

Verbundprojekt
**"Weiterentwicklung und Validierung einer Technologie zur internen
Wärmespeicherung für eine effizientere Wärmenutzung von Biogasanlagen
(ThermoFlex-WAVE)"**

Schlussbericht

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor

<p>Fördermittelgeber:</p> <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie – BMWi</p>	<p>Gefördert durch:</p> <div style="text-align: center;">  <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Energie</p> </div> <p>aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages</p>
<p>Projektträger:</p> <p>Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich GmbH Postfach 61 02 47 10923 Berlin</p>	
<p>Zuwendungsempfänger:</p> <p>bue Anlagentechnik GmbH, mit Teilvorhaben 1: „Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens, ingenieurtechnische Begleitung der großtechnischen Erprobung und Validierung“</p> <p>Thorsis Technologies GmbH, mit Teilvorhaben 2: „Anpassung der modellbasierten Regelung für die großtechnische Erprobung und Validierung des ThermoFlex-Verfahrens, Simulation von Verfahrensvarianten“</p> <p>JSW Biogas, mit Teilvorhaben 3: „Bereitstellung, Umrüstung und Anwendung einer Biogasanlage für die großtechnische Erprobung des ThermoFlex-Verfahrens“</p> <p>Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit, mit Teilvorhaben 4: „Wissenschaftliche Begleitung der Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens sowie der großtechnischen Erprobung und Validierung“</p>	<p>Förderkennzeichen:</p> <p>03KB142A</p> <p>03KB142B</p> <p>03KB142E</p> <p>03KB142D</p>
<p>Berichtszeitraum:</p> <p>von: 01.10.2018 bis: 30.09.2021</p>	
<p>Erstellt am:</p> <p>31.03.2022</p>	

Inhalt

I	Kurzdarstellung.....	4
I.1	Aufgabenstellung.....	4
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	5
I.2.1	Konsortialstruktur.....	5
I.2.2	Vorarbeiten und Expertise, die in das Vorhaben eingebracht wurden.....	6
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	7
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	10
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II	Eingehende Darstellung.....	12
II.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen.....	12
II.1.1	Teilvorhaben 1: Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens, ingenieurtechnische Begleitung der großtechnischen Erprobung und Validierung (bue Anlagentechnik GmbH).....	12
II.1.1.1	Recherche und Analyse der aktuellen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zum Einsatz des Verfahrens (AP 1.1).....	12
II.1.1.2	Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens an relevante Wärmenutzungsmöglichkeiten (AP 1.4).....	14
II.1.1.3	Detailplanungen für Integration Heizkessel oder Wärmepumpe, Integration Kurzzeit-Pufferspeicher und Gärrestlager als Wärmespeicher (AP 2.1).....	16
II.1.1.4	Übertragbarkeit des ThermoFlex-Verfahrens auf Abfallvergärungsanlagen (AP 2.6).....	19
II.1.1.5	Detailplanung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage zur Referenzanlage für das ThermoFlex-Verfahren (AP 3.1) und ingenieurtechnische Begleitung der Umrüstung (zu AP 3.6).....	19
II.1.1.6	Maßnahmen zur technischen Optimierung des ThermoFlex-Verfahrens auf der Referenzanlage (AP 4.4).....	27
II.1.1.7	Analyse möglicher Marktänderungen und Trends sowie der Entwicklung von Markthemmnissen, Aktualisierung der Markteinführungsstrategien; Validierung des Marktpotenzials sowie ökonomische und ökologische Bewertung des ThermoFlex-Verfahrens (zu AP 1.1, 3.6 und 4.5).....	30
II.1.1.8	Projektabschluss mit Auswertung der großtechnischen Erprobung an der Referenzanlage zur Validierung des ThermoFlex-Verfahrens (AP 4.6).....	38
II.1.1.9	Etablierung eines molekularbiologischen Verfahrens zur Überprüfung der Lebensfähigkeit der Mikroorganismen während des Anaerobprozesses bei thermischem Stress (Unterauftrag GMBU 190614/BIO 01).....	43
II.1.2	Teilvorhaben 2: Anpassung der modellbasierten Regelung für die großtechnische Erprobung und Validierung des ThermoFlex-Verfahrens, Simulation von Verfahrensvarianten (Thorsis Technologies GmbH).....	44
II.1.2.1	Optimierung der modellbasierten Regelung des ThermoFlex-Verfahrens und der Überwachung des biologischen Prozesses (AP 1.5).....	44

II.1.2.2	Modellierung und Simulation Beispielszenarien für Integration Heizkessel oder Wärmepumpe, Kurzzeit-Pufferspeicher und Gärrestlager als Wärmespeicher (AP 2.2)	56
II.1.2.3	Anpassung der modellbasierten Regelung an den Einsatz des ThermoFlex-Verfahrens auf Abfallvergärungsanlagen (AP 2.5)	59
II.1.2.4	Implementierung der modellbasierten Regelung für die Referenzanlage (AP 3.2) und Begleitung der MSR-technischen Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage (AP 3.5)	60
II.1.2.5	Simulation zur optimalen Verfahrensparametrierung für den laufenden Betrieb der Referenzanlage (AP 4.1)	64
II.1.3	Teilvorhaben 3: Bereitstellung, Umrüstung und Anwendung einer Biogasanlage für die großtechnische Erprobung des ThermoFlex-Verfahrens (JSW Biogas)	67
II.1.3.1	Bereitstellung und Aufbereitung Daten zur Biogasanlage und zur Wärmenutzung für die Planung der Referenzanlage (AP 1.3)	67
II.1.3.2	Definition betrieblicher Randbedingungen für eine Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage auf das ThermoFlex-Verfahren (AP 2.3)	71
II.1.3.3	Realisierung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage auf das ThermoFlex-Verfahren (AP 3.4)	72
II.1.3.4	Betriebliche Durchführung der großtechnischen Erprobung, Bereitstellung und Aufbereitung Betriebsdaten der Erprobungsphase (AP 4.4)	75
II.1.4	Teilvorhaben 4: Wissenschaftliche Begleitung der Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens sowie der großtechnischen Erprobung und Validierung (Hochschule Magdeburg-Stendal)	76
II.1.4.1	Semi-kontinuierlicher Langzeit-Gärversuch zur Temperaturtoleranz der Prozessbiologie der Referenzanlage (AP 1.2 und 2.4)	76
II.1.4.2	Wissenschaftliche Begleitung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage auf das ThermoFlex-Verfahren (AP 3.3)	85
II.1.4.3	Wissenschaftliche Begleitung der großtechnischen Erprobung (AP 4.2)	98
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	99
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	99
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses	100
II.5	Während der Durchführung des Vorhabens den ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	101
II.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	102
Literaturverzeichnis		103
Abkürzungen und Einheiten		105

I Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Bei einer flexiblen Stromproduktion von Biogasanlagen (BGA) mit hohem Wärmenutzungsgrad werden effiziente Technologien der Wärmespeicherung eine entscheidende Rolle spielen. Vor diesem Hintergrund wurde durch Projektbeteiligte in einem vorangegangenen FuE-Projekt „ThermoFlex“ - gefördert vom BMBF im Programm KMU innovativ - ein neues Verfahren entwickelt. Das ThermoFlex-Verfahren ermöglicht die Flexibilisierung von Biogasanlagen bei hohem Wärmenutzungsgrad ohne zusätzlichen Wärmespeicher. Damit lassen sich die Investitionskosten gegenüber konventionellen Systemen der Wärmespeicherung deutlich verringern. Das Verfahren basiert auf einem gezielten, geregelten Betrieb eines Nachgärsers in thermophilen Temperaturbereichen als Wärmespeicher nach einem mesophilen Fermenter. Wie durch diese Vorarbeiten für übliche Prozessbedingungen bestätigt, toleriert die Prozessbiologie der schwach belasteten Nachgärer entsprechende Temperaturvariationen.

Ausgehend von den im Vorgängerprojekt erzielten Ergebnissen, ist eine Überführung des ThermoFlex-Verfahrens in großtechnische Anwendungen vorgesehen. Hierfür waren im Vorfeld einer erfolgreichen Markteinführung umfassende FuE-Arbeiten zur Weiterentwicklung/Anpassung sowie Validierung/Erprobung des entwickelten Verfahrens erforderlich, die in dem hier beschriebenen Folgeprojekt ThermoFlex-WAVE durchgeführt wurden. Zu den wesentlichen Zielen dieses Projektes gehörten neben der Optimierung des ThermoFlex-Verfahrens und Planung von Verfahrensvarianten die Umrüstung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage zur Referenzanlage und die großtechnische Erprobung zur Validierung des ThermoFlex-Verfahrens.

Die folgende Auflistung gibt einen Überblick zu den wesentlichen wissenschaftlichen und technischen Arbeitszielen des Verbundprojekts:

1. Mit Blick auf die aktuellen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen waren die Integration des ThermoFlex-Verfahrens in moderne Nahwärmekonzepte und Kombinationsmöglichkeiten z. B. mit Spitzenlastkessel, Pufferspeicher und Wärmepumpe oder Einbeziehung von Gärrestlagern als Wärmespeicher weitergehend zu untersuchen.
2. In das Projekt integriert werden sollte eine Analyse von Markthemmnissen und von Markttrends, die Entwicklung von Markteinführungsstrategien und Validierung des Marktpotenzials des ThermoFlex-Verfahrens.
3. Durch einen weiterführenden semi-kontinuierlichen Langzeit-Gärversuch an einer höher skalierten Laboranlage sollte das Vertrauen potenzieller Anwender in die innovative Technologie erhöht werden. Dieser semi-kontinuierliche Langzeit-Gärversuch war für wesentliche Randbedingungen der Referenzanlage durchzuführen. Damit sollte die Einführung und Erprobung des Verfahrens auf der Referenzanlage insbesondere aus prozessbiologischer Sicht vorbereitet werden.
4. Das im Vorläuferprojekt nicht erreichte „Nebenziel“ einer generellen Steigerung der Substrateffizienz durch thermophile Prozessführung im Nachgärer im Vergleich zur mesophilen Betriebsweise wurde weiter anvisiert.
5. Zudem sollten die wesentlichen Aspekte des Einsatzes von ThermoFlex in der Abfallvergärung anhand einer exemplarischen Abfallvergärungsanlage herausgestellt werden.

6. Ein wesentliches Ziel des Projektes ist die Umrüstung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage als Referenzanlage für die großtechnische Erprobung des ThermoFlex-Verfahrens mit modellbasierter Regelung.

7. Anhand dieser Referenzanlage soll die großtechnische Erprobung zur Validierung des ThermoFlex-Verfahrens erfolgen, was das Hauptziel des Vorhabens darstellt. Dadurch sollen auch die praktische Anwendung des Verfahrens, inkl. Regelung, Prozessmonitoring und Wärmenutzung optimiert sowie die geplante Markteinführung - nicht zuletzt durch Steigerung der Akzeptanz - begünstigt werden.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

I.2.1 Konsortialstruktur

Die Realisierung der gesteckten Ziele erfolgte im Rahmen des Verbundprojektes „ThermoFlex-WAVE“ mit vier Teilprojekten (TP). Die beteiligten Projektpartner sind in Tabelle 1, die Teilprojekte in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 1: Projektpartner des Verbundprojektes „ThermoFlex-WAVE“

Name der Einrichtung	Kürzel	Standort
bue Anlagentechnik GmbH (Projektkoordinator)	bue	Mücheln
Thorsis Technologies GmbH	Thorsis	Magdeburg
JSW Biogas, Inh. Jörg Schulze Wext	JSW	Bergzow
Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit	HS	Magdeburg

Tabelle 2: Teilprojekte des Verbundprojektes „ThermoFlex-WAVE“

Partner	TP-Nr.	Bezeichnung des Teilprojekts
bue	TP 1	Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens, ingenieurtechnische Begleitung der großtechnischen Erprobung und Validierung
Thorsis	TP 2	Anpassung der modellbasierten Regelung für die großtechnische Erprobung und Validierung des ThermoFlex-Verfahrens, Simulation von Verfahrensvarianten
JSW	TP 3	Bereitstellung, Umrüstung und Anwendung einer Biogasanlage für die großtechnische Erprobung des ThermoFlex-Verfahrens
HS	TP 4	Wissenschaftliche Begleitung der Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens sowie der großtechnischen Erprobung und Validierung

I.2.2 Vorarbeiten und Expertise, die in das Vorhaben eingebracht wurden

Das Projekt ThermoFlex-WAVE baut auf einer Verfahrensentwicklung aus dem vorangegangenen FuE-Projekt „ThermoFlex“ auf [THE19]. Daran waren die Konsortialpartner bue, Thorsis und HS (vgl. Tabelle 1) beteiligt, die damit die entsprechende Expertise erworben hatten (siehe Kap. I.1).

Die **bue Anlagentechnik GmbH** bietet seit 2007 die Planung, Finanzierung, Errichtung, Begleitung und Wartung im Bereich der erneuerbaren Energien an. Das Unternehmen ist erfolgreich im Biogasanlagenbau tätig und liefert durchdachte Anlagenkonzepte, ausgereifte Standardlösungen für Anlagenkomponenten und solide Entwicklung von Sonderlösungen. Beratung beim Bau und Inbetriebnahme sowie biologische Betreuung komplettieren das Leistungsangebot. Die bue prüft mögliche Standorte zunächst auf ihre technische und wirtschaftliche Machbarkeit, übernimmt die Planung, Genehmigung, Ausschreibung und Errichtung der Anlagen sowie deren Finanzierung und ein anschließendes Service-Management. Repowering und Flexibilisierung von Bestandsanlagen, biologischer Service, Beratungen zur Nutzung alternativer Energiequellen sowie F&E zur Biogasanlagen-Optimierung zählen ebenfalls zum Leistungsspektrum.

Die **Thorsis Technologies GmbH** ist seit 1997 auf dem Gebiet der Industriellen Kommunikation, verteilten Automatisierung und Kläranlagensimulation tätig. Sie ist Komplettanbieter für kundenspezifische Hard- und Softwareentwicklungen und Ansprechpartner für alle Fragen der industriellen Kommunikation, verteilten Automatisierung und Prozesssimulation. In der Umwelttechnik wird im Rahmen von Studien und Projekten die Automatisierung und Betriebsoptimierung von Biogasanlagen unterstützt. Die vorhandenen Kompetenzen, sowohl zur dynamischen Simulation der Anlagen, als auch die Erfahrungen bei der Hard- und Software-Implementierung von industriellen Automatisierungslösungen, sind optimale Voraussetzungen für das Unternehmen.

Der Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit der **Hochschule Magdeburg-Stendal** entstand durch die Verbindung der beiden ehemaligen Fachbereiche Bauwesen sowie Wasser- und Kreislaufwirtschaft. In der Arbeitsgruppe „Siedlungswasserwirtschaft - Abwasser“ sind langjährige Erfahrungen auf den Gebieten der biologischen Abwasser- und Schlammbehandlung vorhanden. Es wurden große Kompetenzen zur Analytik, Optimierung und dynamischen Simulation entwickelt, die in den letzten Jahren verstärkt auf Biogasanlagen ausgedehnt wurden. Durch den Betrieb von labor- und halbtechnischen Versuchsanlagen und deren Anwendung in Forschungsprojekten werden diese Erfahrungen zusätzlich unterstützt.

Die S&W Agrar GmbH ist ein Familienunternehmen im nördlichen Sachsen-Anhalt welches seit 27 Jahren besteht. Der Hauptsitz befindet sich in Bergzow (Gemeinde Elbe-Parey). Das Familienunternehmen setzt sich aus 3 Standbeinen zusammen. Ein fortschrittlicher konventioneller Ackerbau mit insgesamt 1800 ha. In der Pflanzenproduktion werden Weizen, Roggen, Raps, Gerste, Mais, Zuckerrüben und Zwischenfrüchte angebaut. Das zweite Standbein ist der Milchviehbereich mit ca. 500 Kühen und Kälberaufzucht. Seit 2009 wurde als drittes Standbein der Betrieb **JSW Biogas**, Inh. Jörg Schulze Wext gegründet. Dazu zählt die im Projekt als Referenzanlage vorgesehene Biogasanlage mit 740 kW Leistung. Der Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist und die Eigenwärme für den kompletten Betrieb sowie zur Beheizung von privaten Häusern genutzt.

Zur Beherrschung der wissenschaftlich-technischen Risiken wurden für das Vorhaben im Rahmen des BMWi-Förderprogramms Forschung und Entwicklung zur kosten- und energieeffizienten Nutzung von Biomasse im Strom- und Wärmemarkt „**Energetische Biomassenutzung**“, Zuwendungen beantragt und bestätigt.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Verbundprojekt ThermoFlex-WAVE wurde das ThermoFlex-Verfahren weiterentwickelt sowie in einer modifizierten Variante auf einer zum Projektkonsortium gehörenden Beispiel-Biogasanlage (Referenzanlage) implementiert und erprobt.

Entsprechend der **Planung** der beteiligten Partner wurde das Gesamtprojekt in vier Teilvorhaben untergliedert, die in Tabelle 2 in Kap. I.2 aufgeführt wurden.

Das Projekt wurde innerhalb von 3 Jahren (Oktober 2018 bis September 2021) bearbeitet und beinhaltete insgesamt 4 größere, jeweils als Meilenstein abgeschlossene, Teilphasen:

- 1. Energetische und wirtschaftliche Optimierung des ThermoFlex-Verfahrens, Voruntersuchungen zur Referenzanlage
- 2. Detailplanung optionaler Varianten des ThermoFlex-Verfahrens, Randbedingungen Referenzanlage
- 3. Planung und Realisierung der Referenzanlage
- 4. Großtechnische Erprobung zur Validierung des ThermoFlex-Verfahrens

Innerhalb der Teilphasen waren die Projektpartner mit ihren individuellen Arbeitspaketen zum Teil bilateral, zum Teil multilateral vernetzt. In regelmäßigen Projekttreffen wurden die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert sowie weiterführende Schritte festgelegt.

Eine detaillierte Dokumentation der einzelnen Arbeitspakete und der jeweiligen Ergebnisse findet sich in Kap. II.1 dieses Berichtes.

Im **Verlauf des Vorhabens** erfolgten die Arbeiten im Rahmen der ersten beiden Teilphasen nach Zeitplan. Im Laufe des Jahres 2020 (mit der 3. Teilphase) zeichneten sich jedoch zunehmend Verzögerungen ab, woraufhin die Laufzeit des Verbundvorhabens um 6 Monate, d. h. über den ursprünglich geplanten Abschluss zum 31.03.2021 hinaus bis zum 30.09.2021 kostenneutral verlängert wurde. Somit konnte die o.g. 4. Teilphase und damit das gesamte Verbundvorhaben erfolgreich abgeschlossen werden.

Die wesentlichen **Ergebnisse** des Vorhabens sind hier bezugnehmend auf die Auflistung der Projektziele in Kap. II.1 kurz zusammengefasst:

1. Mit Hilfe von weiterentwickelten Wärmemodellen wurde die Integration des ThermoFlex-Verfahrens in moderne Nahwärmekonzepte und ein optimiertes Wärmemanagement für Beispielsysteme untersucht. Mit einem dynamischen Simulationsmodell wurde z. B. gezeigt, dass die Einbindung eines kleinen Pufferspeichers (60 m³) auf einer Biogasanlage die Erhöhungen des Temperaturniveaus im thermophilen Nachgärer-Wärmespeicher um 2-3 K ermöglicht. Dies würde das Einsatzspektrum von ThermoFlex verbessern. Das Beispiel sollte zeigen, wie sich ggf. auf Biogasanlagen vorhandene kleine Wärmespeicher in das ThermoFlex-Verfahren sinnvoll und aufwandsarm integrieren lassen. Für das Wärmemodell der Referenzanlage wurde eine Modellkomponente zur dynamischen Simulation der Trocknungsanlage erstellt und für die Planung der großtechnischen Erprobung verwendet.

2. Eine Bewertung des globalen Erwärmungspotenzials zeigte am Beispiel der Referenzanlage, dass ThermoFlex aus der Sicht des Klimaschutzes dem Bau eines konventionellen Wasserspeichers deutlich überlegen ist. Im Ergebnis der Analyse von Markthemmnissen lassen sich folgende potenzielle Hemmnisse (insbes. ökonomischer und rechtlicher Art) für eine ThermoFlex-Implementierung hervorheben: wirtschaftliche Situation einzelner Anlagenbetreiber, zu hoher Aufwand bei der Anpassung der vorhandenen Wärmeinfrastruktur am landwirtschaftlichen Standort, fehlende Technologieakzeptanz, (förder-)politische Unsicherheiten (generell die Biogas-Branche betreffend), zeitweise keine Planungssicherheit für die Flexibilisierung, Verschärfung verschiedenster fachrechtlicher Anforderungen (DüV, AwSV, TRAS 120, 44. BImSchV, TA-Luft, etc.). Als ein relevantes, aber fallspezifisch beherrschbares, ökonomisch-technisches Hemmnis hat sich bei den Detailplanungen im Projekt gezeigt, dass die für eine vollumfängliche ThermoFlex-Umrüstung erforderliche Nachrüstung von Wärmetauschern inkl. MSR-Technik zu beträchtlichen Mehrkosten führen kann. Zudem wurde herausgestellt, dass bei unterschiedlichen Milieubedingungen für die Prozessbiologie im mesophilen Hauptfermenter und im thermophilen Nachgärer nicht nur die Substratverweilzeit, sondern auch die hydraulische Verweilzeit wichtig für einen erfolgreichen Einsatz des ThermoFlex-Verfahrens ist, womit zu hohe Rezirkulationsraten ein prozesstechnisches Hemmnis darstellen können.

3. In einem semi-kontinuierlichen Langzeit-Gärversuch zur Einführung von ThermoFlex auf der Biogasanlage Bergzow unter den „Ist-Bedingungen“ wurde gezeigt, dass die Implementierung von ThermoFlex dort möglich ist, eine optimale Betriebsweise auf dieser Beispielanlage jedoch Modifikationen erfordert. In einem zweiten semi-kontinuierlichen Gärversuch mit optimierten Randbedingungen wurden entsprechende Modifikationen erfolgreich getestet. Die Gärversuche und eine Recherche von relevanten Literaturquellen [SEI21] bestätigen, dass die Anpassungsfähigkeit an Temperaturänderungen stark von den Randbedingungen der jeweiligen Biogasanlage abhängt und fallspezifische Untersuchungen (Gärversuche) erfolgen sollten, bevor signifikante Änderungen am Temperaturmanagement von Vergärungsanlagen vorgenommen werden. Insbesondere bei der Umstellung auf thermophile Betriebsweise muss behutsam vorgegangen und ausreichend Zeit eingeplant werden. Zudem sollte sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer ein besonders engmaschiges und gründliches Monitoring des Bioprozesses erfolgen. So können Gegenmaßnahmen rechtzeitig ergriffen werden. Im Rahmen eines Unterauftrages an die GMBU e.V konnte eine molekularbiologische Methode zur Ermittlung des mikrobiellen Status in Biogasanlagen unter Verwendung von PCR/qPCR für prozessbegleitende Untersuchungen zur Mikroorganismenabundanz etabliert werden. Diese Methodik hat das Potenzial auch zum begleitenden Prozessmonitoring bei der Umstellung von Biogasanlagen auf das ThermoFlex-Verfahren eingesetzt zu werden.

4. Im o. g. Langzeit-Gärversuch war durch die hohe Belastung entsprechend der Bedingungen auf der Referenzanlage i. V. m. dem erhöhten thermophilen Temperaturbereich (50-58°C) der Methanertrag der Laboranlage ca. 16 % schlechter als in der mesophilen Referenzphase. Im zweiten Gärversuch mit moderatem thermophilen Temperaturbereich von 50-54°C wurde ein deutlich besserer Methanertrag erzielt - im Vergleich mit der mesophilen Referenzphase zeigte sich sogar ein kleiner Mehrertrag, der jedoch sehr gering ausfiel. Somit konnte das „Nebenziel“ einer generellen Steigerung der Substrateffizienz durch thermophile Prozessführung im Nachgärer auch im Projekt ThermoFlex-WAVE nicht erreicht bzw. nicht nachgewiesen werden.

5. Es wurden Recherchen zum aktuellen Stand im Bereich der Abfallvergärung durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Wärmespeicherung i. Z. m. einer flexiblen Stromproduktion bei Abfallvergärungsanlagen derzeit nicht die gleiche Bedeutung besitzt, wie bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Zum einen steht - sowohl bei kommunalen als auch bei gewerblich/industriellen Abfallvergärungsanlagen - die umweltgerechte Abfallentsorgung und weniger die Energieversorgung im Vordergrund. Zum anderen wird dort, wie z. B. in [FNR18] ausgeführt, „häufig die gesamte Wärme für die Aufbereitung und Hygienisierung der Substrate eingesetzt.“ Für eine optimale Wärmenutzung im Zuge einer Flexibilisierung „ist die Lösung, die Wärmenutzung mit den Betriebszeiten der BHKW zu synchronisieren.“ [FNR18]. Somit sollten vor einer Anwendung des ThermoFlex-Verfahrens auf flexibilisierten Abfallvergärungsanlagen aus Sicht der Projektbeteiligten zunächst geeignete Konzepte für die Wärmerückgewinnung (insbes. aus dem Gärrest) realisiert werden.

6. Es erfolgte eine Detailplanung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage zur Referenzanlage für das ThermoFlex-Verfahren inkl. Angebots- und Kostenvergleich. Aufgrund der resultierenden deutlichen Mehrkosten gegenüber der Vorkalkulation, wurde nach alternativen Lösungsmöglichkeiten für die Implementierung des ThermoFlex-Verfahrens bzw. die großtechnische Erprobung auf der BGA Bergzow gesucht. Somit wurde eine „ThermoFlex-Basislösung“ für die Referenzanlage entwickelt, indem die Warmhaltung des Fermenters (während einer Trocknungskampagne) allein durch Nutzung der in den Gärbehältern durch Temperaturerhöhung über mehrere Tage gespeicherten Wärme erfolgt, womit mehr Wärme für die Trocknung verfügbar wird. Im Unterschied zur ursprünglich geplanten vollumfänglichen Lösung würde die Versorgung des Nahwärmenetzes dabei weiter über die BHKW-Abwärme erfolgen, womit nicht das gesamte Wärmepotenzial für die Trocknung erschlossen werden kann. Entscheidender Vorteil ist jedoch, dass keine Umrüstung des Heizungssystems nötig ist. Über die ursprüngliche Lösung hinausgehend wurde diese Modifikation zudem dahingehend weiterentwickelt, dass auch der Hauptfermenter gezielt mit variabler Temperatur gefahren und damit in die Wärmespeicherung einbezogen wird. Eine weitere, teilweise über die Zielstellung der Projektplanung hinausgehende Arbeit war die umfassende modellbasierte Analyse des Ist-Zustandes der Biogasanlage Bergzow und des Optimierungspotenzials sowie die Bewertung entsprechender Maßnahmen zur Verbesserung der Substrateffizienz der BGA Bergzow. Gemäß der modellgestützten Analyse würde sich für die Anlage ein Steigerungspotenzial hinsichtlich der Substrateffizienz von ca. 15 % ergeben. Zu diesen Arbeiten erfolgte eine wissenschaftliche Veröffentlichung [SEI22], die im methodischen Teil auch übertragbare Ansätze zur Modellierung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen vorstellt.

7. Auf Basis der erarbeiteten modifizierten auf die Randbedingungen der Referenzanlage abgestimmten Lösung wurden zwei Demonstrationsversuche zur großtechnischen Erprobung auf der Biogasanlage Bergzow durchgeführt. Im Ergebnis der beiden Demonstrationsversuche konnte gezeigt werden, dass alle Zielstellungen der Verfahrensvariante „ThermoFlex-Basislösung“ auf der Anlage erreicht wurden: mehr verfügbare Wärme für die Trocknung durch Wärmespeicherung in den Gärbehältern vor den Trocknungskampagnen, dadurch Verkürzung der Trocknungskampagnen um mindestens einen Tag, keine Beeinträchtigung der Prozessbiologie und des Methanertrages bzw. der Substrateffizienz durch die variablen Gärtemperaturen sowie eine aufwandsarme Umstellung auf das Verfahren. Somit wurden auch die wesentlichen Ziele des ThermoFlex-Verfahrens in der großtechnischen Erprobung auf der Referenzanlage mit einer Reihe von Modifikationen im Rahmen des Projektes erreicht.

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das **ThermoFlex-Verfahren** ermöglicht ohne zusätzlichen Speicher eine effektive und flexible Wärmespeicherung im Nachgärer für interne sowie externe Wärmenutzungen. Die auf einer Vielzahl der bestehenden Biogasanlagen üblichen Nachgärbehälter sind bereits wärme-gedämmt ausgeführt. Die Dimensionierung der Nachgärer bietet meist bereits bei relativ geringen Temperaturschwankungen ein beträchtliches Wärmespeicherpotenzial. Gleichzeitig verbessert das bei einer thermophilen Prozessführung im Nachgärer gehobene Temperaturniveau das Einsatzspektrum dieser internen Wärmespeichertechnologie.

Zum Einfluss der Temperatur auf die Stabilität anaerober Kulturen der Biogasanlagen sind zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden, die im Vorgängerprojekt ThermoFlex recherchiert wurden. Die Entwicklung der Biozönose verläuft zwischen den meso- und thermophilen Temperaturbereichen fließend [FNR16]. Jedoch sollten zu schnelle Temperaturänderungen vermieden werden, um die Stabilität der Prozessbiologie nicht zu gefährden. Eder [EDE12] empfiehlt z. B. tägliche Temperaturschwankungen im mesophilen Bereich von ± 4 K und im thermophilen Bereich von ± 1 K nicht zu überschreiten.

Im vorangegangenen FuE-Projekt ThermoFlex [THE19] wurden im Zusammenhang mit der Entwicklung des ThermoFlex-Verfahrens exemplarische Berechnungen zum Wärme-management bzw. zur Wärmeerzeugung, -speicherung und -nutzung von Biogasanlagen durchgeführt. Diese Berechnungen der Temperaturverläufe im Fermenter und Nachgärer haben gezeigt, dass Temperaturabsenkungen im Nachgärer von ca. -3 bis -4 K/d und Temperaturanstiege bis ca. 2 K/d den Wärmebedarf üblicher Systeme von Biogasanlagen mit Wärmenutzungen voll abdecken.

Ausgehend von Recherchen und Batchgärtests, wurde mit semi-kontinuierlichen Gärversuchen [SEI18] im vorangegangenen FuE-Projekt ThermoFlex gezeigt, dass die Prozessbiologie der schwach belasteten Nachgärer entsprechende Temperaturvariationen toleriert. Die auf die organische Trockenmasse der dosierten Substrate bezogenen Methan-Ausbeuten lagen dabei auch im thermophilen Milieu mit variablen Gärtemperaturen im erwarteten Bereich. Die Prozessbiologie blieb insgesamt intakt und stabil. Dies zeigte sich sowohl in den erfassten Methanmengen und der Methankonzentration des Biogases, als auch in den klassischen Stabilitätsparametern pH-Wert und FOS/TAC.

Eine Steigerung der Gesamt-Methanausbeuten gegenüber der mesophilen Referenz konnte bisher nicht nachgewiesen werden, ist jedoch auch nicht primäres Ziel des ThermoFlex-Verfahrens. Unabhängig davon können substratabhängig im großtechnischen Bereich noch weitere positive Effekte der thermophilen Betriebsweise (z. B. bessere Rührfähigkeit durch die hohen Temperaturen, Hygienisierung, usw.) relevant sein.

Temperaturgradienten im Nachgärer von -4 bis +2 K/d sollten, wie in den Vorarbeiten gezeigt, bis maximal bis 58°C für mit üblichen landwirtschaftlichen Substraten gefütterte Biogasanlagen offensichtlich kein Problem sein. Dies ermöglicht gemäß dem ThermoFlex-Verfahren die Nutzung von Nachgärbehältern als Wärmespeicher für große Energiemengen bei vergleichsweise akzeptablem Temperaturniveau. Der ThermoFlex-Ansatz wurde mit diesen Vorarbeiten bestätigt.

Das von der Hochschule gehaltene Verfahrenspatent [DE102014016801B4] stellte die schutzrechtliche Grundlage für das Projekt dar.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Vorfeld, der Planung und im Verlauf des Vorhabens kam es zu Kooperationen mit verschiedenen Firmen bzw. Institutionen außerhalb des genannten Projektkonsortiums, wobei hervorzuheben sind:

- Unterauftrag der bue Anlagentechnik GmbH an die Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien (GMBU) e.V. zur Etablierung eines molekularbiologischen Verfahrens zur Überprüfung der Lebensfähigkeit der Mikroorganismen während des Prozesses [GMBU22],
- Unterauftrag der bue Anlagentechnik GmbH an die Cordes & Winterberg GbR zur Bewertung von Marktumfeld, Bioprozesstechnik und Ökobilanz, THG-Bilanz sowie der großtechnischen Nutzung des Thermoflex-Verfahrens [CW22a], [CW22b].

II Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Einzelnen

II.1.1 Teilvorhaben 1: Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens, ingenieurtechnische Begleitung der großtechnischen Erprobung und Validierung (bue Anlagentechnik GmbH)

II.1.1.1 Recherche und Analyse der aktuellen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zum Einsatz des Verfahrens (AP 1.1)

Zum Projektbeginn erfolgte im Rahmen von Arbeitspaket (AP) 1.1 eine Recherche und Analyse der für das ThermoFlex-Verfahren relevanten technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen sowie möglicher Markthemmnisse - schwerpunktmäßig zu den Themenfeldern Wärmenutzung und -speicherung sowie Flexibilisierung von Biogasanlagen (BGA).

Ausgehend von den Branchenzahlen, die der Fachverband Biogas herausgegeben hatte, lag die Brutto-Stromproduktion aus Biogas 2020 bei 33,23 TWh. Dazu wurden aus dem anfallenden Wärmepotenzial immerhin 12,79 TWh für die externe **Wärmenutzung** verwendet [FVB21]. Geht man davon aus, dass die aus dem Wärmepotenzial geschöpfte Prozesswärme annähernd in der gleichen Größenordnung liegt, ist ein weiteres Drittel noch ungenutzt. Hier liegt die Herausforderung der Zukunft, den effektiv nutzbaren Anteil zu erschließen.

Betrachtet man zuerst einmal nur die 2020 schon genutzte externe Wärme von 12,79 TWh, ergibt sich bei der Umrüstung auf die flexible Fahrweise ein beträchtliches Potential für die verschiedenen Wärmespeichertechnologien. Die aktuell am meisten verbreitete ist hier die über den Groß-Warmwasserspeicher mit all seinen Vor- und Nachteilen. Im Bereich der für Biogasanlagen und Nahwärmenetze typischen Speichervolumen steigen die volumenspezifischen Investitionskosten hierbei sehr stark an. Im Leitfaden „Flexibilisierung von Biogasanlagen“ [FNR18] finden sich exemplarische Angaben von 105.000 € für einen 150 m³ sowie von 240.000 € für einen 1 000 m³ Wärmespeicher. Um z. B. die Nahwärmeversorgung für ein Gewächshaus zu sichern wurde am Standort Tannhausen (Baden-Württemberg) ein 800 m³-Groß-Warmwasserspeicher für Investkosten i. H. v. 200.000 € installiert [BRÄ19].

Dort wo die Wärmenutzung im Niedertemperaturbereich angesiedelt ist, greift das hier behandelte ThermoFlex-Verfahren und hilft, die Nachteile der Nutzung von Groß-Warmwasserspeichern zu reduzieren. Diese Nachteile sind im hohen technischen und bautechnischen Aufwand und den damit im Zusammenhang stehenden hohen Investitionskosten begründet. Das ThermoFlex-Verfahren kommt ohne großen baulichen Aufwand aus, da es auf die vorhandene Bau-Substanz des Nachgärbehälters zurückgreift. Investiert werden muss hier nur in die erforderliche Technik zum Wärmeein-/austrag und ggf. in Anpassungen des Nachgärerbehälters.

Aus der in Abbildung 1 dargestellten Entwicklung der Biogasanlagenzahl sowie der installierten elektrischen Leistung im Vergleich mit der arbeitsrelevanten elektrischen Leistung [FVB21] wird deutlich, dass die **Flexibilisierung** von den Anlagenbetreibern erkannt wurde und weit über das Jahr 2021 hinaus fortgesetzt werden muss.

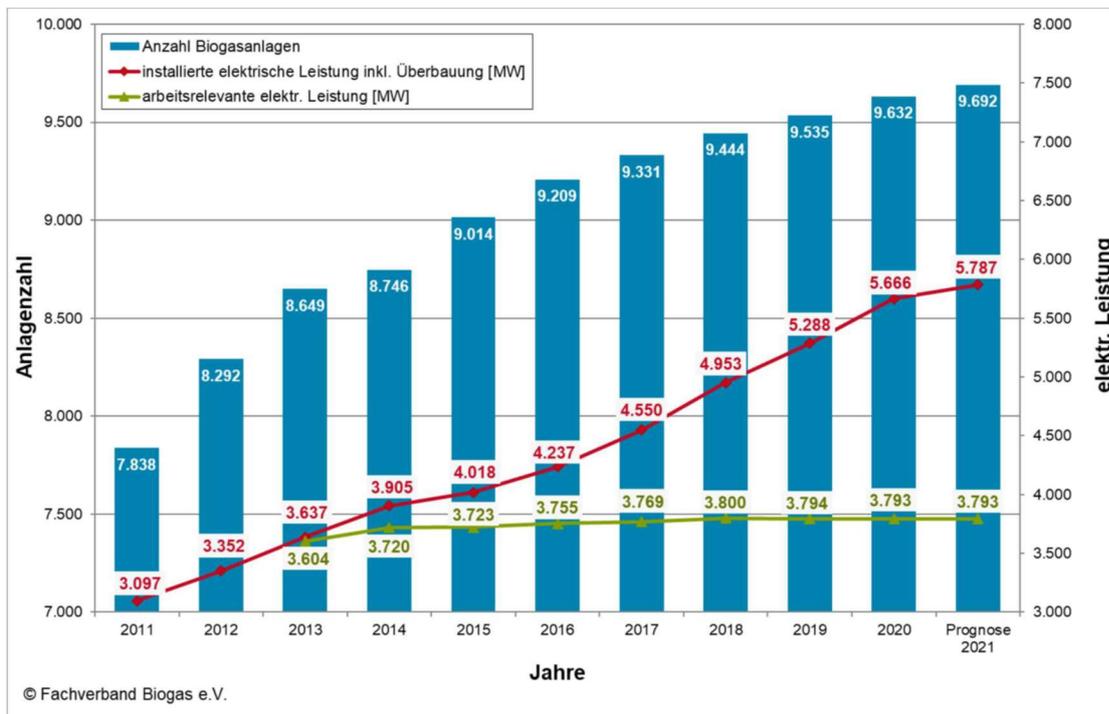


Abbildung 1: Entwicklung der Biogasanlagenzahl und der installierten elektrischen Leistung sowie der arbeitsrelevanten elektrischen Leistung in Deutschland [FVB21]

Mit der **Analyse möglicher Markthemmnisse** wurden folgende Punkte herausgestellt:

Markthemmnisse ökonomischer Art:

- wirtschaftliche Situation einzelner Anlagenbetreiber,
- Missernten, wie z. B. 2018,
- zu hoher Aufwand bei der Anpassung der vorhandenen Wärmeinfrastruktur am landwirtschaftlichen Standort,

rechtlicher Art:

- noch keine Klarheit zur möglichen BAFA-Förderung [BAFA17] für die Umrüstung des Nachgärbehälters zum Wärmespeicher, analog der Regelung für den Einsatz von Groß-Warmwasserspeichern,

fehlende Technologieakzeptanz:

- allgemeine Skepsis einzelner Anlagenbetreiber vor neuen Technologien,
- Prioritätensetzung zugunsten des Erhalts einer vorhandenen Wärmeinfrastruktur auf dem landwirtschaftlichen Standort,
- keine Bereitschaft einzelner Anlagenbetreiber für ein Arrangement mit technischen Innovationen,

(förder-)politische Unsicherheiten (generell die Biogas-Branche betreffend):

- zeitweise keine Planungssicherheit für die Flexibilisierung (insbes. 2020),
- bis 2021 keine Aussicht auf Verbesserungen der Rahmenbedingungen für die Errichtung von Neuanlagen über die Größe von Güllekleinanlagen (lt. §44 EEG 2017) hinaus.

Eine **Erarbeitung von Markteinführungsstrategien** war u.a. Bestandteil eines Unterauftrages an die Cordes & Winterberg GbR. Die Arbeit wird im Kap. II.1.1.7 erläutert.

Im Zuge von AP 1.1 wurden für die **Beispielanlage** („Referenzanlage“) Biogasanlage Bergzow) wesentliche Aspekte zum Wärmemanagement und zur Wärmenutzung zusammengetragen und analysiert. Als grundlegende Varianten für die Heizungsumrüstung auf das ThermoFlex-Verfahren wurden herausgestellt:

- Variante 1: Ausbau der internen Beheizung des Nachgärers (Erweiterung Heizregister),
- Variante 2: Nachrüstung externe Heizung (Doppelrohr-Wärmetauscher Substrat-Wasser).

Ein technisch-technologischer Variantenvergleich folgt im Rahmen von AP 1.4 (siehe Kap. II.1.1.2).

Eine wesentliche Motivation für die Anwendung des ThermoFlex-Verfahrens auf der Beispielanlage ist, dass die Kapazität der auf der BGA betriebenen Maistrocknung (siehe Kap. II.1.2.1, Abbildung 51) - insbesondere von Oktober bis Dezember nicht ausreichend ist. Ziel ist es in diesem Zusammenhang

- die Wärme vor den Trocknungs-Kampagnen im Nachgärer zu speichern.
- Damit kann dann die verfügbare BHKW-Abwärme ($\approx 80^{\circ}\text{C}$) für eine effektive Trocknung vollständig genutzt werden,
- weil der Wärmebedarf der übrigen Verbraucher (Betriebs-/Wohngebäude, Ställe, Fermenter, etc.) während der Trocknungs-Kampagne aus dem Nachgärer gedeckt wird, wofür das thermophile Temperatur-Niveau ($\approx 50\dots 55^{\circ}\text{C}$) ausreichend ist.

II.1.1.2 Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens an relevante Wärmenutzungsmöglichkeiten (AP 1.4)

Im Rahmen von Arbeitspaket 1.4 erfolgte zunächst eine allgemeine Einordnung / Betrachtung zur Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens an **innovative Wärmenutzungsmöglichkeiten** im Niedertemperaturbereich. Zusammenfassend kann dazu folgendes ausgeführt werden:

Die Kombination mit vorhandenen unterirdischen Wärmespeichern verschiedener Art sind möglich. Unter anderem die Speicherung in Wärmespeichern mit niedriger Temperatur mit anschließender Nutzung einer Wärmepumpe in einem Niedertemperaturnetz für die örtliche Wärmeversorgung. Bei saisonaler Nutzung bestehen die größten Möglichkeiten. Bspw. als Niedertemperaturspeicher mit großem Volumen. Weitere interessante Möglichkeiten der Speicherung sind die Erdsonden-Wärmespeicher (Boden in bis zu 100 m Tiefe wird erwärmt) und der Aquifer-Wärmespeicher (Grundwasser und Erde wird erwärmt - funktioniert nur bei stehendem Grundwasser). Gut geeignet für den Aquifer-Wärmespeicher sind alte Bergbauanlagen. Es handelt sich hier um still gelegte Gruben mit einem Volumen von nicht selten größer 80.000 m^3 , die vom Grundwasser geflutet sind.

Auch bei Biogasanlagen kann zusätzlich durch intelligente Abwärmenutzung noch Energie gewonnen werden, das Potenzial ist groß. Das beinhaltet die Nutzung des Nachgärers als Wärmespeicher (siehe ThermoFlex) oder die vorhandene Wärme im Gärrestlager. Außerdem kann die Abwärme eines angeschlossenen landwirtschaftlichen Betriebes bspw. aus der Milchkühlung oder aus der Trocknung genutzt werden, um hier nur einige Quellen zu nennen. Diese Wärmequellen können in Kombination mit Wärmepumpen genutzt werden.

Bei der Anwendung des ThermoFlex-Verfahrens mit Nutzung des Nachgärers als Wärmespeicher im thermophilen Bereich (48-57°C) einer BGA zeigen sich weitere Vorteile:

Die Wärmeverluste im Vergleich zu einem herkömmlichen Nahwärmenetz mit hohen Temperaturen (90/70°C) werden nahezu halbiert. Die Nutzungsdauer des Nahwärmenetzes wird außerdem um viele Jahre erhöht (auf 40-50 Jahre). Im Vergleich: Laut Herstellerangaben sind Heizleitungen aus Kunststoff (PEX) bei Hochtemperaturbetrieb (90/70°C) nur etwa auf 15 Jahre ausgelegt.

Falls höhere Temperaturen für bestimmte Anwendungen benötigt werden, lassen sich diese problemlos durch Einsatz von Wärmepumpen erreichen.

Im weiteren Verlauf der 1. Teilphase des Projektes wurde von bue am Beispiel der Biogasanlage Bergzow (Referenzanlage) ein technisch-technologischer **Variantevergleich** für die in Kap. II.1.1.1 genannten grundsätzlichen Varianten 1 und 2 zur thermischen Be- und Entladung des Nachgärers vorgenommen. Zur Demonstration des ThermoFlex-Verfahrens an der ausgewählten Biogasanlage der JSW Biogas stellte sich in dieser Projektphase die Variante 1 (Ausbau der internen Beheizung des Nachgärers) als vorteilhaft heraus. Der einfache Aufbau, die geringe Störanfälligkeit, die „Elastizität“ im Temperaturspektrum des Substrats und die im Vergleich zur Variante 2 (Nachrüstung externe Wärmetauscher) geringeren Investitionskosten, sind hier als bedeutende Vorteile zu nennen.

Für die Referenzanlage wurden Möglichkeiten zur **Anpassung der Wärmenutzungen** an die besonderen Bedingungen des ThermoFlex-Verfahrens erörtert. Nachfolgend sind diesbezüglich wesentliche Aspekte kurz aufgeführt:

- Vorrangigkeit der Wärmenutzung mit dem höchsten Temperaturbedarf (dies ist auf der Referenzanlage die Trocknungsanlage, wobei die verfügbare BHKW-Abwärme (≈80°C) vollständig genutzt werden soll),
- Senkung der Vorlauftemperatur im Nahwärmenetz auf ca. 50-55°C (entsprechend erzielbarer Temperatur im thermophilen Nachgärer), Integration „Legionellenschaltung“ für Warmwasser,
- Senkung der Rücklauftemperatur im Nahwärmenetz (passend dimensionierte bzw. steuerbare Heizungspumpe / ggf. Volumenstrom senken, ggf. erhöhte Wärmeabnahme durch Neuanschlüsse),
- Mit positiven Auswirkungen auf die Lebensdauer von Netzen aus Kunststoff-Heizungsrohren (PEX).

II.1.1.3 Detailplanungen für Integration Heizkessel oder Wärmepumpe, Integration Kurzzeit-Pufferspeicher und Gärrestlager als Wärmespeicher (AP 2.1)

Die Untersuchungen zu optionalen Ausgestaltungen des ThermoFlex-Verfahrens an ausgewählten exemplarischen landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rahmen von AP 2.1 erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Als Basis für diese Arbeiten wurde - um eine optimale Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen - das bereits im Vorläuferprojekt herangezogene Beispiel einer landwirtschaftlichen BGA mit Flexibilität und Wärmenutzung verwendet (siehe [THE19]).

Im Rahmen der weitergehenden Betrachtungen im neuen Projekt erfolgte die Integration eines kleinen Wärme-Pufferspeichers von 60 m³ in das Beispiel. Ein solcher Kurzzeitpuffer ist auf einer Reihe von Bestandsanlagen mit hoher externer Wärmenutzung (unabhängig von evt. Flexibilisierungsmaßnahmen) installiert worden, um beispielsweise die Versorgung der angeschlossenen Wärmenutzer bei BHKW-Wartungen o. ä. abzusichern.

In das ThermoFlex-Verfahren sollte ein derartiger Pufferspeicher, mit dem Ziel das verfügbare Temperaturniveau für die externe Wärmenutzung zu steigern, aufwandsarm integriert werden können.

Das Fließbild des für diese Untersuchungen vom Projektpartner mit dem Simulationsprogramm SIMBA# [SIM21] erstellten Simulationsmodells ist zum besseren Verständnis der nachfolgenden Ausführungen in diesem Kapitel aufgeführt (Abbildung 2).

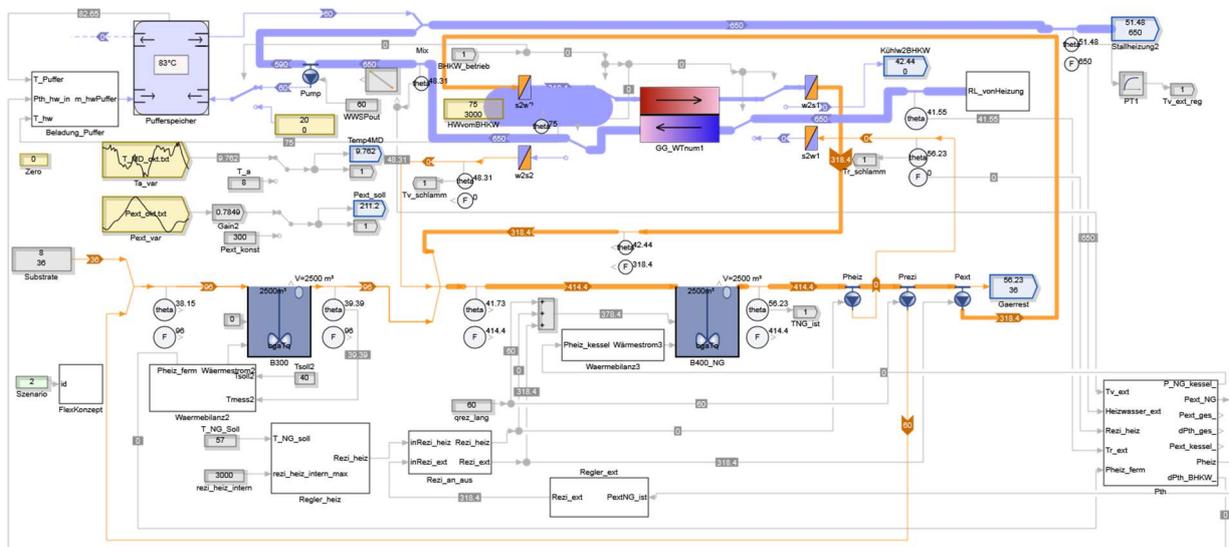


Abbildung 2: Beispielmodell zum Wärmemanagement einer landwirtschaftlichen Biogasanlage mit Fermenter und Nachgärer (je 2500m³) mit ThermoFlex-Verfahren sowie integriertem 60 m³-Wärmepufferspeicher

Die Speicherentladung (Wärmeentnahme aus dem Pufferspeicher) erfolgt im Beispielmodell durch Vorgabe eines (zunächst konstanten) Volumenstromes für den Abzweig eines Teilstromes (hier ca. 10-20 %) aus dem Ablauf des Wärmetauschers und Zufuhr in den Wärmespeicher sowie Zumischung eines entsprechend aus dem Wärmespeicher entnommenen Wasserstromes (siehe Abbildung 2).

Mit diesem Modell exemplarisch simulierte Ergebnisse werden nachfolgend kurz vorgestellt. Als Szenario für die Flexibilität wurde in diesen Beispielsimulationen angenommen: 3-fache

Flexibilität, BHKW zwei Tage aus (z. B. Wochenende) und an den folgenden fünf Tagen täglich 11 Stunden an (jeweils von 6:00-11:00 und von 14:00-20:00). Es wurde ein von der Außentemperatur abhängiger externer Wärmebedarf modelliert. Dafür wird beispielhaft die Übergangszeit (Herbst-Winter) für 4 Wochen mit variabler Wärmelast, bei spätherbstlichen Temperaturen von i. M. ca. 8°C gerechnet. Die Wärmelast wird dabei so normiert, dass sie im Mittel ca. 300 kW (inkl. Wärmenetzverluste) beträgt. Nähere Erläuterung zum verwendeten Wärmemodell und dem angesetzten dynamischen Wärmelastfall können dem Schlussbericht des Vorläuferprojektes ThermoFlex [THE19] entnommen werden.

Abbildung 3 zeigt Simulationsergebnisse für den Verlauf der Vorlauftemperaturen der angeschlossenen externen Wärmenutzung. Folgende Varianten wurden dabei betrachtet:

1. ohne Unterstützung durch den Pufferspeicher (Referenz),
2. mit konstant 60 m³/d unterstützender Zumischung aus dem Pufferspeicher,
3. mit konstant 120 m³/d unterstützender Zumischung aus dem Pufferspeicher.

In Variante 2 wurde ein im Mittel um ca. 2 K höheres Niveau der Vorlauftemperatur für die externe Wärmenutzung berechnet (in den Spitzen bis zu + 5K). Es kann durchweg eine leichte bis mäßig erhöhte Vorlauftemperatur gegenüber der Referenz (1.) beobachtet werden.

In Variante 3 wurde das mittlere Temperaturniveau um ca. 3 K angehoben (bis zu + 8K in den Spitzen). Diese Variante zeigte sich bei den mehrstündigen BHKW-Abschaltungen als vorteilhaft, war jedoch bei den längeren Zeiträumen (BHKW-Abschaltungen über je 2 Tage) nachteilig, weil der Speicher durch die höhere Entnahmemenge schneller entladen wird.

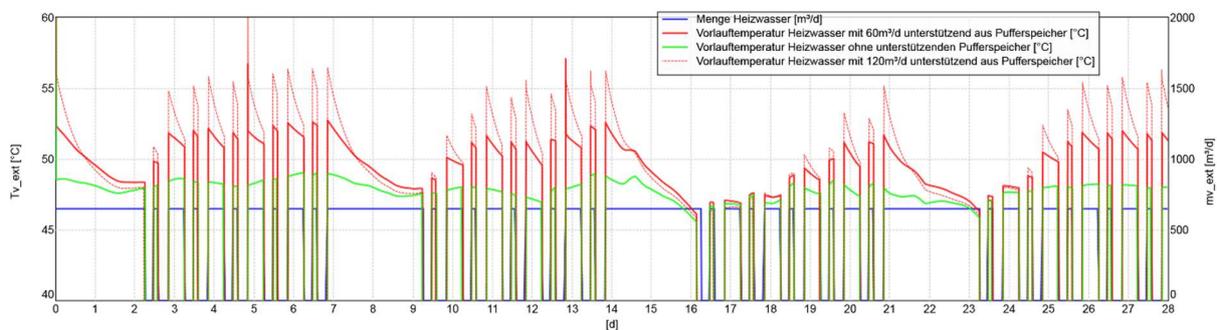


Abbildung 3: Kombination des ThermoFlex-Verfahrens mit einem kleinen Wärmepufferspeicher: Exemplarische Ergebnisse für Vorlauf externe Wärmenutzung (wenn BHKW aus), der Pufferspeicher dient hier zur Temperaturerhöhung. Die für die externe Nutzung erforderliche Wärmemenge (im Mittel 300 kW) kann bis auf zwei kurze Zuschaltungen eines Spitzenlastkessels (vgl. unten) geliefert werden (hier nicht dargestellt)

Eine Vergleichmäßigung der Vorlauftemperatur kann durch eine geeignete Regelung erfolgen, was sich auch in das Modell integrieren lässt. Für das gezeigte Beispiel bzw. zur Potenzialermittlung reicht zunächst die vereinfachte Berechnung mit konstanter Speicherentnahme aus. Auch die Zuschaltung des Spitzenlastkessels kann bei entsprechender Parametrierung (Regelung) der Pufferentladung im Beispiel vermieden werden (hier nicht dargestellt). Vertiefende Betrachtungen können mit den entwickelten Werkzeugen einzelfallspezifisch erfolgen.

Weitere Vereinfachungen im Beispiel sind, dass keine temperaturabhängige Schichtung im Speicher erfolgt (räumlich konstante Speichertemperatur) und dass das einfache Speichermodell keine Wärmeverluste an der Behälterhülle berücksichtigt. Auch diesbezüglich kann das Modell noch ergänzt werden, wenn es der jeweilige Anwendungsfall erfordern sollte.

Abbildung 4 zeigt den simulierten Verlauf der Speicherbeladung (Volumenstrom Beladung und Speichertemperatur). Die Beladung kann grundsätzlich nur während der BHKW-Laufzeit erfolgen, die Ladetemperatur wurde vereinfacht mit 90°C angesetzt. Der Volumenstrom der Beladung wurde dabei aus dem verfügbaren Wärmeüberschuss des BHKW abgeleitet, wobei die resultierende Beladungsleistung je nach Speichertemperatur mehr oder weniger kleiner als der verfügbare Wärmeüberschuss ist (vgl. Abbildung 5). Man erkennt, dass die Speichertemperatur durch den jeweils 2tägigen BHKW-Stopp von max. 90°C auf ca. 50°C absinkt. In den jeweils 5 folgenden Tagen gelingt sukzessive eine Wiederbeladung des Pufferspeichers. In der lastkritischen Woche mit winterlichen Außentemperaturen ist dieser Ladevorgang verzögert, weil zeitweise kaum noch Wärmeüberschuss berechnet wurde (siehe Abbildung 5), was auch am geringeren Ladevolumenstrom erkennbar ist.

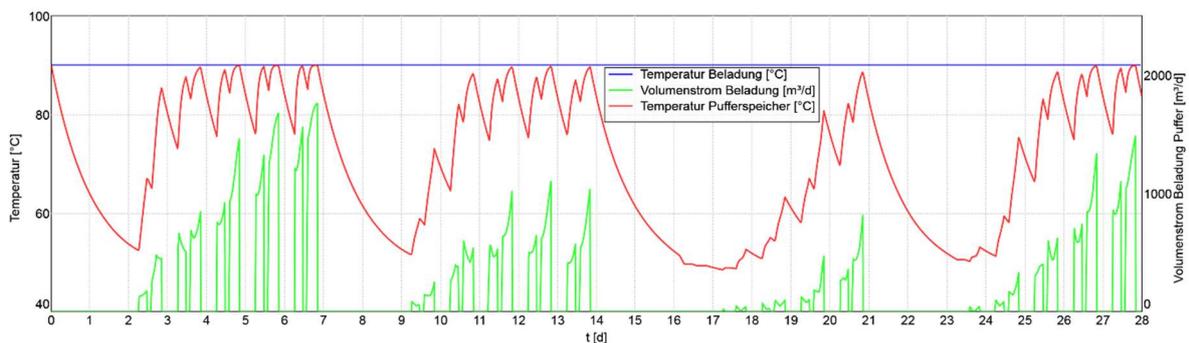


Abbildung 4: Kombination des ThermoFlex-Verfahrens mit einem kleinen Wärmepufferspeicher: Exemplarische Ergebnisse für Pufferspeicher (Beladung und Speichertemperatur)

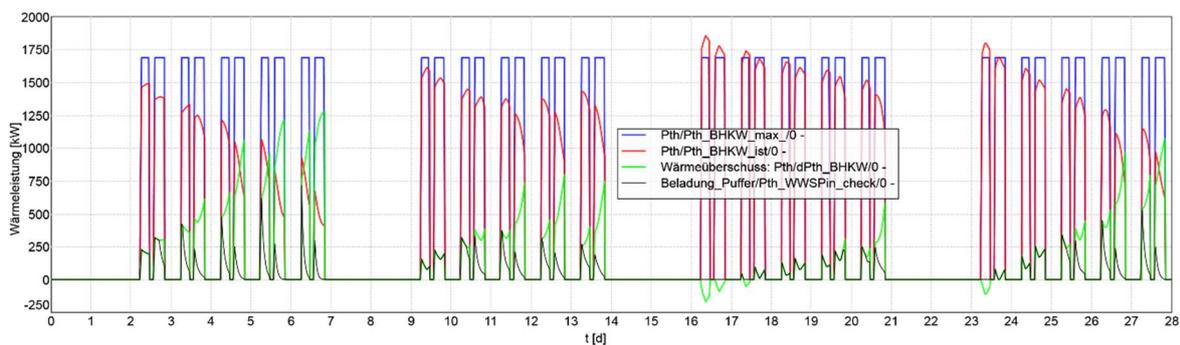


Abbildung 5: Kombination des ThermoFlex-Verfahrens mit einem kleinen Wärmepufferspeicher: Exemplarische Ergebnisse für verfügbare BHKW-Leistung/Wärmeüberschuss, der negativ errechnete Wärmeüberschuss am 16. und 23. Tag wird im Beispiel durch kurzzeitige Zuschaltung eines einfachen Spitzenlastkessel-Modells ausgeglichen)

Wenn auch die berechneten Erhöhungen des Temperaturniveaus von 2-3 K durch die Einbindung eines kleinen Pufferspeichers relativ gering ausfallen, können sie dennoch das Einsatzspektrum von ThermoFlex verbessern. Für deutlich erhöhte Temperatur-Niveaus würde man einen weit größeren Wärmespeicher benötigen, was jedoch ThermoFlex eben gerade vermeiden soll. Das Beispiel soll vielmehr veranschaulichen, wie sich ggf. vorhandene kleine Wärmespeicher in das ThermoFlex-Verfahren sinnvoll und aufwandsarm integrieren lassen.

II.1.1.4 Übertragbarkeit des ThermoFlex-Verfahrens auf Abfallvergärungsanlagen (AP 2.6)

Es wurden Recherchen zum aktuellen Stand im Bereich der Abfallvergärung durchgeführt. Dabei hat sich nach Einschätzung der Projektbeteiligten gezeigt, dass die Wärmespeicherung i. Z. m. einer flexiblen Stromproduktion bei Abfallvergärungsanlagen derzeit nicht die gleiche Bedeutung besitzt, wie bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Zum einen steht - sowohl bei kommunalen als auch bei gewerblich/industriellen Abfallvergärungsanlagen - die umweltgerechte Abfallentsorgung und weniger die (bedarfsorientierte) Energieversorgung im Vordergrund. Zum anderen wird dort, wie z. B. in [FNR18] ausgeführt, „häufig die gesamte Wärme für die Aufbereitung und Hygienisierung der Substrate eingesetzt.“ Für eine optimale Wärmenutzung im Zuge einer Flexibilisierung „ist die Lösung, die Wärmenutzung mit den Betriebszeiten der BHKW zu synchronisieren.“ [FNR18]. Somit sollten vor einer Anwendung des ThermoFlex-Verfahrens auf flexibilisierten Abfallvergärungsanlagen aus Sicht der Projektbeteiligten zunächst geeignete Konzepte für die Wärmerückgewinnung (insbes. aus dem Gärrest) realisiert werden (vgl. auch Kap. II.1.2.3).

Die entsprechenden Arbeiten zur Untersuchung der Übertragbarkeit des ThermoFlex-Verfahrens auf Abfallvergärungsanlagen konnten somit im Umfang deutlich reduziert werden. Die dadurch erzielten Aufwands- und Zeiteinsparungen kamen der Kompensation des entstandenen planerischen Mehraufwandes für die Detailplanung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage und der Verfahrensmodifikation zugute (siehe Kap. II.1.1.5 und II.1.1.6).

II.1.1.5 Detailplanung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage zur Referenzanlage für das ThermoFlex-Verfahren (AP 3.1) und ingenieurtechnische Begleitung der Umrüstung (zu AP 3.6)

Detailliertes Verfahrenskonzept für die Umrüstung der Referenzanlage:

Für die Planung der großtechnischen Anwendung im Rahmen von AP 3.1 ist auf Basis des technisch-technologischen Variantenvergleichs zur thermischen Be- und Entladung des Nachgärbehälters (siehe Kap. II.1.1.2) die Variante 1: thermische Be- und Entladung über in den Nachgärer installierte Wärmeübertrager (Heizregister) ausgewählt worden.

Dafür wurde zunächst ein **R&I-Schema mit Funktionsbeschreibung** der großtechnischen Anwendung des ThermoFlex-Verfahrens auf der Biogasanlage Bergzow erarbeitet. Nachfolgend sind das entsprechende Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema (R&I-Schema, siehe Abbildung 6) mit einem Auszug aus der dazu erarbeiteten Funktionsbeschreibung aufgeführt.

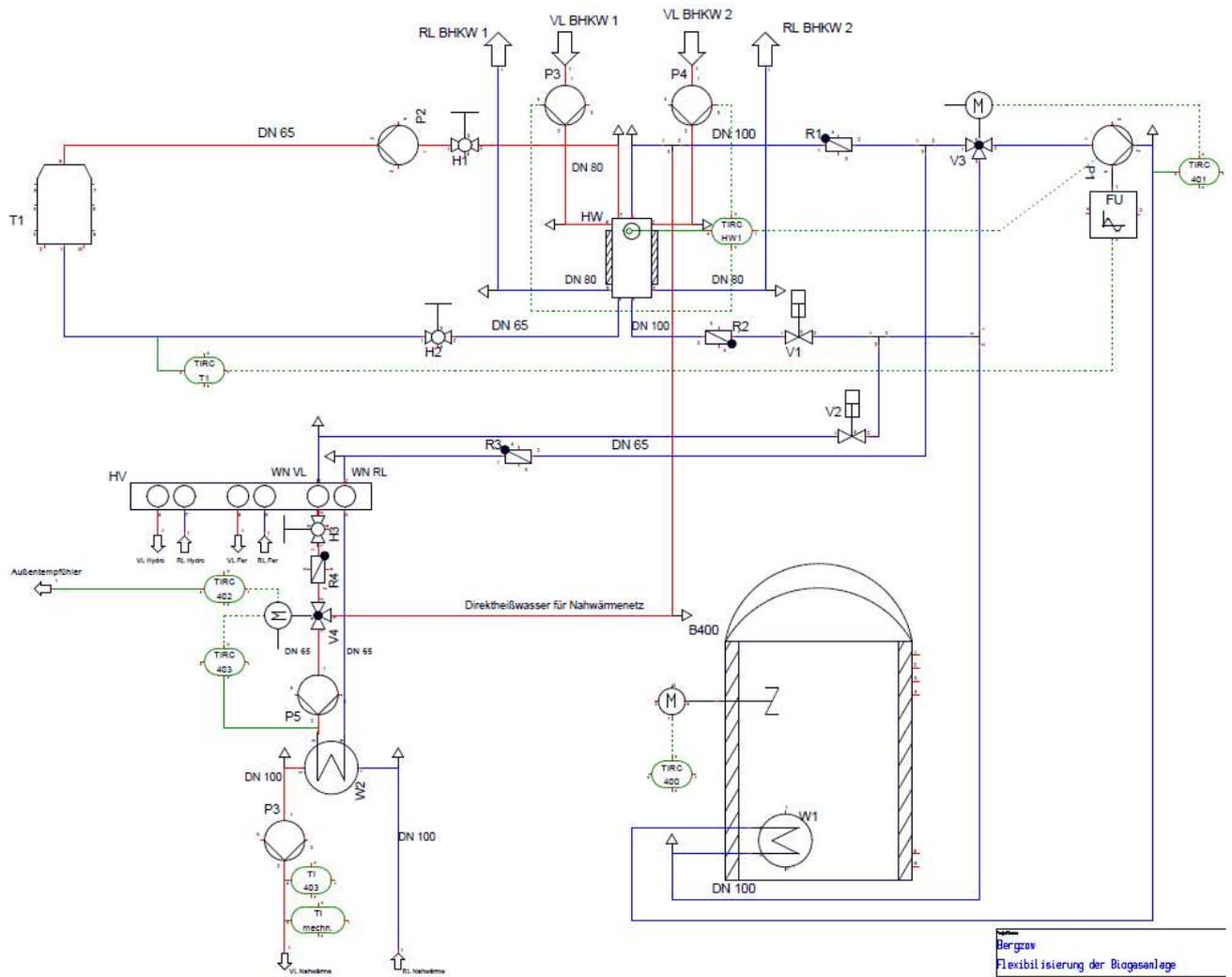


Abbildung 6: R&I-Schema zur Planung der großtechnischen Anwendung des ThermoFlex-Verfahrens auf der Referenzanlage

Die wesentlichen Punkte aus der dazugehörigen Funktionsbeschreibung sind nachfolgend kurz zusammengefasst:

1 Thermische Beladung Nachgärbehälter B400

1.1 Beginn der thermischen Beladung des B400

1.2 Ende der thermischen Beladung des B400

1.2.1 Bei erreichter Marke von T_{max} im B400

1.2.2 Abbruch Beladung durch verkürzte BHKW-Laufzeit infolge Fahrplansteuerung

1.2.3 Umschaltung auf Vorrangschaltung Trockner („teilweises“ Ende Beladung B400)

2 Thermische Beladung Nachgärbehälter B400 mit Wärmenutzung

3 Thermische Entladung Nachgärer B400

3.1 Beginn der thermischen Entladung des B400

3.2 Ende der thermischen Entladung des B400

3.2.1 Bei erreichter Marke von T_{min} im B400

3.2.2 Abbruch Entladung durch verlängerte BHKW-Laufzeit infolge Fahrplansteuerung

4 Entladung Nachgärer (Wärmeerhalt der BHKW)

5 Vorrangschaltung Trockner

6 Zusätzliche Schaltungen im Nahwärmenetz

6.1 Schaltung zur Legionellen-Problematik

6.2 Schaltung zur Absicherung Wärmebereitstellung bei sehr niedriger Außentemperatur

Die Funktionalität des Systems ist durch ein Höchstmaß an Flexibilität charakterisiert, um auf die verschiedensten praktischen Anforderungen reagieren zu können. Die Wesentlichen seien hier genannt:

Der Beladungsvorgang des Nachgärbehälters B400 muss zu jeder Zeit teilweise oder vollständig schadlos abgebrochen werden können, wenn es der Strommarkt erfordert, die entsprechenden Wärmemengen bei hohen Vorlauftemperaturen (ca. 85°C) verlangen oder einfach nur die festgelegte Beladungstemperatur des Nachgärbehälters B400 erreicht ist.

Da in den Zyklen der Beladung des Nachgärbehälters B400 gleichzeitig die Wärmeversorgung der einzelnen Abnehmer aufrechterhalten werden muss, sorgt eine entsprechende Regelung an den einzelnen Abnehmern für die Dosierung der geforderten Wärmeströme.

Beim Entladungsvorgang des Nachgärbehälters B400 muss neben dem vollständigen Entladen bis auf die eingestellte Mindesttemperatur auch eine Steuerung dafür sorgen, dass eine vorzeitige Wiederbeladung aktiviert wird, wenn es der Strommarkt erfordert, sprich: das BHKW zuschaltet. Des Weiteren muss durch eine Steuerung berücksichtigt werden, dass beim Entladungsvorgang auch immer ein angemessener Wärme-Teilstrom für die Temperierung der BHKW sorgt, um starke Wärmespannungen beim Einschalten zu vermeiden. Starke Wärmespannungen setzen die Lebensdauer solcher Anlagenteile erheblich herab. Erhöhte Wartungs- und Instandhaltungskosten sind die Folge.

Die spezifischen Bedingungen auf der Referenzanlage, hervorgerufen durch den Betrieb einer Trocknungsanlage (T1), die vorrangig in der Trocknungskampagne August/September eines jeden Jahres läuft, erfordern eine zusätzliche Steuerung und Regelung im Beladungsvorgang, die die Aufrechterhaltung des Trocknungsprozesses gewährleistet. Eine weitere entsprechende Regelung sorgt dafür, dass die hier nicht benötigte Wärmeenergie zur Beladung des Nachgärbehälters B400 genutzt wird.

Des Weiteren bewirkt eine Steuerung, dass sich im angeschlossenen Nahwärmenetz keine Legionellen im erwärmten Trinkwasser der einzelnen Abnehmer bilden können.

Sollte sich bei extrem niedrigen Temperaturen ($< -10^{\circ}\text{C}$) über mehrere Tage hinweg zeigen, dass die Wärmeversorgung über das Nahwärmenetz mit Niedertemperatur aus dem Nachgärbehälter B400 nicht ausreicht, sorgt eine weitere Regelung dafür, dass über eine Bypassleitung direkt BHKW-Hochtemperaturwärme dem Wärmestrom in das Nahwärmenetz beigemischt wird.

Auslegung der anlagentechnischen Komponenten und Ausführungsplanung für die Umrüstung der Referenzanlage:

Mit der fortgesetzten Detailplanung der Umrüstung der Biogasanlage Bergzow im Zuge von AP 3.1 wurden folgende Arbeiten erledigt:

- Präzisierung des R&I-Schemas auf alle Anforderungen des ThermoFlex-Verfahrens und der anlagenspezifischen Besonderheiten der umzubauenden Realanlage,
- Beschreibung der für die Realisierung des ThermoFlex-Verfahrens notwendigen Funktionen unter Beachtung spezifischer Besonderheiten des Anlagenbetriebes auf der umzubauenden Realanlage (Funktionsbeschreibung),
- Auslegungen und Berechnungen für Maschinenelemente und Apparate,
- Nachrechnung vorhandener Maschinenelemente und Apparate zur Prüfung der Eignung auf das ThermoFlex-Verfahren,
- Erarbeitung des vollständigen Planungssatzes (Baugruppen- und Einzelteilzeichnungen mit Stücklisten),
- Erarbeitung der Ausschreibungsunterlagen für die notwendigen Anfragen bei Fachfirmen für die Ausführung in Form eines detaillierten Mengengerüsts.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen Ansichten aus der Ausführungsplanung der Umrüstung der Biogasanlage Bergzow.

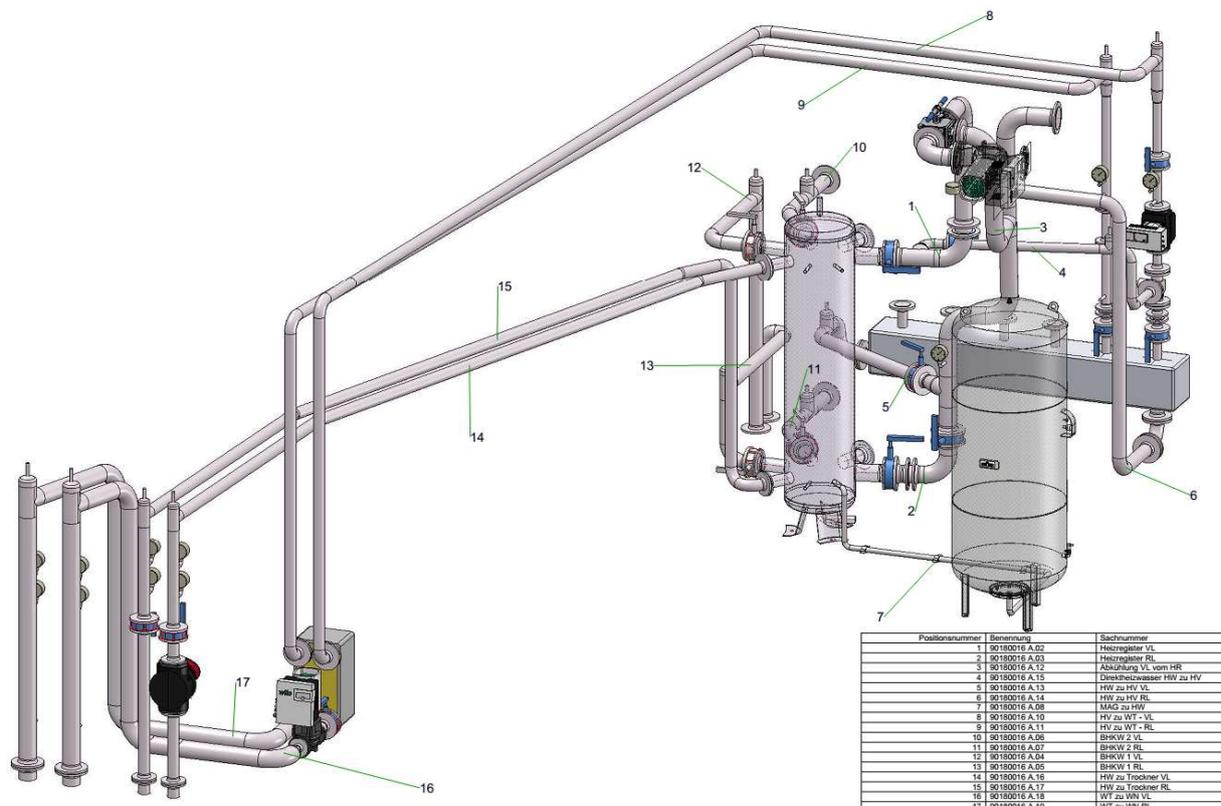


Abbildung 7: Hauptansicht Technikgebäude

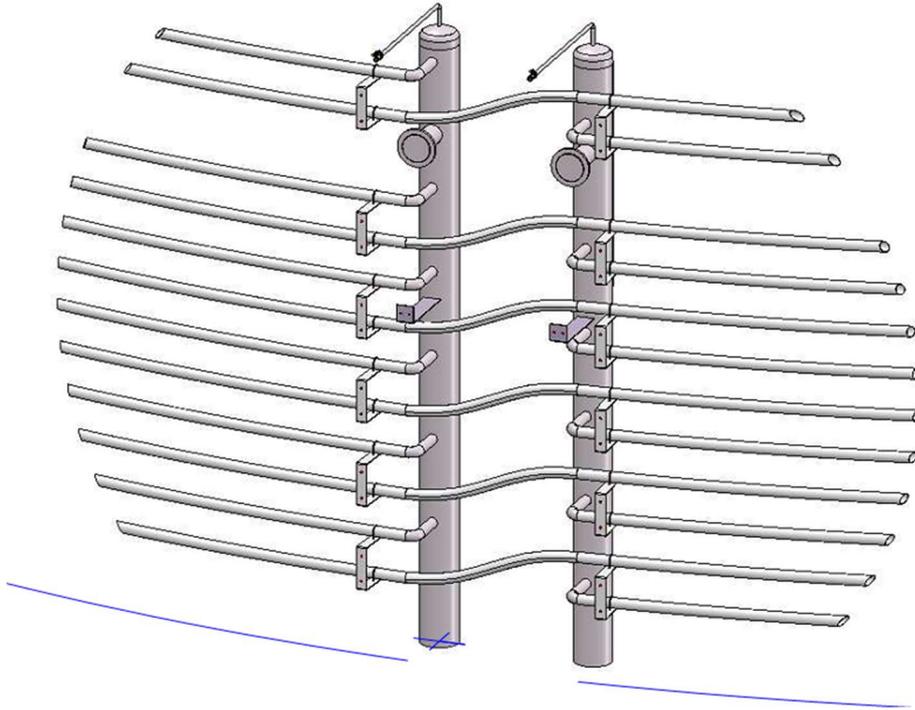


Abbildung 8: Wärmeübertrager Nachgärer nach konstruktiver Anpassung (Detail um den Vor- und Rücklauf-Verteiler). Die konstruktive Anpassung machte sich aus zwei wesentlichen Punkten erforderlich: Ermöglichung einer praktikableren Lieferung und Montage, Kostenoptimierung bei Material und Montage

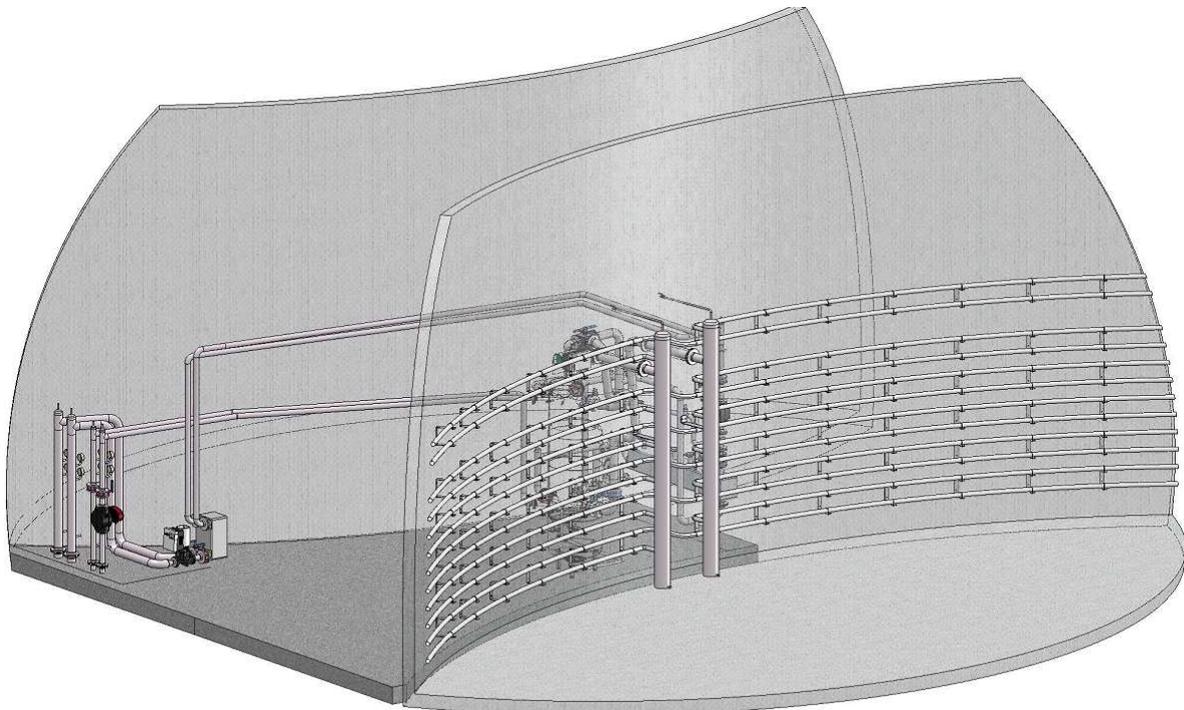


Abbildung 9: Ausschnitt Totalansicht Wärmeübertrager Nachgärer und Technikgebäude

Die Ausschreibung erfolgte in Form von Anfragen an qualifizierte Fachfirmen, getrennt in die Gewerke:

- Anlagenbau auf der Basis des Mengengerüsts und des Planungssatzes
- Elektrotechnik / MSR auf der Basis des R&I-Schemas und der Funktionsbeschreibung

Von jedem Gewerk wurden je 3 Angebote eingeholt. Dabei wurde darauf geachtet, dass regionale Firmen ausgewählt wurden, die sich im näheren Umkreis der Biogasanlage befinden.

Für den Anlagenbau sind das folgende Firmen:

1. Dr. Weiqel Anlagenbau GmbH, Siedlerweg 10, 39124 Magdeburg
2. Industrietechnik Barleben GmbH, Lindenallee 6, 39179 Barleben
3. ISB Ideal System Bau GmbH & Co. KG, An der Bahn 5, 38486 Apenburg-Winterfeld

Für die Elektrotechnik / MSR sind das folgende Firmen:

1. Fanalmatic Umwelttechnik und Industrieautomation GmbH, Cösitzer Weg 2, 06369 Weißandt-Gölzau
2. Hilbrecht & Schmidt GmbH Automatisierungs- und Elektroanlagen, Seestr. 8, 14974 Ludwigfelde OT Genshagen
3. ORmatic GmbH, Am Friedrichshain 22, 10407 Berlin

Entsprechend der eingegangenen Angebote sind die Angebotspreise (jeweils Gesamt-Nettopreis) nachfolgend aufgelistet:

Anlagenbau:

- | | |
|--|-------------|
| 1. Dr. Weiqel Anlagenbau GmbH: | 144.200,- € |
| 2. Industrietechnik Barleben GmbH: | 138.700,- € |
| 3. ISB Ideal System Bau GmbH & Co. KG: | 151.300,- € |

Elektrotechnik / MSR:

- | | |
|---|------------|
| 1. Fanalmatic Umwelttechnik und Industrieautomation GmbH: | 63.660,- € |
| 2. Hilbrecht & Schmidt GmbH: | 70.582,- € |
| 3. ORmatic GmbH: | 56.955,- € |

Ingenieurtechnische Begleitung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage:

Im Zuge des AP 3.6 erfolgte eine Prüfung und Auswertung der o. g. Angebote nach folgenden Kriterien:

- technische Schlüssigkeit
- Wirtschaftlichkeit
- kaufmännische Details

Die Ergebnisse sind in den beiden folgenden Tabellen (Tabelle 3 und Tabelle 4) abgebildet:

Tabelle 3: Auswertung der Angebote Anlagenbau

<u>Anlagenbau</u>	technische Schlüssigkeit			Wirtschaftlichkeit			kaufmännische Details			Wert
	30 %			50 %			20 %			
Bezugs-Note	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Dr. Weiqel Anlagenbau GmbH	x				x				x	0,62
Industrietechnik Barleben GmbH	x			x				x		0,90
ISB GmbH & Co. KG		x				x	x			0,52

Tabelle 4: Auswertung der Angebote Elektrotechnik / MSR

<u>Elektrotechnik / MSR:</u>	technische Schlüssigkeit			Wirtschaftlichkeit			kaufmännische Details			Wert
	30 %			50 %			20 %			
Bezugs-Note	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Fanalmatic Umwelttechnik und Industrieautomation GmbH		x			x			x		0,50
Hilbrecht & Schmidt GmbH		x				x	x			0,52
ORmatic GmbH	x			x					x	0,87

Schlussfolgerungen:

Im Ergebnis der Detailplanung (AP 3.1) liegt das wirtschaftlich günstigste Angebot allein für den Teil Anlagenbau bei netto 138.700 €. Dazu kommt noch der Teil Elektrotechnik / MSR, der noch einmal mit netto 56.955 € zu Buche schlägt.

Somit weist die daraus resultierende Investitionssumme von **195.655 €** für die Umrüstung der BGA Bergzow deutliche Mehrkosten (ca. +60 %) gegenüber der Kostenkalkulation der Antragsphase auf. Bei der Vorkalkulation der Kosten (Material, Unteraufträge für Installationsleistungen und Abschreibungen) im Rahmen der Antragstellung lag man noch bei 121.350 €.

Im Verlauf der Ausführungsplanung traten die Dimensionen des materiellen Aufwandes für die großtechnische Umsetzung des ThermoFlex-Verfahrens auf einer Realanlage langsam immer deutlicher zutage. Auch die Vorplanung in der ersten Projektphase (Variantenvergleich für die thermische Be- und Entladung des Nachgärers, siehe Kap. II.1.1.1 und II.1.1.2) konnte dies noch nicht aufzeigen.

Gründe hierfür sind in der großen Unsicherheit der zugrunde liegenden Datenlage bei der Projektanbahnung und zum Projektbeginn zu suchen. Das begann bei der Auswahl der Realanlage für die Umsetzung des ThermoFlex-Verfahrens. Bei der Antragstellung sollte es die Biogasanlage der Agrargenossenschaft Elbeland e.G. („Elbeland“) werden, die sich aber im Verlauf des Antragsverfahrens zurückzog. Stattdessen wurde die JSW Biogas als entsprechender Projektpartner gewählt. Die Vorkalkulation für Kosten war aber bereits mit der Antragstellung durch die bekannten Bedingungen der BGA der Agrargenossenschaft Elbeland vordefiniert. Die BGA der JSW Biogas war zu dieser Zeit eine für die Projektteilnehmer unbekannt Anlage. Erst im Rahmen der Planungsarbeiten traten sukzessive die veränderten Bedingungen zutage, die zu einem erhöhten Aufwand bei der Umsetzung des ThermoFlex-Verfahrens führen sollten. Die wesentlichen seien hier genannt:

- höhere Wärmelast (ca. 800 kW anstelle ca. 590 kW bei „Elbeland“)
- umfangreicheres Wärmenutzungskonzept (Nahwärmenetz, Trocknungsanlage, Beheizung der landwirtschaftlichen Anlage anstelle nur der Stallheizung bei „Elbeland“)
- durch den Vorrang der Trocknung in den Kampagne-Zeiten – Aufteilung der Wärmenutzung in 2 Temperaturebenen

Der hierfür zu betreibende technische Mehraufwand wie beispielsweise:

- größere Dimensionierung bei Maschinenteknik und Apparaten (z. B. Wärmeübertrager und Heizungspumpen)
- größere Leitungsdimensionen und Entfernungen
- Apparate zur hydraulischen Heizkreistrennung
- erheblicher Mehraufwand für Elektrotechnik und MSR weil,
 - a. ein komplexeres Wärmenutzungskonzept (3 Abnehmer, 2 Temperatur-Ebenen) vorliegt und
 - b. kein Prozessleitsystem (PLS) von buer (so wie bei „Elbeland“) zum Einsatz kommt, weshalb ein separates System für das ThermoFlex-Verfahren mit Datentransfer zum vorhandenen PLS verwendet werden muss.

war bei der Antragstellung zum Verbundprojekt ThermoFlex-WAVE noch nicht hinreichend abschätzbar. Erst durch die intensive F&E-Tätigkeit in diesem Projekt wurde es möglich, dazu die notwendigen Erkenntnisse zu sammeln.

Hinzu kommen spezifische Preissteigerungen bei den erforderlichen Komponenten und Materialien (insbes. Wärmeübertrager, Pumpen, Rohrleitungsmaterial) gegenüber dem Stand der Vorplanung.

Aufgrund der wie oben beschrieben resultierenden deutlichen Mehrkosten gegenüber der Vorkalkulation, wurde nach **alternativen Lösungsmöglichkeiten** für die Implementierung des ThermoFlex-Verfahrens bzw. die großtechnische Erprobung auf der BGA Bergzow gesucht. Dies erfolgte im Rahmen von AP 4.4 und wird im nächsten Kap. II.1.1.6 dokumentiert.

II.1.1.6 Maßnahmen zur technischen Optimierung des ThermoFlex-Verfahrens auf der Referenzanlage (AP 4.4)

Infolge der mit der Detailplanung der Umrüstung der BGA Bergzow gegenüber der Vorkalkulation deutlich höher veranschlagten Investitionssumme von ca. 196.000 €, wurde im Zuge von AP 4.4 nach alternativen Lösungsmöglichkeiten für die Implementierung des ThermoFlex-Verfahrens bzw. die großtechnische Erprobung auf der BGA Bergzow gesucht. Diese sind nachfolgend aufgezählt:

- a) „**Demonstrationsversuch**“ auf der BGA Bergzow (z. B. bei geringerer Wärmelast im Frühjahr) => welche Temperaturvariation ist heizungs- und prozesstechnisch möglich, wie entwickelt sich dabei die Prozessbiologie?
- b) „**Variante Wärmepumpe**“ => gezielte Temperaturvariation im „Nachgärer-Wärmespeicher“ nur im mesophilen Temperatur-Bereich (so dass die Leistung der vorhandenen Wärmeübertrager im Gärbehälter ausreicht), Wärmepumpe zur Anhebung des Temperaturniveaus für die Einspeisung in das Nahwärmenetz (während der Trocknungsphasen).
- c) „**Low-Cost-Lösung**“ => geringerer Zubau Nachgärer-Heizung, entsprechend leicht abgesenkter Temperaturbereich im ThermoFlex-Nachgärer (z. B. auf im Mittel 50°C).

Im Zuge der Grundlagenermittlungen zu diesen Lösungsansätzen hat sich Variante a („**Demonstrationsversuch**“) aufgrund ihrer Vorteile und unter Berücksichtigung des Projektzeitraumes als Vorzugsvariante herausgestellt.

Diese Variante „Demonstrationsversuch“ wurde zu einer „**ThermoFlex-Basislösung**“ dahingehend weiterentwickelt, dass nicht nur gezeigt werden soll, welche Temperaturvariationen im Nachgärer heizungs- und prozesstechnisch möglich sind und wie sich dabei die Prozessbiologie verhält. Zudem soll auch ein Ziel der ursprünglich vollumfänglich geplanten ThermoFlex-Umrüstung erreicht werden, indem die Warmhaltung des Fermenters während einer Trocknungskampagne allein durch Nutzung der in den Gärbehältern durch Temperaturanhebung über mehrere Tage gespeicherten Wärme erfolgen soll, womit mehr Wärme für die Trocknung verfügbar wird. Abhängig von der Jahreszeit bzw. Wärmelast (Behälterheizung und Nahwärmenetz) kann die für eine maximale Wärmeleistung von 800 kW ausgelegte Trocknungsanlage häufig nur mit Wärmeleistungen von höchstens 500 bis 600 kW betrieben werden.

Im Unterschied zur ursprünglich geplanten Lösung würde die Versorgung des Nahwärmenetzes dabei weiter über die BHKW-Abwärme erfolgen, womit nicht das gesamte Wärmepotenzial für die Trocknung erschlossen werden kann. Entscheidender Vorteil ist jedoch, dass keine Umrüstung des Heizungssystems nötig ist; d. h. es kann auch mit den vorhandenen Heizungseinrichtungen der Gärbehälter gearbeitet werden. Diese sind als innenliegende Mantelheizungen mit Edelstahlrohren DN 50 ausgeführt, wobei der Fermenter mit 4 Heizregistern über die doppelte Heizleistung (ca. 150 kW) des mit 2 Heizregistern ausgestatteten Nachgärers (ca. 75 kW) verfügt. Der Hydrolysebehälter ist mit 4 Heizregistern ausgerüstet, wobei die Heizleistung hier durch den kleineren Umfang des Behälters entsprechend geringer ausfällt (ca. 75 kW).

Die auf der Referenzanlage im Zuge von AP 4.4 geplante ThermoFlex-Basislösung zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Während der mehrtägigen Trocknungskampagne wird die Beheizung der Gärbehälter über die vorhandenen Heizeinrichtungen deaktiviert.
- Die Nahwärmeversorgung mit einem über die Heizsaison gemittelten Wärmebedarf von ca. 100 kW (inkl. Beheizung Ställe und Betriebsgebäude) erfolgt weiter über die BHKW-Abwärme.
- Der Wärmebedarf der Gärbehälter (Substrataufheizung und Verluste an den Behälterhüllen) beträgt in der Heizsaison ca. 150 kW und wird während der Trocknungskampagne über den „Nachgärer-Wärmespeicher“ abgedeckt.
- Dafür wird der Mittelwert der Gärtemperatur im Nachgärer moderat erhöht auf einen Bereich zwischen üblichen „mesophilen“ und „thermophilen“ Temperatureinstellungen, d. h. zwischen ca. 44 und 50°C (z. B. auf im Mittel 45°C).
- Diese Temperaturanhebung stellt den 1. Schritt und die Basis des Demonstrationsversuches dar und ist abhängig von der verfügbaren Heizleistung im Zusammenhang mit der Heizlast (insbesondere Außentemperatur) sowie auch von der Entwicklung der Prozessbiologie im Nachgärer.
- Die Machbarkeit aus prozessbiologischer Sicht wurde im kontinuierlichen Gärversuch 2020 aufgezeigt – es werden im Temperaturbereich < 50°C keine Prozessbeeinträchtigungen erwartet. Vielmehr wird die Prozessbiologie deutlich stabiler und leistungsfähiger sein, als in dem 2019 untersuchten erhöhten thermophilen Bereich von im Mittel ca. 54°C (vgl. Kap. II.1.4).
- Während der Trocknungskampagne wird der Fermenter mit der Wärme aus dem Nachgärer bei relativ geringen Temperaturschwankungen warmgehalten (ca. 42 - 43°C).
- Die Temperatur im Nachgärer variiert in dieser Zeit entsprechend der Speicherwirkung in einem Bereich von z. B. 44 - 46°C mit täglichen Änderungsraten von ca. 0,5 - 1 K/d.
- Die nötige Wärmezufuhr in den Fermenter kann durch Umpumpen von Nachgärerschläm in den Fermenter als zusätzliche „kurze Rezirkulation“ erfolgen, was mit Hilfe der entwickelten Wärmemodelle berechnet wurde. Prinzipiell ist das Umpumpen im Betrieb einfach umsetzbar, aber die verfahrenstechnischen Auswirkungen der zusätzlichen Schlämmezirkulation sind zu beachten.

- Um das zusätzliche Umpumpen von Nachgärerschläm in den Fermenter zu reduzieren, kann zudem der Hauptfermenter in die Wärmespeicherung einbezogen werden. Somit wird auch der Fermenter gezielt mit variabler Temperatur gefahren, soweit es dort nicht zu Prozessbeeinträchtigungen kommt. Bei günstigen Randbedingungen (wie bei geringerem Wärmebedarf im Sommer) kann so u. U. ganz auf das zusätzliche Umpumpen verzichtet werden. Dies wurde so erfolgreich in den Demonstrationsversuchen auf der Referenzanlage von Juni bis September 2021 praktiziert (siehe Kap. II.1.1.8).

Durch die Realisierung der Verfahrensvariante „ThermoFlex-Basislösung“ sind unter den o. g. Rahmenbedingungen für die Trocknung somit noch ca. 700 kW verfügbar - d. h. 150 kW mehr, als bisher, was einen nicht unerheblichen Nutzen für den Anlagenbetrieb bietet. So kann z. B. eine bisher 5 Tage dauernde Trocknung in bereits 4 Tagen abgeschlossen werden.

Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der ThermoFlex-Basislösung gegenüber der vollumfänglichen ThermoFlex-Umsetzung (vgl. Kap. II.1.1.5) auf der Referenzanlage aufgelistet:

Vorteile:

- Keine Nachrüstung der Heizungseinrichtungen in den Gärbehältern notwendig
- keine Behälteröffnung erforderlich
- Fermenter und Nachgärer mesophil, folglich keine Adaption an thermophiles Milieu nötig
- Demonstrationsversuch in relativ kurzer Zeit möglich

Nachteile:

- Nutzen für Anlagenbetrieb (Wärmespeicherung) limitiert
- bei ungünstigen Randbedingungen (z. B. im Winter) u. U. zusätzliches Umpumpen vom Nachgärer erforderlich, um die Abkühlung des Fermenters zu begrenzen
- keine „Generalüberholung“ der Heizungsanlage

Eine Steigerung der Leistung der ThermoFlex-Basislösung ist auf der BGA Bergzow durch moderate Nachrüstung von Heizregistern in den Gärbehältern möglich, ohne in den Bereich der Mehrkosten der vollumfänglichen ThermoFlex-Lösung zu kommen. Im Falle des Fermenters ist dies im Juni 2021 in Eigenleistung des Betreibers JSW geschehen, was die anschließende Durchführung der Demonstrationsversuche begünstigt hat (siehe Kap. II.1.1.8 und II.1.3.3).

Wie oben geschildert wurde die ThermoFlex-Basislösung im Zuge zweier **Demonstrationsversuche im Rahmen des Projektzeitraumes auf der BGA Bergzow** implementiert und erprobt, was in Kap. II.1.1.8 näher beschrieben wird.

II.1.1.7 Analyse möglicher Marktänderungen und Trends sowie der Entwicklung von Markthemmnissen, Aktualisierung der Markteinführungsstrategien; Validierung des Marktpotenzials sowie ökonomische und ökologische Bewertung des ThermoFlex-Verfahrens (zu AP 1.1, 3.6 und 4.5)

In Betrachtungen zu den allgemeinen **wirtschaftlichen, politischen und rechtlichen Randbedingungen**, die auch relevant für den erwarteten Markterfolg des ThermoFlex-Verfahrens sind, werden folgende, sich im Projektverlauf abzeichnende, Aspekte hervorgehoben:

- Zwei Hauptforderungen der Biogas-Branche wurden im Klimapaket 2019 verankert: Der Stabilisierungspfad im Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG), der die heute aus Biogas bereitgestellte Energiemenge auch langfristig fest schreibt sowie ein klares Bekenntnis zum Ausbau der GÜllenutzung.
- Verschiedenste fachrechtliche Änderungen erhöhen die Anforderungen an die Betreiber von Biogasanlagen. Dazu gehören: DüV, AwSV, TRAS 120, 44. BImSchV, TA- Luft.
- Perspektiven/Ziele der Branchenentwicklung:
 - Biogasaufbereitung und –einspeisung voranbringen (auch im Bestand),
 - bestehende und neue Anlagen flexibilisieren,
 - Wärmeauskopplung ausbauen,
 - verstärkter Einsatz ökologisch besonders wertvoller Einsatzstoffe (THG-Minderung!),
 - Koppelprodukte und Umweltdienstleistungen in Wert setzen und so den Bedarf finanzieller Unterstützung z. B. durch das EEG verringern.
- Mit dem KWKG, dem Gebäudeenergiegesetz und dem BMWi-Dialogprozess zu Wärmenetzen zeichnen sich gleich drei Einfallstore ab, die Bioenergie im Bereich der Wärme endlich gemäß ihren Potenzialen stärken.

Bereits in Kap. II.1.1.1 wurden u.a. folgende potenzielle **Markthemmnisse** (insbes. ökonomischer und rechtlicher Art) für eine ThermoFlex-Implementierung genannt: wirtschaftliche Situation einzelner Anlagenbetreiber, zu hoher Aufwand bei der Anpassung der Wärmeinfrastruktur am landwirtschaftlichen Standort, fehlende Technologieakzeptanz, (förder-)politische Unsicherheiten.

Als ein relevantes, aber fallspezifisch beherrschbares, ökonomisch-technisches Hemmnis hat sich bei den Detailplanungen im Projekt gezeigt, dass die für eine vollumfängliche ThermoFlex-Umrüstung erforderliche Nachrüstung von Wärmetauschern inkl. MSR-Technik zu beträchtlichen Mehrkosten führen kann (siehe Kap. II.1.1.5).

Im Zuge der Analysen möglicher prozesstechnischer Markthemmnisse für das ThermoFlex-Verfahren wird nachfolgend anhand der Beispielanlagen des Biogasmessprogramms II (BMP II) ein Überblick zu relevanten Belastungsparametern gegeben.

Wie im Zuge des Langzeit-Gärversuches des Projektpartners Hochschule Magdeburg-Stendal herausgestellt (siehe Kap. II.1.4.1), sind nicht nur die Raumbelastungen und Verweilzeiten entsprechend der Substratzufuhr in den Gärbehälter (oTS-Raumbelastung und Substratverweilzeit) wichtig für einen erfolgreichen Einsatz des ThermoFlex-Verfahrens. Bei unterschiedlichen Milieubedingungen für die Prozessbiologie im mesophilen Hauptfermenter und im

thermophilen Nachgärer gewinnt auch die hydraulische Verweilzeit entsprechend der gesamten Materialzufuhr in den jeweiligen Gärbehälter (d. h. Substrat + Rezirkulat) an Bedeutung.

Abbildung 10 zeigt die hydraulischen Verweilzeiten in den Hauptfermentern der im BMP II [BMP09] betrachteten mehrstufigen Biogasanlagen.

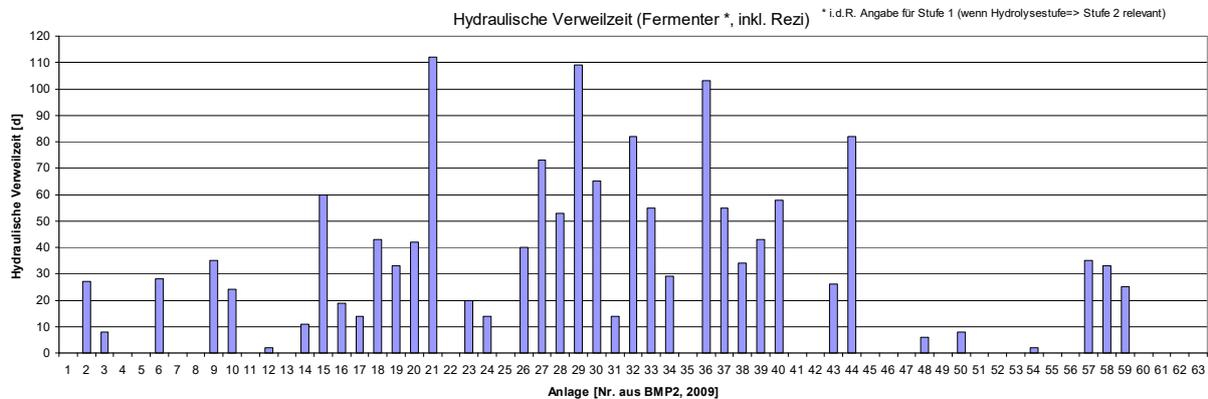


Abbildung 10: Darstellung der hydraulischen Verweilzeit im Hauptfermenter entsprechend der gesamten Materialzufuhr (d. h. ggf. inkl. Rezirkulat) für die im Biogasmessprogramm II betrachteten mehrstufigen BGA, ab Anlage 47 Trockenfermentation (Bild abgeleitet aus Anlagendaten im Anhang zum BMP II [BMP09])

Abbildung 10 kann entnommen werden, dass nur 5 von 38 zweistufigen Biogasanlagen (d. h. ca. 13%) hydraulische Verweilzeiten im Hauptfermenter von weniger als 10 Tagen aufweisen, wovon drei BGA mit Trockenfermentation arbeiten. Für weitere 6 Anlagen ergeben sich Verweilzeiten zwischen 10 und 20 Tagen. Die Relevanz des hier betrachteten Marktthemmnisses hydraulische Verweilzeit wäre demnach nicht entscheidend.

Interessant ist hier auch der Blick auf die Anlagen 50 und 54, welche im Messzeitraum mit einem mesophilen und hoch belasteten Fermenter (42-43°C) und einem Nachgärer im unteren thermophilen Temperaturbereich (50-52°C) arbeiteten. Auch wenn diese BGA Pfropfenstromfermenter mit Trockenfermentation aufweisen und nicht direkt vergleichbar mit den für ThermoFlex relevanten Nassfermentations-Anlagen sind, weisen die Daten doch darauf hin, dass eine Milieutrennung (mesophiler Fermenter und „moderat“ thermophiler Nachgärer) auch bei hohen Belastungen und hydraulischen Verweilzeiten < 10 Tagen funktionieren kann.

Um diese Betrachtungen zu ergänzen, wurden auch die mittleren Raumbelastungen mit organischer Trockenmasse (OLR) der jeweils ersten Stufen der im BMP II betrachteten Biogasanlagen analysiert. Dabei wurde deutlich, dass lediglich auf 11 der 45 Anlagen mit Nassfermentation die OLR aus dem Frischsubstrat in der ersten Stufe größer 5 kg oTS/(m³d) ist. Demnach waren weniger als 25 % der im BMP II ausgewerteten Anlagen mit Nassfermentation so hoch belastet, wie es aktuell die im Projekt ThermoFlex-WAVE betrachtete Beispiel-Biogasanlage Bergzow ist. Die meisten BGA weisen gemäß BMP II [BMP09] eine OLR im Bereich um die 3 kg oTS/(m³d) auf, welche auch als Basis für die Arbeiten im Vorläuferprojekt diente.

Der Parameter Ammonium-Stickstoff, welcher in hohen Konzentrationen (>3 500 mg/L, vgl. [FNR16]) insbesondere bei steigenden pH-Werten und steigender Temperatur mehr oder weniger hemmend wirkt, lag bei nur 10 der im BMP II betrachteten BGA im Ablauf der jeweils letzten Stufe in diesem höheren Bereich [BMP09]. Zudem weist die Prozessbiologie diesbezüglich häufig eine hohe Adaptionsfähigkeit auf (vgl. [FNR16]). Auch die Marktrelevanz dieses Belastungsparameters wäre nach dem Stand des BMP II als nicht entscheidend einzustufen.

Bewertung des globalen Erwärmungspotenzials des ThermoFlex-Verfahrens (Unterauftrag Cordes & Winterberg):

Zu den im Projektverlauf vorgenommenen Analysen möglicher Markthemnisse sowie zur vergleichenden ökologischen Bewertung des ThermoFlex-Verfahrens gehörten auch Betrachtungen zur Ökobilanzierung und **Bewertung des globalen Erwärmungspotenzials** des ThermoFlex-Verfahrens im Vergleich mit konventionellen Lösungen (Warmwasserspeicher). Diese Analysen wurden im Rahmen eines Unterauftrages der bue an die Cordes & Winterberg GbR erarbeitet, nachfolgende Ausführungen basieren auf dem entsprechenden Bericht der Cordes & Winterberg GbR [CW22a]:

Um eine Einschätzung der ökobilanziellen Vorteile des ThermoFlex-Verfahrens zu ermöglichen, war eine aufwändige Ökobilanz auf Basis der ISO-Normen 14040 und 14044 im Projekt nicht erforderlich. Diese wäre mit der Markteinführung des Verfahrens, wenn die verwendeten Materialien hinreichend genau spezifiziert worden sind, wünschenswert.

Stattdessen erfolgte eine formell vereinfachte Bilanzierung des globalen Erwärmungspotenzials der zu vergleichenden Varianten. Berechnet wird die Emissionsminderung von CO₂-Äquivalenten des ThermoFlex-Verfahrens gegenüber einem konventionellen Warmwasserspeicher. Als Datengrundlage dienen die Planungen der bue Anlagenbau GmbH zur vollumfänglichen Implementierung des Verfahrens an der Biogasanlage Bergzow (siehe Kap. II.1.1.5).

Als Referenzsystem der ökobilanziellen Bewertung des Thermoflex-Verfahrens wird ein konventioneller Warmwasserspeicher herangezogen. Die Kombination von Biogasanlagen mit Wärmespeichern ist mit der Einführung der Flexibilisierungsoption bedeutend geworden [FNR18]. Die kostengünstigste Variante ist der sensible Wärmespeicher [STER17], der im Kontext der Biogaserzeugung in der Regel mit Wasser betrieben wird. Für die Biogasanlage Bergzow wird ein Speichervolumen von 500 m³ zugrunde gelegt [BER20]. Für Speicher dieser Größenordnung werden vor allem baustellengefertigte, drucklose Stahl- oder Stahlbetonbehälter verwendet [BER20], [STER17], die in landwirtschaftlichen Betrieben in der Regel freistehend und oberirdisch errichtet werden. GfK-Behälter sind noch die Ausnahme. Die Behälter werden mit Schaumstoffen, Mineralwolle, Schaumglas oder Glaswolle isoliert [STER17].

Die wesentlichen Faktoren, die die Ökobilanz eines Wärmespeichers beeinflussen, sind der folgenden Abbildung 11 zu entnehmen.

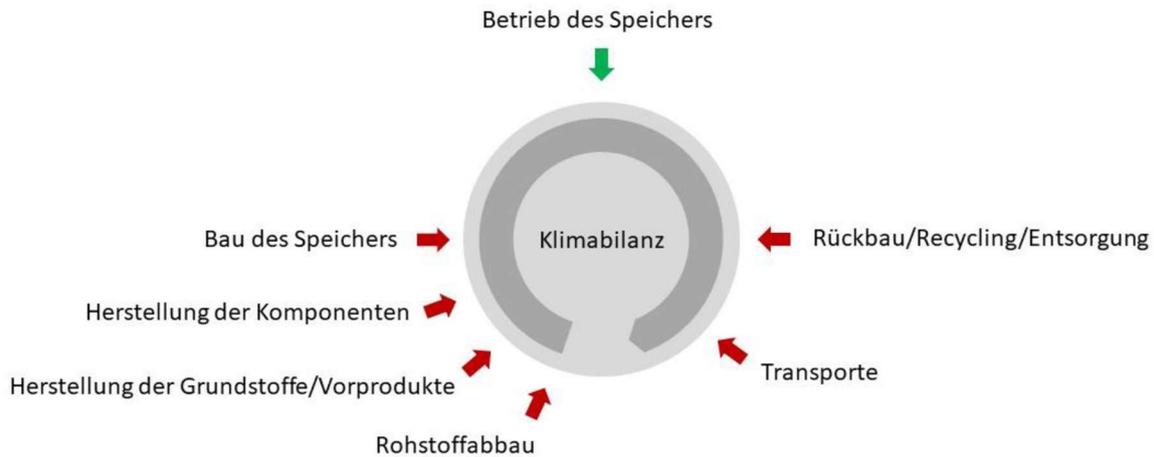


Abbildung 11: Für die Ökobilanz eines Wärmespeichers relevante Faktoren. Der grüne Pfeil symbolisiert einen positiven, rote Pfeile einen negativen Einfluss auf die Bilanz. (Abbildung: Cordes+Winterberg 2020)

Die verwendete Datenbank ÖKOBAUDAT des BMI [ÖKO20] umfasst jedoch für die meisten Materialien nicht das Erwärmungspotenzial, das durch den Bau des Speichers verursacht wird. Auch der ökologische Effekt des Speicherbetriebs wird hier nicht betrachtet.

Die Ökobilanzierung kann sich auf diejenigen Verfahrensschritte beschränken, die die großtechnische Biogasanlage mit konventionellem Warmwasserspeicher von der ThermoFlex-Biogasanlage unterscheiden. Dies ist vor allem der Speicherbehälter mit seinem Fundament. Alle anderen Baugruppen (Wärmetauscher und Verrohrung, MSR) sind für beide Verfahrensvarianten in erster Näherung als baugleich zu betrachten, so dass sich ihre Ökobilanzen im Vergleich neutralisieren. Unterschiede hinsichtlich der Abdichtung und Beschichtung hängen davon ab, ob der ThermoFlex-Wärmespeicher (der Nachgärer) mit Materialien ausgestattet werden muss, die an die Speicherfunktion angepasst sind. Aufgrund der vergleichsweise geringen Materialmassen können diese Baugruppen jedoch vernachlässigt werden.

Als **Referenz** dient ein **500 m³-Stahlspeicher**, wie er zurzeit im Zusammenhang mit der Flexibilisierung von Biogasanlagen häufig eingesetzt wird [BER20], [KRI18]. Die technischen Daten des Referenzbehälters sind Tabelle 5 zu entnehmen. Die Massen der wesentlichen Baustoffe sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 5: Technische Daten und Materialien des konventionellen Warmwasserspeichers, der als Referenzanlage des ThermoFlex-Speichers Bergzow dient (beschränkt auf die bilanziell relevanten Materialien)

Spezifikation	Wert/Typ	Informationsquelle
Flüssigkeitsvolumen	500 m ³	[BER20]
Höhe der Flüssigkeitssäule	14 m	[KRI18]
Durchmesser der Flüssigkeitssäule (Speicher-Innendurchmesser)	6,76 m	[KRI18]
Behälterzylinderhöhe	15 m	-
Behälteraußendurchmesser	6,86 m	-
Mantelmaterial	Stahl S235JRG2	[KRI18]
Manteldicke	5 mm	[KRI18]
Bodenmaterial	Stahl	[KRI18]
Bodenblechdicke	6 mm	[KRI18]
Material Behälterabdeckung	Stahl	[KRI18]
Dicke der Behälterabdeckung	5 mm	[KRI18]
Isolationsmaterial	Polyurethan-Granulat	[URB18]
Dicke der Mantelisoliation	0,3 m	[URB18]
Dicke der Bodenisoliation	0,2 m	[URB18]
Dicke der Abdeckungsisoliation	0,4 m	[URB18]
Schüttdichte	40-50 kg/m ³	[WAG20]
Außenverkleidung	Aluminium, lackiert	[SCH20]
Dicke der Außenverkleidung	0,5 mm	[SCH20]
Beschichtung der Außenverkleidung	Polyesterlack, 25 µm	-
Fundamentdurchmesser	8,8 m	[BER20]
Fundamentdicke	0,8 m	[BER20]
Fundamentmaterial	Stahlbeton, Beton C25/30	[BER20], IZ Beton 2020
Stahlanteil des Fundaments	4 Masse-%	-

Tabelle 6: Massen der wesentlichen Baustoffe des konventionellen Warmwasserspeichers, der als Referenzanlage des Thermoflex-Speichers Bergzow dient (beschränkt auf die bilanziell relevanten Materialien; Daten auf Basis der vorstehenden Tabelle)

Material	Masse bzw. Volumen
Stahl Wasserbehälter	16,0 t
Isolationsmaterial	122 m ³
Trapezbleche Außenverkleidung	0,55 t
Farbeschichtung der Außenverkleidung	0,015 t
Beton des Fundaments	48,7 m ³
Stahl des Fundaments	4,67 t

Den Berechnungen liegen folgende vereinfachende Annahmen zugrunde:

1. Der leicht konische Behälterkopf wurde als Kreisfläche berechnet.
2. Masse der kleinteiligen Konstruktionselemente (Streben, Schrauben etc.) aus Stahl: 500 kg
3. Zylindermantelfläche Trapezbleche berechnet als glatter Zylinder, geschätzter Flächenzuschlag: 20 %
4. Berechnung der Betonmasse auf Basis der Dichteangabe aus [ÖKO20] – keine Berücksichtigung des Stahlanteils

Für das **ThermoFlex-Verfahren** ist hinsichtlich der Ökobilanzierung lediglich der Wärmetauscher (Warmwasser Fermenter/Nahwärme) relevant, der entsprechend der Planung der vollumfänglichen Lösung (vgl. Kap. II.1.1.5) im vorhandenen Nachgärer verlegt wird. Die Massen der wesentlichen Bauteile sind der folgenden Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Massen der wesentlichen Bauteile, die für den Umbau der BGA Bergzow zur ThermoFlex-Biogasanlage erforderlich sind (beschränkt auf die bilanziell relevanten Materialien; Daten: [BER20]).

Material	Masse (t)
Rohre Niro-Flex CNW 60/66 (System BRUGG), 6 x 2 x 67 m, Edelstahl	1,0
Wandhalter, 400 Stck., Stahl	1,0
Rücklaufverteiler DN 200 (DIN 2448-219), 1 x 2,9, Stahl	0,12

Die Baustoff-bezogenen Daten zum globalen Erwärmungspotenzial sind Tabelle 8 zu entnehmen. Die Datengrundlagen der Datenbank ÖKOBAUDAT des BMI enthalten in Abhängigkeit von der Art der Baustoffe teilweise unterschiedliche Phasen des Herstellungs-, Nutzungs- und Wiederverwertungszyklus. So werden bei einigen Baustoffen (z. B. Beton) die Umweltauswirkungen der Bautätigkeiten berücksichtigt, bei anderen nicht. Dennoch ermöglicht die Datenbank eine gute Orientierung, da die Datensammlung auf eine möglichst weitgehende Vergleichbarkeit der Daten abzielt.

Tabelle 8: Globales Erwärmungspotenzial (kg CO₂-Äquivalente/kg oder m³) der wesentlichen Baustoffe des konventionellen Warmwassertanks (Referenz) sowie des ThermoFlex-Systems der Biogasanlage Bergzow. (beschränkt auf die bilanziell relevanten Materialien; Daten: [ÖKO20])

Baugruppe	Material	Einheit	Erwärmungspotenzial	Recyclingpotential	Bilanz	ÖKOBAUDAT Gliederungsnummer
konventioneller Warmwasserspeicher (Referenz)						
Behälter	Stahl	kg CO ₂ -Äq./kg	2,68	-1,576	1,1	4.1.04
Isolation	Polyurethan*	kg CO ₂ -Äq./m ³	1.426,64	-250	1.176,64	2.4.04*
Behälterverkleidung	Aluminium	kg CO ₂ -Äq./kg	10,46	-7,89	2,57	4.3.01
	Polyesterlack	kg CO ₂ -Äq./kg	5,78	-0,3212	5,46	5.6.04
Fundament	Bewehrungsstahl	kg CO ₂ -Äq./kg	0,69	o. A.	-	4.1.02
	Beton C25/C30	kg CO ₂ -Äq./m ³	213,09	-21,4	191,69	1.4.01
Thermoflex-System						
Wärmetauscher	Edelstahl	kg CO ₂ -Äq./kg	3,43	-0,66	2,77	4.2.01

* Für das nach Urbaneck (2018) verwendete Polyurethan-Schüttgut in der ÖKOBAUDAT-Datenbank keine Daten aufgeführt sind, wurde hilfsweise der Datensatz für PIR-Hartschaum verwendet

o. A.: ohne Angabe

Die rechnerische Zusammenführung der Daten zu den benötigten Baumassen (Tabelle 6 und Tabelle 7) sowie der stoffspezifischen Daten der Tabelle 8 ergibt die **absoluten globalen Erwärmungspotentiale der beiden verglichenen Anlagenvarianten**. Diese Daten sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Globales Erwärmungspotenzial (t CO₂-Äquivalente) des konventionellen Wasserspeichers und des ThermoFlex-Systems der BGA Bergzow sowie ihrer wesentlichen Baugruppen. Der Anlagenbau (Baustelleneinrichtung, Anlagenerrichtung) wurde nicht berücksichtigt (beschränkt auf die bilanziell relevanten Materialien)

Baugruppe	Material	Einheit	Erwärmungspotenzial	Recyclingpotential	Bilanz
konventioneller Warmwasserspeicher		t CO ₂ -Äq.	236	(61,1)	(173)
Behälter	Stahl	t CO ₂ -Äq.	42,9	25,2	17,7
Isolation	Polyurethan	t CO ₂ -Äq.	174	30,5	144
Behälterverkleidung	Aluminium	t CO ₂ -Äq.	5,75	4,34	1,41
	Polyesterlack	t CO ₂ -Äq.	0,087	0,005	0,082
Fundament	Bewehrungsstahl	t CO ₂ -Äq.	3,22	o. A.	-
	Beton C25/C30	t CO ₂ -Äq.	10,4	1,04	9,36
		t CO ₂ -Äq.	7,55	1,45	6,1
Wärmetauscher	Edelstahl	t CO ₂ -Äq.	7,55	1,45	6,1

Der ökobilanzielle Vergleich zeigt erwartungsgemäß, dass durch die Nutzung des *Thermoflex*-Konzepts das globale Erwärmungspotenzial der Errichtung des Wärmespeichers deutlich geringer ausfällt. Ein Erwärmungspotenzial von 6,1 t CO₂-Äquivalenten des Umbaus der BGA Bergzow zum *Thermoflex*-System stehen 173 t CO₂-Äquivalenten gegenüber, die durch den Bau eines 500 m³-Wärmespeichers verursacht werden.

Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass das Erwärmungspotenzial des konventionellen Wärmespeichers vor allem durch die Wärmedämmung aus Polyurethan verursacht wird und dass dieser Wert auf einer Hilfsannahme beruht: Da ÖKOBAUDAT das nach Urbaneck (2018) ausgewählte PU-Granulat nicht beschreibt, wurden hilfsweise Daten für PIR-Hartschaum verwendet, die ein sehr hohes Erwärmungspotenzial ausweisen. Dieser Mangel wird durch die Fortsetzung der Arbeiten an der Ökobilanz zu beseitigen sein.

Das wesentliche Merkmal des ThermoFlex-Verfahrens ist die Möglichkeit, die erzeugte Wärme des BHKW einer flexibilisierten Biogasanlage zu speichern, ohne einen Wärmespeicher errichten zu müssen. Aus ökologischer Sicht ergibt sich mit der o. g. Bilanzierung, das war vom Konzept her zu erwarten, ein nicht unerheblicher Vorteil durch die eingesparten Material- und Energieressourcen – zumal die für den Bau von Wasserspeichern benötigten Materialien (hier vor allem Stahl, Beton und Wärmeisulationsmaterial) unter den heutigen Bedingungen mit erheblichen Umweltauswirkungen erzeugt und verbaut werden.

Mit einem globalen Erwärmungspotenzial von 6,1 t CO₂-Äquivalenten bei Implementierung der bilanziell relevanten Anlagenkomponenten schneidet das ThermoFlex-Verfahren in Bergzow im Vergleich zum konventionellen 500 m³-Warmwasserspeicher, der bei der Errichtung durch ein Erwärmungspotenzial von 173 t CO₂-Äquivalenten (ohne Berücksichtigung des Bewehrungsstahl-Recyclings) gekennzeichnet ist, deutlich günstiger ab.

Da aber vor allem das Isolationsmaterial Polyurethan die Umweltbilanz des Referenzsystems belastet, besteht dafür noch Verbesserungspotenzial, z. B. durch den Einsatz umweltfreundlicherer Materialien. Andererseits profitiert der konventionelle Wärmespeicher im Vergleich mit ThermoFlex von der Tatsache, dass ÖKOBAUDAT die Baustellenprozesse nur bei einigen Baustoffen berücksichtigt (hier beim Beton). Die Berücksichtigung des globalen Erwärmungspotenzials der Verarbeitung auch der anderen Materialien würde die Ökobilanz des konventionellen Warmwasserspeichers weiter verschlechtern.

Ein weiterer, hier nicht bilanzierter Vorteil des ThermoFlex-Verfahrens ist der mit dem Bau eines Wärmespeichers verbundene Flächenverbrauch.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass **ThermoFlex aus der Sicht des Klimaschutzes dem Bau eines konventionellen Wasserspeichers deutlich überlegen** ist. Auch die Wahl eines anderen Isolationsmaterials wird daran nichts ändern [CW22a].

II.1.1.8 Projektabschluss mit Auswertung der großtechnischen Erprobung an der Referenzanlage zur Validierung des ThermoFlex-Verfahrens (AP 4.6)

Konzept der großtechnischen Erprobung:

Bereits im Kap. II.1.1.6 wurde die **ThermoFlex-Basislösung** für die Implementierung des ThermoFlex-Verfahrens und großtechnische Erprobung auf der **Referenzanlage BGA Bergzow** vorgestellt. Demgemäß soll die Warmhaltung des Fermenters während einer Trocknungskampagne allein durch Nutzung der in den Gärbehältern durch Temperatur-anhebung über mehrere Tage gespeicherten Wärme erfolgen, womit mehr Wärme für die Trocknung verfügbar wird. So kann z. B. eine bisher 5 Tage dauernde Trocknung in bereits 4 Tagen abgeschlossen werden.

Diese, in Kap. II.1.1.6 detaillierter vorgestellte Lösung, wurde in der letzten Projektphase weiterentwickelt und in enger Zusammenarbeit mit dem Projektpartner JSW Biogas (vgl. Kap. II.1.2.1) an die speziellen Bedingungen der Erprobung auf der BGA Bergzow angepasst und konkretisiert, was insbesondere folgende Punkte betrifft:

- Die Wärmespeicherung erfolgt nicht nur im Nachgärer sondern auch im Hauptfermenter. Somit wird auch der Fermenter gezielt mit variabler Temperatur gefahren.
- Dafür wird der Sollwert der Gärtemperatur (Fermenter und Nachgärer) moderat erhöht von 43°C (übliche Betriebseinstellung) auf bis zu 46°C (in Schritten von bis zu 0,5 K/d).
- Die im Nachgärer gespeicherte Wärme wird über die Rezirkulation in üblicher Höhe (ca. 4-fache Menge des Substratinputs) unterstützend in den Fermenter geführt. Ein zusätzliches Umpumpen von Nachgärerschläm in den Fermenter als „kurze Rezirkulation“ ist somit zunächst (bei der Erprobung in der warmen Jahreszeit) nicht erforderlich.
- Während der Trocknungskampagne wird die Temperatur in den Gärbehältern durch die ausgeschaltete Behälterheizung zurückgehen, was bei den sommerlichen Außentemperaturen im gewählten Versuchszeitraum relativ langsam passiert. Sollte die Temperatur im Fermenter 42°C unterschreiten, wird die Beheizung wieder aktiviert.
- Die Beheizungseinrichtungen des Fermenters wurden Mitte Juni 2021 mit zwei zusätzlichen innenliegenden Mantelheizungen ausgestattet, wobei der Fermenter jetzt über eine Heizleistung von ca. 225 kW verfügt, was die Temperaturanhebung zu Beginn des Versuches begünstigt (vgl. Kap. II.1.2.1).

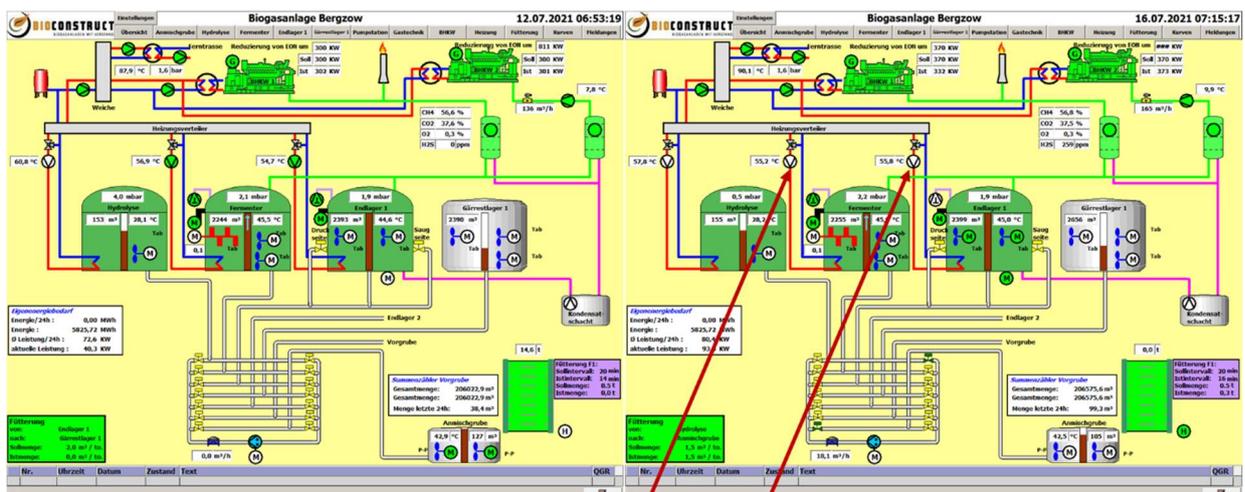
Die Auswertung der auf dieser Basis durchgeführten großtechnischen Erprobung erfolgte gemeinsam durch alle Projektbeteiligten im Rahmen von AP 4.6 und wird nachfolgend dokumentiert:

Durchführung und Auswertung der großtechnischen Erprobung:

Die großtechnische Erprobung der geschilderten Verfahrensvariante „ThermoFlex-Basislösung“ erfolgte auf der Referenzanlage von Juni bis September 2021 und somit bei günstigen Randbedingungen in der warmen Jahreszeit. Die Erprobung umfasst in diesem Zeitrahmen zwei Demonstrationsversuche.

Der **1. Demonstrationsversuch** wurde Ende Juni 2021 mit der Temperaturerhöhung über 43°C begonnen und endete nach ca. einem Monat. Dabei wurden die Temperaturen bis zum 16.07.2021 im Fermenter auf 45,9°C und im Nachgärer auf 45°C angehoben. Vom 16. bis zum 21.07.2021 erfolgte eine Trocknungskampagne (ca. 60 t Maissilage), wobei die Heizungen im Fermenter und im Nachgärer ausgeschaltet wurden (Abbildung 12). In diesem Zeitraum von 5 Tagen sinken die Temperaturen in den unbeheizten Gärbehältern auf 43,6°C ab, um dann mit zugeschalteten Heizungen bis Ende Juli auf ca. 44°C anzusteigen (siehe Abbildung 13). Dieses Temperaturniveau wurde in beiden Gärbehältern bis zum nächsten Demonstrationsversuch gehalten (vgl. unten).

Ab Ende August 2021 wurde mit einem **2. Demonstrationsversuch** begonnen, indem die Temperaturen in den Gärbehältern erneut angehoben wurden. Dabei wurden die Temperaturen bis zum 14.09.2021 im Fermenter auf 45,6°C gesteigert, während im Nachgärer in diesem Versuch nur eine geringfügige Erhöhung (auf 44,3°C) erfolgte. Vom 14. bis zum 17.09.2021 erfolgte eine kleinere Trocknungskampagne (ca. 50 t Luzerne), wobei die Heizungen im Fermenter und im Nachgärer wiederum ausgeschaltet wurden. In diesem Zeitraum von 3 Tagen sinken die Temperaturen in den unbeheizten Gärbehältern auf 44,1°C ab, womit das Ausgangsniveau der Phase vor dem „Hochheizen“ erreicht wurde (siehe Abbildung 14).



Heizungspumpen Fermenter und Nachgärer zum Trocknungsbeginn ausgeschaltet

Abbildung 12: Ausschaltung der Heizungspumpen Fermenter und Nachgärer zum Beginn der Trocknung

Die folgenden Abbildungen zeigen für den jeweiligen Demonstrationsversuch zusammenhängend die **Zeitverläufe** der im Prozessleitsystem aufgezeichneten Temperaturen im Fermenter und Nachgärer sowie des Methangehaltes im Biogas und der gesamten Methanproduktion (Abbildung 13 und Abbildung 14). Die Methanproduktion wurde entsprechend dem in Kap. II.1.4.2 geschilderten Verfahren berechnet aus den gemessenen Strommengen und Methangehalten sowie der auslastungsabhängig ermittelten elektrischen Wirkungsgrade der beiden BHKW.

T-Anhebung bis 45,9°C

Trocknung v. 16.-21.7.21

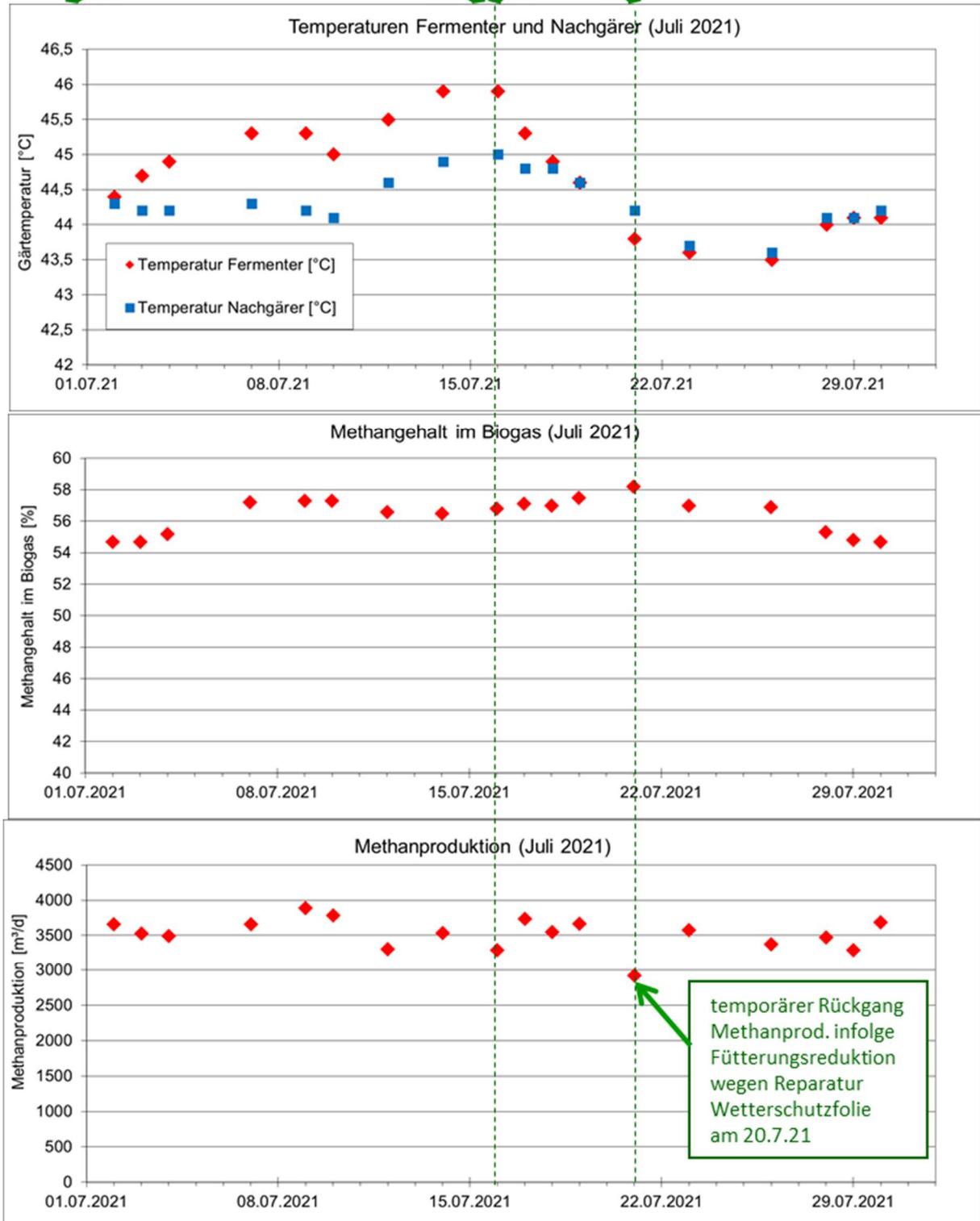


Abbildung 13: 1. Demonstrationsversuch im Juli 2021 mit Zeitverläufen der Temperaturen im Fermenter und Nachgärer (oben), des Methangehaltes im Biogas (Mitte) und der täglichen Methanproduktion der BGA (unten).

T-Anhebung bis 45,6°C

Trocknung v. 14.-17.9.21

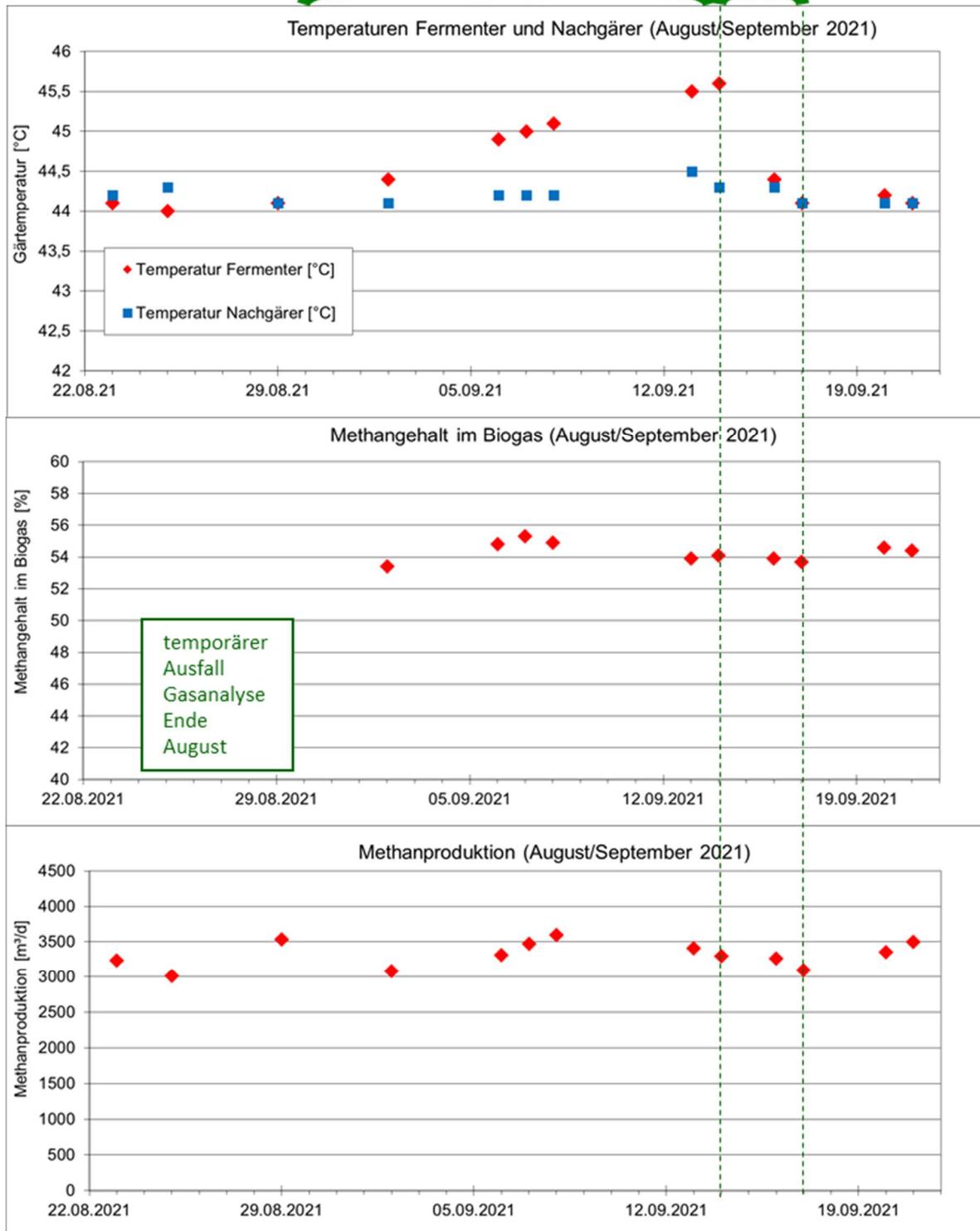


Abbildung 14: 2. Demonstrationsversuch im August/September 2021 mit Zeitverläufen der Temperaturen im Fermenter und Nachgärer (oben), des Methangehaltes im Biogas (Mitte) und der täglichen Methanproduktion der BGA (unten).

Die zusammenhängende Betrachtung der Abbildungen verdeutlicht für beide Demonstrationsversuche, dass die Temperaturvariationen im Fermenter und im Nachgärer in einem Bereich von über 2 K mit Änderungsraten von ca. $\pm 0,3$ bis $\pm 0,5$ K/d zu keinerlei Beeinträchtigungen

des **Methangehaltes** im Biogas (lag zwischen ca. 54 und 58 %) sowie der **Methanproduktion** (zwischen ca. 3000 und 3800 m³/d) der BGA führten. Auch die hier nicht grafisch dargestellten Labormessungen weisen auf eine im gesamten Erprobungszeitraum **stabile Prozessbiologie** hin. So wurden z. B. **FOS/TAC-Werte** im Fermenter von weniger als 0,3 gemessen (0,26 am 07.07.21; 0,29 am 16.08.21; 0,27 am 14.09.21 und 0,24 am 22.09.21), was im unteren Bereich der üblichen FOS/TAC-Werte des Anlagenbetriebes liegt (vgl. auch Kap. II.1.3.3).

In den Demonstrationsversuchen wurde gegenüber der ursprünglich geplanten ThermoFlex-Lösung insoweit Neuland betreten, indem die Temperatur auch im (höher belasteten) Hauptfermenter gezielt variiert wurde, um einen größeren Wärmespeichereffekt zu erzielen, wobei der thermophile Bereich > 50°C hier gemieden wurde. Zusätzlich untermauert werden die o. g. Aussagen zum stabilen Prozessverhalten in den Versuchen durch erste Zwischenergebnisse aus dem laufenden Projekt „flexigast“ (FKZ: 03EI5424) - an dem die BUE sowie die HS beteiligt sind - wobei auch bei deutlich größeren Schwankungen der Temperatur im mesophilen Hauptfermenter keine Prozessbeeinträchtigungen auftraten.

Die mittlere Methanproduktion lag auf der BGA Bergzow im Juli 2021 mit ca. 3520 m³/d etwas unter der in der detaillierten Analyse für das Jahr 2018 bestimmten Methanmenge (3650 m³/d, siehe Kap. II.1.4.2), was in den Nachwirkungen der Fermenteröffnung in der 2. Juniwoche begründet ist. Hinzu kam ein temporärer Rückgang der Methanproduktion am 20.07.21 infolge einer Fütterungsreduktion wegen einer Reparatur der Wetterschutzfolie des Fermenters. Der zweite Demonstrationsversuch fiel in den Zeitraum der Umstellung auf die neue Maissilage im September mit zeitweise reduzierter Fütterung, womit hier im Mittel nur 3320 m³/d Methan produziert wurden. Diese Defizite sind somit nicht den Bedingungen der Demonstrationsversuche zuzuordnen. Auch die Schwankungen der Methanproduktion waren relativ gering (Standardabweichungen: 228 m³/d im 1. Demonstrationsversuch und 163 m³/d im 2. Demonstrationsversuch).

Die **Trocknung** von 60 t Maissilage während des 1. Demonstrationsversuche konnte infolge der um die Gärbehälterbeheizung verminderten Wärmelast und der damit zusätzlich für die Trocknungen bereitgestellten Wärmeleistung **auf 5 Tage verkürzt** werden, während die durchschnittliche Trocknungsdauer für Maissilage (bei vergleichbaren Mengen) 2021 bei ca. 7 Tagen lag. Im 2. Demonstrationsversuch wurden sogar nur 3 Tage für die Trocknung benötigt, wobei hier allerdings infolge des abweichenden Trocknungsgutes (50 t Luzerne) keine direkte Vergleichbarkeit gegenüber der regelmäßigen Maissilage-Trocknung gegeben ist.

Im Ergebnis der beiden Demonstrationsversuche konnte demnach gezeigt werden, dass alle **Zielstellungen der ThermoFlex-Basislösung auf der BGA erreicht** wurden:

- mehr verfügbare Wärme für die Trocknung durch Wärmespeicherung in den Gärbehältern vor den Trocknungskampagnen,
- dadurch Verkürzung der Trocknungskampagnen um mindestens einen Tag möglich,
- keine Beeinträchtigung der Prozessbiologie und des Methanertrages bzw. der Substrat-effizienz durch die variablen Gärtemperaturen,
- aufwandsarme Umstellung auf das Verfahren.

Somit wurden auch die wesentlichen Ziele des ThermoFlex-Verfahrens in der großtechnischen Erprobung auf der Referenzanlage mit einer Reihe von Modifikationen im Rahmen des Projektes erreicht (s. Kap. I.3 und II.4).

II.1.1.9 Etablierung eines molekularbiologischen Verfahrens zur Überprüfung der Lebensfähigkeit der Mikroorganismen während des Anaerobprozesses bei thermischem Stress (Unterauftrag GMBU 190614/BIO 01)

Im Rahmen einer FuE-Dienstleistung der Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien e.V. (GMBU e.V.) bestand u. a. die Aufgabe in der Etablierung eines molekularbiologischen Verfahrens zur Überprüfung der Lebensfähigkeit der Mikroorganismen während des Prozesses. Die folgenden Ausführungen basieren auf dem entsprechenden Bericht der GMBU e.V. [GMBU22]. Der Fokus wurde hierbei auf die PCR basierte (PCR: Polymerase-Kettenreaktion) und später auf die qPCR (quantitative PCR) basierte Detektion methanogener Archaeen, extrahiert aus Faulschlammproben eines Nachgärers, gelegt.

Im Zuge des PCR-basierten Nachweises wurden Oligonukleotide recherchiert und bezüglich ihrer Bindungsspezifität mit Hilfe von Datenbanken und Sequenzvergleichen geprüft. Des Weiteren wurden Faulschlamm-Proben unter verschiedenen Stressbedingungen im Labor-Batchsystem kultiviert, um mit semiquantitativen PCR-Analysen den Einfluss entsprechender Stresssituationen im Vergleich zu unter Standardbedingungen kultivierten Proben nachzuweisen. Aufgrund der Zielstellung des Projektes wurden zum einen Proben bei 75°C kultiviert (übermäßig hoher thermischer Stress) und zum anderen unter einer stetigen Begasung mit Luftsauerstoff (Aerobstress) fermentiert. Diese Maßnahmen sollten im Zuge der Methodenentwicklung Extremfälle simulieren, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Inaktivierung eines in PCR-basierten Nachweisen detektierbaren Teils der methanogenen Spezies führen.

Schlussfolgernd aus den molekularbiologischen Analysen konnten die aus der Temperaturerhöhung resultierenden Veränderungen des mikrobiologischen Status ermittelt werden. Hierbei wurde ersichtlich, dass eine Erhöhung der Temperatur um mehr als 20 K (ausgehend von der Standardtemperatur von 40 °C) für zwei Wochen zu einer Schädigung methanogener Organismen führt. Eine Schädigung der methanbildenden Organismen würde zu Einbußen in den Methanausbeuten führen. Des Weiteren führte extremer Thermostress bei 75°C zu einer irreversiblen Schädigung der methanogenen Organismen. Die Untersuchungen brachten ebenso hervor, dass spezifische methanbildende Vertreter unter hohen Temperaturen, im Vergleich zu anderen methanogenen Spezies geringere Verluste zeigten.

Somit konnte eine molekularbiologische Methode zur Ermittlung des mikrobiellen Status in Biogasanlagen unter Verwendung von PCR/qPCR für prozessbegleitende Untersuchungen zur Mikroorganismenabundanz etabliert werden. Dies stellt eine analytische Möglichkeit dar, bei Wirkung von Störgrößen auf das System bzw. bei undefinierten Prozesszuständen eine Ursachensuche auf mikrobiologischer Ebene zu unterstützen. Diese Methodik kann somit auch zum begleitenden Prozessmonitoring bei der Umstellung von BGA auf das ThermoFlex-Verfahren eingesetzt werden.

II.1.2 Teilvorhaben 2: Anpassung der modellbasierten Regelung für die großtechnische Erprobung und Validierung des ThermoFlex-Verfahrens, Simulation von Verfahrensvarianten (Thorsis Technologies GmbH)

II.1.2.1 Optimierung der modellbasierten Regelung des ThermoFlex-Verfahrens und der Überwachung des biologischen Prozesses (AP 1.5)

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1.5: „Optimierung der modellbasierten Regelung des ThermoFlex-Verfahrens und der Überwachung des biologischen Prozesses“ wurden die geplanten Anpassungen und Vereinfachungen von Modellen durchgeführt. Es wird dabei aufgrund verschiedener Ansätze, Gleichungen und Ziele der Simulation unterschieden zwischen der Modellierung des **Wärmemanagements** und der **Prozessbiologie**. Die Arbeiten erfolgten auf Basis des plattformunabhängigen Simulationsprogramms Simba#biogas [SIM18]. Die dort hinterlegten Anaerobmodelle ADM1xpd und ADM1da [OGU13] sind Modifikationen des etablierten ADM1 [BAT02] und beschreiben die vier Prozessphasen der anaeroben Fermentation durch eine mikrobielle Gemeinschaft unter Sauerstoffausschluss. Diese vier Abbauschritte werden durch biochemische sowie physikalisch-chemische Reaktionen der Ion-Assoziation/Dissoziation und des Gas-Flüssigkeits-Transfers beschrieben. Wichtige Aspekte der Modelle sind die verschiedenen Inhibitionsterme, welche Einfluss auf die mikrobielle Aktivität haben. Zusätzliche wichtige Integrationen innerhalb der Modell-Modifikationen sind:

- Beschreibung und freie, dynamische Aufteilung von Mischsubstraten,
- unterschiedliche Desintegrationsgeschwindigkeiten,
- Beschreibung eines Masse- und Volumenverlustes durch das Reaktormodell,
- temperaturabhängige biologische Parameter und
- mineralische Trockenmasse-Fraktion.

Generell zeigten die Simulationsergebnisse der Vorarbeiten, dass eine Abbildung der anaeroben Vergärung im mesophilen Temperaturbereich hinreichend gut möglich ist. Die Auswirkungen der Lastfälle und Betriebseinstellungen auf die Prozesse im mesophilen Fermenter sind daher gut abbildbar. Zudem zeigte sich als Ergebnis des Vorläuferprojektes „ThermoFlex“, dass es nicht praktikabel und vor allem auch nicht erforderlich ist, eine modellbasierte Regelung im „Echtzeiteinsatz“ zu realisieren. Vielmehr können wirkungsvolle und robuste Konzepte zur Wärmeregulierung entsprechend dem ThermoFlex-Verfahren mit **einfachen Reglern in Modellen** zum Wärmemanagement implementiert und getestet/optimiert werden. Mit Hilfe derartiger Simulationsmodelle können dann die einzelfallspezifischen Implementierungen der „ThermoFlex-Regelungen“ auf den Biogasanlagen erfolgen.

Diese **Simulationsmodelle zum Wärmemanagement** sollen für die Anpassung und Optimierung des Regelungskonzeptes eingesetzt werden. Sie sollen als Werkzeug für die Parametrierung der Regelung dienen. Anders formuliert: Die Regelung des ThermoFlex-Verfahrens arbeitet im engeren Sinne nicht modellbasiert, sondern mit Hilfe konventioneller Regler-Komponenten.

Die Entwicklung und Parametrierung dieser Regler für den Einsatz auf den jeweiligen Biogasanlagen (in diesem Fall BGA Bergzow) sollte hingegen modellbasiert, auf Grundlage der o. g. Wärmemodelle, erfolgen.

Umso wichtiger ist eine Überwachung der Prozessbiologie im Nachgärer durch spezielle Mess- bzw. Monitoring-Konzepte. In diesem Zusammenhang ist eine Unterstützung durch virtuelle Messinformationen aus prozessbiologischen Modellen - verknüpft mit Labor-messungen (in diesem Fall der Hochschule Magdeburg-Stendal) - sehr sinnvoll und hilfreich.

Es wurde davon ausgegangen, dass der verfügbare einfache Ansatz für die ThermoFlex-Regelung eine sehr gute Basis für die Übertragung in praktische Anwendungen darstellt. Das genaue Regelungsverhalten ist freilich von vielen Faktoren abhängig, so u. a. von der Dynamik der Wärmelast, dem Verhalten der Beheizungseinrichtungen und der Entwicklung der Wärmeverluste. Dafür sind spezielle simulative Variantenrechnungen und großtechnische Tests zielführend, um die Regelung korrekt zu parametrieren und das Regelungsverhalten zu optimieren.

Alle Modelle und durchgeführten Arbeiten sollen im Folgenden näher beschrieben werden.

a) Modell Wärmemanagement:

Das Modell zur Wärmeregulierung des Verfahrens wurde auf Basis von einfachen Reglern umgesetzt. In diesem werden konventionelle Regler (wie z.B. P- oder PI-Regler) verwendet, die unter Berücksichtigung von Wärmemodellen parametrisiert werden. Dazu wurde zunächst das **generische Modell [SEI19a]** optimiert. Dabei erfolgten u.a. folgende Anpassungen:

- Unterscheidung zwischen Gülle und „festen“ Substraten,
- Modellierung vom Rücklauf der externen Wärmenutzungen (Block „RL_vonHeizung“) mit variabler Rücklauftemperatur (abh. vom Wärmebedarf der externen Nutzungen „Pext_soll“),
- Modellierung einer verringerten Vorlauftemperatur der Beheizung Gärbehälter (Nachgärer) bei Überschreitung der maximal verfügbaren Wärmeleistung der BHKWs und Begrenzung der Vorlauftemperatur (auf z.B. 64°C um Störungen Prozessbiologie und/oder Anbackungen zu vermeiden),
- Funktionen zur Analyse der Wärmeverluste (Gärrest, Behälter, Heizleitungen) und
- Implementierung weiterer Flexibilitätsszenarien.

Zum Test der Übertragbarkeit des generischen Wärmemodells sowie zur Vorbereitung detaillierter Planungsarbeiten für die Umstellung des Wärmemanagements der Biogasanlage Bergzow (Referenzanlage) auf das „ThermoFlex“-Verfahren, wurde dieses Modell an die Gegebenheiten der Referenzanlage angepasst. Abbildung 15 zeigt das erste implementierte Beispielmotells zum Wärmemanagement der BGA Bergzow.

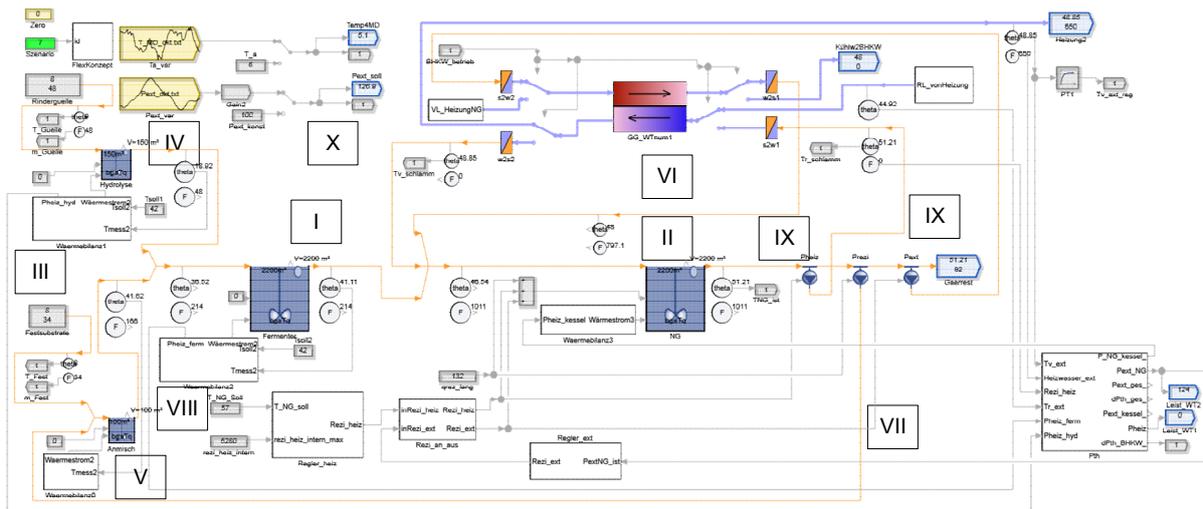


Abbildung 15: Erster Arbeitsstand des Modells des Wärmemanagements der BGA Bergzow im ThermoFlex-Verfahren

Das vorliegende Modell besteht aus zwei Regelkreisen: der Temperaturregelung im Nachgärer in der Heizphase (BHKW an) und der Leistungsregelung der externen Wärmenutzung in der Wärmeentnahmephase (BHKW aus). Die Anlagenkonfigurationen der Referenzanlage wurden im aktuellen Modell angepasst.

So ist z.B. das Arbeitsvolumen des Fermenters (I) sowie des Nächgärs (II) je 2200 m³ und der Input von Festsubstraten 34 t/d mit einer Temperatur von konstanten 8°C (III).

Die Größenordnung und Form der Gärbehälter sowie die Wärmedämmungen der Behälterwände mit Styropor in 100 mm Schichtdicke entsprechen den auch für die Parametrierung des generischen Modells angenommenen Verhältnissen. Die von der Außentemperatur abhängigen Wärmeverluste der Gärbehälter werden demnach im Beispielmmodell vereinfacht berechnet: mit einem mittleren Wärmedurchgang von 0,3 W / (Km²), einem Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis der Behälter von 0,5 sowie Wärmebrückenverluste von 10 %. Zudem werden die auch von der Wärmetauschergröße abhängigen Heizleitungsverluste in der Wärmebilanzierung berücksichtigt. Zusätzlich wurden gemäß der Referenzanlage ein abgedeckter und wärmedämmter „Hydrolyse-Behälter“ (Füllvolumen 150 m³), dessen Input aus Rindergülle mit 48 t/d und 8°C besteht (IV), sowie einem ungedämmten Anmischbehälter (Füllvolumen 100 m³) eingefügt (V). Über ein Modell wird die Beheizung des „Hydrolyse-Behälters“ - welcher im Anlagenbetrieb zur Güllevorwärmung genutzt wird – reguliert.

Die Regelgrößen des Modells sind beim Nachgärer eingefügt. Je nach Phase, BHKW an oder aus, wird der Nachgärer beheizt oder es erfolgt eine Wärmeentnahme. Hierfür wurde eine Solltemperatur im Nachgärer und ein Schlamm/Wasser-Wärmeaustauscher mit Gegenstrom-Prinzip eingefügt (VI). Des Weiteren sind die Rezirkulation vom Nachgärer in den Fermenter (VII) und die bei Biogasanlagen übliche direkte Beheizung des Fermenters (VIII) ins Modell integriert. Als Stellgrößen im Modell dienen Volumenströme für die Schlammwälzpumpe in der Heiz- und Wärmeentnahmephase (IX). Neben der internen Wärmeführung wird ein von der Außentemperatur abhängiger externer Wärmebedarf modelliert (X).

Grundlage dafür sind Messdaten der Außentemperatur von der Wetterstation Magdeburg, die in entsprechende Heizlasten umgerechnet und anschließend importiert werden können.

Eine Recherche aktueller und realistischer Daten der Außentemperatur zeigte, dass die Sophena Software [SOPH] mit ihrer Produktdatenbank geeignet ist. Die Parametrierung des Wärmeaustausches erfolgte unter Berücksichtigung der Variantenrechnungen des Projektpartners bue.

Wie bereits beschrieben, liegt die wesentliche Motivation für die Anwendung des ThermoFlex-Verfahrens auf der BGA Bergzow darin, dass die Kapazität der auf der BGA betriebenen Trocknungsanlage (insbesondere in den Monaten Oktober bis Dezember) nicht ausreichend ist, da gleichzeitig alle sonstigen anlagenexternen Wärmenutzungen bedient werden müssen. Folglich sind die Ziele die Wärme vor den Trocknungs-Kampagnen im Nachgärer zu speichern, damit dann die verfügbare BHKW-Abwärme für die Trocknung effektiver genutzt werden kann, weil der Wärmebedarf der übrigen Verbraucher während der Trocknungs-Kampagne aus dem Nachgärer gedeckt wird (siehe Kap. II.1.1.1).

Im Modell wurde ein Szenario entsprechend dieser vollumfänglichen ThermoFlex-Lösung umgesetzt. Dieses ist angelehnt an die bisherigen Szenarien (generisches Modell, vgl. [THE19]) und beschreibt beispielhaft:

- die Übergangszeit (Herbst-Winter) für 4 Wochen mit variabler Wärmelast (hier entsprechend Auswertung der Zählerdaten der Verbraucher 2016/2017 mit i.M. 100 kW angesetzt), bei spätherbstlichen Temperaturen von i. M. ca. 8°C gerechnet (siehe Abbildung 16),
- dabei wird je Woche eine Trocknungskampagne mit einer Dauer von jeweils 2 d bei voller thermischer Leistung des Trockners (800 kW) angenommen,
- die Trocknung wurde für diesen Arbeitsstand zunächst noch nicht explizit modelliert, entscheidend für die Simulation ist, dass in den Trocknungsphasen eine volle Nutzung der BHKW-Abwärme für die Trocknung erfolgt und somit keine BHKW-Abwärme für die Beheizung der Gärbehälter und die sonstigen externen Wärmenutzer verfügbar ist (die Trocknung wird also vereinfacht indirekt und mit konstantem/maximalem Wärmebedarf modelliert),
- in diesen jeweils 2 Tagen erfolgt eine Wärmeentnahme aus dem auf bis zu 57°C hochgeheizten Nachgärer (siehe Abbildung 17), welche die sonstigen externen Wärmenutzungen abdeckt (siehe Abbildung 18)
- in den auf den jeweiligen Trocknungskampagnen folgenden 5 Tagen wird der Nachgärer wieder von ca. 50°C auf 56-57°C aufgeheizt, wobei vereinfacht ein konstanter Teillast-Betrieb der beiden BHKW gemäß der Bemessungsleistung (insgesamt 500 kWel bei 740 kWel installierter Leistung) simuliert wird; die maximale thermische BHKW-Leistung ergibt sich für diesen Zeitraum aus den angesetzten Wirkungsgraden mit 625 kW (Abbildung 19),
- ein Betrieb des im Modell vereinfacht berücksichtigten Notkessels ist im simulierten Beispielzeitraum nicht nötig, die Trocknung kann mit der vollen Leistung (800 kW) betrieben werden; der erhöhte Wärmebedarf der übrigen Nutzer in den Wochen mit geringer Außentemperatur (<8°C, 100-150 kWth) wird durch langsameren Anstieg der Nachgärertemperatur und geringfügige Unterschreitung des Sollwertes im Laufe der Heizphasen kompensiert. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen diese Beispielsimulation.

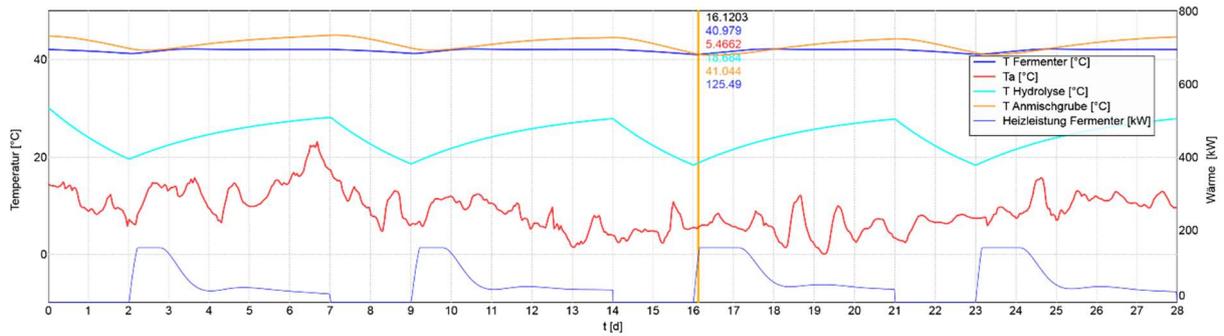


Abbildung 16: Simulation „ThermoFlex“ - Temperaturen Fermenter, „Hydrolyse“-Behälter, Anmischgrube, Außentemperatur sowie direkte Beheizung Fermenter

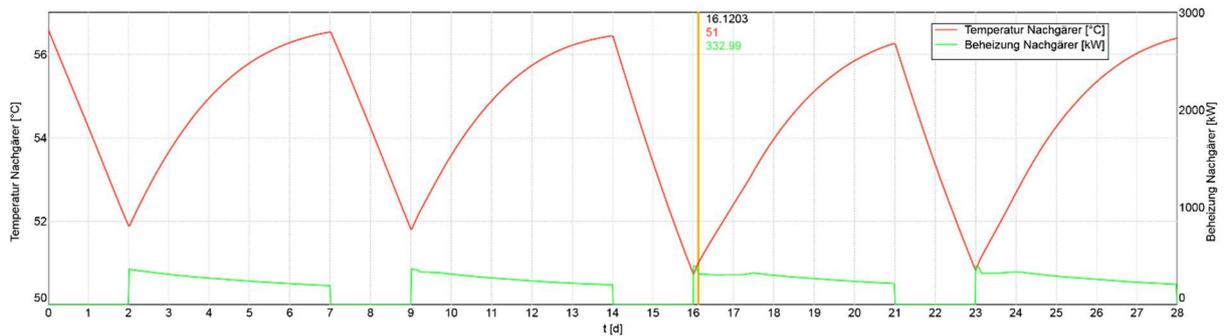


Abbildung 17: Simulation „ThermoFlex“ - Temperatur und Wärmeeintrag (Beheizung) Nachgärer

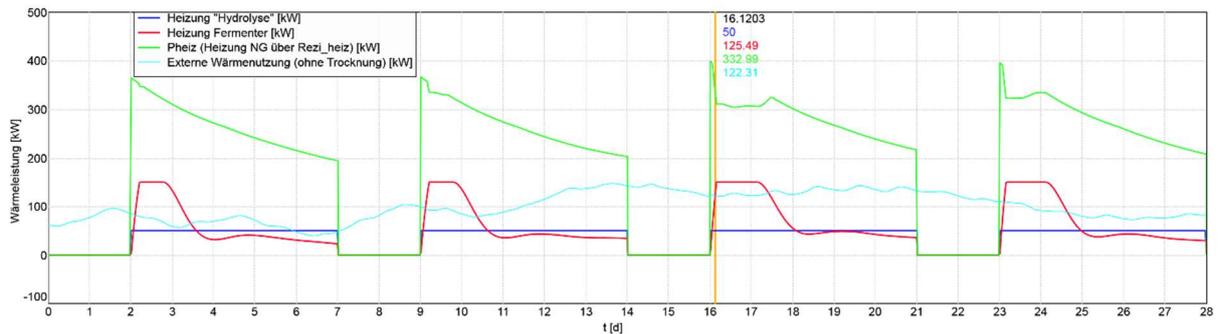


Abbildung 18: Simulation „ThermoFlex“ - Wärmeverbrauch (Beheizung Gärbehälter, externe Nutzung ohne Trocknung)

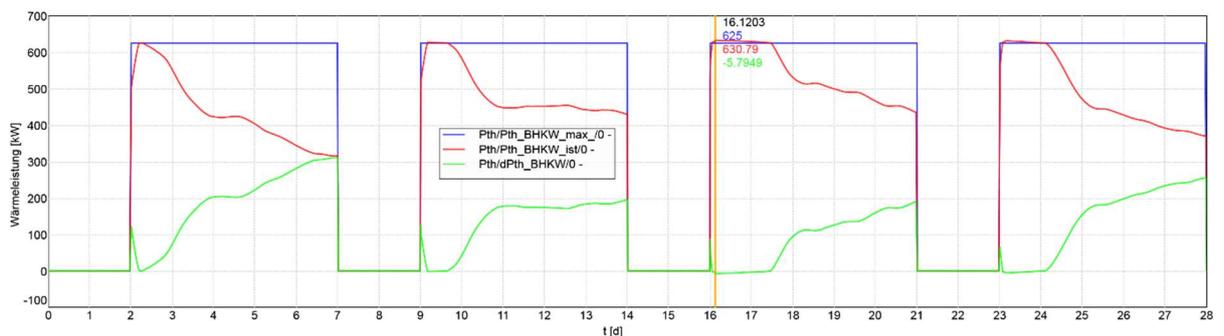


Abbildung 19: Simulation „ThermoFlex“ - Summe Wärmeverbrauch und maximale thermische BHKW-Leistung und verbleibende Differenz/Wärmeüberschuss (ohne Trocknung)

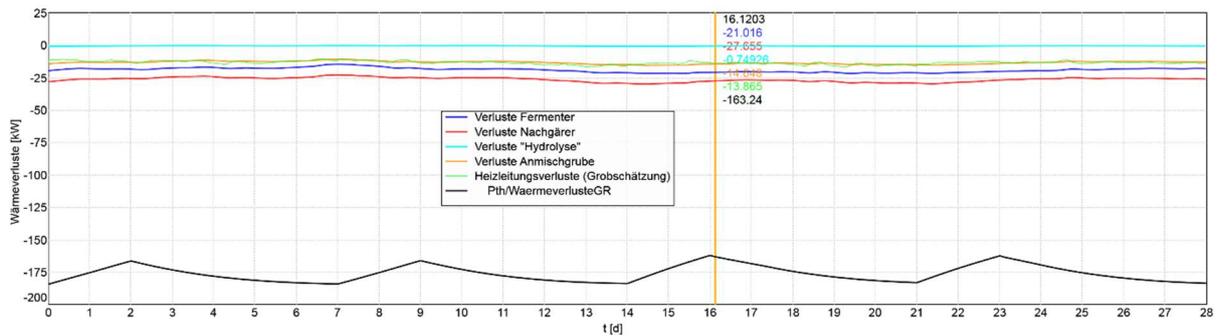


Abbildung 20: Simulation „ThermoFlex“ - Wärmeverluste Behälter, Heizleitungen sowie Gärrest

Um die Solltemperatur des Fermenters von 42°C nicht zu überschreiten und gleichzeitig die Wärmelast der Beheizung des Nachgärers zu senken, wurde die Rezirkulation im Modell mit 132 m³/d eingestellt, was deutlich geringer als im bisherigen Anlagenbetrieb ist. Es wurde in diesem Zusammenhang erwartet, dass mit den veränderten Eigenschaften (verringerte Viskosität durch höhere Temperaturen) des in die Anmischgrube rezirkulierten Nachgärerschlammes das Anmischen der „festen Substrate“ nicht beeinträchtigt wird.

Die folgenden Abbildungen zeigen zum Vergleich mit dem o. g. Beispiel den Betrieb ohne ThermoFlex, d. h. die Simulation mit mesophilem Nachgärer („Mesophile Referenz“) und ohne Wärmespeicherung. Weil somit keine Wärmeentnahme aus dem Nachgärer während der jeweils 2-tägigen Trocknungskampagnen möglich ist, wäre die verfügbare Wärmeleistung für die Trocknung um den Wärmebedarf der sonstigen externen Nutzer verringert. Alternativ wäre der Notkessel zuzuschalten, was in der Abbildung 26 am Beispiel veranschaulicht wird. Diese Referenzsimulation erfolgte ebenfalls ohne Beheizung der Gärbehälter während der Trocknungsphasen. Durch die gegenüber dem ThermoFlex-Betrieb verringerten Temperaturen im Rezirkulat aus dem (hier mesophilen) Nachgärer, schwankt die Fermentertemperatur deutlicher (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 21).

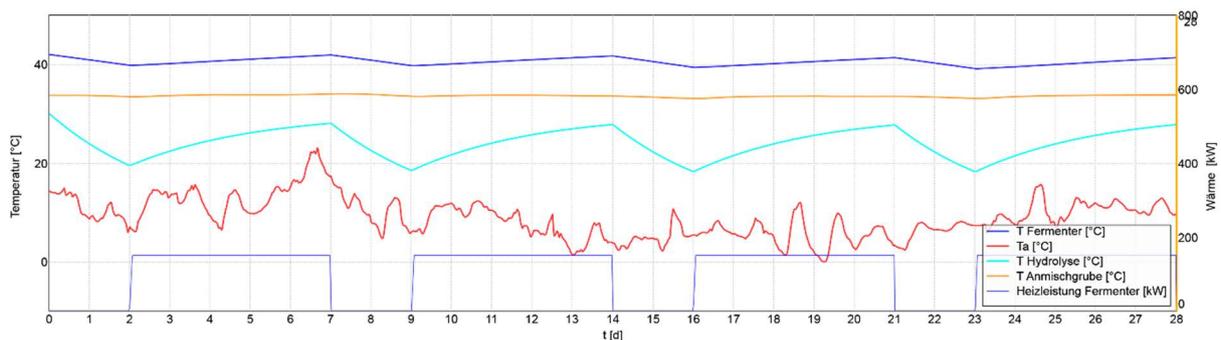


Abbildung 21: Simulation „Mesophile Referenz“ - Temperaturen Fermenter, „Hydrolyse“-Behälter, Anmischgrube, Außentemperatur sowie direkte Beheizung Fermenter

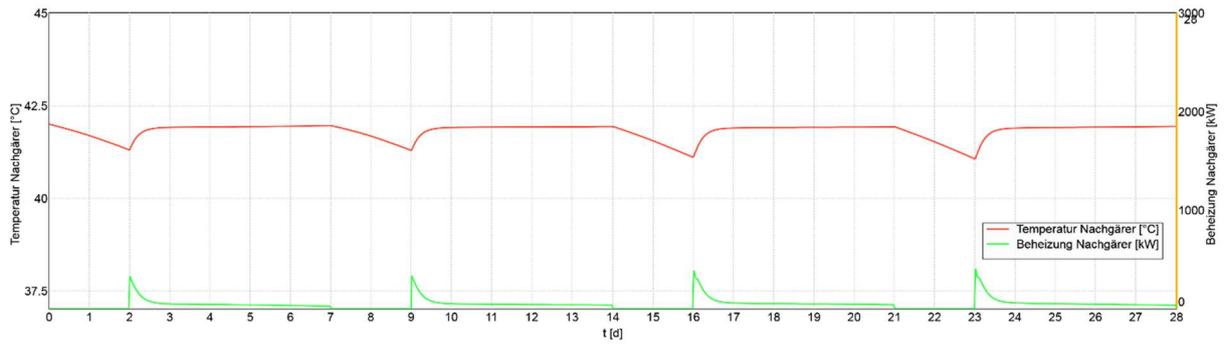


Abbildung 22: Simulation „Mesophile Referenz“ - Temperatur und Wärmeeintrag (Beheizung) Nachgärer

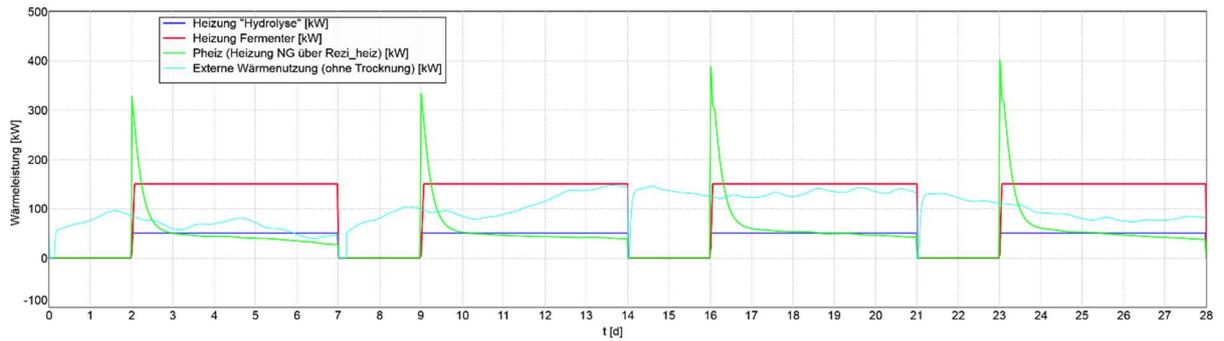


Abbildung 23: Simulation „Mesophile Referenz“ - Wärmeverbrauch (Beheizung Gärbehälter, externe Nutzung ohne Trocknung)

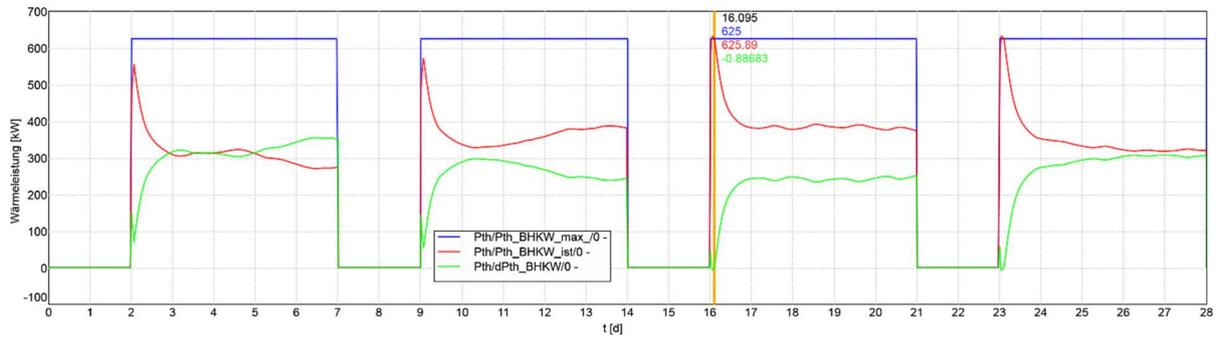


Abbildung 24: Simulation „Mesophile Referenz“ - Summe Wärmeverbrauch und max. thermische BHKW-Leistung und verbleibende Differenz/Wärmeüberschuss (ohne Trocknung)

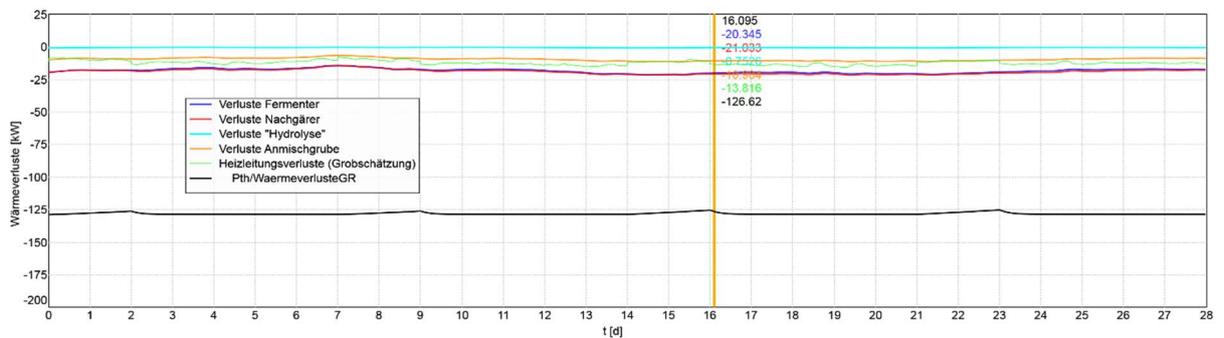


Abbildung 25: Simulation „Mesophile Referenz“ - Wärmeverluste Behälter, Heizleitungen sowie Gärrest

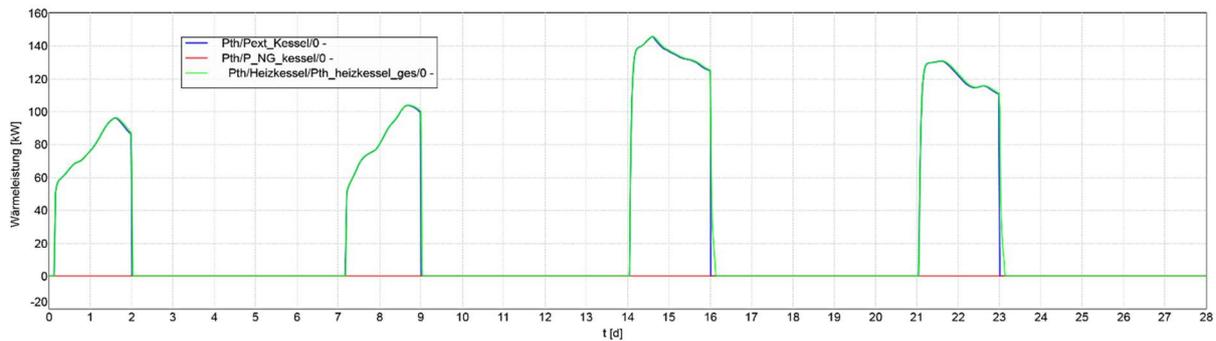


Abbildung 26: Simulation „Mesophile Referenz“: Wärmedefizit während der Trocknungen (hier als entsprechende Zuschaltung Notkessel simuliert)

Im Vergleich zum mesophilen Betrieb ist gemäß den Simulationsergebnissen im Mittel mit ca. 60 kW höheren Wärmeverlusten durch den thermophilen Nachgärer zu rechnen (vgl. Abbildung 20 und Abbildung 25). Diese setzen sich aus ca. 10 kW mehr Abstrahlungsverlusten und ca. 50 kW über die höheren Temperaturen des Gärrestes zusammen, wobei letztere prinzipiell rückgewinnbar sind. Der ThermoFlex-Betrieb ermöglicht allerdings eine flexible, lastangepasste Bereitstellung und Nutzung der Wärme: So kann hier während der 2-tägigen Trocknungskampagnen der Wärmebedarf der sonstigen Wärmeabnehmer vollständig aus dem Nachgärer gedeckt werden, während in den 5-tägigen Phasen mit Wiederaufheizung/Beladung des „Wärmespeichers Nachgärer“ ein geringerer Wärmeüberschuss berechnet wurde. Somit kann durch die erhöhte Flexibilität im ThermoFlex-Betrieb u. U. auch der Einsatz der BHKW-Notkühleinrichtungen reduziert und damit Strom gespart werden.

Die vorgestellte Simulation des **Wärmemodells der Referenzanlage** zeigt, dass trotz anspruchsvoller Randbedingungen auf der Anlage (hohe Fütterungsmengen mit ca. 60 % Gülleanteil und ein ungedämmter Anmischbehälter) ein **Einsatz von ThermoFlex aus Sicht des Wärmemanagements zielführend** ist. Dies wurde zunächst mit vereinfachten Modellansätzen für das implementierte Szenario „Trocknung im Spätherbst“ gezeigt.

Das erarbeitete **generische Modell zum Wärmemanagement und zur Regelung** des ThermoFlex-Verfahrens ist gut auf andere Biogasanlagen übertragbar, wie bisher am Beispiel der Biogasanlage Bergzow gezeigt werden konnte.

b) Modell Prozessbiologie/Biogasproduktion:

Zur Berechnung und Simulation der Prozessbiologie und Biogasproduktion wurden vorhandene Modellansätze untersucht, vereinfacht und optimiert. Vorherige Simulationen des kontinuierlichen Betriebes im mesophilen Temperaturbereich zeigten hinreichend gute Ergebnisse, die mit experimentellen Daten bestätigt wurden (siehe [THE19]). Infolgedessen wurde die Anpassung der Parameter für den thermophilen Betrieb priorisiert. Ein vereinfachtes Modell für die Analyse der Parametrisierung, welches mit SIMBA# Biogas [SIM21] erstellt wurde, ist in Abbildung 27 dargestellt.

Zur Berechnung wird dabei das in dem Modell hinterlegte Anaerobmodell ADM1da genutzt, welches die Prozessphasen der anaeroben Fermentation beschreibt (vgl. oben).

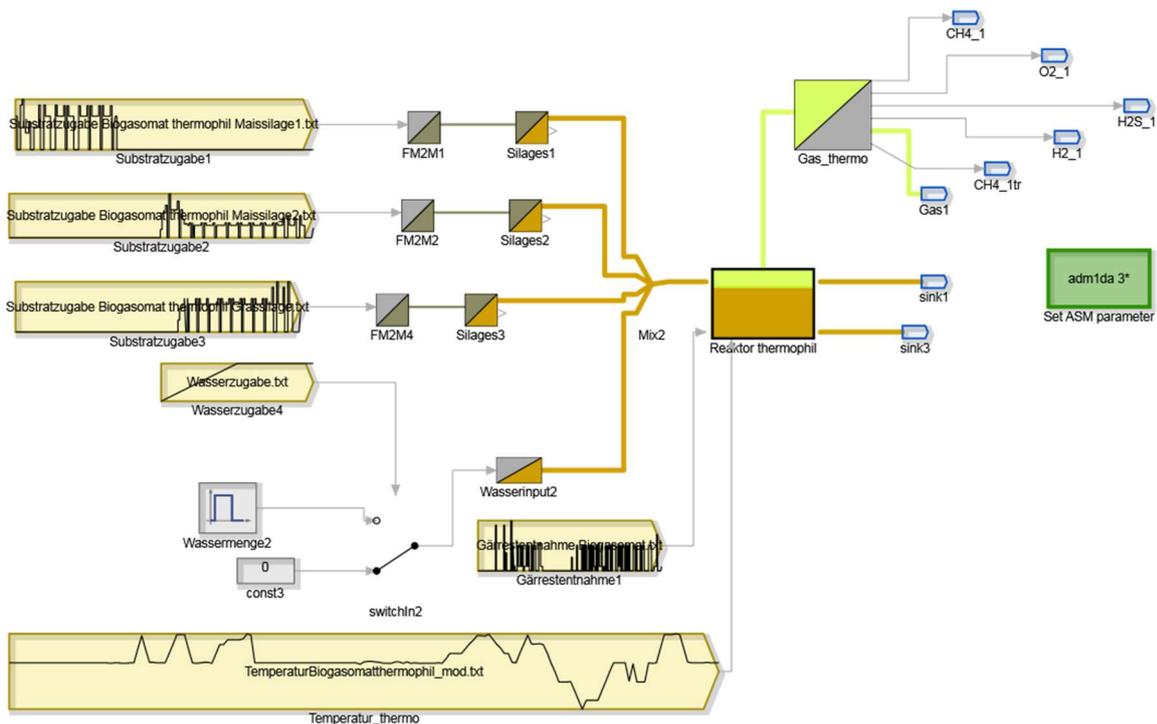


Abbildung 27: vereinfachtes Modell mit thermophilem Reaktor zur Berechnung der Prozessbiologie

Die Relevanz des Modells lag in der Modifizierung der Parameter der Substratzuführung sowie der biochemischen Parameterwerte des thermophilen Bereiches. Die der Literatur entnommenen Standardparameter, die in SIMBA# für das Biogasmodell „adm1da.asm“ festgelegt sind, wurden unter Berücksichtigung der Temperatur untersucht und verändert. Weiterhin wurden Parameter der Substratmodelle (entsprechend der im Labor verwendeten 2 Chargen Maissilage sowie Grassilage in den Blöcken „Silages1...3“) angepasst.

Ein beispielhaftes Temperaturprofil wird in Abbildung 28 dargestellt.

Folgende Untersuchungen/Simulationen wurden durchgeführt:

- **Temperaturprofil mit Ausreißer und Standardparametern,**
- Temperaturprofil ohne Ausreißer und Standardparametern,
- konstante Temperatur und Standardparametern,
- Temperaturprofil mit Ausreißer und modifizierten Parametern,
- **Temperaturprofil ohne Ausreißer und modifizierten Parametern und**
- konstante Temperatur und modifizierten Parametern.

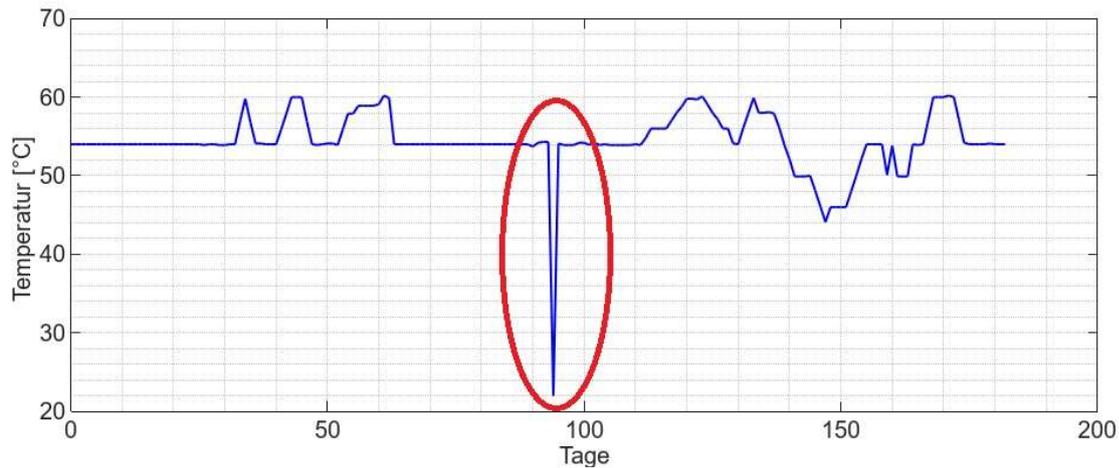


Abbildung 28: Temperaturprofil

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aller Untersuchungen mit Hilfe von Diagrammen beschrieben.

In den entsprechenden Diagrammen sind die aus der FOS-Titration der homogenisierten Substanz berechneten Werte für den Vergleich mit der Simulation relevant.

Die Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse der Simulation mit den vorgegebenen Standardparametern bei dem in Abbildung 28 zu sehenden Temperaturprofil. In den Diagrammen werden die simulierte Werte im thermophilen Reaktor berechnet und blau dargestellt. Die Labor-Messwerte zur Bewertung der Simulation sind in grün und rot dargestellt. Die Gasmengenmessungen sind - insbesondere aufgrund der teilweise an den Wochenenden gesammelten und erst am jeweils folgenden Montag erfolgten Auslesung - nicht in der Tagesdynamik mit den simulierten Werten vergleichbar (siehe [THE19]).

Deshalb werden hier zusätzlich Wochenmittelwerte der Gasmengenmessungen gezeigt. Der gemessene FOS/TAC ist prinzipiell nur sehr eingeschränkt mit der Simulation vergleichbar.

Die Simulationen des pH-Wertes, des FOS/TAC Verhältnisses, der Gasmenge und des Methangehaltes (siehe Abbildung 29) zeigen zwar einen ähnlichen Trend aber dennoch große Differenzen zu den Messwerten. Des Weiteren konnte in den Simulationen beobachtet werden, dass starke (über den Gültigkeitsbereich des verwendeten Modellansatzes ADM1da hinausgehende) Temperaturänderungen (siehe Abbildung 28 roter Kreis), folgend Ausreißer genannt) die Simulationen signifikant beeinflussen. Bei Verwendung der Simba#-Standardparameter konnten zudem ähnliche Ergebnisse bei konstanter Temperatur und auch nach Entfernung des Ausreißers beobachtet werden. Bei beiden Fällen waren signifikante Unterschiede zwischen der Simulation und den Messdaten zu verzeichnen. Dies zeigt, dass die vorliegenden originalen, physikalisch-chemischen Parameter nicht für die Simulation eines thermophilen Betriebes des Behälters geeignet sind.

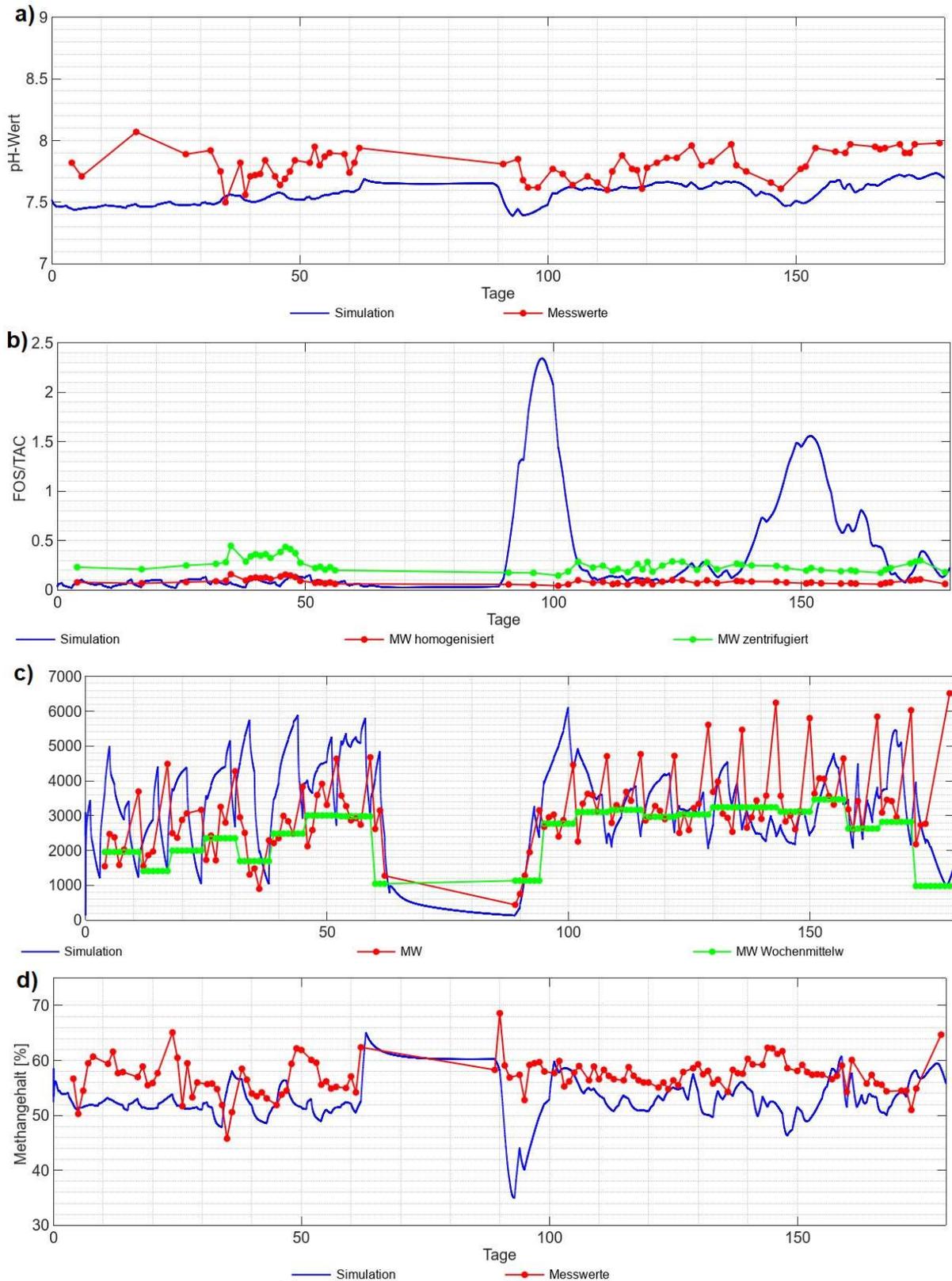


Abbildung 29: Simulationsergebnisse des kontinuierlichen Betriebes im thermophilen Temperaturbereich, mit Ausreißer und Standardparameter, a) pH-Wert, b) FOS/TAC, c) Gasmenge und d) Methangehalt (im trockenen, luftbereinigten Biogas)

Nach Änderung der physikalisch-chemischen und biologischen Parameter (bei Temperaturprofil mit Ausreißern) sind bessere Ergebnisse, d.h. eine kleinere Differenz zu den Messwerten, zu erkennen, auch wenn der FOS/TAC-Parameter unter den Messwerten bleiben. Das beste Ergebnis konnte wie erwartet bei Nutzung optimierter Parameter

(Modellansatz und Zulaufcharakterisierung) und zusätzlicher Entfernung des Temperatur-Ausreißers beobachtet werden (siehe Abbildung 30).

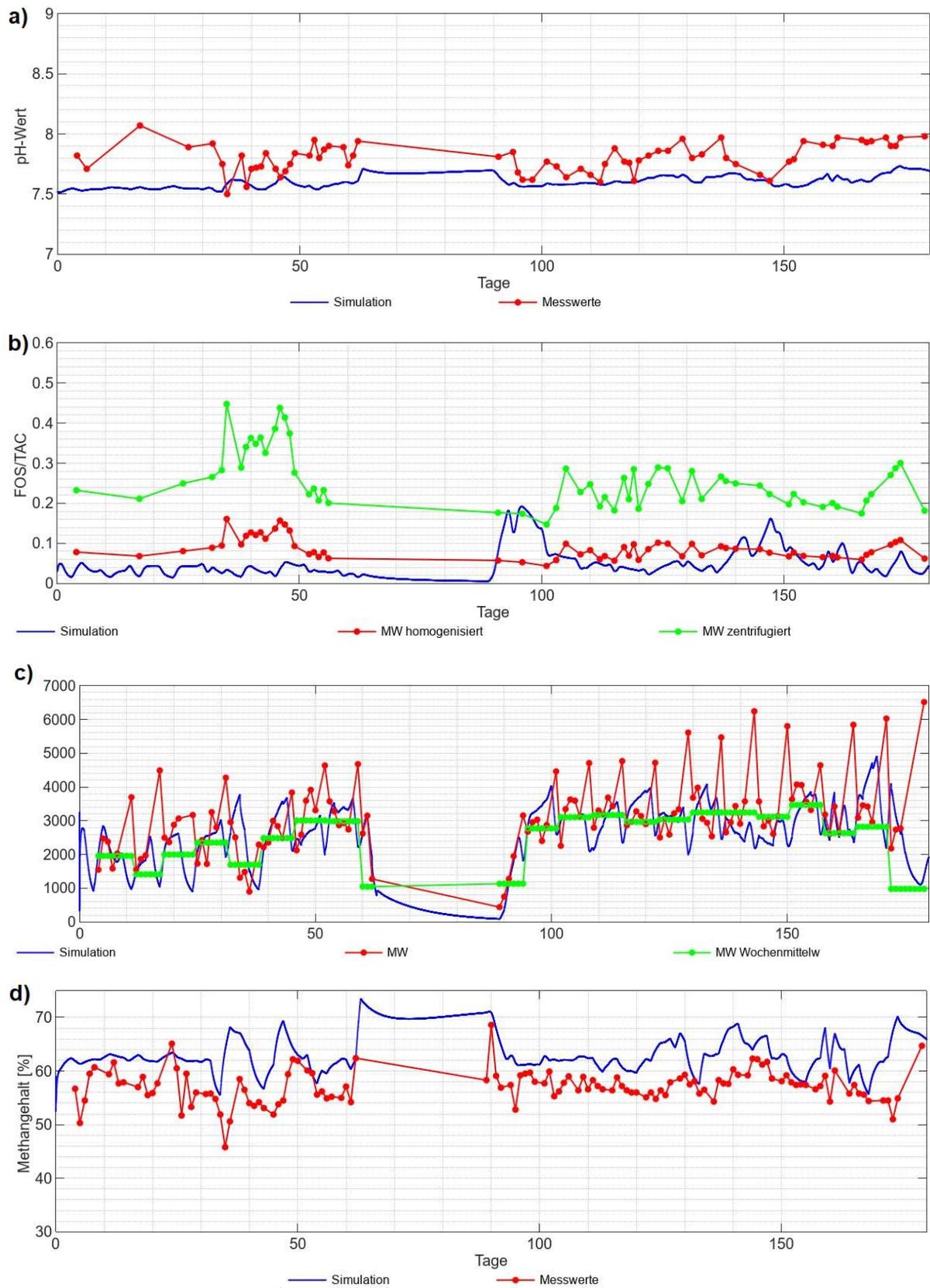


Abbildung 30: Simulationsergebnisse des kontinuierlichen Betriebes im thermophilen Temperaturbereich, ohne Ausreißer und optimierten Parametern, a) pH-Wert, b) FOS/TAC, c) Gasmenge und d) Methangehalt (im trockenem, luftbereinigtem Biogas)

Die Diagramme zeigen folglich, dass der Parametersatz den größten Einfluss auf die Leistung des Modells hat. In der Abbildung 30 kann eine verbesserte Nachbildung der Messwerte beobachtet werden. Der angepasste Parametersatz des Modellansatzes ADM1da wurde als Basis für diese weiteren Arbeiten genutzt. Aus bisherigen Erfahrungen ist es allerdings nicht zielführend, für jedes Anlagenmodell die biologischen und physiko-chemischen Parameter des Modellansatzes erneut anzupassen. Die erste Wahl beim Modellabgleich sollte ausgehend von einer korrekten Modellierung der Anlage die passende Charakterisierung der Input-Substrate sein.

Zusammenfassend hat die Untersuchung gezeigt, dass vor allem die Größen FOS/TAC und Methangehalt die Parameter sind, die im thermophilen Modell bei variablen Temperaturen noch unzureichend abgebildet werden. Gerade diese Parameter sind für eine Beurteilung der Prozessstabilität von Bedeutung, weshalb hier modellgestützt gewonnene „virtuelle Messinformationen“ für eine effektive Überwachung der Prozessstabilität sehr hilfreich wären.

Immerhin wird zumindest teilweise die Dynamik des Methangehaltes in der Simulation wiedergegeben – so auch bei der ansatzweisen Prozesshemmung zwischen dem 30. und 40. Tag nach der erstmaligen Einstellung von 60°C Gärtemperatur vgl. [THE19]. Auf der anderen Seite werden der pH-Wert und der Methangehalt in hohem Maße durch Veränderungen, sowohl des Temperaturprofils als auch der physikalisch-chemischen Eigenschaften, beeinflusst, was im Modell berücksichtigt wird.

II.1.2.2 Modellierung und Simulation Beispielszenarien für Integration Heizkessel oder Wärmepumpe, Kurzzeit-Pufferspeicher und Gärrestlager als Wärmespeicher (AP 2.2)

Im Rahmen des AP 2.2 wurde das Modell des Wärmemanagements mit weiteren Beispielszenarien getestet und parametrisiert.

Des Weiteren wurde ein Simulationsmodell zur vereinfachten Berechnung der Prozessbiologie und Biogasproduktion der Referenzanlage erstellt.

a) Modell Wärmemanagement:

Das zuvor erstellte Modell zur Darstellung des Wärmemanagements im ThermoFlex-Verfahren wurde während des Projektzeitraums weiter angepasst und bearbeitet (siehe Abbildung 31).

Mit diesem Modell wurden weitere Beispielrechnungen durchgeführt. Das vorherige Szenario (Vergleich Kapitel II.1.2.1) wurde ebenfalls angepasst. Die Trocknungskampagne von 2 Tagen mit anschließender Aufheizung über 5 Tage wurde übernommen. Der Nachgärer wird im folgenden Beispiel von ca. 50°C auf 54°C aufgeheizt. Zusätzlich wurde die maximale Heizleistung für die Hydrolyse von 50 auf 75 kW erhöht.

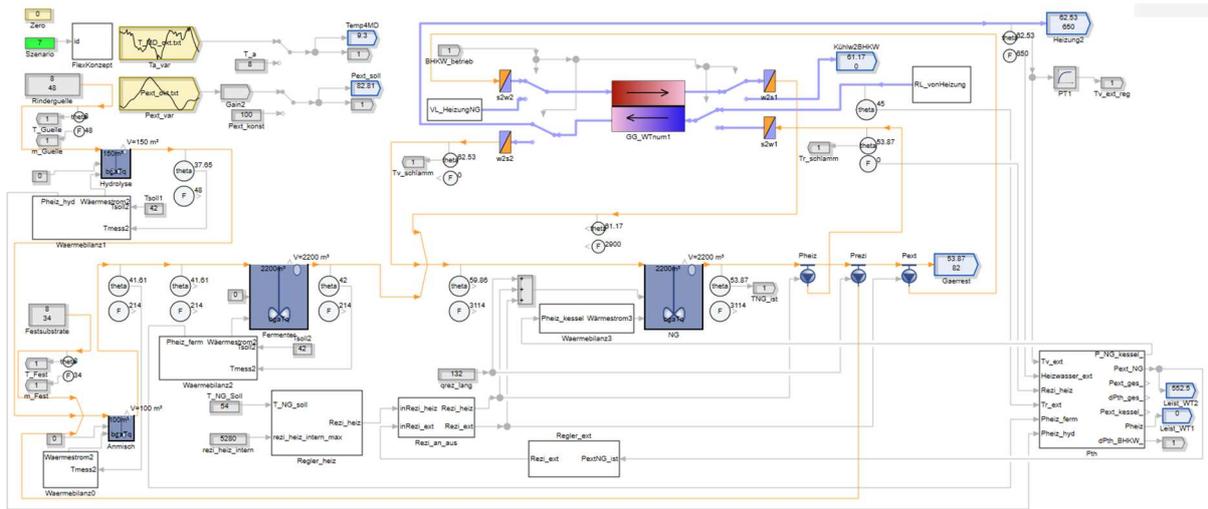


Abbildung 31: Erweitertes und angepasstes Modell des Wärmemanagements der BGA Bergzow mit „ThermoFlex“

Abbildung 32 bis Abbildung 36 veranschaulichen die Beispielsimulation. Die Ergebnisse zeigen, dass der Nachgärer in annähernd 3 Tagen auf die benötigten 54°C aufgeheizt ist, womit sich das Konzept hier auch für längere Trocknungszeiten eignen würde. Insgesamt zeigt sich, dass der bereits beschriebene Wärmeverlust durch den thermophilen Nachgärer gesenkt und die Temperatur im Fermenter nahezu konstant bei 42°C gehalten werden können. Die Ergebnisse bestätigen erneut den Vorteil der Nutzung des ThermoFlex-Verfahrens aus Sicht des Wärmemanagements.

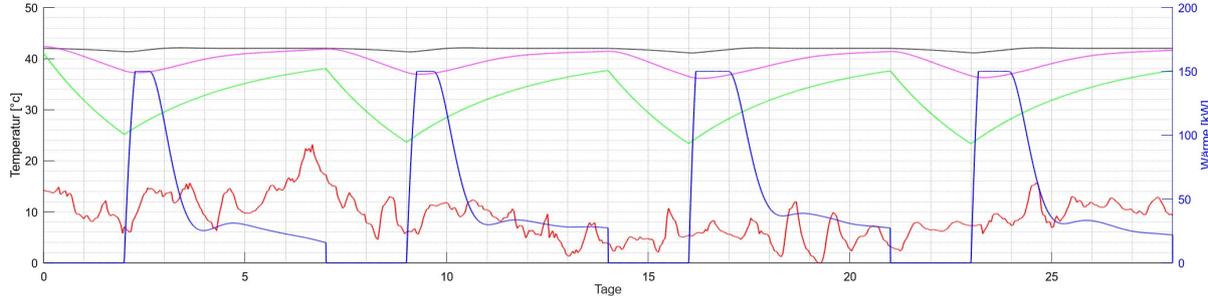


Abbildung 32: Simulation „ThermoFlex“ - Temperaturen Fermenter, „Hydrolyse“-Behälter, Anmischgrube, Außentemperatur sowie direkte Beheizung Fermenter

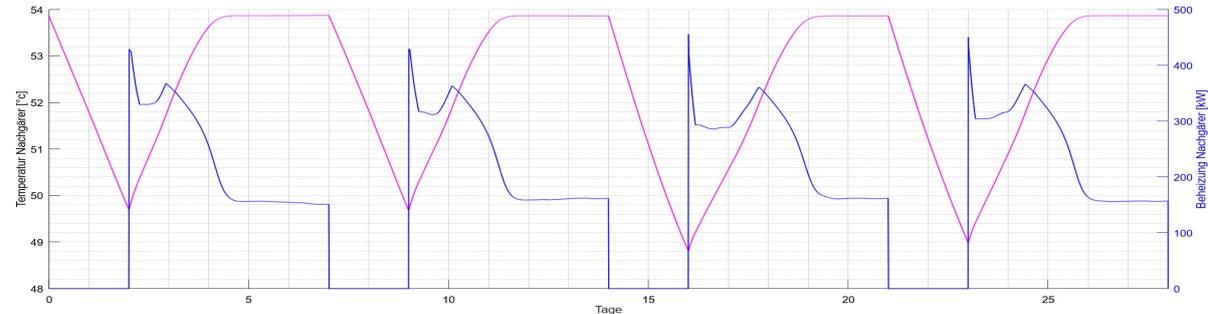


Abbildung 33: Simulation „ThermoFlex“ - Temperatur und Wärmeeintrag (Beheizung) Nachgärer

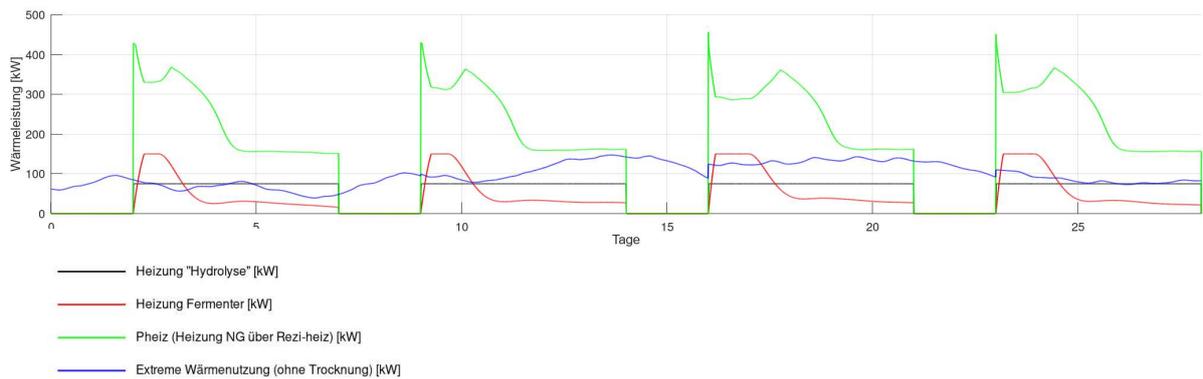


Abbildung 34: Simulation „ThermoFlex“ - Wärmeverbrauch (Beheizung Gärbehälter, externe Nutzung ohne Trocknung)

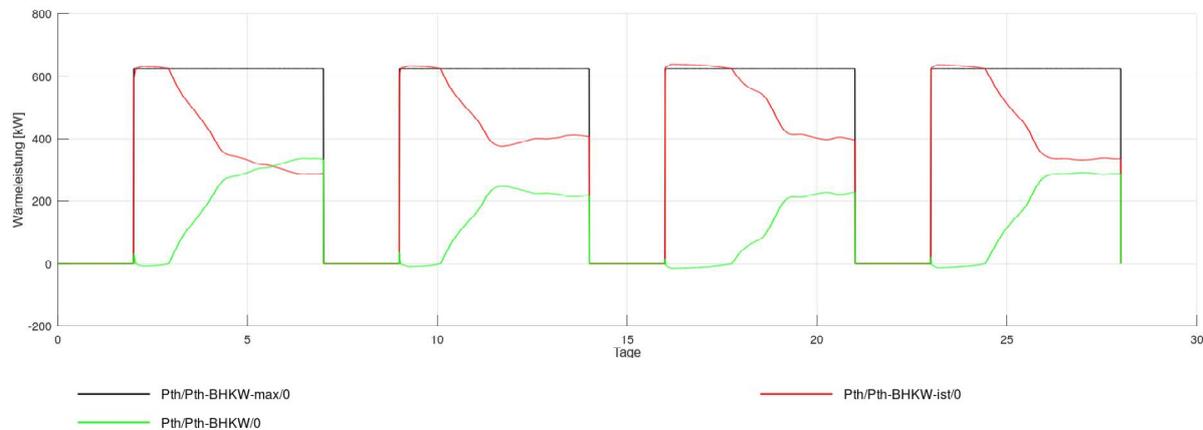


Abbildung 35: Simulation „ThermoFlex“ - Summe Wärmeverbrauch und maximale thermische BHKW-Leistung und verbleibende Differenz/Wärmeüberschuss (ohne Trocknung)

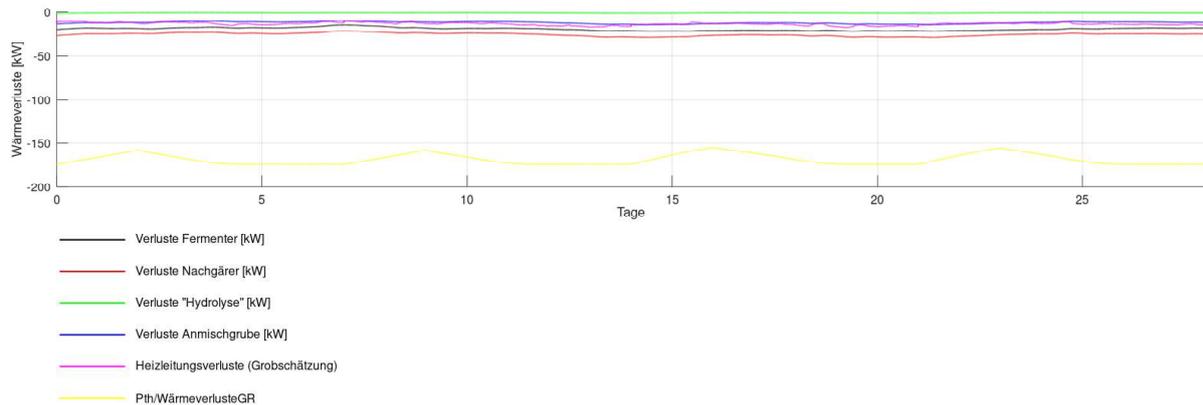


Abbildung 36: Simulation „ThermoFlex“ - Wärmeverluste Behälter, Heizleitungen sowie Gärrest

Die Modellierungs- und Simulationsarbeiten zur Untersuchung optionaler Ausgestaltungen des ThermoFlex-Verfahrens an ausgewählten exemplarischen landwirtschaftlichen Biogasanlagen im Rahmen von AP 2.2 erfolgten in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern. Das Fließbild des für diese Untersuchungen erstellten Simulationsmodells ist zusammen mit exemplarischen Simulationsergebnissen in Kapitel II.1.1.2 aufgeführt.

b) Modell Prozessbiologie/Biogasproduktion:

Gemäß dem Arbeitsplan wurde ein Simulationsmodell zur vereinfachten Berechnung der Prozessbiologie und Biogasproduktion der Referenzanlage erstellt. Dieses Modell stellt den Prozess vor der Umrüstung auf das ThermoFlex-Verfahren dar. Folglich erfolgt ein mesophiler Betrieb des Nachgärers.

Ein Zwischenstand des Modells ist in Abbildung 37 dargestellt. Die Volumenströme Q sind hier mit Hilfe des Sankey-Diagramms dargestellt. Die jeweiligen Mengen werden durch mengenproportional dicke Pfeile dargestellt. Die Anlage wird täglich mit mehreren Substraten (z.B. Rindergülle, Maissilage, Grassilage und Rinderfestmist und weitere) (I) beschickt. Diese werden dann in einer Anmischgrube (II) vermischt.

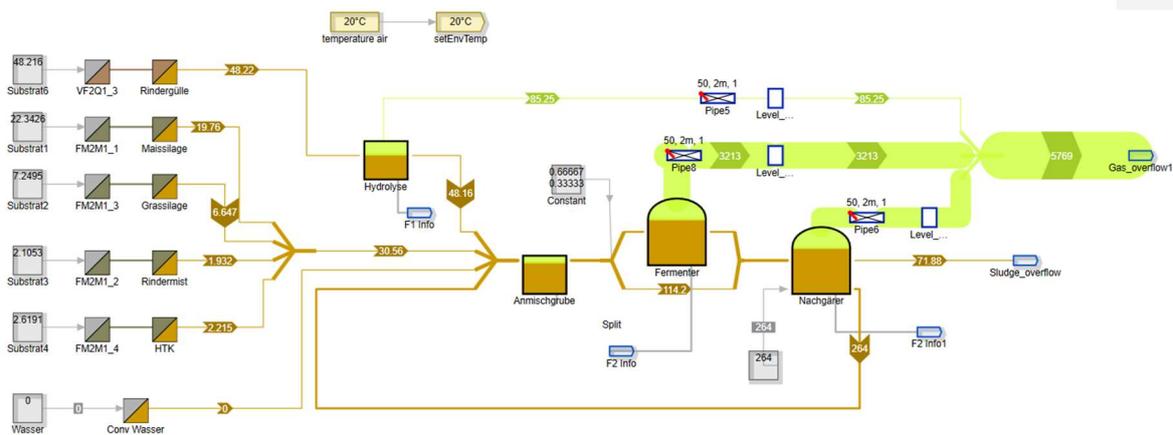


Abbildung 37: Modell der Prozessbiologie der BGA Bergzow

Von der Anmischgrube aus gehen, in Anlehnung an eine temporäre Betriebsweise der Referenzanlage, $2/3$ des Substrates in den Fermenter (III) und $1/3$ direkt in den Nachgärer (IV). Der Ablauf des Fermentes wird weiterhin in den Nachgärer geleitet. Ein Teil des Ablaufs wird aus dem Nachgärer in den Fermenter rezirkuliert (V). Die zwei BHKWs sind hier zur Vereinfachung des Modellansatzes nicht berücksichtigt.

II.1.2.3 Anpassung der modellbasierten Regelung an den Einsatz des ThermoFlex-Verfahrens auf Abfallvergärungsanlagen (AP 2.5)

Gemäß dem Arbeitsplan war eine Anpassung des Wärmemodells an den Einsatz des ThermoFlex-Verfahrens auf Abfallvergärungsanlagen vorgesehen. Als Grundlage wurde vom Projektpartner bue Anlagentechnik GmbH eine Recherche zum aktuellen Stand der Technik und Anwendungen auf Abfallvergärungsanlagen durchgeführt. Diese zeigte, dass eine Anpassung an Abfallvergärungsanlagen zwar interessant in Bezug auf die Berechnung der Wärmerückgewinnung ist, die flexible Stromproduktion bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen jedoch bei dem ThermoFlex-Verfahren im Vordergrund steht. Folglich wurde das Arbeitspaket 2.5 stark reduziert. Dadurch konnte der Mehraufwand in anderen Arbeitspaketen kompensiert werden (vgl. Kap. II.1.1.4).

II.1.2.4 Implementierung der modellbasierten Regelung für die Referenzanlage (AP 3.2) und Begleitung der MSR-technischen Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage (AP 3.5)

a) Modell Wärmemanagement:

Das bestehende SIMBA#-Modell (vgl. Kap. II.1.2.2) für die Simulation des Wärmemanagements wurde analog zu dem Modell der Prozessbiologie bearbeitet und an die aktuelle Betriebsweise auf der Anlage angepasst (siehe Abbildung 38).

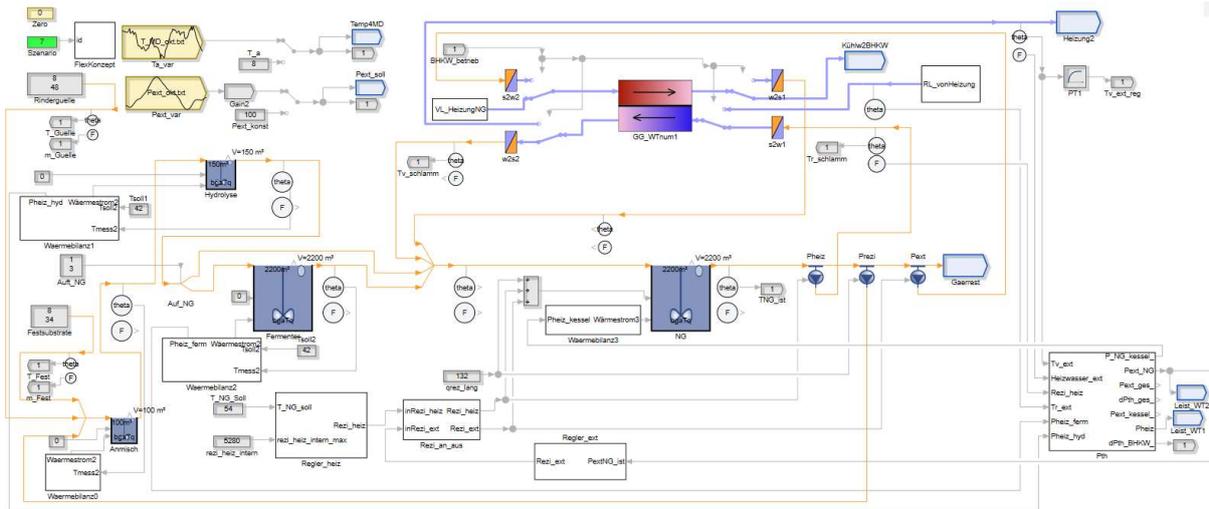


Abbildung 38: An die aktuelle Betriebsweise angepasstes Modell des Wärmemanagements der BGA Bergzow

Die Anpassungen umfassen in dem Modell die Schaltung des Hydrolysebehälters als Vorfermenter und die Zulaufaufteilung des Fermenters und Nachgärers, was so zeitweise auf der BGA Bergzow betrieben wurde (vgl. Kap. II.1.3.3).

b) Modell Prozessbiologie/Biogasproduktion:

Das Modell zur Berechnung der Prozessbiologie und Biogasproduktion der Referenzanlage (vgl. Kap. II.1.2.2, Abbildung 37) wurde ebenfalls weiter angepasst und zunächst für die vergleichende Prozessanalyse vor der Umrüstung auf das ThermoFlex-Verfahren herangezogen. Die folgende Abbildung zeigt eine für die exemplarische dynamische Simulation des Betriebsjahres 2018 der Biogasanlage Bergzow parametrisierte Version dieses Modells (implementiert mit dem Simulationsprogramm SIMBA# [SIM21]).

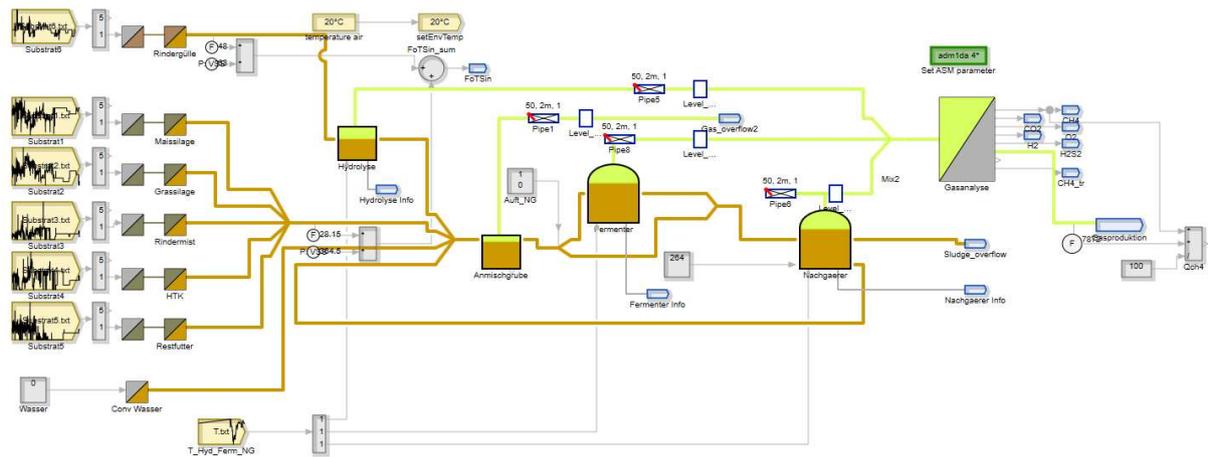


Abbildung 39: Modell der Prozessbiologie der BGA Bergzow zur Simulation des Betriebsjahres 2018

Anschließend erfolgte von der Hochschule Magdeburg-Stendal ein Vergleich der dynamischen Simulationsdaten mit den Werten aus dem Betriebstagebuch des Referenzjahres 2018. Der Vergleich zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung (siehe Kap. II.1.4.2 und [SEI22]).

Für die modellgestützte Untersuchung des Optimierungspotenzials und Bewertung entsprechender Maßnahmen, insbesondere zur Verbesserung der Substrateffizienz der BGA Bergzow wurde das o. g. Modell an die aktuelle geplante Betriebsweise auf der Anlage angepasst (siehe Kap. II.1.4.2 und [SEI22]). Dies betrifft folgende wesentliche Änderungen:

- Zulaufaufteilung Fermenter / Nachgärer (parametrierbar, Voreinstellung: 70 % in den Fermenter, 30 % in den Nachgärer)
- Volumenstrom Rezirkulat 336 m³/d (ca. 4fache Menge des Substratinputs)
- Hydrolysebehälter zwischen Anmischgrube und Fermenter geschaltet
- Gärrestlager mit Gasfassung im Modell abgebildet (Erfassung des zusätzlichen Gasverwertungspotenzials)

Die folgende Abbildung 40 zeigt das entsprechende Fließschema dieser Modellvariante.

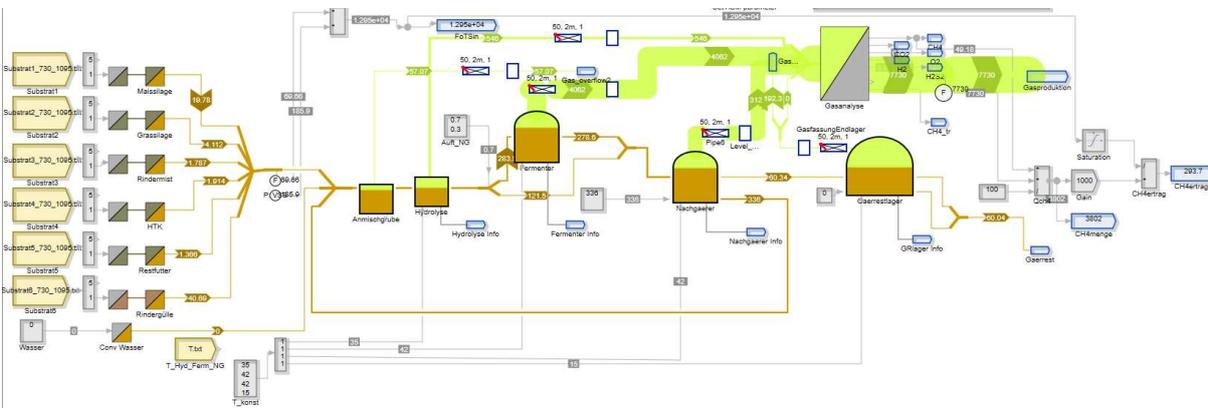


Abbildung 40: An die aktuelle Betriebsweise angepasstes Modell der Prozessbiologie der BGA Bergzow

Dieses Modell wurde durch die Hochschule Magdeburg-Stendal zur Analyse des Optimierungspotenzials und Bewertung entsprechender Maßnahmen, insbesondere zur Verbesserung der Substrateffizienz der BGA Bergzow verwendet (siehe Kap. II.1.4.2 und [SEI22]).

c) Untersuchungen zur Modellierung der Temperaturabhängigkeit der essigsäureverwertenden Methanbildner:

Ein weiterer Aspekt, der untersucht wurde, ist die temperaturabhängige Betrachtung der essigsäureverwertende Methanbildner X_{ac} . Diese sind die wichtigste und auch sensibelste Biomassegruppe im ADM1da-Modell und sollen zur Nachbildung der im Labor beobachteten Prozesshemmung (ca. bei Gärtemperaturen $> 60^{\circ}\text{C}$) genutzt werden. Dazu wird angenommen, dass X_{ac} die Summe des mesophilen Anteils $X_{ac,meso}$ (Säuren während des mesophilen Prozesses) und thermophilen Anteils $X_{ac,thermo}$ (Säuren während des thermophilen Prozesses) ist. Für diese Betrachtung wurde im Rahmen des Projektes ein Ansatz zur Untersuchung entwickelt.

Zur Einführung des Terms wurde zunächst ein vereinfachtes Modell einer Biogasanlage mit einem Fermenter erstellt. Mittels des ASM-Editors [SIM21] wurden Gleichungen für das Wachstum (kurz g für growth) und den Zerfall (kurz d für decay) erstellt.

Für das Wachstum ergibt sich als Beispiel für den mesophilen Anteil:

$$\frac{dX_{ac,meso}}{dt} = (1 - c)k_{g,Xac}X_{ac,meso} \quad (1)$$

$$\text{Mit } k_{g,Xac} = Y_{ac}k_{m,ac} \frac{S_{ac}}{S_{ac} + K_{S_{ac}}} \frac{S_{NH_4} + S_{NH_3}}{S_{NH_4} + S_{NH_3} + K_{S_{IN}}} \frac{K_{I_{NH_3,ac}}^2}{S_{NH_3}^2 + K_{I_{NH_3,ac}}^2} \frac{K_{I_{H,AC}}^3}{SH^3 + K_{H,AC}^3} \frac{K_{I_{Hac}}}{S_{ac} - S_{ac} + K_{I_{Hac}}} \quad (2)$$

Für das Wachstum ergibt sich als Beispiel für den thermophilen Anteil:

$$\frac{dX_{ac,therm}}{dt} = -\frac{dX_{ac,meso}}{dt} \quad (3)$$

$$\text{Und den Zerfall } \frac{dX_{ac,meso}}{dt} = c X_{ac,meso} k_{d,Xac} \quad (4)$$

$$\text{Mit } k_{d,Xac} = \exp^{(0.055 \cdot (T - 35))} \quad (5)$$

Für den Zerfall ergibt sich als Beispiel für den thermophilen Anteil:

$$\frac{dX_{ac,thermo}}{dt} = -\frac{dX_{ac,meso}}{dt} \quad (6)$$

Anschließend wurde eine Temperaturabhängigkeit eingefügt in die Variable c. Dazu wurde folgende Gleichung verwendet:

$$c = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi + \arctan\left(\frac{(T+273,15)^2 - (T_{lim}+273,15)^2}{(T+273,15)(T_{lim}+273,15)}\right)}{\pi} \right] \quad (7)$$

Wobei T_{lim} die Temperatur ist, bei der der Prozess von mesophil zu thermophil „wechselt“. Mit dieser Anpassung wurden verschiedene Temperaturen getestet. Es ist zu erwähnen, dass die Reaktortemperatur weiterhin konstant bei 42°C (mesophil) liegt. Es zeigte sich bei den Untersuchungen, dass bei größerer Temperaturdifferenz zwischen T und T_{lim} ein Effekt zu beobachten ist. Im nächsten Schritt wurde die Temperatur des Fermenters mit Hilfe eines Temperaturprofils (siehe Abbildung 41), welches vom mesophilen in den thermophilen Temperaturbereich verläuft, gesteuert werden. Das angepasste Simulationsmodell ist in der Abbildung 42 dargestellt.

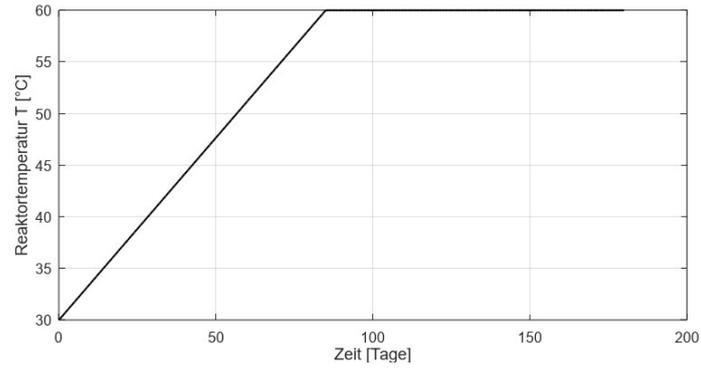


Abbildung 41: Temperaturprofil des Fermenters

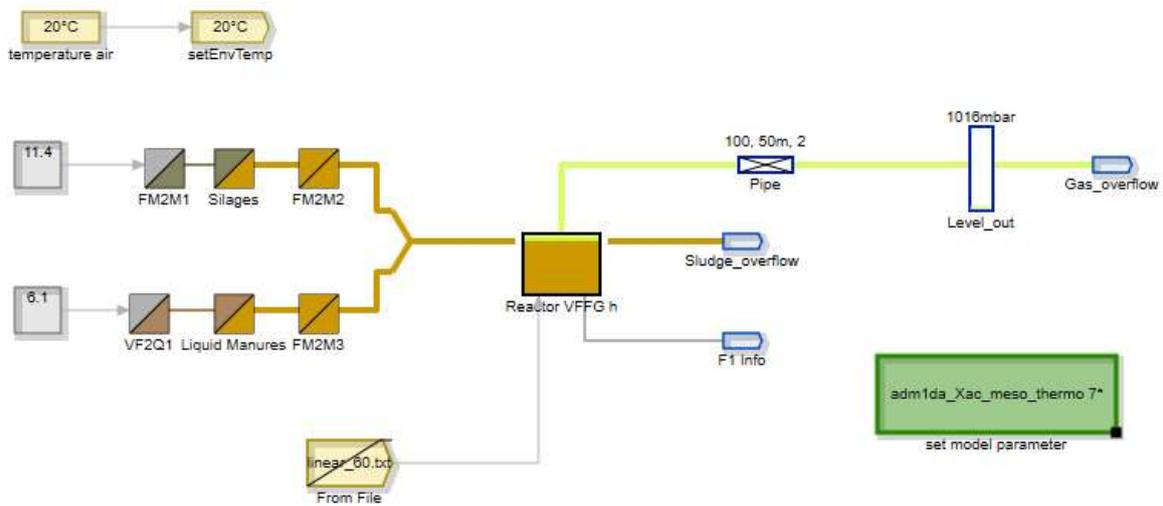


Abbildung 42: Simulationsmodell für die Untersuchung der essigsäureverwertende Methanbildner

Die folgende Abbildung 43 zeigt den Verlauf für $X_{ac,meso}$ und $X_{ac,therm}$.

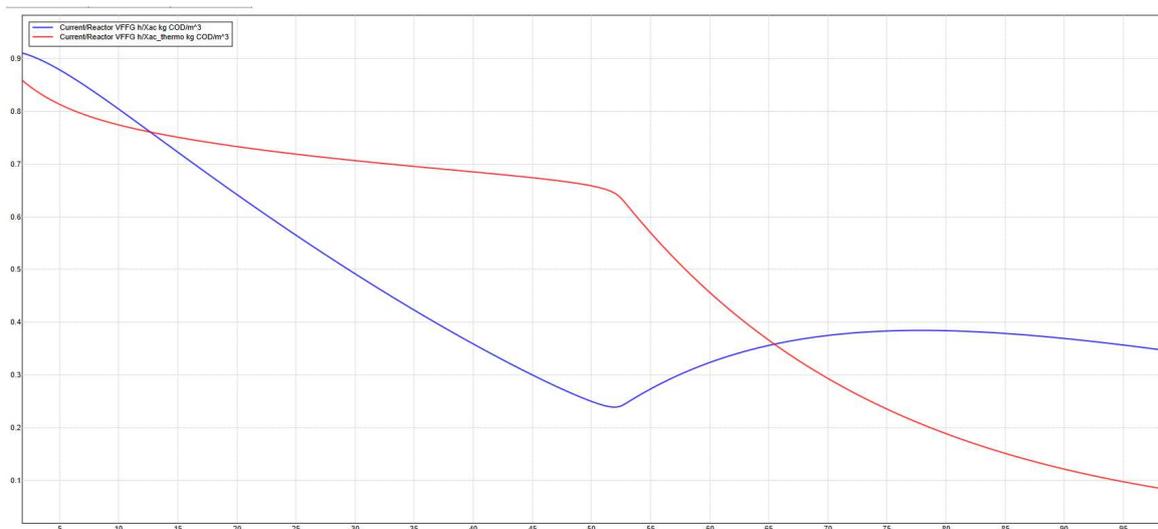


Abbildung 43: Verlauf des mesophilen und thermophilen Anteils des essigsäureverwertende Methanbildner bei dem Temperaturprofil

II.1.2.5 Simulation zur optimalen Verfahrensparametrierung für den laufenden Betrieb der Referenzanlage (AP 4.1)

Da sich wie bereits erwähnt (siehe Kap. II.1.1.6 und II.1.1.8) der erweiterte Demonstrationsversuch als bevorzugte Variante herausgestellt hat, wurde dieser mit einem Wärmemodell beschrieben. Die Hauptänderung dieser Variante liegt in der Warmhaltung des Fermenters durch den "Nachgärer-Wärmespeicher" während einer mehrtägigen Trocknungskampagne, wobei die Versorgung des Nahwärmenetzes weiterhin direkt über die BHKW-Abwärme erfolgt. In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde das bestehende Wärmemodell auf die Alternativlösung angepasst. Abbildung 44 zeigt das Modell, bei dem neue/angepasste Blöcke oder Einstellungen/Parameter rot markiert sind.

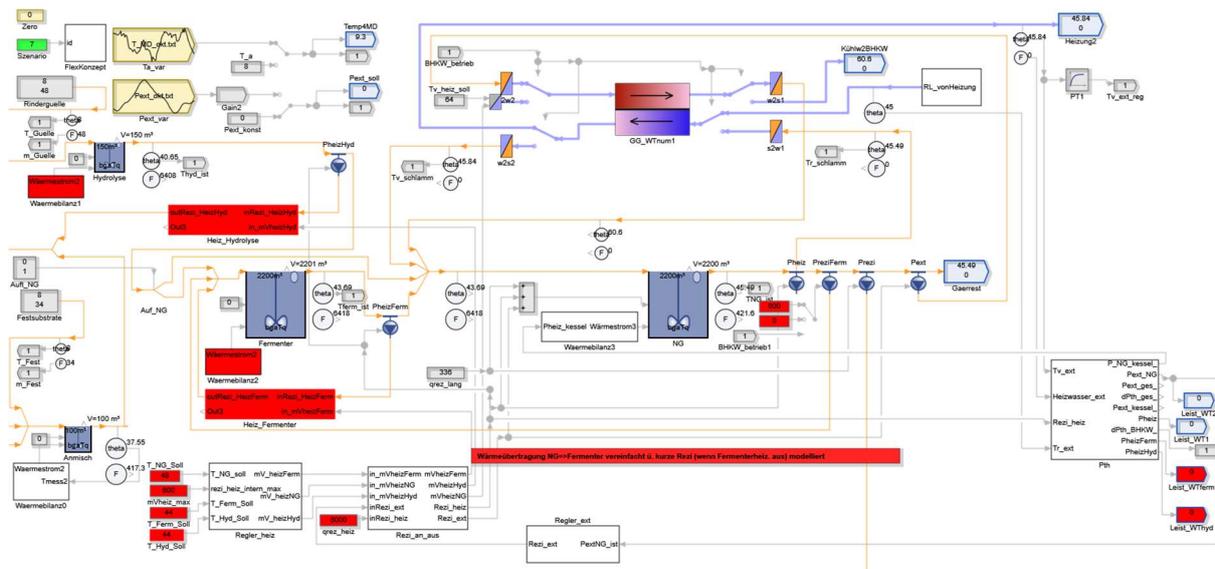


Abbildung 44: Angepasstes Modell des Wärmemanagements der BGA Bergzow für die geplanten Demonstrationsversuche der „ThermoFlex-Basislösung“ (neue / geänderte Blöcke/Einstellungen in rot)

In Kapitel II.1.1.6 sind die wichtigsten Merkmale dieser „ThermoFlex-Basislösung“ beschrieben. Bei der Modellierung sind folgende Punkte relevant und wurden im angepassten Modell berücksichtigt:

- Die Solltemperaturen des Fermenters, Nachgärers und der Hydrolyse wurden angepasst, insbes. die Gärtemperatur im Nachgärer wurde nur moderat erhöht ($T_{NG_Soll} < 50^{\circ}C$).
- Die Modellierung der Beheizung der Gärbehälter wurde detailliert: Die neuen Blöcke „Heiz_Hydrolyse“ und „Heiz-Fermenter“ enthalten Wärmetauschermodelle zur temperaturabhängigen Simulation der Heizleistung der in den Behältern installierten Heizregister mit den entsprechenden Wärmeübertragungsflächen (Hydrolyse: 10 m^2 , Fermenter: 40 m^2). Die Beheizung des Nachgärers erfolgt im Modell wie bisher über den Wärmetauscherblock („GG_WTnum1“), welcher jedoch entsprechend der vorhandenen innenliegenden Mantelheizung neu parametrierung wurde - mit 20 m^2 Wärmeübertragungsfläche. Der Wärmedurchgangskoeffizient k in den Wärmetauscherblöcken wurde auf jeweils $300\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ eingestellt und liegt damit im unteren Bereich der Angaben im VDI-Wärmeatlas (Kap. C3) für flüssige Medien bei vergleichbaren Systemen [VDI13]. Der tatsächliche k -Wert ist natürlich stark abhängig von der Rührwerksleistung und Durchmischung in den Behältern sowie vom Verschmutzungsgrad an den Heizrohren.

- Die Steuerung der Wärmenutzung wurde im Modell so geändert, dass während der mehrtägigen Trocknungskampagne (2 bis 5 d), die Nahwärmeversorgung weiter über das BHKW erfolgt (Block „RL_vonHeizung“ deaktiviert), während der Wärmebedarf der Gärbehälter über den „Nachgärer-Wärmespeicher“ abgedeckt wird.
- Die Warmhaltung des Fermenters erfolgt während einer Trocknungskampagne mit der Wärme aus dem Nachgärer bei relativ geringen Temperaturschwankungen, die Wärmezufuhr in den Fermenter geschieht als zusätzliche „kurze Rezirkulation“ (Umpumpen von Nachgärerschläm) - siehe Blöcke „Wärmebilanz 2“ und „PreziFerm“.

Das Modell wurde mit dem bisher verwendeten Wärmelastfall, siehe Kapitel II.1.1.3, getestet. Die Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse der Simulationen.

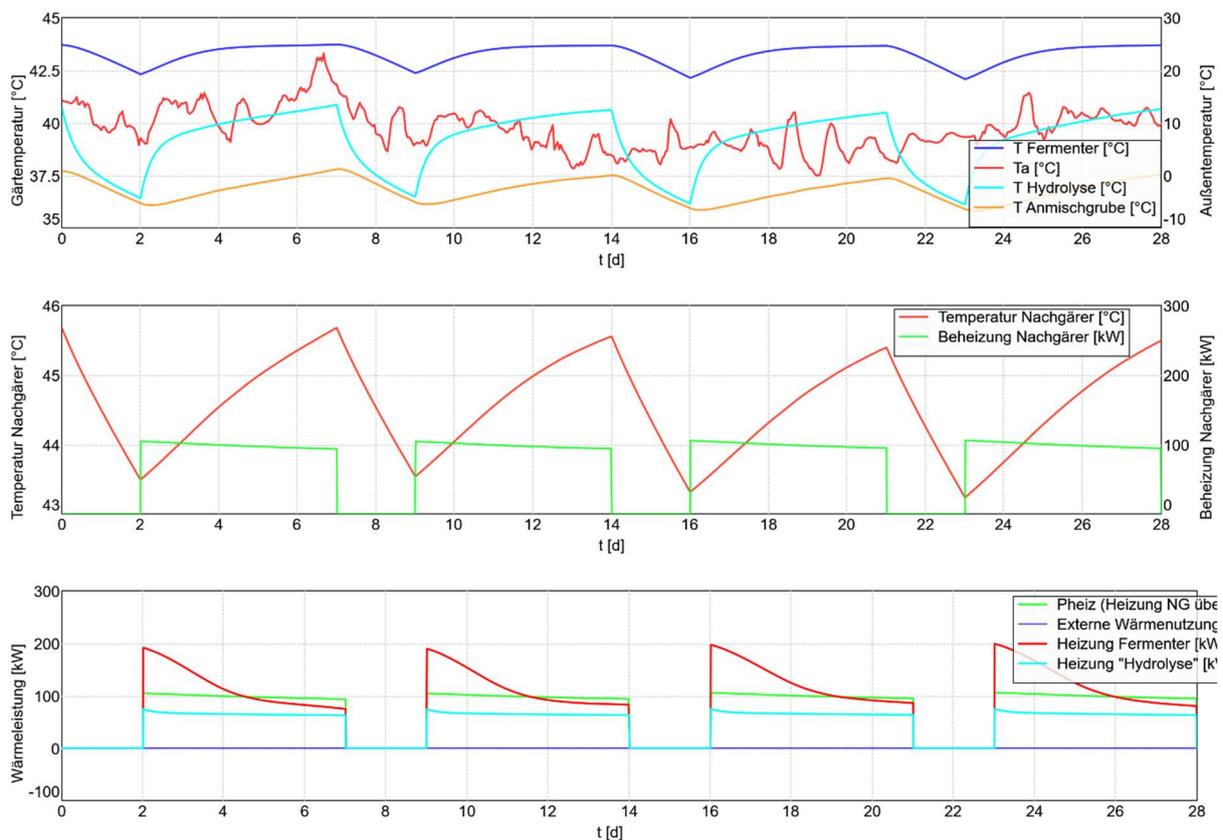


Abbildung 45: Ergebnisse von Simulationen der ThermoFlex-Basislösung (über die Zeit in Tagen), Oben: Temperatur der Gärbehälter und die Außentemperatur, Mitte: Temperatur und Beheizung des Nachgärs, Unten: Wärmeleistungen der Gärbehälterbeheizung („NG“ = Nachgärer, externe Wärmenutzung im Modell deaktiviert)

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass mit den gegebenen Voraussetzungen die Leistung der vorhandenen Nachgärerheizung ausreichen würde, um zum einen den Wärmebedarf im Fermenter- und Hydrolysebehälter in den Trocknungsphasen durch den „Nachgärer-Wärmespeicher“ abzudecken und zum anderen den Nachgärer dabei z. B. zwischen ca. 43 - 46°C zu betreiben.

Des Weiteren wurden zur Betrachtung der Trocknung und Simulation des Wärmebedarfs der Trocknung in Kooperation mit der JSW Biogas aktuelle Szenarien und Zählerstände der BGA Bergzow erfasst. Dazu wurde das oben beschriebene Wärmemodell zum erweiterten Demonstrationsversuch bzw. zur Erprobung der ThermoFlex-Basislösung weiter angepasst. Als eine wesentliche Ergänzung dabei wurde das Wärmemodell um ein einfaches Modell der

Trocknung erweitert. Dazu wurden durch den Projektpartner Hochschule Magdeburg-Stendal Daten zur Trocknung auf der BGA Bergzow analysiert und in eine entsprechende Modellkomponente zur Trocknung integriert (siehe Abbildung 46, oberer Teil).

Mit dem ergänzten Wärmemodell wurden exemplarisch zwei Trocknungen in 28 Tagen (d. h. alle 14 Tage Beginn einer Trocknungskampagne) simuliert, wobei die externe Wärmenutzung (Bedarf Nahwärmenetz ca. 50-150 kW) von der maximalen Trocknungsleistung (800 kW) abgezogen wurde. Der dieser Berechnung zugrundeliegende Wärmelastgang des Nahwärmenetzes wurde wie in den bisher verwendeten Beispielen gewählt. Somit stehen ca. 600-700 kW für die Trocknung bereit. Zudem ist jetzt im Modell die Trocknungszeit variabel - je nach Leistung endet die Trocknung, wenn eine Gesamt-Wärmemenge erreicht wird (laut der o. g. Datenanalyse i. d. R. ca. 60 MWh je Trocknungscharge von ca. 60 m³, d. h. ca. 1 MWh je m³). Das implementierte Trocknungsmodell bietet einen deutlichen Mehrwert gegenüber den bisherigen Modellrechnungen mit vereinfacht als konstant angenommener Trocknungsdauer bei voller Leistung.

Durch Realisierung der ThermoFlex-Basislösung kann, wie im Beispiel gezeigt, eine bisher 5 Tage dauernde Trocknung in bereits knapp 4 Tagen abgeschlossen werden (siehe Abbildung 46, unterer Teil).

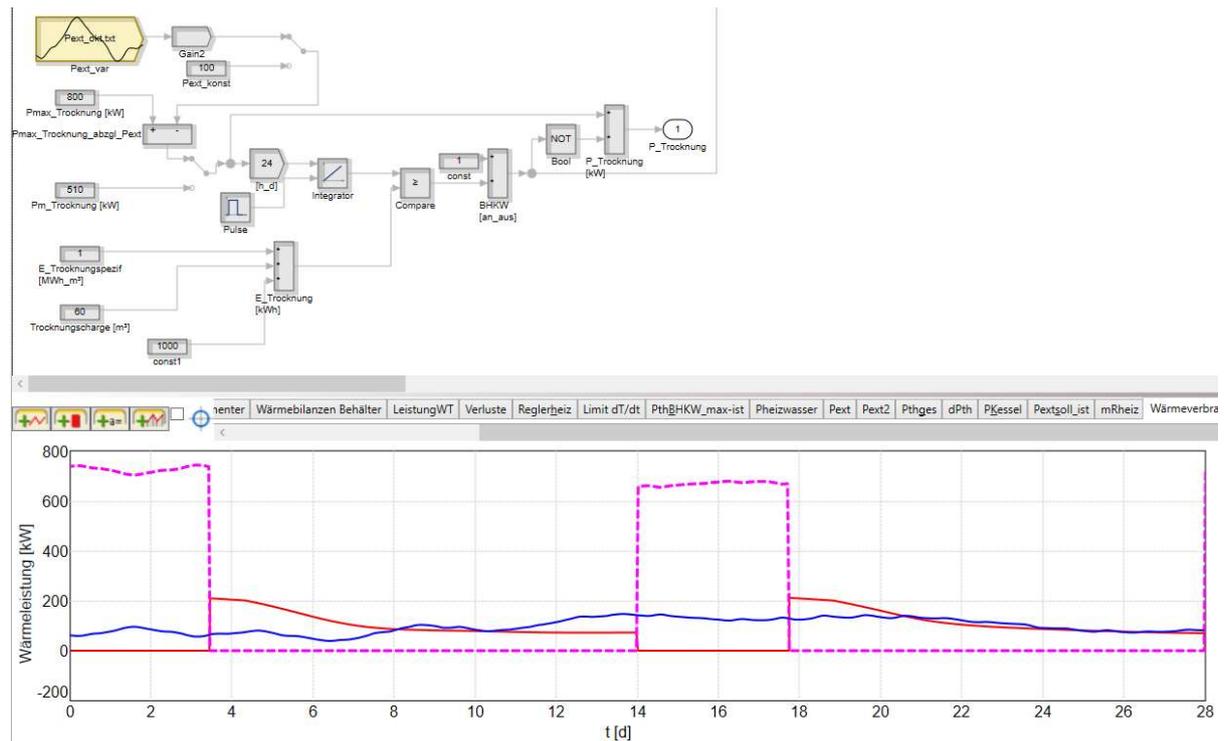


Abbildung 46: oben: Modellkomponente zur Simulation der Trocknung der BGA Bergzow, unten: Beispielsimulation Wärmeverbrauch (blau: Nahwärmenetz, rot: Fermenterheizung, magenta gestrichelt: Trocknungsanlage)

Eine Auswertung der großtechnischen Erprobung erfolgt gemeinsam durch alle Projektbeteiligten im Rahmen von AP 4.6 und wird in Kap. II.1.1.8 zusammen mit der Planung und Durchführung dieses Versuches dokumentiert.

II.1.3 Teilvorhaben 3: Bereitstellung, Umrüstung und Anwendung einer Biogasanlage für die großtechnische Erprobung des ThermoFlex-Verfahrens (JSW Biogas)

II.1.3.1 Bereitstellung und Aufbereitung Daten zur Biogasanlage und zur Wärmenutzung für die Planung der Referenzanlage (AP 1.3)

Überblick Referenzanlage:

Im Rahmen des Teilvorhabens 3 stellt JSW die 2009 in Betrieb genommene Biogasanlage Bergzow als Referenzanlage bereit. Die Anlage verfügt derzeit über zwei BHKW mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt 740 kW. Der Strom wird in das öffentliche Netz eingespeist und die Eigenwärme für den kompletten Betrieb sowie zur Beheizung von privaten Häusern genutzt. Die Anlage wird mit landwirtschaftlichen Substraten beschickt (Rindergülle, Maissilage, Grassilage, Hühnertrockenkot, Rinderfestmist und Restfutter, siehe unten).

Suboptimale Silagechargen des Landwirtschaftsbetriebs S&W Agrar GmbH in Bergzow werden bevorzugt zur Versorgung der Biogasanlage verwendet. Zudem hat insbes. in den Jahren 2018 und 2019 die Silagequalität unter den geringen Niederschlagsmengen der Region gelitten. Die Biogasanlage Bergzow wurde von der Bioconstruct GmbH geplant und ursprünglich für eine elektrische Leistung des BHKW von 370 kW konzipiert. Die spätere Verdopplung der Leistung der BHKW auf 740 kW führte dann zu einer überdurchschnittlich hohen Raumbelastung des Fermenters [CW22b].

Die Substrate werden in einer unbeheizten offenen Anmischgrube (ca. 100 m³ Füllvolumen) vermischt und in den Fermenter (ca. 2200m³ Füllvolumen) gepumpt. Ein als abgedeckter „Hydrolysebehälter“ dient zur Aufheizung der Rindergülle vor der Zugabe in die Anmischgrube und ist im Regelbetrieb mit ca. 150 m³ gefüllt. Dieser Behälter wurde ursprünglich als nicht gasdicht geschlossene Hydrolyse- und Versäuerungsstufe (H+V-Stufe) in Anlehnung an die Funktionsprinzipien der Avantec-Hydrolysestufen errichtet und später mehrfach modifiziert (s. unten [CW22b]). Das Gärsubstrat aus dem Fermenter wird anschließend in den Nachgärer, der wie der Fermenter über etwa 2200 m³ Arbeitsvolumen verfügt, gepumpt.

Die Durchmischung des Fermenters erfolgt durch einen Paddelgiganten (agricomp, Merken-dorf) und durch ein Tauchmotorrührwerk, der Nachgärer verfügt über 2 Tauchmotorrührwerke [CW22b]. Zudem wurde eine Landia-Pumpe zur Schlammumwälzung und auch zur Zerkleinerung verbliebener Faserstoffe im Nachgärbehälter nachgerüstet.

Vom Nachgärer wird ein Volumenstrom von der ca. 3-4fachen Menge des Substratinputs als Rezirkulat zum Anmischen der nicht pumpfähigen Substrate in die Anmischgrube gepumpt. Zur Vermeidung hoher H₂S-Gehalte im Biogas werden eine interne biologische Entschwefelung durch Luftzufuhr mittels Kleinkompressoren in die Gärbehälter sowie die tägliche Dosierung von Eisen(III)-hydroxid mit dem Substratinput praktiziert.

Die mit der o. g. Leistungserweiterung der Biogasanlage einhergegangene Steigerung der Durchflussrate in Verbindung mit dem Substratkonzept des Betriebes (Verwendung der Silagen mit unterdurchschnittlicher Qualität für die BGA) machte sukzessive Optimierungsmaßnahmen erforderlich. Folgende bioprozesstechnisch relevanten Modifikationen wurden bereits in den Jahren vor Beginn des Projektes durchgeführt [CW22b]:

1. Es erfolgte ein gasdichter Abschluss der Hydrolyse- und Versäuerungsstufe. Im Zusammenhang mit dieser Modifikation wurde die Belüftung der H+V-Stufe abgeschaltet. Die Leistungserweiterung der BGA ließ die Einhaltung der ursprünglich vorgesehenen Betriebsbedingungen nicht mehr zu, so dass auf die Einstellung spezifischer Betriebsbedingungen in der H+V-Stufe verzichtet wurde. Der Betreiber sah diese Stufe daher nicht länger als Hydrolyse- und Versäuerungsstufe an, sondern als "Vorfermenter".
2. Im Jahr 2018 wurde die Betriebsweise der ehemaligen Hydrolyse- und Versäuerungsstufe erneut geändert, indem sie nunmehr als beheizter Güllepufferbehälter genutzt wird.
3. Im Jahr 2017 erfolgte der Ersatz des (überforderten) Zwangsmischers des Anmaischers durch ein langsam laufendes Paddelrührwerk mit horizontaler Achse [CW22b].

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 47, Abbildung 48) zeigen Gesamtansichten der BGA.



Abbildung 47: Biogasanlage Bergzow aus der Satellitenperspektive (Google Maps 2020)



Abbildung 48: Gesamtansicht der BGA Bergzow. Von links: Fermenter, Güllepufferbehälter (ehemalige Hydrolyse- und Versäuerungsstufe), Anmaischer, Nachgärer und Gärrestlager (Abb.: Cordes+Winterberg 2015).

Datengrundlage für Gärversuche und Verfahrenskonzeption:

Im Rahmen des AP 1.3 wurden von der Biogasanlage Bergzow im Januar 2019 Impfschlamm aus dem Nachgärer sowie 3 Substratchargen - am 15. Januar, am 11. März (nur neue Rindergülle) und am 27. Mai 2019 - mit den erforderlichen Daten und Informationen für die Gärversuche bereitgestellt.

Im Zuge des fortgesetzten Langzeit-Gärversuches des Projektpartners Hochschule Magdeburg-Stendal wurden in der 2. Projektphase weitere Substratchargen - am 27. Mai: Maissilage, Grassilage, Hühner trockenkot (HTK), Rindermist und Rindergülle, am 25. Oktober nur Rindergülle und am 11. Dezember 2019 Maissilage und Rindergülle - mit den erforderlichen Daten und Informationen für die Gärversuche bereitgestellt.

Vom Projektkonsortium wurde vereinbart, als Basis für die Untersuchungen - insbesondere der Gärversuche der Hochschule - die Daten der letzten **3 Betriebsjahre (2016 bis 2018)** der BGA Bergzow heranzuziehen.

Abbildung 49 zeigt die Futtermischung, bestehend aus Rindergülle, Maissilage, Grassilage, Rinderfestmist, HTK und Restfutter, die sich über die betrachteten Betriebsjahre 2016-2018 ergibt. Diese Substratarten werden auch bis zum Projektende auf der BGA eingesetzt.

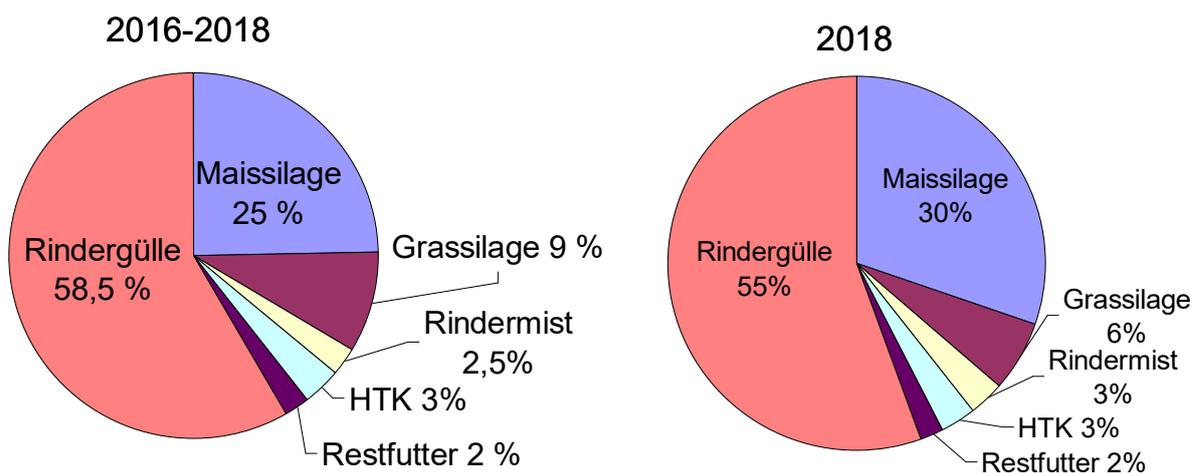


Abbildung 49: Futtermischung der BGA Bergzow (Mittelwerte aus täglichen Substratmengen => links: Betriebsjahre 2016 bis 2018, rechts: Betriebsjahr 2018)

Die folgenden Tabellen zeigen die relevanten Mengen der Einzelsubstrate, mit den Parametern Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS) für die 1. Substratcharge (Tabelle 10) und für die im Mai und Dezember geholten neuen Substratchargen (Tabelle 11 und Tabelle 12).

Tabelle 10: Mittlere Futtermengen BGA Bergzow (2016 bis 2018) mit Laboranalysen TS, oTS aus der 1. Substratcharge für die Laborversuche vom Januar 2019 (vgl. 2. Zwischenbericht)

Art	Menge [kg FM/d]	Mengenanteil [%]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [kg oTS/d]
Maissilage	20508	24,85%	0,352	0,9624	6947
Grassilage	7249,5	8,78%	0,2273	0,8505	1401
Rinderfestmist	2105,3	2,55%	0,2048	0,843	363
Huhn	2619,1	3,17%	0,4337	0,8639	981
Restfutter	1834,6	2,22%	0,352	0,9624	621
Rindergülle	48216	58,42%	0,065	0,8178	2563

Tabelle 11: Laboranalysen TS, oTS aus der 2. Substratcharge für die Laborversuche vom Mai 2019 (neue Werte rot, Unterschied TS und oTS der Grassilage-Charge vom Mai 2019 vernachlässigbar für Änderung Fütterung bei den Laborversuchen)

Art	Menge [kg FM/d]	Mengenanteil [%]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [kg oTS/d]
Maissilage	20508	24,85%	0,3992	0,9635	7888
Grassilage	7249,5	8,78%	0,2273	0,8505	1401
Rinderfestmist	2105,3	2,55%	0,2861	0,8094	488
Huhn	2619,1	3,17%	0,5778	0,8614	1304
Restfutter	1834,6	2,22%	0,3992	0,9635	706
Rindergülle	48216	58,42%	0,0669	0,8072	2604

Tabelle 12: Laboranalysen TS, oTS aus der 3. Maissilage-Charge vom Dezember 2019 (neue Werte rot, Unterschied TS und oTS der Rindergülle-Chargen vom Oktober und Dezember 2019 vernachlässigbar für Änderung Fütterung bei den Laborversuchen)

Art	Menge [kg FM/d]	Mengenanteil [%]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [kg oTS/d]
Maissilage	20508	24,85%	0,3006	0,9508	5861
Grassilage	7249,5	8,78%	0,2273	0,8505	1401
Rinderfestmist	2105,3	2,55%	0,2861	0,8094	488
Huhn	2619,1	3,17%	0,5778	0,8614	1304
Restfutter	1834,6	2,22%	0,3006	0,9508	524
Rindergülle	48216	58,42%	0,0686	0,7824	2588

Für die Berechnung der Futtermengen der Laboranlage wurden die mittleren Mengen dieser Betriebsjahre der auf der BGA Bergzow eingesetzten Substrate entsprechend dem Verhältnis der Fermentervolumen (BGA: 2200 m³, BTP2: 20 L) skaliert. Die untergeordnete Menge an „Restfutter“, welches zu großen Teilen aus Maissilage besteht, wird beim Laborversuch dem Anteil an Maissilage zugeschlagen. Grundsätzlich sind diese Chargen miteinander vergleichbar; jedoch machen insbesondere Abweichungen bei den TS-Gehalten der „festen Substrate“ (Silage, Rinderfestmist und Hühnertrockenkot) eine Korrektur der Fütterungsmengen erforderlich, um vergleichbare Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Beim Einsatz neuer Substratchargen im Labor wurden deshalb die jeweiligen Dosiermengen entsprechend der bestimmten TS- und oTS-Konzentrationen angepasst, um die Raumbelastung mit organischer Trockenmasse (OLR) beizubehalten.

Für die von den Projektpartnern durchzuführenden Arbeiten zur Analyse und Bewertung der Biogasanlage wurden u. a. folgende Daten bereitgestellt:

- Betriebstagebuchdaten zu den Fütterungsmengen
- Betriebstagebuchdaten zum BHKW-Betrieb (Strom- und Wärmemengen, Gasqualität)
- Betriebstagebuchdaten zu den Gärbehältern (Temperaturen, Füllstände)
- Labordaten zu den monatlichen Fermenteranalysen
- Substratanalysen für Mais- und Grassilage (u. a. Weender und van Soest)
- Zählerstände der einzelnen Wärmenutzer

Im Rahmen des Teilvorhabens 3 wurden weiterhin die relevanten Daten zum vorhandenen Wärmemanagement bzw. zum Konzept der Wärmenutzung sowie zur geplanten Umrüstung der Referenzanlage auf ThermoFlex bereitgestellt und in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern analysiert. Eine weitergehende Darstellung erfolgt im nächsten Kapitel.

II.1.3.2 Definition betrieblicher Randbedingungen für eine Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage auf das ThermoFlex-Verfahren (AP 2.3)

Im Zuge von AP 2.3 wurden die wesentlichen Daten zum vorhandenen **Wärmemanagement** bzw. zum Konzept der Wärmenutzung sowie zur geplanten Umrüstung der Referenzanlage auf ThermoFlex bereitgestellt und in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern analysiert. Diese Daten und Informationen sind in das Konzept zum Wärmemanagement (siehe Kap. II.1.1) sowie in das dazugehörige Modell (siehe Kap. II.1.2) eingeflossen.

Weiterhin wurden wesentliche Aspekte spezieller **Anforderungen für eine Umrüstung** der Biogasanlage Bergzow auf das ThermoFlex-Verfahren - insbesondere aus verfahrenstechnischer Sicht - herausgestellt. Hierauf wird nachfolgend kurz eingegangen:

Die mittlere Raumbelastung mit organischer Trockenmasse des mesophilen Fermenters (2016-2018) wurde mit ca. 5,8 kg oTS/(m³d) berechnet und stellt eine im Vergleich mit vielen anderen landwirtschaftlichen BGA relativ hohe Last dar. Hinzu kommen der Einsatz stickstoffhaltiger Substrate mit NH₄-N-Gehalten im Fermenter von ca. 5 g/L sowie die hohen Rezirkulationsraten (3-4fache Menge des Substratinputs) womit auch der Nachgärer einen signifikanten Anteil an der organischen Belastung erhält. Diese Aspekte stellen anspruchsvolle Randbedingungen für die geplante Umstellung des Nachgärers auf thermophile Bedingungen dar.

In erster Linie sollte hier - nicht nur für die ThermoFlex-Umrüstung, sondern generell - eine Erhöhung der Substrateffizienz angestrebt werden, womit sich die Raumbelastung und auch die zum Anmischen erforderlichen Rezirkulatströme senken lassen, ohne dass die Biogasproduktion zurückgeht. Wie in den Kapiteln II.1.1.7 und II.1.4.1 erwähnt, ist auch die infolge der hohen Güllezugabe und Rezirkulatmengen geringe hydraulische Verweilzeit im Fermenter und Nachgärer von Bedeutung für die Thermoflex-Umrüstung.

Die folgenden Maßnahmen können für eine **generelle Verbesserung der Betriebsweise** vor, während und auch nach der Umrüstung auf ThermoFlex in Betracht gezogen werden:

- Steigerung der Substrateffizienz:
 - Steigerung Gasertrag durch die geplante Abdeckung des Gärrestlagers,
 - Wirkungsgrad der BHKW verbessern (insbes. durch Minimierung Teillastbetrieb),
 - optimierter Einsatz der vorhandenen Landia-Pumpe zur Schlammumwälzung und auch zur Zerkleinerung verbliebener Faserstoffe im Nachgärbehälter.
- Senkung des Rezirkulationsstromes (Nachgärer => Anmischgrube => Fermenter => Nachgärer) u. a. durch
 - die verringerten Fütterungsmengen (siehe Substrateffizienz),
 - ggf. verbesserte Substrateigenschaften (geringerer Faseranteil),
 - geringere Viskosität des Nachgärer-Schlammes bei thermophilem Betrieb,
 - optimierten Einsatz der Landia-Pumpe (vgl. oben).
- Nutzung des derzeit hauptsächlich nur zur Güllevorwärmung dienenden Hydrolyse-Behälters als aktives Gärvolumen (z. B. Rezirkulat in die Hydrolyse leiten, um die Gülle besser biologisch vorzubehandeln (Vorabbau) und somit den Fermenter zu entlasten).

Eine Veränderung der Substratmischung käme aus heutiger Sicht des Anlagenbetriebes nur vorübergehend zur Unterstützung der Adaption in Betracht. Aus betriebswirtschaftlichen Gründen sollte auch die Senkung der Fütterungsmengen ohne eine äquivalente Verbesserung der Substrateffizienz möglichst vermieden werden.

Während der mehrmonatigen **Adaptionszeit** für den Übergang des Nachgärers in thermophile Temperaturbereiche können - über die oben genannten Möglichkeiten hinausgehend - weitere Maßnahmen ergriffen werden, wie z. B.

- ausreichende Adaptionszeit / geringe Temperaturanhebung während der Adaption,
- engmaschiges und gründliches Monitoring des Bioprozesses,
- weitergehende Senkung der Rezirkulationsrate vom Nachgärer zum Fermenter (vgl. oben, ggf. unterstützende Rezirkulation aus dem Gärrestlager unter teilweiser Umgehung des Nachgärers),
- temporäre Veränderung der Substratmischung (z. B. weniger HTK, hochwertigere Chargen aus den Silos, vgl. [CW22b]) um die Prozessbiologie zu entlasten.

Diese und weitere Optimierungsmöglichkeiten wurden im nächsten Projektabschnitt genauer betrachtet (vgl. insbes. Kap. II.1.4.2).

II.1.3.3 Realisierung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage auf das ThermoFlex-Verfahren (AP 3.4)

Fortgesetzte Bereitstellung und Aufbereitung Daten zum Anlagenbetrieb:

Nachfolgend sind Änderungen im Anlagenbetrieb aufgelistet, die im Zuge der Betriebsjahre 2019 und 2020 vorgenommen wurden und für das Projekt relevant waren (vgl. Kap. II.1.3.1 und II.1.3.2):

- Zeitweise (von Oktober 2019 bis Juni 2020) wurden ca. 30 % der Maische des Anmischers direkt dem Nachgärer zugeführt, um den Fermenter zu entlasten (vgl. [CW22b]).
- Die mit der Rindergülle und dem Rezirkulat aus dem Nachgärer in der offenen Anmischgrube erzeugte Maische wurde temporär (2020) wieder - wie im ursprünglichen Betrieb - in den abgedeckten und beheizten „Hydrolysebehälter“ überführt, welcher somit als „Vorfermenter“ diente.
- Die geplante Abdeckung des Gärrestlagers, die eine Verwertung des Biogases und damit eine Steigerung der Substrateffizienz ermöglicht, verschiebt sich aus genehmigungsrechtlichen Gründen.
- Der vom Nachgärer als Rezirkulat in die Anmischgrube gepumpte Volumenstrom liegt mit 14 m³/h inzwischen regelmäßig bei der 4fachen Menge des Substratinputs (also im oberen Bereich der bisher angenommenen Spannweite).
- Die Soll-Temperaturen im Fermenter und Nachgärer sind seit 2020 mit je 43°C ca. 1 K höher als im bisherigen Betrachtungszeitraum 2016-2018 (bzw. 2019).

Die hohe organische Raumbelastung (OLR) und die hohe Stickstoffbelastung spiegeln sich in den monatlichen Analysen des Fermenterschlamms wider.

So wurden im Fermenter im Betriebsjahr 2020

- FOS/TAC-Werte zwischen 0,27 und 0,66,
- NH₄-N-Konzentrationen zwischen 3,6 und 5,1 g/L und
- TS-Gehalte zwischen 9,2 und 10,5 % gemessen.

Auch der oTS-spezifische Methanertrag der Anlage deutet auf einen unterdurchschnittlichen Substratabbau hin (vgl. Kap. II.1.4.2).

Die folgenden Tabellen zeigen die aus den Betriebstagebüchern 2019 und 2020 bestimmten Mittelwerte der Fütterungsmengen der BGA Bergzow, mit den TS- und oTS-Gehalten (gemessen und im Vergleich mit Standardwerten nach [KTBL15]) sowie die daraus resultierenden oTS-Raumbelastungen.

Tabelle 13: Fütterungswerte BGA Bergzow 2019

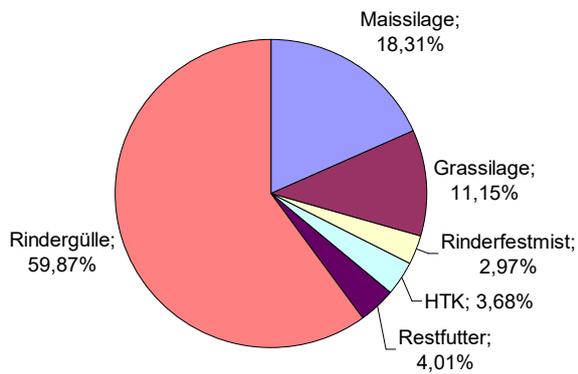
Mittelwerte Fütterung BGA Bergzow 2019						TS-/oTS-Analysen vom Januar 2019			Vgl. mit TS/oTS aus [KTBL15]:		
Fermentervol.: 2200 (ohne Hydrolyse)											
Art	Menge [t FM/d]	Mengenanteil [%]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [t oTS/d]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [t oTS/d]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [t oTS/d]
Maissilage	13,189	18,31%	0,352	0,9624	4,47	0,3500	0,9500	4,39	0,3500	0,9000	2,53
Grassilage	8,033	11,15%	0,2273	0,8505	1,55	0,3500	0,9000	2,53	0,2500	0,8500	0,45
Rinderfestmist	2,140	2,97%	0,2048	0,843	0,37	0,2500	0,8500	0,45	0,4000	0,7500	0,79
HTK	2,649	3,68%	0,4337	0,8639	0,99	0,3500	0,9500	0,96	0,3500	0,9500	0,96
Restfutter	2,885	4,01%			0,98	0,3500	0,9500	0,96	0,3500	0,9500	0,96
Rindergülle	43,118	59,87%	0,065	0,8178	2,29	0,0850	0,8000	2,93	0,0850	0,8000	2,93
	72,014	100,00%			10,65			12,06			12,06
	26285 t/a		Org. Raumbelastung [kg oTS/(m³d)]:			4,842		5,480			5,480
			Substratverweilzeit [d]:			30,5					

Tabelle 14: Fütterungswerte BGA Bergzow 2020

Mittelwerte Fütterung BGA Bergzow 2020						TS-/oTS-Analysen vom Oktober 2020			Vgl. mit TS/oTS aus [KTBL15]:		
Fermentervol.: 2200 (ohne Hydrolyse)											
Art	Menge [t FM/d]	Mengenanteil [%]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [t oTS/d]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [t oTS/d]	TS [kg/kg FM]	oTS [kg/kg TS]	oTS-Fracht [t oTS/d]
Maissilage	18,090	23,42%	0,2962	0,9547	5,12	0,3500	0,9500	6,01	0,3500	0,9000	1,99
Grassilage	6,328	8,19%	0,2946	0,9035	1,68	0,3500	0,9000	1,99	0,2500	0,8500	0,43
Rinderfestmist	2,000	2,59%	0,2198	0,8441	0,37	0,2500	0,8500	0,43	0,4000	0,7500	0,60
HTK	2,000	2,59%	0,4372	0,8474	0,74	0,3500	0,9500	1,00	0,3500	0,9500	1,00
Restfutter	3,000	3,88%			0,85	0,3500	0,9500	1,00	0,3500	0,9500	1,00
Rindergülle	45,836	59,33%	0,0629	0,8306	2,39	0,0850	0,8000	3,12	0,0850	0,8000	3,12
	77,254	100,00%			11,15			13,15			13,15
	28198 t/a		Org. Raumbelastung [kg oTS/(m³d)]:			5,070		5,976			5,976
			Substratverweilzeit [d]:			28,5					

Abbildung 50 zeigt die Futtermischung, die sich jeweils gemittelt über die Betriebsjahre 2019 und 2020 ergibt. Diese Substrate wurden auch in den Betriebsjahren 2016-2018 auf der BGA eingesetzt, wobei sich die Mischungsverhältnisse in den einzelnen Jahren verändern können. So ist z. B. der Maisanteil 2019 gegenüber 2018 (vgl. Kap. II.1.3.1) merklich gesunken und 2020 wieder etwas angestiegen.

Mittlerer Futtermix BGA Bergzow 2019 (mengenbasiert)



Mittlerer Futtermix BGA Bergzow 2020 (mengenbasiert)

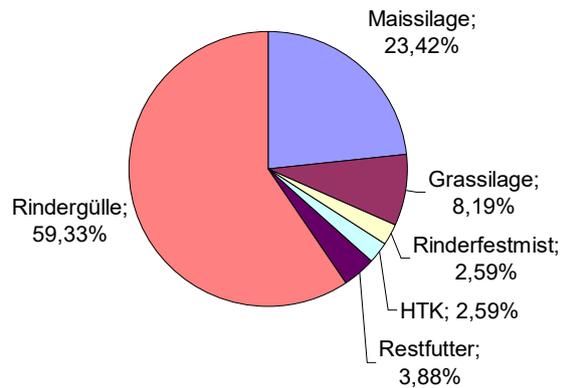


Abbildung 50: Futtermischung der BGA Bergzow (Mittelwerte aus täglichen Substratmengen => links: Betriebsjahr 2019, rechts: Betriebsjahr 2020)

Umrüstung der Referenzanlage:

Durch die Realisierung der Verfahrensvariante „ThermoFlex-Basislösung“ (siehe Kap. II.1.1.6, II.1.1.8 und II.1.3.4) konnte der Aufwand der **Umrüstung** der Referenzanlage gegenüber der vollumfänglichen ThermoFlex-Umsetzung (vgl. Kap. II.1.1.5) auf der Referenzanlage deutlich reduziert werden. Die Beheizungseinrichtungen des Fermenters der BGA Bergzow wurden Mitte Juni 2021 in Eigenleistung des Betreibers JSW mit zwei zusätzlichen innenliegenden Mantelheizungen mit Edelstahlrohren DN 50 ausgestattet, wobei der Fermenter mit jetzt 6 Heizregistern über eine Heizleistung von ca. 225 kW verfügt. Dies begünstigte die Temperaturerhöhung zu Beginn des Versuches.

Weiterhin war JSW in diesem Zeitraum maßgeblich an der in den Kap. II.1.1.6, II.1.1.8 und beschriebenen Planung, Konkretisierung und Umsetzung des erweiterten Demonstrationsversuches (großtechnische Erprobung) beteiligt. Die aktuellen Rahmenbedingungen des Anlagenbetriebs (Verfahrenstechnik, Prozessbiologie, Substratversorgung, Wärmemanagement, Betrieb der Trocknungsanlage, vgl. Abbildung 51) wurden mit weiteren Daten und Informationen genauer definiert (vgl. Kap. II.1.3.1 und II.1.3.2).

Für die Ergänzung des Wärmemodells um ein einfaches Modell der Trocknung wurden den Projektpartnern Daten zur Trocknung auf der BGA Bergzow (Zählerstände, Trocknungsmengen, Trocknungsware, Trocknungsdauer der Betriebsjahre 2019 und 2020) bereitgestellt. Weiterhin wurde die Durchführung und Auswertung der Labor- und Simulationsuntersuchungen im Rahmen von Teilvorhaben 4 durch Bereitstellung der Einsatzstoffe sowie von aufbereiteten Daten unterstützt.



Abbildung 51: Trocknungsanlage auf der BGA Bergzow

II.1.3.4 Betriebliche Durchführung der großtechnischen Erprobung, Bereitstellung und Aufbereitung Betriebsdaten der Erprobungsphase (AP 4.4)

Der erste Versuch im Rahmen der großtechnischen Erprobung wurde nach der in Kap. II.1.3.3 erwähnten Heizungsumrüstung im Fermenter Ende Juni 2021 begonnen und endete nach ca. einem Monat. Ein Wiederholungsversuch startete Ende August und wurde bis zum Projektende Ende September 2021 abgeschlossen.

Eine Auswertung der großtechnischen Erprobung erfolgt gemeinsam durch alle Projektbeteiligten im Rahmen von AP 4.6 und wird in Kap. II.1.1.8 zusammen mit der Planung und Durchführung dieses Versuches dokumentiert.

II.1.4 Teilvorhaben 4: Wissenschaftliche Begleitung der Weiterentwicklung und Anpassung des ThermoFlex-Verfahrens sowie der großtechnischen Erprobung und Validierung (Hochschule Magdeburg-Stendal)

II.1.4.1 Semi-kontinuierlicher Langzeit-Gärversuch zur Temperaturtoleranz der Prozessbiologie der Referenzanlage (AP 1.2 und 2.4)

Material und Methoden / Grundlegendes zum Versuchsaufbau und -ablauf:

Die Hochschule führte in den Teilphasen 1 und 2 des Verbundvorhabens im Rahmen der AP 1.2 und 2.4 einen semi-kontinuierlichen Langzeit-Gärversuch zur Temperaturtoleranz der Prozessbiologie der Referenzanlage durch. Durch diesen Versuch sollten wesentliche Informationen für die Umstellung der Referenzanlage auf das ThermoFlex-Verfahren sowie zur optimalen Prozessführung, bezüglich Temperaturniveau, Temperaturschwankungen, Stabilität, Effizienz und Regelung des Gesamt-Prozesses, gewonnen werden. Dabei waren im Gegensatz zu den im Vorläuferprojekt durchgeführten Gärversuchen die Randbedingungen bzw. die Betriebsweise der BGA Bergzow ausreichend genau nachzubilden. Das bedeutet, dass mit - vor allem für die thermophile Betriebsweise - sehr anspruchsvollen Bedingungen gearbeitet wurde. Hier sind u. a. die auf der Anlage gefahrene relativ hohe Belastung des Fermenters sowie (durch die Rezirkulation) auch des Nachgärers und der Einsatz stickstoffhaltiger Substrate zu nennen. Mit einer erfolgreichen Abbildung dieser schwierigen Randbedingungen, kann aller Wahrscheinlichkeit nach davon ausgegangen werden, dass das Verfahren auch auf den üblichen landwirtschaftlichen BGA funktioniert (vgl. Kap. II.1.1.7).

Nachfolgend wird der Versuchsaufbau kurz vorgestellt. Eine weitergehende Beschreibung dieses Langzeit-Gärversuches findet sich in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung [SEI21].

Als Basis für die Versuchsparmetrierung werden die Mittelwerte der Daten der letzten 3 Betriebsjahre (2016 bis 2018) der Biogasanlage Bergzow herangezogen (siehe Kap. II.1.3.1). Der Gärversuch wurde von Mitte Januar bis Ende Dezember 2019 durchgeführt. Hierfür wurde die Laborbiogasanlage am Standort der Hochschule „Biogas Test Plant BTP2“ (Hersteller: Fa. Umwelt- und Ingenieurtechnik GmbH Dresden) verwendet (siehe Abbildung 52).



Abbildung 52: Laborbiogasanlage „BTP2“ des Fachbereichs Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit der HS

Die BTP2 besitzt folgende wesentliche Parameter:

- zwei Gärbehälter mit je x 20 Liter Arbeitsvolumen,
- Fütterung manuell (im Versuch i. d. R. 1-mal pro Tag am frühen Nachmittag),
- Gärrestentnahme manuell (im Versuch i. d. R. 2 bis 3-mal pro Woche),
- steuerbare Rührwerke (im Hauptversuch 15 min an / 5 min aus),
- automatische Gasmengenmessung (Gasuhr Ritter TG 05, Version 5-8),
- Gasspeicherung je Behälter in zwei Folienbeuteln mit je 5 Liter Füllvolumen,
- Analyse (CH₄, CO₂, O₂, H₂S) mit Gasanalysegerät Pronova SSM 6000, automatisch (i. d. R. alle 2 bis 4 Stunden),
- kontinuierliche Messungen je Behälter: pH, Gärtemperatur sowie Drehzahl und Drehmoment Rührwerke, Lufttemperatur, Luftdruck,
- elektrische Mantelheizung, Temperatur je Behälter regelbar.

Die beiden Gärbehälter der BTP2 wurden in Reihe geschaltet (Fermenter/Nachgärer), um das ThermoFlex-Verfahren abzubilden. Es erfolgte mit jeder Fütterung eine Rezirkulation vom Nachgärer in den Fermenter. Die Rezirkulationsmenge wurde angelehnt an den Betrieb der Referenzanlage im o. g. Betrachtungszeitraum (2016 bis 2018) auf das 3fache der dem Fermenter zugeführten Substratmenge eingestellt (RV=3).

Die Versuche begannen mit der Neubeimpfung beider Gärbehälter am 15.01.2019 mit frischem Schlamm, der am gleichen Tag aus dem Nachgärer der BGA Bergzow entnommen wurde. Zur Fütterung werden die Substrate derselben Biogasanlage verwendet, die über den Versuchszeitraum in mehreren Chargen geholt und bei 4°C gelagert werden. Dabei handelt es sich um Maissilage, Grassilage, Rinderfestmist, Hühner trockenkot und Rindergülle. Die Mengenverhältnisse und die erfassten Qualitäten dieser Substrate können Kap. II.1.3.1 entnommen werden.

Beim Einsatz neuer Substratchargen wurden die jeweiligen Dosiermengen entsprechend der im Labor zeitnah bestimmten TS- und oTS-Konzentrationen angepasst, um die Raumbelastung mit organischer Trockenmasse (oTS-Raumbelastung, OLR) beizubehalten. Diese Vorgehensweise ist insbesondere bei der Maissilage von großer Bedeutung für die Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsphasen. So wurde ab Anfang Juni mit einer neuen Maissilage-Charge mit einem TS-Gehalt von ca. 40 % gearbeitet (vorher 34 %, gleiches Silo von 2018), während ab Anfang November die Maissilage vom Herbst 2019 aus Bergzow eingesetzt wurde, welche nur einen TS-Gehalt von 30 % aufwies.

Mit der Fütterung des Fermenters und (über die Rezirkulation) des Nachgärers wurde am Folgetag begonnen, wobei die Last schrittweise gesteigert wurde. Bis Anfang Februar wurde die Zielraumbelastung erreicht (siehe Abbildung 57).

Die Laboranalysen umfassen während des Langzeit-Gärversuches i. d. R.:

- TS und oTS Gärbehälter (ca. 1-mal pro Monat),
- FOS/TAC Gärbehälter (i. d. R. täglich mit dem „HACH BIOGAS Titration Manager“),
- TS und oTS Substrate (nach Bedarf).

Die organische Raumbelastung des Nachgärers wird auch maßgeblich durch die Rezirkulation sowie den sich im Fermenter einstellenden oTS-Gehalt beeinflusst.

Wie auf der Referenzanlage wird der Fermenter mesophil mit konstanter Temperatur (42°C) und der Nachgärer in der Start- und Referenzphase zunächst ebenfalls mesophil mit 42°C betrieben. Anschließend wurde die Temperatur im Nachgärer in variablen Schritten bis auf die angestrebte thermophile Adaptionstemperatur von 54°C erhöht und dann entsprechend dem ThermoFlex-Verfahren gezielt variiert (siehe Abbildung 53). Die Fermentertemperatur wurde im gesamten Versuchszeitraum auf ca. 42°C gehalten (mit Ausnahme eines 5tägigen Anlagenstillstandes infolge eines Defektes in der Anlagensteuerung Anfang September sowie einer planmäßigen 1wöchigen Betriebspause Anfang Oktober).

Die durchgeführten Versuche können in folgende Abschnitte unterteilt werden:

- Einfahrphase (16.01. - 17.02.2019): Fermenter- und Nachgärertemperatur ca. 42°C,
- **Phase 1** - „Mesophile Referenz“ (18.02. - 17.03.2019, 28 Tage): Fermenter- und Nachgärertemperatur ca. 42°C, bei Zielbelastung und etwa stationären Verhältnissen,
- **Phase 2** - „Adaptionsphase“ (18.03. - 13.09.2019, 180 Tage): Nachgärertemperatur in variablen Tagesschritten von 42°C bis auf thermophile Bedingungen gesteigert (ab Anfang Juni konstant 54°C), mit temporär abgesenkter Belastung,
- **Phase 3** - „Thermophile Referenz“ (14.09. - 04.10.2019, 21 Tage): Nachgärertemperatur konstant 54°C bei Zielbelastung und etwa stationären Verhältnissen,
- **Phase 4** - „Hauptversuch“ (21.10. - 19.12.2019, 60 Tage): gezielte Temperaturvariation im Nachgärer entsprechend ThermoFlex zwischen 48°C und 58°C bei Zielbelastung. Die Hauptversuche in Phase 4 lassen sich noch einmal in folgende Unterabschnitte unterteilen:
 - **Phase 4a** - „T-Stress1“ (21.10. - 10.11.2019, 21 Tage): Temperaturvariation im Nachgärer im Bereich zwischen 50-58°C, mit Änderungsraten zwischen -3 K/d und +1 K/d, erhöhter Temperaturstress insbesondere durch eine 6tägige Phase mit 58°C,
 - **Phase 4b** - „Erholungsphase“ (11.11. - 18.11.2019, 8 Tage): Temperaturabsenkung im Nachgärer auf 50°C an 5 Tagen und 48°C an 3 Tagen,
 - **Phase 4c** - „T-Stress2“ (19.11. - 30.11.2019, 12 Tage): Temperaturvariation im Nachgärer im Bereich zwischen 50-58°C, mit hohen Änderungsraten zw. -4 K/d und +2 K/d,
 - **Phase 4d** - „Verringerter Temperaturbereich“ (01.12. - 19.11.2019, 19 Tage): Temperaturvariation im Nachgärer im Bereich zwischen 50-54°C, mit hohen Änderungsraten zwischen -4 K/d und +2 K/d, Rezirkulation verringert von RV=3 auf RV=1.

Die folgenden Abbildungen veranschaulichen diese Versuchsphasen noch einmal für den Gesamtzeitraum (Abbildung 53) sowie im Detail für die Phase 4 mit dem Hauptversuch zur Temperaturvariation im Nachgärer (Abbildung 54).

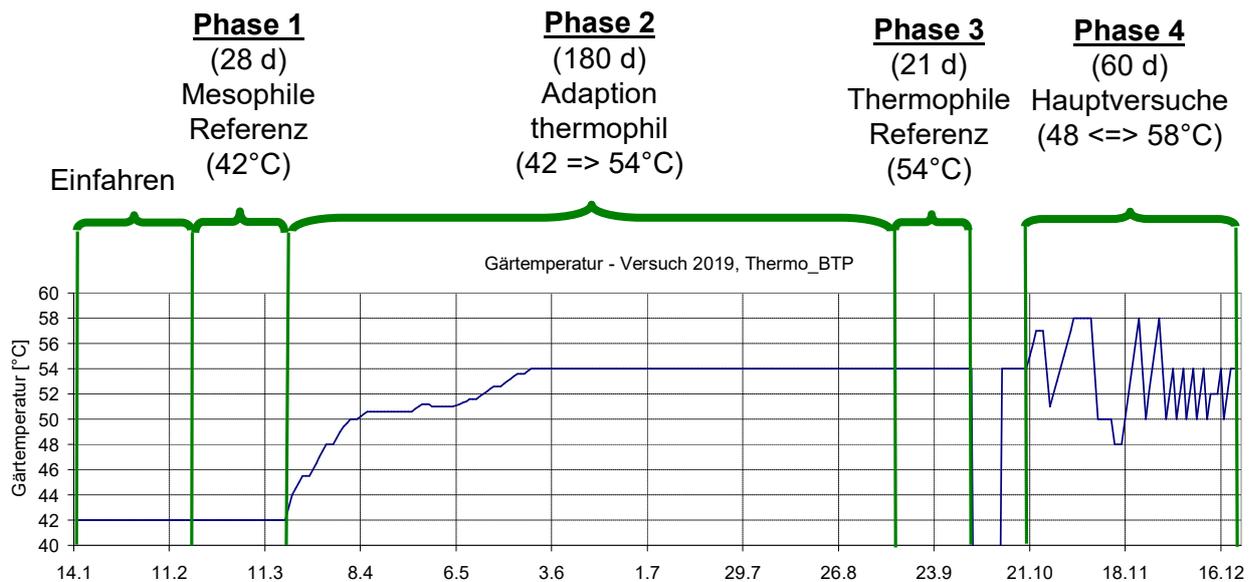


Abbildung 53: Versuchsphasen entspr. der eingestellten Zieltemperaturen im Nachgärer - Gärversuch 2019

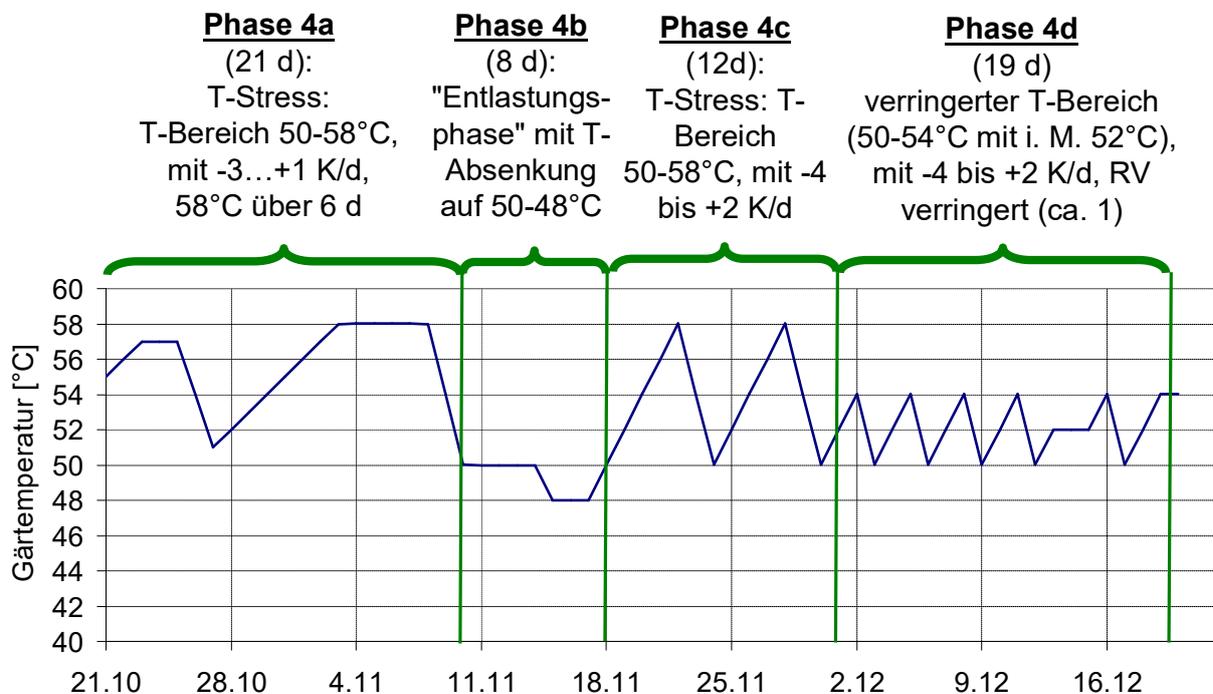


Abbildung 54: Versuchsphasen entspr. der eingestellten Zieltemperaturen im Nachgärer - Phase 4

Die Fütterung erfolgte bei Versuchsbeginn ab Januar 2019 zunächst i. d. R. einmal pro Wochentag (Montag bis Freitag). Die mittlere OLR des mesophilen Fermenters der Laboranlage wurde entsprechend der Referenzanlage auf ca. 5,8 kg oTS/(m³d) eingestellt, was eine relativ hohe Last darstellt (vgl. Kap. II.1.1.7). Damit ist die Ziel-Raumbelastung der Laboranlage auch knapp doppelt so hoch, wie sie in den maßgeblichen Versuchen des Vorläuferprojektes [THE19], [SEI18] gefahren wurde.

Infolge der verzögerten Adaption des Nachgärers an thermophile Bedingungen, bzw. von Verschlechterungen der Prozessstabilitätsparameter ab Nachgärer-Temperaturen >50°C (vgl. Auswertung unten) wurde vom April bis August die Raumbelastung des Fermenters sukzessive abgesenkt. Dem entsprechend wurde auch die Rezirkulatmenge und damit die Belastung des Nachgärers (unter Beibehaltung des Rezirkulationsverhältnisses von RV=3) reduziert. Bis

zum Ende von Phase 2 wurde dann die Raumbelastung schrittweise wieder gesteigert, wobei die Zielbelastung von knapp 6 kg oTS/(m³d) bis zum 13.09.19 wieder erreicht wurde.

Zur Entschwefelung wurde das auch auf der Referenzanlage eingesetzte Eisen(III)-hydroxid-Produkt verwendet. Es wurde i. d. R. täglich in den Fermenter und nach Bedarf auch in den Nachgärer dosiert. Dabei wurden H₂S-Werte im Biogas zwischen ca. 100 und 300 ppm angestrebt und auch weitgehend eingehalten.

Wesentliche Ergebnisse des Gärversuches 2019:

Näherungsweise stationäre Verhältnisse in der Einfahrphase - erkennbar an etwa gleich bleibenden Wochenmengen der Biogas- bzw. Methanbildung (vgl. Abbildung 57) sowie stabile FOS/TAC-Werte (ca. 0,2 bis 0,3) im Fermenter und Nachgärer - wurden bis Mitte Februar erzielt. Ab der 6. Versuchswoche konnte somit eine 4wöchige Referenzphase mit mesophilem Nachgärer bei etwa stationären Bedingungen gefahren werden (vgl. oben).

Ab dem 18.03.2019 wurde die Nachgärer-Temperatur in variablen Tagesschritten von 42°C bis auf thermophile Bedingungen angehoben. Dabei wurde die Temperatur zunächst in Schritten von 0,5 K/d bis auf 49°C und dann weiter in kleineren Schritten (0,4 bis 0,1 K/d) bis auf 54°C gesteigert (siehe Abbildung 53).

Während in den ersten beiden Wochen der Adaption (bis zu Gärtemperaturen von ca. 48°C) Gas- bzw. Methanmengen merklich anstiegen (Abbildung 57), deutete sich in der 3. Woche (Anfang April) ein Rückgang der Methankonzentration an (Abbildung 55), der nicht mehr allein durch physikalische Effekte (erhöhte CO₂-Ausgasung durch geringere CO₂-Löslichkeit bei Temperaturanstieg) erklärt werden kann. In der 4. Adaptionswoche ab dem 8. April - mit Nachgärertemperaturen von knapp über 50°C - wird dieser Effekt deutlicher. Es tritt offensichtlich - wie auch mit dem Erfahrungsschatz des Vorläuferprojektes erwartet - ab ca. 50°C eine Hemmung der noch an mesophile Bedingungen gewöhnten Prozessbiologie auf. Dies wird auch durch die Messwerte für FOS/TAC untermauert (Abbildung 56). Hier ist ab Anfang April ein Anstieg von knapp über 0,2 bis auf zunächst ca. 0,35 zu verzeichnen. Dieser Wert lässt sich bis Mitte Mai durch temporäres Aussetzen der Temperaturerhöhung sowie durch reduzierte Fütterungsmengen stabil halten.

Mit der weiteren Temperaturanhebung im Nachgärer von ca. 52 auf 54°C ab Mitte Mai steigt der FOS/TAC schließlich auf Werte von knapp über 0,4 und blieb bis Ende Juni stabil. Die Methankonzentrationen des im Nachgärer erzeugten Biogases stabilisierte sich in dieser Phase mit Werten zwischen ca. 42 und 47 % auf relativ geringem Niveau und lag damit ca. 5-10 % unter der CO₂-Konzentration (hier nicht dargestellt).

Um eine bessere Adaption des Nachgärers an thermophile Bedingungen zu erzielen, wurde vom Anfang Juli bis Anfang August die Raumbelastung sukzessive abgesenkt (siehe Abbildung 57) und zeitweise auch auf die Fütterung mit den besonders stickstoffhaltigen Substraten verzichtet. In dieser Zeit wurden damit Verbesserungen im Nachgärer erzielt, indem FOS/TAC-Werte von 0,35 und Methangehalte bis zu 50% erreicht wurden.

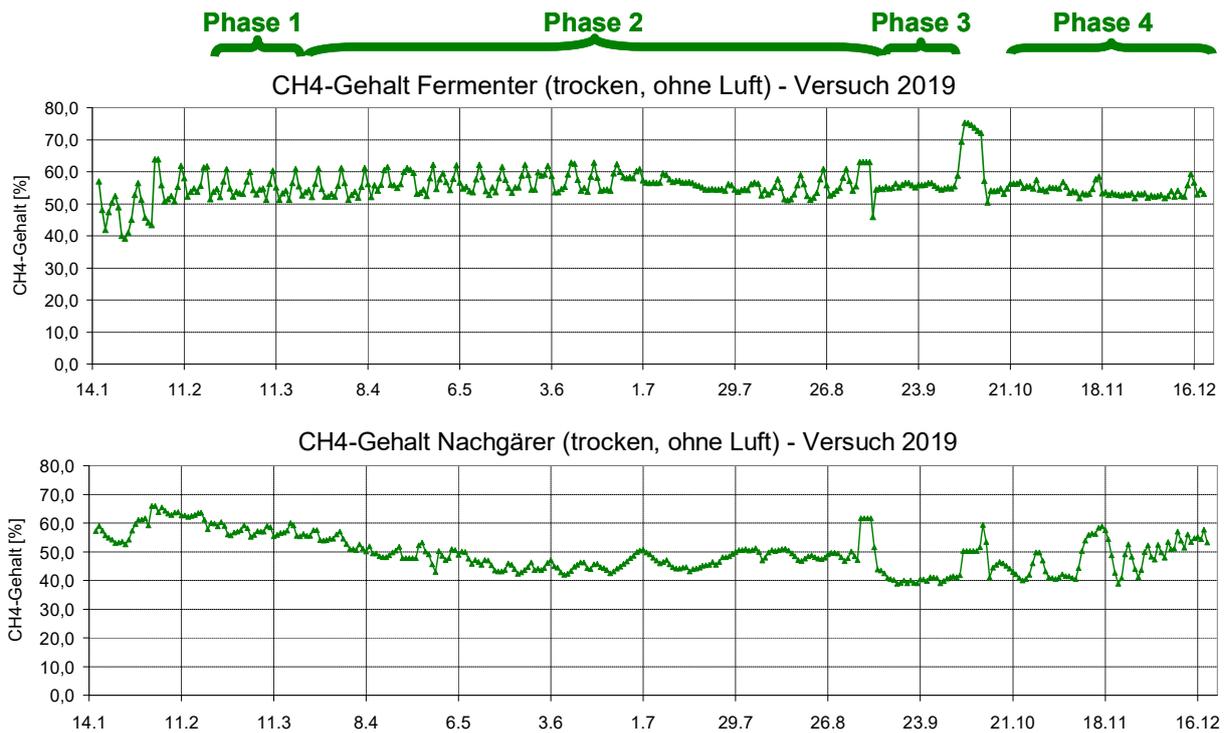


Abbildung 55: CH₄-Gehalte im Biogas (oben: aus Fermenter, unten: aus Nachgärer, Tagesmittelwerte aus den Gasanalysen, rechnerisch wasser- und luftbereinigt) - Gärversuch 2019

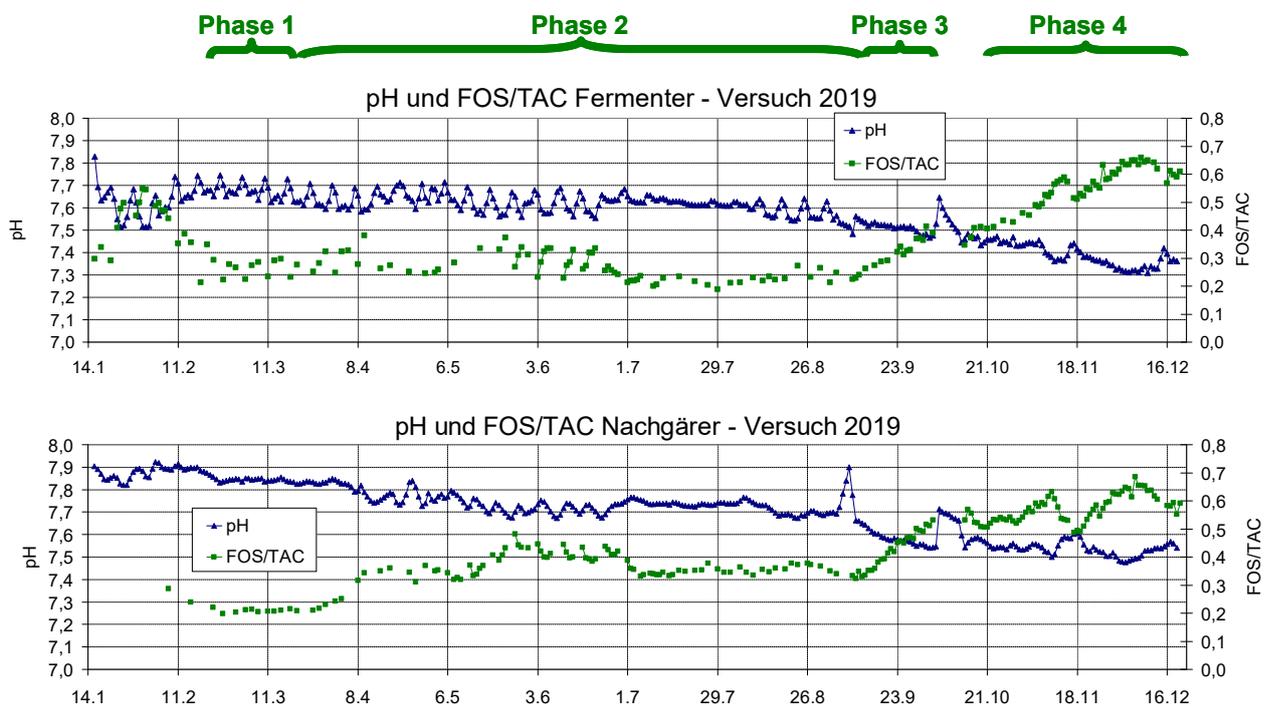


Abbildung 56: pH- und FOS/TAC-Werte (oben: Fermenter, unten: Nachgärer) - Gärversuch 2019

Mit der schrittweisen Steigerung der Belastung ab Mitte August, bis zur Zielbelastung von knapp 6 kg oTS/(m³d) ab dem Ende von Phase 2 Mitte September, kommt es zu einem entsprechenden Anstieg der FOS/TAC-Gehalte im Nachgärer sowie zeitverzögert auch im Fermenter bis zu Werten von über 0,6. Der Verlauf der pH-Werte passt zu dieser Entwicklung, bleibt aber über den gesamten Versuchsverlauf mit Werten deutlich über 7 im unkritischen

Bereich. In der Regel lagen die pH-Werte im Nachgärer um 0,1-0,2 höher als im Fermenter. Auch der Methangehalt im Biogas des Nachgärers (Abbildung 55, unten) sinkt mit der vollen Belastung zeitweise wieder von 50 auf 40%. In der Phase 4 mit Temperaturvariation schwankt er merklich um $\pm 5\%$ bis zu $\pm 20\%$ (auch aufgrund der stärker temperaturabhängigen Löslichkeit des CO_2). Der CH_4 -Gehalt im Nachgärer steigt jedoch in Phase 4 insgesamt wieder an, bis über 55 % in Phase 4d. Der Methangehalt des Biogases aus dem Fermenter bleibt über den gesamten Versuchszeitraum relativ stabil bei guten Werten von deutlich über 50 % (Abbildung 55, oben). Die Einflüsse der Betriebspausen (Heizungsstörungen) Anfang September und Anfang Oktober sind bei den Methangehalten wie auch bei den Methanmengen natürlich deutlich erkennbar.

Insbesondere die FOS/TAC-Werte von über 0,6 weisen auf einen zunehmenden Stress - sowohl im Nachgärer als auch im Fermenter - hin (vgl. Abbildung 56). Offensichtlich lässt sich die Adaption der Prozessbiologie im Nachgärer an ausgeprägt thermophile Bedingungen (im Mittel 54°C) mit der höchsten Belastung nicht vollständig erreichen. Durch die hohen Rezykulationsmengen kommt es bei suboptimalem Prozess im Nachgärer auch zur erhöhten Rückbelastung des Fermenters.

Hier ist auch die geringe hydraulische Verweilzeit (durch die hohe Rezykulation nur je ca. 7 Tage im Fermenter und im Nachgärer) von möglicherweise entscheidender Bedeutung. Bei ausgeprägten Milieu-Unterschieden in den Behältern (mesophiler Fermenter und thermophiler Nachgärer) wird ein Teil der in den jeweils anderen Gärbehälter überführten Methanbildner zumindest vorübergehend gehemmt bzw. deaktiviert. Möglicherweise reicht dann die kurze Verweildauer nicht aus, um eine vollständige Kompensation dieser Hemmung durch Nachwachsen von optimal an die jeweilige Temperatur angepassten Methanbildnern zu erreichen. Hinzu kommt eine relativ hohe Stickstoff-Belastung durch die Substrate.

Erst in der Phase 4d gelingt durch Absenkung

- des Temperaturbereiches von im Mittel 54°C ($50-58^\circ\text{C}$) auf 52°C ($50-54^\circ\text{C}$) und
- der Rezykulation (von $\text{RV}=3$ auf $\text{RV}=1$)

bei gleicher OLR des Fermenters eine merkliche Prozessverbesserung, wie an den Abbildung 55 und Abbildung 56 erkennbar ist.

Aus Zeitgründen (späteste planmäßige Außerbetriebnahme der BTP2 am 20.12.2019) konnten diese positiven Entwicklungen der letzten Versuchswochen nicht bis zum Optimum verfolgt werden. Auch eine getrennte Betrachtung des Einflusses der Parameter Temperaturbereich und Rezykulation (bzw. hydraulische Verweilzeit) war im Labor-Gärversuch 2019 deshalb nicht mehr möglich.

Maßgeblich bei der Bewertung der erzeugten Methanmengen ist vor allem die Betrachtung des **Gesamtsystems**, also auch der Methanproduktion des Fermenters sowie der oTS-spezifischen also fütterungsabhängigen **Methanausbeuten** (vgl. Abbildung 57).

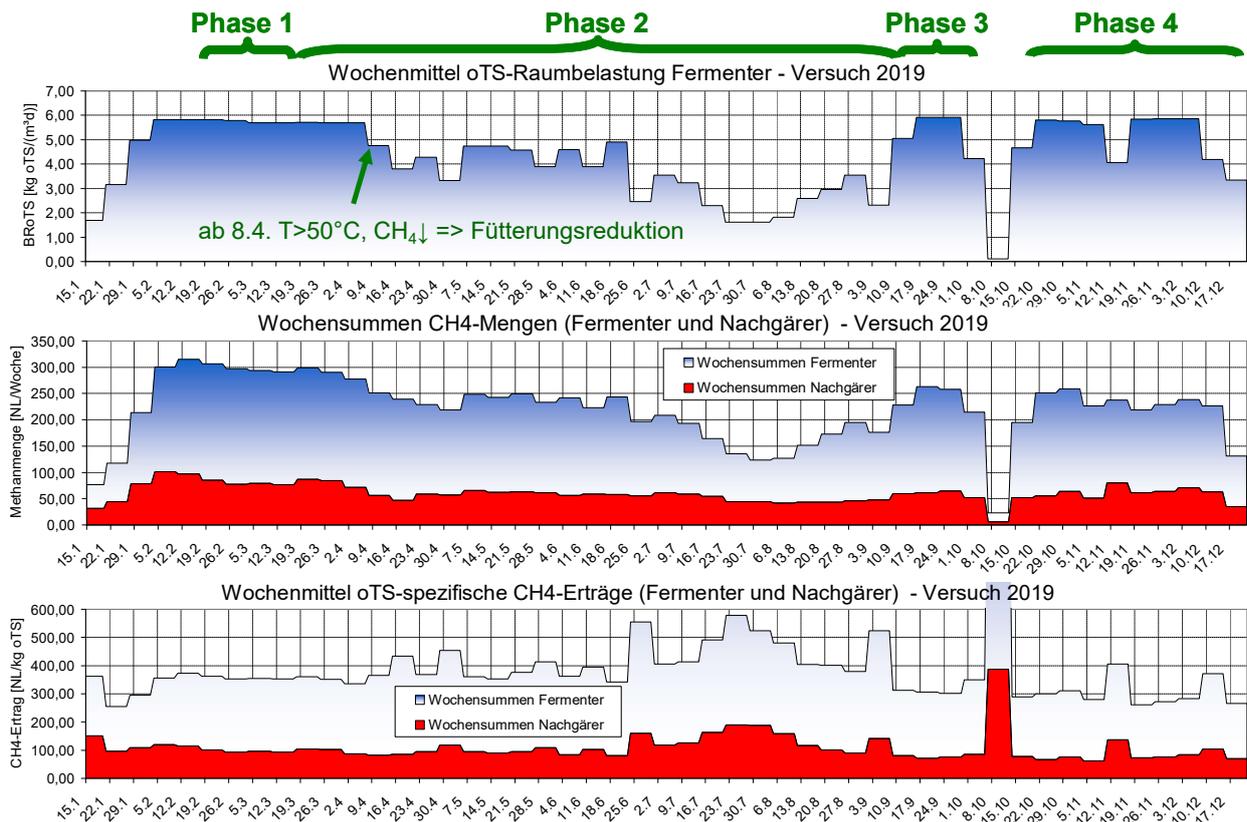


Abbildung 57: Wochenmittelwerte der OLR des Fermenters (oben), Wochensummen der Methanmengen aus Fermenter und Nachgärer (Mitte), Wochenmittelwerte der oTS-spezifischen CH₄-Ausbeuten Fermenter und Nachgärer (unten) - Gärversuche 2019 (letzte Fütterung am Donnerstag, den 19.12.19 => in Darstellung reduzierte OLR und CH₄-Menge in letzter Woche)

Trotz der geschilderten Adaptionsprobleme, liegen die für die Auswertung maßgeblichen oTS-spezifischen Methanausbeuten des Gesamtsystems (Fermenter und Nachgärer) in der Adaptionsphase ca. 8 % über der bereits relativ guten Referenzphase mit mesophilem Nachgärer (vgl. Abbildung 58). Dies wird sicher hauptsächlich durch die Reduzierungen in der Belastung begünstigt (vgl. Abbildung 57, oben). Damit wird zugleich deutlich, wie hoch die Bedeutung der Belastung auch für die Substrateffizienz ist. Generell lagen die Gesamtmethanausbeuten im erwarteten Bereich des in ebenfalls in Abbildung 58 vergleichend dargestellten aus den Richtwerten des KTBL [KTBL15] berechneten Ertrages (von 305 L/kg oTS). Jedoch wurde in den Hauptversuchen mit Temperaturvariation im thermophilen Nachgärer in Phase 4 insgesamt mit 299 L/kg oTS ein um ca. 16 % geringerer oTS-spezifischer Methanertrag als in der mesophilen Referenzphase (356 L/kg oTS) erzielt. Der Unterschied zur thermophilen Referenz, d. h. zwischen den Phasen 3 und 4 ist hier vernachlässigbar. Die hohen Temperaturänderungsraten in der Phase 4 spielten hier offensichtlich eine untergeordnete Rolle für die Gasausbeute, verglichen mit dem thermophilen Niveau des Temperaturbereichs.

Über die einzelnen Teilphasen 4a bis 4d wurden stärkere Schwankungen berechnet, wobei die höheren Werte der Phase 4b und die geringen Erträge von 4c deutlich erkennbar sind. Allerdings sind die Bilanzzeiträume für eine getrennte Betrachtung der Methanausbeuten für diese Teilphasen so kurz, dass die dafür in der rechten Hälfte der Abbildung 58 gezeigten Ergebnisse nur zum groben Vergleich der Teilphasen dienen können.

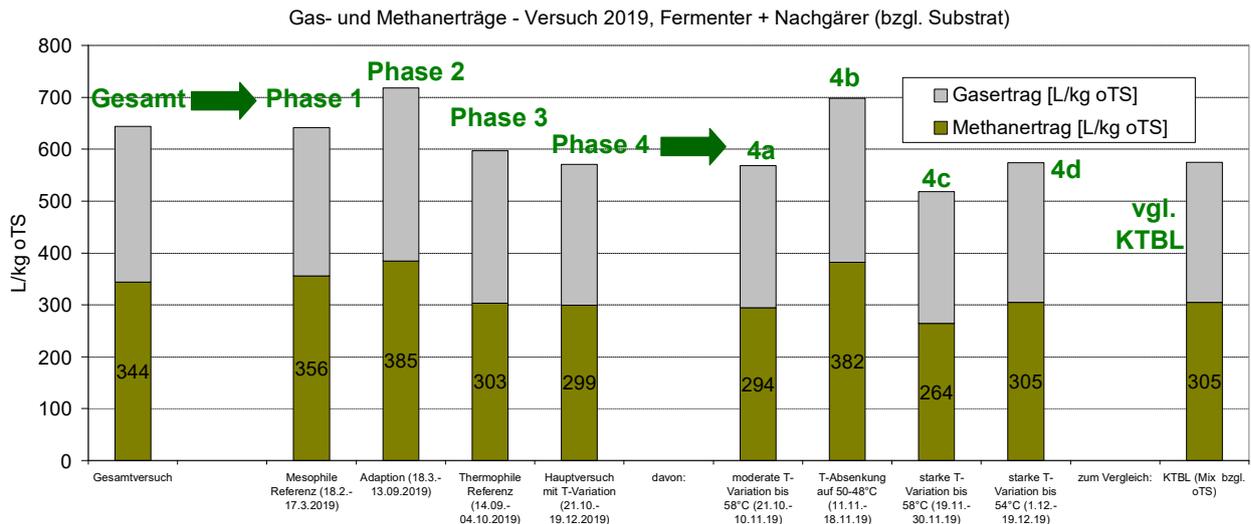


Abbildung 58: Vergleich oTS-spezifische Gas- und Methan-Ausbeuten des Gesamtsystems (Fermenter und Nachgärer) für die Versuchsphasen (Werte über „KTBL“ abgeleitet entsprechend Substratmischung aus [KTBL15], Tab. 2)

Im Laborexperiment des vorangegangenen Projekts [THE19], [SEI18] wurde ein oTS-spezifischer Methanertrag von bis zu 314 L/kg oTS erreicht (mit einer Mischung aus Maissilage und Rindergülle im vergleichbaren Verhältnis von 2:3), wobei die Belastung etwa halb so hoch lag wie in dem hier vorgestellten Versuch und die Anpassung an thermophile Bedingungen offenbar vollständig war. Das resultierende Defizit ist relativ gering - wie auch zum o. g. „KTBL-Wert“ (siehe Abbildung 58). Die Methanausbeute der BGA Bergzow wurde exemplarisch mit Daten aus dem Betriebsjahr 2018 ermittelt und lag mit 274 L/kg oTS noch niedriger (siehe Kap. II.1.4.2). Im einem 2020 wieder aufgenommenen kontinuierlichen Gärversuch mit einer mäßig hohen OLR von 4,2 kg oTS(m³d) wurden hingegen deutlich höhere Gesamt-Methan-ausbeuten von ca. 375 L/kg oTS erreicht (siehe Kap. II.1.4.2).

Schlussfolgerungen aus dem Gärversuch 2019 und weitere Arbeiten:

Im Gegensatz zu den im Vorgängerprojekt durchgeführten Fermentationsversuchen [THE19], [SEI18] wurden die Gärbehälter entsprechend der Betriebsstrategie der Referenzanlage mit einer hohen Belastung betrieben (vgl. Kap.II.1.2.1 und folgendes Kap. II.1.4.2). Hier sind u. a. die auf der Anlage gefahrenen

- hohe oTS-Raubelastung (OLR) des Fermenters sowie durch die Rezirkulation auch des Nachgärers,
- die geringe hydraulische Verweildauer entsprechend der gesamten Materialzufuhr in den jeweiligen Gärbehälter (d. h. Substrat + Rezirkulat) und
- der relativ hohe Stickstoffanteil aus dem Substratmix (insbesondere Rindergülle/-mist und Hühnertrockenkot)

zu nennen.

Der Langzeit-Gärversuch zeigte, dass nicht nur die Raumbelastungen und Substrat-verweilzeiten wichtig für einen erfolgreichen Einsatz des ThermoFlex-Verfahrens sind. Bei den verfahrensgemäß unterschiedlichen Milieubedingungen für die Prozessbiologie im mesophilen Hauptfermenter und im thermophilen Nachgärer gewinnt auch die hydraulische Verweilzeit

entsprechend der gesamten Materialzufuhr in den jeweiligen Gärbehälter (d. h. Substrat + Rezirkulat) an Bedeutung (vgl. Kap. II.1.1.7). Sehr geringe hydraulische Verweilzeiten können hier zu einem teilweisen oder sogar vollständigen Auswaschen von Methanbildnern im Fermenter und im Nachgärer führen. So geben Kaltschmitt et al. beispielsweise Verdoppelungszeiten von Methanbildnern im mesophilen Temperaturbereich von 10 Tagen und mehr an [KAL16].

Hauptziel des Langzeit-Gärversuches war es, die Einführung von ThermoFlex auf der BGA Bergzow zunächst unter den „Ist-Bedingungen“ vorzubereiten. Die Versuchsergebnisse zeigten, dass dies prinzipiell möglich ist, eine optimale Betriebsweise im konkreten Beispiel jedoch Modifikationen erfordert, insbesondere bzgl.:

- ThermoFlex-Verfahren: Temperatur-Bereich im Nachgärer moderat absenken,
- BGA Bergzow: Substrateffizienz und hydraulische Verweilzeit erhöhen.

Das vom Projektpartner bue erarbeitete Konzept des Wärmemanagements ist für einen moderat reduzierten Temperaturbereich anwendbar (z. B. 50-54°C). Auch eine Erhöhung der Substrateffizienz und der hydraulischen Verweilzeit auf der Referenzanlage kann durch verschiedene Maßnahmen ermöglicht werden (siehe Kap. II.1.3.2).

Der Gärversuch und eine Recherche von relevanten Literaturquellen (siehe [SEI21]) bestätigen, dass die Anpassungsfähigkeit an Temperaturänderungen stark von den Randbedingungen der jeweiligen Biogasanlage abhängt und fallspezifische Untersuchungen (Gärversuche) erfolgen sollten, bevor signifikante Änderungen am Temperaturmanagement von Vergärungsanlagen vorgenommen werden. Insbesondere bei der Umstellung auf thermophile Betriebsweise muss behutsam vorgegangen und ausreichend Zeit eingeplant werden. Zudem sollte sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer ein besonders engmaschiges und gründliches Monitoring des Bioprozesses erfolgen. So können Gegenmaßnahmen rechtzeitig ergriffen werden (vgl. Kap. II.1.3.2).

II.1.4.2 Wissenschaftliche Begleitung der Umrüstung der großtechnischen Biogasanlage auf das ThermoFlex-Verfahren (AP 3.3)

Weiterführender Labor-Gärversuch 2020 - Überblick:

Aufgrund der Ergebnisse des Langzeit-Gärversuches 2019 (Kap. II.1.4.1) umfasst die wissenschaftliche Begleitung der Umrüstung der Referenzanlage auf das ThermoFlex-Verfahren auch weiterführende semi-kontinuierliche Labor-Gärversuche mit dem 2019 verwendeten Versuchssystem, mit dem Hauptziel, die Wirkung des **moderat abgesenkten Temperatur-Bereiches** im thermophilen Nachgärer (50-54°C anstatt 50-58°C) zu untersuchen.

Im Rahmen der Planung der Adaption des Nachgärers der Referenzanlage an thermophile Bedingungen (AP 3.3) wurde deshalb bis Ende 2020 ein weiterer semi-kontinuierlicher Labor-Gärversuch durchgeführt. Dieser Versuch basiert auf dem auch 2019 verwendeten Versuchssystem (BTP2, gefüttert mit dem Substratmix der BGA Bergzow, siehe Kap. II.1.4.1). Jedoch wurden folgende wesentliche Randbedingungen bzw. Parameter modifiziert:

- Die Beimpfung des Fermenters der BTP2 erfolgte mit Fermenterschlämme der BGA Bergzow (2019 wurden sowohl Fermenter als auch Nachgärer mit Nachgärerschlämme inokuliert).

- An den Wochenenden wurden keine Fütterungen und Schlammprobenentnahmen vorgenommen. Somit ergibt sich im (Wochen-)mittel eine reduzierte OLR - während des Hauptversuches im Fermenter: 4,2 kg oTS/(m³d); vgl. 2019: 5,8 kg oTS/(m³d).
- Der Nachgärer wurde in der thermophilen Phase auf den geplanten, moderat abgesenkten Temperatur-Bereich von 50-54°C eingestellt (2019: 50-58°C).
- Zum Versuchsende wurde eine Woche mit weitergehend in den „Übergangsbereich mesophil/thermophil“ abgesenkter Temperatur im Nachgärer untersucht, um die Bedingungen des Demonstrationsversuches (siehe Kap. II.1.1.6 und II.1.1.8) abzubilden.

Die Rezirkulationsrate blieb mit einem RV=3 durchgehend im Bereich des Versuches 2019, weil der praktische Anlagenbetrieb mindestens auch ein RV in diesem Bereich erfordert (vgl. Kap. II.1.3.3). Zudem war infolge der schnellen und erfolgreichen Adaption des Nachgärers an thermophile Bedingungen (vgl. Auswertung unten) keine prozessbedingte Absenkung des RV im Versuchsverlauf notwendig.

Ablauf und Ergebnisse dieses semi-kontinuierlichen Gärversuches werden nachfolgend beschrieben:

Weiterführender Labor-Gärversuch 2020 - Versuchsablauf:

Die beiden Gärbehälter der BTP2 werden in Reihe geschaltet (Fermenter/Nachgärer), um das ThermoFlex-Verfahren abzubilden. Es erfolgt mit jeder Fütterung eine Rezirkulation vom Nachgärer in den Fermenter (RV=3, vgl. oben).

Die Versuchszeit umfasst 12 Wochen (30. September bis 22. Dezember 2020). Die Versuche begannen mit der Neubeimpfung beider Gärbehälter am 30.09.2020 mit frischem Schlamm, der am gleichen Tag aus dem Fermenter und dem Nachgärer der BGA Bergzow entnommen wurde. In den Nachgärer der BTP2 wurden ca. 19,5 L des entsprechenden Schlammes gefüllt, während vom sehr dickflüssigen Fermenterschlamm ca. 15 L, mit 0,5 L Leitungswasser und 3 L Nachgärerschlamm vermischt, in den Fermenter der BTP2 gegeben wurden. Zur Fütterung wurden die Substrate derselben Biogasanlage verwendet, die ebenfalls am 30.09.2020 aus Bergzow geholt und bis zum Versuchsende eingesetzt wurden. Dabei handelt es sich wie auch 2019 um Maissilage, Grassilage, Rinderfestmist, Hühnertrockenkot und Rindergülle. Die dosierten Mengen sind in der folgenden Abbildung 59 veranschaulicht. Die erfassten Qualitäten dieser Substrate können Tabelle 14 aus Kap. II.1.3.3 entnommen werden. Die Mengenverhältnisse wurden, wie auch beim Einsatz neuer Substratchargen im Verlauf des Langzeit-Gärversuches 2019 so berechnet, dass die oTS-Fracht an den Fütterungstagen für die einzelnen Substrate konstant bleibt. Das bedeutet, dass die Tagesmengen entsprechend dem Verhältnis der im Januar 2019 und im Oktober 2020 bestimmten TS- bzw. oTS-Gehalte (vgl. Tabelle 11) normiert wurden.

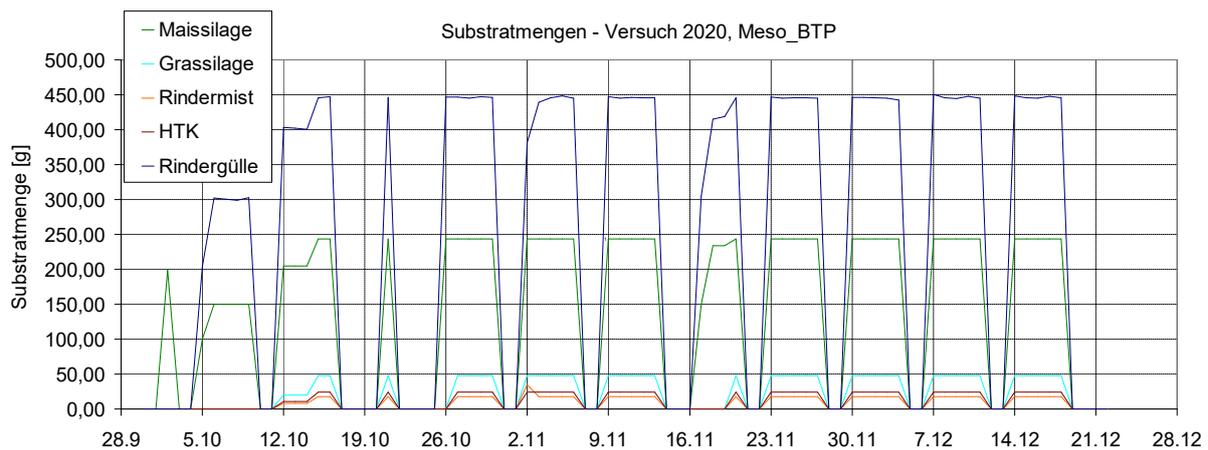


Abbildung 59: Dem Fermenter zugeführte Substratmengen - Gärversuch 2020

Mit der Beschickung des Fermenters und (über die Rezirkulation) des Nachgärers wurde am 05. Oktober begonnen, wobei die Last schrittweise gesteigert wurde. Grundsätzlich wurde 1mal täglich (i. d. R. am frühen Nachmittag) gefüttert. Keine Beschickung erfolgte an den Wochenenden sowie am 19.-20. und 22.-23. Oktober (planmäßige Fütterungspausen). Infolge eines Heizungsausfalles vom 14.-16. November wurde auch an diesen Tagen nicht gefüttert.

Bis zum 27. Oktober wurde die Zielraumbelastung des Fermenters erreicht - an den Wochentagen 5,8 kg oTS/(m³d) bzw. im Wochenmittel 4,2 kg oTS/(m³d); siehe Abbildung 60.

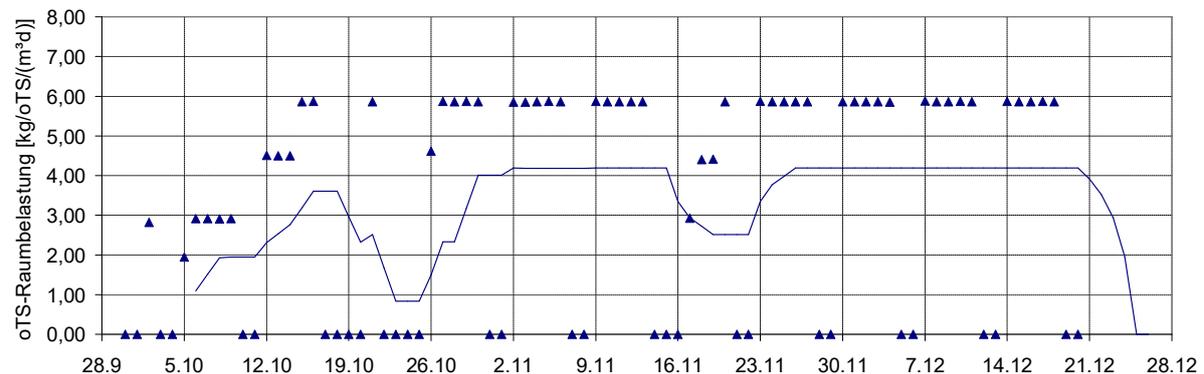


Abbildung 60: OLR des Fermenters mit gleitendem 7d-Mittelwert - Gärversuch 2020

Die Laboranalysen umfassen wie im Versuch 2019 die Parameter TS, oTS und FOS/TAC (vgl. Kap. II.1.4.1). Wie 2019 wird der Fermenter mesophil mit konstanter Temperatur (42°C) und der Nachgärer in der Start- und Referenzphase zunächst ebenfalls mesophil mit 42°C betrieben. Die entsprechenden Gärtemperaturen auf der BGA Bergzow lagen in der Phase der Impfschlammentnahme hingegen mit je 43°C etwas höher als im Vorjahr. Anschließend wurde die Temperatur im Nachgärer der BTP2 in variablen Schritten bis auf die angestrebte thermophile Adaptionstemperatur von 52°C erhöht und dann entsprechend dem ThermoFlex-Verfahren gezielt variiert. Die Fermentertemperatur wurde im gesamten Versuchszeitraum auf ca. 42°C gehalten (mit Ausnahme des o. g. Ausfalls der Fermenterheizung).

Der 2020 durchgeführte Versuch kann in folgende Abschnitte unterteilt werden:

- Inbetriebnahme (30.09. - 04.10.2020): Inokulation am 30.09., 1. Fütterung am 02.10.2020
- **Phase 1** – Einfahrphase und „Mesophile Referenz“ (05.10. - 01.11.2020, 28 Tage): Fermenter- und Nachgärertemperatur ca. 42°C, OLR gesteigert bis Zielbelastung,

- **Phase 2** - „Adaptionsphase“ (02.11. - 15.11.2020, 14 Tage): Nachgärertemperatur in variablen Tagesschritten (0,5-2 K) vom mesophilen in den „moderat thermophilen“ Bereich gesteigert (ab Mitte November 50°C),
- **Phase 3** - „Thermophile Referenz“ (16.11. - 29.11.2020, 14 Tage): thermophile Nachgärertemperatur ($\geq 50^\circ\text{C}$) weiter gesteigert in kleinen Tagesschritten (0,2-0,3 K) bis zur Zieltemperatur (ab Ende November 52°C),
- **Phase 4** - „Hauptversuch“ (30.11. - 20.12.2020, 21 Tage): starke Temperaturvariation im Nachgärer entsprechend ThermoFlex (Absenkung um 4 K/d und Erhöhung um 2 K/d) im Bereich von 50°C bis 54°C in der 1. Woche mit Wiederholung in der 2. Woche. In der 3. Woche wurde die Nachgärertemperatur weitergehend abgesenkt - in den „Übergangsbereich mesophil/thermophil“ - und es erfolgte eine mit ± 4 K/d starke Temperaturvariation im Bereich zwischen 44 und 48°C (um die Bedingungen des geplanten Demonstrationsversuches abzubilden).

Abbildung 61 veranschaulicht diese Versuchsphasen für den Gesamtzeitraum.

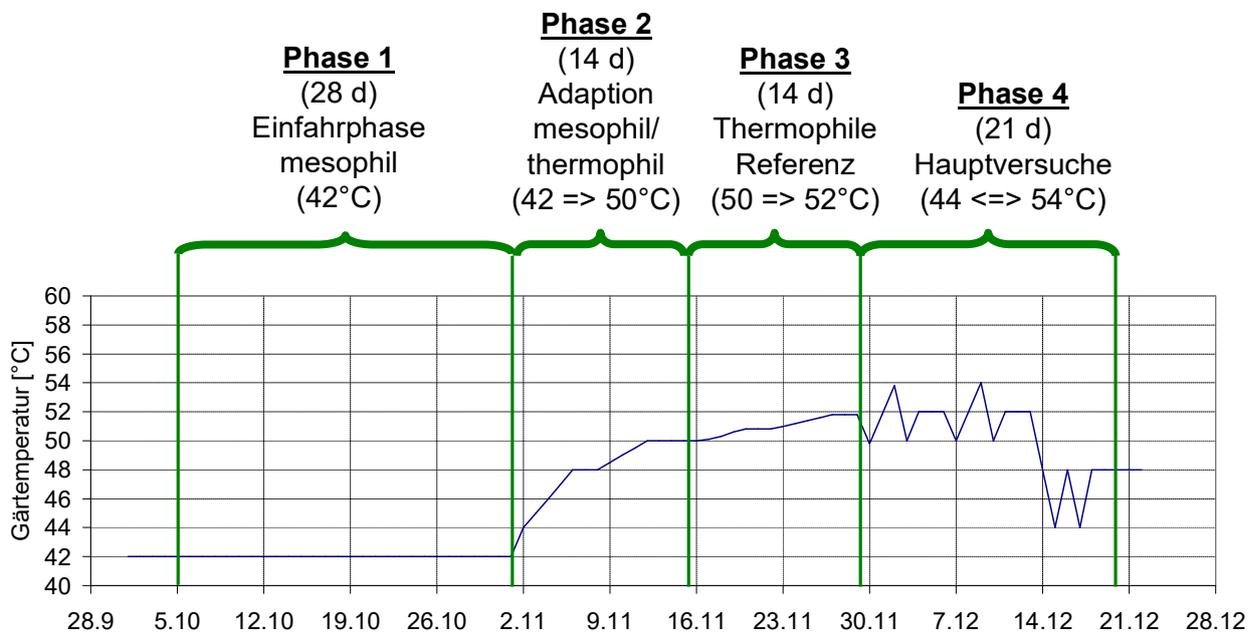


Abbildung 61: Versuchsphasen entspr. den eingestellten Zieltemperaturen im Nachgärer - Gärversuch 2019

Die Außerbetriebnahme des Versuchssystems erfolgte am 22.12.2020. Die Einteilung der o. g. Phasen wurde so vorgenommen, dass stets ganze Kalenderwochen zugeordnet werden können, um Unregelmäßigkeiten durch die Wochenendpausen zu vermeiden. Begünstigt durch die (insbesondere verglichen mit dem Versuch 2019) gute Entwicklung des Prozesses im Nachgärer (siehe unten) konnte die Adaptionsphase sehr kurz gehalten werden. Infolge des bis Ende 2020 limitierten Versuchszeitraumes wurde auch in der Phase 3 die Nachgärertemperatur weiter in kleinen Schritten von 50°C bis auf die Adaptionstemperatur von 52°C gesteigert. Diese 2 Wochen werden hier als „thermophile Referenz“ bezeichnet, maßgeblich für den Vergleich des Hauptversuches (Phase 4) ist jedoch die Phase 1 (Einfahrphase bzw. „Mesophile Referenz“).

Die Entschwefelung erfolgte - wie auch im Versuch 2019 - mit Eisen(III)-hydroxid. Es wurde i. d. R. wochentäglich in den Fermenter und nach Bedarf auch in den Nachgärer dosiert, wodurch H₂S-Werte im Biogas zwischen ca. 100 bis 300 ppm erzielt wurden (vgl. Kap. II.1.4.1).

Wesentliche Ergebnisse des Gärversuches 2020:

Kurz nach Inbetriebnahme und bis zur dritten Versuchswoche zunehmend - traten Instabilitäten der Prozessbiologie im Fermenter auf - erkennbar an relativ geringer Biogasmenge und geringem CH₄-Gehalt (< 40%) des Biogases sowie bis auf 0,6 erhöhten FOS/TAC-Gehalten. Ein ähnliches Verhalten wurde auch 2019 beobachtet, wobei damals die Beimpfung mit dem an schwächere Belastung adaptierten Nachgärerschlämme i. Z. m. der hohen Zielraumbelastung des Fermenters als Ursache vermutet wurde. Dies wurde 2020 weitgehend vermieden - durch Beimpfung mit 15 L Fermenterschlämme. Eine weitere mögliche Ursache kann im Zusammenhang mit hohen Schwefelwasserstoffgehalten im Gärslamm gesehen werden, was hemmend wirken kann. So wurden, wie auch 2019, in der 1. Versuchswoche mehr als 1000 ppm H₂S im Biogas gemessen, trotz frühzeitiger Eisendosierung und zunächst geringer Fütterung. Offensichtlich muss initial noch eine deutlich höhere Menge an Eisen(III)-hydroxid vorgesehen werden. Nicht zuletzt ist darauf hinzuweisen, dass die Impfschlämme aus einer prozessbiologisch angespannten Phase der BGA Bergzow stammen. So ergab die monatliche Routine-Analyse des Fermenterschlammes der BGA vom 07.10.2020, also eine Woche nach der Impfschlammernahme, einen (gegenüber dem Jahresmittelwert etwa verdoppelten) FOS/TAC von 0,66 bei einem Gehalt an organischen Säuren von 7420 mg Essigsäureäquivalent pro L (vgl. Kap. II.1.3.3).

Während der Prozess im Nachgärer in dieser Zeit nicht beeinträchtigt war, stabilisierte sich die Situation im Fermenter der Laboranlage erst nach den zwei 4tägigen Fütterungspausen Mitte Oktober. Ab Ende Oktober wurde die erwartete Leistung des Fermenters weitgehend erreicht (vgl. Abbildung 62). Allerdings weist eine bis zum Versuchsende im Dezember weitergehende Steigerung der Methanproduktion des Fermenters auf noch nicht vollständig stationäre Verhältnisse hin. Dies geht vermutlich auch - verstärkt durch den o. g. Heizungsausfall - auf einen gewissen „Nachholeffekt“ (Abbau akkumulierter Substratbestandteile) zurück.

Bei der Versuchsplanung wurde zunächst davon ausgegangen, die mittlere OLR des Fermenters der Laboranlage durchgehend entsprechend der Referenzanlage (im Betrachtungszeitraum 2016-18) auf ca. 5,8 kg oTS/(m³d) einzustellen, was eine relativ hohe Last darstellt (vgl. Kap. II.1.4.1). Somit war auch eine Fütterung an den Wochenenden oder ein Ausgleich der Wochenendpausen durch entsprechende Lasterhöhung im Wochenverlauf vorgesehen. Infolge der sich kurz nach der Beimpfung im mesophilen Fermenter abzeichnenden „Einfahrkrise“ (siehe oben) wurde davon abgesehen und nur an den Wochentagen gefüttert, womit sich eine mittlere OLR von 4,2 kg oTS/(m³d) ergibt. Ein weiterer Vorteil dieser Absenkung der mittleren Last ist, dass dadurch eine schnelle Adaption des Nachgärers an thermophile Bedingungen begünstigt wird. Vor dem Hintergrund der auf 12 Wochen limitierten Versuchszeit und mit Blick auf die Erfahrungen des letzten Gärversuches (2019 betrug die Adaptionphase 180 Tage) war dieser Aspekt von großer Bedeutung, was sich dann im erfolgreichen Versuchsverlauf bestätigte (siehe unten). Es wird davon ausgegangen, dass die Versuchsergebnisse trotzdem hinreichend übertragbar sind, weil die OLR der Laboranlage jeweils an 5 aufeinander folgenden Tagen der Woche im Bereich der Belastung der BGA liegt und damit eine hohe Last auch im Labor abgebildet wird. Zudem ist eine Erhöhung der Substrateffizienz bzw. Reduzierung der Belastung auf der BGA Bergzow anzustreben (vgl. Kap. II.1.3.2). Nicht zuletzt hängt die rechnerisch bestimmte Raumbelastung maßgeblich von den angesetzten Werten für die TS- und oTS-Gehalte der Substrate ab, wie z. B. ein Blick auf Tabelle 14 in Kap. II.1.3.3 zeigt: Die dort für das Betriebsjahr 2020 ermittelte OLR liegt bei Berechnung mit den Standardwerten für die TS- und oTS-Konzentration nach [KTBL15] mit

ca. 6 kg oTS/(m³d) um 20 % höher als der aus den TS- und oTS-Laboranalysen vom Oktober 2020 resultierende Wert von 5 kg oTS/(m³d).

Ab dem 02. November wurde die Nachgärer-Temperatur in variablen Tagesschritten von 42°C bis auf thermophile Bedingungen angehoben - zunächst bis zum Ende von Phase 2 auf 50°C, dann bis zum Ende von Phase 3 auf 52°C (vgl. Abbildung 61 und Aufzählung oben).

In den beiden Wochen von Phase 2 sowie auch in der 1. Woche der Phase 3 blieb der Prozess im **Nachgärer** nahezu unbeeinträchtigt - die Gas- bzw. Methanmengen stiegen zunächst sogar an (Abbildung 63 und Abbildung 66)¹, der CH₄-Gehalt im Biogas sank nur geringfügig (Abbildung 65) und der FOS/TAC-Gehalt im Nachgärer erhöhte sich unwesentlich von ca. 0,21 auf 0,23 (Abbildung 64). Erst in der 4. Woche der Temperaturanhebung Ende November (> 51°C) zeigte sich ein erkennbarer Rückgang der Methankonzentration (Abbildung 65), der nicht mehr allein durch physikalische Effekte (erhöhte CO₂-Ausgasung durch geringere CO₂-Löslichkeit bei Temperaturanstieg) erklärt werden kann. Dies wird auch durch die Messwerte für FOS/TAC untermauert (Abbildung 64). Hier ist in diesem Zeitraum ein Anstieg auf über 0,3 zu verzeichnen, bis sich die Werte in Phase 4 zwischen 0,31 und 0,37 einpegeln. Beim pH-Wert ist nur ein leichter Rückgang um ca. 0,1 erkennbar. Auch der CH₄-Gehalt im Biogas aus dem Nachgärer bleibt mit i. d. R. über 50 % im moderaten Bereich und steigt bis zum Ende von Phase 4 (bei Gärtemperaturen zwischen 44 und 48°C) sogar auf über 60%.

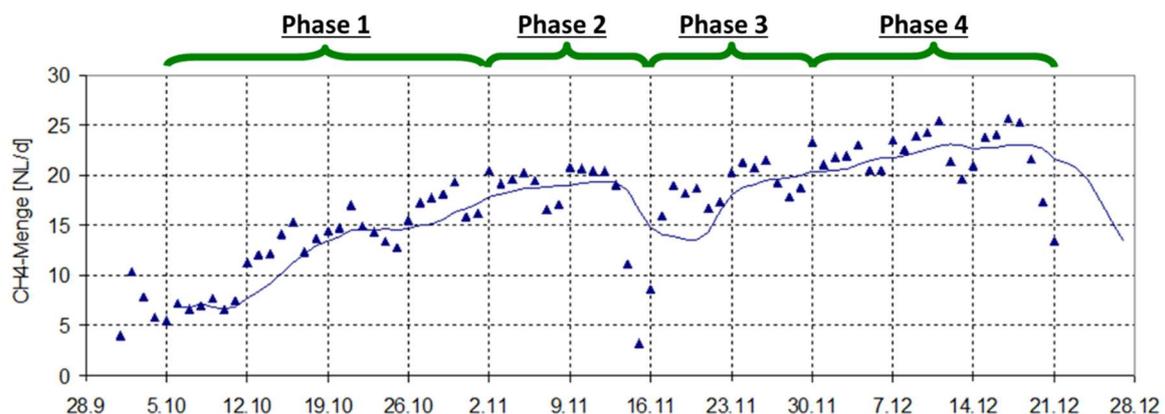


Abbildung 62: Methanmengen aus Fermenter, Tagesmittelwerte mit gleitendem 7d-Mittelwert - Gärversuch 2020

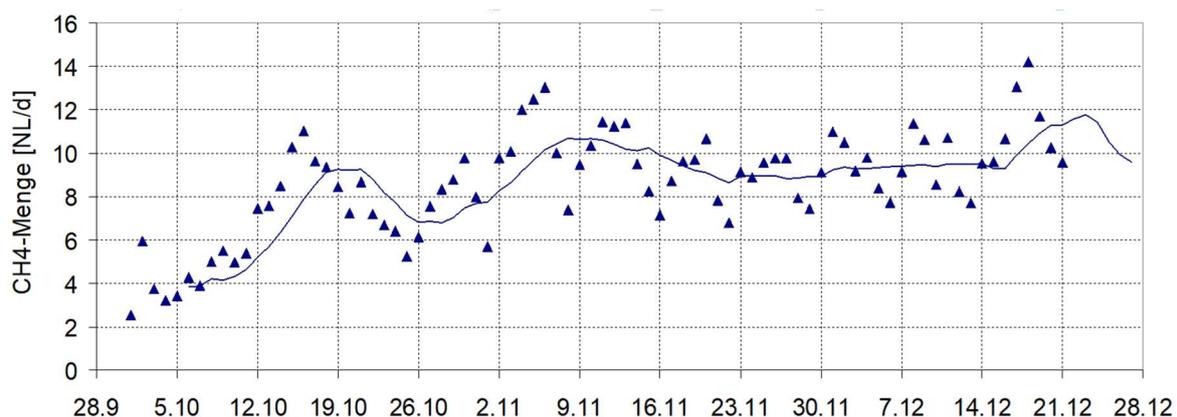


Abbildung 63: Methanmengen aus Nachgärer, Tagesmittelwerte mit gleitendem 7d-Mittelwert - Gärversuch 2020

¹ der Rückgang der Methanmenge in der 1. Woche von Phase 3 ist im Heizungsausfall vom 14.-16.11.20 begründet

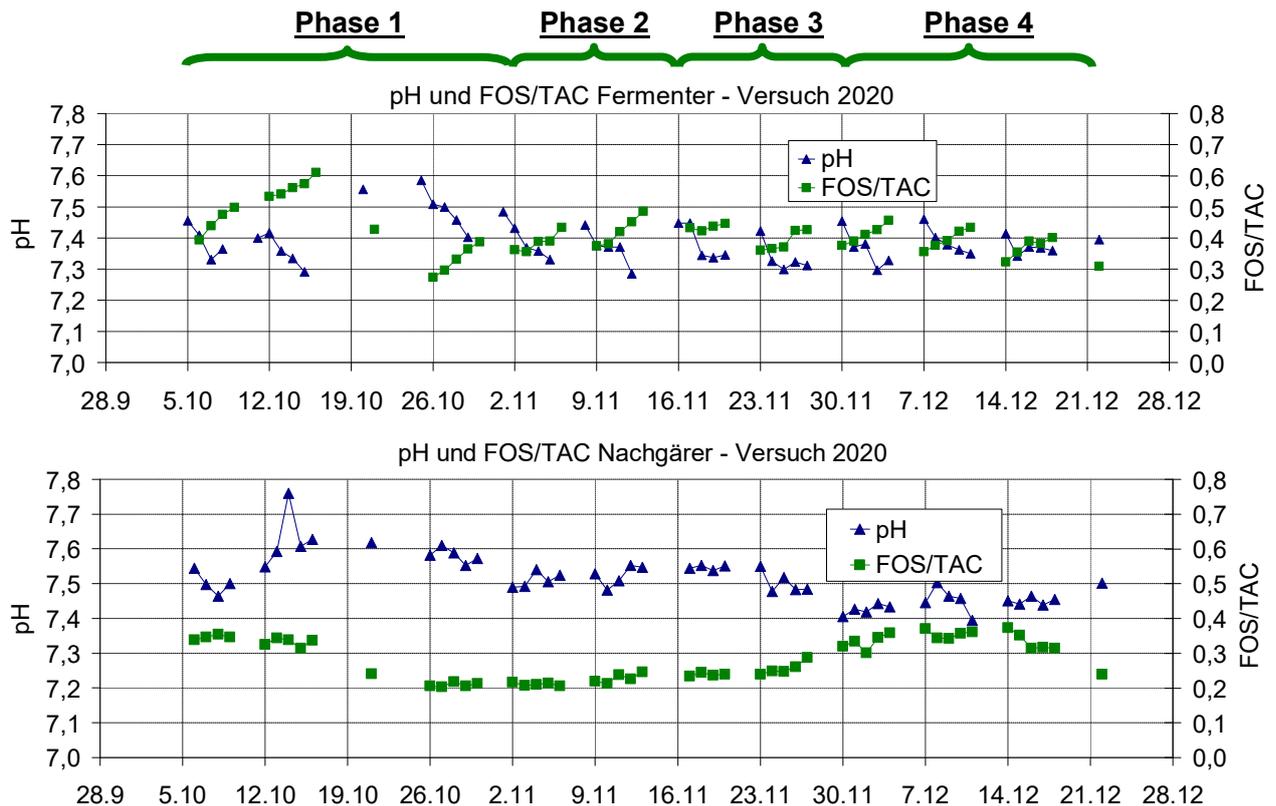


Abbildung 64: pH- und FOS/TAC-Werte - Gärversuch 2020 (oben: Fermenter, unten: Nachgärer)

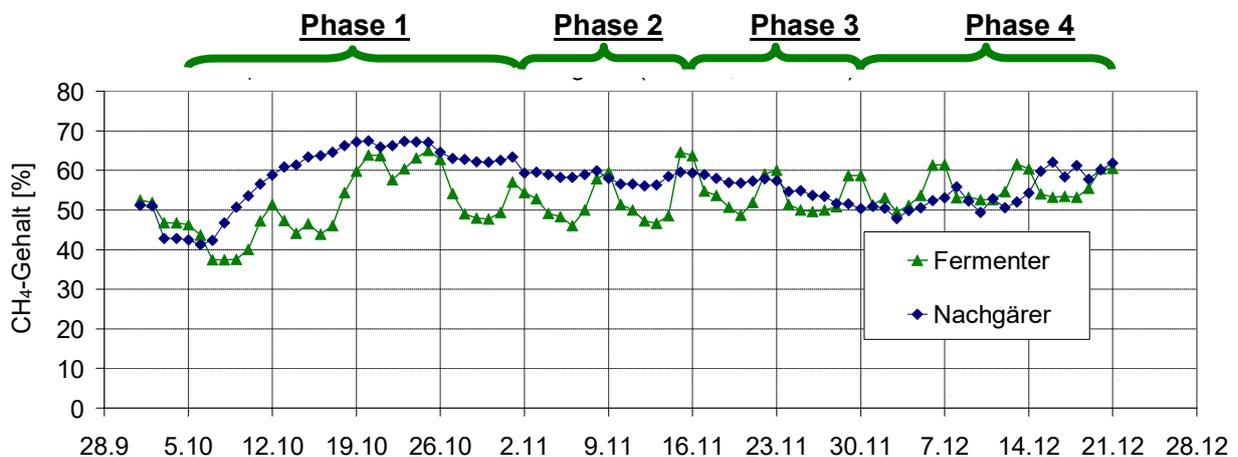


Abbildung 65: CH₄-Gehalte im Biogas aus Fermenter und aus Nachgärer (Tagesmittelwerte aus den Gasanalysen, rechnerisch wasser- und luftbereinigt) - Gärversuch 2020

Wie an den Verläufen von FOS/TAC, pH und CH₄-Gehalt in Abbildung 64 und Abbildung 65 verdeutlicht wird, bleibt der Prozess im **Fermenter** von Ende Oktober bis zum Versuchsende stabil. Die Einflüsse der Wochenendpausen sowie der Heizungsstörung Mitte November treten hier erwartungsgemäß deutlicher hervor. So steigt der FOS/TAC, in einem Bereich zwischen ca. 0,36 und 0,46, regelmäßig vom Montag bis zum Freitag an, um dann am Wochenende wieder entsprechend abzusinken. Diese relativ hohen, aber in der wochenweisen Betrachtung stabilen, FOS/TAC-Werte im Laborfermenter spiegeln sich in den monatlichen Analysen des Fermenterschlamms auf der Beispielanlage wider. So werden auch im Fermenter der BGA Bergzow regelmäßig FOS/TAC-Werte von über 0,3 gemessen (siehe oben, vgl. Kap. II.1.2.1).

Die erhöhten Werte im Fermenter sind offensichtlich in der hohen Belastung der Anlage begründet und somit auch im Laborversuch zu erwarten.

Die Betrachtung des **Gesamtsystems**, also der Methanproduktion von Fermenter und Nachgärer insgesamt sowie der daraus abgeleiteten oTS-spezifischen **Methanausbeuten** erfolgt in den nachstehenden Diagrammen (siehe Abbildung 66 und Abbildung 67).

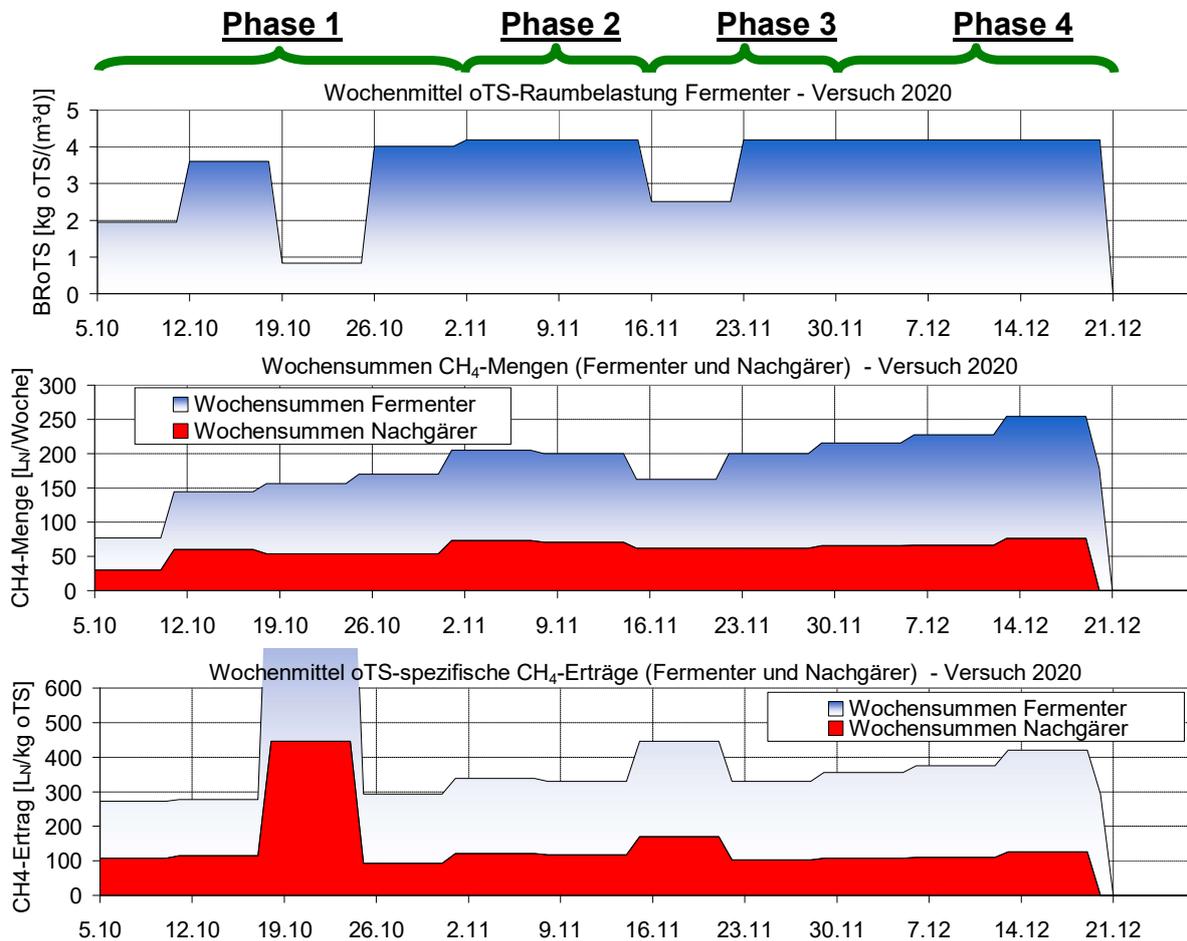


Abbildung 66: Wochenmittelwerte der OLR des Fermenters (oben), Wochensummen der Methanmengen aus Fermenter und Nachgärer (Mitte), Wochenmittelwerte der oTS-spezifischen CH₄-Ausbeuten Fermenter und Nachgärer (unten) - Gärversuch 2020

Die oTS-spezifischen Methanausbeuten des Gesamtsystems (Fermenter und Nachgärer) lagen generell deutlich über den Werten des Versuches 2019 (vgl. Abbildung 58). Dies wurde zweifellos auch durch die infolge der Wochenendpausen reduzierte OLR begünstigt (siehe Abbildung 60). Generell lagen die Gesamt-Methanausbeuten 2020 auch deutlich über dem vergleichend dargestellten, aus den Richtwerten des KTBL [KTBL15] berechneten Ertrag. Im **Hauptversuch mit Temperaturvariation im Nachgärer in Phase 4 wurde mit 375 L/kg oTS ein ähnlicher oTS-spezifischer Methanertrag wie in der mesophilen Referenzphase** und wie im Gesamtversuch erzielt.

Der erhöhte Methanertrag während der „thermophilen Referenz“ in Phase 3, kann mit dem 4-tägigen Fütterungsstopp während des Heizungsausfalls und der daraus resultierenden temporären Lastabsenkung erklärt werden. Auch der mit 325 L/kg oTS deutlich verringerte Methanertrag während der Adaption in Phase 2 liegt zu weiten Teilen in diesem Heizungsausfall begründet. Die Methanproduktion des Fermenters geht (infolge des schnellen Temperaturrückganges - ab dem Nachmittag des 14.11.2020 < 25°C) deutlich zurück und

steigt erst nach Wiederinbetriebnahme der Heizung am Montag, den 16.11.2020 wieder an (siehe Abbildung 62). Damit fällt der „Nachholeffekt“ durch Abbau während des Heizungsausfalls akkumulierter Substratbestandteile erst in die Phase 3. Somit ist der rechnerisch ermittelte Methanertrag in Phase 2 geringer und in Phase 3 entsprechend höher. Zudem sind die Bilanzzeiträume für die Betrachtung der Methanausbeuten insbesondere für die Phasen 2 und 3 mit jeweils 2 Wochen recht kurz, so dass die dafür in Abbildung 67 gezeigten Ergebnisse nur zum groben Vergleich der Phasen dienen können. Alternativ ist auch eine zusammengefasste Betrachtung der Phasen 2 und 3 möglich: daraus resultiert ein Methanertrag von 354 L_N/kg oTS.

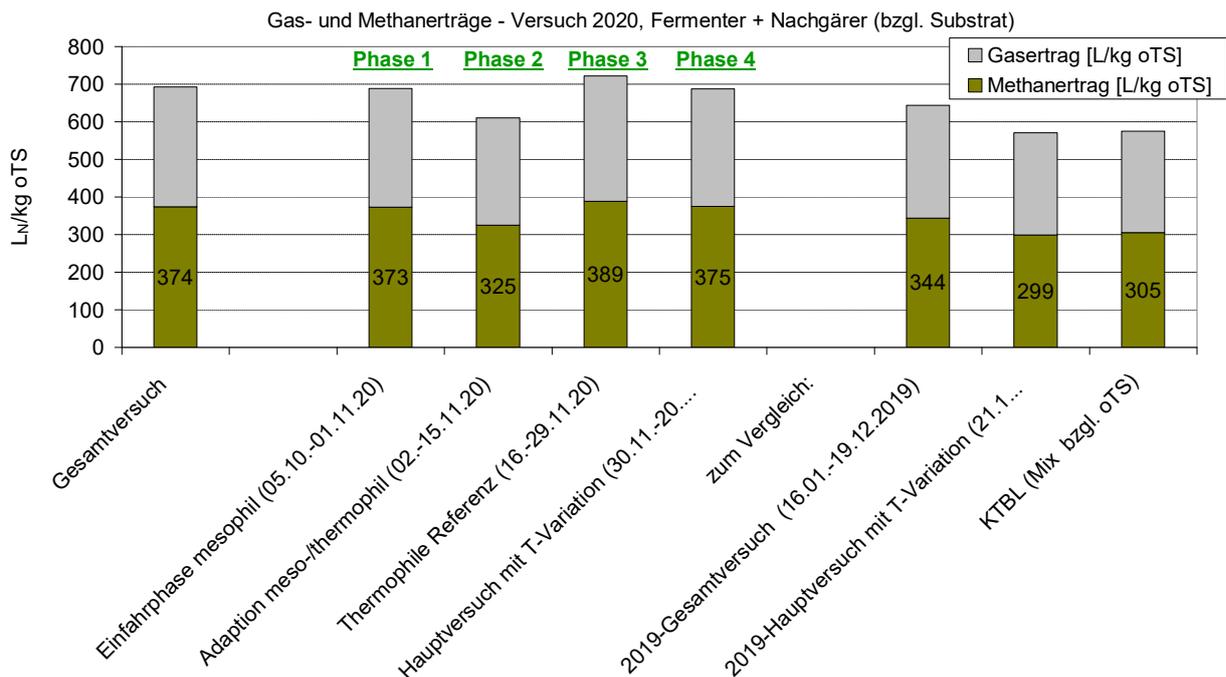


Abbildung 67: oTS-spezifische Gas- und Methan-Ausbeuten des Gesamtsystems (Fermenter und Nachgärer) für die Versuchsphasen des Gärversuches 2020 (im Vergleich mit dem Gärversuch 2019 sowie berechneten Werten (KTBL) - abgeleitet entsprechend Substratmischung aus [KTBL15], Tab. 2)

Durch die relativ hohe Raumbelastung des Fermenters in Verbindung mit der hohen Rezirkulation kommt dem Nachgärer ein vergleichsweise hoher Anteil an der Abbauleistung zu. Der Nachgärer lieferte im Versuchverlauf im Mittel ca. 34 % des Gesamt-Methanertrages (siehe Abbildung 66).

Schlussfolgerungen aus dem Gärversuch 2020:

Entscheidend für die Auswertung ist, dass sich - sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer - betrachtet über die 3 Wochen des Hauptversuches (Phase 4) **keine Verschlechterungen bei den Stabilitätsparametern** zeigen. Vielmehr ist sogar eine **Leistungssteigerung**, erkennbar an den Methanmengen in Abbildung 62 und Abbildung 63, bis zur letzten Versuchswoche zu verzeichnen. Somit verlief der **Versuch 2020 deutlich stabiler als der Langzeit-Gärversuch 2019**. Zweifellos wurde dies auch durch die, wie oben beschrieben, auf 4,2 kg oTS/(m³d) verringerte mittlere OLR begünstigt. Als Hauptgrund wird hier aber die abgesenkte **Temperatur im Nachgärer von im Mittel 52°C** bei Maximalwerten von 54°C (gegenüber im Mittel 54°C bei Maximalwerten von 58°C im Versuch 2019) angesehen.

Somit wurde der Versuch 2020 planmäßig durchgeführt und das bereits am Anfang dieses Kapitels formulierte Ziel, den Einfluss des moderat abgesenkten Temperaturbereiches von 50-54°C zu analysieren, erreicht. Darüber hinaus wurde in Vorbereitung des Demonstrationsversuches auf der BGA Bergzow (siehe Kap. II.1.1.6 und II.1.1.8) zum Versuchsende eine Woche mit weitergehend in den „Übergangsbereich mesophil/thermophil“ abgesenkter Temperatur (<50°C) im Nachgärer erfolgreich getestet.

Analyse des Ist-Zustandes der BGA Bergzow:

Im Rahmen des AP 3.3 erfolgte in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern eine Analyse des Ist-Zustandes der Verfahrensführung, Prozessbiologie und Anlageneffizienz im Vorfeld der Implementierung von ThermoFlex auf der Referenzanlage.

Im Zuge dieser Arbeiten wurden auch Ansätze und Maßnahmen für die Optimierung des Anlagenbetriebes mit Hilfe des in Kap. II.1.2.4 vorgestellten Simulationsmodells zur Verfahrenstechnik und Prozessbiologie vergleichend bewertet (siehe unten).

Die nachfolgend kurz dokumentierten Arbeiten zur Analyse und Bewertung und erfolgten zunächst basierend auf einem umfassenden Datensatz aus dem Betriebsjahr 2018 (vgl. Kap. II.1.2.1). Eine weitergehende Beschreibung dieser Arbeiten findet sich in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung zu diesem Thema [SEI22].

Abbildung 68 zeigt ein für die Bestimmung der Substrateffizienz bzw. des oTS-spezifischen Methanertrages erstelltes Berechnungsschema mit Beispielwerten aus dem Jahresmittel des Betriebsjahres 2018 für die Stromproduktion, den BHKW-Wirkungsgrad (bei Teillast, vgl. auch Abbildung 69) und die Mengen der Einzelsubstrate. Weiterhin fließen Standardwerte für den Gehalt an Trockensubstanz (TS) und organischer Trockensubstanz (oTS) der verwendeten Substrate nach den KTBL-Tabellen [KTBL15] in die Betrachtung ein. Diese Verfahrensweise erlaubt zudem den Vergleich des Methanertrages mit den direkt aus den substratspezifischen Angaben der KTBL-Tabellen ermittelten Werten für den Substratmix.

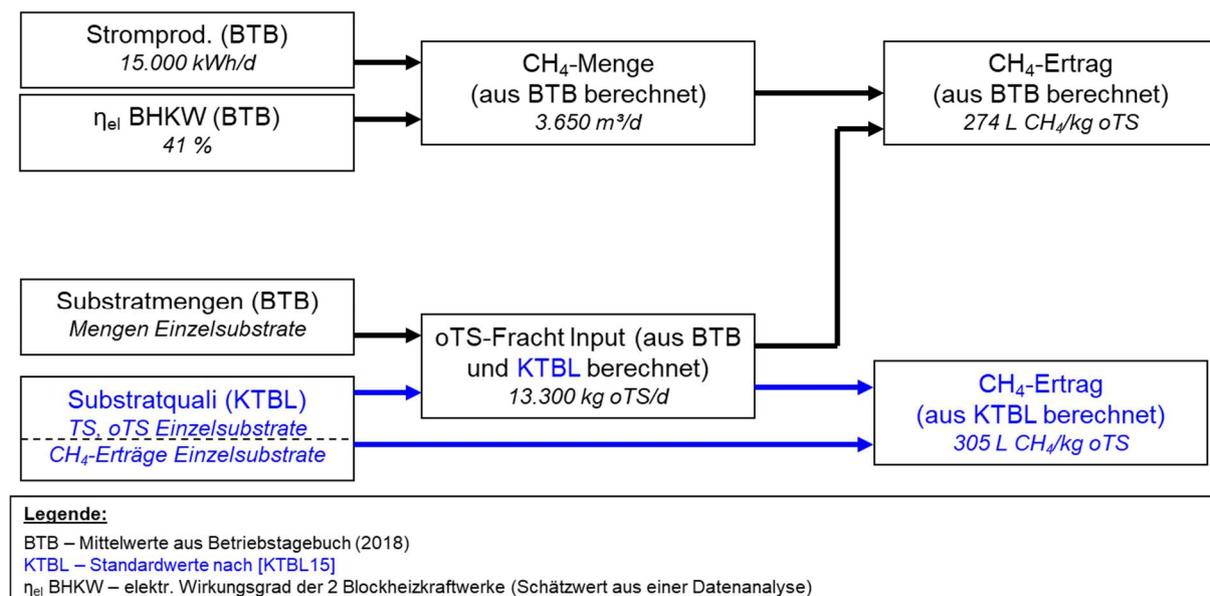


Abbildung 68: Berechnung Substrateffizienz der BGA Bergzow

Das Resultat des entsprechenden Vergleichs mit den KTBL-Werten für den Substratmix ist demnach für die Substrateffizienz bzw. den oTS-spezifischen Methanertrag (Y_{CH_4}):

- $Y_{CH_4} = 274 \text{ L/kg oTS}$ entspr. Anlagenbetrieb 2018 (aus Betriebstagebuch berechnet)
- $Y_{CH_4} = 305 \text{ L/kg oTS}$ entspr. Standardwerten nach [KTBL15] (berechnet für Substratmix)

Demnach wird im Beispieljahr 2018 ein **Defizit des oTS-spezifischen Methanertrages zum Rechenwert nach den KTBL-Tabellen von ca. 10 %** ermittelt. Zu berücksichtigen ist dabei zudem, dass auf 2-stufigen Biogasanlagen (mit Fermenter und Nachgärer) häufig deutlich bessere Methanerträge erzielt werden, als in den KTBL-Tabellen - deren Werte auf Batchgärtests basieren - angegeben. Vor diesem Hintergrund ist ein Potenzial für die Verbesserung des Methanertrages auf der BGA Bergzow von mehr als 10 % durchaus realistisch.

Zu den möglichen Ursachen für das ermittelte Defizit des Methanertrages gehören neben der generell sehr hohen Belastung der Anlage auch mögliche Abweichungen der oTS- und TS-Gehalte der eingesetzten Substrate von den hier angesetzten KTBL-Werten. Zudem ist möglicherweise die Zusammensetzung der organischen Fraktionen in den Substraten ungünstiger (z. B. höherer Ligningehalt). Nicht zuletzt spielt auch die Dürreperiode im Jahr 2018 eine Rolle. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass bis zum Herbst 2018 noch die Maissilage aus dem Jahr 2017 eingesetzt wurde. Vielmehr kann für die Jahre 2019 und z. T. auch 2020 von suboptimalen Silagen infolge überdurchschnittlicher Trockenperioden ausgegangen werden.

Wie eine **Analyse des BHKW-Betriebs** (exemplarisch für das BHKW 2 im 4. Quartal 2019, vgl. Abbildung 69) gezeigt hat, werden die Zielwerte (Sollleistungen) der BHKWs im Normalbetrieb zwar entsprechend dem optimalen Auslastungsbereich (ca. 80-90 %) gewählt; was sich jedoch aus verschiedenen betrieblichen Gründen häufig nicht erreichen lässt. So kann es vorübergehend zu einem signifikanten Wirkungsgradabfall kommen, wenn die BHKW-Auslastung aufgrund betrieblicher Einschränkungen deutlich unter den optimalen Bereich fällt.

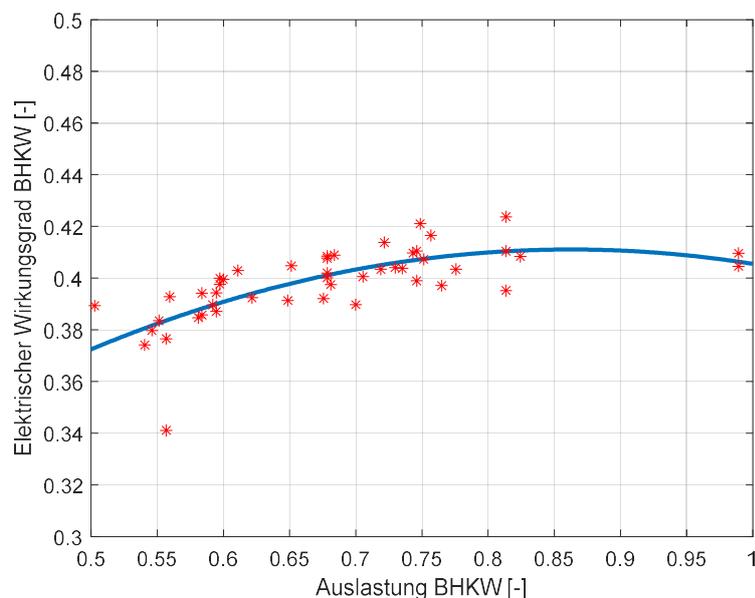


Abbildung 69: Elektrischer Wirkungsgrad abhängig vom Auslastungsgrad am Beispiel des BHKW 2 (Typ: 2G-KWK-370 BGG) der BGA Bergzow mit Wertepaaren aus einem Datensatz vom 4. Quartal 2019 und quadratischer Trendlinie

Im Rahmen der Analyse des Ist-Zustandes der BGA Bergzow für die vergleichende Prozessanalyse vor der Umrüstung auf das ThermoFlex-Verfahren wurde das in Kap. II.1.2.4 (Abbildung 39) vorgestellte **Modell zur Berechnung der Prozessbiologie und Biogasproduktion der Referenzanlage** verwendet und mit den relevanten Daten des Betriebsjahres 2018 (vgl. Kap. II.1.2.1) parametrisiert.

Im Simulationsmodell wurden - wie auch bei der o. g. Berechnung der Substrateffizienz in Abbildung 68 beschrieben - die TS- und oTS-Gehalte der Einzelsubstrate entsprechend den Standardwerten nach KTBL [KTBL15] gesetzt. Es wurde dann über die Einstellung der inerten Anteile an der oTS der Einzelsubstrate im Modell ein **Modellabgleich** vorgenommen, so dass der - wie ebenfalls in Abbildung 68 gezeigt - mit Hilfe von Betriebs- und Standardwerten berechnete oTS-spezifische Methanertrag der Anlage auch in der Simulation erzielt wird. Weiterhin wird beim Modellabgleich Augenmerk auf die Biogas- und Methanproduktion, den Methangehalt des Biogases sowie die Konzentrationen an Trockensubstanz, an organischen Säuren und an Ammonium-Stickstoff sowie den pH-Wert in den Gärbehältern gelegt.

Eine weitergehende Beschreibung dieses Modellabgleichs findet sich in der o. g. wissenschaftlichen Veröffentlichung zu diesen Arbeiten [SEI22]. Die dynamischen Simulationsrechnungen zeigten nach dem Modellabgleich gute Übereinstimmungen mit Werten aus dem Betriebstagebuch und den Laboranalysen. Gewisse Abweichungen, wie z. B. beim Vergleich der simulierten und aus den Betriebsdaten berechneten Methanmengen (vgl. [SEI22]), werden auch infolge der vereinfacht über den Betriebszeitraum als konstant angenommenen Substratqualitäten hervorgerufen.

Der erfolgreiche Modellabgleich ermöglichte die Arbeiten zur modellgestützten Analyse des Optimierungspotenzials, welche nachfolgend kurz sowie in [SEI22] weitergehend beschreiben werden.

Potenzielle Maßnahmen zur Steigerung der Substrateffizienz:

Für die modellgestützte Analyse des Optimierungspotenzials und Bewertung entsprechender Maßnahmen, insbesondere zur Verbesserung der Substrateffizienz der BGA Bergzow wurde die in Kap. II.1.2.4 (Abbildung 40) vorgestellte Modellvariante verwendet. Dieses Modell wurde, wie in Kap. II.1.2.4 beschrieben, an die aktuelle Betriebsweise angepasst. Weitere Ausführungen hierzu können wiederum [SEI22] entnommen werden.

Der Variantenvergleich erfolgt mit Hilfe von Mittelwerten (Simulation mit konstanten Substratmengen und -qualitäten). Es wird für diese Betrachtungen davon ausgegangen, dass sich der mittlere Substratmix (vgl. Kap. II.1.2.1) nicht wesentlich ändert. Die wie zuvor beschriebene auf Basis der Daten des Betriebsjahres 2018 erfolgte Parametrierung wurde beibehalten. Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst:

- Die seit Oktober 2019 praktizierte **Beschickung des Nachgärers** mit 30 % des Substratinputs verschlechtert den mittleren oTS-spezifischen Methanertrag geringfügig, entlastet aber den Fermenter (höhere Prozessstabilität insbes. in kritischen Phasen).
- Der Gas- und Methanverlust in der offenen **Anmischgrube** ist stark abhängig von der Temperatur im Behälter und liegt bei 25°C bei nur **0,5 %**. Mit 40°C in der Anmischgrube (was in der warmen Jahreszeit regelmäßig erreicht wird) wurden in der Simulation bereits 3,6% Verluste der gesamten CH₄-Produktion ermittelt. Eine entsprechende Verbesserung

könnte hier theoretisch erreicht werden, indem man den Behälter gasdicht abdeckt und das dort entstehende Gas der Biogasverwertung zuführt.

- Änderungen der **Rezirkulationsmenge** wirken sich nur wenig auf den CH₄-Ertrag aus. Eine geringere Rezirkulation führt jedoch dazu, dass die Vorteile des mehrstufigen Reaktorsystems besser genutzt werden, d. h. ein effektiverer Substratabbau aufgrund der längeren hydraulischen Verweilzeit im Vorfermenter ermöglicht wird. Allerdings erhöht sich dadurch auch die Verweilzeit in der Anmischgrube, was zu einer erhöhten Biogasproduktion in diesem offenen Behälter und damit zu einem höheren Methanverlust führt. Diese beiden gegenläufigen Effekte auf den CH₄-Ertrag können mit dem Modell gut quantifiziert werden. Hinzu kommt noch der Effekt des reduzierten Wärmeeintrages in den Anmischbehälter, wenn die Rezirkulation gesenkt wird, was in dieser Modellversion nicht direkt berücksichtigt wird. Die entsprechend niedrigere Temperatur in der offenen Anmischgrube würde die Methanverluste infolge der dort verringerten Biogasproduktion reduzieren. Eine Abdeckung des Gärrestlagers würde sich unter diesem Gesichtspunkt positiv auswirken, weil sie eine Rezirkulation aus dem kälteren Gärrestlager in den Anmischbehälter ermöglicht.
- Moderate **Erhöhungen der Gärtemperatur** (noch im mesophilen Bereich) verbessern den CH₄-Ertrag etwas. So führt z.B. eine Erhöhung der mittleren Temperatur im Fermenter und im Nachgärer von 42 C auf 45°C in der Simulation zu einem **2,6 %** höheren Methanertrag.
- Die größte Verbesserung zeigte sich in der Simulation mit **Gassammlung im Gärrestlager**. Nach einer entsprechenden Abdeckung des Behälters sind hier **11 %** mehr Methanertrag zu erwarten (simuliert mit einer Gärtemperatur von 37°C). Bereits bei niedrigen Temperaturen liegt hier ein signifikantes Verbesserungspotenzial vor - so wurde bei angenommenen 15°C im Gärrestlager eine Steigerung des Methanertrages um 5,5 % simuliert.
- Wie die Analyse zeigte, werden die BHKW im Jahresdurchschnitt bereits im optimalen Auslastungsbereich betrieben. Allerdings kann es zu vorübergehenden Effizienzeinbußen kommen, wenn die **Auslastung der BHKW** infolge betrieblicher Zwänge (Störungen, Wartungen, etc.) deutlich unter den optimalen Bereich sinkt. Im Jahr 2018 hätte sich so z. B. eine bis zu 2,5-prozentige Steigerung der Substrateffizienz erreichen lassen.

Somit würde sich, ausgehend von den im Modell exemplarisch abgebildeten Rahmenbedingungen, ein **Steigerungspotenzial hinsichtlich der Substrateffizienz von ca. 15 %** ergeben. Davon würde ein wesentlicher Teil (bis zu 11 %) erst durch eine **Abdeckung des vorhandenen Gärrestlagers** erzielt werden. Hinzu käme das im Rahmen des Projektes nicht untersuchte Verbesserungspotenzial durch Substratvariationen.

Ermittlung des Restgaspotenzials:

Im Vorfeld des Demonstrationsversuches wurde im Zusammenhang mit der Analyse des Ist-Zustandes der Anlageneffizienz das Restgas- bzw. Restmethanpotenzial des Nachgärerschlammes der Biogasanlage Bergzow bestimmt. Dazu wurden am 20.04.2021 Schlammproben aus dem Nachgärer entnommen und nach kurzer, gekühlter Lagerung noch am gleichen Tag für Batch-Gärversuche (nach [VDI16]) zur Bestimmung der Biogas- und Methanbildung bei 37°C sowie bei 20°C verwendet (je 4 Gäransätze in 0,5 L Glasflaschen).

Die oTS-spezifischen Methanerträge der Batch-Gärversuche (kumulierte Methanerträge über die Versuchslaufzeit, jeweils gemittelt über die 4 Gäransätze) wurden dafür in Bezug zum gesamten Methanertrag der BGA gesetzt. Der gesamte Methanertrag wurde dabei mit den Standardwerten (TS, oTS, Gas- und Methanertrag) der Einzelsubstrate nach [KTBL15] für den Substratmix über eine Mischungsrechnung mit den Substratmengen des letzten Betriebsjahres (2020) ermittelt.

Eine Zwischenauswertung wurde nach 60 Tagen Versuchszeit vorgenommen, was der empfohlenen Laufzeit von Batch-Gärversuchen zur Bestimmung des Restgaspotenzials nach nach [VDI16] entspricht. Dabei haben sich ein

- Restgaspotenzial von 2,6 % bei 20°C bzw. 6,6 % bei 37°C sowie ein
- Restmethanpotenzial von 3,1 % bei 20°C bzw. 7,8 % bei 37°C

ergeben. Mit dem Versuchsabschluss nach 90 Tagen Gärzeit, was ungefähr der Aufenthaltszeit des Gärrestes im Gärrestlager der BGA Bergzow entspricht, stellte sich ein

- Restgaspotenzial von 3,0 % bei 20°C bzw. 7,2 % bei 37°C sowie ein
- Restmethanpotenzial von 3,7 % bei 20°C bzw. 8,6 % bei 37°C ein.

Berücksichtigt man für die Ermittlung des Methanertrages der BGA (als relevante Bezugsgröße für das Restmethanpotenzial) weiterhin, dass bei der o. g. Analyse des Ist-Zustandes der BGA ermittelte Defizit der Substrateffizienz bzw. des oTS-spezifischen Methangehaltes von 10 % gegenüber den mit der Mischungsrechnung nach [KTBL15] erwarteten Werten ergibt sich ein **Restmethanpotenzial von ca. 10 %**. Dies passt wiederum recht gut zu dem durch Simulation ermittelten Methan-Mehrertrag bei Abdeckung des Gärrestlagers von bis zu 11 % (vgl. oben).

II.1.4.3 Wissenschaftliche Begleitung der großtechnischen Erprobung (AP 4.2)

Grundlegendes:

Aufgrund der guten Ergebnisse des Gärversuches 2020, und weil zudem im Demonstrationsversuch (siehe Kap. II.1.1.8) die Gärtemperatur 50°C nicht überschreiten sollte, konnte auf weitere, den Demonstrationsversuch begleitende kontinuierliche Labor-Gärversuche verzichtet werden. Der Schwerpunkt der wissenschaftlichen Begleitung der großtechnischen Erprobung wurde auf erweiterte und verdichtete Analysen auf der BGA Bergzow unterstützt durch vorbereitende Modellrechnungen gelegt (vgl. Kap. II.1.4.2). Die Modellierungsarbeiten werden dabei ebenfalls durch den abgesenkten Temperaturbereich begünstigt (bessere Modellgenauigkeit bei Einhaltung von Temperaturen < 50°C, vgl. Kap. II.1.2).

Wissenschaftliche Begleitung des erweiterten Demonstrationsversuches:

Diese Arbeiten werden zusammenfassend mit der Beschreibung der Planung, Durchführung und Auswertung der großtechnischen Erprobung in Kap. II.1.1.8 dokumentiert.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises können den Erfolgskontrollberichten zu den Teilprojekten entnommen werden.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die beabsichtigte Überführung des im Vorläuferprojekt „ThermoFlex [THE19] entwickelten Verfahrens in großtechnische Anwendungen waren im Vorfeld einer erfolgreichen und möglichst breiten Markteinführung umfangreiche FuE-Arbeiten zur Weiterentwicklung, Anpassung, Validierung und Erprobung **notwendig**, die im hier beschriebenen Folgeprojekt ThermoFlex-WAVE durchgeführt wurden.

Im Verbundvorhaben wurde ausgehend und begleitet von notwendigen Analysen der sich z. T. sehr dynamisch entwickelnden technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen im Bioenergiebereich eine Anpassung und Optimierung des ThermoFlex-Verfahrens vorgenommen. Im Projekt wurde zudem besonderer Wert auf die frühzeitige Analyse von Markthemnissen und Markttrends, die Entwicklung von Markteinführungsstrategien und Validierung des Marktpotenzials des ThermoFlex-Verfahrens gelegt.

Ein wesentlicher Beitrag zur notwendigen Erhöhung der Technologieakzeptanz sollte im Vorhaben durch eine zur Referenzanlage umzurüstende großtechnische Biogasanlage und eine entsprechende großtechnische Erprobung mit der erforderlichen Prozessüberwachung erbracht werden.

Dafür wurde im Vorfeld ein semi-kontinuierlicher Langzeit-Gärversuch an einer höher skalierten Laboranlage für wesentliche Randbedingungen der Referenzanlage durchgeführt, um die Erprobung des Verfahrens auf der Referenzanlage insbesondere aus prozessbiologischer Sicht vorzubereiten.

Durch Analysen und Verfahrensoptimierungen mit dynamischen Simulationsmodellen - sowohl zum Wärmemanagement als auch zur Prozessbiologie - sowie der Weiterentwicklung dieser Modelle wurden die Entwicklungsarbeiten unterstützt.

Diese anspruchsvollen und umfassenden FuE-Aufgaben waren von den Verbundpartnern nicht ohne entsprechende Förderungen zu bewältigen. Die **Angemessenheit** der geleisteten Arbeiten geht insbesondere auch aus den Projektergebnissen hervor, die am Ende von Kap. I.3 zusammengefasst wurden.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit des Ergebnisses

Die Ergebnisse der beiden Demonstrationsversuche mit der modifizierten Verfahrensvariante „ThermoFlex-Basislösung“ auf der Referenzanlage liefern ein Erfolgsbeispiel, das für die weitere Verwertung/Vermarktung des ThermoFlex-Verfahrens durch die Partner **bue** und **Thorsis** grundsätzlich geeignet ist. Auch wenn nicht die ursprünglich geplante vollumfängliche Lösung auf der Referenzanlage realisiert werden konnte, so zeigt die großtechnische Erprobung doch, dass fallspezifisch angepasste Varianten umsetzbar sind. Gerade dies ergibt für die beteiligten FuE-Partner die Möglichkeit, im Sinne der Verwertungsplanung, das Verfahren für die verschiedenen Biogasanlagenkonzepte angepasst zu implementieren. Zudem kann das auf der Beispielanlage erprobte Konzept auch für vergleichbare Biogasanlagen als kostengünstige Lösung oder als Vorstufe zu einer vollumfänglichen ThermoFlex-Lösung entwickelt werden. Die Einbeziehung des Fermenters in die Wärmespeicherung - wie es im Versuch auf der BGA Bergzow geschah - bietet hier zusätzliches Potenzial.

Das Prinzip der auf der Referenzanlage erprobten ThermoFlex-Basislösung lässt sich potenziell auch auf flexibilisierten Biogasanlagen mit Satelliten-BHKW anwenden, wenn - wie es dabei häufig der Fall ist - auf der Anlage noch ein (kleineres) BHKW betrieben wird, dessen Abwärme zur Behälterheizung genutzt wird. Dieses BHKW könnte durch die neue Lösung flexibler betrieben werden, wenn die in den BHKW-Betriebspausen weiterhin zur Behälterheizung benötigte Wärme zuvor in den Gärbehältern (durch Anhebung der Gärtemperaturen) gespeichert wird - ggf. abgestimmt mit dem Bedarf weiterer Vor-Ort-Wärmeverbraucher wie z. B. Betriebsgebäude. Somit würde die sehr kostengünstige ThermoFlex-Basislösung eine zusätzliche Verwertung in einem Marktsegment (flexible Biogasanlagen mit Satelliten-BHKW) ermöglichen, welches für ThermoFlex bisher als grundsätzlich nicht relevant angesehen wurde; vgl. [THE19].

Der Nutzen für den Projektpartner **JSW** als Betreiber der Referenzanlage ergibt sich mit der erfolgreich getesteten ThermoFlex-Basislösung durch einen effektiveren Betrieb der Trocknungsanlage im Zusammenhang mit der flexiblen Temperaturführung in den Gärbehältern. Zudem können mit Hilfe der Ergebnisse der modellbasierten Analyse der Biogasanlage Maßnahmen zur Verbesserung der Substrateffizienz gezielter geplant und umgesetzt werden.

Die **Hochschule Magdeburg-Stendal** konnte im Projektverlauf kurzfristig, eine deutliche Stärkung ihrer Kompetenzen im Bereich der Durchführung spezielle kontinuierlicher Gärversuche mit einer höher-skalierten Laboranlage herbeiführen. Weiterhin wurde die Expertise zur Entwicklung und Anwendung von prozessbiologischen Simulationsmodellen sowie auch Modellen zum Wärmemanagement von Biogasanlagen signifikant erweitert. Damit werden sich weitere Möglichkeiten für die Einwerbung von Drittmitteln ergeben. Wesentliche Ergebnisse der speziellen Gärversuche sowie auch der Modellierungsarbeiten wurden bereits wissenschaftlich veröffentlicht bzw. auf Fachtagungen vorgestellt (vgl. Kap. II.6).

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens den ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Den Verbundpartnern sind keine neuen Erkenntnisse bei anderen Stellen zu den unmittelbaren Themenschwerpunkten des Verbundprojektes bekannt. Der Schwerpunkt bei der Speicherung von Wärmemengen im Zusammenhang mit Biogasanlagen liegt nach wie vor auf dem Zubau von konventionellen Wärmespeichern.

Aktuelle Forschungsprojekte zum Thema Flexibilisierung von Biogasanlagen zielen auch auf eine flexible Fütterung zur bedarfsorientierten Biogasproduktion ab. Hier sind z. B. folgende Projekte zu nennen:

- OptiFlex - Optimierung des Betriebs und Designs von Biogasanlagen für eine bedarfsgerechte, flexibilisierte und effiziente Biogasproduktion unter Berücksichtigung der Prozessstabilität als Post-EEG Strategie (Laufzeit: 10/2017-09/2020, gefördert durch BMEL, FKZ: 22401717),
- ReBi 2.0: Regelung der Gasproduktion von Biogasanlagen (ReBi) für eine am Bedarf orientierte, gesteuerte Biogasverstromung; Teilvorhaben 2: Flexible Biogasproduktion durch die Vergärung eines breiten Substratspektrums mit der bestehenden ReBi-Technikumsanlage (Laufzeit:12/2015-06/2018, gefördert durch BMEL, FKZ: 22401815),
- FlexFeed - Flexibilisierte Fütterung in Biogasprozessen mit Modell-basierter Prozesserkennung im Praxismaßstab (Laufzeit:10/2014 – 03/2018, gefördert durch BMWi, FKZ: 03KB101),
- Untersuchung der Eignung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Flexibilisierung des Biogasprozesses mittels modellgestützter Methoden und Verschneidung der Ergebnisse mit vorhandenen Mengenpotenzialen (07/2019 - 06/2022, gefördert durch BMEL, FKZ: 22041818),
- UBEDB: Verbundvorhaben: Upgrading von Bestandsbiogasanlagen hin zu flexiblen Energieerzeugern durch eine bedarfsorientierte Dynamisierung der Biogasproduktion (07/2015 - 02/2018, gefördert durch BMEL, FKZ: 22401614 und 22400415).

Darüber hinaus werden verschiedene, zum Teil individuelle, d. h. standortbezogene Flexibilisierungsstrategien im Umgang mit Biogasanlagen verfolgt. Das Forschungsprojekt „FlexFuture“ z. B. setzt auf eine Kombination von Photovoltaik und Biogastechnik, wobei zusätzlich zum Grundlast- ein Flex-BHKW installiert wurde und der Gasspeicherfüllstand gezielt überwacht wird [DAN19].

Im Bereich der Abwassertechnik gibt es bereits erste Erfahrungen mit der Temperaturänderung zur Wärmespeicherung in Faulbehältern auf Kläranlagen. So zeigten Hubert et al. [HUB19], [STE21] in einer Datenanalyse von Klärschlammfaulbehältern auf zwei Kläranlagen, dass saisonale bzw. längerfristige Temperaturschwankungen zwischen mesophilem und thermophilem Milieu ohne Einbußen bei der Faulgasproduktion erreichbar sind. Dabei wurde ein breiter Temperaturbereich zwischen 30 und 56 °C getestet, wobei die Temperaturänderungsrate während des Beobachtungszeitraums maximal 1 K/d und meist weniger als 0,5 K/d betrug.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Im Verlauf des Vorhabens wurden die jeweils aktuellen Projektergebnisse regelmäßig veröffentlicht. Nachfolgend sind die wichtigsten dieser Aktivitäten chronologisch aufgelistet:

Beim 12. Biogas-Innovationskongress in Osnabrück am 21./22. Mai 2019 wurden das ThermoFlex-Verfahren sowie das aktuelle Projekt dem Fachpublikum vorgestellt [SEI19b].

Auf der 8. Statuskonferenz des BMWi-Förderprogramms „Energetische Biomassenutzung“ am 17./18.09.2019 in Leipzig erfolgte eine Kurzvorstellung des Projektes.

Mit einem Vortrag auf der 8. Fachtagung Biogas „Flexible Biogaserzeugung vs. Intelligentes Wärmemanagement“ in Merseburg am 24.10.2019 wurde der Planungsstand insbesondere zum Wärmekonzept für die Umrüstung der Referenzanlage dem Fachpublikum vorgestellt.

Zu dem von der Hochschule 2019 im Projekt durchgeführten Langzeit-Gärversuch gab es eine wissenschaftliche Veröffentlichung [SEI21].

Am 23.03.2021 erfolgte eine Kurzpräsentation der Arbeiten der Hochschule zur modellbasierten Analyse der BGA Bergzow: “Model-based analysis to increase the efficiency of a biogas plant” auf der CMP V - Conference on Monitoring & Process Control of Anaerobic Digestion Processes (Online). Eine weitergehende Beschreibung dieser Arbeiten findet sich in einem nach Projektabschluss veröffentlichten wissenschaftlichen Beitrag [SEI22].

Literaturverzeichnis

- [BAT02] Batstone, D.J.; Keller, J.; Angelidaki, I.; Kalyuzhnyi, S.V.; Pavlostathis, S.G.; Rozzi, A.; Sanders, W.T.M.; Siegrist, H.; Vavilin, V.A.; 2002. *Anaerobic Digestion Model No. 1*. IWA Task Group on Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes. IWA Scientific and Technical Report No. 13. 2002.
- [BER20] Bernhardt, M. (bue Anlagentechnik GmbH), persönliche Mitteilung an Winterberg, R., 01.09.2020
- [BMP09] Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI) Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik: *Biogas-Messprogramm II, 61 Biogasanlagen im Vergleich*. Herausgegeben von der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow, 2009.
- [BRÄ19] Bräsel, M.: *Grüne Wärme für das Alter*, Biogas Journal, 1_2019, S. 74-76.
- [CW22a] Winterberg, R.: *Bewertung des globalen Erwärmungspotenzials des Thermoflex-Verfahrens*, Abschlussbericht vom 28.03.2022 zum Unterauftrag der bue Anlagentechnik GmbH an die Cordes & Winterberg GbR vom 24.10.2019.
- [CW22b] Winterberg, R.: *Bioprozesstechnik der großtechnischen Nutzung des Thermoflex-Verfahrens*, Abschlussbericht vom 28.03.2022 zum Unterauftrag der bue Anlagentechnik GmbH an die Cordes & Winterberg GbR vom 24.10.2019.
- [DAN19] Dany, C.: Am Stromnetz orientiert flexibilisieren, Biogas Journal, 1_2019, S. 84-87.
- [EDE12] Eder, B. (Hrsg.): *Biogas-Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Umwelt*. 5. überarbeitete Auflage, ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg, 2012.
- [FNR16] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (Hrsg.): *Leitfaden Biogas – Von der Gewinnung zur Nutzung*. 7. Auflage, Gülzow, 2016.
- [FNR18] *Flexibilisierung von Biogasanlagen*. Text: Uwe Welteke-Fabricius, Netzwerk Flexperten, meta-i.d. Ökologische Innovation GmbH. Redaktion und Herausgeber: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Gülzow, 2018.
- [FVB21] *Branchenzahlen 2020 und Prognose der Branchenentwicklung 2021, Stand: Oktober 2021*. Fachverband Biogas e.V., Internet: [https://biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf](https://biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/21-10-14_Biogas_Branchenzahlen-2020_Prognose-2021.pdf), Zugriff: 07.03.2022.
- [GMBU22] Gesellschaft zur Förderung von Medizin-, Bio- und Umwelttechnologien (GMBU) e.V.: *Ergebnisse zum Unterauftrag GMBU 190614/BIO 01*, Bericht vom 23.03.2022 zum Unterauftrag der bue Anlagentechnik GmbH an die GMBU e.V. vom 14.06.2019.
- [HUB19] Hubert, C.; Steiniger, B.; Schaum, C.; Michel, M.; Spallek, M.: *Variation of the digester temperature in the annual cycle – using the digester as heat storage*. Water Pract. Technol. 2019, Vol 14 No 2, DOI: 10.2166/wpt.2019.030.
- [KAL16] Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.; Hofbauer, H. (Hrsg.): *Energie aus Biomasse Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, 2016, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016, ISBN 978-3-662-47437-2.
- [KRI18] Kriens WHW: Statik Festdachtank 500 m³. Unveröffentlichte Planungsunterlage der AKconflex B. V., Limbricht (NL) 2018.
- [KTBL15] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). *Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. KTBL-Heft 107, 3. Auflage 2015.

- [OGU13] Ogurek, M.; Seick, I.; Kujawski, O.; Alex, J.: *Toward modeling of biogas plants in engineering practice*. 11th IWA conference on instrumentation control and automation, 18.-20. September 2013, Narbonne, France.
- [ÖKO20] ÖKOBAUDAT. Informationsportal nachhaltiges Bauen des BMI, <https://www.oekobaudat.de/datenbank/browser-oekobaudat.html>, Zugriffe vom 14.-17.09.2020.
- [SCH20] Trapezblech 20/125 direkt vom Hersteller. <https://www.schuette-aluminium.de/trapezblech-20-125.html>, Zugriff am 16.09.2020.
- [SEI18] Seick, I.; Vergara-Araya, M.; Wiese, J. (2018), *ThermoFlex: Heat Storage in Secondary Digesters for Flexible Power Generation of Biogas Plants*. Chem. Eng. Technol., doi:10.1002/ceat.201800153.
- [SEI19a] Seick, I.: *Modellierung des Wärmemanagements zum ThermoFlex-Verfahren für Biogasanlagen*, 26. Simba Anwendertreffen, 14. - 15. Mai 2019, Merseburg.
- [SEI19b] Seick, I.; Wiese, J.: *Wärmespeicherung im Nachgärer mit dem ThermoFlex-Verfahren für flexible Biogasanlagen*. 12. Biogas-Innovationskongress 2019, 21.-22.05 2019 in Osnabrück. Tagungsband. ISBN 978-3-947777-03-7, Hrsg.: ProFair Consult+Project GmbH.
- [SEI21] Seick, I.; Araya, M. V.; Wiese, J.: *Flexible energy from biogas: Use of secondary digesters for heat storage - Results of fermentation tests*. CLEAN – Soil, Air, Water, 10.1002/clen.202000373, (2021).
- [SEI22] Seick, I.; Araya, M. V.; Wiese, J.: *Model-Based Analysis to Increase the Substrate Efficiency of a Biogas Plant*. Chem. Eng. Technol.. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100370> (2022).
- [SIM21] SIMBA#biogas 4.3 - Simulationssystem für Biogas. Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak), Magdeburg, 2021.
- [SOPH] Software "Sophena" (Software zur Planung von Heizwerken und Nahwärmenetzen), Version 1.1, C.A.R.M.E.N. e.V.
- [STE21] Steiniger, B.; Schaum, C.; Hubert, C.: *Digesters as Heat Storage – Energetic Assessment of Flexible Variation of Digester Temperature*. Chem. Eng. Technol. 2022, 45, No. 1, 144–151, DOI: 10.1002/ceat.202100240.
- [STER17] *Energiespeicher*. Sterner M, Stadler I (Hrsg.), Springer, Berlin 2017.
- [THE19] Schlussbericht zum Verbundvorhaben "*Interne Wärmespeicherung für eine verbesserte Wärmenutzung und Effizienz bei der flexiblen Stromproduktion von Biogasanlagen (ThermoFlex)*" an das BMBF (FKZ 01LY1509), DOI: <https://doi.org/10.2314/KXP:1697722261>.
- [URB18] Urbaneck, T. et al.: *Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmeversorgungssysteme*. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben OBSERW des BMWi, Förderkennzeichen des Projektträgers PtJ: Förderkennzeichen: 03ET1230A/B/C. Chemnitz 2018.
- [VDI13] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*, 11. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.
- [VDI16] VDI-Richtlinie 4630: *Vergärung organischer Stoffe, Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche*. Verein deutscher Ingenieure, Nov. 2016.
- [WAG20] RATHIPUR-Dämmgranulat KD. <https://wagemans-isobau.eu/rathipur-daemmgranulat-kd/>, Zugriff am 16.09.2020.

Abkürzungen und Einheiten

AP	Arbeitspaket
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMP II	Biogasmessprogramm II
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FOS/TAC	Verhältnis von flüchtigen organischen Säuren zur Pufferkapazität
HTK	Hühnertrockenkot
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
oTS	organische Trockensubstanz
OLR	Organic loading rate (Raumbelastung mit organischer Trockensubstanz)
PCR	Polymerase-Kettenreaktion (engl.: polymerase chain reaction)
PLS	Prozessleitsystem
qPCR	quantitative PCR
R&I-Schema	Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema
RV	Rezirkulationsverhältnis (Menge Rezirkulat : Menge Substrat)
ta	mittlere hydraulische Verweilzeit
THG	Treibhausgas
TP	Teilprojekt
TS	Trockensubstanz