1,3

Im Folgenden ist exemplarisch eine Versuchswoche hinsichtlich des Verlaufes der Gasproduktion dargestellt.

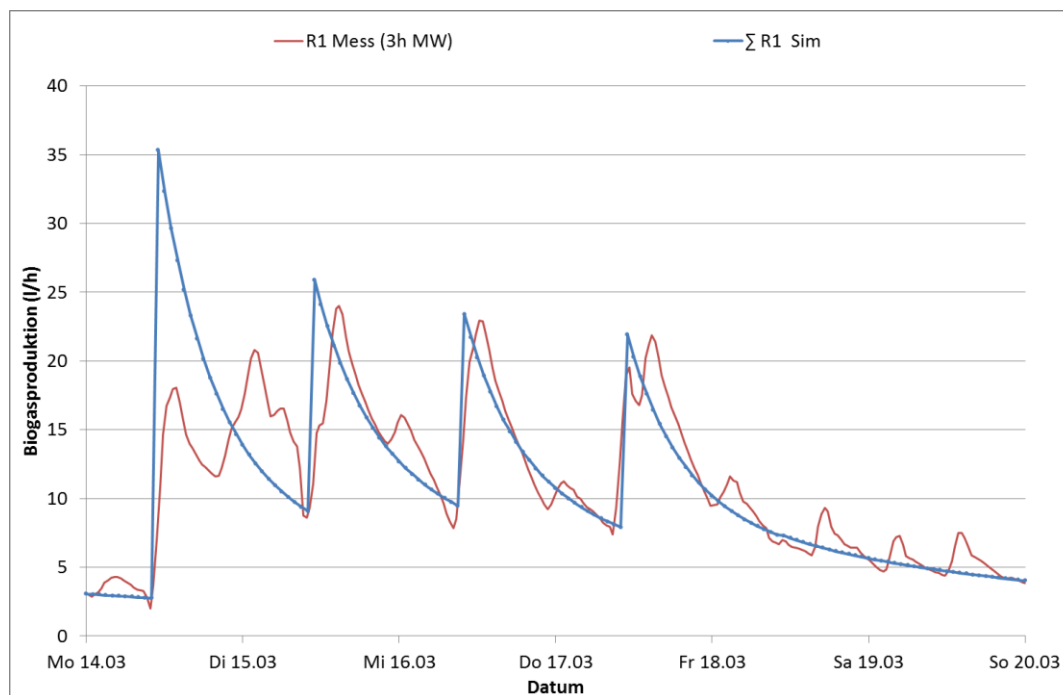


Abbildung 19: Verlauf der Gasproduktion des Fermenters: gemessene und simulierte Produktion. Messwerte über 3h gemittelt. Die regelmäßigen Schwankungen geringer Intensität sind auf die Fermenterbeheizung und die resultierende zyklisch vermehrte Ausgasung zurückzuführen.

Der Verlauf der Messdaten liegt wie auch im Vorversuch gut über den Daten der Simulation. Ausnahme bildet wieder der erste Tag nach der Fütterungspause. Die Problematik ist oben beschrieben und sollte im Praxisbetrieb und bei automatisierter Fütterung nicht auftreten. Kleinere Gasspitzen sind auch hier auf Heiz- und Rührbetrieb zurückzuführen, die eine verstärkte, physikalisch bedingte Ausgasung bewirken, nicht aber auf die eigentliche Gasproduktion zurückzuführen sind.

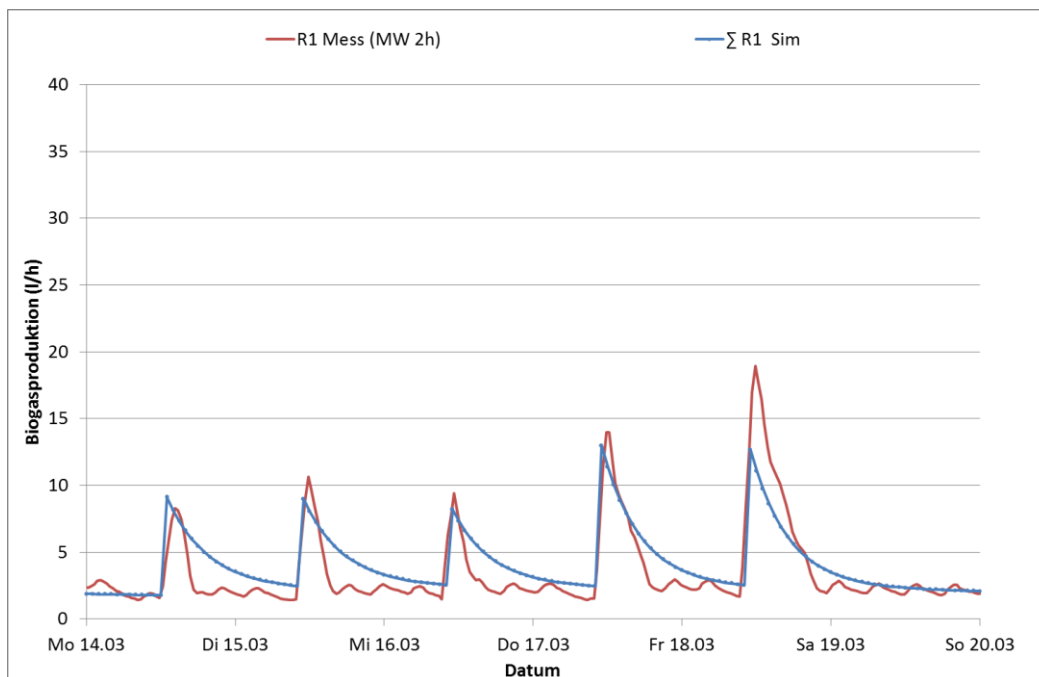


Abbildung 20: Verlauf der Gasproduktion des Nachgärers: gemessene und simulierte Produktion. Messwerte über 3h gemittelt. Die regelmäßigen Schwankungen sind auf die Fermenterbeheizung zurückzuführen.

Auch hier ließ sich die Gasproduktion grundsätzlich gut in der Simulation nachvollziehen.

Auf Basis der Mess- sowie auch der Simulationsdaten wurden dann gegen die oben erläuterten Gasverbrauchsszenarien die Gasspeicherfüllstände bilanziert. In Abbildung 21 ist das Ergebnis dieser Bilanzierung dargestellt. Hierbei zeigt sich wieder, dass die flexibilisierte Gasproduktion weitreichende Einsparungen gegenüber der kontinuierlichen Gasproduktion in Hinsicht auf die Auslegungsnotwendigkeit des Gasspeichers ermöglicht. Weiterhin zeigt sich, dass die Bilanzierung aus den gemessenen sowie den simulierten Daten beider Reaktoren zu sehr gut vergleichbaren Ergebnissen kommen. Dies erlaubt den Einsatz von simulierten Gasproduktionsraten für die Berechnung weiterer Fütterungs- und Gasproduktionsszenarien.

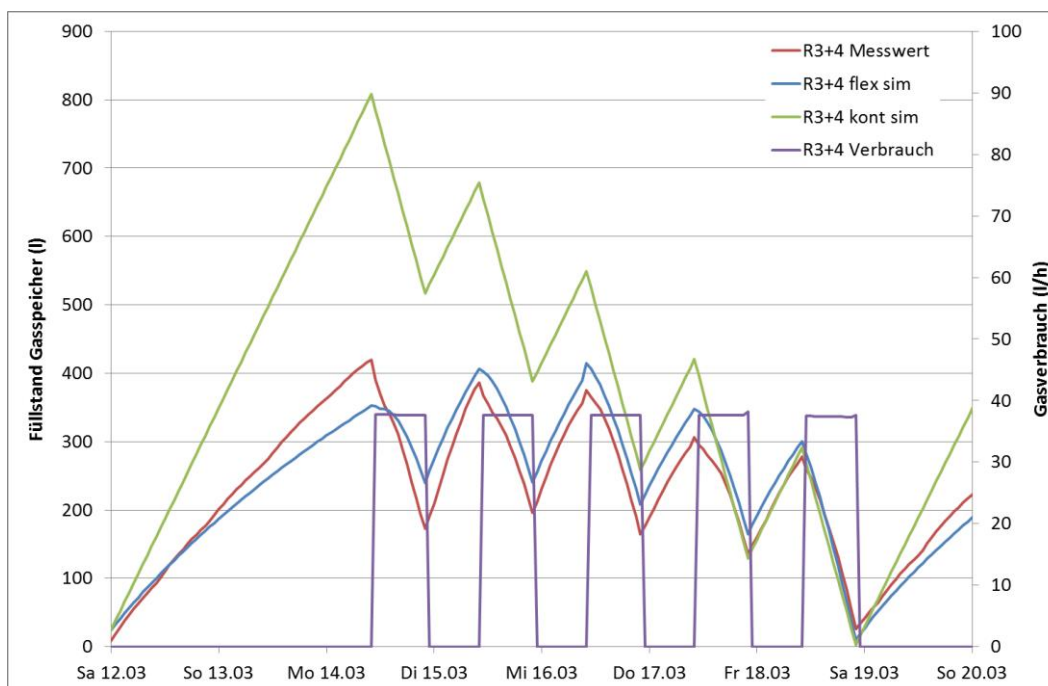


Abbildung 21: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher für die Gesamtanlage (Fermenter und Nachgärer) bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Gasspeicherfüllstand bei kontinuierlicher Fütterung (simuliert) in grün, bei flexibler Fütterung (simuliert) in blau und basierend auf den gemessenen Daten bilanziert in rot.

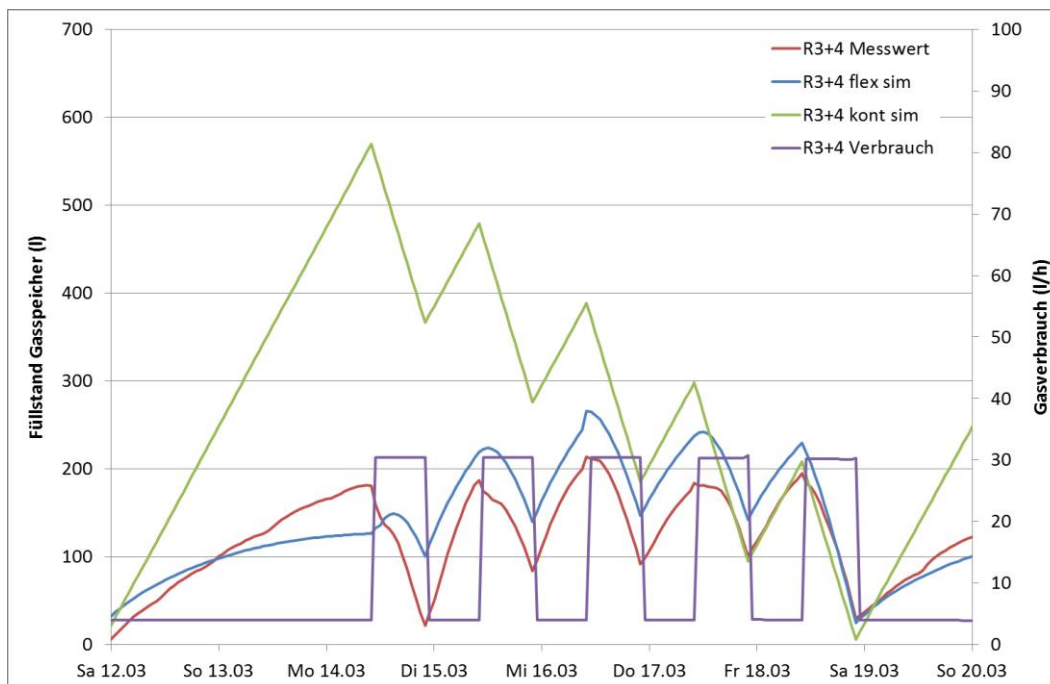


Abbildung 22: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher für die Gesamtanlage (Fermenter und Nachgärer) bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW.

Die notwendigen Gasspeicher konnten in beiden Szenarien um ca. 50% reduziert werden.

Die Belastung der Biologie ist durch die täglich einmalige Fütterung höher, als im Praxisbetrieb. Dennoch konnten bei enger Überwachung der Gärsäuren keine kritisch erhöhten Werte festgestellt werden. Wie in Abbildung 23 ersichtlich ist, steigt die Säuremenge im Tagesverlauf und nach der Fütterung an, geht aber in der fütterungsfreien Zeit auf ein sehr niedriges Niveau zurück.

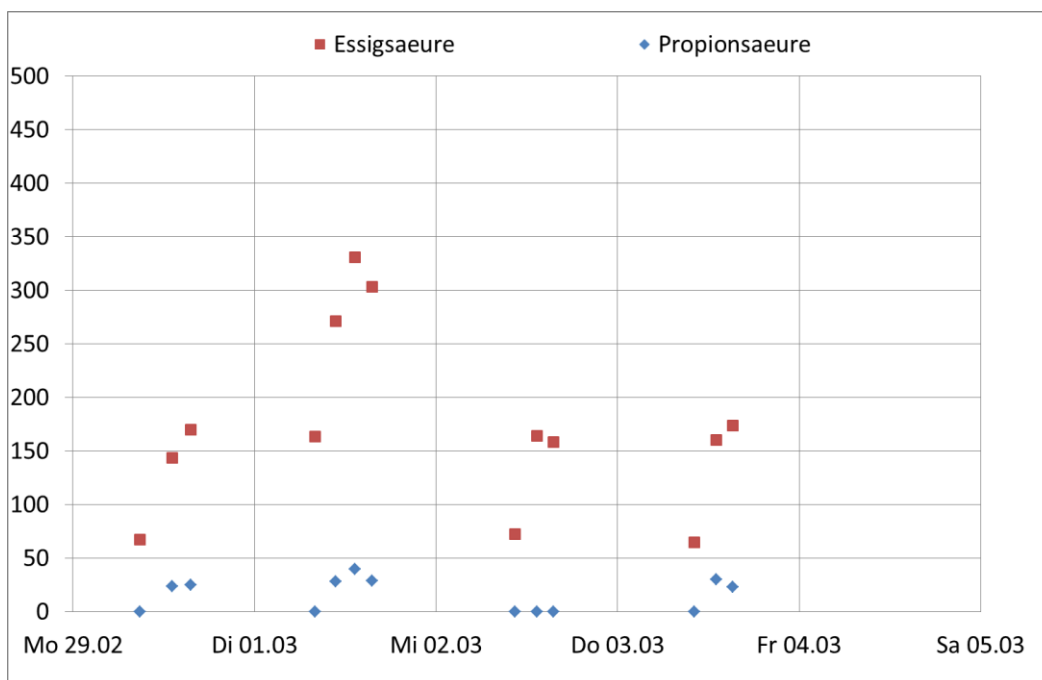


Abbildung 23: Verlauf der Säurewerte (in mg/l) in einer exemplarischen Woche im Fermenter. (V02RIII).

Die im Wochenverlauf ungleichmäßige Belastung führt damit nicht zu kritischen Prozesszuständen. Die fütterungsfreien Zeiten sind ausreichend, um die geringen Säuremengen wieder abzubauen.

3.1.1.3 Versuch 4 (Gülle Klee gras-Luzerne)

In diesem Versuch wurde eine Mischsilage aus dem Klee gras-Luzerne-Gemengeanbau verwendet. Klee gras kann in der Summe der verschiedenen Schnitte in bestimmten Anbaulagen die Erträge von Mais erreichen. In der Regel liegen die Erträge aber eher darunter. In der Fruchtfolge ergeben sich jedoch durch den Anbau solcher Mischungen verschiedene ökologische und pflanzenbauliche Vorteile. Leguminosen und ihre Gemenge haben einen sehr hohen Wert als Vorfrucht. Dieser ergibt sich aus

- der starken Durchwurzelung des Bodens, die sich positiv auf die Bodenstruktur auswirkt,
- dem Einbringen organischer Substanz in den Boden durch Wurzeln und Pflanzenreste,
- verminderte Erosionsgefahr durch hohe Bodendeckung,
- die hohe Stickstoffierleistung in Verbindung mit einer hohen Nährstoffaufnahme und damit –bindung im Boden (Verlustminderung, Bereitstellung für die Nachfrucht) und letztlich
- einem geringen Pflanzenschutzbedarf.

Die Methanausbeute entspricht - bezogen auf die organische Trockensubstanz - der anderer pflanzlicher Substrate und ist auch hier vom richtigen Schnittzeitpunkt und der Silierung abhängig. Leguminosenaufwüchse weisen erhöhte Proteingehalte auf, weshalb der Einsatz als alleiniges Substrat geprüft werden sollte. In der Praxis wird dies aber eher nicht der Fall sein und sollte daher kein Hemmnis darstellen, da es hier immer nur als Co-Substrat zum Einsatz kommen wird.

Die täglichen Fütterungsmengen wurden auch hier dahingehend ausgelegt, dass eine minimale Gasproduktion am Wochenende bei stabiler Prozessführung und hohen Raumbelastungen am Wochenanfang realisiert werden konnten. Die daraus ermittelte Verteilung der Fütterungsgaben ist in der folgenden Tabelle zu sehen.

Tabelle 10: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 4 (Klee gras-Luzerne).

	Gülle (g/d)	Klee gras- Luzerne (g/d)	HRT (d)	BR (g oTS * l ⁻¹ * d ⁻¹)
Mo	500	480	31	5,5
Di	500	416	33	4,9
Mi	500	416	33	4,9
Do	500	288	38	3,6
Fr	500	0	60	0,8
Sa	0	0	-	0
So	0	0	-	0
Mittel	357	229	51	2,8

Auch hier erfolgte die Fütterung fast ausschließlich innerhalb von vier Tagen, um die Gasproduktion am Wochenende minimal und den Füllstand des Gasspeichers an allen Wochentagen gleich hoch und damit optimal minimiert zu halten.

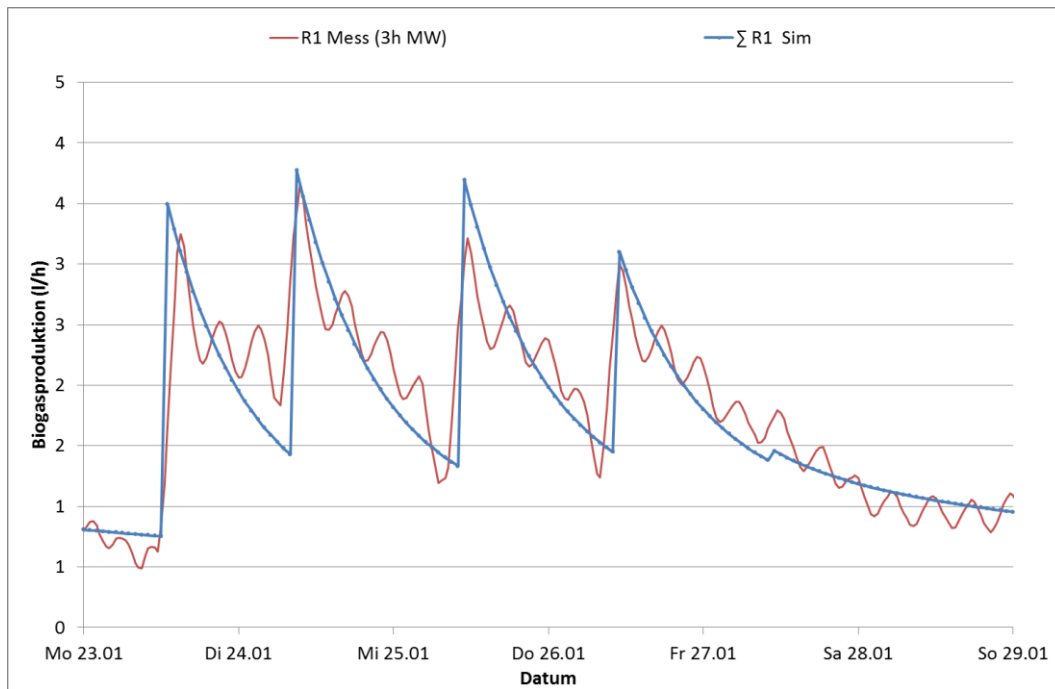


Abbildung 24: Verlauf Gasproduktion exemplarische Versuchswoche & simulierte Produktion Klee gras-Luzerne und Gülle. (V04RIII).

Simulierte und gemessene Daten ließen sich zu guter Übereinstimmung bringen. Auch in diesem Versuch zeigte sich die verzögerte Gasproduktionsrate am ersten Tag nach der Fütterungspause.

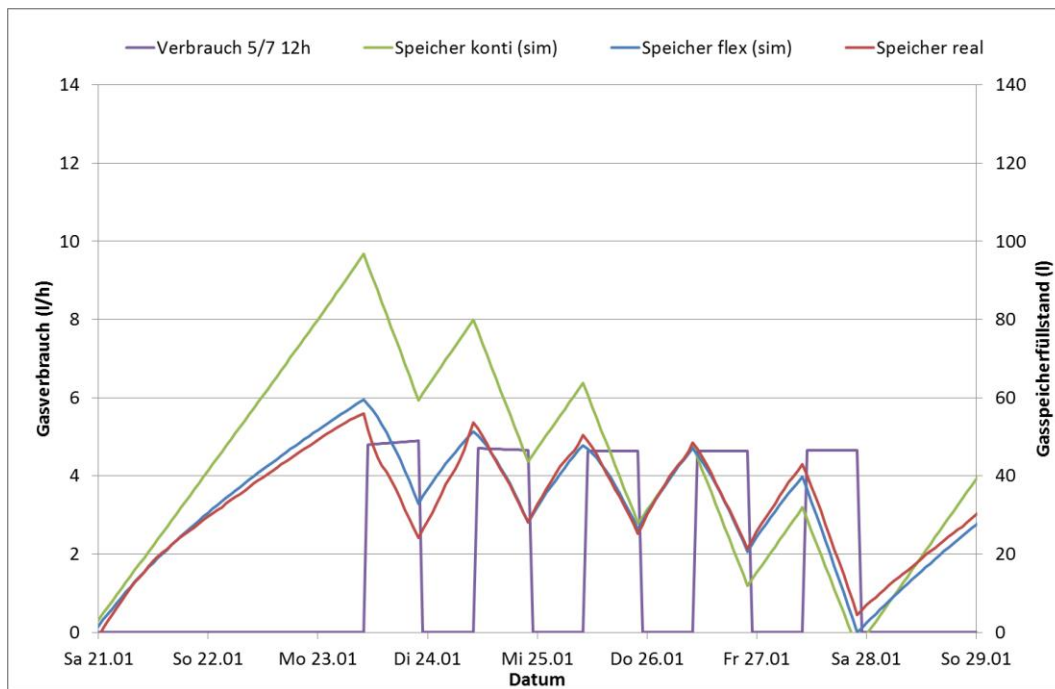


Abbildung 25: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V04RIII).

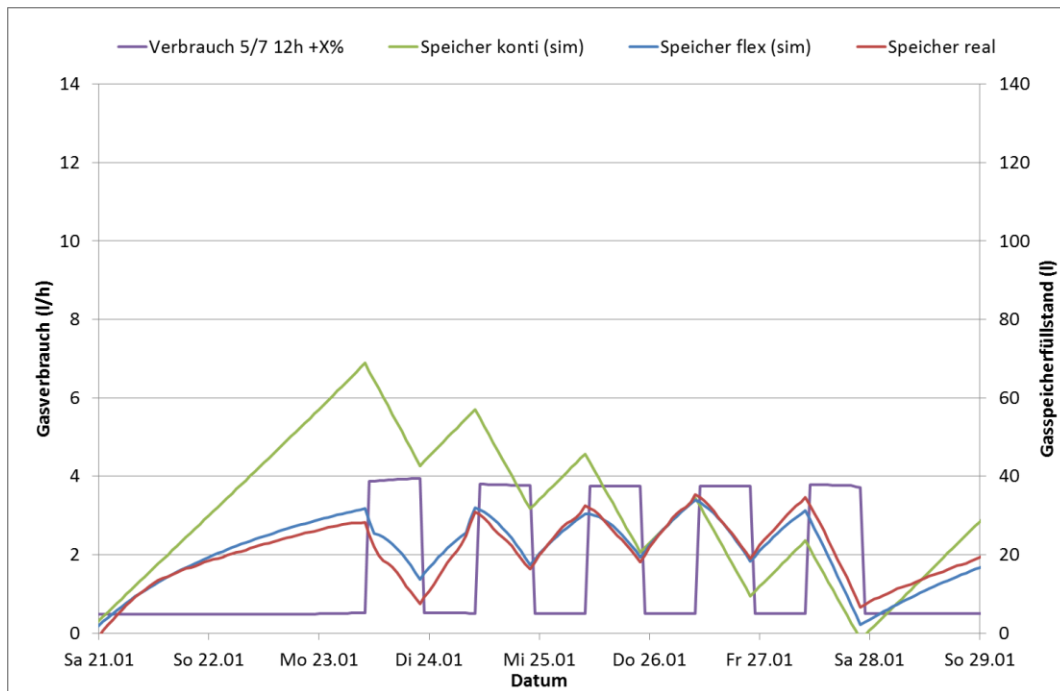


Abbildung 26: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V04RIII)

Der Speicherbedarf für das Szenario mit Dauerläufer-BHKW liegt für eine kontinuierliche Fütterung bei ca. 42h der durchschnittlichen Gasproduktion. Für den Fall der flexiblen Fütterung sinkt dieser Wert auf ca. 21h, was einer Reduktion von knapp 50% des nötigen Gasspeichers entspricht und von Anlagen mit großer Speicherausstattung bereits erreichbar ist.

3.1.1.4 Versuch 5 (Gülle-Wildpflanzenmischung)

Wildpflanzenmischungen werden seit einigen Jahren als ökologisch wertvolle Ergänzung in der Fruchtfolge oder als Alternative auf geeigneten Flächen diskutiert und erforscht. Die ökologischen Vorteile sind an verschiedenen Stellen hinreichend genannt und sollen hier nicht vertieft werden (s.a. FNR-geförderte Projekte „Energie aus Wildpflanzen“). Die Trockenmasseerträge von solchen Flächen erreichen bislang 50-60% der Erträge von Mais, der Methanhektarertrag liegt noch etwas niedriger. Wildpflanzenmischungen können als mehrjährige Kulturen angelegt werden und liegen im Bearbeitungsbedarf, d.h. Düngung und Pflanzenschutz entsprechend unter einjährigen Einzelkulturen.

Wie auch in den anderen Versuchen wurden nach der Identifizierung von kinetischen Kenndaten Fütterungstabellen erstellt, um die Gasproduktion optimal über den Wochenverlauf zu verteilen:

Tabelle 11: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 5.

	Gülle (g/d)	Wildpflanzen- silage (g/d)	HRT (d)	BR (g oTS * l ⁻¹ * d ⁻¹)
Mo	1600	3950	23	8,0
Di	1600	3060	29	6,2
Mi	1600	2740	33	5,5
Do	1600	2260	40	4,6
Fr	1600	0	40	0,0
Sa	0	0	-	0
So	0	0	-	0
Mittel	1600	2400	52,5	3,5

Am Verlauf der langfristigen Mittelwerte der Gasbildung ist ersichtlich, dass simulierte und gemessene Gasproduktion nicht gleichlaufend sind. Die Abweichungen sind auf eine im Versuchsverlauf aufgetretene zeitweise Störung des Prozesses zurückzuführen.

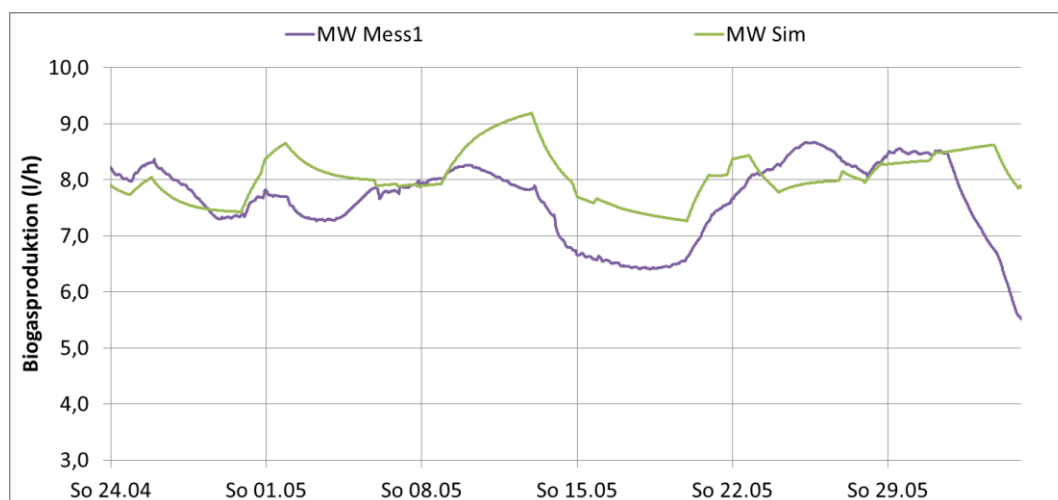


Abbildung 27: Verlauf simulierte und gemessene Gasproduktion im Wochenmittel. Bei korrekt identifizierter Kinetik, gleichbleibender Substratqualität und ohne Prozessstörungen liegen beide Verläufe deckungsgleich übereinander.

Zur Wochenmitte hin trat tw. ein starker Anstieg der Säurewerte ein, welcher sich über das fütterungsfreie Wochenende wieder abbaute. Wie sich am Ende des Versuches herausstellte, hat das eingesetzte faserige Material zu einer starken Schwimmschichtbildung geführt. Dadurch wurde hauptsächlich flüssiges Material aus dem Fermenter abgezogen, aufgeschwommenes faseriges Material blieb zurück. Diese Separation hat zu einer Verminderung des durchmischten Reaktionsraumes geführt, welcher durch die Fütterungen

überlastet wurde. Dies wird als Grund für den fehlenden Gleichlauf von simulierter und gemessener Gasproduktion angesehen.

Die Kinetikparameter wurden in einer Phase zu Beginn des Versuches ermittelt und sollten daher für den unbelasteten Prozess gültig sein. Dies konnte jedoch nicht über den Versuchsverlauf verifiziert werden. Die ermittelten Daten unterliegen damit einer gewissen Unsicherheit.

Eine Wiederholung des Versuches nach Durchführung aller Versuche konnte aus Zeitgründen nicht erfolgen.

Der Versuch ist hinsichtlich seiner Auswertbarkeit dadurch nur bedingt verlässlich. Die nachfolgend gezeigten Daten zeigen entsprechende Diskrepanzen zwischen simulierten und gemessenen Daten, die auf die genannten Ursachen zurückzuführen sind.

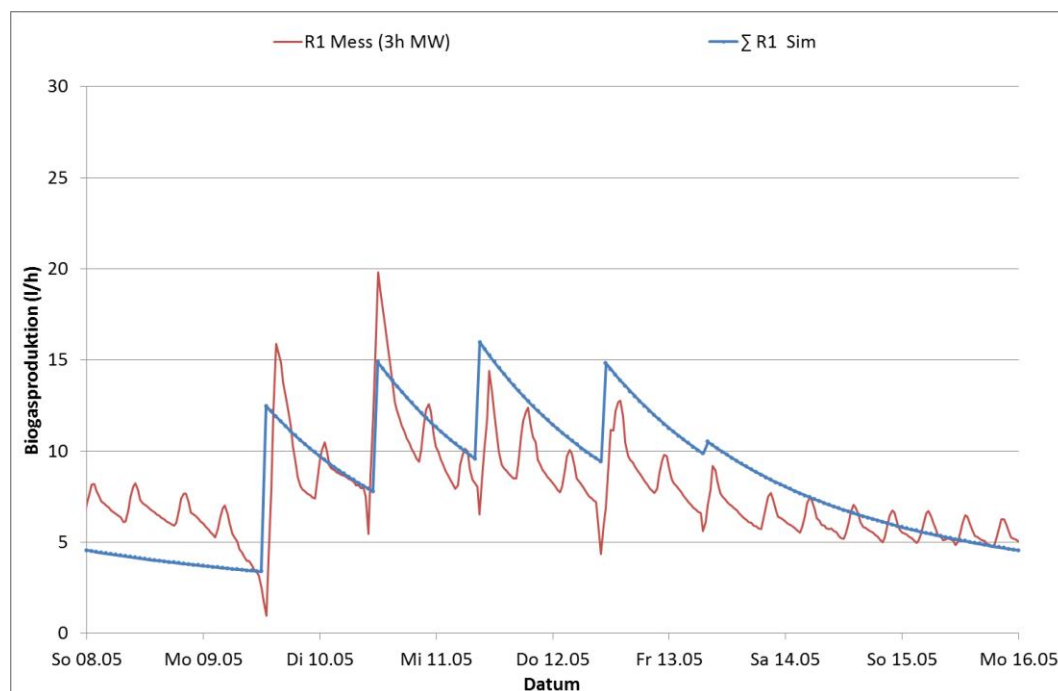


Abbildung 28: Verlauf Gasproduktion Versuchswoche & simulierte Produktion. Messwerte über 3h gemittelt. Die regelmäßigen Schwankungen sind auf die Fermenterbeheizung zurückzuführen. (V05RI).

Während des Wochenendes ab 6.5. ist ein stärkerer Anstieg des berechneten Gasspeicherfüllstandes auf Basis der realen Messwerte (rot) im Vergleich zum simulierten Anstieg (blau) zu verzeichnen. Dieser ist vermutlich auf den verzögerten Abbau von angesammelten Säuren und weiterer im Fermenter zurückgehaltener oTS zurückzuführen. Während der fütterungsfreien Phase werden die durch die Überlastung angestauten Säuren und weiteren leicht abbaubaren Bestandteile umgesetzt. Die Gasproduktionsrate flacht nicht entsprechend der Erwartung ab. Im Verlauf des Wochenendes sinkt das Säurelevel ab, bevor mit den erhöhten Fütterungsmengen zum nächsten Wochenbeginn wieder eine Überlastung aufgrund des reduzierten aktiven Faulraumvolumens eintritt.

Dieses Phänomen trat in allen drei Wiederholungen gleichzeitig auf, so dass zwar Daten aus der frühen Versuchsphase für die Kinetikbestimmung unter normalen Bedingungen erhoben werden konnten, aber keine störungsfreie Versuchswoche mit dem Zielszenario vorliegt.

Gaspeicherreduktionspotentiale ließen sich in diesem Fall aufgrund des gestörten Prozesses nur auf Basis der simulierten Daten ermitteln. Auch hier lagen die Reduktionspotentiale im Bereich von 60-40%, welche aber nicht als gesichert angenommen werden können.

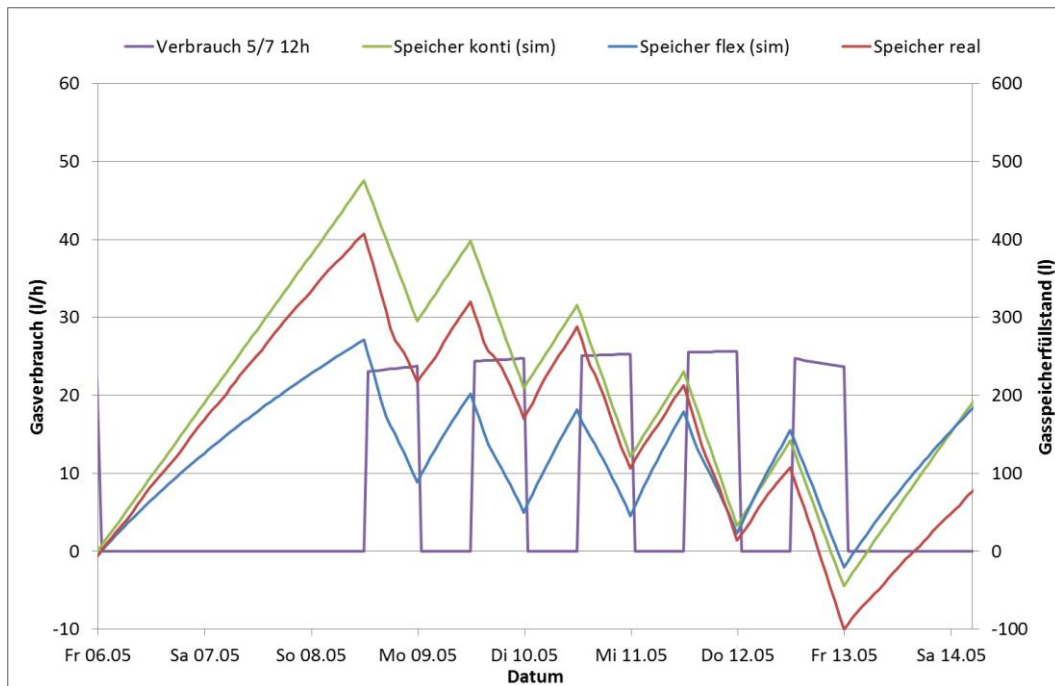


Abbildung 29: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V5RI)

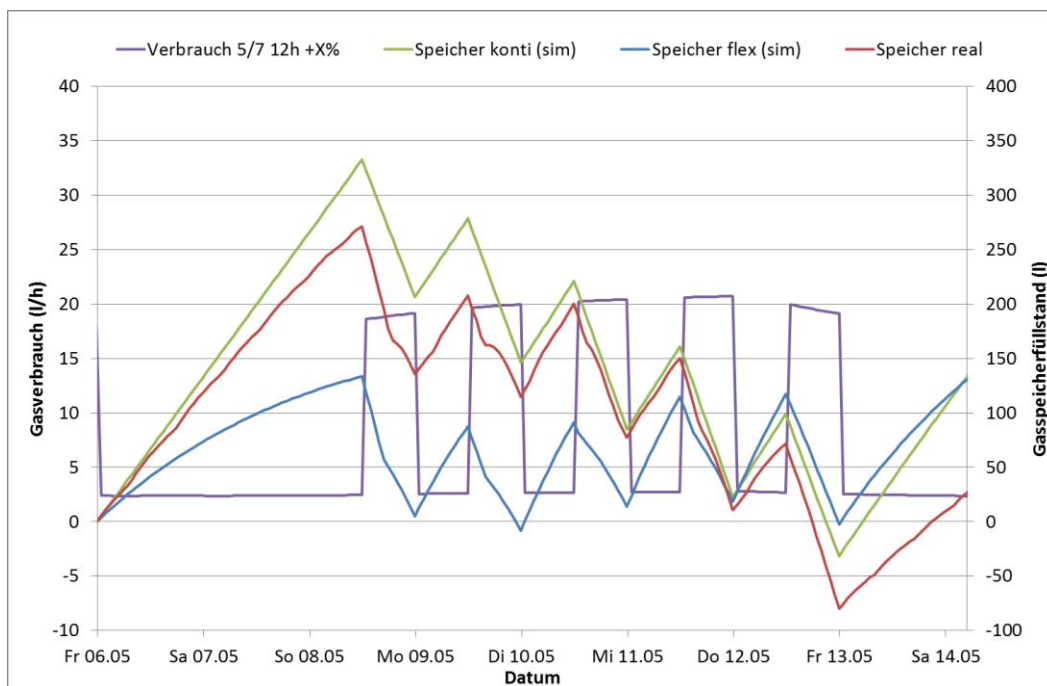


Abbildung 30: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergrößen berechnet. (V5RI).

Hinsichtlich der Kinetik und der Abbaucharakteristika ist zu bemerken, dass naturgemäß die Abreife von Ernten aus dem Mischanbau i.d.R. heterogener, als im Einzelanbau ist, so dass mehr und weniger starke Verholzungsgrade zu erwarten sind. Dies hängt aber sowohl vom Standjahr der Mischung, dem Standort und dem Erntezeitpunkt ab, so dass die Ergebnisse dieses Versuches nur bedingt auf Wildpflanzenmischungen im allgemeinen übertragen werden können.

3.1.1.5 Versuch 6 (Gülle-Silphie-Getreideschrot)

Durchwachsende Silphie hat ein hohes Ertragspotential und wird seit einigen Jahren als mögliche, gleichwertige Ergänzung zu bzw. als Ersatz von Mais untersucht. Als mehrjährige Blühpflanze weist sie dem Mais gegenüber einige ökologische Vorteile auf. Hinsichtlich der Erträge ist in der Regel noch von niedrigeren Werten als bei Mais – abgesehen von Sonderfällen, wie z.B. Trockenheit – auszugehen. Um Silphie als Blühpflanze voll zu nutzen ist ein späterer Erntetermin nötig. Zu diesem Zeitpunkt kann bereits eine stärkere Verholzung eingetreten sein, was sich auf die Vergärbarkeit und die Kinetik der Gasproduktion auswirken kann. Daher wurde der Einsatz von Getreideschrot in diesem Versuch eingebunden. Das Getreideschrot sollte insbesondere in Richtung der Fütterungspause verstärkt eingesetzt werden, um Gas aus schnell abbaubarem Substrat zur Verfügung zu stellen, während Silphie gleichzeitig entsprechend vermindert werden sollte, um vor Beginn der Verstromungspause schon so weit als möglich abgebaut zu sein. Der Vermahlungsgrad des Getreides wurde mittelgrob gewählt. Zu feine Vermahlungsgrade sind als Ursache für eine Schaumbildung in der Diskussion. Je gröber der Vermahlungsgrad, desto weniger schnell erfolgt aber der Abbau. Die identifizierte Kinetik (3.1.2) ist unter diesem Gesichtspunkt zu betrachten.

Tabelle 12: Fütterungsplan (Tagesmengen) und resultierende Parameter Versuch 6

	Gülle (g/d)	Silphie (g/d)	Weizen- schrot (g/d)	HRT (d)	BR (g oTS * l ⁻¹ * d ⁻¹)
Mo	1300	3020	0	34,7	4,9
Di	1300	1870	90	46,0	3,9
Mi	1300	1670	110	48,7	3,7
Do	1300	1720	120	47,8	3,8
Fr	1300	0	160	102,7	1,8
Sa	0	0	0		0,0
So	0	0	0		0,0
Mittel	929	1183	69	69	2,6

Der Verlauf der Gasproduktion stieg dementsprechend im Wochenverlauf sogar an, was aber gewünscht war.

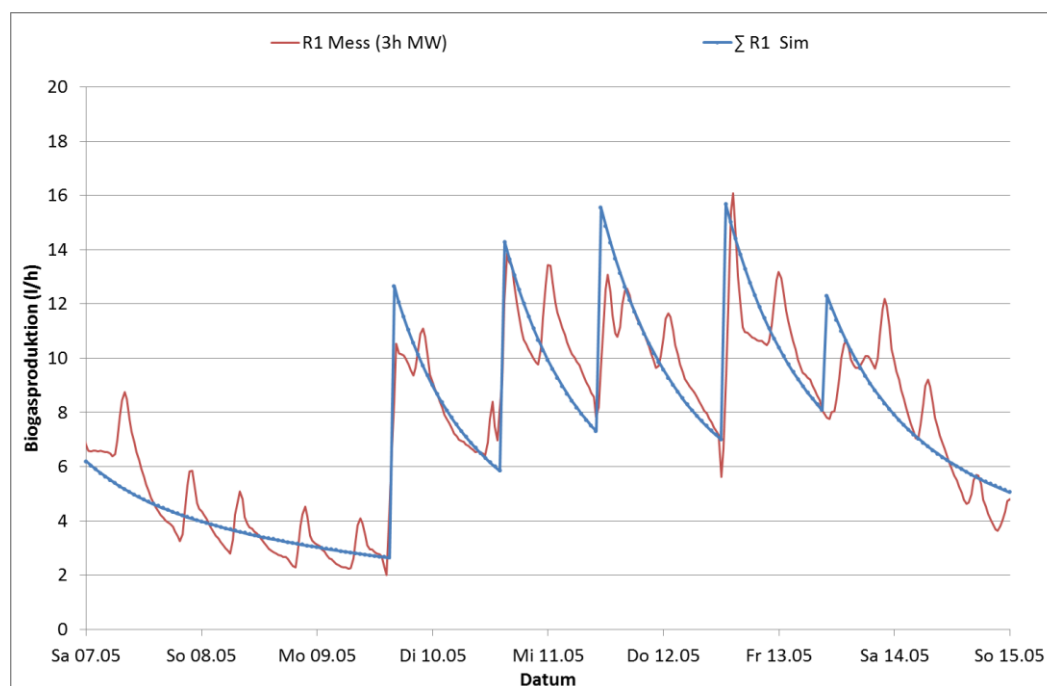


Abbildung 31: Verlauf Gasproduktion Versuchswoche & simulierte Produktion. (V06RV).

Der mit diesem Fütterungsansatz reduzierte Speicherbedarf liegt für das Szenario ohne Dauerläufer-BHKW bei ca. 65% des Bedarfes bei kontinuierlicher Fütterung und kann bei Einsatz eines Dauerläufer-BHKWs auf 45-50% reduziert werden.

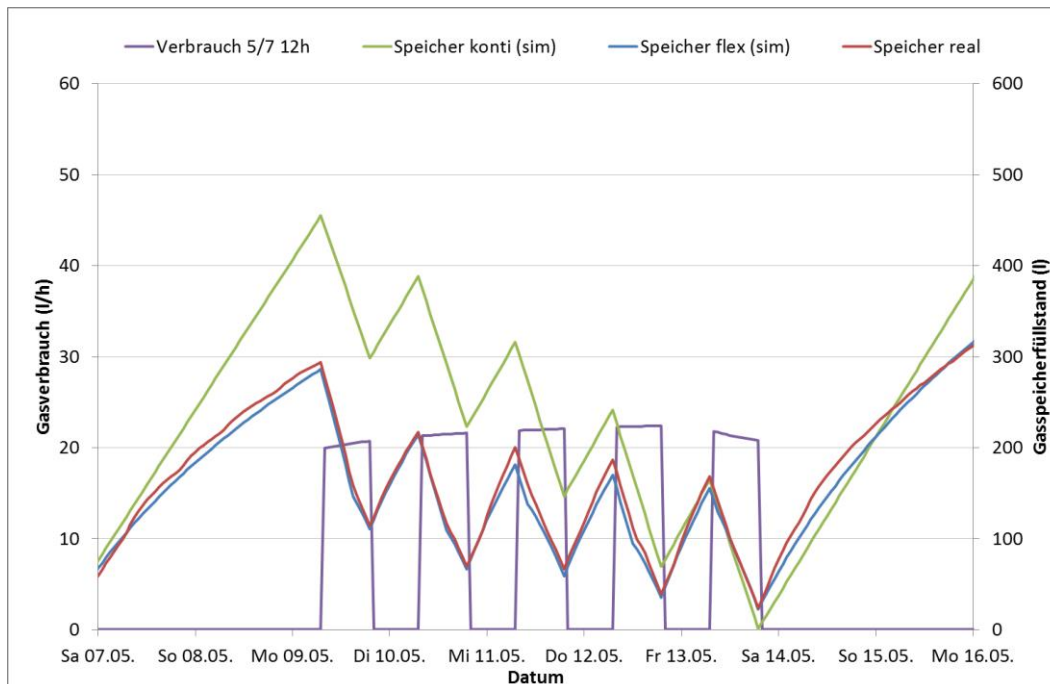


Abbildung 32: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergößen berechnet. (V06RV).

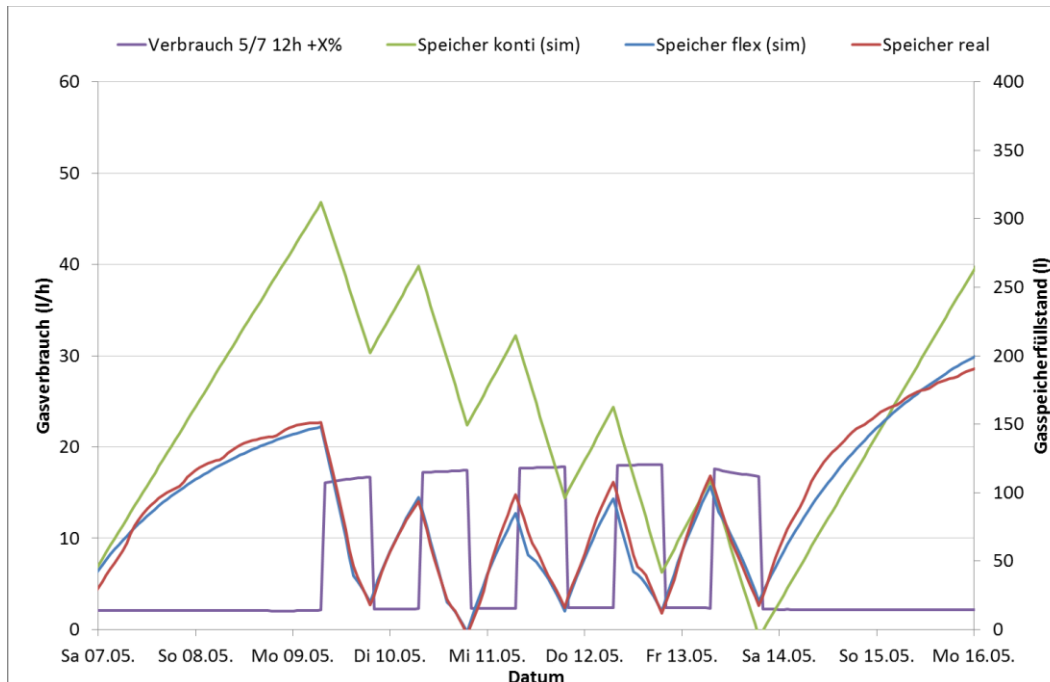


Abbildung 33: Verlauf der (virtuellen) Gasspeicher bei einem Gasverbrauch von 12h/d an 5 von 7 Tagen bei gleichzeitiger kontinuierlicher Verstromung von 30% der Gesamtproduktion mit einem Dauerläufer-BHKW. Basierend auf der Simulation wurden Gasproduktion und Gasverbrauch bilanziert und damit die benötigten Speichergößen berechnet.

Silphie selbst zeigte sich als langsamer als Mais und kaum schneller als die beiden anderen Alternativen Wildpflanze und Klee gras-Luzerne in der Abbaugeschwindigkeit (3.1.2). Der Einsatz von Getreideschrot hat

zur Kompensation dieser geringeren Geschwindigkeit geführt und es konnten annähernd ähnliche Gasspeicherreduktionspotentiale aufgezeigt werden.

Auch hier kam es in dem für diesen Versuch eingesetzten Reaktortyp zur Bildung von Schwimmschichten und damit letztlich zu Prozessstörungen durch die damit einhergehende Verminderung des aktiven Faulraumes.

In der Vergangenheit sind Ansätze zur nicht-kontinuierlichen Fütterung von Biogasprozessen häufig aufgrund der Annahme abgelehnt worden, dass dadurch die Prozessstabilität gestört werden würde. Die angesetzten Versuche haben alle durchschnittliche Raumbelastungen im unteren bis mittleren Bereich mit tagesindividuellen Raumbelastungen im sehr hohen Bereich gehabt. Diejenigen Versuche, bei denen keine Störungen, wie Schwimmschichten, auftraten sind durch die Verlagerung der Fütterungen im Wochenverlauf in keiner Weise destabilisiert worden. Das technisch bedingte Auftreten von Schwimmschichten und die damit einhergehende Einengung des Reaktionsraumes und die Aufkonzentrierung unvergorenen Substrates haben – unplanmäßig – zu wesentlich höheren Raumbelastungen geführt. Die Schwimmschichten nahmen teilweise bis zu 50% des Reaktorvolumens ein. Fütterungen, die in den darunter gelegenen Fermentationsraum eingebracht wurden, führten demnach bis zum doppelten der angedachten Raumbelastung. Dies zeigte sich zwar in einer verzögerten Gasbildung, einem Anstieg der Säuren und damit einer Prozessstörung, führte aber nicht zum Erliegen des Prozesses. Es kann damit angenommen werden, dass die geplanten Belastungen jeweils noch weit unter der maximal möglichen Belastung lagen und dass die regelmäßigen, mehrtägigen Fütterungspausen immer wieder zu einer weitgehenden Entspannung der Situation geführt haben.

Die Bildung der Schwimmschichten ist als laborspezifische Problematik anzusehen und nicht auf den großtechnischen Prozess übertragbar.

3.1.2 Kinetik der verschiedenen Substrate

Als für die Beschreibung der Abbaugeschwindigkeit tauglich haben sich folgende Parameterkombinationen für die unterschiedlichen Substrate erwiesen:

Tabelle 13: Charakterisierung der Abbaugeschwindigkeit der eingesetzten Substrate: prozentuale Verteilung der Fraktionen und die für die jeweilige Fraktion angesetzten k-Werte.

	Rinder- gülle	Wild- pflanze*	Mais	Mist	Kleegras- Luzerne	Getrei- de- schrot	Zucker- rübe	Ablauf (Ferm.)	Silphie	Gülle gesiebt
k1 (d ⁻¹)	1	0,9	3	0,8	2	2	3	3	2	0
p1 (%)	10%	35%	40%	30%	40%	50%	50%	10%	20%	0%
k2 (d ⁻¹)	0,5	0,5	0,5	0,4	0	0,4	1	0	0,5	0,5
p2 (%)	10%	10%	40%	40%	0%	40%	30%	0%	40%	100%
k3 (d ⁻¹)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
p3 (%)	80%	55%	20%	30%	60%	10%	20%	90%	40%	0%

*nicht gesicherte Daten

Zur Darstellung der Abbaugeschwindigkeiten der verschiedenen Substrate wurden die fortlaufenden kumulierten Gaserträge jedes Substrates im Verlauf der Zeit dargestellt. Hieraus lassen sich die Unterschiede der Abbaucharakteristika ablesen.

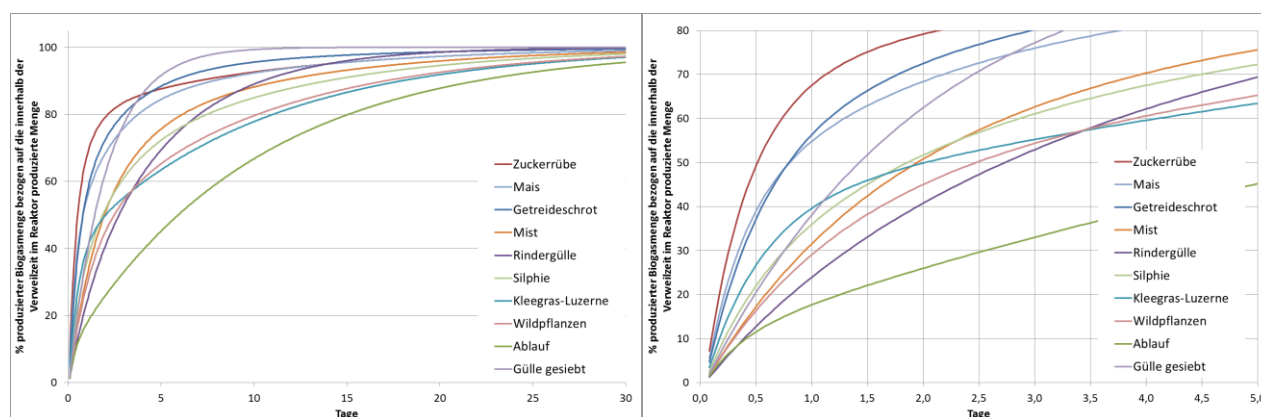


Abbildung 34: Simulierte Batch-Abbaukurven der einzelnen Substrate anhand der verwendeten Kinetikdaten (s. Tabelle 13). Die Kinetikdaten beziehen sich auf die im Versuch gemessenen Gasmengen. Links für 30 Tage, rechts ein Ausschnitt der in diesem Versuch besonders relevanten ersten Tage.

Anhand der Kinetikparameter und der Abbildung 34 lassen sich verschiedene Typen von Substraten charakterisieren. Die Gruppe mit der höchsten Abbaugeschwindigkeit setzt sich aus Zuckerrübe (gequetscht einsiliert), Getreideschrot (mittelgroß geschrotet) und Mais zusammen. Die erstgenannten sind beide in dieser Gruppe erwartet gewesen. Mais, als ganzpflanzliches Substrat, verfügt ebenfalls über große Anteile von leicht abbaubaren Stoffen (sowohl aus der Pflanze, als auch aus den Kolben sowie Silierprodukte) so dass ein hoher Anteil des potentiell innerhalb der Verweildauer produzierbaren Gases in kurzer Zeit freigesetzt wird. Für alle drei gilt, dass im Versuch 50% des produzierten Gases innerhalb von 12-18h freigesetzt werden, 80% innerhalb von 2-3 Tagen, bei Mais etwas länger. Hier zeigt sich die Sinnhaftigkeit der Unterteilung in die drei verschiedenen Fraktionen. Auf diese Weise lassen sich die unterschiedlichen Phasen des Abbaus sehr gut nachvollziehen. Die nächste Gruppe bilden Rindermist und Rindergülle. Diese enthalten geringere Anteile leicht abbaubarer Substanzen und höhere Anteile langsam abbaubarer Substanzen. Die sehr langsam abbaubaren Bestandteile kommen bei niedrigeren Verweilzeiten bzw. der ausschließlichen Betrachtung eines Fermenters weniger stark zum Tragen. Die gefundenen Kinetikparameter legen nahe, dass 80% des produzierten Gases innerhalb einer Woche freigesetzt werden, dies sagt nichts darüber aus, wieviel Prozent des Gesamtbioaspotentials innerhalb dieser Zeit freigesetzt werden. Die dritte Gruppe bilden die pflanzlichen Substrate Kleegras-Luzerne, Wildpflanzen und Silphie. Die anfängliche Umsetzung ist ähnlich der

vorgenannten Substrate, jedoch gibt es hier offensichtlich größere Anteile von schwieriger erreichbaren Komponenten. Die im Vergleich zur Maissilage (gehäckselt) geringe Aufbereitung führt vermutlich dazu, dass die Umsetzung intakter Pflanzenbestandteile längere Zeit in Anspruch nimmt. Hier werden 80% der Gasmenge erst später erreicht. Bei der Silphie, die ähnlich wie Mais gehäckselt wurde, lag dieser Zeitpunkt bei 7-8 Tagen, bei den anderen beiden Substraten bei ca. 10 Tagen. Sonderpositionen nehmen der Ablauf aus dem Fermenter sowie abgeseibte Gülle ein. Abgeseibte Gülle ist zum Teil zur Verminderung der Schwimmschichtbildung anstelle von Rindergülle eingesetzt worden. Die verdaulichen Anteile sind aufgrund der abgetrennten faserigen Bestandteile schnell umsetzbar, so dass die (insgesamt sehr geringe Gasbildung) in kurzer Zeit weitgehend abgeschlossen ist. Der Überlauf, welcher in der Versuchskombination Fermenter/Nachgärer eingesetzt wurde enthält die langsam verdaulichen Bestandteile aus den Substraten Mais, Mist und Gülle. Die hierfür identifizierte Kinetik weist dementsprechend den trägsten Gasfreisetzungsvorlauf auf.

Zusammenfassend eignen sich die identifizierten Kinetiken gut für die Simulation des zeitlichen Verlaufes der zu erwartenden Gasmengen und wurden daher im Laborversuch nach der Identifikation für die Rationsmengenbestimmung eingesetzt. Die Substrate unterscheiden sich entsprechend ihrer Zusammensetzung und ihres Aufbereitungsgrades hinsichtlich der gezeigten Gasproduktionsgeschwindigkeiten.

3.1.3 Leistungskennzahlen

Zur Bewertung der Flexibilisierung wurden, wie in 2.2.5 beschrieben, verschiedene Leistungskennzahlen erhoben.

In Tabelle 14 und Tabelle 15 sind die benötigten Speichergrößen bzw. die Reduktion der benötigten Gasspeicher dargestellt.

Tabelle 14: Vergleich: Gasspeicherbedarf für das Wochenende in h durchschnittlicher Gasproduktion für die Szenarien mit („30%“) und ohne Dauerläufer

Versuch	konti	flex	konti 30%	flex 30%
1	60	30	41	21
2&3	60	30	43	21
4	60	36	42	21
5*	60	35	41	16
6	60	39	42	20

*nicht gesicherte Daten

Tabelle 15: Vergleich: Gasspeichereinsparung, immer im Vergleich zur jeweiligen kontinuierlicher Gasproduktion für die Szenarien mit („30%“) und ohne Dauerläufer

Versuch	flex	flex 30%
1	50%	49%
2&3	50%	52%
4	40%	50%
5*	42%	61%
6	35%	53%

*nicht gesicherte Daten

Zusammengefasst (s.a. Abbildung 35) kann gesagt werden, dass sich durch entsprechende Verschiebung der Fütterungszeitpunkte der für ein verstromungsfreies Wochenende benötigte Gasspeicherbedarf um ca. 50% reduzieren lässt. Bei Einsatz eines durchlaufenden BHKWs, mit einem Verbrauchsanteil von 30% an der Gesamtgasproduktion, lassen sich bereits Gasspeichergrößen um 20h erreichen, die auf gut ausgestatteten Anlagen vorzufinden sind.

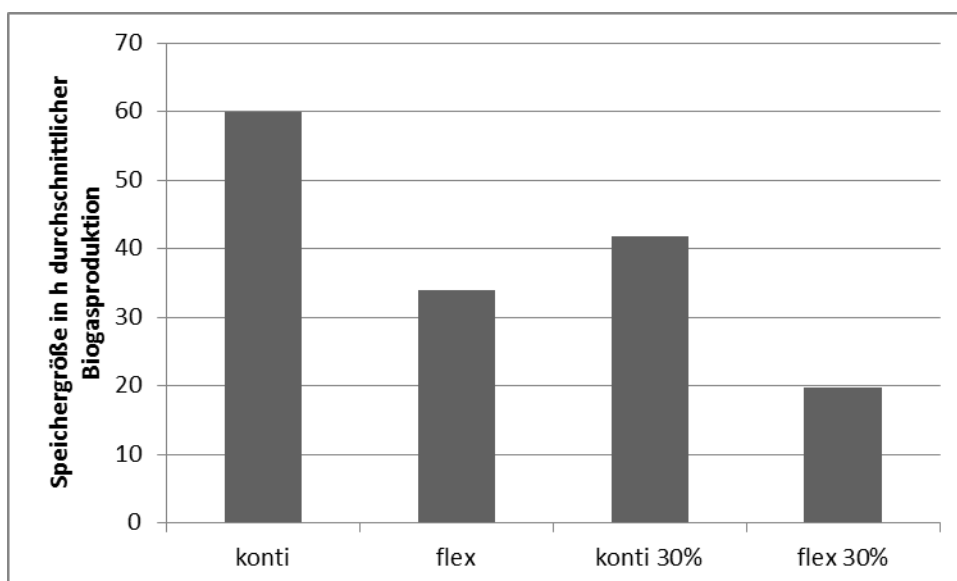


Abbildung 35: Speicherbedarf für die verschiedenen Szenarien (Mittelwerte über alle Versuche).

Zur Reduktion des nötigen Gasspeichers muss möglichst viel Biogas innerhalb der Woche, d.h. dem Zeitraum in dem verstromt wird, produziert werden – und entsprechend wenig in dem Zeitraum, in dem nicht verstromt werden soll. In den gewählten Szenarien entspricht der Verstromungszeitraum Werktags von 8-20 Uhr, entsprechend 4,5 Tagen, entsprechend 64% der Zeit einer Woche. Je mehr Gas in diesem Zeitraum produziert werden kann, desto weniger Speicher ist am Wochenende nötig. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei flexibler Fütterung ca. 80% des produzierten Biogases in diesem Zeitraum erreicht werden können. Dies bedeutet eine Reduktion des am Wochenende produzierten Gases von 36% auf ca. 20%.

Tabelle 16: Vergleich: Anteil der Gasproduktion in der Arbeitswoche (4,5 Tage \approx 64% der Wochenstunden und damit der Referenzgasproduktion bei kontinuierlicher Gasproduktion)

Versuch	flex
1	82%
2&3	82%
4	79%
5*	79%
6	77%

*nicht gesicherte Daten

Die Substratflexibilität spiegelt sich zusätzlich im Anstieg der Gasproduktionsrate nach einer Fütterung wieder. Je größer der Anteil schnell abbaubarer Inhaltsstoffe, desto größer die initiale Gasproduktionsrate und desto niedriger die Gasproduktionsrate nach einer Fütterungspause. Im Labor wurde die gesamte Tagesration auf einmal dem Reaktor zugeführt. In Praxisanlagen ist dies nicht zu erwarten, die maximalen Werte sind daher kaum mit realen Anlagen vergleichbar, die minimalen Raten hingegen durchaus.

Über die Versuche hinweg konnten unterschiedliche Reduktionsraten erreicht werden, was mit der jeweiligen Substratkombination zusammenhängt. In Versuch 1 wurde mit Mais die größte Reduktion erreicht, was sich auch in den Daten zur Speicherreduktion zeigt.

Tabelle 17: Vergleich: Gasproduktionsvariabilität (maximale und minimale Gasproduktionsrate im Vergleich zur Durchschnittsproduktion) – stark gerundete Werte.

Versuch	flex min	flex max
1	30%	260%
2&3	40%	320%
4	50%	230%
5*	50%	190%
6	40%	210%

*nicht gesicherte Daten

Es kann zusammengefasst werden, dass die Verlagerung der Gasproduktionsrate in der Hauptsache von der Verteilung der Fütterung im Wochenverlauf abhängt. Die Abbaugeschwindigkeit der Substrate spielt dabei sicherlich eine Rolle, aber diese ist nicht so ausgeprägt, wie erwartet. Ein intelligenter Einsatz auch von langsam abbaubaren Substraten erlaubt eine weitreichende Reduktion des Gasspeicherbedarfes.

3.1.4 Alternativszenarien Dauerläufer

Die flexible Fütterung reduziert den Speicherbedarf auf ca. die Hälfte, was für die Mehrzahl der Anlagen ohne Aufbau zusätzlicher Speicherkapazität noch nicht für dieses Verstromungsszenario (5 Tage/Woche 12h täglich) ausreichen würde. Neben dem Aufbau zusätzlicher Speicherkapazitäten kann der Einsatz eines kleineren Dauerläufers die notwendige Gasspeichergröße weiter reduzieren. Der Einsatz eines durchlaufenden BHKWs kann aus verschiedenen Gründen an BGA erwogen werden (z.B. Wärmebereitstellung Eigenwärme oder an Wärmekunden, Vermeidung von Pufferspeicherkosten) und wurde hier beispielhaft in den Kapiteln 3.1.1.1 bis 3.1.1.5 mit einem anteiligen Verbrauch von 30% am insgesamt produzierten Gas unterstellt. Der Gasspeicherbedarf bei kontinuierlicher Fütterungsweise lag für diesen Fall (Dauerläufer 30%) immer noch zwischen 40-50h und konnte durch die flexible Fütterung auf Werte von ca. 20h abgesenkt werden. Gut ausgestattete Anlagen verfügen bereits heute über Speicherkapazitäten in diesem Bereich, so dass die Erhöhung der Verstromungsflexibilität mittels des Einsatzes von flexibler Fütterung auch ohne Änderung der Gasspeicherkapazitäten möglich erscheint.

In Abbildung 36 ist eine beispielhafte Darstellung der Einsparungsmöglichkeiten von Gasspeicher durch den Einsatz unterschiedliche großer Dauerläufer (Verbrauch von 0-50% der produzierten Gasmenge) dargestellt. Die zugrundeliegenden Daten stammen aus dem Versuch mit Maissilage (s.a. 3.1.1.1).

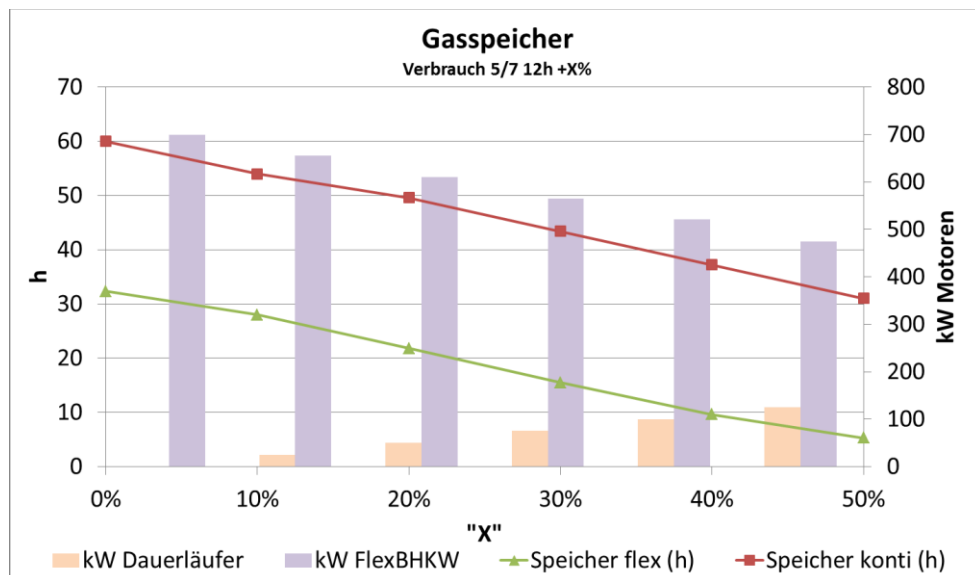


Abbildung 36: Reduktion des Gasspeicherbedarfs (dargestellt in h durchschnittlicher Biogasproduktion) durch Einsatz verschieden großer Dauerläufer und angepassten Spitzenleistungs-BHKW mit entsprechend verschieden großen Anteilen am Gasverbrauch für eine Anlage mit insgesamt 250kW Durchschnittsleistung.

Der Einsatz von Dauerläufermotoren vermindert aus wirtschaftlicher Sicht die Stunden mit höherer Vergütung, kann aber unter Umständen ins Anlagenkonzept passen und reduziert – wie in der Grafik ersichtlich – den notwendigen Gasspeicher beträchtlich. Bei flexibler Fütterung werden dann auch Gasspeichergrößen erreicht, die auf Bestandsanlagen vorhanden sind. Die Vielzahl möglicher Szenarien, die für diese Fälle aus wirtschaftlicher Sicht betrachtet werden könnte ist sehr groß. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden daher generalisierbarere Fallbeispiele betrachtet.

3.1.5 Fazit Laborversuche

Die flexible Biogasproduktion mit verschiedenen Substraten hat sich in den durchgeführten Laborversuchen als gut durchführbar erwiesen. Die erreichbare Reduzierung des Speicherbedarfs ist signifikant und liegt im Bereich einer Halbierung desselben. Der resultierende Speicherbedarf von ca. 30 h durchschnittlicher Gasproduktion liegt auf Praxisanlagen in aller Regel jedoch weit darunter. Ein Zubau von Gasspeicher oder ein Gasverbrauch am Wochenende sind also i.d.R. unausweichlich.

Die eingesetzten Substrate unterschieden sich erwartungsgemäß hinsichtlich ihrer kinetischen Parameter in der Biogasproduktion. Aus Anbausicht ökologisch vorteilhafte Substrate wie Klee gras-Luzerne, Silphie und Wildpflanzenmischungen wiesen zwar insgesamt geringere Abbaugeschwindigkeiten auf, als die Referenz Mais. Dennoch konnten in allen Szenarien ähnliche Einsparungspotentiale erreicht werden. Dieses Ziel wurde durch die entsprechend Anpassung der Fütterungsstrategie an die Kinetik des Substrates erreicht. Langsam abbaubare Substrate lassen sich leichter in größeren Mengen bereits am Wochenanfang einsetzen, als schnell abbaubare. Die freigesetzten Biogasmengen und auch die daraus resultierende Belastung des Prozesses ist entsprechend geringer, als bei schnell abbaubaren Substraten. Durch den entsprechend langen Vorlauf vor dem Wochenende sinkt die Gasproduktion am Wochenende dann bereits entsprechend ab, und es werden signifikante Einsparungspotentiale realisiert. Eine geschickte Verschneidung leicht abbaubarer Substrate kann dies zusätzlich stützen bzw. den Abfall der Biogasproduktion an Donnerstag/Freitag auffangen, so dass für die dort geplanten Verstromungsblöcke ausreichend Gas vorhanden ist.

Anhand wenig flexibel erscheinender Substrate wie Mist, heterogen abgereifter Wildpflanzensilage und anderen konnte in den durchgeführten Versuchen gezeigt werden, dass die Flexibilisierung der Biogasproduktion im Wochengang weniger vom Substrat, als vielmehr von der geschickten Planung der Fütterung abhängt.

Die Auswirkungen längerer Vergärungsdauer schwerer abbaubarer Substrate konnten nur in einem Szenario (Versuch 2&3) untersucht werden. Innerhalb der Versuchsdauer zeigte auch dieser Versuch ein hohes Verlagerungspotential.

Für die Praxis bedeutet dies, dass neben der Prüfung und ggf. Anpassung von Verstromungsaggregaten und Gasspeicherkapazitäten vor allem auch die Einbringtechnik auf die hierfür notwendige Schlagkräftigkeit geprüft werden muss. Ggf. ist auch die Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Rührwerkstechnik dabei zu prüfen, denn die Einbringung großer Mengen Substrat fordert diese zusätzlich heraus. Flüssigeinbringungstechniken sind hier vermutlich am geeignetsten, da sie bereits für eine weitgehende Einmischung und Verteilung der Substrate im Fermenter sorgen.

- Für die eingesetzten Substrate konnten Abbaukinetiken identifiziert werden, die sich stark voneinander unterscheiden.
- Die Biogasproduktion am Wochenende konnte durch entsprechende Verteilung der Fütterungsmengen im Wochenverlauf gegenüber der üblichen Fütterungsweise um ca. 50% reduziert werden.
- Die Verteilung der Substrate im Wochenverlauf hat hierbei einen sehr großen Einfluss. Große Einsparpotentiale konnten auch mit schwerer abbaubaren Substraten erreicht werden.
- Eine am Wochenende stark reduzierte Biogasproduktion und damit die Verlagerung in die Woche erscheint daher mit allen eingesetzten Substraten möglich.
- Die begleitende Überwachung der prozessbiologischen Parameter hat keine Anzeichen für nachteilige Auswirkungen der flexiblen Fütterungsweise gezeigt. Hohe Belastungen (2-3faches der Durchschnittsbelastung) an einzelnen Wochentagen resultierten in minimalen Änderungen der Gärsäuren, welche in den fütterungsfreien/-armen Zeiten wieder vollständig reduziert wurden.

3.2 Versuchsergebnisse aus dem flexiblen Demonstrationsbetrieb

Im Zeitraum von April bis Dezember 2017 wurden an der großtechnischen Forschungsbiogasanlage (vgl. Kapitel 2.2.1) Versuche mit 3 unterschiedlichen Substratzusammensetzungen zur flexiblen Gasproduktion durchgeführt. Die Ergebnisse werden je Substratzusammensetzung anhand einer Versuchswoche dargestellt. Die Bewertung erfolgt auf Basis der kompletten Versuchsreihe.

3.2.1 Rinderfestmist und Zuckerrüben

Wie in Abbildung 37 ersichtlich, ist in der Umstellungswoche drei der Bedarf an Gasspeicherkapazität während der flexiblen Gasproduktion weitaus geringer im Vergleich zur kontinuierlichen Fahrweise. Bei der kontinuierlichen Biogasproduktion lag der maximale Füllstand des Gasspeichers in dieser Woche bei ca. 2.000 m³. Im Gegensatz hierzu betrug der maximale Speicherbedarf bei der flexiblen Biogasproduktion lediglich 1.045 m³. In dieser Woche wurde eine Einsparung des Gasspeicherbedarfs von 48 % erzielt.

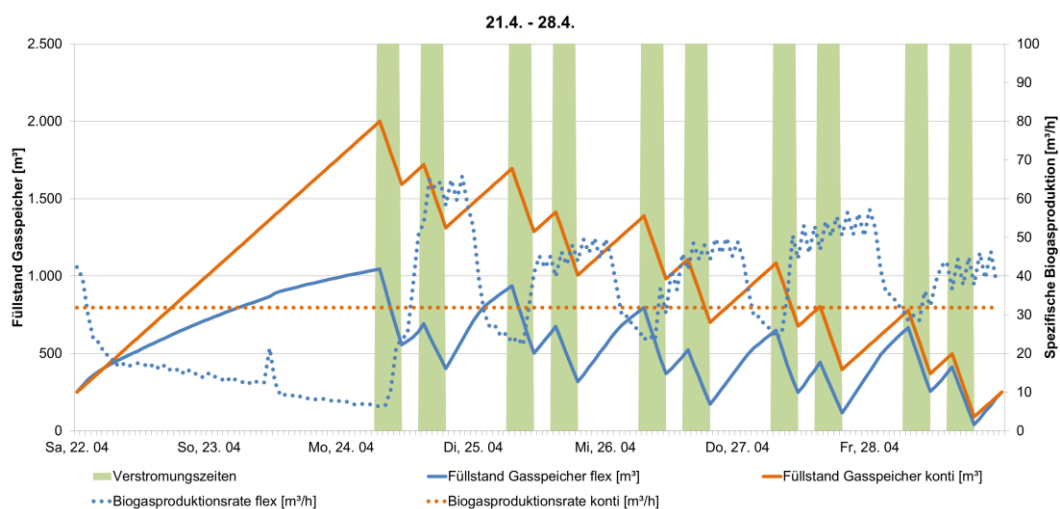


Abbildung 37: Gasspeichereinsparung Umstellungswoche 3, Versuch 1, Rinderfestmist und Zuckerrüben

Darüber hinaus erfolgte die Ermittlung der Höhe des Anteils der Biogasproduktion an den Werktagen, in denen die Verstromung stattfand. Während der kontinuierlichen Fahrweise lag die Biogasproduktion bei 64 %. Im Laufe der flexiblen Fahrweise gelang es, eine Verlagerung der Biogasproduktion von 17 % vom Wochenende auf die Wochentage zu erreichen. Somit konnten bei der dynamischen Fütterung 81 % des Biogases innerhalb der Woche produziert werden.

Neben der Verlagerung der Gasproduktion im Laufe der Woche wurde auch die tägliche Verlagerung untersucht. Dabei geht es um die Verlagerung der Gasproduktion auf die Stunden zwischen 12 Uhr und 24 Uhr, bedingt durch die Fütterung, welche morgens nach 9 Uhr beginnt. Am Montag der dritten Umstellungswoche konnte eine Verlagerung der Gasproduktion von 85% auf die Stunden zwischen 12.00 Uhr und 24.00 Uhr erreicht werden. Dies entspricht einer Verlagerung von 35 %. Was auch mit den Ergebnissen des DBFZ einhergeht. In den Laboruntersuchungen des DBFZ konnten Verlagerungen der Gasproduktion von bis zu 20 % erreicht werden. [33] S. 266 Im Verlauf der Woche wurde die Gasproduktion reduziert und die Verlagerung verringerte sich auf durchschnittlich 58 %.

In Bezug auf die Variation der Gasproduktion konnte in dieser Woche eine maximale Biogasproduktion von 207 % und eine minimale Biogasproduktion von 20 % im Vergleich zur kontinuierlichen Gasproduktion erreicht werden.

Die Ergebnisse der Umstellungswoche drei zeigen, dass eine flexible Gasproduktion mittels dynamischer Fütterung möglich ist. Abbildung 38 zeigt hierzu die Gasspeichereinsparungen im gesamten ersten Versuch als Vergleich.

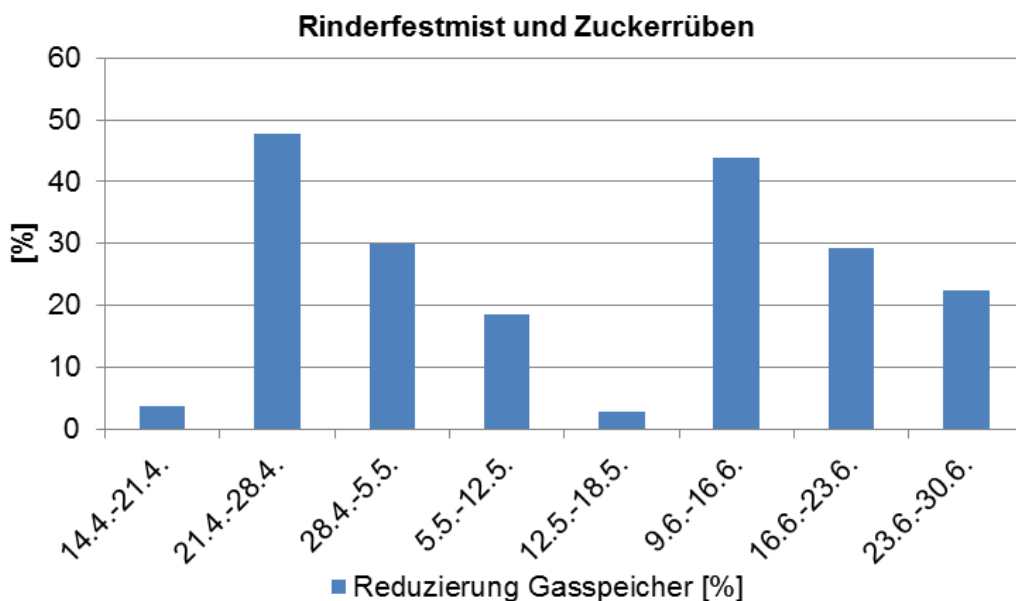


Abbildung 38: Vergleich Gasspeichereinsparung Umstellungs- und Versuchsphase Versuch 1, Rinderfestmist und Zuckerrüben

Wie zu erkennen ist, wurde die höchste Einsparung in der Woche vom 21.04.2017 mit 48 % erreicht. In der folgenden Woche verringerte sich die Einsparung. In den folgenden Wochen reduzierte sich die Differenz auf eine Einsparung von 3 %, welches die geringste Speicherreduzierung im gesamten Versuch darstellt. Durch die anschließende Fütterungsanpassung erhöhte sich die Einsparung in den letzten drei Versuchswochen wieder. Anhand von Abbildung 38 ist aber zu erkennen, dass trotz gleichbleibender Fütterung, wie in den letzten drei Wochen des Versuchs praktiziert, die Gasspeicherreduzierung nicht konstant auf hohem Niveau gehalten werden konnte, sondern abgenommen hat. Dieses Phänomen konnte nicht abschließend erklärt werden und gilt es in Zukunft noch näher zu analysieren.

3.2.2 Silphie und Getreideschrot

Als Beispielwoche für den zweiten Teilversuch mit Gülle, Silphie und Getreideschrot dient die vierte Versuchswoche. Sie stellt eine der Wochen dar, mit einer sehr hohen Gasspeichereinsparung. Wie in Abbildung 39 ersichtlich, lag der maximale Füllstand in der kontinuierlichen Fahrweise in dieser Woche bei 1.116 m³, während er bei der dynamischen Fütterung bei 593 m³ lag. Somit konnte der Gasspeicher um 47 % reduziert werden.

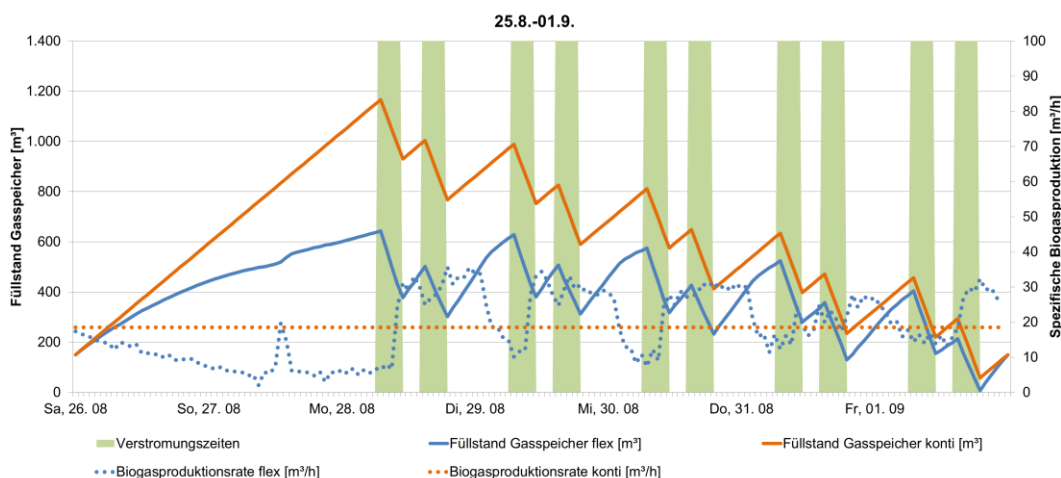


Abbildung 39: Gasspeichereinsparung Versuchswoche 4, Versuch 2, Silphie und Getreideschrot

Es konnte ebenfalls eine hohe Verlagerung der Gasproduktion vom Wochenende auf die Woche erreicht werden. Diese lag mit 80 % bei der dynamischen Fütterung 16 % höher, als die kontinuierliche Produktion während der Wochentage.

Die tägliche Verlagerung der Gasproduktion auf die Stunden 12 Uhr bis 24 Uhr belief sich auf 76 % am Montag. Durch die Reduzierung der Gasproduktion im Verlauf der Woche sank diese auf durchschnittlich 58 % in den Tagen von Dienstag bis Donnerstag.

In Bezug auf die Variation der Gasproduktion im Laufe der gesamten Woche konnte eine maximale Gasproduktion von 193 % und eine minimale Gasproduktion von 11 % im Vergleich zur kontinuierlichen Gasproduktion erzielt werden.

Abbildung 40 zeigt den Vergleich der Gasspeichereinsparungen über den gesamten zweiten Versuch. Wie daraus ersichtlich ist, liegt die geringste Einsparung in der ersten Versuchswoche. Dies ist aber durch den im Vorfeld laufenden Versuch mit Rinderfestmist zu erklären, welcher noch Einfluss auf die Gasproduktion in der ersten Woche hatte.

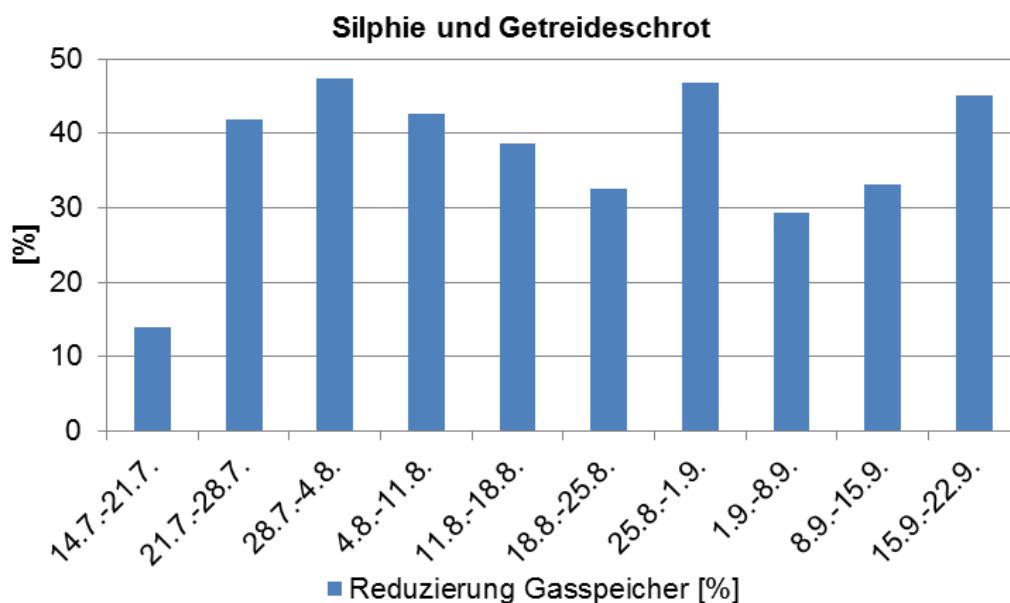


Abbildung 40: Vergleich Gasspeichereinsparung Umstellungs- und Versuchsphase Versuch 2, Silphie und Getreideschrot

Die höchsten Einsparungen konnten in der vierten Umstellungs- und in der vierten Versuchswoche mit 47 % erzielt werden. Die geringste Einsparung im Versuch mit Silphie und Getreideschrot wurde in der fünften Versuchswoche mit 29 % Gasspeichereinsparung erreicht. Mit Ausnahme dieser Woche konnte die Gasspeichereinsparung im gesamten Versuch über 30 % gehalten werden.

Der zweite Versuch musste wie der erste Versuch vor dem geplanten Ende abgebrochen werden. Auf Grund der Konzeption des Forschungsfermenters konnte kein Substrat mehr in den Behälter eingebracht oder abgezogen werden. Die Befüll- und Entnahmeleitung des Forschungsfermenters befindet sich ca. 1 m über dem Fermenterboden. Im Verlauf des Versuches mit der Silphie kam es zum Absetzen des pflanzlichen Materials, wodurch die Leitung verstopft wurde, sodass kein Substrat zum Anmischen im Quickmix entnommen werden konnte. Das Substrat im Fermenter musste mit Güllemengen von bis zu 15 m³ pro Tag verdünnt und über einen Zeitraum von zwei Wochen aufgerührt werden. Somit wurde der Versuch am 22.09.2017 abgebrochen, um einer aufwendigen Entleerung und Reinigung des Fermenters zu entgehen.

3.2.3 Gülle und Maissilage

Für den letzte der drei Teilversuche mit Gülle und Maissilage wird in Abbildung 41 Versuchswoche sechs als Beispiel dargestellt. Wie in Abbildung 41 erkennbar, lag der maximale Gasspeicherfüllstand der kontinuierlichen Gasproduktion bei 627 m³, währenddessen der maximale Gasspeicherfüllstand der

dynamischen Fütterung bei 326 m³ in Versuchswoche sechs lag. Somit konnte der Gasspeicher um 48 % reduziert werden.

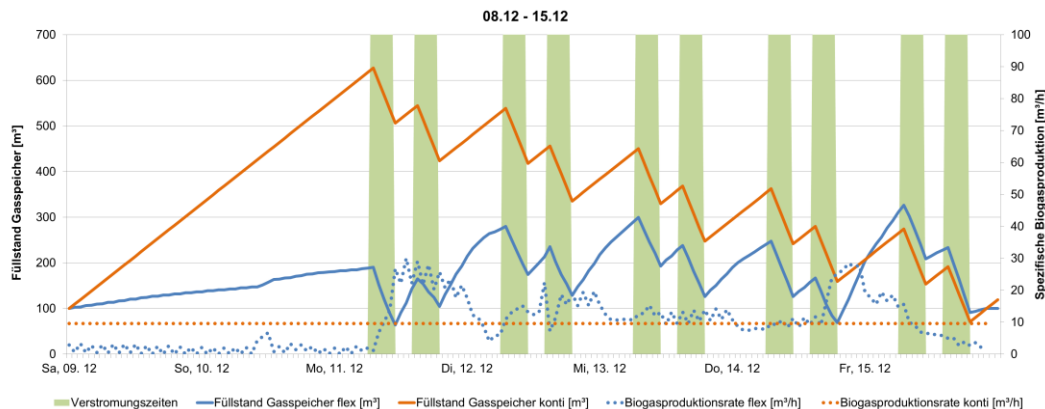


Abbildung 41: Gasspeichereinsparung Versuchswoche 6, Versuch 3, Gülle und Mais

Die Verlagerung der Gasproduktion vom Wochenende auf unter der Woche erfolgte mit einer Verschiebung von 30 %. Somit lag die Gasproduktion unter der Woche bei 94 % bei der flexiblen Gasproduktion, im Vergleich zu 64 % bei der kontinuierlichen.

Die Auswertung der täglichen Gasproduktion ergab eine Verschiebung auf die Stunden 12 Uhr bis 24 Uhr von 80 % am Montag der sechsten Versuchswoche. Im Durchschnitt lag die Verschiebung an den Tagen Dienstag bis Donnerstag bei 49 %, was bedeutet, dass in diesen Tagen in beiden Tageshälften annähernd die gleiche Gasmenge produziert wurde. Dies begründet sich auch damit, dass die Fütterung nicht Stoßweise erfolgte, sondern über den Tag verteilt.

Die maximale Gasproduktion befand sich in dieser Woche bei 313 % der kontinuierlichen Gasproduktion, während die minimale Gasproduktion bei 10 % lag.

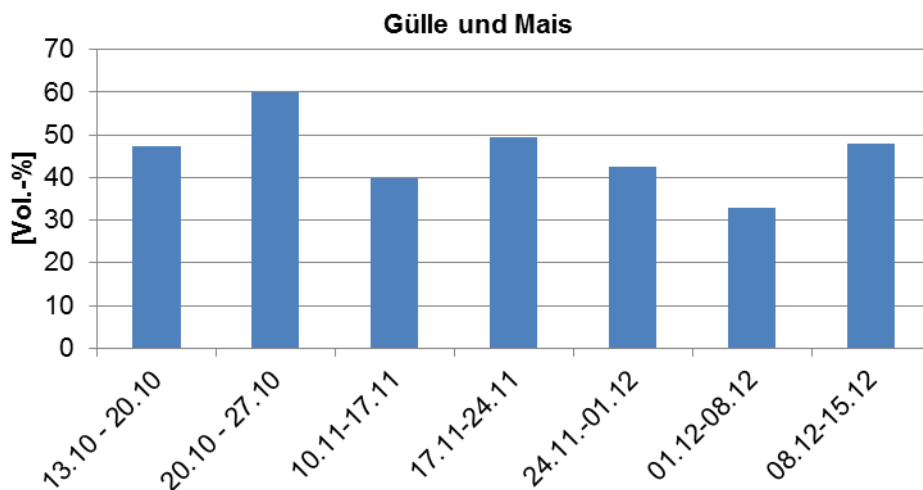


Abbildung 42: Vergleich Gasspeichereinsparung Umstellungs- und Versuchsphase Versuch 3, Gülle und Maissilage

Abbildung 42 zeigt die erzielte Einsparung der Gasspeicherkapazität des dritten Teilversuches (Wochen der Substratumstellung mit negativem Ergebniss sind, weil nicht repräsentativ, nicht dargese stellt). Die höchste Gasspeichereinsparung konnte mit einer Reduktion von 60 % in der dritten Umstellungswoche erreicht werden. In den übrigen Umstellungs- und Versuchswochen lag die Gasspeichereinsparung zwischen 33 % und 50 %.

Wie in den anderen beiden Versuchen auch, konnten auch in diesem Versuch nicht alle Wochen wie geplant durchgeführt bzw. ausgewertet werden. Auf Grund eines technischen Defektes wurden die Daten vom

27.10.2017 bis 06.11.2017 nicht dokumentiert, wodurch diese beiden Wochen nicht ausgewertet werden können. Des Weiteren war der Versuch ursprünglich bis zum 31.12.2017 geplant.

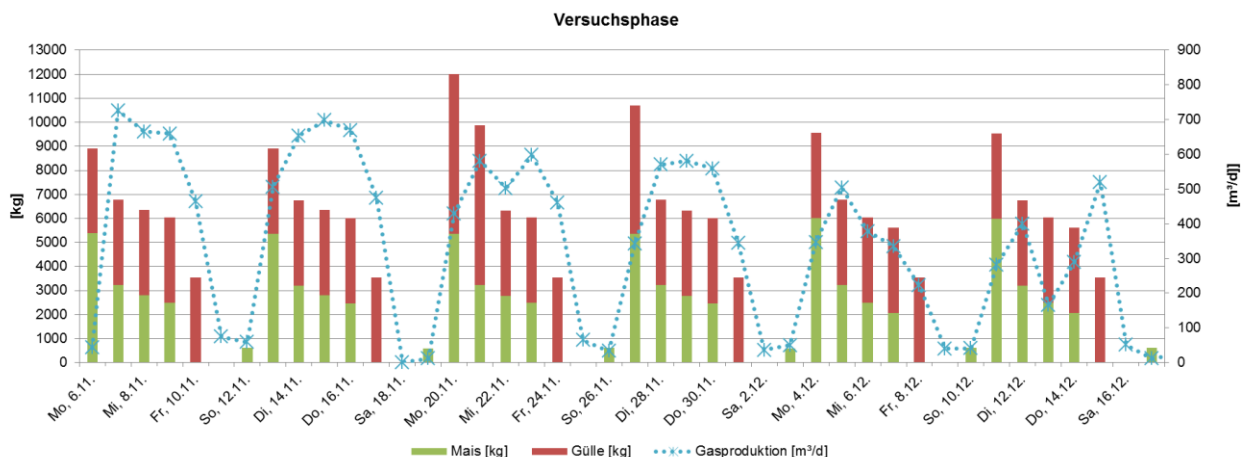


Abbildung 43: Fütterungsmengen und Gasproduktion Versuchsphase – Versuch 3

3.2.4 Laborergebnisse und Gasqualität im Fermenter

Wie unter Punkt 0 erläutert wurde der Forschungsfermenter im Rahmen der Versuche regelmäßig untersucht. Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse dieser Laboruntersuchungen, welche sich im Verlauf der Versuche nur marginal verändern. Im Verlauf des ersten Versuches stiegen TM und oTM sukzessive an, während der pH-Wert und der EQ-Wert nahezu konstant blieben. Im zweiten Versuch nahmen TM und oTM weiter zu, bis zum Abbruch des Versuches am 22.09.2017. Dies zeigt auch der EQ-Wert deutlich, der zu diesem Zeitpunkt auf Werte von über 600 mg/kg angestiegen ist. Im gesamten letzten Versuch verliefen alle Werte des Fermentersubstrates wieder auf konstantem Niveau.

Die Unterbrechungen, die in einzelnen Kurven ersichtlich sind, kommen durch die unterschiedlichen Häufigkeiten der Analysen zu Stande, welche im Analyseplan erläutert wurden.

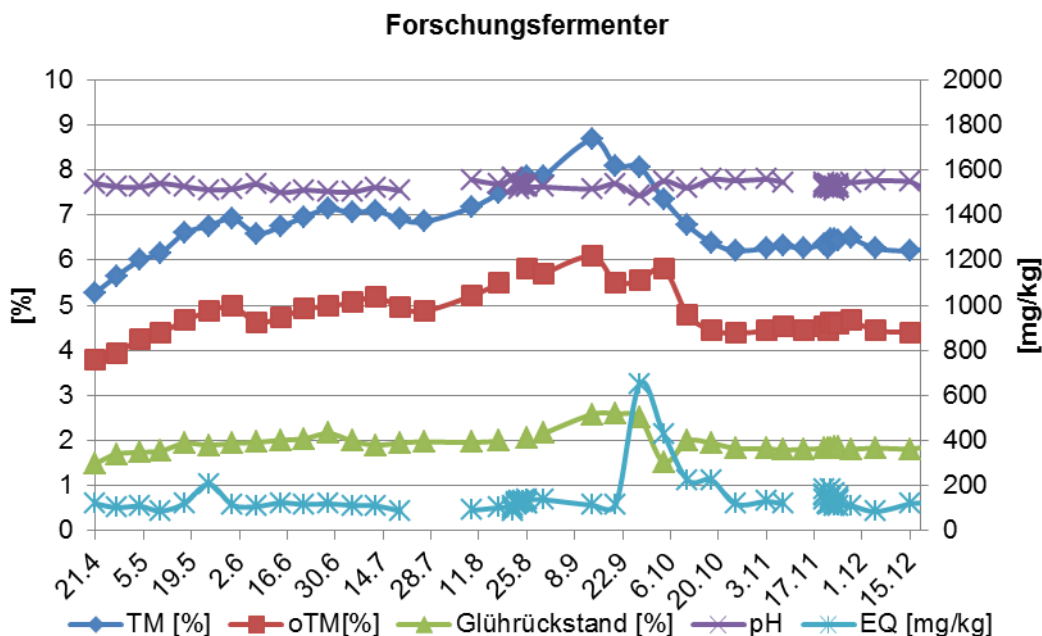


Abbildung 44: Laborergebnisse Forschungsfermenter im Verlauf der drei Versuche

Neben den laboranalytischen Untersuchungen erfolgt, an der Biogasanlage eine Analyse der Gasqualitäten. Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse der Gasqualitätsanalyse im Verlauf der drei Versuche. Es gab im Laufe des

zweiten Versuches Probleme mit dem Messgerät, woraus die lückenhafte Aufzeichnung der Abbildung resultiert. Jedoch zeigen die Messwerte von CH₄ und CO₂ aus Abbildung 45, dass es im Verlauf der Versuche zu keinen größeren Schwankungen gekommen ist. Der CH₄-Gehalt lag im Durchschnitt in allen drei Versuchen bei 51,9 % und schwankte im Vergleich der Versuche nur um 0,9 %. Der CO₂-Gehalt lag im Mittel bei 48,1 % und schwankte im Vergleich nur um 1,1 % im Durchschnitt zwischen den Versuchen. Der O₂-Gehalt lag mit Ausnahme der Schwankungen im Rahmen des Defektes im Durchschnitt bei 0,18 %. Der H₂S-Gehalt wies regelmäßige Schwankungen im Bereich von 0 ppm bis 664 ppm auf.

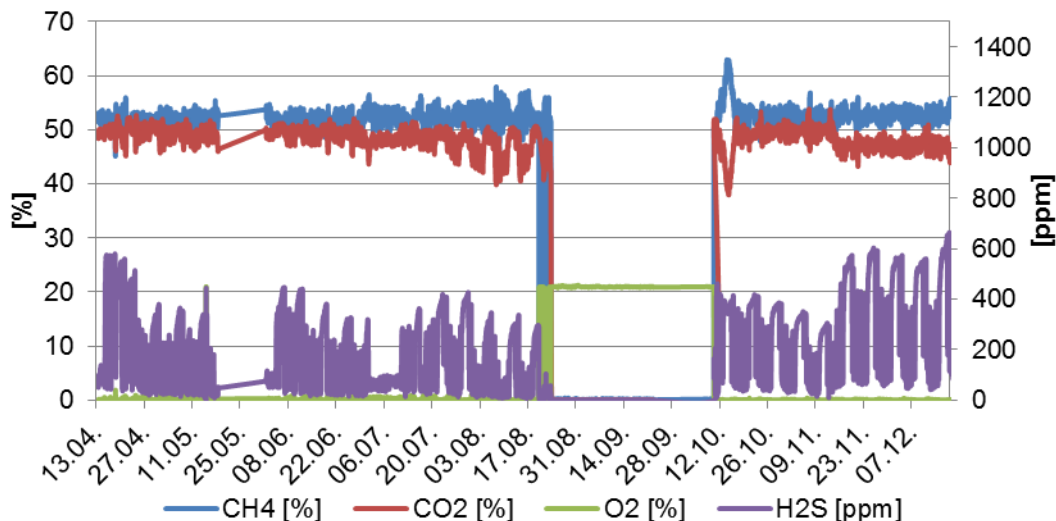


Abbildung 45: Gasqualität im Fermenter im Verlauf der drei Versuche

3.2.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass die Flexibilisierung von Biogasanlagen durch ein angepasstes Fütterungsmanagement möglich ist und ein hohes Potential in sich birgt. Grundlage ist ein zuvor festgelegter Verstromungsplan, auf dessen Basis ein Fütterungsplan aus Substraten mit unterschiedlichen Eigenschaften erstellt wird.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Fütterung, bestehend aus einer Kombination von schnell und langsam abbaubaren Substraten, erhebliche Vorteile im Hinblick auf die Flexibilisierung zu erwarten sind.

Im ersten Versuch wurden Mais und Gülle als Basissubstrat verwendet, während Festmist und Zuckerrüben zur Steuerung für die Gasspitzen dienen sollten. In einem Forschungsvorhaben des DBFZ wurden bereits Untersuchungen zur dynamischen Fütterung mit diesen Substraten durchgeführt. [33] 264 f. Die Verfügbarkeit, insbesondere von Festmist an Biogasanlagen, ist positiv zu bewerten. Problematisch war die auf Grund des schlechten Lagerungszustands der Zuckerrüben notwendige Vermischung von Zuckerrüben und Festmist. Darüber hinaus wäre die vorhandene Anlagentechnik nicht ohne weiteres für die getrennte Einbringung der Substrate geeignet gewesen. Es war somit nicht mehr möglich, wie ursprünglich geplant, den schwer vergärbaren Festmist zum Wochenanfang zu füttern. Ebenso konnten die Zuckerrüben, als sehr schnell vergärbare Substrat, nicht zum Wochenende hin genutzt werden, um gezielt Gasspitzen zu erzeugen. Trotz dieses Umstandes konnte, wie in Tabelle 18 ersichtlich, im Versuch gezeigt werden, dass bis zu 48 % des Gasspeichers bei flexiblem Fütterungsmanagement wochenspezifisch eingespart werden könnten. Mehrfach wurden Gasspeichereinsparungen von über 45 % erreicht (siehe Abbildung 38).

Des Weiteren konnte im Wochenverlauf eine Verlagerung der Gasproduktion von 35 % vom Wochenende auf die Wochentage (Montag 8 Uhr bis Freitag 20 Uhr) erreicht werden. Somit lag die Gasproduktion unter der Woche bei 81 %. Dies resultiert aus der Steigerung der flexiblen Gasproduktion auf bis zu 207 % im Vergleich zur kontinuierlichen Gasproduktion.

Tabelle 18: Vergleich Leistungskennzahlen ausgewählter Versuchswochen der drei Versuche

	Verlagerung		Variation		Variation
	Gasspeicher- einsparung	Gasproduktion wöchentlich	Durchschnittliche Gasproduktion	Gasproduk- tion Max	Gasproduk- tion Min
	[%]	[%]	[m ³ /h]	[%]	[%]
Versuch 1 - Rinderfestmist, Zuckerrüben	48	35	32	207	20
Versuch 2 - Silphie, Getreideschrot	47	16	18	193	11
Versuch 3 - Mais, Gülle	48	30	10	313	10

Im zweiten Teilversuch des Projektes mit Silphie und Getreideschrot konnte ebenfalls bewiesen werden, dass eine dynamische Fütterung zur Flexibilisierung einer Biogasanlage geeignet ist. In diesem Versuch dienten Silphie und Gülle als Grundsubstrat, während das Getreideschrot zum Wochenende hin für Gasspitzen eingesetzt wurde. Die exemplarische Versuchswoche hat gezeigt, dass eine Gasspeichereinsparung von bis zu 47 % erreicht werden konnte (siehe Tabelle 18). Des Weiteren konnte eine Verlagerung der wöchentlichen Gasproduktion um 16 % vom Wochenende auf die Wochentage erzielt werden. Die durchschnittliche Gasproduktion lag in dieser vierten Versuchswoche bei 18 m³/h. Im Bezug dazu konnte in dieser Woche eine maximale Gasproduktion von 193 % der durchschnittlichen erreicht werden, während die minimale Gasproduktion bei 11 % lag (Messungenauigkeit bei sehr kleinen Gasvolumenströmen inbegriffen). Es konnten somit vergleichbare Kennzahlen zum ersten Versuch nachgewiesen werden.

Der zweite Versuch gestaltete sich allerdings in Bezug auf den Einsatz des Getreideschrotes anders als ursprünglich geplant. Für den Versuch wurde das Getreide zu Schrot gemahlen, woraufhin erhebliche Probleme mit Schaum auftraten, welche mit Pflanzenöl eingedämmt wurden. Aus diesem Grund wurde die zweite Charge Getreide lediglich nur noch gequetscht. Diese Form der Zerkleinerung führte zu keinen Problemen im Fermenter und ist somit besser geeignet. Im Verlauf dieses Versuches kam es zu einem weiteren Problem, welches folglich zum Abbruch des Versuches geführt hat. Der Einsatz von durchschnittlich 24 t Silphie pro Woche in der Versuchsphase führte zu erheblichen Verstopfungen im Fermenter. In Folge dessen musste der Fermenter über ca. 2 Wochen kontinuierlich aufgerührt und mit bis zu 20 m³ Gülle pro Tag verdünnt werden, um die vollständige Entleerung und Reinigung des Fermenters zu umgehen. Der Anteil der Silphie an der Fütterung lag im Versuchszeitraum bei ca. 72 %. Der Versuchsverlauf hat gezeigt, dass für eine bodennahe Flüssigfütterung des Fermenters dieser Anteil über einen längeren Zeitraum hinweg zu hoch ist.

Im dritten Teilversuch mit Mais und Gülle konnten wie in den beiden Versuchen zuvor Gasspeichereinsparungen von bis über 30 % zu 48 % erreicht werden (vgl. Tabelle 18). Die Verlagerung der Gasproduktion auf die Wochentage lag in der exemplarischen Versuchswoche bei 30 %, bei einer niedrigen durchschnittlichen Gasproduktion von 10 m³/h. In Bezug auf die durchschnittliche Gasproduktion lagen das Maximum bei 313 % und das Minimum bei 10 %. Die Werte dieses dritten Versuches müssen allerdings relativiert werden, wie bereits unter Punkt 3.2.3 erläutert. Im Verlauf dieses Versuches kam es über den gesamten Zeitraum zunehmend zu Problemen, was anhand von Abbildung 43 ersichtlich ist. In der Versuchsphase nahm trotz konstanter Fütterung die Gasproduktion stetig ab. Dieses Phänomen konnte im Rahmen des Projektes nicht geklärt werden. Ein möglicher Grund für die stetige Abnahme könnten Probleme der Fermenterbiologie mit der dynamischen Fütterung sein. Eine weitere Möglichkeit stellt aber auch die Gasmestechnik dar, welche vermutlich nicht alle Gasmengen detektiert hat. Dafür sprechen auch die dokumentierten, ungewöhnlich niedrigen Gasmengen, welche über das Wochenende gemessen wurden (vgl. Punkt 3.2.3). Trotz Reinigung und täglicher Kontrolle der Gasmestechnik und regelmäßiger Kontrolle der Fermenterbiologie konnte der Grund für die stetige Abnahme der Gasproduktion in der Projektlaufzeit nicht ermittelt werden. Grundsätzlich haben die Versuche zur flexiblen Gasproduktion die Ergebnisse von Mauky et

al. [7, 34, 35] belegt und gezeigt, dass es technisch möglich ist durch ein gezieltes Substratmanagement eine flexible Gasproduktion zu erreichen.

Für die Umsetzung an Bestandsbiogasanlagen ist wichtig, dass das Prinzip funktioniert, aber nicht jede Anlagentechnik für alle Substratrohstoffe und Zusammensetzungen geeignet ist. Demnach müssen für die Umsetzung an Bestandsbiogasanlagen anlagenspezifische Konzepte erstellt werden.

Im Verlauf des Versuches wurde des Weiteren festgestellt, dass bei gleichbleibender Fütterung die Gasspeichereinsparung der flexiblen Fahrweise nicht auf dem hohen Niveau von über 40 % gehalten werden kann. Im Verlauf des ersten Versuches als Beispiel sank die Gasspeichereinsparung bei gleichbleibender Fütterung auf ca. 20 % ab. Dieses Phänomen kann nicht abschließend geklärt werden. Mögliche Ursachen können die Ablagerung von Sand (aus der Fütterung der Zuckerrüben) oder Silphie sein, die den Faulraum verkleinern und demzufolge die Verweilzeit der Substrate reduzieren. Eine weitere Ursache können aber auch die temporären Ermüdungserscheinungen der Prozessbiologie am Ende der 8-monatigen Versuchsperiode sein.

3.3 Ökonomische Bewertung der flexiblen Biogasproduktion

Die Ergebnisse der ökonomischen Analyse vergleichen die Wirtschaftlichkeit verschiedener Konzepte zur Flexibilisierung der Verstromung einer Bestandsbiogasanlage (Kapitel 3.3.1). Dabei wird in Fall 1 und 2a ein Wochenverstromungsplan mit 40 h Verstromung pro Woche, aufgeteilt über die Wochentage mit kontinuierlicher und flexibler Gasproduktion, verglichen. In beiden Fällen ist mit der Erhöhung der Verstromungskapazität auch eine Erweiterung der Gasspeicherkapazität verbunden. Fall 2b untersucht dagegen den flexiblen Verstromungsbetrieb mit an der Anlage bereits vorhandenen Gasspeicherkapazitäten.

3.3.1 Ökonomie der Referenzanlage

Entscheiden sich Biogasanlagenbetreiber für die Flexibilisierung Ihrer Anlage hat dies mehrere Gründe. Zu nennen sind hier neben der perspektivischen Ertüchtigung der Anlage für eine mögliche Post-EEG Laufzeit und der Erhöhung der Verfügbarkeit des BHKWs durch die Installation von „redundanten Verstromungskapazitäten“ auch die Wirkungsgraderhöhung durch effizientere BHKW. Primärer Grund für die Investition in einen flexiblen Verstromungsbetrieb ist jedoch, dass die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs verbessert werden soll. Dies wird anhand einer 500 kW_{el} P_{Bem} Modellanlage mittels verschiedener Anlagenkonzepte zur Flexibilisierung der Stromproduktion überprüft. Diese sind mit deren ökonomischen und technischen Rahmenbedingungen in Kapitel 2.4.3 dargestellt.

Die Annuität der Bestandsanlage mit einer Grundlastverstromung nach EEG 2012 ist in

Tabelle 19 dargestellt. Die Annuität der Bestandsanlage ist positiv. Das bedeutet, dass mit dem Anlagenbetrieb die Kosten für die Kapitale Dienstleistung gedeckt sind und die Arbeitszeit bereits vergütet ist. Darüber hinaus sind über die Laufzeit von 20 Jahren Aufwendungen für Reinvestitionen sowie Reparatur und Wartung bereits in den jährlichen Kosten enthalten.

Tabelle 19: Annuität der Bestandsanlage im Grundlastbetrieb

Investitionskosten	
Feststoffeintrag, 40 m ³ Vorlagebehälter	105.533
Mobiltechnik für Feststoffe	53.695
Vorgrube, 20 m ³ Bruttovolumen	14.738
Fermenter, 2000 m ³ Bruttovolumen	261.247
Nachgärer, 2000 m ³ Bruttovolumen	248.093
Gärrestlager, 4700 m ³ Bruttovolumen	253.371
Tragluftdach für 4700 m ³ Gärrestlager	69.616
BHKW inkl. Peripherie; Gas-Otto-Motor, 600 kW	458.728
Mess-, Steuer-, Regeltechnik mit Gasfackel (300-500 m ³ /h)	159.178
Zentrale Pumpstation, 60 m ³ /h Förderleistung	34.658
Einhausung 10-Fuß-Container für Pumpen	15.918
Zuschlag für Planung, Genehmigung, Sonstiges	156.924
Rückbau	86.729
Invest, gesamt	1.918.428
Jährliche Kosten und Einnahmen	
Kaptialgebundene Kosten	204.376
Betriebsgebundene Kosten	115.762
Bedarfsgebundene Kosten	505.340
Sonstige Kosten	17.646
Kosten, gesamt	843.124
Grundvergütung (EEG 2012)	553.720
EK I (EEG 2012)	260.611
EK II (EEG 2012)	2.919
Wärmeerlös	29.759
Erlöse, gesamt	847.008
Annuität	3.884

3.3.2 Ökonomie der flexiblen Verstromungskonzepte

Basierend auf den in Kapitel 2.4.3 beschriebenen Anlagenkonzepten werden die Ergebnisse der ökonomischen Analyse anhand einer repräsentativen 500 kW_{el} P_{Bem} Modellbiogasanlage dargestellt. Dabei geben die Ergebnisse Auskunft über die Vorzüge unterschiedlicher Flexibilisierungsvarianten mit unterschiedlichen, daraus resultierenden Verstromungskapazitäten.

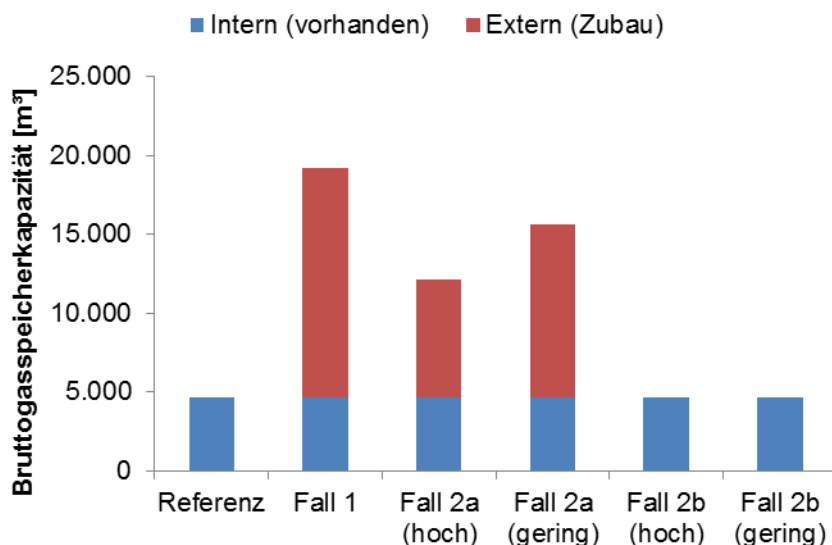


Abbildung 46: Bruttogasspeicherkapazität der betrachteten Anlagenkonzepte

In Abbildung 46 sind die Bruttogasspeicherkapazitäten der Anlagenkonzepte dargestellt. Hieraus gehen die durch die flexible Biogasproduktion eingesparten Gasspeicherkapazitäten gegenüber der flexiblen Verstromung in Fall 1 sowie die gegenüber der Referenzanlage erweiterten Gasspeicherkapazitäten hervor. Dabei wurde die unterstellte Flexibilität der Gasproduktion im Fall 2a von 40 % Reduktion der Gasproduktion gegenüber der Wochendurchschnittsgasproduktion in den Nichtverstromungszeiten (übers Wochenende) auf nur 20 % (Fall 2a gering) variiert. Dies wurde ebenso auf die Anlage in Fall 2b übertragen. Jedoch hat eine veränderte Flexibilität dieser Anlage keinen Einfluss auf die Gasspeicherkapazität (die hier gesetzt, weil bereits vorhanden, ist), sondern auf die Flexibilität des Verstromungsbetriebs. Zur besseren Veranschaulichung sind die Verstromungsfahrpläne der Anlagenkonzepte in Abbildung 47 dargestellt.

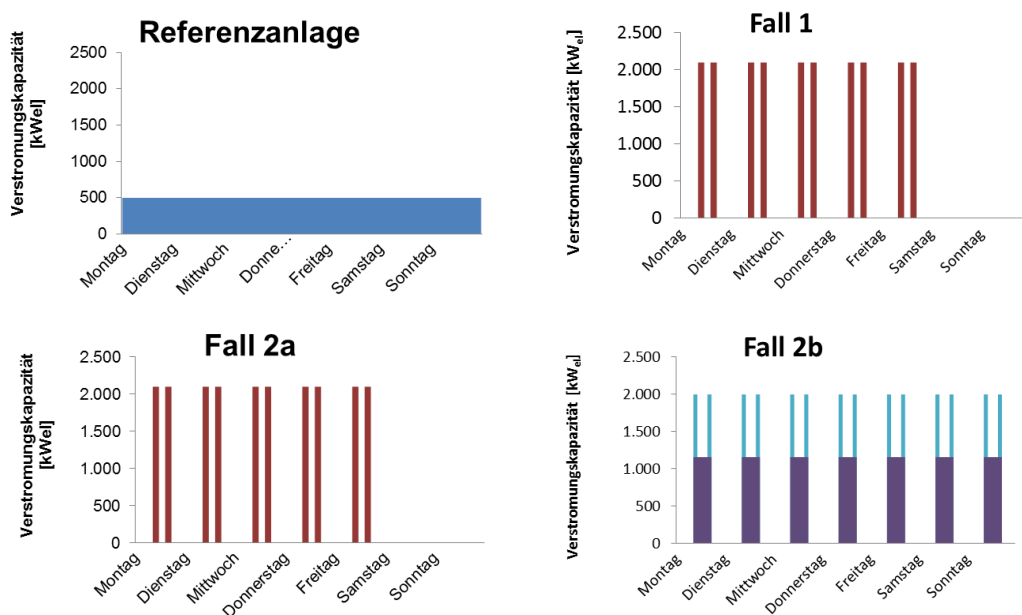


Abbildung 47: Verstromungsfahrplan der einzelnen Anlagenkonzepte im Laufe einer Woche

Erklärung: Die Variation in 2b resultiert aus den Annahmen einer hohen und geringeren Flexibilität der Gasproduktion.

Die Ergebnisse der ökonomischen Analyse der untersuchten Anlagenkonzepte zur flexiblen Verstromung sind in Tabelle 20 aufgezeigt. Betrachtet wurden nur die durch die flexible Verstromung erzielten Mehrerlöse und die erforderlichen Investitionen in die Erweiterung der Anlage für den flexiblen Verstromungsbetrieb sowie die durch den veränderten Betrieb geänderten betriebs-, bedarfsgebundenen und sonstigen Kosten. Die Kosten für die Ersatzinvestition in das schon bestehende BHKW bzw. den bestehenden Gasspeicher wurden nicht berücksichtigt, weil diese auch ohne die Investition in den flexiblen Anlagenbetrieb anfallen würden. Die Wirkungsgradsteigerung bei der Installation von Verstromungsüberkapazitäten führt dazu, dass Anlagen weniger Substrateinsatz haben, um die gleiche Verstromungsleistung zu erzielen wie eine Referenzanlage mit Grundlastverstromung und einem kleineren BHKW. Die Betriebskosten sind daher durch die Einsparung von Substratkosten bei allen flexiblen Anlagenkonzepten negativ (weil Einsparung gegenüber Referenzbetrieb).

Es ist ersichtlich, dass die Anlage mit kontinuierlicher Gasproduktion und einer ausschließlichen Entkopplung der Gasproduktion vom Gasverbrauch mittels zusätzlicher Gasspeicherkapazität (Fall 1) eine positive Annuität in Höhe von 619 €/a erzielt. Die an die Investition gestellten Erwartungen, Verzinsung des eingesetzten Kapitals, Entlohnung der Arbeit etc. wurden erfüllt. Ein Investor würde sich für die Investition in die Erweiterung der Anlage entscheiden.

Die Anlage mit flexibler Gasproduktion (Fall 2a) und Verstromungsflexibilität (Erlösen) wie in Fall 1 profitiert von den reduzierten Investitionskosten bei der Anlagenerweiterung und erzielt eine im Vergleich zu Fall 1 höhere Annuität. Sollten sich die unterstellten, und in den Versuchen als umsetzbar erwiesenen, Einsparungen der Gasspeicherkapazität auch im kommerziellen Betrieb als belastbar erweisen, würde die flexible Gasproduktion zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit führen.

Im Fall 2b wurde der bestehende Gasspeicher der Modellanlage nicht erweitert (keine Investitionskosten hierfür erforderlich). Jedoch konnte damit nicht ganz die Verstromungsflexibilität wie in Fall 1 und 2a erzielt werden. Dies macht sich in den erzielbaren Erlösen am Strommarkt bemerkbar. Ebenfalls sind die Erlöse durch Regelenenergiebereitstellung reduziert. Trotzdem erzielt das Anlagenkonzept mit 63 T€/a die höchste Annuität und stellt damit für den Anlagenbetreiber/Investor den, unter den hier unterstellten Rahmenbedingungen, vorzüglichsten Fall dar.

Tabelle 20: Annuität der untersuchten Anlagenkonzepte zur flexiblen Verstromung

Investitionskosten in €	Fall 1	Fall 2a (hoch)	Fall 2a (gering)	Fall 2b (hoch)	Fall 2b (gering)
BHKW-Anschaffungskosten - durch Flexibilisierung verursacht	718.673	718.673	718.673	674.915	607.088
Verstärkung Netzanschluss	56.499	56.499	56.499	41.499	41.499
Gaslagererweiterungen	335.110	172.615	253.529	0	0
Erweiterung Peripherie	177.216	177.216	177.216	56.742	53.051
Genehmigungen, Umweltgutachten	9.500	9.500	9.500	9.500	9.500
Anlagenzertifikat > 1 MWel Mittelspannungsrichtlinie 2014	13.000	13.000	13.000	13.000	13.000
Planung und Genehmigung	65.500	57.375	61.421	39.783	36.207
Wärmespeicher	105.000	105.000	105.000	85.000	85.000
Rückbau	69.625	61.500	65.546	42.908	39.332
Invest, gesamt	1.550.122	1.371.378	1.460.383	963.346	884.676
Jährliche Kosten und Einnahmen in €/a					
Kaptialgebundene Kosten	108.200	84.939	96.522	37.535	36.124
Betriebsgebundene Kosten	65.283	61.897	63.583	52.181	47.157
Bedarfsgebundene Kosten	-13.970	-13.970	-13.970	-13.970	-13.970
Sonstige Kosten	16.152	14.289	15.217	10.038	9.218
Kosten, gesamt	175.665	147.155	161.352	85.783	78.528
Zusatzerlös Strom	24.784	24.784	24.784	19.410	14.259
Erlös Regelenenergie	15.000	15.000	15.000	10.000	10.000
Flexprämie	136.500	136.500	136.500	120.000	78.000
Erlöse, gesamt	176.284	176.284	176.284	149.410	102.259
Annuität	619	29.129	14.933	63.627	23.731

Legende: Fall 1: kontinuierliche Gasproduktion und Gasspeichererweiterung

Fall 2a: flexible Gasproduktion, reduzierte Gasspeichererweiterung, Verstromung wie in Fall 1

Fall 2b: flexible Gasproduktion, keine Gasspeichererweiterung, geringere Flexibilität der Verstromung geg. Fall 1 und 2a

3.4 Praxisbeispiel: Flexible Gasproduktion im kommerziellen Anlagenbetrieb

Die Möglichkeit der flexiblen Stromproduktion von Biogasanlagen ist ein großer Vorteil gegenüber anderen Erneuerbaren Energien wie Windkraft und Solarenergie, da sie bedarfsgerecht abgerufen werden kann und nicht allein von meteorologischen Gegebenheiten abhängt. Für Betreiber von Biogasanlagen stellt die Flexible Verstromung sowie das Angebot von Regelleistung eine Möglichkeit dar, zusätzliche Einnahmen zu generieren, indem sie die Stromproduktion in Hochpreiszeiten verlagern. Diese sind im Regelfall werktags zu erzielen. Nachts und an den Wochenenden hingegen sind die Börsenpreise für den Strom geringer (vgl. Kapitel 2.4.2).

Wie können Biogasanlagenbetreiber diese Hochpreisphasen ausnutzen und welche Bedingungen müssen sie dafür erfüllen? Die Verlagerung in Hochpreiszeiten ist mit einigen Tücken versehen und Anlagenbetreiber müssen sorgfältig prüfen, ob es technisch möglich ist, ausschließlich während der Hochtarifphasen Strom zu produzieren. Sie müssen dabei berücksichtigen, dass ihre Gasspeicher dafür ausreichend dimensioniert sind, um die Gasproduktion mehrerer Tage aufnehmen zu können. Außerdem muss ausreichend flexible Motorleistung (elektrische Überkapazität) zur Verfügung stehen, mit der das gespeicherte Gas letztendlich verstromt wird. Eine naheliegende Optimierungsmöglichkeit für Anlagenbetreiber besteht in der bedarfsgerechten Gaserzeugung und damit verbunden in der Flexibilisierung der Anlagenfütterung.

Um eine Biogasanlage bedarfsgerecht zu füttern, muss der Betreiber genaue Kenntnis über die Wirkungszeiträume der eingesetzten Substrate haben, um diese passend einzusetzen. Erhebliche Managementqualitäten des Anlagenbetreibers sind ferner Voraussetzung für eine erfolgreiche Flexibilisierung.

Die Reaktionsdauer der eingesetzten Substrate kann, abhängig von verschiedenen Faktoren, wie beispielsweise der Temperatur variieren. Mist benötigt etwa 4-6 Tage bis er sein Hauptgasertragspotential erreicht hat, Gülle hat eine Freisetzungsdauer von 4 - 5 Tagen. Eine wesentlich geringere Reaktionszeit weist Maissilage auf, sie erreicht nach 1,5 – 2 Tagen im Biogasprozess ihr volles Ertragspotential. Um kurzfristig die Gasproduktion einer Biogasanlage zu erhöhen, eignen sich beispielsweise zerkleinerte Zuckerrüben, sie sind innerhalb von 12 Stunden in der Lage ihr Hauptpotential zu entfalten (vgl. Abbildung 34). Dabei gilt, je feiner der Grad der Zerkleinerung, desto schneller erfolgt der Abbau und somit die Gasproduktion. Auch Getreide kann diesen kurzfristigen Effekt in der Gasproduktion erzielen, auch für Getreide gilt, dass das Korn für einen schnellen Aufschluss zerkleinert (gequetscht) sein muss, am geeignetsten ist daher der Einsatz von Getreideschrot.

Im Arbeitskreis „Biogas“ des Maschinenring Kommunalservice GmbH, innerhalb dessen sich Anlagenbetreiber regelmäßig zum Fachaustausch treffen, sind Stromvermarktung und flexible Biogasverstromung bereits seit mehreren Jahren ein wichtiges Thema. Diese werden in verschiedensten Varianten durch die angeschlossenen Beratungsbetriebe praktiziert.

Auch das Thema flexible Fütterung im Zusammenhang mit der bedarfsgerechten Stromproduktion wurde in Begleitung zu dem Forschungsvorhaben von Biogasanlagenbetreibern aus dem Beratungsring in den letzten Jahren zum Teil schon umgesetzt. Als Beispiel wird im Folgenden die Anlage von Herrn Gerhard Buckert in Fürstenberg-Lichtenfels beschrieben (siehe Abbildung 48).

3.4.1 Anlagenbeschreibung Biogasanlage „Biogas Weidenhof Buckert GbR“



Abbildung 48: Biogasanlage „Biogas Weidenhof Buckert GbR“ mit flexibler Gasproduktion von Herrn Buckert (Bildquelle: MR GmbH Kassel)

Die Biogasanlage ist einem landwirtschaftlichen Betrieb mit Milchkühen sowie eigener Nachzucht und Futterbau angeschlossen. Die 120 Milchkühe sind in einem Boxenlaufstall mit Spaltenboden aufgestellt, die weibliche Nachzucht (30 Kälber, 40 Färsen, 50 Jungrinder) ist in einem Tiefstreustall untergebracht. Zusätzlich nimmt der Betrieb Gülle und Mist von 42 umliegenden Betrieben zur Vergärung in der Biogasanlage auf. Diese Gegebenheiten stellen eine wichtige Konstante in der Verfügbarkeit der Substrate für die Biogasanlage dar und können daher nur in geringem Maß zur Steuerung der Gasproduktion begrenzt werden.

Die bei der Verstromung anfallende Abwärme wird zum Beheizen der Biogasanlage (Gärbehälter), des Wohnhauses, des Büros und der Warmwasserbereitung der Melkanlage genutzt. Außerdem wird eine Containertrocknung mit vier Stellplätzen damit betrieben.

Anlagenbeschreibung:

- Biogas Weidenhof Buckert GbR
- Inbetriebnahme der Anlage: Oktober 2010
- Anlagenhersteller: Bauherrenmodell Maschinenring Kommunalservice GmbH
- Fermenter: 1.200 m³, isoliert, beheizt, 2 BioBull-Rührwerke, Tragluftdach
- Nachgärer 1: 1.200 m³, isoliert, beheizt, 1 Tauchmotorrührwerk, Tragluftdach
- Nachgärer 2: 3.800 m³, isoliert, beheizt, 2 Tauchmotorrührwerke, Tragluftdach
- Gasspeichervolumen: 1.459 m³

Installierte elektrische Leistung:

- 190 kW Gas-Otto-Motor der Firma Kuntschar & Schlüter
- 200 kW Gas-Otto-Motor der Firma Kuntschar & Schlüter
- 360 kW Gas-Otto-Motor der Firma 2G

3.4.2 Beschreibung des Verstromungsbetriebs

Der Anlagenbetreiber hat bei seinem Stromhändler die Prognose abgegeben (roter Graph in Abb. 1), dauerhaft 360 kWh Strom zu erzeugen, dazu fährt das 360 kW BHKW der Firma 2G konstant Vollast. Zusätzlich hat der Anlagenbetreiber dem Stromhändler prognostiziert montags bis samstags von 8 – 12 Uhr zusätzliche Leistung von 190 kW zu erzeugen, da in dieser Zeitscheibe der Strompreis höher ist. An Sonntagen stellt die Anlage, aufgrund der geringen Strompreise, keine zusätzliche Leistung für den Strommarkt zur Verfügung und fährt Grundlast.

Neben dem Tarif „Handelsflex“, in dem die Verstromungskapazität des 190 kW_{el} und 200 kW_{el} BHKW-Blocks zu Hochpreiszeiten vermarktet wird, erbringt die Anlage auch negative Sekundärregelleistung. Für letzteres wird das 360 kW_{el} Grundlast BHKW durch den Stromhändler zeitweise heruntergeregelt. Diese Regelintervalle dauern einige Minuten bis hin zu einigen Stunden.

3.4.3 Fütterungsmanagement und flexible Gasproduktion

Einen hohen Anteil an der Fütterungsration haben die täglich anfallenden Substrate Mist und Gülle. Aufgrund des kontinuierlichen Anfalls wird die tägliche Güllezufuhr konstant bei 11 m³/d gehalten und nicht zur Flexibilisierung der Gasproduktion eingesetzt. Betrachtet man eine in Tabelle 21 dargestellte Wochenration der Biogasanlage, ist ersichtlich, dass montags, dienstags und freitags die größten Mistmengen gefüttert werden. Durch diese Verteilung und die Eigenschaft des Mistes sein Hauptgaspotential nach 4 - 6 Tagen zu entfalten, eignet sich dieses Substrat, gemeinsam mit der eingesetzten Gülle, gut als Grundlage für die Gasproduktion. Der Anlagenbetreiber reguliert die Gasproduktion zusätzlich über die Fütterung von Maissilage. Diese benötigt etwa 1,5 – 2 Tage im Vergärungsprozess, bis sie ihr volles Ertragspotential erreicht. Daher wird Maissilage verstärkt ab Samstag eingesetzt, damit sie bis zur geplanten Leistungserhöhung am Montagmorgen aufgeschlossen ist und Gas daraus produziert wird. Die erhöhte Fütterung der Maissilage bis dienstags ermöglicht es am Mittwoch und Donnerstag die Mengen der Maissilage und der Zuckerrüben zu reduzieren um die entstandene Gasmenge bedarfsorientiert zu verstromen. Ab Samstag wird dann neben der Maissilage auch die Fütterungsmenge der Zuckerrübe wieder erhöht um auf einen hohen Gasfüllstand am Wochenanfang hinzuwirken.

Die Zuckerrüben in der Ration eignen sich für die kurzfristige Regulierung der Gasproduktion und sind ein wichtiger Faktor zur Verbesserung der Viskosität des Gärsubstrates, was aufgrund der hohen eingesetzten Mistmenge bei der Anlage erforderlich ist.

Die Erfahrung der Anlage und weiterer Anlagenbetreiber hat gezeigt, dass eine kontinuierliche Optimierung der Fütterung der Biogasanlage erforderlich ist, auch um auf geänderte Anforderungen (Änderung des Substratanfalls bzw. des Stromfahrplans) zu reagieren.

Tabelle 21: Auszug aus dem Fütterungstagebuch der Biogasanlage

Datum	Wochentag	Rinder- mist to/ d	Rinder- gülle m ³ /d	Mais- silage to/ d	Zucker- rüben to/ d
29.01.2018	Montag	23,1	11	6,6	6,2
30.01.2018	Dienstag	20	11	6,4	6,3
31.01.2018	Mittwoch	16,3	11	4,6	3,7
01.02.2018	Donnerstag	16,5	11	5	4,8
02.02.2018	Freitag	20,9	11	4,9	6,1
03.02.2018	Samstag	18,1	11	5,9	6,3
04.02.2018	Sonntag	14,6	11	6,9	6,1

Quelle: Maschinenring Kommunalservice GmbH Kassel

3.5 Lessons learned

Das Kapitel „Lessons learned“ fasst die Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb mit der flexiblen Biogasproduktion, die im Laufe der Vorhabenslaufzeit gesammelt wurden, zusammen. Basierend auf diesen wurde eine Checkliste erarbeitet, die Anlagenbetreibern bei der Umstellung auf eine flexible Biogasproduktion eine Hilfestellung gibt.

3.5.1 Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb

Soll die flexible Gasproduktion in den kommerziellen Anlagenbetrieb überführt werden ist es erforderlich einanlagenspezifisches Konzept, welches die individuellen Gegebenheiten der Anlage berücksichtigt zu erstellen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass nicht die Biologie im Fermenter der begrenzende Faktor zur flexiblen Gasproduktion ist, sondern vielmehr das Anlagenkonzept und die Bauform des Fermenters sich auf den Erfolg einer flexiblen Gasproduktion auswirken. Daher widmet sich die folgende Sammlung von gemachten Erfahrungen während des Versuchsbetriebs überwiegend technischen Themen.

Hierbei spielt die Bauform des Fermenters mit der dazugehörigen Fütterungsform eine große Rolle. In den hier beschriebenen Versuchen konnte festgestellt werden, dass Substrate wie Zuckerrüben (als ganze Rübe) und Festmist bei getrennter Fütterung Probleme im Feststoffdosierer bzw. in den Schnecken hervorrufen können. So kam es in den Versuchen zu Problemen bei der Fütterung durch Brückenbildung im Substratdosierer und durch Verstopfungen in der Schnecke. Andere Substrate wie Silphie führten im Feststoffdosierer, bei einer Häcksellänge von ca. 4 mm, zu keinen Problemen. Allerdings können diese, bei zu hohem Anteil an der gesamten Fütterung und gleichzeitiger flüssiger Fütterung in Bodennähe des Fermenters, zu Ablagerungen im Fermenter führen. Daher wäre für die Beschickung der Anlage mit Silphie eine Fütterung mittels Stopfschnecke besser geeignet. Für den Einsatz von faserigen Biomassen, wie Silphie oder Gras, ist auch die im Fermenter installierte Rührtechnik von Bedeutung. Die Nutzung eines Schnellläufers im Fermenter hilft, um abgesetztes Substrat oder Schwimmschichten vorzubeugen,.

Neben der Bauform und der Fütterungseinrichtung spielt auch die Weiterleitung des Substrates vom Fermenter zum Nachgärer eine wichtige Rolle. Hierbei geht es um die Nutzung einer Pumpe als Fördermittel oder den Einsatz eines automatischen Überlaufes. An dem Hochfermenter der Forschungsbiogasanlage ist zum Beispiel eine Stoßfütterung nur begrenzt möglich, da durch eine solche erhebliche Mengen frisch gefüttertes Substrat unvergoren (im Kurzschluß) in den Nachgärer überfließen würden. Im Vorfeld einer jeden Stoßfütterung müsste deshalb der Füllstand im Behälter, sofern möglich, abgesenkt werden. Im Falle eines flachen und breiten Fermenters ist eine Stoßfütterung einfacher möglich, da in dieser Bauform die Problematik der Substratabsenkung durch die größere Grundfläche des Fermenters reduziert ist.

Eine weitere wichtige Komponente ist die Überdrucksicherung an der Anlage. Wie an der Forschungsbiogasanlage auch werden an vielen Biogasanlagen Überdrucksicherungen mit einem maximalen Überdruck von ca. 3,5 mbar genutzt. Durch die dynamische Fütterung kommt es vor allem in den Rührzeiten, durch die dadurch gestiegene Gasfreisetzung, zu temporär höheren Drücken in Fermenter mit fester Decke. Wodurch die Installation einer Überdrucksicherung, die temporär höhere Drücke zulässt, erforderlich wird.

3.5.2 Checkliste – flexible Gasproduktion in der Praxis

Aus den Erfahrungen aus dem Versuchsbetrieb ist nachfolgend eine kurze Checkliste erarbeitet, die kommerziellen Anlagenbetreibern bei der Umstellung auf eine flexible Gasproduktion, sowie weitere Forschungsarbeiten an dem Thema unterstützen soll:

Analagentchnik:

- Ist der Gasspeicher für einen flexiblen Betrieb geeignet und für den Verstromungsfahrplan ausreichend groß?
- Ist das Substratbeschickungssystem im Falle einer Substratumstellung geeignet?
- Können die verschiedenen Substrate technisch unproblematisch über denselben Feststoffdosierer zugeführt werden oder gibt es separate Dosierer?
- Ist das Beschickungssystem auch für größere Tagesmengen ausgelegt?
- Ist die Rührwerkstechnik für größere Substratstöße ausgelegt?
- Wie präzise kann der Gasspeicherfüllstand / die Gasproduktionsrate erfasst werden?
- Kann es bei hohen zugegebenen Biomassemenigen in kurzer Zeit (Stoßbelastung) zu Kurzschlussströmen beim Überlauf in den Nachgärer kommen?

Prozessführung, Arbeitsabläufe:

- Sind Stoßbelastungen möglich (nur relevant im Falle einer erwünschten Tagesflexibilität)?
- Sind verschiedene Substrate zur Erstellung eines, für die flexible Gasproduktion, optimierten Fütterungsplan vorhanden?
- Ist die Substratverfügbarkeit gewährleistet? Sind, abhängig vom Substratmix, Möglichkeiten zur Induktion von Antischaummitteln vorhanden?
- Ist die Anlagenfütterung über ein Wochenprogramm steuerbar?
- Welche Möglichkeiten bestehen kontinuierlich anfallende Substrate zwischenzulagern?
- Passen die geänderten Arbeitsabläufe in das Betriebskonzept (z.B. Arbeitsspitzen unter der Woche durch höheren Monitoringaufwand – Entlastung an den Wochenenden)?

Prozesskontrolle:

- Ist eine regelmäßige labortechnische Betreuung möglich?
- Wird die Gasqualität regelmäßig kontrolliert?
- Ist eine behälterindividuelle Erfassung möglich des Biogasvolumenstroms möglich?

Wirtschaftlichkeit:

- Sind mögliche Mehrerlösen durch den flexiblen Betrieb mit einem erfahrenen Stromvermarkter abgestimmt und den Kosten für die Flexibilisierung gegenübergestellt?
- Wurden Unsicherheiten bei der Erfassung des Gasspeicherfüllstands und des Gasverlagerungspotentials berücksichtigt?
- Ist die Annuität bei einer wirtschaftlichen Abschätzung ausreichend zur Entlohnung der Arbeitskraft und Verzinsung des eingesetzten Kapitals?

4 Zusammenfassung der wesentlichen Projekterkenntnisse

Das Forschungsvorhaben „Upgrading von Bestandsbiogasanlagen hin zu flexiblen Energieerzeugern durch eine bedarfsorientierte Dynamisierung der Biogasproduktion – UBEDB“ untersuchte im Zeitraum von 01.07.2015 bis 28.02.2018 die Möglichkeiten durch ein gezieltes Fütterungsmanagement, mit im landwirtschaftlichen Umfeld anfallenden Substraten, die Biogasproduktion ohne großen technischen Zusatzaufwand dem Strombedarf anzupassen. Hierfür wurden zu Beginn des Vorhabens theoretische Verstromungsprofile erstellt, die als Grundlage für die bedarfsorientierte Gasproduktion, erst im Labor, dann in der Praxis dienen.

Dabei wurden im Labor insgesamt 6 verschiedene Substratzusammensetzungen mit 9 verschiedenen Substraten über einen Zeitraum von jeweils ca. 3 Monaten erprobt. Die Substratvariationen mit den vielversprechendsten Ergebnissen sollten anschließend in den Versuchsbetrieb an der großtechnischen Versuchsanlage am Forschungsstandort überführt werden. Die ursprünglich geplanten 6 Monate großtechnischer Versuchslaufzeit für die flexible Biogasproduktion wurden auf 8 Monate erweitert. Damit die Biozönose im Fermenter zwischen der Versuchsdurchführung der 3 erprobten, unterschiedlichen Substratzusammensetzungen einen Zeitraum von jeweils 4 Wochen hatte, um sich an die neuen Substrate zu gewöhnen. Dabei wurden im landwirtschaftlichen Umfeld anfallende Substrate, wie Rinderfestmist, Getreideschrot, Zuckerrüben und Silphie (siliert) eingesetzt und mit den an Biogasanlagen weit verbreiteten Substraten Maissilage, Schweine- und Rindergülle vervollständigt. Auf Grund der mengenmäßig knappen Verfügbarkeit der im Labor eingesetzten Ackerwildkräuter und Zwischenfrüchte, konnten diese nicht für den großtechnischen Betrieb genutzt werden.

Die Ergebnisse der flexiblen Biogasproduktion (Kapitel 3.1 und 3.2) zeigten sowohl im Labor als auch an der großtechnischen Anlage, dass entsprechend des unterstellten Verstromungsfahrplans, dessen wesentliches Flexibilitätskriterium eine Verstromungspause (Zeit ohne Gasbedarf, trotz fortlaufender Produktion) von 60 h übers Wochenende ist, eine deutliche Einsparung in der zur Überbrückung dieses Zeitraums erforderlichen Gasspeicherkapazität erzielt werden konnte. Dabei belegten die Versuchsergebnisse die von Mauky et al. und Mulat et al. [35, 36] mit anderen Substraten im großtechnischen Maßstab bereits erzielten Versuchsergebnisse und übertrafen diese hinsichtlich der erreichten Flexibilität zum Teil sogar. So konnten in den großtechnischen Versuchen durch die Verschiebung der Gasproduktion in die Verstromungszeiten an den Wochentagen von bis zu 8:2 (Wochentage zu Wochenende) knapp 50 % des Gasspeicherbedarfs gegenüber einem Betrieb mit kontinuierlicher Gasproduktion eingespart werden. Wie auch durch Barchmann et al. [30] festgestellt, würde dies eine Einsparung von bis zu 50 % der erforderlichen Investitionen in die Gasspeichererweiterung gegenüber einem Anlagenbetrieb mit kontinuierlicher Gasproduktion bedeuten.

Die ökonomische Analyse zeigte, aufbauend auf den erzielten Versuchsergebnissen, dass die Einsparung in Gasspeicherkapazitäten gegenüber einem Betrieb mit gleicher Verstromungsflexibilität aber kontinuierlicher Gasproduktion, durch die vermiedenen bzw. reduzierten Investitionskosten in die Erweiterung der Gasspeicherkapazitäten zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit führen. Darüber hinaus erlaubt die flexible Gasproduktion auch, bei entsprechender Erweiterung der Verstromungskapazitäten, eine flexible Verstromung ohne Erweiterung des Gasspeichers. In dem in diesem Bericht vorgestellten Fall einer Biogasanlage mit $500 \text{ kW}_{\text{el}}$ P_{Bem} erzielte dieser Fall die höchste Annuität und wäre für Anlagenbetreiber die attraktivste Option.

Damit konnten die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zeigen, dass eine flexible Biogasproduktion mit einem breiten, im landwirtschaftlichen Umfeld anfallenden Substratspektrum ohne große weitere Investitionen in z.B. Desintegrationstechnologien etc. prinzipiell möglich ist und bei entsprechend vorhandenem, nutzbarem Gasspeichervolumen auch auf die Gasspeichererweiterung verzichtet werden kann. Jedoch stellte sich bei der Versuchsdurchführung auch dar, dass das an der Anlage vorhandene Einbringsystem auch zu der Biomasse passen muss. So müssen z.B. der Überlauf in den Nachgärbehälter zur Vermeidung von sogenannten „Kurzschlussströmen“ kontrolliert erfolgen die Einstellung der Überdrucksicherung angepasst werden und eine etwaige Schaumbildung beim Einsatz von schnell abbaubaren Substraten (z.B. Getreideschrot), bei der Umstellung auf eine flexible Biogasproduktion beachtet werden.

Für die Praxis bedeutet dies, dass neben der Prüfung und ggf. Anpassung von Verstromungsaggregaten und Gasspeicherkapazitäten vor allem auch die Einbringtechnik auf die hierfür notwendige Schlagkräftigkeit

geprüft werden muss. Ggf. ist auch die Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Rührwerkstechnik dabei zu prüfen, denn die Einbringung großer Mengen Substrat fordert diese zusätzlich heraus. Flüssigeinbringungstechniken sind hier vermutlich am geeignetsten, da sie bereits für eine weitgehende Einmischung und Verteilung der Substrate im Fermenter sorgen.

Die in den Laborversuchen sowie z.T. auch in der Versuchsbiogasanlage eingesetzten Substrate unterschieden sich erwartungsgemäß hinsichtlich ihrer kinetischen Parameter in der Biogasproduktion. Aus Anbausicht ökologisch vorteilhafte Substrate wie Klee gras-Luzerne, Silphie und Wildpflanzenmischungen wiesen zwar insgesamt geringere Abbaugeschwindigkeiten auf, als die Referenz Mais. Dennoch konnten in allen Szenarien ähnliche Einsparungspotentiale erreicht werden. Dieses Ziel wurde durch die entsprechend Anpassung der Fütterungsstrategie an die Kinetik des Substrates erreicht. Anhand wenig flexibel erscheinender Substrate wie Mist, heterogen abgereifter Wildpflanzensilage und anderen konnte in den durchgeführten Versuchen gezeigt werden, dass die Flexibilisierung der Biogasproduktion im Wochengang weniger vom Substrat, als vielmehr von der geschickten Planung der Fütterung abhängt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] HAHN, H. ; HOLZHAMMER, U. ; GERHARDT, N. ; KIRCHNER, D. ; KRAUTKREMER, Bernd: *Effects of balancing the residual load with flexible biogas plants on the energy system and operation of fossil power plants (Effekte des Ausgleichs von Stromdefiziten durch Biogasanlagen.)* (2014)
- [2] HOLZHAMMER, Uwe ; NELLES, Michael ; SCHOLWIN, F.: Flexible Stromerzeugung aus Bioenergie - Ein relevanter Beitrag zum Gelingen der Energiewende? Auswirkungen einer flexiblen Stromproduktion aus Bioenergie auf den konventionellen Kraftwerkspark. In: *7. Rostocker Bioenergieforum*.
- [3] HOLZHAMMER, Uwe Abraham (2015): *Biogas in einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur mit hohen Anteilen fluktuierender Erneuerbarer Energien*. Rostock : Universität Rostock
- [4] HARTMANN, K. ; BOFINGER, S. ; BRAUN, M. ; COSTA GOMEZ, C. ; DANIEL-GROMKE, J. ; GERHARDT, N. ; JENTSCH, M. ; KIRCHNER, D. ; REIMANN, T. ; SAINT-DRENAIN, Y-M ; SCHUMACHER, B. ; SCHÜNEMEYER, F. (2010): *Die Rolle des Stromes aus Biogas in zukünftigen Energieversorgungsstrukturen*. URL http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/Berichte_Projektdatenbank/2223008_Endbericht.pdf – Überprüfungsdatum 2013-02-20
- [5] HAHN, Henning (Hrsg.); SCHÜNEMEYER, Frank (Hrsg.): *Möglichkeiten der bedarfsorientierten Bereitstellung von Biogas durch eine steuerbare Biogasproduktion - Überblick über den Stand der Technik und zukünftige Möglichkeiten*. 1. Auflage 2011, 2011
- [6] HAHN, Henning ; KRAUTKREMER, Bernd ; HARTMANN, Kilian ; WACHENDORF, Michael (2014): *Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation*. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, S. 383–393
- [7] MAUKY, Eric ; JACOBI, H. Fabian ; LIEBETRAU, Jan ; NELLES, Michael (2015): *Flexible biogas production for demand-driven energy supply – Feeding strategies and types of substrates*. In: *Bioresource Technology* 178, S. 262–269
- [8] MAUKY, Eric ; KRETZSCHMAR, J. ; PRÖTER, J. ; HIEBER, H. ; STOLLBERG, B. ; FRITZSCH, M. ; WERMUTH, G.: *OptiMand – Optimierter Einsatz von Mühlennachprodukten zur bedarfsgerechten Bioenergieproduktion durch innovative Überwachungs-, Mess- und Regelungsmethoden* (2017)
- [9] SONNLEITNER E.: *Fütterungsmanagement zur Erlössteigerung der bedarfsorientierten Stromproduktion : 4. VDI-Fachkonferenz Bedarfsorientierte – Stromerzeugung aus Biogas und Biomethan* (2014)
- [10] GANAGIN, W. ; HAHN, H. ; LOEWEN, A. ; NELLES, M.: *Flexible Biogasproduktion durch technische und prozessbiologische Verfahrensanpassung*. : *Biogas Innovationskongress* (2014)
- [11] HAHN, Henning ; GANAGIN, W. ; LOEWE, K.: *Regelung der Gasproduktion von Biogasanlagen (ReBi) für eine bedarfsorientierte Biogasbereitstellung zur flexiblen Verstromung*, KTBL-Schrift 501. In: *Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven*, S. 382–384
- [12] WEINRICH, Soren (2018): *Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen: systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM 1)*. In: *Dissertation, Universität Rostock*
- [13] BATSTONE, D.J., KELLER, J., ANGELIDAKI, I., KALYUZHNYI, S.V., PAVLOSTATHIS, S.G., ROZZI, A. (2002): *Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1)*. Scientific and Technical Report No. 13. In: *IWA Publishing*,

London

- [14] KTBL (2017): *Biogasrechner*. URL
<http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do?zustandReq=1&selectedAction=showMona#start> –
 Überprüfungsdatum 2018-01-30
- [15] WEIß, Jürgen ; PABST, Wilhelm ; STRACK, Karl Ernst ; GRANZ, Susanne (2005): *Tierproduktion*. 13. Aufl.
 Stuttgart : Parey Verlag
- [16] CZEPUCK, Katharina ; DR. OECHSNER, Hans ; SCHUMACHER, Britt ; LEMMER, Andreas (2006):
Biogasausbeuten im Labor im Vergleich zur rechnerischen Abschätzung, Nr. 2. URL
<https://www.landtechnik-online.eu/ojs-2.4.5/index.php/landtechnik/article/viewFile/2006-2-082-083/1797>
 – Überprüfungsdatum 2017-09-15
- [17] LFL (2015): *Gruber Tabelle zur Fütterung der Milchkühe, Zuchtrinder, Schafe, Ziegen* –
 Überprüfungsdatum 2017-09-15
- [18] LLH, CORELL, Jean: *Ernteschnitlänge Silphie*. Telefonat. 2018-01-30. Lena Vogel (Adressat)
- [19] LANDESBETRIEB HESSISCHES LANDESLABOR (Hrsg.): *Prüfmethoden* (2017)
- [20] VDI (2002): *Economic Calculation System for Capital Goods and Plants. Guideline 6025 of the Verein Deutsche Ingenieure*. Berlin, Germany : Beuth
- [21] VDI (2012): *Economic efficiency of building installations. Fundamentals and economic calculation. Guideline 2067 of the Verein Deutsche Ingenieure*. Berlin, Germany : Beuth
- [22] KTBL (2017): *Biogasrechner*. URL
<http://daten.ktbl.de/biogas/startseite.do?zustandReq=1&selectedAction=showMona#start> –
 Überprüfungsdatum 2018-01-30
- [23] DÖHLER, Helmut ; ET AL. (2013): *Faustzahlen Biogas*. 3. Ausg. Darmstadt : KTBL
- [24] ASUE - ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR SPARSAMEN UND UMWELTFREUNDLICHEN ENERGIEVERBRAUCH E.V.
 (Hrsg.): *BHKW-Kenndaten 2014/2015* (2014)
- [25] LFL: *Biogasausbeuten Datenbank*. URL
http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=32%2Cb&anker0=substratanker#substratanker –
 Überprüfungsdatum 2.2018
- [26] FACHVERBAND BIOGAS E.V. (Hrsg.): *BiogasJournal : Biomassepreise 2016*. 3. Aufl. (2017)
- [27] STELZER, M. (Mitarb.); KRAUSE, Thomas (Mitarb.) : *Marktpreiserhebung für Wärmespeicher im Auftrag des KTBL : unveröffentlicht* (2014)
- [28] PERSÖNLICHE MITTEILUNG: *Expertengespräch Stromgestehungskosten Biogasanlagen, Teilnehmer: TLL, LfL, DBFZ, TH Ingolstadt, FvB e.V., StMwi Bayern, Südwestbank, MUEEF Saarland, Götz Agrardienst, Biogas Aelerheim*. 4/2017. (Adressat)
- [29] *Fachgespräch Kleingülle Biogasanlage*. mündliche Mitteilung. 11/2017. (Adressat)
- [30] BARCHMANN, Tino ; MAUKY, Eric ; DOTZAUER, Martin ; STUR, Mathias ; WEINRICH, Sören ; JACOBI, H. Fabian ; LIEBETRAU, Jan ; NELLES, Michael (2016): *Erweiterung der Flexibilität von Biogasanlagen* –

Substratmanagement, Fahrplansynthese und ökonomische Bewertung. 233–251 Seiten /

LANDTECHNIK – Agricultural Engineering, Bd. 71, Nr. 6 (2016)

- [31] HAHN, Henning ; GANAGIN, Waldemar ; HARTMANN, Kilian ; WACHENDORF, Michael (2014): *Cost analysis of concepts for a demand oriented biogas supply for flexible power generation.* In: *Bioresource Technology* 170, S. 211–220
- [32] FRAUNHOFER IEE (Hrsg.): *Marktpreisanalyse Biogasspeicher* (2014)
- [33] MAUKY, Eric ; JACOBI, H. Fabian ; LIEBETRAU, Jan ; NELLES, Michael (2015): *Flexible biogas production for demand-driven energy supply : Feeding strategies and types of substrates.* In: *Bioresource Technology*, Nr. 178, S. 262–269
- [34] MAUKY, Eric ; JACOBI, H. Fabian ; LIEBETRAU, Jan ; NELLES, Michael (2015): *Flexible biogas production for demand-driven energy supply : Feeding strategies and types of substrates.* In: *Bioresource Technology*, Nr. 178, S. 262–269
- [35] MAUKY, Eric ; WEINRICH, Soren ; JACOBI, Hans-Fabian ; NAGELE, Hans-Joachim ; LIEBETRAU, Jan ; NELLES, Michael (2017): *Demand-driven biogas production by flexible feeding in full-scale - Process stability and flexibility potentials.* In: *Anaerobe*
- [36] MULAT, Daniel Girma ; JACOBI, H. Fabian ; FEILBERG, Anders ; ADAMSEN, Anders Peter S. ; RICHNOW, Hans-Hermann ; NIKOLAUSZ, Marcell ; KELLY, R. M. (2016): *Changing Feeding Regimes To Demonstrate Flexible Biogas Production : Effects on Process Performance, Microbial Community Structure, and Methanogenesis Pathways.* In: *Applied and Environmental Microbiology* 82, Nr. 2, S. 438–449

ANHANG

Fütterungspläne

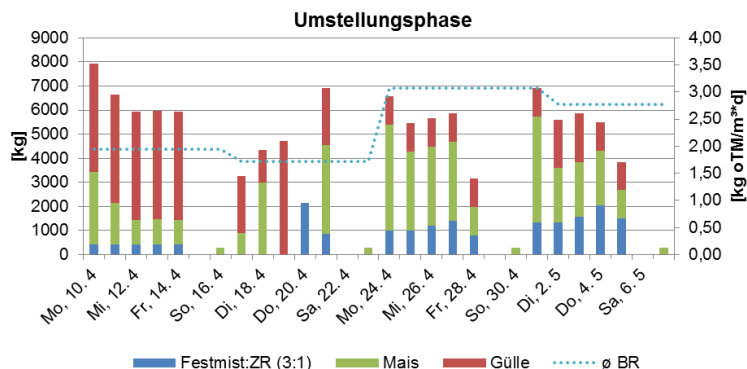


Abbildung 49: Fütterungsplan Umstellungsphase, Versuch Rinderfestmist und Zuckerrüben

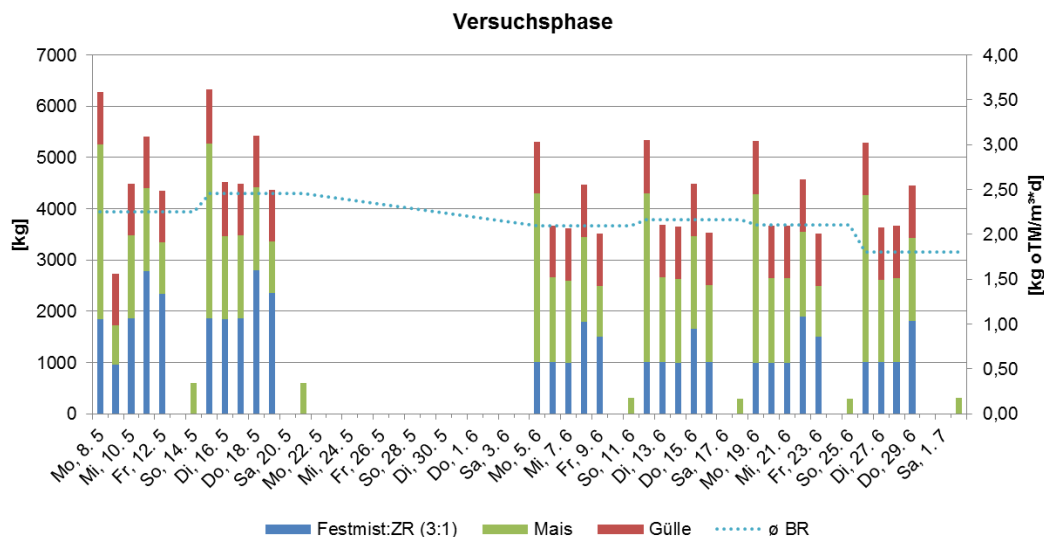


Abbildung 49: Fütterungsplan Versuchsphase, Versuch Rinderfestmist und Zuckerrüben

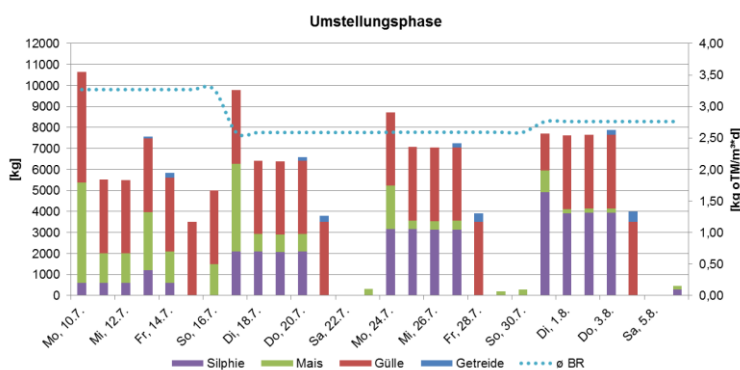


Abbildung 50: Fütterungsplan Umstellungsphase, Versuch Silphie und Getreideschrot

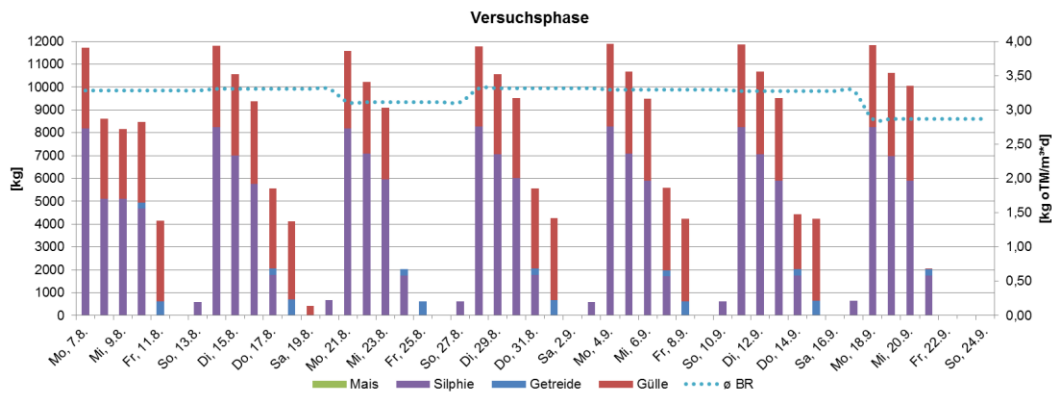


Abbildung 51: Fütterungsplan Versuchsphase, Versuch Silphie und Getreideschrot

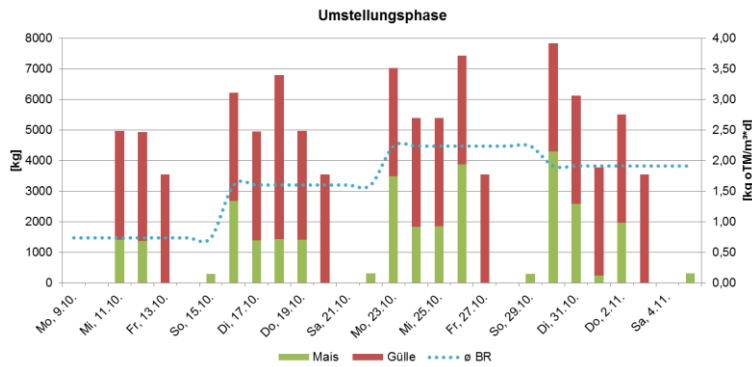


Abbildung 52: Fütterungsplan Umstellungsphase, Versuch Gülle und Maissilage

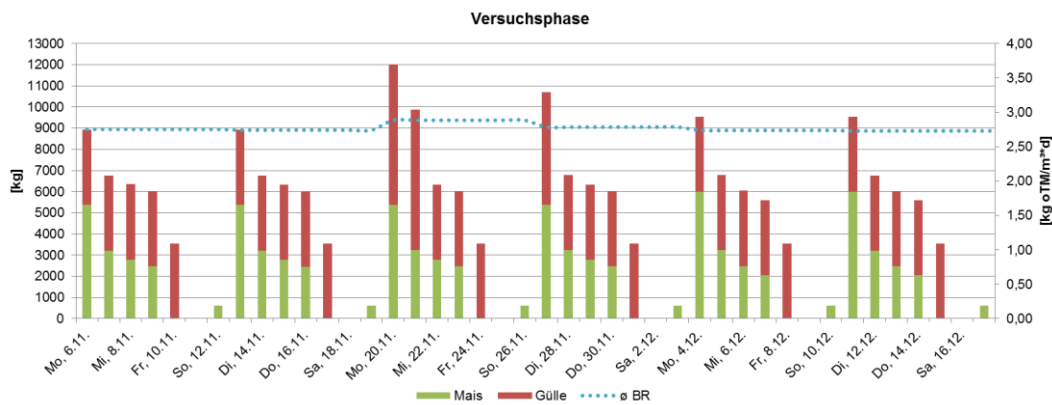


Abbildung 53: Fütterungsplan Versuchsphase, Versuch Gülle und Maissilage