



## **Energie- und Nährstoffeffizienz von Gülle** **(ENEGÜLL)**

**Gülleaufbereitung zur landwirtschaftlichen Erzeugung nährstoffoptimierter  
Düngemittel und zur Verringerung des Einsatzes Nachwachsender Rohstoffen  
in Biogasanlagen**

## Inhalt

a.	Kurzdarstellung des Projektes „ENEGÜLL“ .....	7
I.	Ausgangssituation und Bedarf.....	7
II.	Projektziel und konkrete Aufgabenstellung .....	7
III.	Mitglieder der OG.....	8
IV.	Projektgebiet .....	10
V.	Projektlaufzeit und -dauer.....	10
VI.	Budget .....	10
VII.	Ablauf des Vorhabens .....	10
VIII.	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	11
b.	Eingehende Darstellung .....	12
I.	Verwendung der Zuwendung.....	12
II.	Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn .....	16
	Ausgangssituation .....	16
	Projektaufgabenstellung .....	18
III.	Ergebnisse der OG in Bezug auf .....	20
	Zusammenarbeit .....	20
	Mehrwert einer OG .....	21
	Weitere Zusammenarbeit von Mitgliedern der OG nach Projektabschluss?.....	22
IV.	Ergebnisse des Innovationsprojektes.....	22
	Zielerreichung.....	22
	Abweichungen zwischen Projektplan und Ergebnissen .....	24
	Projektverlauf .....	26
	Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP Zielen .....	35
	Nebenergebnisse – „by- catches“?.....	36
	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben .....	36
V.	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis.....	36
	Nutzbare/verwertbare Empfehlungen, Produkte, Verfahren, oder Technologien.....	36
	Umsetzungsstand .....	38
VI.	(Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse .....	38
VII.	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit .....	39
VIII.	Administration und Bürokratie.....	39
	Aufwand .....	39
	Schwierigkeiten .....	39

Verbesserungsvorschläge.....	39
IX.    Nutzung des Innovationsbüros (Innovationsdienstleister, IDL) .....	40
X.    Kommunikations- und Disseminationskonzept.....	41
Kommunikation der Ergebnisse .....	41
Fazit zur Eignung von EIP-Förderung.....	41
c.    Anhang.....	43
I.    Fließschema der Anlage A .....	43
II.   Fließschema der Anlage B .....	44
III.  Fließschema der Anlage C .....	45
IV.   Projektzusammenfassung CAU .....	46
Ergebnisse des Innovationsprojektes.....	46
V.    Projektbericht Universität Bayreuth .....	56
Prozessschritte .....	58
Mikrobielle Population .....	58
Ammoniakhemmung.....	59
Mikrobielle Anpassung in der Betrieb B-Anlage.....	61
Mikrobielle Anpassung in der Betrieb C-Anlage.....	65
Mikrobielle Anpassung in der Betrieb A-Anlage .....	67
Betrieb D-Anlage .....	68
ARISA, Archaeen .....	69
ARISA, Bakterien.....	72
Sequenzierung, Bar-Plots .....	75
Sequenzierung, Heat-Map.....	78
Gesamt-Stickstoffkonzentration .....	79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gesamtkostenübersicht "ENEGÜLL" - Antrag .....	13
Tabelle 2: Indikativer Zeitplan ENEGÜLL .....	24
Tabelle 3: Inhaltsstoffe der Rindergülle (RG) und des Gärrest des Betriebs Betrieb B vom 10.09.2020 .....	46
Tabelle 4: Substratmix der BGA Betrieb B.....	47
Tabelle 5: Versuch zur Aufbereitung von Gärrest - Bilanz der Fest/Flüssig-Trennung .....	48
Tabelle 6: Versuch zur Aufbereitung von Gärrest - Bilanz der Verdunstungsanlage HEF .....	49
Tabelle 7: Versuch zur Aufbereitung von Gärrest - Konzentrationen der Inhaltstoffe der Stoffströme .....	49
Tabelle 8: Die häufigsten methanogenen Archeen und deren Substrate, bzw. metabolische Wege zur Biogaserzeugung .....	59

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Variante 1 - BGA Betrieb B mit Rezirkulation in Bilanzgrenze .....	51
Abbildung 2: Variante 1 - BGA Betrieb B mit Rezirkulation außerhalb der Bilanzgrenze .....	52
Abbildung 3: Variante 2 - BGA Betrieb B mit Aufbereitung und Rezirkulation von Feststoff, Dickschlamm und Konzentrat .....	52
Abbildung 4: Variante 3 - BGA Betrieb B mit Aufbereitung und Rezirkulation von Dickschlamm und Konzentrat .....	53
Abbildung 5: Variante 4 - BGA Betrieb B mit Aufbereitung und Rezirkulation von Dickschlamm, Konzentrat und Kondensat .....	53
Abbildung 6. Biogaserzeugung aus Biopolymeren/komplexen organischen Substraten .....	58
Abbildung 7. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus im Projekt beteiligten Anlagen .....	61
Abbildung 8. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus Betrieb B .....	62
Abbildung 9. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in Betrieb B über die Zeit .....	64
Abbildung 10. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus Betrieb C .....	65
Abbildung 11. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in Betrieb C über die Zeit .....	66
Abbildung 12. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus Betrieb A .....	67
Abbildung 13. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in Betrieb A über die Zeit .....	68
Abbildung 14. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in der Anlage in Betrieb D .....	68
Abbildung 15. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum August 2018 – März 2019 .....	69
Abbildung 16. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum April 2019 – Oktober 2019 .....	70
Abbildung 17. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum November 2019 – März 2020 und manche der alten Proben .....	70
Abbildung 18. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum Februar 2020 – Juni 2020 und manche der alten Proben .....	71
Abbildung 19. Gezoomte Abbildung 18, A (ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum Februar 2020 – Juni 2020 und manche der alten Proben) .....	71
Abbildung 20. Gezoomte Abbildung 18, B (ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum Februar 2020 – Juni 2020 und manche der alten Proben) .....	72
Abbildung 21. ARISA-Ergebnisse für Bakterien für den Zeitraum August 2018 – März 2019 .....	72
Abbildung 22. ARISA-Ergebnisse für Bakterien für den Zeitraum April 2019 – Oktober 2019 .....	73
Abbildung 23. ARISA-Ergebnisse für Bakterien für den Zeitraum November 2019 – März 2020 und manche der alten Proben .....	73
Abbildung 24. ARISA-Ergebnisse für Bakterien für den Zeitraum Februar 2020 – Juni 2020 und manche der alten Proben .....	74
Abbildung 25. Relative Häufigkeit von Archaeen und Bakterien in Betrieb B .....	75
Abbildung 26. Relative Häufigkeit von Archaeen und Bakterien in Betrieb C .....	76
Abbildung 27. Relative Häufigkeit von Archaeen und Bakterien in Betrieb A .....	77
Abbildung 28. Heatmap – Gruppierung von ähnlichen Proben aus ENEGÜLL-Anlagen (links) und zusätzlichen früher am Lehrstuhl analysierten Proben (rechts) .....	78
Abbildung 29. Gesamt-Stickstoffkonzentration in Fermenter und Nachgärer über die Zeit in Betrieb B (oben) und Betrieb C (unten) .....	79

## Abkürzungsverzeichnis

ASL	<b>A</b> mmoniumsulfatlösung
BGA	<b>B</b> iogasanlage
BHKW	<b>B</b> lock <b>h</b> eiz <b>k</b> raft <b>w</b> erk
CAU	<b>C</b> hristian- <b>A</b> lbrechts- <b>U</b> niversität zu Kiel
DüVO	<b>D</b> ü <b>n</b> ge- <b>V</b> er <b>o</b> rdnung
F-F-T	<b>F</b> est- <b>F</b> lüssig- <b>T</b> rennung
GVEE	<b>G</b> roß <b>v</b> ie <b>e</b> in <b>e</b> inheiten
HBL	<b>H</b> ö <b>ch</b> st <b>b</b> emessungs <b>l</b> eistung
HEF	Verdunstungseinheit <b>H</b> igh <b>E</b> fficiency
HTK	<b>H</b> üh <b>n</b> er <b>t</b> rocken <b>k</b> ot
LLUR	<b>L</b> andesamt für <b>L</b> andwirtschaft, <b>U</b> mwelt und ländliche <b>R</b> äume
LWK SH	<b>L</b> andwirtschaftskammer <b>S</b> chleswig- <b>H</b> olstein
MO	<b>M</b> ikroorganismen
NaWaRo	<b>N</b> ach <b>w</b> achsende <b>R</b> ohstoffe
OG	<b>O</b> perationelle <b>G</b> ruppe
SSA	<b>S</b> chwefelsaurer <b>A</b> mmoniak
TS	<b>T</b> rockensubstanz

## a. Kurzdarstellung des Projektes „ENEGÜLL“

### I. Ausgangssituation und Bedarf

Die seit Jahrzehnten zunehmende Intensivierung im Pflanzenbau in Verbindung mit einer hohen regionalen Konzentration von Tierhaltung und Biogaserzeugung führte in einigen Regionen zu Nährstoffüberschüssen im Boden und Nährstoffanreicherung im Grundwasser. Die Konsequenz seitens des Gesetzgebers sind zunehmende Anforderungen an LandwirtInnen und Biogasanlagen (BGA) hinsichtlich einer effizienten Nährstoffausnutzung. Dies zeigt sich in der Düngeverordnung (DüngeVO), die zunehmend Grenzwerte für organische Düngemittel festsetzt. Hieraus resultiert, dass zur Verfügung stehende Flächen nicht ausreichen und Nährstoffe u.U. teuer aus den Regionen exportiert werden müssen. Zudem erfordern die festgesetzten Grenzwerte einen eng am Pflanzenbedarf orientierte Nährstoffversorgung. Allerdings schwankt die Nährstoffzusammensetzung der organischen Gölledüngung. LandwirtInnen suchen daher nach Möglichkeiten, ihre organischen Düngemittel zu verwerten bzw. aufzuwerten. Der Blick richtet sich hierbei zunehmend auf Biogasanlagen. Diese können als Verwerter von Gülle und Mist jedoch nur bedingt Abhilfe schaffen. Der Einsatz von Gülle und Mist in der BGA ist durch die Menge des darin enthaltenen Ammoniaks (NH<sub>3</sub>) bzw. Ammoniums (NH<sub>4</sub>) und den geringen Energiegehalt begrenzt. Zu hohe Stickstoffgehalte hemmen die biologische Methanbildung. Zudem sorgen die geringen Energiegehalte von Gülle dafür, dass eine Ausweitung des Gölleeinsatzes in bestehenden BGA vielfach nur mit teuren, baulich aufwendigen und Flächen verbrauchenden zusätzlichen Gärbehältern möglich wäre. Demnach verringert sich wiederum die für die Urproduktion zur Verfügung stehende Anbaufläche. LandwirtInnen stehen hierdurch abermals unter Druck, da zum einen Ausbringungsflächen für Gülle und Mist fehlen und zum anderen Anbaufläche für Futterpflanzen.

Auf einem der am Projekt beteiligten Betriebe wurde bereits 2017 eine Gärrestveredelungsanlage installiert. Der entsprechende Landwirt überlegte, künftig Hühnertrockenkot (HTK) einsetzen zu wollen. Dies würde jedoch bedeuten, dass noch mehr Stickstoff in die BGA eingebracht würde und so die Menge an Gülle noch strenger limitiert wäre. Gleiches gilt für die Ausbringung des organischen Düngers. Der Landwirt überlegte daher, wie er diesen Konflikt lösen könnte. So kam er auf die Idee, dass es sinnvoll wäre, bereits den Stickstoff als limitierenden Faktor aus der Gülle und nicht erst aus dem Gärrest zu entziehen.

### II. Projektziel und konkrete Aufgabenstellung

Das Projekt „ENEGÜLL“ verfolgte den Ansatz, Gülle und Mist VOR Zugabe in die Biogasanlage so zu behandeln, dass möglichst viel Stickstoff, Phosphat und Wasser entzogen wird. Ziel war es, die eingesetzten Gülle- und Mistmengen zu erhöhen und gleichzeitig die Maismenge zu

reduzieren. Zudem sollten mittels der zum Einsatz kommenden Aufbereitungsanlage aus Gülle und Mist definierte Düngeprodukte gewonnen werden, die pflanzenbaulich optimal nutzbar eingesetzt werden können.

Um eine möglichst breite Basis für spätere Projektaussagen zu schaffen, sollten sich die Testbetriebe möglichst in der Substratzusammensetzung sowie den ackerbaulichen Zielsetzungen unterscheiden.

Die Gülleaufbereitung umfasst eine Separation, eine Kondensation und - zur Endreinigung des abgetrennten Wassers – ggf. eine biologische Nachbehandlung. Folgende Produkte können gewonnen werden:

- Ammoniumsulfatlösung als mineralischer Zweinährstoffdünger (Stickstoff und Schwefel)
- Dickschlamm als P-reiches Düngemittel oder als Einsatzstoff für die BGA
- Feststoff, N- und P-reduziert, als Einsatzstoff für die BGA
- Gereinigtes Wasser, praktisch nährstofffrei, pH-neutral und ohne biologische Belastung – zur Verrieselung auf landwirtschaftlichen Flächen oder zur Einleitung

Im Laufe des Projektes sollte zudem der Prozess hinsichtlich

- der praktischen Umsetzung der Verfahrenstechnik,
- der optimalen Zusammensetzung der Biogassubstrate,
- der Verwertung der Produkte (Güllefeststoff, Dickschlamm, Ammoniumsulfat und gereinigtes Wasser),
- des Gasertrags und des biologischen Verhaltens der Produkte im Biogasprozess
- des Potenzials zur technischen und ökonomischen Umsetzbarkeit

optimiert und evaluiert werden.

Im Ergebnis profitieren sowohl Umwelt als auch Landwirtschaft:

- Gewässerschutz durch bedarfsgerechte organische Düngung
- Verringerung der Emissionen aus Güllelagerung und Ausbringung durch Entlastung in der Fläche und klimaschonende Landwirtschaft
- Mehr Handlungsfreiheit bei Pflanzenernährung und Fruchtfolgegestaltung
- Kostengünstige Biogassubstrate

### **III. Mitglieder der OG**

Am Projekt ENEGÜLL waren zu Projektbeginn insgesamt 4 landwirtschaftliche Betriebe sowie drei Biogasanlagen beteiligt. Im Laufe des Projektes entschied sich ein Projektpartner sowohl mit seinem landwirtschaftlichen Betrieb als auch mit der Biogasanlage, an der er beteiligt ist, als aktives Mitglied auszuscheiden. Dennoch nahm er weiterhin als assoziierter Partner am Projekt teil. Als neues drittes, aktives OG-Mitglied konnte ein landwirtschaftlicher Betrieb mit angeschlossener Biogasanlage gewonnen werden.

Bei Projektpartner A handelt es sich um zwei landwirtschaftliche Betriebe im Kreis Rendsburg-Eckernförde, die an einer Biogasanlage (BGA) beteiligt sind. Sie bewirtschaften

rund 191 ha Acker- und ca. 14,5 ha Grünland. Am Standort der Biogasanlage wird Schweinehaltung betrieben mit durchschnittlich 585 Großvieheinheiten (GVE). Die anfallende Schweinegülle (~ 8.300 t/a) wird direkt in die Biogasanlage eingebracht.

Die erstmalige Inbetriebnahme der BGA erfolgte 2009. Erweiterungen folgten 2010 und 2014 durch Errichtung weiterer Blockheizkraftwerke (BHKW). Die installierte Leistung der insgesamt vier BHKW beträgt 2,4 MW, wobei die Höchstbemessungsleistung (HBL) genehmigungsrechtlich auf 1,15 MW begrenzt ist. Die Biogasanlage erzeugt jährlich rund 4,9 Mio. Nm<sup>3</sup> Rohbiogas. Dies geschieht in sieben Behältern – drei Fermenter mit einem Durchmesser von je 20,5 m, zwei Nachgärer mit 20,5 m bzw. 32 m Durchmesser und einem Gärrestlager, dessen Durchmesser 32 m beträgt. Zudem verfügt die BGA über eine Vorgrube, deren Volumen 200 m<sup>3</sup> misst. An die BGA ist ein Wärmenetz angeschlossen.

OG-Partner B betreibt einen landwirtschaftlichen Betrieb im Kreis Schleswig-Flensburg. Dem Betrieb angeschlossen ist eine Biogasanlage. Der Betrieb bewirtschaftet 240 ha Acker- und 55 ha Grünland. Auf dem Betrieb werden durchschnittliche 250 GVE in Form von Milchkühen samt Nachzucht gehalten. Auf dem Betrieb fallen jährlich rund 800 t Mist sowie rund 6.000 t Gülle an. Beides wird als Inputstoff für die BGA genutzt.

Die dem Betrieb angeschlossene BGA wurde 2006 in Betrieb genommen. Die sechs installierten BHKW haben eine Gesamtleistung von 2,4 MW und eine HBL von rund 1,1 MW. In den vier Behältern der BGA können jährlich bis zu 6 Mio. m<sup>3</sup> Biogas produziert werden. Bei den Behältern handelt es sich um zwei Fermenter mit je 23 m Durchmesser, einen Nachgärer mit 30 m Durchmesser und ein Gärrestlager, dessen Durchmesser 34 m beträgt. Der Betrieb betreibt ein Wärmenetz.

Projektpartner C befindet sich ebenfalls im Kreis Schleswig-Flensburg. Er steht vor der Herausforderung, dass sich der Betrieb in einem sog. „Roten Gebiet“ befindet, d.h. diese Gebiete wurden als nitratbelastet eingestuft und müssen zusätzliche Anforderungen der Düngeverordnung (DüVO) erfüllen. Bewirtschaftet werden rund 485 ha Acker- und rund 8 ha Grünland. Eine Tierhaltung erfolgt nicht, die benötigten 4.500 m<sup>3</sup> Gülle werden über Zukauf generiert.

Dem landwirtschaftlichen Betrieb ist eine BGA angeschlossen, deren Inbetriebnahme 2011 erfolgte. Auf der BGA sind zwei BHKW (623 und 265 kW) installiert, wobei das kleinere der beiden als Fackelersatz dient. Jährlich können in den drei Behältern bis zu 2,3 Mio. m<sup>3</sup> Biogas produziert werden. Bei den Behältern handelt es sich um einen Fermenter und einen Nachgärer mit einem Durchmesser von je 21 m und ein Gärrestlager mit einem Durchmesser von 25 m.

Betrieb D ist ein Betrieb in Betrieb D, der ursprünglich als aktiver Partner teilnehmen wollte, sich jedoch aus verschiedenen Gründen zunächst gegen die Anschaffung einer für das

Projekt erforderlichen Aufbereitungsanlage entschieden hat. Der teilnehmende landwirtschaftliche Betrieb ist neben anderen landwirtschaftlichen Betrieben an einer Biogasanlage beteiligt. Der Betrieb betreibt auf etwa 872 ha Ackerbau.

Die Inbetriebnahme der BGA erfolgte 2012 mit einer installierten Leistung von 637 kW. Die max. Biogasmenge, die pro Jahr erzeugt wird, liegt bei ca. 13,6 Mio. m<sup>3</sup>. Die Biogasproduktion erfolgt in insgesamt neun Behältern – drei Fermenter und ein Nachgärer mit je 26 m Durchmesser und fünf Gärrestlagern mit je 26 m bzw. 30 m Durchmesser.

#### **IV. Projektgebiet**

Zu Projektbeginn war neben den beiden schleswig-holsteinischen Betrieben auch ein Landwirt aus Betrieb D, der an einer BGA beteiligt ist, Teil der OG. Dieser trat jedoch als aktives OG-Mitglied zurück, beteiligte sich allerdings weiterhin als assoziiertes Mitglied am Projekt. Gleiches gilt für Betriebe aus Niedersachsen. Letztlich stellten vier Landwirte aus Schleswig-Holstein ihre Betriebe für das Projekt zur Verfügung. Zwei landwirtschaftliche Betriebe mit einer BGA aus dem Kreis Rendsburg-Eckernförde, die beiden anderen Betriebe samt BGA sind im Kreis Schleswig-Flensburg ansässig.

#### **V. Projektlaufzeit und -dauer**

Das Projekt ENEGÜLL startete am 01.07.2018 und endete am 30.06.2021. Aus Projektsicht wäre eine kostenneutrale Verlängerung wünschenswert gewesen, konnte jedoch aus verschiedenen Gründen nicht umgesetzt werden. Hier ist v.a. der Ausfall relevanter OG-Mitglieder anzuführen.

#### **VI. Budget**

Bei der Planung des Projektes wurde ein Kostenbedarf von rund 495.000,00 € angesetzt. Dieser basierte insbesondere auf den hohen technischen Kosten, die im Rahmen des Projektes und bei der (Um-)Nutzung der Aufbereitungsanlage anfallen. Die Ansprüche, die sich aus dem Projekt ergaben, blieben unter der bewilligten Fördersumme.

#### **VII. Ablauf des Vorhabens**

Grundlage des Projektes bildete die Umnutzung einer bewährten Gärresteaufbereitungstechnik. Diese war zu Projektbeginn bereits auf dem Betrieb A vorhanden und einsatzbereit. Der entsprechende Landwirt war einer der Ideengeber für das Projekt. Auf den Betrieben B und C wurde eine gleichartige jedoch bereits technisch weiterentwickelte Aufbereitungsanlage errichtet. Beim Bau der Anlagen konnte Betrieb C,

dessen System zuletzt errichtet wurde, von den auf Betrieb A und B gesammelten Erfahrungen profitieren, insbesondere in technischer Hinsicht. Allerdings stand Betrieb C vor genehmigungsrechtlichen Herausforderungen, die die Inbetriebnahme verzögerten.

Die landwirtschaftlichen Betriebe arbeiteten eng mit Beratung, Wissenschaft und dem Anlagenhersteller zusammen und gaben immer wieder neue Impulse. Sie waren und sind sehr engagiert, wenn es um Problemlösungen geht und scheuten nicht davor zurück, selbst Hand anzulegen. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um ein Pilotprojekt handelt, war immer wieder eine hohe Einsatzbereitschaft der Landwirte gefragt, die sich viel mit der Technik und Konstruktion auseinandersetzten und immer wieder Lösungsansätze ansprachen und aufzeigten. Ebenso gaben sie ehrliches Feedback zu den Prozessen und der Technik.

Neben den praktischen Einsatzmöglichkeiten sind für die Landwirte und Betreiber der BGA auch die mikrobiologischen Prozesse interessant und entscheidend, die sich durch die Änderung der Inputstoffe ergeben (können). Daher wurden neben den technischen Verfahren auch die mikrobiologischen Prozesse und Veränderungen betrachtet und Optimierungspotenziale bzw. Hemmnisse identifiziert. Hierfür wurden alle 14 Tage Proben aus den jeweiligen Biogas-Behältern (Fermenter und Nachgärer) entnommen. Diese wurden im Labor untersucht und prozessbiologische Parameter erfasst sowie Laborversuche angelegt, die mit der Praxis verglichen wurden. Daneben wurden zudem Versuche durchgeführt, die z.B. die Auswirkungen erhöhter Stickstoff-Konzentrationen in der BGA aufzeigten. Solche Versuche dienten der Ermittlung von Grenzwerten, die für die jeweiligen BGA gelten und bildeten die Basis der Fütterungsempfehlungen für die BGA. Die Landwirte konnten so die Inputstoffe der BGA entsprechend der Erkenntnisse und Empfehlungen aus den Laborversuchen umstellen und potenzielle negative Auswirkungen auf die Biologie vermeiden. Auch die Stoffflüsse der Betriebe wurden betrachtet und ausgewertet. Hierzu wurden Diagramme der Stoffflüsse erstellt (Anhang I-III).

Parallel zu den gewonnenen Erkenntnissen wurde die Technik der Anlagen immer wieder angepasst und weiterentwickelt bzw. technische Komponenten ersetzt. Für die Ermittlung der Effizienz der Aufbereitungsanlage wurden Versuchsreihen im laufenden Betrieb durchgeführt.

## **VIII. Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die Idee der Aufbereitung von Gülle und Mist vor Gabe in die Biogasanlage erweist sich als zukunftsweisend und umsetzbar. Zum einen konnte bereits ein Teil der Maismenge durch Gülle und Mist ersetzt und zum anderen definierte Düngeprodukte gewonnen werden. Ursprünglich wurde hierbei der Fokus auf eine Ammoniumsulfatlösung (ASL) gerichtet. Dank

des Impulses eines Landwirtes konnte aus der ASL sogar schwefelsaurer Ammoniak (SSA) produziert werden. Dies erhöht die Lagerfähigkeit und verringert wiederum Lagerkapazitäten. Darüber hinaus konnten alle Betriebe Gärrestlager einsparen. Mit Hilfe der Laborversuche wurden mögliche Auswirkungen der Substratänderung auf die Mikrobiologie ermittelt, z.T. mit fatalen Folgen für den Biogasertrag. Aufgrund der labortechnisch gewonnenen Erkenntnisse konnten Empfehlungen für die Praxis ausgesprochen und von den Projektpartnern umgesetzt werden. Dies führte zu einer erfolgreichen Umstellung der Fütterung ohne gravierende Einbrüche in der Biogasproduktion.

Allerdings gestaltete sich die Umnutzung der Gärrestveredelungsanlage für Gülle und Mist aufwendiger, als zu Beginn des Projektes erwartet. Die Umstellung der Inputstoffe bedurfte eines höheren technischen Anpassungsbedarfes. Zudem zeigten sich deutliche Unterschiede in den eingesetzten Güllen sowie deren Eigenschaften, auch innerhalb der Betriebe. Während Gärreste homogen sind, ist Gülle sehr heterogen und enthält Fremdkörper wie Steine oder grobe Faserbestandteile. Der Einfluss der Tierfütterung auf die Gülle zeigte sich deutlich, z.B. in Form vermehrter Schaumbildung in der Anlage. Um die Gülle für die Anlage nutzbar zu machen, wurde bspw. auf einer Anlage, die nahezu ausschließlich mit Fremdgülle arbeitet, ein anderer Separator errichtet als auf den anderen beiden Anlagen. Zudem wurde eine (halb-)automatische Gegendruckklappe installiert. Pumpen- und Steuerungstechnik wurden angepasst sowie ein Fremdkörperabscheider installiert. Zur Zerkleinerung der groben Fasern ist nun ein Cutter vorgeschaltet.

Genehmigungsrechtlich galt es einige Unklarheiten zu beseitigen. Aufgrund der innovativen Nutzung und der fehlenden Datengrundlage bedurfte es einiger Prüfungen seitens der Behörden. Zudem ist die rechtliche Einordnung der gewonnenen Düngemittel noch nicht hinreichend geklärt, sofern diese als Produkt der Gülle an deren Lieferanten zurückgeführt werden.

## **b. Eingehende Darstellung**

### **I. Verwendung der Zuwendung**

Für die Umsetzung des Projektes „ENEGÜLL“ wurde mit dem Zuwendungsbescheid vom 08.05.2018 ein Zuschuss in Höhe von 495.533,00 € gewährt. Diese Summe ergab sich aus folgenden Positionen:

Tabelle 1: Gesamtkostenübersicht "ENEGÜLL" - Antrag

<b>Gesamtkosten Projekt ENEGÜLL Antrag</b>	<b>2018 (€)</b>	<b>2019 (€)</b>	<b>2020 (€)</b>	<b>2021 (€)</b>	<b>Summe (€)</b>
Laufende Kosten der Zusammenarbeit	1.435,20	2.870,40	2.870,40 €	1.435,20	<b>8.611,20</b>
Öffentlichkeitsarbeit	-	3.400,00	2.200,00	2.200,00	<b>7.800,00</b>
Personalkosten in unmittelbarem Zusammenhang (& Dienstleister)	8.530,00	34.795,00	34.795,00	26.265,00	<b>104.385,00</b>
Aufwand Forscher, Analysen, Nutzungskosten von Maschinen	10.800,00	23.600,00	23.600,00	9.800,00	<b>67.800,00</b>
Aufwandsentschädigung und Nutzungskosten Landwirtschaft Urproduktion	40.537,50	96.075,00	96.075,00	3.037,50	<b>235.725,00</b>
Reisekosten der Projektpartner	2.952,00	5.904,00	5.904,00	2.952,00	<b>17.712,00</b>
Ausgaben Material und Bedarfsmittel	25.000,00	19.500,00	5.500,00	1.500,00	<b>51.500,00</b>
Kosten für Zukauf Lizenzen	-	-	-	-	-
Ausgaben für geringfügige Investitionen kleiner 410,-	500,00	750,00	750,00	-	<b>2.000,00</b>
Innovative Investitionen inkl. bauliche Leistungen	-	-	-	-	-
<b>Summe Gesamtkosten Projekt ENEGÜLL</b>	<b>89.754,70</b>	<b>186.894,40</b>	<b>171.694,40</b>	<b>47.189,70</b>	<b>495.533,20</b>

Abgerufen wurden seitens des Projekts insgesamt rund 467.000,00 €. Die Differenz der abgerufenen Mittel zu den genehmigten Zuwendungen beruht auf folgenden Umständen:

*Personalkosten in unmittelbarem Zusammenhang (& Dienstleister)*

- Ein Teil der hier angesetzten Kosten war für die Projektkommunikation bzw. den Dialog mit der Öffentlichkeit vorgesehen. Aufgrund der Corona-Situation fanden keine Veranstaltungen statt, sodass die hier angedachten Auftritte nicht wahrgenommen werden konnten. Daher entfielen Reisekosten sowie Werbungskosten, z.B. Plakatdrucke.
- Die Bewertung der Umsetzbarkeit mit den Landwirten erfolgte im Rahmen kleiner Treffen, unabhängig von den Projekttreffen. Der geplante Gülle-Betrieb der Anlagen

konnte aufgrund diverser Gründe nicht so umfangreich wie geplant umgesetzt werden. Die Bewertung der Umsetzbarkeit konnte daher nicht so ausgiebig stattfinden, wie im Antrag vorgesehen. Gleiches gilt für die Optimierung der Biogassubstrate

- Die geplante Verwertung der Produkte ASL und Dickschlamm erfolgte nicht. Ursache hierfür war, dass aufgrund der erforderlichen und wiederkehrenden technischen Anpassungen am System keine ausreichenden Mengen der beiden Produkte aus Gülle gewonnen werden konnten. Die Verwertung von ASL und Dickschlamm aus Gärrest war nicht Teil des Projektes und wurde daher nicht berücksichtigt.

#### *Aufwandsentschädigung und Nutzungskosten Landwirtschaft Urproduktion*

- Als größter Kostenansatz galt diesbezüglich die Anlagenmiete, die für die Nutzung der Aufbereitungsanlagen für das Projektvorhaben an die Landwirte gezahlt werden sollte. Diese ist v.a. als Aufwandsentschädigung zu sehen. Der Aufwand für die Landwirte bei der Umsetzung der innovativen Projektidee und der Umnutzung der Anlage konnte zu Projektbeginn nicht abgeschätzt werden. Letztlich war dieser deutlich größer als angenommen. Aufgrund von Verzögerungen bei der Errichtung bzw. Inbetriebnahme der beiden Anlagen auf den Betrieben B und C und dem vorzeitigen Ausscheiden des Betriebes A war jedoch der Zeitraum, für den die Anlagenmiete gezahlt wurde, kürzer als für den Antrag angenommen. Daraus resultieren geringere benötigte Mittel für diesen Kostenpunkt.

#### *Aufwand Forscher, Analysen, Nutzungskosten von Maschinen*

- Hinsichtlich des Aufwandes für Forscher wurden im Vergleich zum Geschäftsplan rund 25.000,00 € mehr abgerufen, als beantragt. Dies ist auf eine Mittelumwidmung der CAU vom 11.11.2019 zurückzuführen. Die von der CAU im Projektantrag angesetzten Kosten für Inhaltsstoffanalysen wurden für selbige nicht benötigt. Die Verzögerungen beim Verfahrensaufbau erforderten eine längere Beschäftigung von Personal als geplant. Da der Anlagenhersteller die erforderliche Messtechnik zur Verfügung stellte, musste die CAU keine eigene Technik einsetzen. Die entsprechenden Mittel wurden daher dem Posten Personal zugeschrieben.

#### *Ausgaben Material und Bedarfsmittel*

- Die Ausgaben für Material und Bedarfsmittel waren v.a. in Bezug auf die Messtechnik und die Anpassungskosten auf den Betrieben deutlich geringer. Die Kosten für die Messtechnik entfielen nahezu vollständig, da der Anlagenhersteller den Großteil übernommen bzw. zur Verfügung gestellt hat. Im Hinblick auf die Anpassungskosten auf den Betrieben fielen diese z.T. geringer aus oder wurden von den Betrieben, z.T. auch vom Anlagenhersteller, getragen.

#### *Reisekosten der Projektpartner & Öffentlichkeitsarbeit*

- Die Reisekosten der Projektpartner entfielen überwiegend, da aufgrund der Corona-Pandemie ab 2019 kaum Reisen stattfinden konnten. Gleiches galt für Veranstaltungen, die ausfielen. Daher konnten auch die angedachten öffentlichen Tagungen, z.T. mit externen Referenten, nicht erfolgen. Die entfallenen

Veranstaltungen machten Werbematerial überflüssig, sodass dieses eingespart werden konnte.

Tabelle 2: Gesamtkostenübersicht "ENEGÜLL" - Abruf

<b>Gesamtkosten Projekt ENEGÜLL - Abruf</b>	<b>2018 (€)</b>	<b>2019 (€)</b>	<b>2020 (€)</b>	<b>2021 (€)</b>	<b>Summe (€)</b>
Laufende Kosten der Zusammenarbeit	339,48	2.066,40	1.719,38	2.198,47	<b>6.323,73</b>
Öffentlichkeitsarbeit	16,81	18,46	-	-	<b>35,27</b>
Personalkosten in unmittelbarem Zusammenhang (& Dienstleister)	2.121,44	5.443,48	4.612,55	10.846,63	<b>23.024,10</b>
Aufwand Forscher, Analysen, Nutzungskosten von Maschinen	-	5.156,54	70.995,08	16.742,69	<b>92.894,31</b>
Aufwandsentschädigung und Nutzungskosten Landwirtschaft Urproduktion	-	-	1.817,70	314.161,77	<b>315.979,47</b>
Reisekosten der Projektpartner	64,50	1.641,61	1.929,82	391,40	<b>4.027,33</b>
Ausgaben Material und Bedarfsmittel	-	1.743,11	14.380,07	8.115,27	<b>24.238,45</b>
Kosten für Zukauf Lizenzen	-	-	-	-	-
Ausgaben für geringfügige Investitionen kleiner 410,-	4,20	14,80	9,45	-	<b>28,45</b>
Innovative Investitionen inkl. bauliche Leistungen	-	-	-	-	-
<b>Summe Gesamtkosten Projekt ENEGÜLL</b>	<b>2.546,43</b>	<b>16.084,40</b>	<b>95.464,05</b>	<b>352.456,23</b>	<b>466.551,11</b>

Die am Projekt beteiligten Betriebe investierten in eine Gärrestaufbereitung der Firma Terrawater, wobei dies nicht verpflichtend für die Projektteilnahme war. Die Anschaffungskosten einer solchen Anlage betragen rund 475.000,00 €. Hinzu kommen ca. 100.000,00 €, um das System in die BGA zu integrieren, sowie Genehmigungen und Abnahmeprüfungen. Die (Neben-)Kosten sind betriebsindividuell. Betrieb C hat darüber hinaus eine Erweiterung der Aufbereitungsanlage in Form einer Saline umgesetzt. Soweit dem Projekt bekannt ist, ist dies bisher einzigartig in Deutschland. Mit Hilfe der Saline kann die flüssige ASL zu kristallinem schwefelsaurem Ammoniak (SSA) weiterverarbeitet werden.

Hierdurch ergeben sich für den Betrieb weitere Einsatzmöglichkeiten und eine noch größere Flexibilität beim Einsatz der betriebseigenen Düngemittel. Zudem erhöht sich die Lagerfähigkeit des SSA, da dieses in Big Bags aufbewahrt werden kann und keine Lagertanks wie bei der ASL vorgehalten werden müssen.

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und der obligatorischen Anbindung des Systems an eine BGA verbleiben die Aufbereitungsanlagen auch nach Projektende auf den Betrieben und im Besitz der Landwirte. Die Anschaffungskosten wurden seitens des Projektes nicht getragen. Weder vollständig noch anteilig. Den Landwirten wird rückwirkend durch das Projekt eine Anlagenmiete i.H.v. 2.500,00 €/Monat gezahlt, die als Aufwandsentschädigung dient. Diese Miete wird für diejenigen Monate gezahlt, in denen die Anlagen dem Projekt zur Verfügung standen.

## **II. Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn**

### **Ausgangssituation**

Alle Betriebe standen vor unterschiedlichen Herausforderungen, die sie mittels Nutzung einer Gärrestveredelungsanlage bewältigen wollten. Die Umnutzung einer solchen Anlage ist für alle Betriebe gleichermaßen, jedoch aus unterschiedlichen Gründen relevant. Alle Betriebe wurden zu Beginn des Projektes zu ihren Intentionen befragt. Hierzu wurden jeweils drei Fragen beantwortet.

#### *1. Welches Ziel verfolgen Sie mit dem Einsatz der Aufbereitungsanlage?*

##### Betrieb A:

- Erhöhung der Nährstoffkonzentration je Einheit und damit Steigerung der Transportwürdigkeit
- Verringerung der Transport- & Ausbringkosten
- Verbesserung der Berechenbarkeit der im Dünger (Organik) enthaltenen Nährstoffe, insbesondere bei Stickstoff (Stichworte: Homogenität je Einheit, Nährstoffeffizienz & genauere Applikation)
- Substitution von mineralischem Dünger durch den aufbereiteten organischen Dünger in den eigenen Ackerbaubetrieben
- Abgabe von überschüssigen Nährstoffen an externe Betriebe
- Bessere Ausnutzung von freiem thermischem Potenzial auf der Biogasanlage

##### Betrieb B:

- Verringerung der Ausbringungsmenge/Lagermenge
- Düngerproduktion/Konzentration
- Substratzusammensetzung verändern, mehr Wirtschaftsdünger einsetzen

##### Betrieb C:

- Verringerung der Gärrestmenge durch Wasserentzug
- Verringerung von Transportkosten
- Gleichzeitig Stickstoffe aus den Gärresten lösen und eine ASL Produktion erreichen

- Später: zusätzliche Installation einer Saline, um SSA in Granulatform zu produzieren. So soll nachweislich mineralischer Dünger hergestellt werden, der definitiv streu- und ggf. abgabefähig ist - mit immer gleichen Produktionswerten
- Landeinsparung durch weniger Stickstoff

#### Betrieb D:

Aktuell kann zur Verdünnung im Fermenter nur bedingt Rezirkulat eingesetzt werden, da die Ammoniumstickstoffwerte sonst zu hoch werden würden. Bei Flüssigkeitsmangel muss daher Wasser zugeführt werden. Dieses erhöht die Gärrestmengen und senkt die Transportwürdigkeit des Gärrestes. Wasser verdünnt nicht nur den Ammoniumstickstoff, sondern auch alle anderen Nährstoffe. Daher wird folgendes Ziel verfolgt:

- Abtrennung des Ammoniumstickstoffs um Wasser durch Rezirkulat ersetzen zu können. Dadurch erhöhten sich Nährstoffgehalte (außer Ammoniumstickstoff) und somit der Düngewert. Die entstandene Ammoniumsulfatlösung kann zielgerichtet eingesetzt werden.
- Deutliche Steigerung von HTK- und Gülleeinsatz. Dadurch Absenkung von NawaRo-Anbau und Förderung der energetischen Nutzung von ohnehin vorhandenen Wirtschaftsdüngern.
- Senkung der Substratkosten zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit

## *2. Weshalb haben Sie sich für dieses System entschieden?*

#### Betrieb A:

- System versprach die Nutzung von vorhandenen thermischen Überkapazitäten
- Bei Inbetriebnahme konnte/kann nur dieser Hersteller den nach dem Ammoniakstripping entstehenden Rest so weit filtrieren, dass dieser einleitfähig wurde/wird

#### Betrieb B:

- Effizientes Verfahren, einfache Technologie
- Als Gärrestaufbereitung bzw. um dem Rezirkulat den  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$  zu entziehen und somit den gesamt N im Fermenter zu reduzieren

#### Betrieb C:

Neben den zu Frage 1 aufgeführten Punkten waren folgende Aspekte entscheidend:

- Anlage verspricht wenig Arbeitsaufwand
- Wenig Gefahrenpotenzial
- scheint in sich sehr sauber zu arbeiten und bietet am Ende als einzige uns bekannte Anlage die Möglichkeit SSA als Granulat zu produzieren
- Wärmeeffizienzanlage
- Einsparung von Mais durch Einsatz zusätzlicher Rindergülle

#### Betrieb D:

*Hinweis:* Bei Betrieb D handelt es sich um einen landwirtschaftlichen Betrieb, der mit einer Vielzahl anderer landwirtschaftlicher Betriebe und weiterer Partner an einer Biogasanlage

beteiligt ist. Daher obliegen Entscheidungen nicht allein dem beteiligten Landwirt. Die Entscheidung zur Investition in eine entsprechende Aufbereitungsanlage war zu Projektbeginn noch nicht abschließend getroffen.

- Für das System haben wir uns noch nicht entschieden. Wenn die Praxis die Erwartungen der Theorie bestätigt, werden auch unsere Gremien von dem System zu überzeugen sein.

Letztlich hat sich dieser Projektpartner vorerst gegen die Anschaffung entschieden. Die ursprüngliche Intention war, den Ammoniumstickstoffgehalt im Fermenter zu reduzieren und so mehr HTK einsetzen zu können. *„Die Entscheidung gegen eine Anlage fiel letztlich zusammen mit [dem] Aufsichtsrat, da eine Investition in einen der ersten Prototypen als zu riskant angesehen wurde. [Bisher wurde] noch kein Ersatz angeschafft und [weiterhin besteht durchaus Interesse] an einer Reduktion des Ammoniumstickstoffs“* (Betrieb D).

### 3. Auf welche Weise soll die Anlage in den Betrieb integriert werden?

#### Betrieb A:

*Hinweis:* Dieser Betrieb hat seine Gärrestaufbereitungsanlage bereits 2017 in Betrieb genommen und war einer der Ideengeber für das Projekt. Daher sollte die Frage hier lauten: Auf welche Weise ist die Anlage in Ihren Betrieb integriert?

- Je nachdem wie der Versuch ausgeht, werden wir die Anlage danach vermutlich zur Regulierung des N-Wertes während der Fermentation im By-Pass-Prinzip einsetzen (aus Nachgärer vor Rezirkulation in Fermenter  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$ -rausnehmen). Dies wird von der zukünftigen Einsatzstoffmenge Geflügelmist abhängen

#### Betrieb B:

- Als Gärrestaufbereitung bzw. um dem Rezirkulat den  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$  zu entziehen und somit den gesamt N im Fermenter zu reduzieren

#### Betrieb C:

- Die Anlage soll eine Einheit in der Infrastruktur der BGA bilden, welche möglichst automatisiert mitläuft und auf der Grundlage von ungenutzten Stallungen errichtet werden

#### Betrieb D:

- Die genaue Integration muss noch geplant werden

### Projektaufgabenstellung

Für die Umsetzung des Projektes ENEGÜLL sollte auf den landwirtschaftlichen Betrieben mit eigener BGA bzw. Beteiligung an einer BGA eine bewährte Gärrestaufbereitungsanlage errichtet und modifiziert werden. Statt des nach dem Biogasprozess anfallenden Gärrestes sollten Gülle und Mist vor dem Vergärungsprozess aufbereitet werden. Um ein möglichst breites Spektrum abzubilden, wurden Betriebe gesucht, die sich hinsichtlich der Substratzusammensetzung und betrieblichen bzw. ackerbaulichen Zielsetzung unterscheiden. Betrieb A plante bspw. den vermehrten Einsatz von HTK in der BGA. HTK ist

zwar als Biogassubstrat hochwertig, jedoch sehr N-haltig. Daher war der Aspekt der  $\text{NH}_3/\text{NH}_4$ -Reduktion im HTK selbst äußerst interessant. Für Betrieb C ist die Aufbereitung von Gülle und Mist und die Gewinnung von Düngemitteln mit definierten Eigenschaften aufgrund der Lage in einem sog. Roten Gebiet besonders relevant. Die Planbarkeit der Düngung und der Nachweis der Einhaltung von Grenzwerten wurden hier als besonderer Vorteil gesehen. Die Tatsache, dass Betrieb C zudem Fremdgülle zukaft, deren Eigenschaften z.T. stark schwankend ist, erschwert die Düngeplanung zusätzlich. Ebenso führen die unterschiedlichen Gülleeigenschaften u.U. zu schwankenden Biogaserträgen. Betrieb B stand zu Projektbeginn vor der Überlegung, zusätzliche Lagerbehälter oder eine Aufbereitungsanlage zu errichten. Aufgrund der Vorteile, die eine Veredelung bietet, entschied sich Landwirt B für den Bau eines entsprechenden Systems. Hier sind nicht nur die zuvor genannten Punkte hinsichtlich Planbarkeit der Düngung und der Optimierung des Substrateinsatzes zu wesentlich. Auch die mit der Integration einer solchen Anlage verbundenen Einsparung von Lagerraum war ausschlaggebend. Zudem kann in allen Fällen die vorhandene überschüssige Wärme sinnvoll eingesetzt werden.

Alle Betriebe sahen den Vorteil der Düngemittelauskopplung aus Gülle und Mist im Gegensatz zu Gärrest darin, positiven Einfluss auf Substratzusammensetzung und Gaserzeugung ausüben zu können. Darüber hinaus wurde aufgrund der physikalischen und chemischen Unterschiede zwischen Gülle und Gärrest eine erheblich trennschärfere und umfassendere Auskoppelung des Nährstoffstroms bei der Gülleverarbeitung erwartet. Hierzu war für die Betriebe die Leistungsfähigkeit der Anlage hinsichtlich der Mengen und Qualität der gewonnenen Produkte relevant. Auf Basis der Gärrestveredelung konnten diesbezüglich Vergleichszahlen angegeben werden. Inwiefern sich diese bei der Gülleaufbereitung bestätigen lassen, war eine der Aufgabenstellungen im Projekt.

Insbesondere die Möglichkeit, vorhandene Ressourcen zu nutzen und keine zusätzlichen Biogasbehälter bauen zu müssen, war besonders attraktiv. So mussten keine landwirtschaftlichen Flächen „geopfert“ werden. Die Flexibilität der Anlage bezüglich ihrer Integration in den Betrieb und der Option, sogar zwischen Gülle- und Gärrestaufbereitung wechseln zu können, ist ein weiterer Pluspunkt gegenüber statischen Behältern, deren Nutzungsmöglichkeiten stark begrenzt sind. Die Vielseitigkeit der Anlage zeigte sich bereits zu Projektbeginn in den beabsichtigten Integrationen des Systems in die vorhandene Struktur. Alle drei teilnehmenden Betriebe hatten unterschiedliche Absichten und unterschiedliche Ansätze. Betrieb A plante die Vorschaltung der Aufbereitungsanlage, Betrieb B plante die Zuschaltung des Systems in den Prozess, um das Rezirkulat im Prozess effektiv zu nutzen und Betrieb C beabsichtigte die wohl aufwendigste Nutzung, indem die Anlage zwischen Gülle und Gärrest wechseln soll. Für das Projekt stand die Güllenutzung jedoch im Vordergrund, zumal die Verarbeitung von Gärrest ein bewährtes Verfahren ist. Für alle Betriebe war v.a. auch die Handhabbarkeit einer Aufbereitungsanlage entscheidend. Das

System soll neben den individuellen betrieblichen Bedürfnissen auch den arbeitswirtschaftlichen Aspekten gerecht werden. Hierfür ist ein technisch optimiertes und betriebswirtschaftlich umsetzbares Verfahren ausschlaggebend.

Im Gegensatz zu den anderen beiden Betrieben lag Betrieb C bei Einstieg in das Projekt noch keine Genehmigung für die Errichtung einer Aufbereitungsanlage vor. Daher war auch dieser Prozess ein Teil des Projektes, um die Grundlagen künftiger Genehmigungsprozesse zu schaffen und ein genehmigungsrechtlich einwandfreies Verfahren umsetzen zu können.

### **III. Ergebnisse der OG in Bezug auf**

#### **Zusammenarbeit**

Am Projekt ENEGÜLL waren folgende Projektpartner beteiligt:

- LandBeratung Mitte GmbH (Fachberatung für Biogas) als Leadpartner
- Christian-Albrechts-Universität (CAU) zu Kiel
- Universität Bayreuth (Lehrstuhl Bioprozesstechnik)
- Vier landwirtschaftliche Betriebe aus Schleswig-Holstein mit insgesamt drei angeschlossenen BGA

Die Zusammenarbeit der Projektpartner erfolgte zum einen koordiniert durch den Lead-Partner, z.B. in Form von Projekttreffen, zum anderen koordinierten sich die Projektpartner auch untereinander. So nahmen bspw. die Universitäten direkten Kontakt zu den Landwirten auf, wenn etwa Unterlagen benötigt wurden oder Versuchsreihen durchgeführt werden sollten.

Je Quartal wurde ein Projekttreffen durchgeführt, das von der LandBeratung terminiert und koordiniert wurde. Hierzu wurden die Projektpartner in das Gebäude der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein eingeladen (Sitz der LandBeratung). Die Corona-Pandemie erforderte es, die Projekttreffen z.T. digital bzw. hybrid abzuhalten. Hierzu wurde Zoom verwendet. Einzig Frau Dr. Freitag von der Uni Bayreuth nahm regelmäßig in Präsenz an den Projekttreffen teil. Grund hierfür war, dass Frau Dr. Freitag im Zuge der Treffen die von den Landwirten genommen Behälterproben abholte und zur Uni Bayreuth brachte. Kostenvergleiche zeigten, dass dies den günstigsten und sichersten Transport darstellte. Die Proben wurden im Vorwege des Treffens vom Lead-Partner auf den Betrieben abgeholt und zentral in Rendsburg verwahrt.

Die Landwirte telefonierten miteinander bzw. besichtigten die Anlagen der anderen Projektpartner und tauschten sich untereinander aus. Auch der Anlagenhersteller wurde kontaktiert und in die Projektabläufe einbezogen. Ein Vertreter des Herstellers Terrawater nahm an den Projekttreffen teil und schätzte den Erfahrungsaustausch sehr. Insbesondere die Anregungen und Erkenntnisse der Landwirte stellten einen großen Mehrwert dar und wurden technisch umgesetzt.

Für die Dateiablage wurde eine Dropbox genutzt, um allen Mitgliedern der OG den Zugriff auf die Dateien zu ermöglichen. Die Dropbox ermöglichte es zudem, größere Dateien zur

Verfügung zu stellen und den teils mühseligen E-Mailversand zu ersparen. Die Kommunikation innerhalb der OG erfolgte telefonisch, per Mail oder im Rahmen persönlicher Treffen.

### Mehrwert einer OG

Die regelmäßigen Projekttreffen, an denen i.d.R. alle aktiven OG-Mitglieder teilnahmen, dienten v.a. dem Erfahrungsaustausch und der Kommunikation der Ergebnisse, die im Rahmen der Arbeiten und Versuche gewonnen wurden. Zudem konnten Probleme, die auf den Betrieben festgestellt wurden, erörtert und Lösungen gesucht werden. Hier profitierten die Landwirte zum einen von den wissenschaftlichen Ansichten und Erfahrungen, zum anderen von den Erkenntnissen der anderen Landwirte und der Fachberatung. Theorie und Praxis konnten so Hand in Hand zusammenarbeiten und ineinandergreifen und Schwierigkeiten aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet werden. Insbesondere Maßnahmen, die auf den Betrieben zu Erfolgen führten, konnten so ausgetauscht und ggf. auf anderen Betrieben umgesetzt werden. So standen bspw. alle Betriebe vor technischen Herausforderungen, die im Rahmen der Projekttreffen erörtert und Lösungsansätze aufgezeigt wurden. Die wissenschaftliche Sicht war für die Landwirte bisher eher theoretischer Natur und Berührungspunkte waren nicht vorhanden. Durch das Projekt und den Austausch von Wissenschaft und Praxis konnten für beide Seiten neue Sichtweisen eröffnet werden. Die an der Uni Bayreuth durchgeführten Laborversuche ermöglichten eine gezielte Beratung im Hinblick auf Substratanpassungen und möglichen Auswirkungen auf die Biologie der BGA. Für die Landwirte konnten so negative Konsequenzen weitgehend vermieden werden.

Die Uni Bayreuth begleitete die BGA während der gesamten Projektlaufzeit und untersuchte die aus den Behältern der BGA entnommenen Proben im Labor. Bei jedem Projekttreffen wurden die Ergebnisse dargestellt und die Landwirte über das Vorgehen in ihren BGA informiert. Hier zeichneten sich deutliche Unterschiede in der Mikrobiologie ab, die entsprechend unterschiedliche Vorgehensweisen bei Änderungen an der BGA bedurften. Die Landwirte profitierten von den engmaschigen und langfristigen Untersuchungen und den Ergebnissen. Interessant waren hier sowohl jahreszeitliche Veränderungen als auch Veränderungen des Inputs und deren Auswirkungen auf die Biologie. Neben den jahreszeitlichen Veränderungen konnten dank der kontinuierlichen und mehrjährigen Untersuchungen auch Vergleiche zwischen den Jahren zu gleichen Zeitpunkten gezogen werden. Hier konnten v.a. Unterschiede zwischen den verschiedenen Ernten und Substratmischungen beobachtet werden. So konnte bspw. festgestellt werden, dass es bei vermehrtem Rübeneinsatz zu Schaumbildung in der Anlage kam, allen voran auf Betrieb B.

Beide beteiligten Universitäten betonen, dass ihre Anregungen bzw. Empfehlungen bestmöglich umgesetzt wurden, sowohl von den Landwirten als auch von technischer Seite durch den Hersteller.

### Weitere Zusammenarbeit von Mitgliedern der OG nach Projektabschluss?

Sowohl die CAU als auch der Hersteller haben Interesse, auch nach Projektende noch Messreihen durchzuführen und Messergebnisse zu kommunizieren. Die beteiligten Landwirte werden in Kontakt bleiben und sich bzgl. ihrer Erfahrungen austauschen.

## IV. Ergebnisse des Innovationsprojektes

### Zielerreichung

Im Projekt war vorgesehen, eine bewährte Gärrestaufbereitungsanlage umzunutzen und statt des Gärrestes nach bereits die Rohstoffe Gülle und Mist vor dem Biogasprozess zu veredeln. Wie sich im Projektverlauf zeigte, ist eine solche Umnutzung mit einem hohen technischen und zeitlichen Aufwand verbunden. Nicht nur technische Aspekte führten zu Verzögerungen der geplanten Nutzung, auch Wettereinflüsse, Probleme in der Substratbeschaffung oder langwierige genehmigungsrechtliche Verfahren hatten Einfluss auf die Umsetzung des Projektbetriebes.

Die genannten Umstände führten dazu, dass die Versuchsanlagen erst spät den geplanten Güllebetrieb umsetzen konnten. Immer wieder wurden Gülle-Versuche durchgeführt, die neue Herausforderungen aufzeigten, die v.a. technisch gelöst bzw. umgesetzt werden mussten. Ein kontinuierlicher Gülle-Betrieb konnte nicht zufriedenstellend umgesetzt werden. Die durchgeführten Versuchsreihen auf Betrieb B lieferten Ergebnisse, die nicht realistisch schienen. Daher wurden mehrtägige Versuchsreihen angestrebt, die aufgrund wiederholter Störungen in der Anlage nicht durchgeführt werden konnten.

Zu Projektende sind sich jedoch alle Beteiligten einig, dass die Idee und deren Umsetzung zukunftsfähig ist.

Im Projektantrag für ENEGÜLL wurde eine Vielzahl an Zielen formuliert. Auszugsweise sind an dieser Stelle die Ziele aufgeführt, die umgesetzt werden konnten.

1. Erzeugung handelsfähiger Düngemittel aus Gülle und Mist: Ammoniumsulfat (Basis ist der flüchtige Stickstoff) und Dickschlamm (extrem phosphathaltiges Konzentrat) oder wahlweise eine Mischung aus Beidem.  
→ *Technische Störungen führten immer wieder zum Ausfall des Systems. Ein kontinuierlicher Gülle-Betrieb war nicht möglich. Daher konnten keine Produkte explizit aus Gülle und Mist gewonnen werden. Es erfolgte eine Vermischung der Rohstoffe mit Gärrest. Hieraus konnten erfolgreich ASL und SSA gewonnen werden.*
2. Ersatz des Mineraldünger-Zukaufs durch landwirtschaftlich erzeugte Düngemittel.  
→ *Dieses Ziel konnte erfolgreich umgesetzt werden. Auf Betrieb B konnten mit Gärrest ca. 350 l ASL/Tag produziert werden. Die Menge aus Gülle und Mist ist zu ermitteln, sobald*

- ein dauerhafter und störungsfreier Betrieb möglich ist. Die erwartete Menge liegt jedoch über der Menge, die aus Gärrest gewonnen wird.*
- *Auf Betrieb C wird tgl. 1m<sup>3</sup> (1.000 l) ASL produziert. Hier wird bereits ein Güllebetrieb umgesetzt*
3. Verringerung des Transportaufwands durch Wasserentzug und Nutzung lokal anfallender Wirtschaftsdünger.
- *Dieses Ziel konnte erfolgreich umgesetzt werden. Auf Betrieb C werden tgl. 8-12 m<sup>3</sup>, das entspricht 3.000-4.500 m<sup>3</sup>/a, Wasser verdampft. Dieses muss wiederum nicht mehr „unnötig“ zu den landwirtschaftlichen Flächen gefahren und dort ausgebracht werden. Bei einem Güllewagen mit einem Fassungsvermögen von 20 m<sup>3</sup> wären das jährlich 150 Güllewagen Wasser, die nicht transportiert werden müssen.*
- *Der Anlagenhersteller gibt einen Wert von ca. 6 m<sup>3</sup> verdunstetem Wasser pro Tag an. Somit ist, sofern der Wert von ca. 10 m<sup>3</sup>/Tag dauerhaft erreicht wird, die Anlage mit Gülle effizienter hinsichtlich der Wasserverdunstung. Dies würde eine noch deutlichere Entlastung der Betriebe bedeuten als angenommen.*
4. Vorliegen eines technisch optimierten, betriebswirtschaftlich umsetzbaren und genehmigungsrechtlich einwandfreien Verfahrens zur Gülleaufbereitung
- *Dieser Aspekt konnte dank intensivem Einsatz aller Beteiligten und eines kontinuierlichen Optimierungsprozesses auf den Betrieben und an den Aufbereitungssystemen umgesetzt werden*
- *Genehmigungsrechtlich hat v.a. der Anlagenhersteller Erfahrungen sammeln können und kann künftige Kunden noch besser unterstützen als zuvor. Aufgrund der innovativen Nutzung und fehlender Erfahrungen bzw. Referenzen war es schwierig, die für Betrieb C verantwortliche Genehmigungsbehörde von den Vorteilen der Aufbereitungsanlage zu überzeugen. Die gewonnenen Erkenntnisse können in Zukunft als Zusatzinformation an Beratungsunternehmen und Behörden ausgehändigt und der Nutzen eines solchen Systems aufgezeigt werden.*
5. Belastbare Ergebnisse bezüglich der potenziellen Leistungsfähigkeit der Produkte zur bedarfsgerechten und nährstoffangepassten Pflanzenernährung sowie zur Energieerzeugung.
- *Im Rahmen der OG-Treffen wurde der Wunsch nach Düngeversuchen geäußert. Entsprechende Kontakte zur Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein wurden hergestellt. Bedauerlicherweise konnten während der Projektlaufzeit keine offiziellen Düngeversuche umgesetzt werden. Belastbare Ergebnisse liegen somit nicht vor.*
- *Betrieb B brachte betrieblich erzeugte ASL versuchsweise auf Grünland aus und war begeistert von den Ergebnissen. Der Landwirt konnte einen besseren Aufwuchs feststellen. Eine mengenmäßige Erfassung der tatsächlichen Erntemengen bzw. Vergleichsmengen liegen nicht vor.*

Die Uni Bayreuth hatte zur Zielsetzung im Projekt die Untersuchung der Auswirkung von erhöhten Ammoniakkonzentrationen auf die Gärbiologie in landwirtschaftlichen

Biogasanlagen. Von besonderem Interesse war aus Sicht des Lehrstuhles die Möglichkeit an realen technischen Anlagen arbeiten zu können und die Laborergebnisse zu validieren. Diese Ziele konnten vollumfänglich erreicht werden.

### Abweichungen zwischen Projektplan und Ergebnissen

Für das Projekt ENEGÜLL wurde ein indikativer Zeitplan erstellt, der wie in Tabelle 3 dargestellt ist. Dieser konnte aus verschiedenen Gründen nicht immer eingehalten werden.

Tabelle 3: Indikativer Zeitplan ENEGÜLL

Position	2018		2019				2020				2021	
	3. Q.	4. Q.	1. Q.	2. Q.	3. Q.	4. Q.	1. Q.	2. Q.	3. Q.	4. Q.	1. Q.	2. Q.
Aufbau und Test - Verfahrenstechnik	x	x	x									
Aufbau und Test - Messtechnik		x	x	x								
Erfassung In- und Outputs	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Inhaltsstoffe und Datenanalyse				x	x	x	x	x	x	x		
Nutzung und Bewertung von ASL, Dickschlamm				x	x	x	x	x	x	x	x	x
Charakterisierung der Biogasanlagen	x	x	x	x								
Charakterisierung der Idw. Betriebe	x	x										
Gärversuche zur Bewertung der Substrate				x	x	x	x	x	x	x		
Bewertung Verfahren und Ökonomie					x	x	x	x	x	x	x	x
Öffentlichkeitsarbeit und Vortragsveranstaltungen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Projekttreffen	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Auswertung / Berichte		x			x				x		x	

Im 3. Quartal 2018 konnten die geplanten Ziele umgesetzt werden. Doch bereits im 4. Quartal 2018 kam es zu ersten Verzögerungen hinsichtlich des Aufbaus der Verfahrens- und Messtechnik. Grund hierfür waren technische Probleme mit dem Separator auf den

Betrieben A und B. Zudem wirkten sich ungünstige Witterungsverhältnisse auf den Bau der Anlage B aus und führten zu Verzug. Die Probleme mit dem Separator zogen sich bis 2019. Trotz wiederholter Versuche mit Gülle und Mist gab es immer wieder technische Probleme, so dass ein reibungsloser Betrieb mit diesen Rohstoffen nicht gewährleistet werden konnte. Nach einer Vielzahl von Testläufen konnten die Probleme bei der Fest-Flüssig-Trennung auf die heterogenen Substrateigenschaften zurückgeführt werden. Hierdurch war eine erste technische Anpassung des Systems in Form eines Schneidesiebs erforderlich. Betrieb D entschied sich zu Beginn von 2019 dazu, vorerst keine Aufbereitungsanlage zu installieren. Stattdessen wurde Betrieb C zum 01.03.2019 Teil des Projektes. Die dort vorgesehene Aufbereitungsanlage befand sich zu dem Zeitpunkt in Planung.

Ein weiterer Faktor, der sowohl 2018 als auch 2019 die geplante Nutzung des Systems einschränkte, war die mangelnde Verfügbarkeit des vorgesehenen HTKs. Dieser war kaum und nur zu wirtschaftlich unattraktiven und hohen Kosten erhältlich. Daher sahen Betrieb A und B vom Einsatz dieses Substrates ab.

Die auf Betrieb A bereits zu Projektbeginn vorhandene Veredelungsanlage stand ab Mitte 2020 für eine aufwendige Generalüberholung zunächst vorläufig nicht mehr für das Projekt zur Verfügung. Die z.T. überholte Technik sollte angepasst werden. Dies konnte allerdings nicht vor Ort geschehen, sondern musste am Standort des Herstellers erfolgen. Letztlich wurde die Anlage bis zum Ende des Projektes aus betrieblichen Gründen nicht wieder in Betrieb genommen und schied daher vollständig aus. Die Betriebe B und C mussten sich derweil mit genehmigungsrechtlichen Hindernissen auseinandersetzen. Während Betrieb B trotz fehlender Genehmigung als Pilotanlage das System betreiben durfte, war es Betrieb C bis zur Genehmigungserteilung – Mitte 2020 - streng untersagt.

Die Umstellung des Systems auf Gülle und Mist führte trotz nachgerüstetem Schneidesieb auf Betrieb B weiterhin zu Problemen bei der Aufbereitung. Die in der Gülle enthaltenen Grob- und Schwebstoffe setzten sich immer wieder in den Rohrleitungen ab und verstopften diese. Hierdurch waren wiederholt aufwendige und zeitintensive Reinigungsarbeiten der gesamten Anlage erforderlich. Dies machte eine Anpassung der Rohrleitungen sowie des Steuerungssystems notwendig. Folge war zum einen eine Unterbrechung im Betrieb, zum anderen ein Verzug bzgl. der geplanten Leistungstests, die seitens der CAU durchgeführt werden sollten.

Neben der Anpassung der Steuerung, der Verrohrung und des Einbaus eines Scheidesiebs stellte sich 2020 heraus, dass zusätzlich eine Gegendruckklappe am Separator montiert werden musste. Die unterschiedliche Dicke der eingesetzten Güllen machte den Einbau einer solchen erforderlich.

Die vorgesehene Nutzung und Bewertung der Produkte ASL und Dickschlamm konnte bis zum Ende des Projektes nicht umgesetzt werden. Die immer wieder auftretenden Störungen verhinderten die Gewinnung ausreichender Mengen dieser Erzeugnisse aus Gülle und Mist.

Die Nutzung von ASL und Dickschlamm rein aus Gärrest bzw. aus Gärrest und Gülle und Mist wäre für das Projekt nicht zielführend gewesen. Daher musste auf diesen Teil verzichtet werden. Eine Bewertung der Verfahren sowie der Ökonomie konnten ebenfalls kaum bzw. nicht erfolgen.

### Projektverlauf

Das Projekt ENEGÜLL startete am 01.07.2018. Zu diesem Zeitpunkt war auf Betrieb A im Kreis Rendsburg-Eckernförde bereits eine Gärrestveredelungsanlage installiert, die kontinuierlich und zuverlässig funktionierte. Diese sollte für das Projekt umgerüstet und auf Gülle umgestellt werden. Landwirt A war einer der Ideengeber für das Projekt. Die positiven Erfahrungen, die er mit seiner Aufbereitungsanlage bereits gesammelt hatte und der erfolgreiche Betrieb motivierten ihn, neue Lösungsansätze zu suchen und das System noch optimaler zu nutzen. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass allen voran die Dünge-VO strenger und Auflagen schärfer wurden. Daher überlegte er, wie die bewährte Anlage noch effizienter genutzt werden könnte. So entstand die Idee, statt des Gärrestes bereits die Rohstoffe Gülle und Mist aufzubereiten. Sollte dies funktionieren, könnten bereits vor dem Prozess wertvolle Nährstoffe, allen voran flüchtiger Stickstoff, entzogen werden, die für die Düngung interessant, für den Biogasprozess jedoch irrelevant, teils sogar hemmend sind. Ein weiterer positiver Effekt könnte die Erhöhung der Gülle- und Mistmengen sein, deren Einsatz durch den hohen Stickstoffanteil limitiert ist. Optimalerweise könnte auf diese Weise Mais durch Gülle und Mist ersetzt werden. Der landwirtschaftliche Betrieb würde somit deutlich entlastet und Gülle und Mist ideal verwertet werden. So entstand die Vision, Güllen jeder Art so aufzubereiten, dass aus ihnen Dünger gewonnen wird und Mais in BGA ersetzt werden kann. Zu diesem Zweck sollten die Gärrestaufbereitungen umgenutzt werden. Diese bestehen im Wesentlichen aus einer Fest-Flüssig-Trennung (Separator) und einer Verdunstungseinheit, die Wasser und flüchtigen Stickstoff entzieht.

Die Anlage auf betrieb A ist seit 2017 in Betrieb, stand dem Projekt also theoretisch von Beginn an zur Verfügung. Allerdings bedurfte es noch einiger Anpassungen, um das System für den Gülle-Betrieb nutzbar zu machen. Die Anlage war zuvor dem Biogasprozess nachgeschaltet und sollte nun für das Projekt vorgeschaltet werden. Daher musste die Verrohrung angepasst werden.

Zu Projektbeginn besuchten Mitarbeiter der LandBeratung und der Universität Bayreuth alle beteiligten Anlagen. Dort wurden Proben aus den Biogasbehältern entnommen, die Betreiber in die Probenahme eingewiesen und die Proben eingefroren, um diese in das Labor nach Bayreuth zu verbringen. Während der gesamten Projektlaufzeit entnahmen die Landwirte im 14-tägigen Rhythmus Proben aus ihren Fermentern und Nachgärern. Diese Proben mussten auf den Betrieben tiefgefroren und gelagert werden. Zu diesem Zweck stellte der Anlagenhersteller jeder Anlage einen Gefrierschrank zur Verfügung. Bei diesem war wichtig, dass eine Temperatur von -18 °C gewährleistet wurde. Zunächst blieb ungeklärt,

wie die Proben zur Untersuchung ins Labor nach Bayreuth verbracht werden sollten. Nach Vergleichen möglicher Transportmöglichkeiten, stellte sich heraus, dass der sicherste und günstigste Weg der direkte Transport war. Dieser wurde von einem/r Mitarbeiter/in der Uni Bayreuth durchgeführt. Hierzu boten sich die Projekttreffen an, die quartalsmäßig stattfanden. Zu diesen Treffen brachten die Landwirte ihre Proben mit. Nachdem persönliche Treffen aufgrund von Corona nicht bzw. sehr eingeschränkt möglich waren, sammelte eine Mitarbeiterin der LandBeratung die Proben vor den Treffen auf den Betrieben ein und verwahrte diese. Zunächst Herr Dr. Hilbrig, später Frau Dr. Freitag nahmen die Proben dann persönlich entgegen und transportierten diese auf Trockeneis nach Bayreuth.

Die Landwirte erhielten Betriebserfassungsbögen, auf denen die Betriebsdaten sowie der geplante Einsatz der Anlagen auf den Betrieben beschrieben wurden (Kapitel II). Die Inputs der BGA werden grds. in sog. Betriebstagebüchern erfasst. Diese wurden der Universität Bayreuth seitens der Betriebe zur Verfügung gestellt. Diesen Tagebüchern konnten Änderungen des Inputs entnommen und mit Ergebnissen der Laborversuche und Untersuchungen der Proben ins Verhältnis gesetzt werden.

Sowohl Betrieb A als auch Betrieb B beabsichtigten den Einsatz von HTK in ihren BGA. Dieser war jedoch Ende 2018/Anfang 2019 nicht bzw. zu unwirtschaftlichen Preisen (26-28 €/t) verfügbar. Grund hierfür war die Dürre 2018, die allgemein zu Substratknappheit führte. Wirtschaftlich vertretbar wäre ein Preis von max. 20 €/t. Beide Betriebe suchten nach Alternativen bzw. überlegten zunächst mit betriebseigenen Mitteln zu arbeiten und im ersten Schritt den Gülleanteil ohne Zugabe von HTK zu erhöhen. Betrieb B hatte zu diesem Zeitpunkt bereits Anfragen von Nachbarbetrieben, die kooperationswillig waren und gern Gülle liefern wollten.

Die Inbetriebnahme der Aufbereitungsanlage auf Betrieb B im Kreis Schleswig-Flensburg war für Ende 2018 geplant. Allerdings verzögerte sich der Aufbau zunächst. Hierzu führten verschiedene Gründe:

- Die auf Betrieb A bereits gewonnenen technischen Erkenntnisse sollten direkt auf Betrieb B umgesetzt werden
- Witterungsbedingt kam es zu Verzögerungen, da es zu kalt war, um bestimmte Anlagenteile zu installieren
- Die Genehmigung für den Einsatz der zukünftigen geplanten Inputstoffe stand noch aus.

Letztlich erfolgte die endgültige Inbetriebnahme der Anlage B am 22.02.2019 und stand dem Projekt zur Verfügung.

Ende 2018 besuchten Mitarbeiter der CAU die Betriebe A und B und tauschten sich mit den Landwirten und dem Anlagenhersteller über die vorhandene Messtechnik aus. Zudem wurde

erörtert, welche Messungen im Rahmen des Projektes interessant und aussagekräftig wären und inwiefern entsprechende Messtechnik verbaut werden kann. Der Anlagenhersteller erklärte sich bereit, die erforderliche Messtechnik bereitzustellen und zu installieren. Die Uni Bayreuth konnte zu diesem Zeitpunkt bereits erste Untersuchungsergebnisse vorweisen. Alle drei Betriebe weisen sehr unterschiedliche Populationen in ihren Biogasbehältern auf. Auf Basis dieser ersten Untersuchungen konnten bereits erste Annahmen der Reaktionen der Mikroorganismen auf eine veränderte Substratzufuhr abgeleitet werden. Betrieb B bspw. wies eine überdurchschnittliche Anzahl acetoclastischer Archaeen im Nachgärer auf und könnte sehr sensibel auf höhere N-Gehalte reagieren.

Im Frühjahr 2019 konnten die ersten Gülle-Versuche auf den Betrieben A und B durchgeführt werden. Auf Betrieb A wird Schweinegülle eingesetzt. Normalerweise wird diese direkt vom angrenzenden Schweinestall in den Fermenter gepumpt. Für den Versuch wurden drei verschiedene Substratmischungen eingesetzt sowie erforderliche Mengen HTK und Rindergülle zugekauft. Folgende Mischungen kamen zum Einsatz:

- 1. Versuch: Schweinegülle + 10 % HTK
- 2. Versuch: Schweinegülle, 10 % HTK + separierte Rindergülle
- 3. Versuch: Rindergülle + HTK

Für den Versuch wurden die Güllen in einem Anmischcontainer mit Mist vermischt und mittels Güllerührer vermischt. Allerdings scheiterten diese Versuche. Der Separator war nicht in der Lage, das jeweilige Gülle-Mist-Gemisch in eine feste und eine flüssige Phase zu trennen. Die Propfenbildung blieb aus, die Gemische liefen ungehindert aus der Pressschnecke. Nach mehreren gescheiterten Versuchen und diversen möglichen technischen Anpassungen wurde der Versuch nach acht Stunden abgebrochen. Die Bildung eines manuellen Pfropfens brachte nur vorübergehend Erfolg. Bereits nach kurzer Zeit löste sich dieser. Herr Mächtig von der CAU, Landwirt, Betriebsleiter und Anlagenhersteller konnten sich zunächst nicht erklären, weshalb die Fest-Flüssig-Trennung (F-F-T) solche Probleme mit den Güllen hatte. Die Vermutung war, dass die Güllen zu flüssig wären. Erneute Versuche mit Rindergülle wies Landwirt A ab. Zum einen hätte die Rindergülle kostenintensiv über eine längere Strecke transportiert werden müssen, zum anderen war Rindergülle in der Genehmigung nicht vorgesehen und somit ein Einsatz in größerem Umfang nicht gestattet. Zudem wollte Landwirt A aus tierseuchenrechtlichen Gründen keine fremde Gülle auf seinem Betrieb lagern und verarbeiten.

Nachdem auf Betrieb B die ersten Versuche durchgeführt wurden, folgte die erste Erkenntnis, dass nicht die Gülle zu den Problemen der F-F-T geführt hatte. Auch auf Anlage B kam es zu keiner Propfenbildung bzw. brach der Presskuchen immer wieder durch und die Gülle lief auch hier ungehindert aus dem Separator. Hinzu kamen immer wieder Verstopfungen der Rohrleitungen. Betrieb B setzte im Gegensatz zu Betrieb A Rindergülle ein. Diese ist nicht nur sehr heterogen, sondern auch faserreich, z.B. durch Strohanteile. Zudem kam es in der Anlage aufgrund der dort eingesetzten Zuckerrüben wiederholt zu

Schaumbildung in der Anlage. Diese zog zu einem Störungen und zu aufwendigen Reinigungsarbeiten nach sich. Die Uni Bayreuth zeigte auf, dass ein möglicher (weiterer) Faktor für die Schaumbildung eine erhöhte Ammoniakkonzentration sein könnte.

Um das Problem der fehlenden Pfropfenbildung bei Einsatz von Gülle zu beheben, war der Einbau einer Gegendruckklappe erforderlich. Diese wurde vor die Pressschnecke gesetzt und verhindert somit, dass die Gülle aus dem Separator laufen kann. So kann es zu einer Pfropfenbildung kommen. Betrieb B entschied sich für den Einbau einer halbautomatischen Gegendruckklappe. Bei dieser muss bei Bedarf bzw. Änderung des Substrates der Gegendruck manuell angepasst werden.

Zum 01.03.2019 schloss sich Betrieb C dem Projekt an. Der hiesige Landwirt plante neben der Installation der F-F-T und der Verdampfungseinheit zusätzlich die Errichtung einer Saline. Diese sollte die flüssige ASL zu kristallinem SSA weiterverarbeiten. Eine solche Konstellation ist bisher in Deutschland einzigartig. Das Konzept der Saline sah Landwirt C bereits in List auf Sylt. Dort wird mit Hilfe einer Saline Meersalz direkt vor Ort aus Meerwasser gewonnen. Landwirt C entwickelte daraus die Idee, SSA aus ASL zu gewinnen, um sein betriebseigenes Düngerportfolio auszuweiten und seine Düngung noch flexibler gestalten zu können.

Parallel zu den anlaufenden Gülleversuchen kam die Überlegung, die gewonnenen betriebseigenen Dünger in Form von Düngeversuchen zu erproben. Hierzu nahm der Lead-Partner Kontakt zur Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein (LWK SH) auf, um sich über die Möglichkeiten geeigneter Versuche auszutauschen. Trotz mehrfacher Kontaktaufnahme zu dem Verantwortlichen der LWK SH und der Lieferung von ASL kam es bis zum Projektende nicht zu den angedachten Düngeversuchen. Allerdings waren diese nicht als Teil des Projektes vorgesehen und wären dementsprechend ein netter by-catch gewesen.

Die Uni Bayreuth war bereits im Mai 2019 angetan von den bis dato vorliegenden Proben und Ergebnissen. Ein solch langfristige und kontinuierliche Beprobung von BGA hatte es bisher noch nicht gegeben. Somit lag bereits gut ein Jahr nach Projektbeginn eine einzigartige Datengrundlage vor.

Für 2020 war für die Anlage A eine Revision des Systems geplant. Das dort installierte System war ein Prototyp des Anlagenherstellers und bedurfte etwaiger technischer Anpassungen, um dem aktuellen Stand der Technik gerecht werden zu können. Hierzu war eine Generalüberholung erforderlich, die jedoch nicht auf dem Betrieb selbst stattfinden konnte bzw. nicht vollumfänglich. Daher bedurfte es eines Abbaus der Anlage und der Verbringung zur Werkstätte des Herstellers in Kiel. Allerdings kam es zu Verzögerungen, die auf dem Auf-

und Umbau der Anlagen B und C begründet waren. Landwirt C profitierte beim Bau seiner Anlage bereits von den Erkenntnissen der anderen beiden Betriebe, sodass dort die Erkenntnisse in Form technischen Anpassungen direkt umgesetzt wurden. Im Gegensatz zu Betrieb B installierte Betrieb C eine vollautomatische Gegendruckklappe. Betrieb C hatte bereits bei der Planung der Anlage den Anspruch höchster Flexibilität, d.h. die Anlage sollte auf drei verschiedene Arten betrieben werden können:

- Reiner Güllebetrieb
- Reiner Gärrestbetrieb
- Gülle-Gärrest-Mischbetrieb

Im Hinblick auf die geplante Fahrweise und die Notwendigkeit der steten manuellen Anpassung einer halbautomatischen Gegendruckklappe, wurde von vornherein auf eine zuverlässige technische Lösung gesetzt, die vollautomatisch funktioniert. Die Inbetriebnahme der Anlage C war für November 2019 vorgesehen. Allerdings standen dem genehmigungsrechtliche Hindernisse entgegen.

Anlage A befindet sich im Kreis Rendsburg-Eckernförde und hatte genehmigungsrechtlich keinerlei Probleme hinsichtlich des Baus der Aufbereitungsanlage. Hier bestand allerdings Klärungsbedarf mit dem Amtsveterinär bzgl. des Inputstoffes HTK. Nach Erfüllung der geforderten Auflagen (u.a. eine überdachte Lagerfläche), widersprach nichts dem Betrieb der Anlage. Die beiden Betriebe B und C befinden sich im Kreis Schleswig-Flensburg, unterstehen somit einem anderen Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) als Betrieb A. Es zeigte sich, dass die verschiedenen Kreise den Bau der Aufbereitungsanlage unterschiedlich bewerteten. Hinzu kam die unterschiedliche Betrachtungsweise verschiedener Sachbearbeiter innerhalb des LLURs. Betrieb B erhielt zunächst eine vorläufige Genehmigung und konnte als „Pilotanlage“ den Betrieb aufnehmen. Der zuständige Sachbearbeiter des Betriebes C hingegen war äußerst kritisch und verweigerte zunächst die Genehmigung. Es bedurfte einer Vielzahl klärender Gespräche bis die Genehmigung letztendlich erteilt wurde. Dieser lange Genehmigungsprozess führte zu einem Verzug der Inbetriebnahme um fast ein Jahr, sodass die Betriebsbereitschaft der Anlage erst Ende Juli 2020 hergestellt werden konnte.

Herr Mächtig von der CAU stellte im November 2019 seine ersten Ergebnisse und Erkenntnisse vor. Hierbei wurde deutlich, dass die auf den Betrieben vorhandene Messtechnik nicht ausreichend war, um die erforderlichen Daten zu gewinnen. In Absprache mit dem Hersteller wurde die entsprechende Technik auf Betrieb B installiert. Für alle drei Betriebe wurden seitens der CAU Fließschemata erstellt (Anhang I-III) sowie die jeweiligen Schwierigkeiten und notwendigen Maßnahmen aufgezeigt.

Auf Betrieb B zeigten erste Gülleversuche, dass die Gülle sehr dünn und heterogen ist. Dies ist zum einen auf die unterschiedlichen Altersklassen der betriebseigenen Tiere und zum anderen auf bspw. anfallendes Waschwasser zurückzuführen. Um die Gülle einzudicken,

wurde diese mit Gärrest versetzt. Allerdings wurde die Gülle dann zu dick. Es galt also die optimale Konsistenz der Gülle mittels Mischversuchen zu ermitteln. Aus der dünnflüssigen Gülle einerseits und der verdickten Gülle andererseits resultierten Probleme bei der Verarbeitung. Wie bereits bei den Gülleversuchen auf Betrieb A mangelte es bei dem ausschließlichen Einsatz von Gülle an der erforderlichen Propfenbildung in der F-F-T. Die Heterogenität der Gülle bzw. des Gülle-Gärrest-Gemisches führte wiederholt zu Verstopfungen im System. Diese Verstopfungen hatte zur Folge, dass das Rohrsystem sowie die Aufbereitungsanlage zeitintensiv gereinigt und z.T. auseinandgebaut werden mussten. Daraus ergab sich für die OG die Frage nach einer Definition für die optimale Gülle-Viskosität. Diese zu finden ist jedoch schwierig, da es viele Einflussfaktoren gibt, die berücksichtigt werden müssen:

- Trockensubstanz (TS)-Gehalt
- Qualität
- Fütterung der Tiere
- Faserstruktur
- Abscheidegrad
- Pressdruck
- Altersstruktur der Tiere

All diese Aspekte erfordern eine möglichst flexible, dennoch praktisch gut handhabbare Technik. Um im ersten Schritt eine höhere Homogenität des Substrates zu erreichen, wurde der Einbau eines Schneidesiebes, der sog. MEYLO-Cut 3.000 E, erforderlich. Dieser sollte die groben Faserbestandteile zerkleinern und weiteren Verstopfungen vorbeugen. Damit dieses Problem auf Betrieb C gar nicht erst auftritt, wurde dort ebenfalls ein MEYLO-Cut installiert. Auf Betrieb B wurde zudem festgestellt, dass die empfohlene Temperatur von 81 °C nicht erreicht werden konnte. Dies machte den Austausch der Heizkreispumpe erforderlich sowie eine wärmeseitige Anpassung der Anlage.

Die Uni Bayreuth untersuchte nicht nur die entnommenen Behälterproben, sondern legte auch Gärversuche im Labor an. Die ersten Ergebnisse präsentierte Frau Dr. Freitag im Februar 2020. Im Rahmen dieser Versuche wurde auch der Einfluss der Stickstoffhemmung im Modell analysiert und der OG dargelegt. Die Modellanlagen wurden somit gezielt unter Stress gesetzt, um die Reaktionen der BGA abzuschätzen. Hierbei wurde die Ammonium-Zugabe bis auf 10 g/l erhöht. Es zeigte sich, dass die Laboranlage diversen Schwankungen unterlag und z.T. 10 Tage benötigte, um sich anzupassen und bevor wieder Biogas messbar war. Mit Hilfe der Laborversuche wurde ermittelt, über welchen Zeitraum die Umstellung der BGA erfolgen muss, um einen stabilen Biogasprozess zu gewährleisten. Die BGA benötigen Wochen bis Monate, um sich anzupassen und einen Totalausfall zu vermeiden. Die Einstellung auf ein höheres N-Niveau ist zwar grds. möglich, hat jedoch zur Folge, dass dieses dauerhaft gehalten werden muss. Auf Basis der Modellversuche konnten

Empfehlungen bei der Anpassung der Inputstoffe in der BGA ausgesprochen werden. Die Landwirte nahmen diese an und setzten sie erfolgreich um.

Für die Sommermonate 2020 waren mehrfach Leistungstests auf Betrieb B mit der CAU geplant. Diese mussten jedoch abgesagt oder abgebrochen werden, da es wiederholt zu Verstopfungen im System kam. Zusätzlich zur Gegendruckklappe und zum MEYLO-Cut musste ein Membrankopf in den Separator eingebaut werden. Darüber hinaus stellte sich heraus, dass die Verrohrung nicht optimal (zu starke Verwinkelung der Rohre) und das der Rohrdurchmesser zu klein war. Letzterer ist für Gärrest geeignet, nicht jedoch für Gülle. Die in der Gülle enthaltenen Grob- und Schwebstoffe setzten sich in den Rohrleitungen ab und verstopften diese. Hinzu kam, dass die Fließgeschwindigkeit zu gering war, was wiederum das Absetzen der Grob- und Schwebstoffe begünstigte. Daraus resultierte eine Anpassung der Fließgeschwindigkeit. Statt eines kontinuierlichen Stromes wurde auf Intervallbetrieb umgestellt. Nachdem alle erforderlichen Maßnahmen umgesetzt wurden, konnten im September 2020 erste Leistungstests auf Betrieb B durchgeführt werden. Diese erfolgten zunächst mit Gärrest. Die CAU verglich die Messergebnisse mit den zuvor gefertigten Simulationen. Herr Mächtig stellte fest, dass die Gülle-Mais-Substitution nicht den erhofften Erwartungen entsprach. Theoretisch wurde ein größeres Substitutionspotenzial der Gülle erwartet. Die Simulation zeigte einen max. Ersatz von 20 % Mais.

Die ersten durchgeführten Leistungstests liefen über eine Dauer von 5 Stunden. Die Ergebnisse wurden dann auf 24 Stunden hochgerechnet. Die Hochrechnung wies jedoch Diskrepanzen in der Massenbilanz auf. Zudem führte die verhältnismäßig kurze Dauer des Versuchs zu Messungenauigkeiten und Messfehlern, auf denen wiederum die fehlende Plausibilität der Ergebnisse gründete. Daher sollten im nächsten Schritt weitere Leistungstests erfolgen, die mehrtägig angelegt werden sollten. Hierbei sollten auch externe Faktoren wie bspw. die Witterung berücksichtigt und Messfehler bzw. -ungenauigkeiten ausgemerzt werden. Für die Durchführung der Leistungstests arbeiteten die CAU und der Anlagenhersteller eng zusammen. Betrieb B wurde sehr umfänglich mit der notwendigen Messtechnik ausgestattet, um die relevanten Parameter zu erfassen. Parallel dazu sollte die Bilanzierung der Stoffströme zeigen, wie effizient das System tatsächlich ist, auch, um die Wirtschaftlichkeit der Anlage zu ermitteln. Hierzu ist auch das Zusammenspiel von Verfahrenstechnik und Anlagenstabilität interessant.

Mitte 2020 wurde seitens der CAU eine Mittelumwidmung erforderlich. Der Projektplan sah bei Antrag vor, dass die Untersuchungen, die von der CAU durchgeführt werden sollten, bis Ende Juni 2020 weitgehend abgeschlossen sind. Aufgrund der mehrfachen Verzögerungen wurde eine längere Beschäftigung von Herrn Mächtig nötig. Da der Anlagenhersteller die erforderliche Mess- und Verfahrenstechnik bereitstellte, konnte das von der CAU hierfür vorgesehene Geld umgewidmet und für die anfallenden Personalkosten der Weiterbeschäftigung aufgewendet werden.

Die Revision der Anlage A wurde in den Herbst 2020 verschoben und hatte zur Folge, dass die Anlage bis Ende 2020 nicht für das Projekt zur Verfügung stehen würde. Die ursprünglich geplante Demontage der Anlage konnte aufgrund diverser oberirdischer Leitungen nicht erfolgen. Die Wieder-Inbetriebnahme wurde für Januar 2021 angesetzt. Letztlich wurde das System bis zum Projektende aus betrieblichen Gründen nicht wieder in Betrieb genommen. Somit standen ab Mitte 2020 für das Projekt noch die Anlagen B und C zur Verfügung.

Im Februar 2021 stellte Frau Dr. Freitag im Rahmen des OG-Treffens die Ergebnisse der Beprobung der Anlage B vor. Hier zeigte sich, dass sich seit dem Einsatz der Aufbereitungsanlage eine neue Bakterienpopulation gebildet hat. Diese neue Population bedeutet eine höhere Diversität und damit eine neue Prozessstabilität. Die Änderung ist auf den veränderten (höheren) N-Einsatz zurückzuführen und führte zu einer breiteren Populationsverteilung. Zu Projektbeginn konnten in der Anlage B eher spezialisierte Mikroorganismen (MO) festgestellt werden. Aufgrund dieser hochspezialisierten MO wurde befürchtet, dass die Änderung des Inputs diese MO überfordern und es zu einem Einbruch der Biogasproduktion kommen würde. Diese Befürchtung bestätigte sich nicht. Somit konnte ein positiver Einfluss der Aufbereitungsanlage auf die BGA aufgezeigt werden.

Ebenfalls im Februar 2021 stand Landwirt B vor einer erneuten Herausforderung. Der Einsatz von Rüben in der BGA führte zu Problemen mit Schaumbildung in der Anlage. Daher musste in der Verdunstungseinheit (HEF) Entschäumer eingesetzt werden. Dieser ist ein zusätzlicher Kostenfaktor. Hinzu kam Frost, der in Kombination mit der Schaumbildung die F-F-T beschädigte, sodass diese ausfiel und erneut umgebaut werden musste. Der Umbau durfte laut Landwirt nicht länger als eine Woche dauern, da ein längerer Ausfall zum Überlaufen des Endlagers führen könnte. Der eingesetzte Entschäumer könnte durch Rapsöl ersetzt werden. Allerdings führt dieses zu einer erhöhten Tauschrate der Reinigungskugeln in den Leitungen. Die Kosten des Einsatzes von Rapsöl bzw. Entschäumer sind daher abzuwägen.

Bis zum Projektende am 30.06.2021 konnten sehr zum Bedauern aller Beteiligten keine ausreichenden Versuchsreihen durchgeführt werden, um repräsentative Ergebnisse vorzuweisen. Ein mehrtägiger und kontinuierlicher ausschließlicher Güllebetrieb war nicht möglich, da die Technik immer wieder angepasst und optimiert werden musste. Der technische Aufwand war deutlich höher als erwartet. Auf Betrieb B wurden während der Projektlaufzeit folgende Anpassungen vorgenommen:

- Neue Verrohrung
- Neue Pumpentechnik
- Andere Steuerungstechnik
- Fremdkörperabscheider (Steinfang)
- Vorgeschalteter Cutter
- Einbau Membrankopf in Separator

- Einbau halbautomatische Gegendruckklappe
- Austausch defekter Motor Mikrofiltration

Zum Ende des Projektes stellte Betrieb B zudem vermehrtes Aufschäumen der Rindergülle fest. Eine mögliche Ursache hierfür könnte der Stärkegehalt des Futters sein. Dies zeigt einmal mehr den Einfluss der Tierfütterung auf den gesamten Biogasprozess. Trotz aller Rückschläge und Herausforderungen konnte Landwirt B eine deutliche Entlastung seiner Lager feststellen.

Auf Betrieb C waren im Februar 2020 sowohl die Aufbereitungsanlage als auch die Zusatzmodule Saline und Granulierer aufgebaut. Zu diesem Zeitpunkt wurden tgl. 1 m<sup>3</sup> ASL produziert und ca. 10-13 m<sup>3</sup> Wasser verdampft. Diese Wassermenge wäre andernfalls mit der Gülle mittels Güllewagen ausgebracht worden. Für den Landwirt bedeutet dies eine deutliche Einsparung an Transportwegen und damit auch -kosten. Für Landwirt C stellte sich allerdings die Frage nach der Deklaration seiner gewonnenen Düngemittel. Er plante ursprünglich die Vermischung von SSA und Kalk. Allerdings ist dies laut Dünge-VO nicht erlaubt. Um dieses Düngemittel einsetzen zu können, bedarf es einer Unbedenklichkeitsbescheinigung. Inzwischen entschied sich Landwirt C gegen den Einsatz von Kalk und für die ausschließliche SSA-Produktion.

Zudem zeigte sich auf Betrieb C deutlich der Einfluss des pH-Wertes auf die ASL-Gewinnung und den Biogasprozess. Ab einem pH-Wert von 8 sollte das Substrat nicht mehr der BGA zugeführt werden, um die Biologie nicht zu gefährden. Die BGA könnte umkippen und der Biogasprozess zum Erliegen kommen. Bei einem pH-Wert von 6 (Gülle) bzw. 8 (Gärrest) wird kein ASL mehr gewonnen. Der niedrigere pH-Wert von Gülle im Vergleich zu Gärrest führt grds. zu einer geringeren ASL-Ausbeute. Zudem hatte Betrieb C wiederholt Probleme mit der Steuerungstechnik. Hier kam es mehrfach zu Fehlermeldungen, die ein menschliches Eingreifen erforderlich machten und dazu führten, dass Landwirt C bis zu 20-mal am Tag zu seiner Aufbereitungsanlage gehen und die Fehlermeldung beheben musste. Darüber hinaus bereitete die F-F-T Probleme. Das verbaute System hatte sich zwar auf den Betrieben A und B bewährt, konnte jedoch auf Betrieb C nicht überzeugen. Hierdurch wurde der Austausch des Separators erforderlich. Das vorhandene System wurde durch einen Vakuumseparator ersetzt, sodass Pressschnecke und Mikrofiltration nun in einem Schritt erfolgen. Der wechselnde Input auf Betrieb C und damit die sich ständig wechselnde Viskosität des Substrates machte den Einbau einer automatischen Gegendruckklappe erforderlich, da wechselnde Konsistenzen unterschiedlichen Gegendruck erfordern.

Den potenziellen Einsparungen durch reduzierte Transportkosten und verringerten Düngerzukauf stehen deutliche Mehrkosten entgegen. Auf allen beteiligten Betrieben lagen die Kosten deutlich über den kalkulierten Ansätzen. Hier sind zum einen die technischen Anpassungen anzuführen. Zum anderen sind in den Anschaffungskosten noch nicht die Kosten der erforderlichen Infrastruktur enthalten. Die Landwirte sind bspw. für den Bau der

Bodenplatte, auf der die Aufbereitungsanlage errichtet wird und die Anbindung des Systems an die BGA verantwortlich.

Die OG zog eine kostenneutrale Verlängerung in Erwägung. Hiergegen sprach jedoch der Wegfall des Lead-Partners sowie der beiden Universitäten. Der Lead-Partner musste aus personellen Gründen ausscheiden, die beiden Universitäten hatten ihre Finanzmittel bereits ausgeschöpft. Daher wurde das Projekt, wie vorgesehen, am 30.06.2021 beendet.

Für den Anlagenhersteller ergaben sich, nicht zuletzt durch die verschiedenen Perspektiven der OG-Mitglieder, neue Sichtweisen. Die Probleme der Separatoren mit verschiedenen Medien wurden erst durch das Projekt festgestellt. Auch die Messtechnik war nicht so optimal, wie angenommen. Fehlerquellen im und am System konnten identifiziert und die Technik auf die Anforderungen aus der Praxis angepasst werden.

Ein Landwirt fasst zusammen: „Es war ein langer Weg“. Bis dato würde ich es [Pilotprojekt] nicht wieder tun aber jetzt sind wir auf einem guten Weg und ganz gespannt und aufgeregt, wie es ab jetzt läuft. Der Schlüssel für die Praxis ist die Menge Wasser, die entzogen wird!“

### Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP Zielen

In den EIP-Förderrichtlinien heißt es, dass „Anreize für die projektbezogene Zusammenarbeit von verschiedenen Akteurinnen und Akteuren aus der Landwirtschaft (...) geschaffen [und] (...) ein Brückenschlag zwischen Praxis und Forschung erreicht werden [soll]. [Es sollen] innovative Lösungen für praktische land- und forstwirtschaftliche Fragen- und Problemstellungen gefunden werden. Der Fokus richtet sich dabei auf aktuelle Herausforderungen (...).“ Letztlich „soll ein wesentlicher Beitrag zur wirtschaftlichen Stärkung, zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit im Agrarbereich geleistet werden.“

ENEGÜLL erfüllt genau diese Anforderungen. In der OG arbeiteten Praxis, Forschung und Beratung Hand in Hand und ergänzten sich gegenseitig. Alle Seiten profitierten von dem Wissen und den Erfahrungen der beteiligten Partner und gaben immer wieder Impulse im und für das Projekt. Zudem konnten Blickwinkel erweitert und praktische und theoretische Ergebnisse verglichen und ins Verhältnis gesetzt werden. Resultate wurden kritisch hinterfragt und Zusammenhänge ge- und erklärt. Unstimmigkeiten und/oder Abweichungen konnten schnell identifiziert und z.T. direkt gelöst werden. Die gemeinsame Planung und (Weiter-)Entwicklung der Anlagen half allen Beteiligten dabei, ein besseres Verständnis für die Gegenseite zu entwickeln. Mögliche Hindernisse konnten direkt bei der Umsetzung der Planung berücksichtigt und kalkuliert werden.

Für die landwirtschaftlichen Betriebe ergaben und ergeben sich neue Möglichkeiten, die den eigenen Betrieb zukunftsfähig machen und sich nicht nur positiv auf den eigenen Betrieb,

sondern auch auf Nachbarbetriebe auswirken. Der Einsatz einer Aufbereitungsanlage bietet die Basis von Kooperationen in der Landwirtschaft. Somit kann nicht nur der eigene Betrieb entlastet und Ressourcen genutzt werden, auch umliegende Betriebe profitieren davon. Die Rohstoffe Gülle und Mist, die auf jedem landwirtschaftlichen Betrieb mit Tierhaltung anfallen, können mit Hilfe der Aufbereitungsanlage zu Produkten mit definierten Eigenschaften veredelt und somit gezielter eingesetzt werden. Dies hat auch wirtschaftlich positive Folgen. Für die Landwirte bieten sich neue und flexible Möglichkeiten bei der Verwertung von Gülle und Mist. Der Druck, der aufgrund immer neuer Gesetze und Verordnungen auf ihnen lastet, kann genommen werden. Landwirtschaftliche Flächen stehen auch weiterhin für die landwirtschaftliche Nutzung zur Verfügung und müssen nicht durch den Bau weiterer Lagerbehälter irreversibel der Nutzung entzogen werden.

### Nebenergebnisse – „by-catches“?

Auf Betrieb C wurde neben der Aufbereitungsanlage, bestehend aus Fest-Flüssig-Trennung und Verdunstungseinheit, zusätzlich eine Saline installiert. Ein solcher Aufbau ist bisher deutschlandweit einzigartig. Erste Durchläufe zeigten vielversprechende Ergebnisse bei der Weiterverarbeitung von ASL zu SSA. Landwirt C ist bereits jetzt von dieser zusätzlichen Einheit begeistert und bereut die Investition nicht.

### Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Während der Projektlaufzeit entwickelte sich die Idee, die gewonnenen Düngemittel mittels Düngeversuchen zu erproben. Trotz wiederholter Gespräche mit der LWK SH wurden die Versuche nicht umgesetzt. Einmalig wurde ASL an die LWK SH geliefert. Ob und mit welchem Ergebnis Versuche erfolgten, blieb ungewiss.

Die Separation von Schweinegülle + HTK und Separation von Rindergülle im Rahmen der Versuche auf Betrieb A blieben erfolglos. Ebenso konnten keine genauen Messungen von Stoffströmen zur exakten Bilanzierung des Prozesses durchgeführt werden.

## V. Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

### Nutzbare/verwertbare Empfehlungen, Produkte, Verfahren, oder Technologien

Im Projekt kam die bewährte Gärrestveredelungsanlage der Firma Terrawater zum Einsatz, die auf allen drei Standorten errichtet wurden. Die Nutzung dieser Anlage war jedoch keine Teilnahmebedingung für das Projekt. Die Anlage wird seit 2017 erfolgreich für die Aufbereitung von Gärrest genutzt und erzielt mit diesem Substrat sehr gute Ergebnisse. Ziel des Projektes war die Umnutzung der Anlage, sodass statt Gärrest Gülle und Mist dem Veredelungsprozess zugeführt werden.

Es zeigte sich, dass dieselbe Kombination aus Pressschnecke und Mikrofiltration an den drei Standorten absolut unterschiedliche Ergebnisse erzielte. Insbesondere das Einstellen des

Presskuchens der Pressschnecke auf veränderte Eigenschaften des Pressmaterials war mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden und dortige Probleme nicht immer nachvollziehbar. Die Anforderungen wurden durch zugekaufte Güllen von Nachbarbetrieben für die Versuche erhöht. Das durch seinen modularen Aufbau betriebsindividuell anpassungsfähige System musste nun auch im Verfahrensprozess flexibler gestaltet werden. Daher wurde auf Betrieb C die F-F-T durch eine Vakuumseparation ausgetauscht, die sich als deutlich robuster und prozesssicherer herausstellte. Zudem ist dieses System redundant ausgelegt und erhöht somit die Betriebsbereitschaft des gesamten Systems deutlich. Für die HEF kann so mehr Flüssigkeit bereitgestellt werden und die Dickschlamm-Phase entfällt. Die Phosphor-Abscheidung blieb zwar in den Versuchen unter den erwarteten Werten von 30-50 % P, könnte jedoch zukünftig durch den Einsatz eines anderen Dekanters erreicht werden. Mit einem solchen sind bis zu 80 % P-Abtrennung realisierbar (Literaturwerte). Alternativ hierzu untersucht der Hersteller derzeit eine Möglichkeit der weiteren mechanischen Entwässerung, die es ermöglicht, die feste Phase von derzeit 25 % TS auf 65 % TS zu erhöhen. Dies hätte eine anteilige Erhöhung des P-Gehaltes im verbleibenden Presskuchen zur Folge.

Der Entzug des flüchtigen Stickstoffes aus Güllen, der für die Maissubstitution elementar ist, war erfolgreich. Hierdurch konnte eine ASL mit sehr guter Qualität ( $> 7,5$  Gew%N) und somit hervorragender flüssiger Stickstoffdünger gewonnen werden. Der gleichzeitige Entzug von Wasser erzeugte ein Konzentrat, das deutlich bessere Düngereigenschaften als reine Gülle aufweist (weniger Volumen, weniger N und P).

Die flüssige ASL muss gelagert werden, da eine ganzjährige Ausbringung nicht gestattet ist. Um die Lagerwürdigkeit noch zu erhöhen, wurden auf Betrieb C zusätzlich eine Saline und ein Granulierer installiert. Die Saline ermöglicht die Überführung von ASL zu SSA, das als mineralischer Feststoffdünger als Sackware gelagert werden kann. Wie sich im Projekt zeigte, ist dieser Schritt erfolgreich. Für die Betriebe ergibt sich hieraus eine große Flexibilität hinsichtlich ihres Düngereinsatzes und der optimal angepassten Düngung.

Aus Sicht der CAU kann das System für die Aufbereitung von Gülle aktuell nicht empfohlen werden, da kein abschließender Nachweis der Eignung erbracht werden konnte. Für die Aufbereitung von Gärrest hingegen ist das System technologisch empfehlenswert. Die Uni Bayreuth relativiert diese Aussage etwas. Zwar führt Frau Dr. Freitag an, dass das System beim Gülleeinsatz technisch noch mit „Kinderkrankheiten“ behaftet ist, der Einsatz eines solchen Systems jedoch tatsächlich dazu führt, dass höhere Güllemengen in die BGA eingebracht werden können. Das System stellt daher aus ihrer Sicht eine Lösung dar, die unbedingt in Betracht gezogen werden sollte, wenn beabsichtigt wird, größere Güllemengen in einer BGA zu verarbeiten. Hinsichtlich ökonomischer Aspekte müssen die betriebsindividuellen Rahmenbedingungen geprüft und eingeschätzt werden.

## Umsetzungsstand

Diverse Herausforderungen führten wiederholt zu Verzögerungen, die dem geplanten Gülle-Betrieb der Aufbereitungsanlage entgegenstanden. Mit deutlichem zeitlichem Verzug konnte der Gülle-Betrieb erst zum Ende der Projektlaufzeit umgesetzt werden.

Aussagekräftige Versuchsreihen und dazugehörige Auswertungen konnten daher nicht mehr im Rahmen des Projektes erfolgen.

Auf allen drei Betrieben sind die entsprechenden Aufbereitungsanlagen betriebsbereit und auf dem technisch erforderlichen Stand, um einen kontinuierlichen Gülle-Betrieb aufzunehmen. Auf Betrieb C läuft die Anlage reibungslos mit einem Gülle-Gärrest-Gemisch, das dem Verhältnis 60:40 entspricht. Die nachgeschaltete Saline scheint bisher eine erfolgsversprechende Erweiterung der Anlage zu sein.

Das Projekt zeigte Probleme auf, die insbesondere politischer bzw. genehmigungsrechtlicher Natur sind. Das aus Gülle und Gärrest entzogene reine Wasser (Kondensat) darf nicht ohne weiteres in die Vorflut eingeleitet werden. Laborversuche zeigten, dass dieses Wasser der Trinkwasserqualität entspricht. Dennoch sind die Behörden hier noch äußerst skeptisch. Hier wären Vorgaben von einzuhaltenden Einleitwerten ein entscheidender Schritt.

Die Aufbereitungsanlage, die an das Vorhandensein einer BGA geknüpft ist, bietet Landwirten die Chance, Kooperationen mit Nachbarbetrieben einzugehen. So könnten Lager eingespart und die Verwertung von Gülle über BGA gefördert werden. Um für beide Seiten ein attraktives Modell darzustellen, wäre ein Austausch der Produkte erstrebenswert. Hier stehen die aufnehmenden Landwirte jedoch vor dem Problem, dass ein Handel mit Düngemitteln nicht gestattet ist und u.U. ihre Privilegierung gefährdet ist. Unabhängig davon, dass die Düngemittel aus der zuvor gelieferten Gülle gewonnen werden. Die landwirtschaftliche Düngerproduktion (in diesem Fall aus Gülle und Mist) wird somit mit einer industriellen Produktion gleichgesetzt. Der Anreiz für Kooperationen wird folglich gehemmt.

## **VI. (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse**

Für die Beratung konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Eine Empfehlung für oder gegen ein Aufbereitungssystem kann nicht pauschalisiert werden. Hier sind die betriebsindividuellen Gegebenheiten und Zukunftspläne entscheidend. Dennoch kann insbesondere der Lead-Partner als Fachberater für Biogas auf eine wichtige Datengrundlage und Beziehungen zurückgreifen, die den Kunden und Interessierten zugutekommen.

Der Anlagenhersteller hat wichtige Erkenntnisse gewonnen und kann diese zukünftigen Kunden zur Verfügung stellen und deren Anlagen noch besser beraten und unterstützen

## VII. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Auf Basis der Projektergebnisse ist für die Zukunft zu klären, inwiefern ein „Handel“ zwischen Landwirten möglich sein wird, wenn Gülle geliefert und daraus gewonnene/s ASL/SSA abgenommen wird und inwiefern diese Düngeprodukte deklariert werden müssen. Zudem gilt es die Frage nach Grenzwerten für die Einleitfähigkeit des entzogenen Wassers zu klären.

Während der Projektlaufzeit konnte kein dauerhafter Gülle-Betrieb realisiert werden. Hier ist noch immer die Frage nach einer Definition der optimalen Viskosität des Gülle-Mist-Gemisches offen. Hier ist v.a. die Vielzahl der Einflussfaktoren eine wesentliche Komponente. Auch die optimale Einbindung der Aufbereitungsanlage im Prozess konnte nicht abschließend geklärt werden.

## VIII. Administration und Bürokratie

### Aufwand

Bei der Planung des Projektes wurde ein jährlicher Stundenansatz von 220 Std. seitens des Lead-Partners hinsichtlich Administration und Bürokratie angenommen. Dieser Ansatz wurde realistisch gewählt.

Am zeitintensivsten können die Mittelabrufe identifiziert werden. Diese bedurften der größten Organisation und Koordination. Dies liegt v.a. daran, dass die Abrechnungsunterlagen der verschiedenen Projektpartner eingeholt, gesichtet und geprüft sowie die Zahlungsansprüche zugeordnet werden mussten. Aufgrund der Förderungsrichtlinien galt es immer wieder, fehlende Nachweise wie z.B. Angebotsvergleiche einzuholen und den Formvorgaben anzupassen. Eingereichte Rechnungen erforderten z.T. eine Trennung der aufgeführten Posten, wenn nicht alle aufgeführten Positionen dem Projekt zugeordnet werden konnten. Dies war v.a. im Bereich der Anpassungskosten der BGA der Fall.

### Schwierigkeiten

Die Vorgaben der Förderrichtlinie waren nicht immer verständlich und primär für die Landwirte nicht immer eindeutig umsetzbar. Hier sind z.B. Rechnungen anzuführen, die nicht gesplittet werden konnten und so einen erhöhten Aufwand hinsichtlich der Abrechnung darstellten. Probleme mit den Dateivorlagen führten zudem zu einem erhöhten Zeitaufwand.

### Verbesserungsvorschläge

Gewünscht ist eine Angebotseinholung vor Auftragserteilung, jedoch wird es gern gesehen, wenn nicht immer dieselben Dienstleister beauftragt werden, z.B. beim Posterdruck. Hier gilt es für jedes Poster erneut drei Angebote einzuholen und diese zu vergleichen. Die erneute Vergabe an denselben Dienstleister kann, unter Einhaltung der Vorgaben, wieder erfolgen. An dieser Stelle wäre eine Vereinfachung wünschenswert, wenn bspw. nach erstmaliger

Angebotseinholung bekannt ist, dass bei gleicher Dienstleistung, derselbe Dienstleister ohne erneute Angebotsanfrage beauftragt werden könnte. Insbesondere, wenn sich Qualität und Auftragsausführung bewährt haben.

## **IX. Nutzung des Innovationsbüros (Innovationsdienstleister, IDL)**

Das Innovationsbüro begleitete das Projekt ENEGÜLL von der Antragsstellung bis zum Abschluss. Ein besonderer Umstand war, dass der Berater der LandBeratung, der das Projekt mit initiierte, leider noch vor Bekanntgabe der Bewilligung tödlich verunglückte. Dies führte dazu, dass das Innovationsbüro v.a. zu Beginn des Projektes die LandBeratung sehr unterstützte und die Mitarbeiterinnen, die das Projekt übernahmen, über alles informierte und sie unterstützte. Insbesondere im Hinblick auf die Formalitäten und die Anforderungen, die an den Lead-Partner gestellt wurden, war das Innovationsbüro eine große Hilfe. Der Umstand, dass sich der Lead-Partner und das Innovationsbüro im selben Haus befinden, erleichterte die Kommunikation und ermöglichte kurze Wege.

Das Innovationsbüro wurde des Öfteren um Unterstützung gebeten, nicht nur in Bezug auf die Mittelabrufe, sondern auch bezüglich der Kommunikation innerhalb der OG. Hier gab es die ein oder andere Fragestellung, die mit Hilfe des Innovationsbüros geklärt werden konnte. Zeichneten sich Spannungen in der OG ab, wurde Frau Ketelhodt zu den OG-Treffen hinzugezogen und vermittelte, wenn dies erforderlich war. Zudem wurde sie nicht müde, die Vorgaben, an die EIP-Projekte gebunden sind, zu erläutern.

Frau Ketelhodt stand nicht nur für Rückfragen zur Verfügung, sondern fragte auch immer wieder bei den Projektverantwortlichen nach dem aktuellen Stand, unabhängig vom Mittelabruf. Bemerkte sie Abweichungen vom Projektantrag, wies sie die Projektbeteiligten auf diese und ggf. daraus resultierende Verantwortlichkeiten hin.

Das Innovationsbüro stellte Vorlagen zur Verfügung und prüfte bspw. Material für die Öffentlichkeitsarbeit. Zudem wurden verschiedene Veranstaltungen organisiert sowie regelmäßige Informationen verschickt.

Zu Projektbeginn waren zwei Mitarbeiterinnen im Innovationsbüro tätig. Inzwischen ist es nur noch eine. Dies führt zu einer schlechteren Erreichbarkeit des Innovationsbüros und u.U. dazu, dass bei Abwesenheit der Mitarbeiterin keine Ansprechperson für Fragen zur Verfügung steht. Gleiches gilt, wenn die Mitarbeiterin bspw. an OG-Treffen oder Veranstaltungen teilnimmt. Alternativ muss sich hier ggf. direkt an das MELUND gewandt werden, das jedoch nicht immer der richtige Ansprechpartner ist. Es wäre daher wünschenswert, dass zumindest zwei Verantwortliche das Innovationsbüro besetzen und auf diese Weise immer zumindest eine Person erreichbar ist.

Die zur Verfügung gestellten Vorlagen, v.a. die Stundennachweise wiesen z.T. Probleme auf, die auf fehlenden oder fehlerhaften Formeln und/oder Verknüpfungen basierten. Dies stellte Projektpartner vor Herausforderungen, da die Dateien nicht ohne Anpassung nutzbar waren. Wurden solche Probleme an das Innovationsbüro kommuniziert, erfolgte zeitnah eine Anpassung der Vorlagen sowie i.d.R. eine Rundmail mit dem Hinweis auf die Problematik

und die erfolgte Anpassung. Solche Nachbearbeitungen sind für alle Beteiligten zeitaufwendig und sollten nach Möglichkeit vermieden werden.

## **X. Kommunikations- und Disseminationskonzept**

### **Kommunikation der Ergebnisse**

Die gewonnenen Ergebnisse wurden zum einen im Rahmen von Veranstaltungen, zum anderen mittels Artikeln in einschlägigen Fachzeitschriften veröffentlicht.

Das Projekt ENEGÜLL wurde 2018 und 2019 auf der NORLA vorgestellt. Die LandBeratung als Lead-Partner organisierte 2019 einen Arbeitskreis mit an dem System und dem Projekt interessierten Landwirten aus dem eigenen Kundenstamm auf der Anlage A. Ebenfalls im Jahr 2019 fand der sog. IB.SH Agrarkreis statt. Bei diesem stellten Landwirt A und der Anlagenhersteller gemeinsam die Funktionsweise des Systems sowie das Projekt mit dessen Zielen und ersten Ergebnissen vor. Ende 2019 erhielt die LandBeratung die Möglichkeit, das Projekt bei einem Beratertreffen vorzustellen, an dem überwiegend Agrarberater teilnahmen. Landwirt B stellte seine Anlage sowie das Projekt 2020 im Rahmen eines Arbeitskreises vor, der seitens des Beratungsunternehmens des Landwirtes B ausgerichtet wurde. 2021 wurde das Projekt mit seinen Ergebnissen beim EIP-Vernetzungstreffen vorgestellt. Auf der jährlich stattfindenden Biogas-Fachmesse in Rendsburg präsentierte sich ENEGÜLL jeweils an drei Ständen. An dem der LandBeratung, an dem des Anlagenherstellers Terrawater und an dem Stand eines OG-Mitgliedes. Zudem wurde in Vorträgen, die ein oder mehr Projektpartner dort hielten, auf das Projekt verwiesen. Der Anlagenhersteller Terrawater war auf diversen Fachmessen mit einem Stand vertreten und wurde zu Vorträgen eingeladen, bspw. bei der LWK Niedersachsen. Dort legte er jeweils Infomaterial zu ENEGÜLL aus bzw. stellte das Projekt im Rahmen von Vorträgen vor.

Neben Präsentationen zu bzw. in Verbindung mit ENEGÜLL erschienen einige Artikel zu dem Projekt. Im Bauernblatt vom 17.11.2018 stellte sich das Projekt erstmals vor. Am 20.06.2020 erschien dort ein weiterer Artikel mit dem aktuellen Zwischenstand. In der Ausgabe 2/2019 der „energie aus pflanzen“ erschien ein Artikel mit dem Titel „Düngesalz statt Flüssigdünger“. In diesem wird das Projekt ENEGÜLL sowie dessen Zielsetzung hervorgehoben. Der Einsatz der Saline zur Gewinnung von SSA aus ASL fand im März 2019 in der top agrar Erwähnung. Die Universität Bayreuth bereitet derzeit zwei Publikationen vor.

### **Fazit zur Eignung von EIP-Förderung**

Die EIP-Förderung bietet Anreize für Projekte aus der Praxis für die Praxis. Allerdings sind die Förderrichtlinien sehr komplex und das gesamte Verfahren (Antrag, Durchführung, Abschluss) sehr aufwendig. Für Praktiker, in diesem Falle Landwirte, kann die Beteiligung an

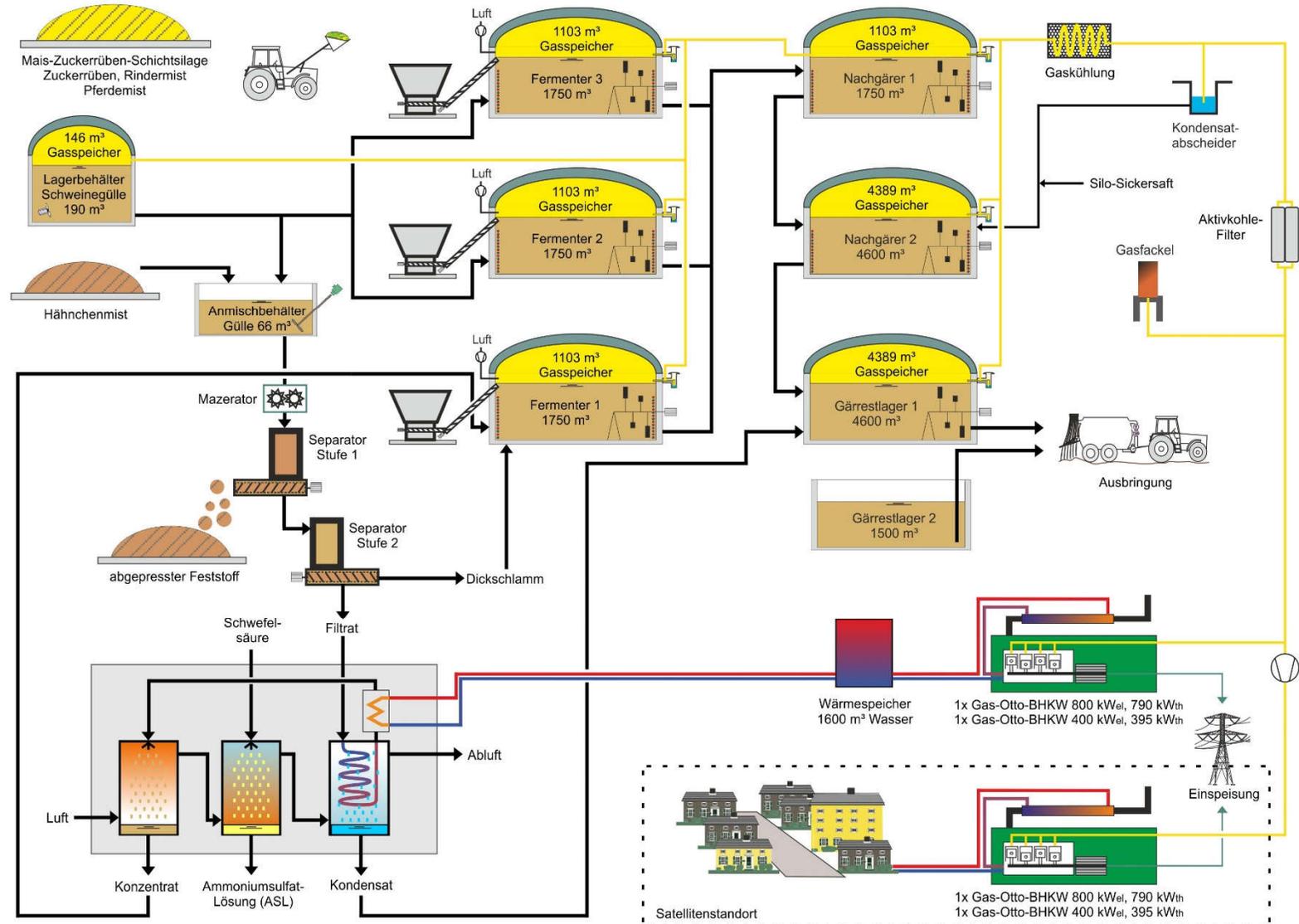
einem EIP-Projekt einerseits interessant (Vorreiterrolle, innovative Lösungen), andererseits jedoch auch irrelevant (Pilotverfahren, arbeits-, zeit- und kostenintensiv) sein.

Insbesondere für die Landwirte ist der zusätzliche bürokratische Aufwand nicht zu unterschätzen und z.T. auch abschreckend. Gleiches gilt für die anderen Projektpartner, allen voran den Lead-Partner, der v.a. in Zeiten des Mittelabrufes besonders beansprucht wird. Das Konzept, dass der Lead-Partner für die Praktiker in Vorleistung treten muss, macht diesen Part zusätzlich unattraktiv.

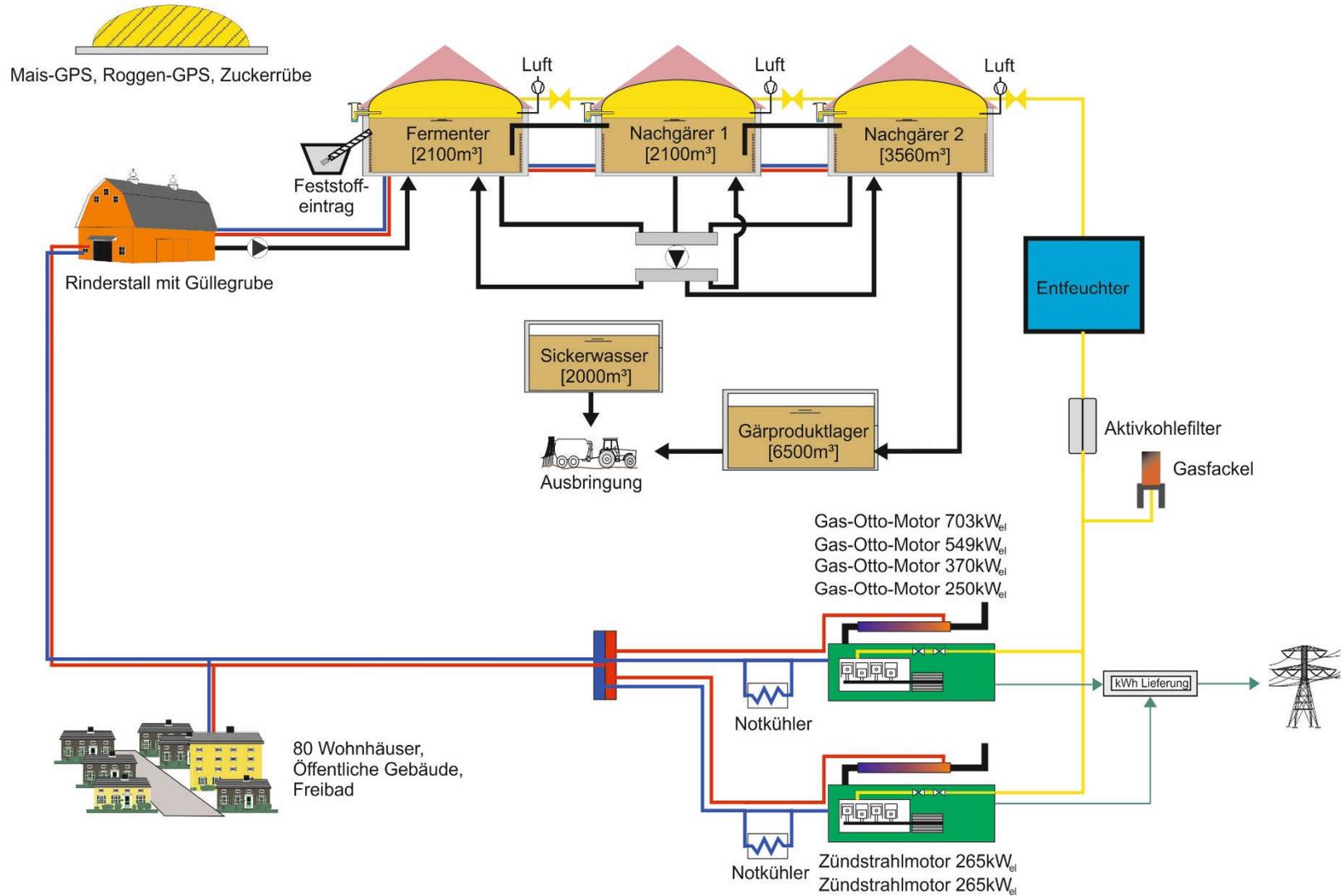
Der bei Antragsstellung eingereichte Kostenplan wurde geprüft und genehmigt. Allerdings mussten im Projekt ENEGÜLL zunächst Fördermittel zurückgehalten werden. Hierbei handelte es sich um die Anlagenmiete, die bei Antragsstellung mit 2.500,00 €/Monat beziffert wurde und eine Aufwandsentschädigung der Landwirte darstellte. Da jedoch deren Berechtigung in Frage gestellt wurde, durfte eine Auszahlung erst zu Projektende erfolgen. Dies wirkte sich demotivierend und z.T. auch kontraproduktiv auf und für die Praktiker aus und führte zu viel Unmut. Diese stellten ihre Anlagen für ein neuartiges Verfahren, dessen Erfolg ungewiss war, zur Verfügung, hatten zusätzliche Arbeit und trugen zusätzlich die Kosten. Abgesehen von den Umbau- und Personalkosten vorerst ohne Gegenleistung. Ein solches Vorgehen wirkt sich nachteilig auf die Innovationsbereitschaft von Praktikern aus. Lücken zwischen Praxis und Wissenschaft können so u.U. nur zeitverzögert geschlossen werden. Genehmigte Mittel sollten daher leichter abgerufen werden können bzw. Zweifel an Mitteln bei Antragsprüfung und vor Antragsgenehmigung ausgeräumt werden.

## c. Anhang

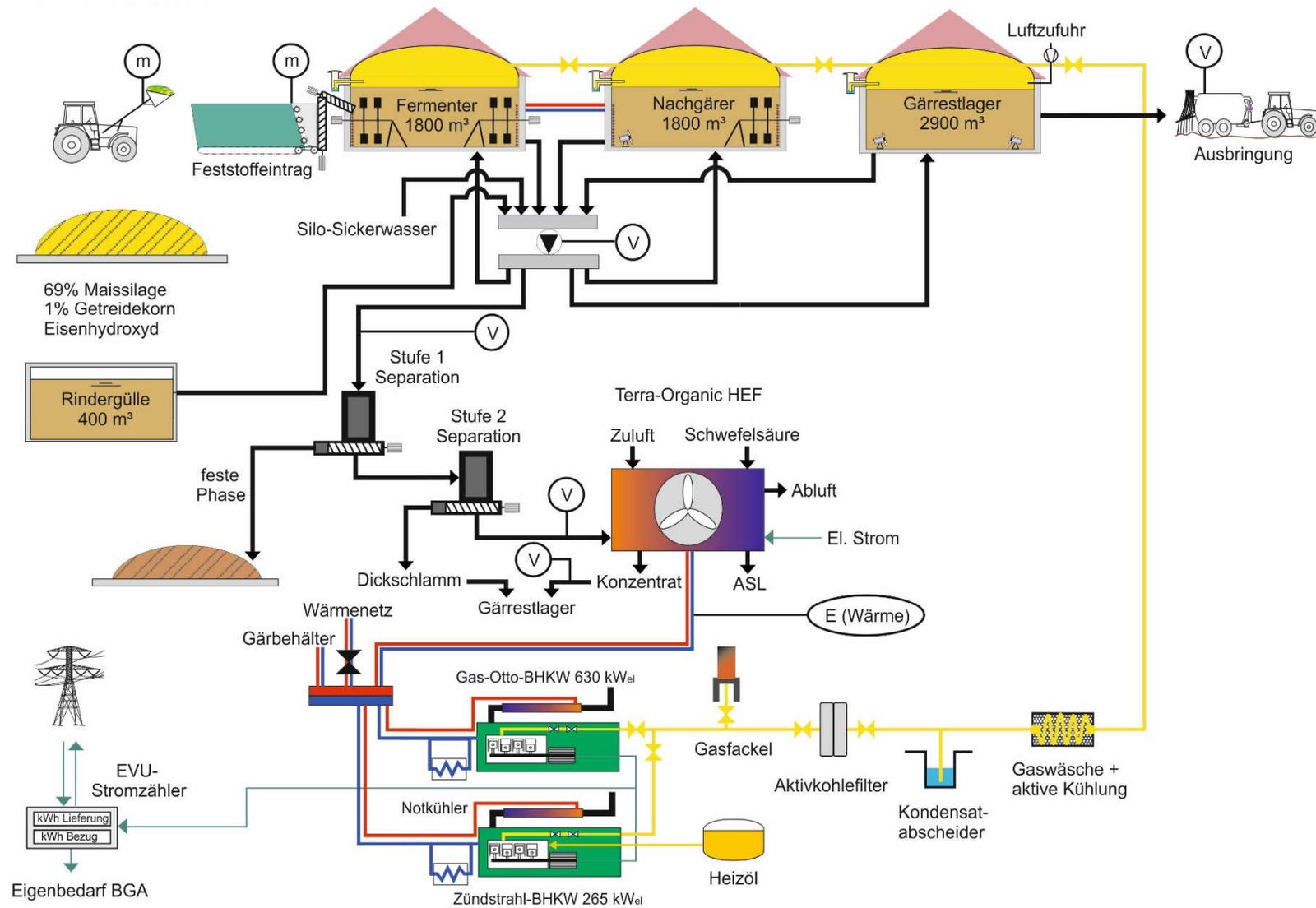
### I. Fließschema der Anlage A



## II. Fließschema der Anlage B



### III. Fließschema der Anlage C



## IV. Projektzusammenfassung CAU

### Ergebnisse des Innovationsprojektes

#### Zielerreichung (wurde eine Innovation im Projekt generiert?)

Nicht im Sinne des Projektziels. Es konnte gezeigt werden, dass die Aufbereitungsanlage nährstoffoptimierte Düngemittel erzeugt – jedoch nicht direkt aus Gülle, sondern aus Gärrest.

Die Verfahrenstechnik war (bis zum Projektende) nicht in der Lage Gülle zuverlässig zu verarbeiten. Das Problem bestand direkt im ersten Prozessschritt, der Separation von Gülle. Um die nachfolgende Verfahrenstechnik untersuchen zu können wurden auf dem Betrieb in Betrieb B Versuche mit Gärrest durchgeführt, welcher besser separiert werden kann. Die Zusammensetzung des Gärrest ist zu der als Substrat in der BGA eingesetzten Güllemischung recht ähnlich.

Tabelle 4. Inhaltsstoffe der Rindergülle (RG) und des Gärrest des Betriebs Betrieb B vom 10.09.2020

Inhaltsstoff	Einheit	RG Milchvieh	RG Mast	RG Mischung	Gärrest
Trockensubstanz	% der FM	8,6	7,36	7,98	7,06
org. Trockensubstanz	% der TM	79,9	78,7	79,3	78,9
Gesamtstickstoff Nges	g/kg (FM)	4,32	3,97	4,15	4,31
Ammoniumstickstoff (NH <sub>4</sub> -N)	g/kg (FM)	2,02	1,92	1,97	1,88
Phosphor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	g/kg (FM)	2,26	1,88	2,07	1,97
Kalium (K <sub>2</sub> O)	g/kg (FM)	4,71	4,62	4,67	5,10

Durch die Behandlung konnte ASL erzeugt werden, wodurch NH<sub>4</sub>-N aus dem Gärrest entfernt wird. Durch Rückführung von NH<sub>4</sub>-reduzierten behandelten Stoffströmen in die BGA kann somit die NH<sub>4</sub>-Konzentration gesenkt werden, auch ohne dass Gülle vor der Zugabe in die BGA behandelt wird. Dieser Betriebsmodus mit Rückführung wurde jedoch nicht praktisch untersucht, sondern nur modelliert.

#### Betrieb B

Der Landwirtschaftliche Betrieb B betreibt neben einer Biogasanlage Rindermast und Milchviehhaltung. Die entstehende Gülle wird in einer Biogasanlage verarbeitet. Die Substratzusammensetzung der Biogasanlage besteht allerdings nur zu ca. 33 % aus Gülle. Der restliche Anteil wird durch Energiepflanzen, hauptsächlich Mais, eingenommen. Saisonal werden auch Zuckerrüben und Roggen-Ganzpflanzensilage verwendet. Pro Tag werden etwa 44 t Mais-Ganzpflanzensilage und 22 t Rindergülle eingesetzt. Die Anlage besitzt ein beheiztes 3-stufiges Fermentersystem mit einem Gärraumvolumen von 7760 m<sup>3</sup>. Die durchschnittliche organische Raumbelastung ist moderat mit 2,1 kg<sub>OTS</sub>/ (m<sup>3</sup>\*d). Die mittlere hydraulische Verweilzeit beträgt 116 d. Täglich werden 75 m<sup>3</sup> Gärrest rezirkuliert, wodurch ein Anteil des Gärgemisch den Gärraum mehrfach durchläuft. Die Verweilzeit bei einem

einfachen Durchlauf verringert sich damit auf 55 d, wobei statistisch die mittlere Verweilzeit des Substrats bei 116 d verbleibt, aufgrund des mehrfachen Durchlaufs.

Das entstehende Biogas wird an mehreren Standorten in BHKW zur Produktion von elektrischem Strom und Wärme eingesetzt. Die Wärme wird über Nahwärmenetze an Wohnhäuser, öffentliche Gebäude, Gewerbebetriebe und ein Freibad abgegeben. Diese Wärmesenken haben einen saisonal schwankenden Wärmebedarf, sodass insbesondere im Sommer nicht die gesamte Wärme verwendet wird. Auf dem landwirtschaftlichen Betrieb wird Wärme in Trocknungsanlagen und zum Betrieb der Gärrestaubbereitungsanlage eingesetzt. Insbesondere die Gärrestaubbereitungsanlage hat den Vorteil eine regelbare Wärmesenke zu sein. Damit kann die Wärmelast im Wärmenetz geglättet werden.

### Modellierung der Substratvariation auf Betrieb B

Der Betrieb der Biogasanlage dient der Erzeugung von Strom und Wärme. Zu deren Bereitstellung werden Blockheizkraftwerke betrieben, welche mit dem produzierten Biogas gespeist werden. Um einen wirtschaftlichen Betrieb der Biogasanlage sicherzustellen, muss genug Methan erzeugt werden, damit die BHKW die im Jahresdurchschnitt die genehmigte Höchstbemessungsleistung ausnutzen. Somit muss bei einer Variation der Substratzufuhr sichergestellt werden, dass die erzeugte Methanmenge konstant bleibt. Anhand der in Betrieb B genutzten Einsatzstoffe Mais-Ganzpflanzensilage und Rindergülle wird hier einmal exemplarisch dargestellt, welche Auswirkungen der Ersatz von Mais-GPS durch Rindergülle hat. Es werden damit Literaturwerte nach KTBL angenommen.

Tabelle 5: Substratmix der BGA Betrieb B

Substrat	Änderung Mais		0	-10%	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
	Menge Maissilage	t/d	45	40	36	31	27	22	18	13	9	4	0
	Menge Rindergülle	t/d	23	56	89	123	156	189	223	256	289	323	356
Mix Konzentrationen	TS	% der FM	26,3	19,9	16,4	14,3	12,8	11,7	10,9	10,3	9,8	9,4	9,0
	oTS	% der TS	93,3	91,0	89,1	87,5	86,0	84,7	83,6	82,5	81,6	80,8	80,0
	Nges	g/kg	4,3	4,2	4,1	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
	NH4-N	g/kg	0,9	1,3	1,5	1,7	1,8	1,8	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0
BGA Inhalt Konzentr.	TS	% der FM	6,2	5,8	5,6	5,4	5,4	5,3	5,3	5,2	5,2	5,2	5,2
	oTS	% der TS	61,8	62,4	62,8	63,0	63,1	63,2	63,2	63,3	63,3	63,4	63,4
	Nges	g/kg	5,8	5,1	4,8	4,6	4,5	4,4	4,3	4,3	4,3	4,2	4,2
	NH4-N	g/kg	?										
	OLR	kg/(m <sup>3</sup> *d)	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3
	HRT	d	115,6	80,7	62,1	50,4	42,4	36,7	32,3	28,8	26,0	23,7	21,8

Die Verringerung des Anteils an Mais-GPS muss mit überproportionalem Anstieg des Anteils der Rindergülle kompensiert werden, um konstante Methanmengen zu erzeugen. Aufgrund des höheren Wasseranteils der Rindergülle verringert sich dabei die Konzentration von Gesamtstickstoff im Substratmix, wobei sich der Anteil von Ammoniumstickstoff erhöht. Hier ist also die Notwendigkeit zur Verringerung des Ammoniumgehalts bei vermehrter

Güllefütterung erkennbar, wenngleich die Konzentrationen nicht übermäßig hoch sind bei Rindergülle. Gleichzeitig ist jedoch auch erkennbar, dass die organische Belastung des Gärraums zunimmt und sich die Verweilzeit stark verringert. Bereits bei 30 % relativer Verringerung des Maisanteils sinkt die Verweilzeit auf 50 Tage, sodass hier eine den Literaturwerten entsprechende Gasausbeute vermutlich bereits unterschritten wird. Das Hauptproblem ist also der Wasseranteil im Substrat. Würde man nun die untersuchte Aufbereitungsanlage zur Abtrennung von Wasser und Ammoniumstickstoff einsetzen, würde sich wiederum der Stickstoff durch die Wasserreduktion aufkonzentrieren.

### Ergebnisse der Aufbereitung von Gärrest

Es wurden zwei Versuche zur Aufbereitung von Gärrest durchgeführt. Der erste Versuch erfolgte über einen Zeitraum von 5 Stunden, wobei stündlich Proben von den flüssigen Stoffströmen genommen wurden. Die stündlichen Proben eines Stoffstroms wurden anschließend zu einer Gesamtprobe des Stoffstroms gemischt (Sammelprobe) und tiefgefroren zur chemischen Analyse an ein akkreditiertes Labor geschickt. Der zweite Versuch diente der genaueren Erfassung der Menge der Stoffströme, dass diese über den längeren Zeitraum von 27 Stunden genauer erfasst werden konnten.

Aus den gewonnenen Daten lässt sich folgende Bilanz des Aufbereitungsprozesses aufstellen:

*Tabelle 6: Versuch zur Aufbereitung von Gärrest - Bilanz der Fest/Flüssig-Trennung*

Frachten	Gärrest	Abgepr. Feststoff	Dickschlamm	Filtrat	Bilanzrest $\Delta$
FM (kg/d)	59126* $\pm$ 1653	6048 $\pm$ 192	19949 $\pm$ 299	33130 $\pm$ 497	0 $\pm$ 2641
Wasser (kg/d)	54872 $\pm$ 3180	4795 $\pm$ 296	18684 $\pm$ 841	31738 $\pm$ 1428	-345 $\pm$ 5745
TS (kg/d)	4168 $\pm$ 242	1253 $\pm$ 77	1265 $\pm$ 57	1391 $\pm$ 63	259 $\pm$ 439
oTS (kg/d)	3287 $\pm$ 322	1070 $\pm$ 109	937 $\pm$ 80	1053 $\pm$ 89	227 $\pm$ 600
N <sub>ges</sub> (kg/d)	254 $\pm$ 20	46 $\pm$ 4	90 $\pm$ 6	132 $\pm$ 9	-13 $\pm$ 38
NH <sub>4</sub> -N (kg/d)	111 $\pm$ 12	16 $\pm$ 2	37 $\pm$ 3	57 $\pm$ 5	1 $\pm$ 23
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/d)	116 $\pm$ 9	45 $\pm$ 4	32 $\pm$ 2	25 $\pm$ 2	15 $\pm$ 16
K <sub>2</sub> O (kg/d)	301 $\pm$ ?	29 $\pm$ ?	102 $\pm$ ?	167 $\pm$ ?	3 $\pm$ ?

\*Menge bilanziell ermittelt

Tabelle 7: Versuch zur Aufbereitung von Gärrest - Bilanz der Verdunstungsanlage HEF

Frachten	Filtrat	Konzentrat	Kondensat	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	ASL	Zuluft	Abluft	Bilanzrest Δ
FM (kg/d)	33130 ± 497	25608 ± 384	7709 ± 231	120 ± 2	361 ± 2	62865 ± 1893	67846 ± 4005	-5408 ± 7014
Wasser (kg/d)	31738 ± 1428	24194 ± 1089	7709 ± 231	26 ± 2	240 ± 5	504 ± 86	5495 ± 1176	-5370 ± 4017
TS (kg/d)	1391 ± 63	1414 ± 64						-22 ± 126
oTS (kg/d)	1053 ± 89	1069 ± 91						-16 ± 180
N <sub>ges</sub> (kg/d)	132 ± 9	82 ± 5			(25 ± 3)			25 ± 14
NH <sub>4</sub> -N (kg/d)	57 ± 5	16 ± 2	0,2 ± 0,02		25 ± 3		0,67	15 ± 9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/d)	25 ± 2	26 ± 2						-2 ± 3
K <sub>2</sub> O (kg/d)	167 ± ?	171 ± ?						-4 ± ?
S (kg/d)				31 ± 2	32 ± 2			-1 ± 4

Tabelle 8: Versuch zur Aufbereitung von Gärrest - Konzentrationen der Inhaltstoffe der Stoffströme

Konzentrationen	Gärrest	Abgepr. Feststoff	Dickschlamm	Filtrat	Konzentrat	ASL	Kondensat
TS (% der FM)	7,1	20,7	6,3	4,2	5,5		
oTS (% der TS)	78,9	85,4	74,1	75,7	75,6		
N <sub>ges</sub> (kg/t <sub>FM</sub> )	4,31	7,58	4,51	3,98	3,21		
NH <sub>4</sub> -N (kg/t <sub>FM</sub> )	1,88	2,69	1,84	1,71	0,63	68,10	0,26
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/t <sub>FM</sub> )	1,97	7,42	1,59	0,74	1,02		
K <sub>2</sub> O (kg/t <sub>FM</sub> )	5,10	4,75	5,12	5,05	6,69		
pH	7,56		7,59	7,70	8,92	7,648	9,95

Die tabellierten Werte der Bilanzierung sind jeweils der Messwert  $\pm$  die Fehlergrenze, welche sich aus der Fehlergrenze der Messgeräte und der Unsicherheit der Labormesswerte ergibt. Dabei zeigt sich, dass nicht für alle Parameter eine plausible Bilanz aufgestellt werden kann und somit Messfehler vorliegen. Die Herkunft der Messfehler konnte nicht geklärt und auch nicht einem Messgerät oder einem Laborparameter zugeordnet werden. Daher konnte auch keine Korrektur erfolgen.

Die Bilanzierung zeigt, dass eine Auftrennung von Nährstoffen erfolgt ist. Phosphor wurde hauptsächlich im abgepressten Feststoff der ersten Separationsstufe aufkonzentriert. Eine Aufkonzentrierung von Ammonium erfolgt erwartungsgemäß in der Ammoniumsulfatlösung. Etwa 22 % des Ammoniumstickstoffs des Gärrests werden in ASL konzentriert gebunden. Dafür werden  $7 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg NH}_4\text{-N}$  an elektrischer Arbeit und  $120\text{-}152 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg NH}_4\text{-N}$  an Wärme benötigt. Die Abluft enthält nach der Gaswäsche noch durchschnittlich 10 ppm Ammoniak. Das Kondensat enthält etwa 26 mg/L Ammoniumstickstoff und hat 38 mg/L chemischen Sauerstoffbedarf (CSB).

Zusätzlich zur Trennung von Nährstoffen werden auch ca. 14 % des Wassers des Gärrests mit dem Kondensat abgetrennt und 9 % verdunstet. Dadurch kommt es zur Anreicherung von Kalium im Konzentrat.

Stromverbrauch ca.  $173 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{d} - 7 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{kg NH}_4\text{-N}$

Wärmeverbrauch zwischen  $2.960$  und  $3.750 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{d} - 120\text{-}152 \text{ kWh}_{\text{th}}/\text{kg NH}_4\text{-N}$

Abscheidegrad  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus Gärrest in ASL:  $22 \pm 4 \%$

Abscheidegrad  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus Filtrat in ASL:  $43 \pm 8 \%$

Die Ergebnisse der Nährstoffauftrennung bei der Behandlung von Gärrest wurden im Weiteren genutzt, um zu modellieren, wie sich die Abscheidung von Ammoniumstickstoff auf eine Biogasanlage auswirkt, wenn die Aufbereitung im Rezirkulatstrom erfolgt.

### **Darstellung der Modellierung der BGA Betrieb B auf Basis der Versuchsergebnisse bei der Aufbereitung von Gärrest und der durchschnittlichen Fütterung im Frühjahr 2020**

Die konkrete Fragestellung im Projekt war, wie der Anteil von Gülle in der Fütterung von Biogasanlagen erhöht werden kann. Zentrales Problem sind dabei zum einen der hohe Wasseranteil und damit die geringe Energiedichte der Gülle und zum anderen der erhöhte Anteil an Stickstoff. Beide Probleme kann die untersuchte Aufbereitungsanlage lösen. Allerdings scheiterte die direkte Aufbereitung von Gülle am schwierig kontrollierbaren Separationsprozess. Neben der Behandlung von Gülle direkt vor der Zugabe zur Biogasanlage besteht auch die Möglichkeit den Inhalt der Biogasanlage, also das Gärmedium oder Gärrest, zu behandeln, um Ammonium und Wasser abzutrennen. Anschließend würden die

abgereicherten Stoffe in die Biogasanlage zurückgeführt. Dieses Szenario wurde mittels Modellierung untersucht.

Dabei wurden folgende Betriebszustände verglichen:

1. Betrieb der Biogasanlage mit Gärrestrückführung
2. Betrieb der Biogasanlage mit Aufbereitung des Gärrest und Rückführung von Feststoff, Dickschlamm und Konzentrat
3. Betrieb der Biogasanlage mit Aufbereitung des Gärrest und Rückführung von Dickschlamm und Konzentrat
4. Betrieb der Biogasanlage mit Aufbereitung des Gärrest und Rückführung von Dickschlamm, Konzentrat und Kondensat

Die Randbedingungen der Modellierung entsprechen der Biogasanlage des Betriebs auf Betrieb B. Die Fütterung erfolgt mit etwa einem Drittel Rindergülle, welche sich zu 50 % als Milchviehgülle und 50 % aus Mastgülle zusammensetzt (Tabelle 1), und zwei Dritteln Mais-Ganzpflanzensilage. Bei den Varianten mit Rezirkulation werden 75 m<sup>3</sup>/d als Rezirkulatmenge angesetzt, so wie es im praktischen Betrieb erfolgt. Die Biogasanlage verfügt über vier serielle Gärbehälter. Der Gärraum wird im hiesigen statischen Modell als ein großer Raum angenommen. Die Biogasanlage erzeugt eine durchschnittliche tägliche Methanmenge von 6.523 m<sup>3</sup>, was einer Ausbeute von 122 % des theoretischen Methanpotentials der Substrate nach Literaturwerten entspricht. Das ist in der Praxis nicht untypisch und plausibel (vgl. Biogasmessprogramm III). Im Folgenden sind die vier Varianten grafisch dargestellt:

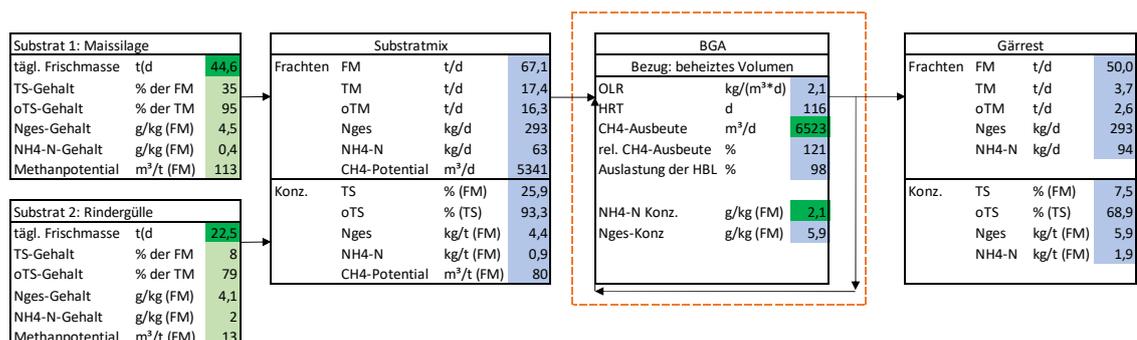


Abbildung 1: Variante 1 - BGA Betrieb B mit Rezirkulation in Bilanzgrenze

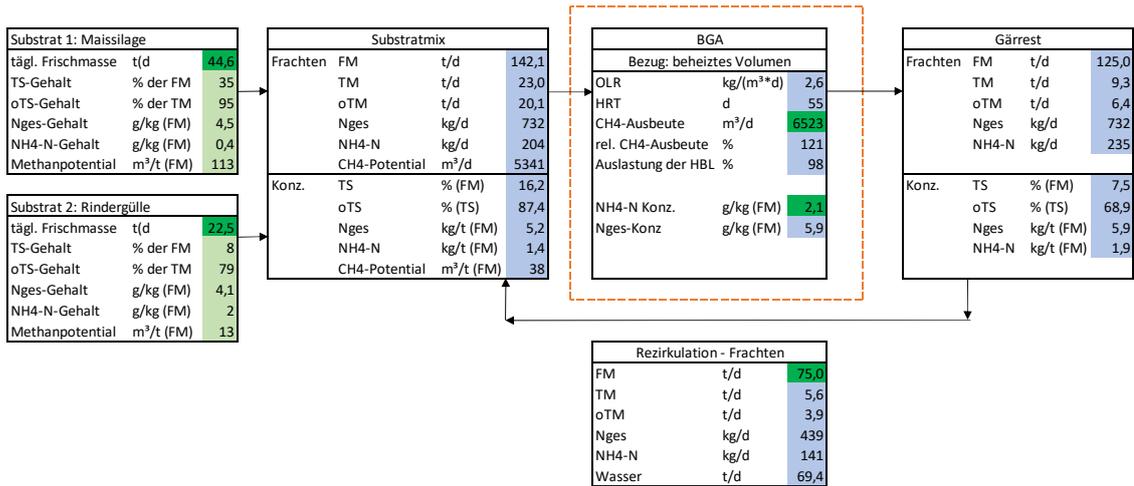


Abbildung 2: Variante 1 - BGA Betrieb B mit Rezirkulation außerhalb der Bilanzgrenze

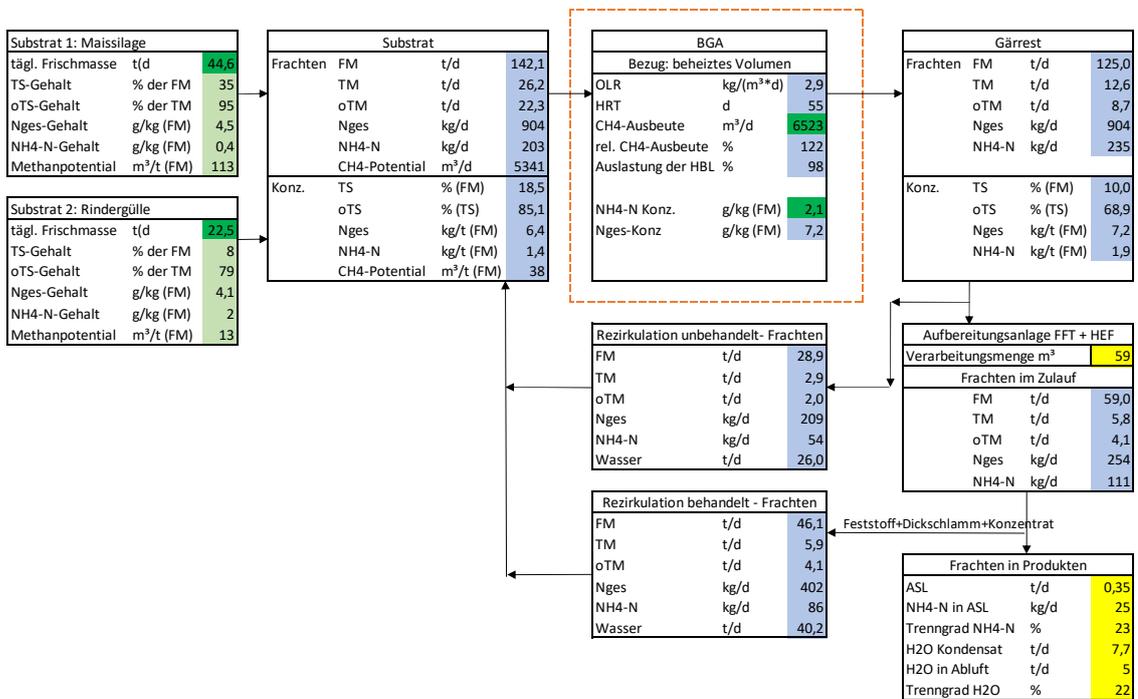


Abbildung 3: Variante 2 - BGA Betrieb B mit Aufbereitung und Rezirkulation von Feststoff, Dickschlamm und Konzentrat

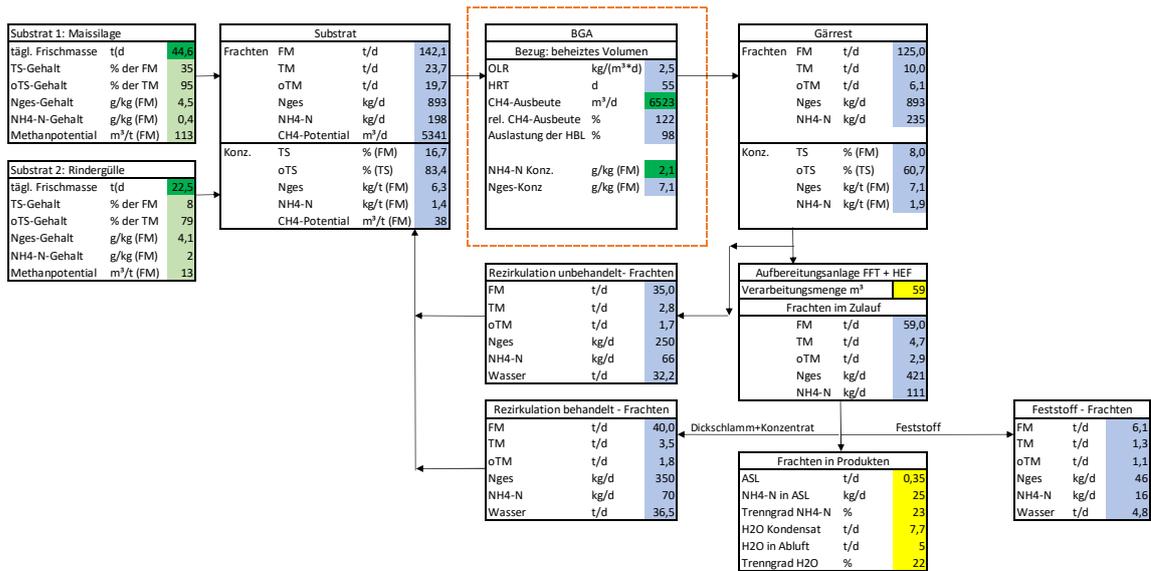


Abbildung 4: Variante 3 - BGA Betrieb B mit Aufbereitung und Rezirkulation von Dickschlamm und Konzentrat

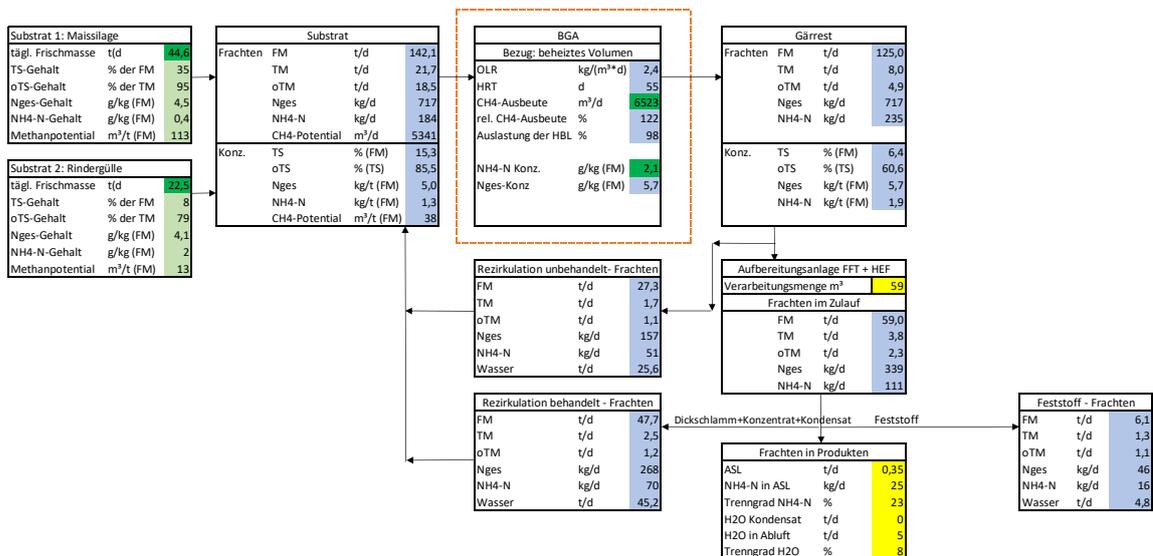


Abbildung 5: Variante 4 - BGA Betrieb B mit Aufbereitung und Rezirkulation von Dickschlamm, Konzentrat und Kondensat

### Szenario 1: Abtrennung von Ammoniumstickstoff und Wasser aus dem Rezirkulat

In diesem Szenario wird ein Teil des Rezirkulatstroms aufbereitet, wobei die Leistungsparameter jenen des praktischen Versuchs entsprechen. Der abgespresste Feststoff, der Dickschlamm und das Konzentrat werden der Biogasanlage wieder zugeführt. Somit erfolgt selektiv eine Abtrennung von Wasser und Ammoniumstickstoff. Außerdem werden ca. 29 m<sup>3</sup> Rezirkulat unbehandelt zurückgeführt, sodass insgesamt wieder 75 m<sup>3</sup> Rezirkulat in die BGA gelangt, wie in Variante 1.

Die Auswirkungen des Szenarios sind ein Anstieg von (Gesamt-)Stickstoff im Gärmedium von 5,9 auf 7,2 g/kg sowie ein Anstieg des Trockensubstanzgehalts im Fermenter von 7,5 % auf 10 %. Beides sind direkt Auswirkungen der Abtrennung von Wasser. Über die Auswirkungen auf den Gehalt an Ammoniumstickstoff im Fermenter kann mit diesem Modell keine Aussage getroffen werden, weil die Kinetik der Mineralisierung des Gesamtstickstoffs nicht bekannt ist. Der in den Grafiken

dargestellte Wert für den Ammoniumstickstoff ist der Messwert aus der praktisch durchgeführten Variante 1. Es wäre denkbar, dass der Gehalt an Ammoniumstickstoff im Fermenter infolge erhöhter Konzentration an Gesamtstickstoff ansteigt.

Durch den Anstieg des Trockensubstanzgehalts im Fermenter ist zu erwarten, dass die Rührfähigkeit des Gärmediums abnimmt und ein erhöhter Energiebedarf für die Durchmischung entsteht. Das wirkt sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage aus.

### **Szenario 2: Abtrennung von Ammoniumstickstoff, Wasser und Feststoff aus dem Rezirkulat**

Um den Anstieg des Trockensubstanzgehalts im Gärmedium zu begrenzen, wird in diesem Szenario auch der abgepresste Feststoff aus dem Rezirkulat entfernt. Um die rezirkulierte Gärrestmenge konstant zu halten, wird etwas mehr unbehandelter Gärrest rezirkuliert.

Die Auswirkungen in diesem Szenario sind ein leicht geringerer Anstieg des Gehalts an Gesamtstickstoff von 5,9 g/kg auf 7,1 g/kg im Vergleich zu 7,2 g/kg im Szenario 1. Zusätzlich ist der Anstieg des Trockensubstanzgehalt von 7,5 % auf 8 % deutlich geringer als im Szenario 1 mit 10 %. Dadurch ist die Änderung der Rührfähigkeit nur gering. Das Szenario 2 wäre demnach dem Szenario 1 zu bevorzugen, wenn die Änderungen gegenüber dem Ausgangszustand ohne Aufbereitung geringgehalten werden sollen. In beiden Szenarien kommt es jedoch immer zur Anreicherung von Gesamtstickstoff und Trockensubstanz durch die Abtrennung von Wasser. Das lässt sich nur verhindern, indem auch das Kondensat zurückgeführt wird. Wird das gesamte Kondensat in die Biogasanlage zurückgeführt, sinkt der Gehalt an Gesamtstickstoff im Gärmedium auf 5,7 g/kg und der Trockensubstanzgehalt auf 6,4 %. Auf diese Weise ließen sich die Prozessparameter gegenüber dem Ausgangszustand verbessern, auf Kosten verringerter Wasserabtrennung und damit zu Lasten der begrenzten Lagerkapazität des Gärrestlagers. Diese Betriebsweise ist im Vergleich damit die einzige Möglichkeit den Stickstoffgehalt im Fermenter zu reduzieren.

### **Bewertung der Aufbereitung von Rindergülle auf Basis der Modellierung**

Die Aufbereitung von Rindergülle für den Ersatz von Energiepflanzen wie Mais in der Substratfütterung erscheint nicht sinnvoll. Hauptproblem ist der hohe Wasseranteil in der Rindergülle. Um eine dem Mais entsprechende frischmasse-spezifische Energiedichte (hinsichtlich Methanpotential) zu erreichen müsste die Rindergülle um den Faktor 8 aufkonzentriert werden. Das führt allerdings zu erheblicher Aufkonzentrierung von Stickstoff (Gesamtstickstoff). Die Aufbereitungsanlage kann nur Ammoniumstickstoff aus der Gülle entfernen. Der organisch gebundene Anteil würde sich durch den Wasserentzug sehr stark erhöhen.

## **Betrieb in Betrieb A**

Der landwirtschaftliche Betrieb A betreibt Schweinezucht neben einer Biogasanlage. Die Anlage besteht aus drei parallelen Fermentern mit zwei seriell nachgeschalteten Nachgärern und Gärproduktlagern. In der BGA werden Mais-GPS, Zuckerrüben, Rindermist, Pferdemist und Schweinegülle eingesetzt. Die drei Fermenter bekommen alle die gleiche Substratzufuhr. Im Projekt wurde das Ziel verfolgt, die Fütterung eines Fermenters umzustellen und einen Teil der Energiepflanzen mit Hühnertrockenkot (HTK) zu ersetzen. Da HTK hohe Gehalte an Stickstoff enthält, sollte der HTK vor Zugabe zum Fermenter mit Hilfe einer Aufbereitungsanlage an Ammoniumstickstoff abgereichert werden. Da Ammonium wasserlöslich ist und die Aufbereitungsanlage nur Flüssigkeiten verarbeiten kann, sollte der HTK vor der Behandlung mit Schweinegülle gemischt werden. Diese Mischung sollte aufbereitet werden und die entstehenden Stoffströme an unterschiedlichen Stellen dem Prozess wieder zugeführt werden (siehe Fließbild bei Gülleaufbereitung).

## **Versuch zur Gülleaufbereitung auf Betrieb A**

Die Aufbereitungsanlage der BGA Betrieb A verarbeitet normalerweise Gärrest. In einem Versuch sollte nun die Aufbereitung von einer Schweinegülle-HTK-Mischung erprobt werden. Dazu wurde ein Container zum Anmischen der Gülle verwendet.

Im ersten Versuch wurden ca. 40 m<sup>3</sup> Schweinegülle mit 9 t HTK gemischt. Diese Mischung wurde dann der Aufbereitungsanlage zugeführt. Im ersten Prozessschritt soll dort der Feststoff mit einem Pressschneckenseparator abgetrennt werden. Dies gelang jedoch nicht, da sich kein fester Filterkuchen als Pfropfen am Separator bildete. Um die Bildung eines Filterkuchens zu verbessern, wurden der Güllemischung noch 12 t vom festen Anteil von bereits separierte Rindergülle als Strukturmaterial zugemischt. Doch auch damit bildete sich kein Pfropfen. Der Separator lief immer wieder über. Eine Separation fand somit nicht statt. Trotz Variation von Sieb, Blenden und der Güllemischung konnte kein stabiles Separationsergebnis erzielt werden. Die Versuche wurden daraufhin abgebrochen. Eine Bewertung der Technik für die Aufbereitung von HTK und Schweinegülle kann aufgrund fehlender praktischer Daten nicht erfolgen.



## V. Projektbericht Universität Bayreuth

# **ENEGÜLL: Energie- und Nährstoffeffizienz von Gülle**

*Innovationsprojekt: „Gülleaufbereitung zur landwirtschaftlichen Erzeugung  
nährstoffoptimierter Düngemittel und zur Verringerung des Einsatzes  
Nachwachsender Rohstoffen in Biogasanlagen“*

Endbericht Teilvorhaben: Gasertrag und Biologie (AP 4)

Laufzeit: 01.07.2018 – 30.06.2021

Prof. Dr. Ruth Freitag, Stanislava Mlinar  
Lehrstuhl für Bioprozesstechnik  
Universität Bayreuth

August 2021



## Bewertung des Gasertrages und des biologischen Verhaltens der Produkte im Biogasprozess

### 1. Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Projektablauf an der Universität Bayreuth wurde in drei Arbeitspakete unterteilt:

**Arbeitspaket 1:** Charakterisierung der am Projekt beteiligten Biogasanlagen (Populationsanalyse, mikrobielle Umsetzungen, etc.). Korrelation zu den dokumentierten Gaserträgen/Prozessparametern (Anlagentagebücher) und zur bislang erreichten Effizienz der Vergärung. Zusätzlich werden systematische Gärversuche (Satellitenexperimente) am Lehrstuhl etabliert und durchgeführt, um Reproduzierbarkeit und Robustheit der mikrobiellen Umsetzungen zu dokumentieren. Diese Werte bilden die Basis für die nachfolgenden Untersuchungen mit den aufbereiteten Substraten.

**Arbeitspaket 2 (ab Q4, 04/19):** Gärversuche zu Bewertung der aufbereiteten Substrate hinsichtlich Gasertrag und mikrobieller Umsetzung / Populationsstabilität.

Die Vergärung in der Biogasanlage ist der verfahrenstechnische Schritt, in welchem das in seiner Zusammensetzung optimierten bzw. definierten aufbereitete Substrat in den gesuchten nährstoffoptimierten Dünger überführt wird. Hierzu müssen in AP\_UBT2 zwei wesentliche Aspekte geklärt werden: 1) Welche Auswirkungen hat die geänderte Zusammensetzung der Substrate auf die Effizienz der Biogaserzeugung aber auch auf die Biogasqualität und 2) Welche Auswirkungen hat dies auf die Zusammensetzung der Gärreste. Beim letztgenannten Punkt sind auch verfahrenstechnische Aspekte wie die Verweilzeit zu berücksichtigen. **Ziel:** Relative Evaluierung der Auswirkungen der jeweiligen Substratzusammensetzungen auf den Prozess.

Laborversuche zur Auswirkung der Belastung mit Stickstoff bis zum 15 L Maßstab.

**Arbeitspaket 3 (ab Q5, 07/19):** Bewertung der technischen Anlagen bei Betrieb mit vorbehandeltem Substrat. **Ziel:** Der Erfolg der Substratvorbehandlung wird dokumentiert (höherer Gasertrag, stabilere Prozessführung, o.ä.), die Ergebnisse fließen in die verfahrenstechnische Bewertung sowie die Definition der jeweils optimalen Substratzusammensetzung ein. Dabei werden Hypothesen aus AP\_UBT2 hinsichtlich der Effekte verifiziert.

### 2. Anleitung

Biogasproduktion/Anaerobe Vergärung ist ein komplexer Prozess, der trotz der umfangreichen Forschung immer noch nicht ganz voraussagbar ist. Deswegen sind signifikante Änderungen der Prozessparameter oder Substrat riskant für einen Prozess im Industriemaßstab. Wenn Substrat

geändert wird, sodass zum Beispiel mehr Tierabfälle wie Gülle benutzt werden, um das Nutzen von NawaRo zu reduzieren, können die Biogaszusammensetzung (mehr Methan von Proteinen als von Kohlenhydraten (Weiland 2010)), Neben- und Zwischenprodukte und die Prozessproduktivität und -stabilität beeinflusst werden. Um die Änderungen in einer Anlage besser verstehen und charakterisieren zu können wird die mikrobielle Population untersucht, weil sie in einer direkten Korrelation mit Substratzusammensetzung und Biogasproduktion ist.

### Prozessschritte

Biogas wird durch vier Prozessschritte aus komplexen organischen Substraten produziert: Hydrolyse, Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese (Rosenwinkel et al. 2015). Die vier Schritte des Prozesses sind in Abbildung 6 schematisch dargestellt.

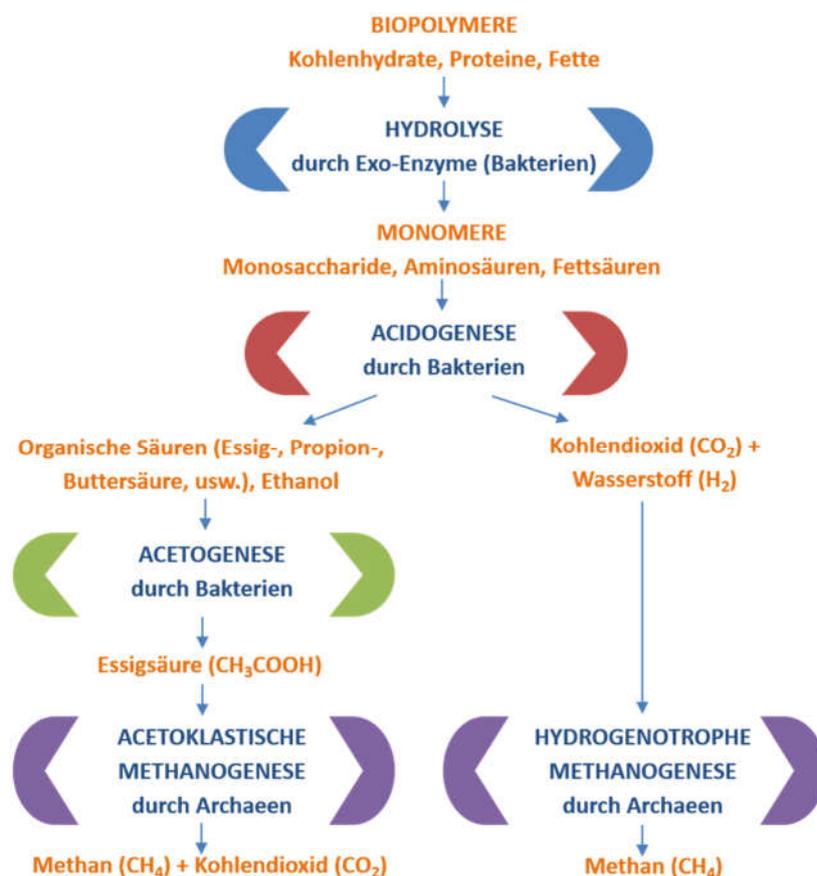


Abbildung 6. Biogaserzeugung aus Biopolymeren/komplexen organischen Substraten

### Mikrobielle Population

Die häufigsten Mikroorganismen in Biogasanlagen sind Bakterien, die für die ersten Substratabbauschritten zuständig sind (Hydrolyse, Acidogenese und Acetogenese). Archaeen gehören zu einer anderen Gruppe (einer anderen Domain) von Mikroorganismen, die für die Methanogenese (Methanbildung aus Acetat bzw. Wasserstoff und Kohlendioxid) verantwortlich sind. In *Tabelle 9* ist ein Überblick der häufigsten methanogenen Archaeen und deren Substrate gegeben.

Es gibt drei metabolische Wege, die zur Methanbildung führen:

### 1. Acetoklastische Methanogenese

CH<sub>4</sub> und CO<sub>2</sub> werden aus Acetat produziert. Zuständige Mikroorganismen sind acetoklastische Archaeen. Sie sind bei höheren Ammoniakkonzentrationen (> 3 g/L Gesamt-Ammoniakstickstoff) gehemmt.

### 2. Hydrogenotrophe Methanogenese

CH<sub>4</sub> wird aus CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> produziert. Zuständige Mikroorganismen sind hydrogenotrophe Archaeen.

### 3. Syntropische Acetatoxydation

Acetat wird von Bakterien zu CO<sub>2</sub> oxidiert, wobei noch H<sub>2</sub> produziert wird. Danach kann die hydrogenotrophe Methanogenese durch Archaeen stattfinden.

Tabelle 9. Die häufigsten methanogenen Archeen und deren Substrate, bzw. metabolische Wege zur Biogaserzeugung (Garrity et al. 2001)

Ordnung	Gattung	Substrat	Metabolismus
<i>Methanosarcinales</i>	<i>Methanosaeta</i>	Acetat	acetoklastisch
	<i>Methanosarcina</i>	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Methanol, Methylamine, Acetat	hydrogenotroph/ acetoklastisch
<i>Methanomicrobiales</i>	<i>Methanospirillum</i>	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	hydrogenotroph
	<i>Methanoculleus</i>	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Alkohole, Formiat	
<i>Methanobacteriales</i>	<i>Methanobacterium</i>	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	
	<i>Methanobrevibacter</i>	H <sub>2</sub> + CO <sub>2</sub> , Formiat	

### Ammoniakhemmung

Anaerober Abbau von proteinhaltigen Substraten wie Gülle führt zur Ammoniakproduktion. Niedrigere TAN-Konzentrationen (TAN: Gesamt-Ammoniakstickstoff) (50 – 200 mg/L) sind für die Zellen von Vorteil (McCarty 1964). Darüber hinaus sollten geringfügig höhere Konzentrationen von 250 – 1000 mg/L keine Nebenwirkungen zeigen. Konzentrationen im Bereich 1500 – 3000 mg/L wirken bei höheren pH-Werten hemmend, da die Konzentrationen von freiem Ammoniak höher sind als bei niedrigeren pH-Werten, während TAN-Konzentrationen über 3000 mg/L unabhängig vom pH-Wert und der Ammoniakform toxisch sind. Eine Ammoniakhemmung kann durch höhere Konzentrationen von flüchtigen Säuren und niedrigere Methanausbeute beobachtet werden (Angelidaki und Ahring 1993).

In Schlämmen kann Ammoniak in Form des Ammoniumions ( $\text{NH}_4^+$ ) oder als gelöstes Ammoniakgas ( $\text{NH}_3$ ) vorliegen. Die beiden Formen stehen im Gleichgewicht, das vom pH-Wert abhängt:  $\text{NH}_4^+ \rightleftharpoons \text{NH}_3 + \text{H}^+$ . Je niedriger der pH-Wert, desto höher der  $\text{NH}_4^+$ -Anteil und desto niedriger die  $\text{NH}_3$ -Konzentration. Die Hemmkonzentration von  $\text{NH}_3$  ist niedriger als die von  $\text{NH}_4^+$  (McCarty 1964).

### 3. Methoden

Die Proben zu DNA-Analysen wurden auf den Anlagen ca. jede zwei Wochen genommen, dort gefroren und im gefrorenen Zustand im Trockeneis transportiert. Danach wurden sie aufgetaut und DNA wurde extrahiert. Es wurden zwei Analysen der mikrobiellen Populationen durchgeführt:

1. ARISA: Sie zeigt wie ähnlich die in einem Lauf analysierten Proben sind bzw. wann zu einer relevanten Änderung der mikrobiellen Population kam.
2. DNA-Sequenzierung (NGS: eng. Next Generation Sequencing): Sie zeigt welche Mikroorganismen in den Anlagen vorhanden waren und in welchen Verhältnissen sie zueinander standen. Da es relativ bekannt ist, welche Mikroorganismen für welche Reaktionen zuständig sind, kann diese Analyse Informationen über eine potentielle Hemmung/Prozessstabilität und die metabolischen Wege des Prozesses liefern.

DNA-Extraktion und die durchgeführten Analysen sind in Mlinar et al. (2020) beschrieben. Zusätzlich wurde die Stickstoffkonzentration (TAN: eng. Total Ammonium Nitrogen; Stickstoff aus  $\text{NH}_4^+$  und  $\text{NH}_3$ ) mithilfe des Ammonium-Tests (Merck) bestimmt.

### 4. Ergebnisse

Schlammproben zur DNA-Sequenzierung wurden mit ARISA jede 3-6 Monate analysiert. Die Ergebnisse zeigten wann eine größere Änderung der mikrobiellen Population stattfand. Die ARISA-Ergebnisse sind im Anhang zu sehen und sie dienten als die Grundlage zur Entscheidung, welche Proben weiter analysiert werden sollen. In der letzten Phase des Projektes (Zeitraum: Sep 2020 – Mai 2021) wurden alle Proben direkt ohne ARISA-Voranalyse sequenziert, da die Anlagen im Projektbetrieb liefen.

*Abbildung 7* präsentiert die Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben. Die Prozente auf den Achsen zeigen, in welcher Richtung die Änderung stärker war. Es ist deutlich zu sehen, dass sich die Proben aus jeweiligen Anlagen gruppieren und dass eine zeitliche Änderung/Anpassung der Mikroorganismen in allen Anlagen stattfand. Aus Betrieb D wurden nur die Nullproben analysiert und keine weiteren Proben waren vorhanden.

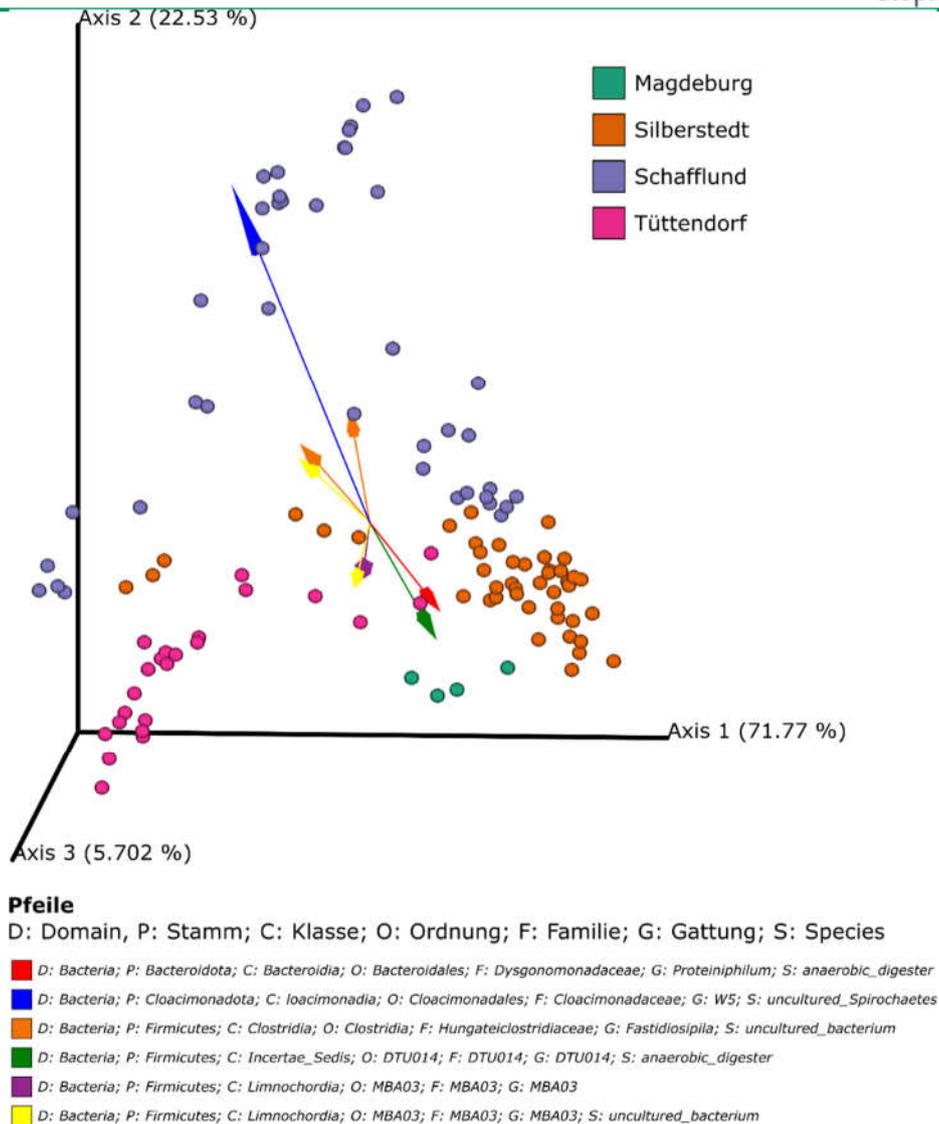
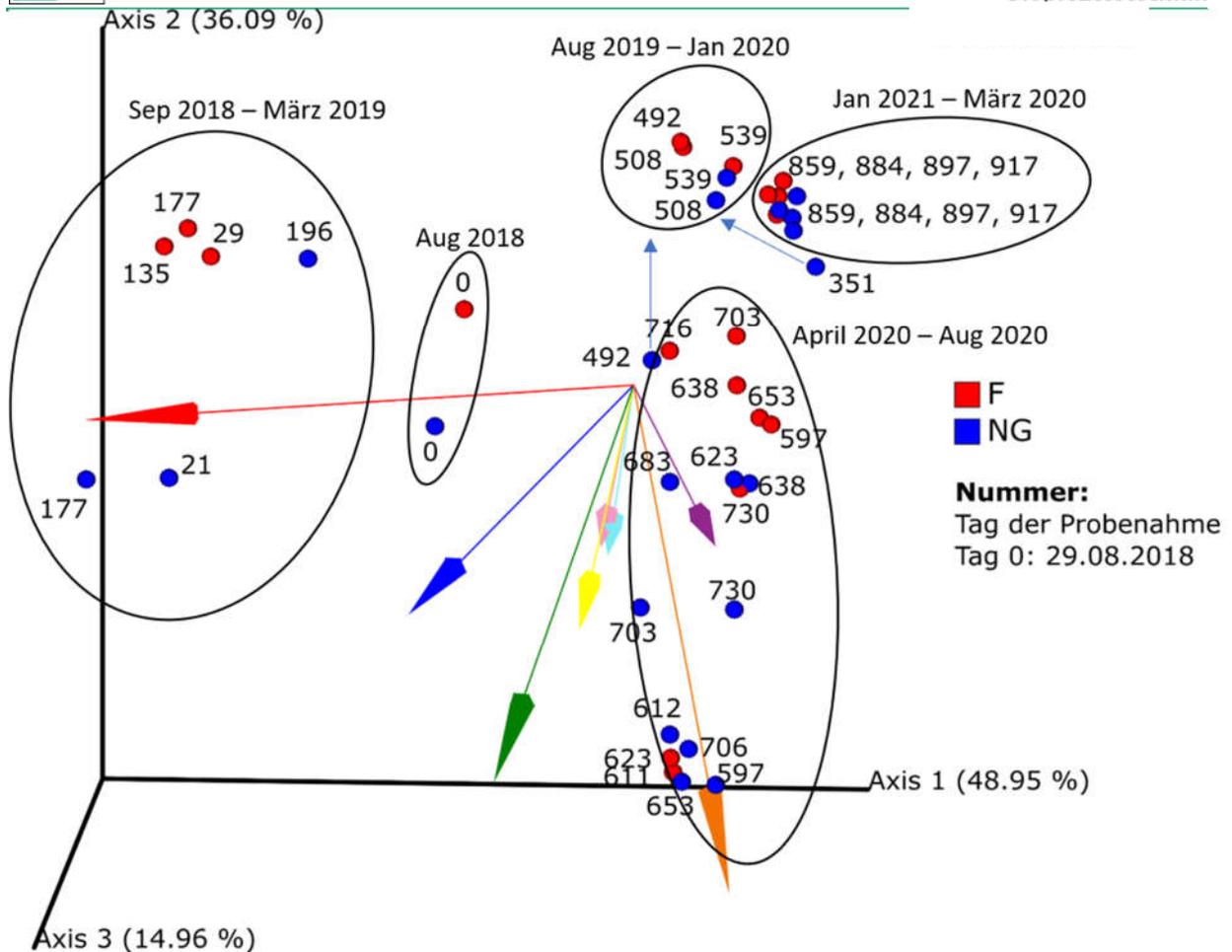


Abbildung 7. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus im Projekt beteiligten Anlagen

### Mikrobielle Anpassung in der Betrieb B-Anlage

Die Analysen der Proben aus Betrieb B zeigen zeitliche Änderungen sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer (Abbildung 8). Schon in den ersten Wochen fand eine deutliche Änderung der mikrobiellen Population statt. Dann wurde die Fütterung hochgefahren, da es im Herbst und im Winter mehr gefüttert wird. Zusätzlich wurde mit Zuckerrübe gefüttert, die schnell verfügbare Kohlenhydrate enthält (FNR, 2021) und deswegen zu einer schnellen Säureproduktion und pH-Senkung führen kann.



### Pfeile

D: Domain, P: Stamm; C: Klasse; O: Ordnung; F: Familie; G: Gattung; S: Species

- D: Archaea; P: Halobacterota; C: Methanosarcinia; O: Methanosarciniales; F: Methanosarcinaceae; G: Methanosarcina
- D: Bacteria; P: Bacteroidota; C: Bacteroidia; O: Bacteroidales; F: Bacteroidales\_UCG-001; G: Bacteroidales\_UCG-001
- D: Bacteria; P: Caldatribacteriota; C: Caldatribacteriia; O: Caldatribacteriales; F: Caldatribacteriaceae; G: Candidatus\_Caldatribacterium
- D: Bacteria; P: Cloacimonadota; C: Cloacimonadia; O: Cloacimonadales; F: Cloacimonadaceae; G: W5; S: uncultured\_Spirochaetes
- D: Bacteria; P: Cloacimonadota; C: Cloacimonadia; O: Cloacimonadales; F: W27; G: W27; S: uncultured\_Cloacimonetes
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Clostridia; O: Clostridia; F: Hungateiclostridiaceae; G: Fastidiosipila; S: uncultured\_bacterium
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Clostridia; O: Peptostreptococcales-Tissierellales; F: Sedimentibacteraceae; G: Sedimentibacter
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Clostridia; O: Peptostreptococcales-Tissierellales; F: Sedimentibacteraceae; G: Sedimentibacter; S: uncultured\_bacterium

Abbildung 8. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus Betrieb B

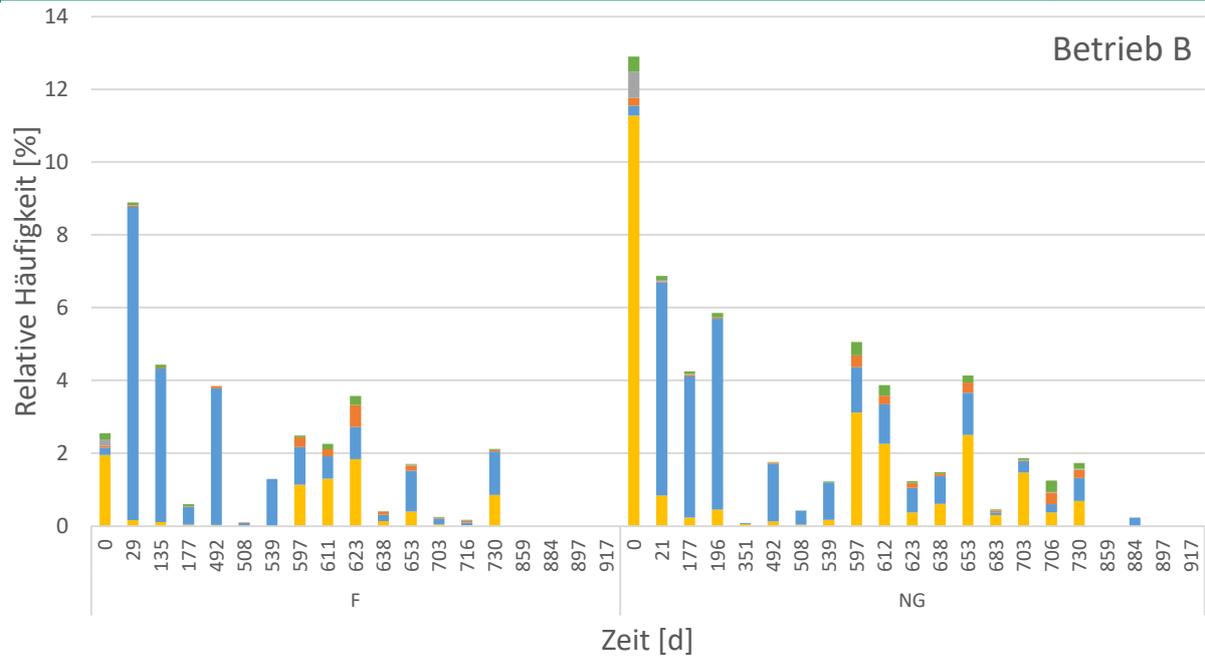
Die Anlage wurde mit der Entwicklung der methanogenen Gattung *Methanosarcina* charakterisiert (Rote Pfeile, *Abbildung 8*). In den Nullproben war die acetoklastische Gattung *Methanosaeta* die häufigste, jedoch wurde sie schon nach wenigen Tagen (im September 2018) mit der Gattung *Methanosarcina* ersetzt (*Abbildung 9*). *Methanosarcina* ist am meistens eine hydrogenotrophe Gattung. Nichtsdestotrotz können diese Mikroorganismen auch Acetat abbauen, wenn eine Hemmung der acetoklastischen Methanogenese stattfindet. Dies wurde mit Laborversuchen bestätigt. Der Abstieg von *Methanosaeta* kann mit höheren Konzentrationen von Substrat bzw. Ammoniak erklärt werden. Einerseits führt eine pH-Senkung (Fütterung mit Zuckerrübe) zur Hemmung des Acetatabbaus,

andererseits hemmt eine höhere Ammoniakkonzentration (mehr proteinhaltige Substrate/Gülle) diese Mikroorganismen.

Eine weitere Gruppierung ist für den Zeitraum Aug 2019 – Jan 2020 zu sehen. Diese Proben wurden mit einer Senkung von Archaeen (Methan produzierenden Mikroorganismen) charakterisiert.

Ab April 2020 steigt die Diversität von Archaeen in der Anlage, sowohl von acetoklastischen als auch von hydrogenotrophen Methanogenen, was ein Zeichen von Änderungen vom Substrat oder Prozessparametern ist und signalisiert, dass der Prozess stabil war. Dies kann mit der Nutzung der TerraWater-Anlage erklärt werden, da sie für 6 Wochen benutzt wurde. Parallel mit der Prozessstabilität angesehen von mikrobieller Diversität, steigt auch die Prozessproduktivität. Das Verhältnis Stromproduktion/Substratmenge steigt im April und sinkt in den nächsten Monaten. Dies kann auch mit der diversen mikrobiellen Population erklärt werden, was zeigt, dass das Nutzen der TerraWater-Anlage einen positiven Einfluss sowohl auf die Prozessstabilität als auch die Prozessproduktivität hatte, trotz der technischen Schwierigkeiten. Eine weitere Erklärung kann die höhere Menge von Substrat sein, was zu einem intensiveren Prozess führt.

Im Zeitraum Jan 2021 – März 2021 waren die Mikroorganismen sehr nah zu der Gruppe Aug 2019 – Jan 2020. Jedoch sank die Anzahl an Archaeen, was ein Zeichen für einen weniger stabilen Prozess sein könnte. Für diesen Zeitraum konnte nicht bestätigt werden, dass die Proben korrekt gelagert wurden (im gefrorenen Zustand). Deswegen müssen diese Ergebnisse mit Vorsicht berücksichtigt werden.

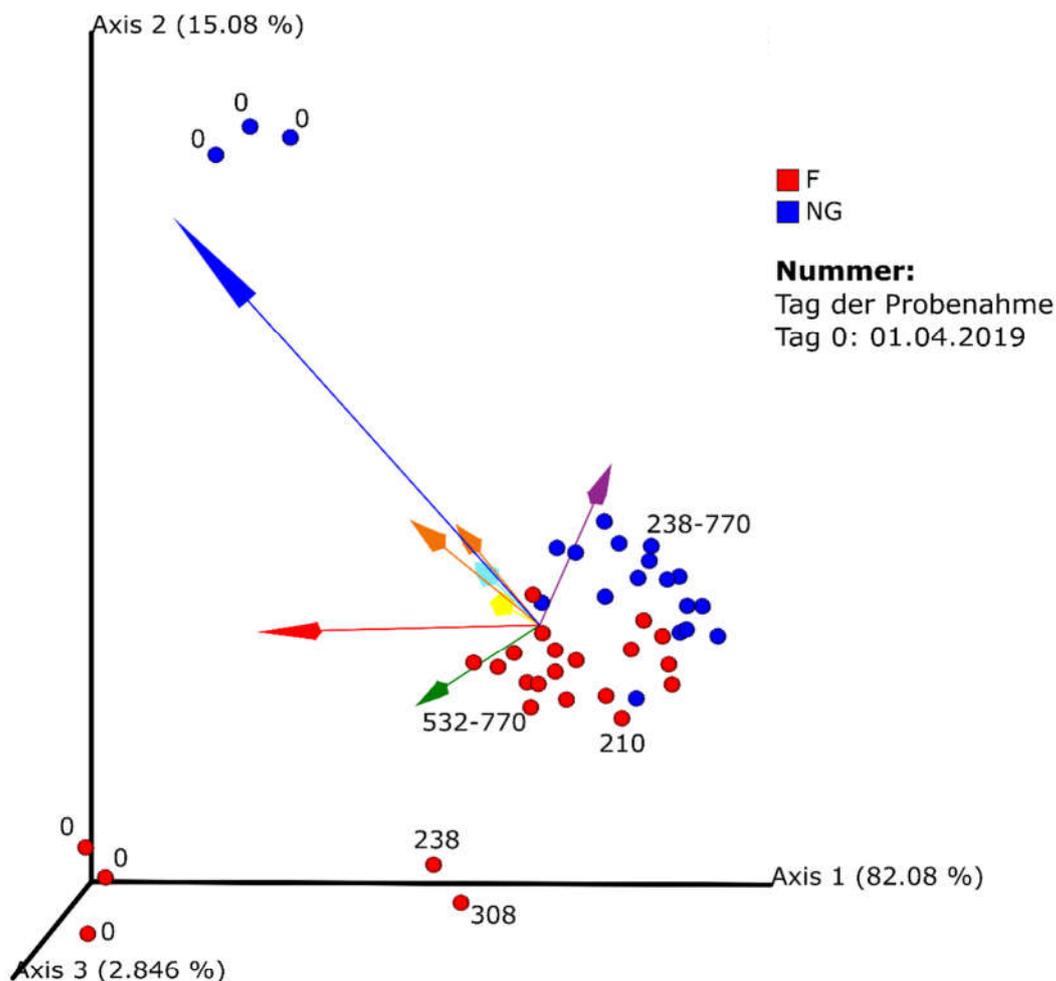


- Andere Archaeen (Relative Häufigkeit < 0.5 %)
- D: Archaea; P: Halobacterota; C: Methanomicrobia; O: Methanomicrobiales; F: Methanomicrobiaceae; G: Methanoculleus
- D: Archaea; P: Euryarchaeota; C: Methanobacteria; O: Methanobacteriales; F: Methanobacteriaceae; G: Methanobacterium
- D: Archaea; P: Halobacterota; C: Methanosarcinia; O: Methanosarciniales; F: Methanosarcinaceae; G: Methanosarcina
- D: Archaea; P: Halobacterota; C: Methanosarcinia; O: Methanosarciniales; F: Methanosaetaceae; G: Methanosaeta

Abbildung 9. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in Betrieb B über die Zeit

## Mikrobielle Anpassung in der Betrieb C-Anlage

Die Analyse der Nullproben aus der Anlage in Betrieb C lässt erkennen, dass die mikrobiellen Populationen im Fermenter und Nachgärer sehr unterschiedlich waren (Abbildung 10). Nach einigen Monaten und signifikanten mikrobiellen Änderungen war die Population stabil, ähnlich im Fermenter und im Nachgärer und wurde bis Ende der Projektlaufzeit nicht signifikant geändert. Der Fermenter brauchte mehr Zeit für die Anpassung, was an Tagen 238 und 308 zu sehen ist (Nov 2019 – Feb 2020). Die Population im Fermenter war im Zeitraum Sep 2020 – Mai 2021 gruppiert, während der Nachgärer mit einer stabilen Population im Zeitraum Nov 2019 – Mai 2021 charakterisiert war.



### Pfeile

D: Domain, P: Stamm; C: Klasse; O: Ordnung; F: Familie; G: Gattung; S: Species

- D: Bacteria; P: Bacteroidota; C: Bacteroidia; O: Bacteroidales; F: Bacteroidales\_UCG-001; G: Bacteroidales\_UCG-001
- D: Bacteria; P: Cloacimonadota; C: Cloacimonadia; O: Cloacimonadales; F: Cloacimonadaceae; G: W5; S: uncultured\_Spirochaetes
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Clostridia; O: Clostridia; F: Hungateiclostridiaceae; G: Fastidiosipila; S: uncultured\_bacterium
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Clostridia; O: Peptostreptococcales-Tissierellales; F: Sedimentibacteraceae; G: Sedimentibacter
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Incertae\_Sedis; O: DTU014; F: DTU014; G: DTU014; S: anaerobic\_digester
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Limnochordia; O: MBA03; F: MBA03; G: MBA03
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Limnochordia; O: MBA03; F: MBA03; G: MBA03; S: uncultured\_bacterium

Abbildung 10. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus Betrieb C

Abbildung 11 zeigt, dass die acetoklastische Gattung *Methanosaeta* sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer am Anfang vorhanden war. Der große Unterschied zwischen den zwei Reaktoren am Anfang

wird dem Unterschied von Bakterien zugeschrieben, was auch mithilfe der ARISA-Ergebnisse zu sehen ist. Während des Projektbetriebes wurde *Methanosaeta* mit *Methanosarcina* ersetzt. In diesem Zeitraum (Sommer 2019) wurde Gülle geändert. Diese Änderung des Substrats führte zu dieser starken Änderung der Population. Da methanogene Mikroorganismen immer noch vorhanden waren und über längere Zeit stabil blieben, bedeutet diese Änderung eine Adaptation auf die neuen Bedingungen, jedoch mit anderen metabolischen Wegen. Die neuen metabolischen Wege können in einer Verbindung mit manchen Prozessparametern sein (z. B. hydraulische Verweilzeit und organische Raumbelastung). Unser Laborversuch zeigte, dass *Methanosaeta* während einer Ammoniakhemmung von *Methanosarcina* ersetzt wird und die Hemmung dadurch überwunden sein kann. Die Ergebnisse zeigen, dass die Änderung des Substrats zur Hemmung führte. Jedoch war der Prozess später stabil.

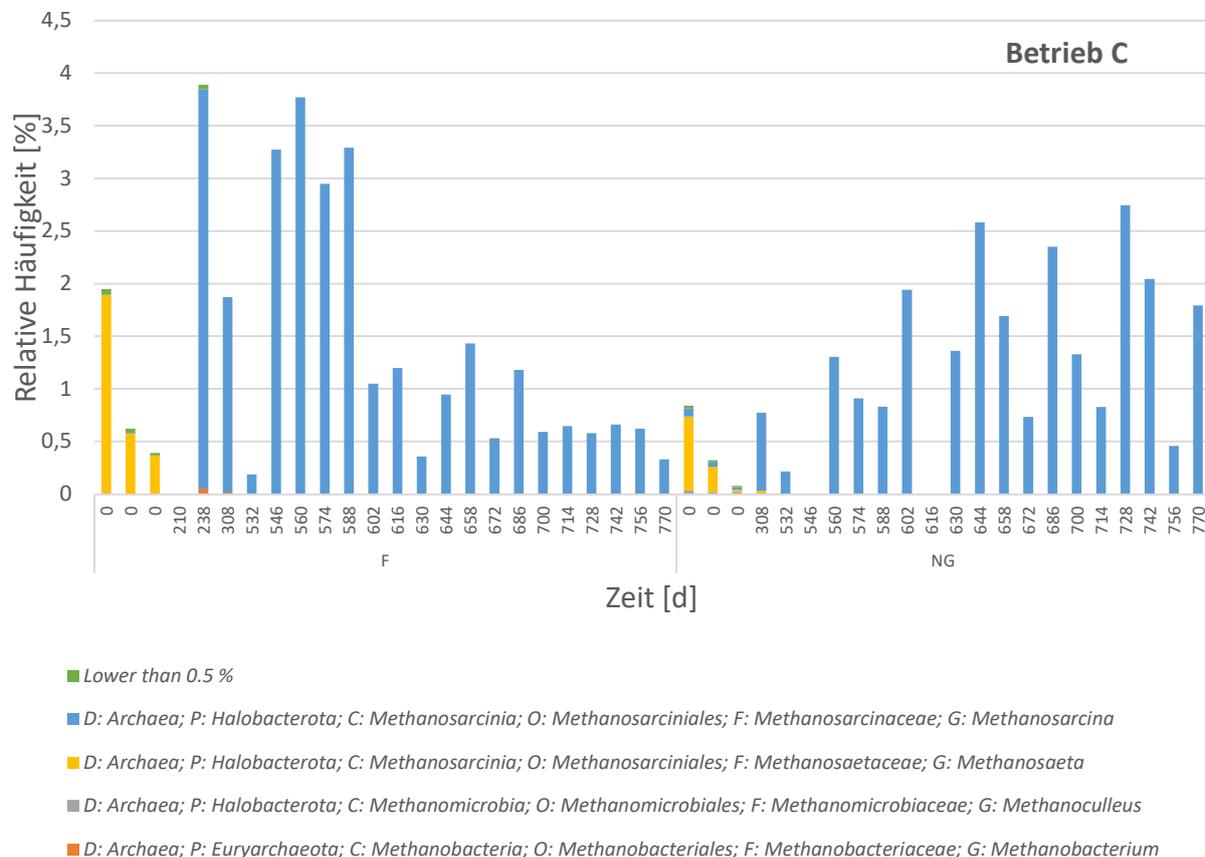
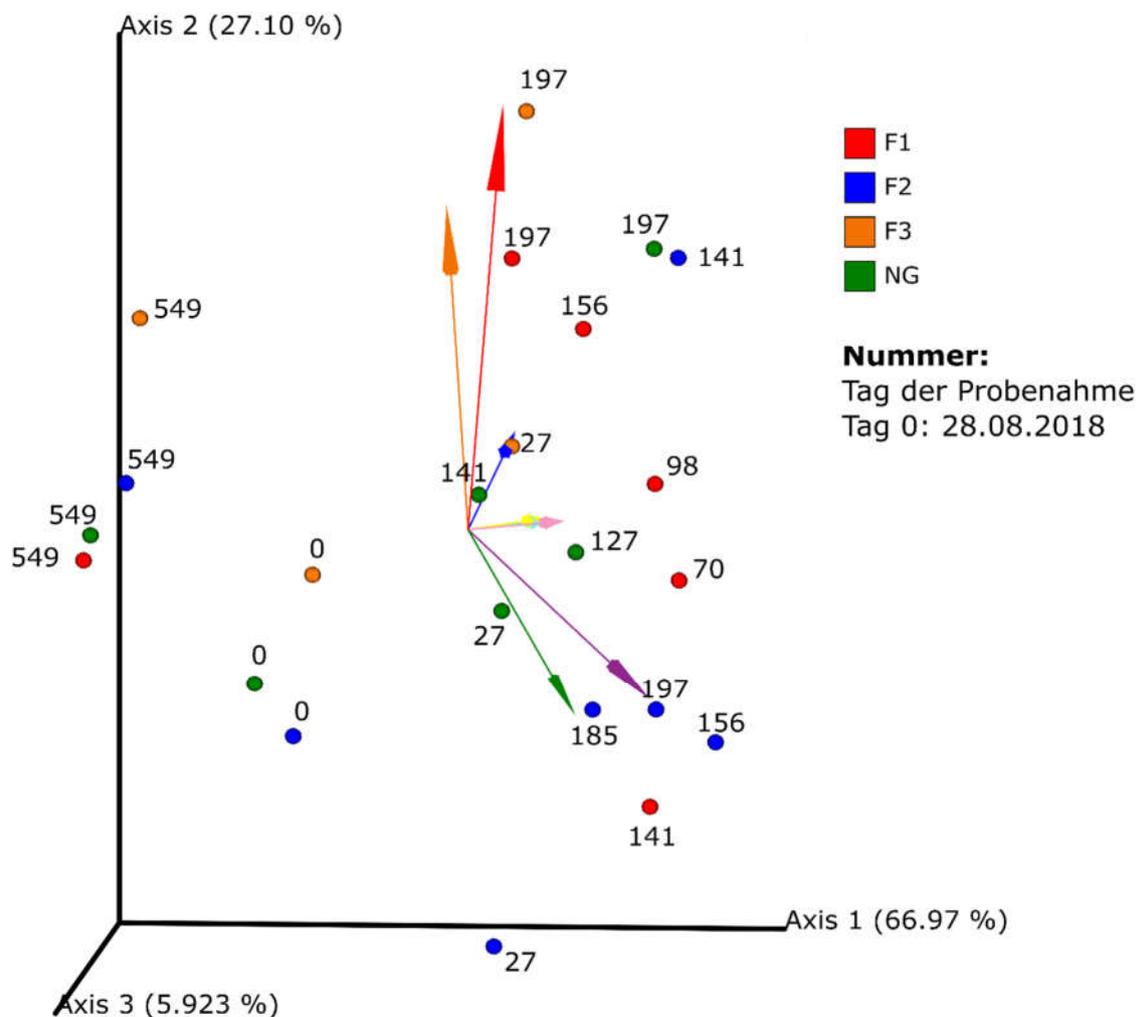


Abbildung 11. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in Betrieb C über die Zeit

### Mikrobielle Anpassung in der Betrieb A-Anlage

Die Änderungen der mikrobiellen Population in der Anlage in Betrieb A sind in *Abbildung 12* zu sehen. Sie war mit hoher Diversität von methanogenen Mikroorganismen charakterisiert (*Abbildung 13*). Die Änderungen in den Fermentern und im Nachgärer fanden parallel statt. Die Populationen am selben Tag sind am meistens gruppiert (gehen in die gleiche Richtung).



#### Pfeile

D: Domain, P: Stamm; C: Klasse; O: Ordnung; F: Familie; G: Gattung; S: Species

- D: Archaea; P: Halobacterota; C: Methanosarcinia; O: Methanosarcinales; F: Methanosaetaceae; G: Methanosaeta; S: uncultured\_Methanosarcina
- D: Bacteria; P: Bacteroidota; C: Bacteroidia; O: Bacteroidales; F: Bacteroidales\_UCG-001; G: Bacteroidales\_UCG-001
- D: Bacteria; P: Bacteroidota; C: Bacteroidia; O: Sphingobacteriales; F: ST-12K33; G: ST-12K33; S: metagenome
- D: Bacteria; P: Cloacimonadota; C: Cloacimonadia; O: Cloacimonadales; F: W27; G: W27; S: anaerobic\_digester
- D: Bacteria; P: Cloacimonadota; C: Cloacimonadia; O: Cloacimonadales; F: W27; G: W27; S: uncultured\_Cloacimonetes
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Clostridia; O: Clostridia; F: Hungateiclostridiaceae; G: Fastidiosipila; S: uncultured\_bacterium
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Limnochordia; O: MBA03; F: MBA03; G: MBA03
- D: Bacteria; P: Firmicutes; C: Limnochordia; O: MBA03; F: MBA03; G: MBA03; S: uncultured\_bacterium

Abbildung 12. Hauptkomponentenanalyse aller sequenzierten Proben aus Betrieb A

Auffällig ist es, dass die acetoklastische Gattung *Methanosaeta* deutlich stieg (ab Tag 197 zu sehen), was in einer Verbindung mit Substratänderung und stabileren Prozessparametern sein könnte. Da die Anlage nicht weiter im Projektbetrieb war, wurden keine weiteren Proben genommen und analysiert.

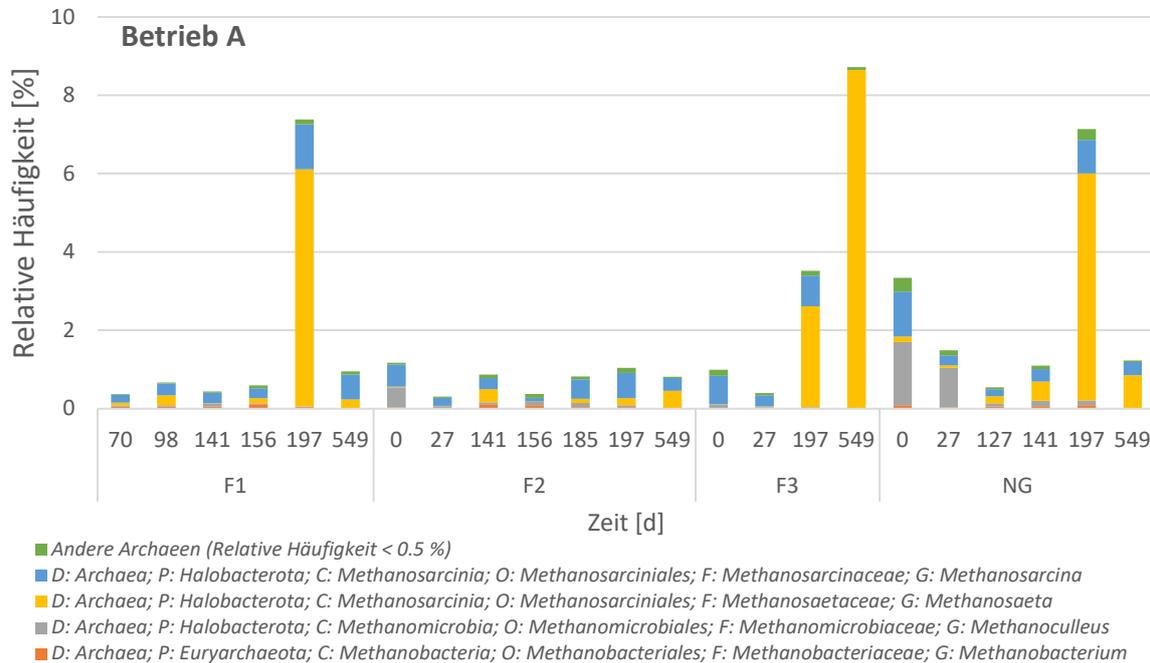


Abbildung 13. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in Betrieb A über die Zeit

### Betrieb D-Anlage

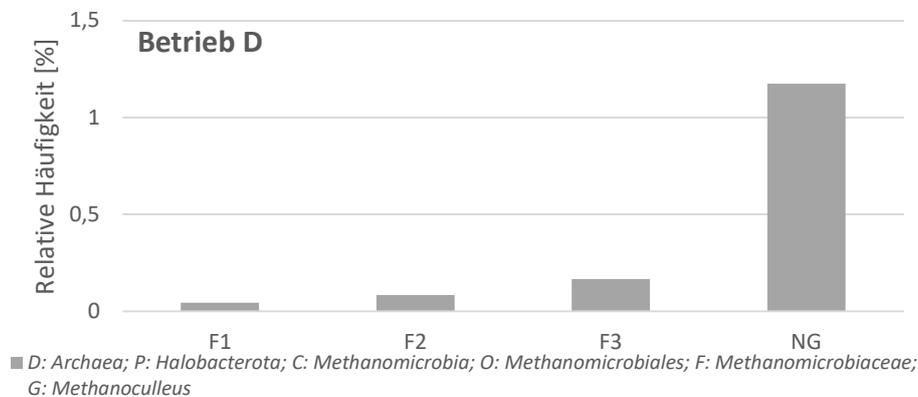


Abbildung 14. Relative Häufigkeit verschiedener Archaeen in der Anlage in Betrieb D

Die Nullproben aus Betrieb D wurden analysiert und die Ergebnisse zeigen, dass nur eine methanogene Gattung (*Methanoculleus*) in allen Fermentern und im Nachgärer der Anlage vorhanden war (Abbildung 14). *Methanoculleus* ist eine hydrogenotrophe Gattung, die kein Acetat direkt abbauen kann, sondern produziert Methan aus  $H_2$  und  $CO_2$ . In solchen Fällen wird Acetat von Bakterien zu  $CO_2$  und  $H_2$  abgebaut, die weiter von den vorhandenen Archaeen zu Biogas umgewandelt werden können. Dies zeigte am Anfang des Projektes, dass die Anlage in Betrieb D keine repräsentative Biogasanlage war.

## 5. Anhang

### ARISA, Archaeen

Die ARISA-Ergebnisse (Abbildung 15 - Abbildung 24) zeigen, wie nah die Population in verschiedenen Proben zueinander war, wann zu einer Änderung der Population kam und dienen als die Grundlage zur Entscheidung, welche Proben weiter analysiert werden sollen.

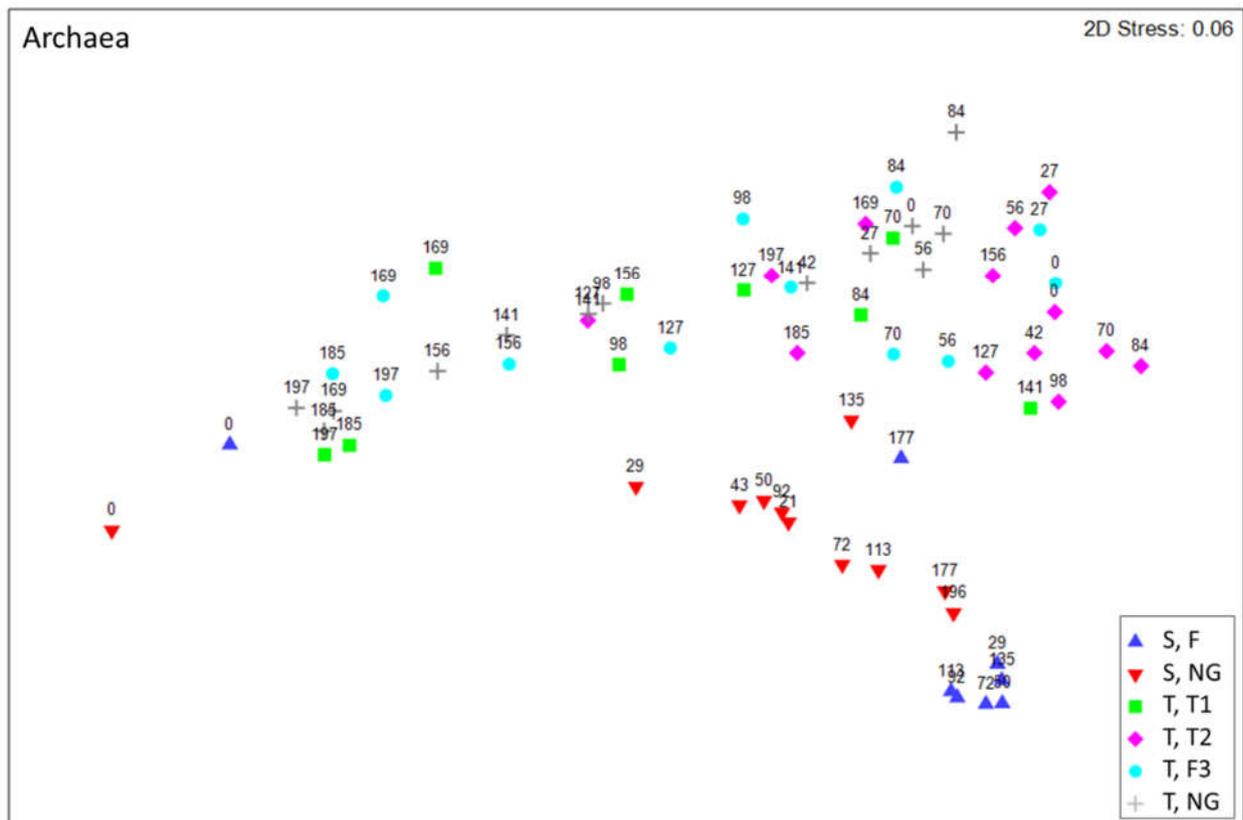


Abbildung 15. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum August 2018 – März 2019

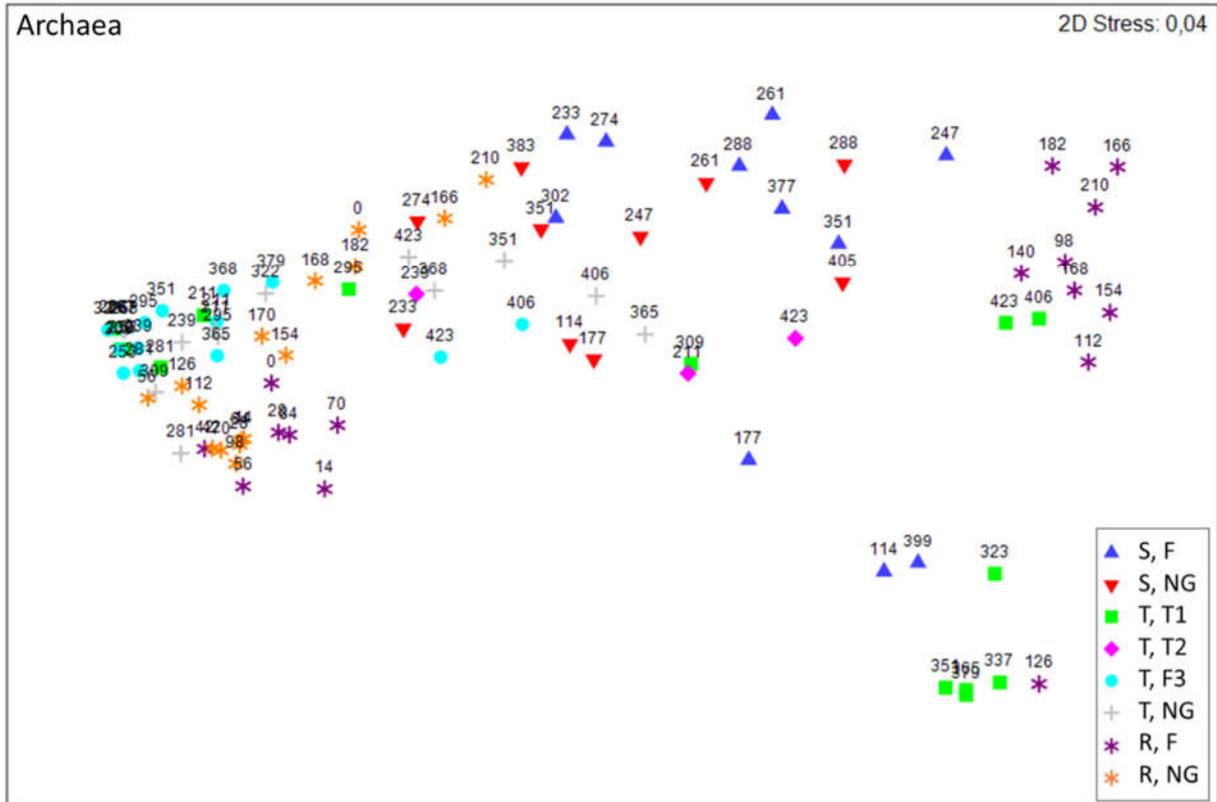


Abbildung 16. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum April 2019 – Oktober 2019

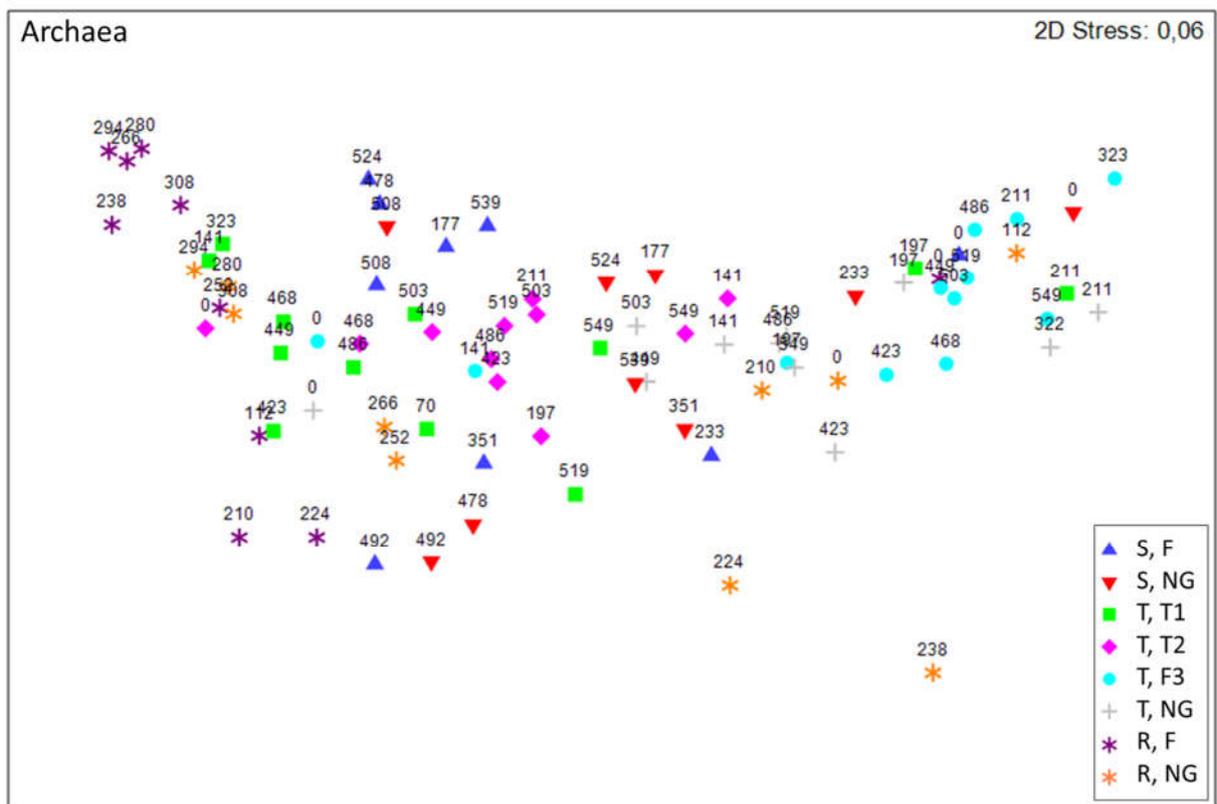


Abbildung 17. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum November 2019 – März 2020 und manche der alten Proben

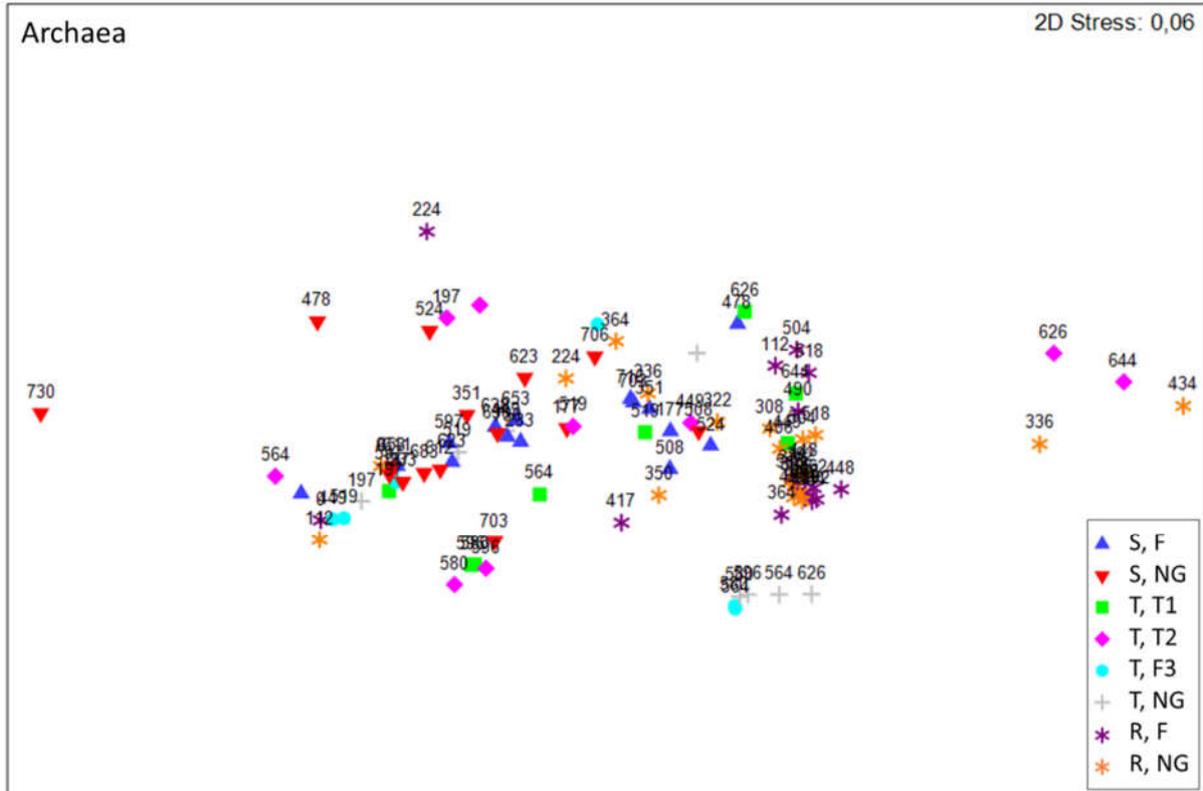


Abbildung 18. ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum Februar 2020 – Juni 2020 und manche der alten Proben

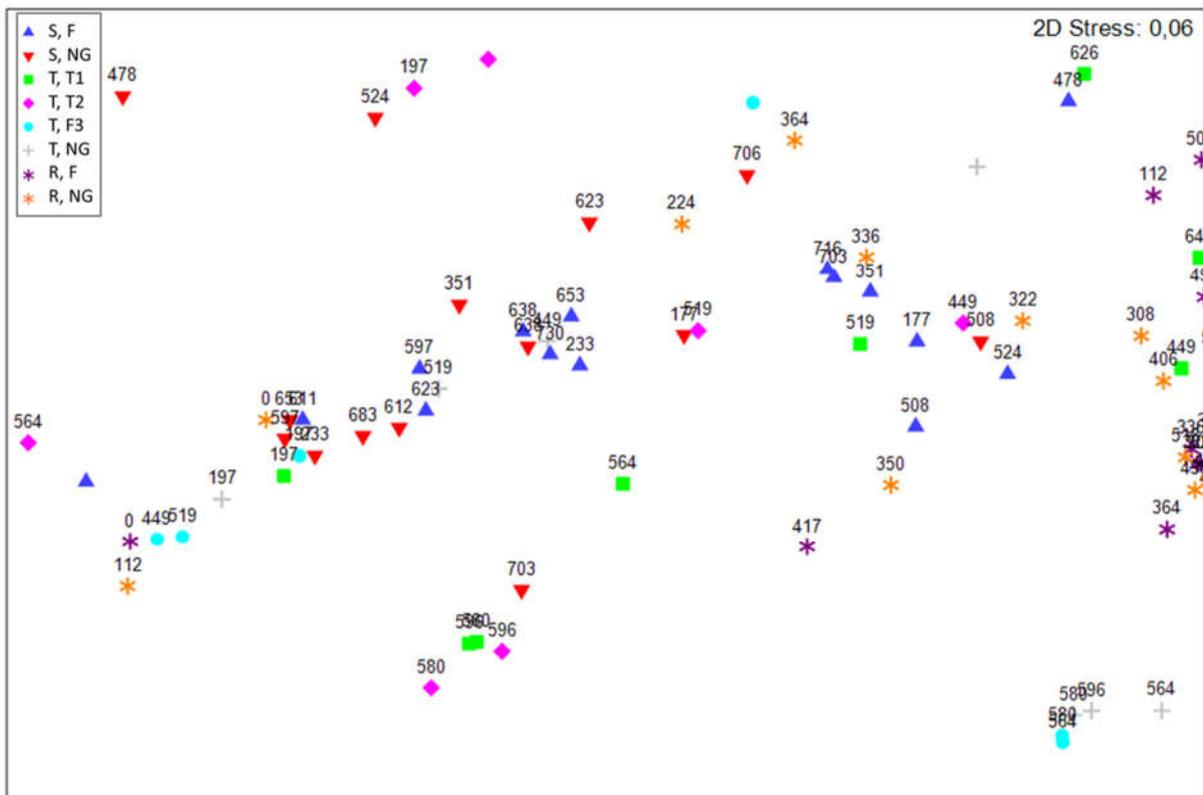


Abbildung 19. Gezoomte Abbildung 18, A (ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum Februar 2020 – Juni 2020 und manche der alten Proben)

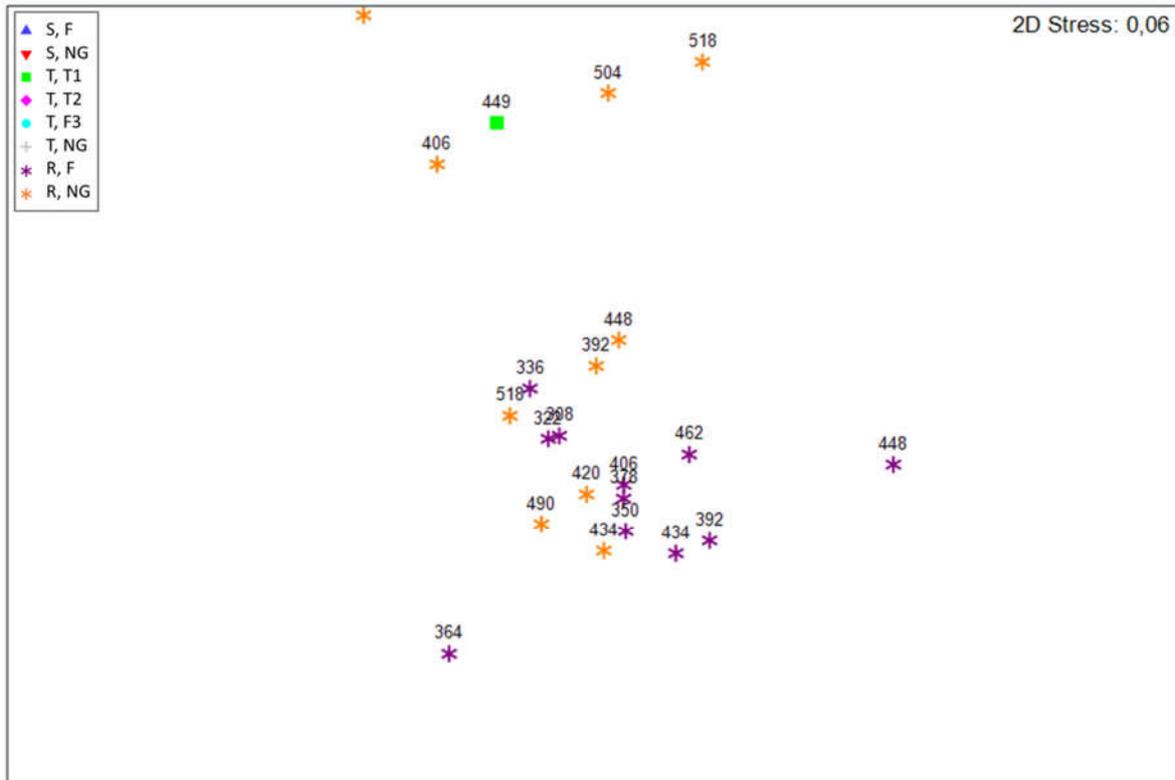


Abbildung 20. Gezoomte Abbildung 18, B (ARISA-Ergebnisse für Archaeen für den Zeitraum Februar 2020 – Juni 2020 und manche der alten Proben)

### ARISA, Bakterien

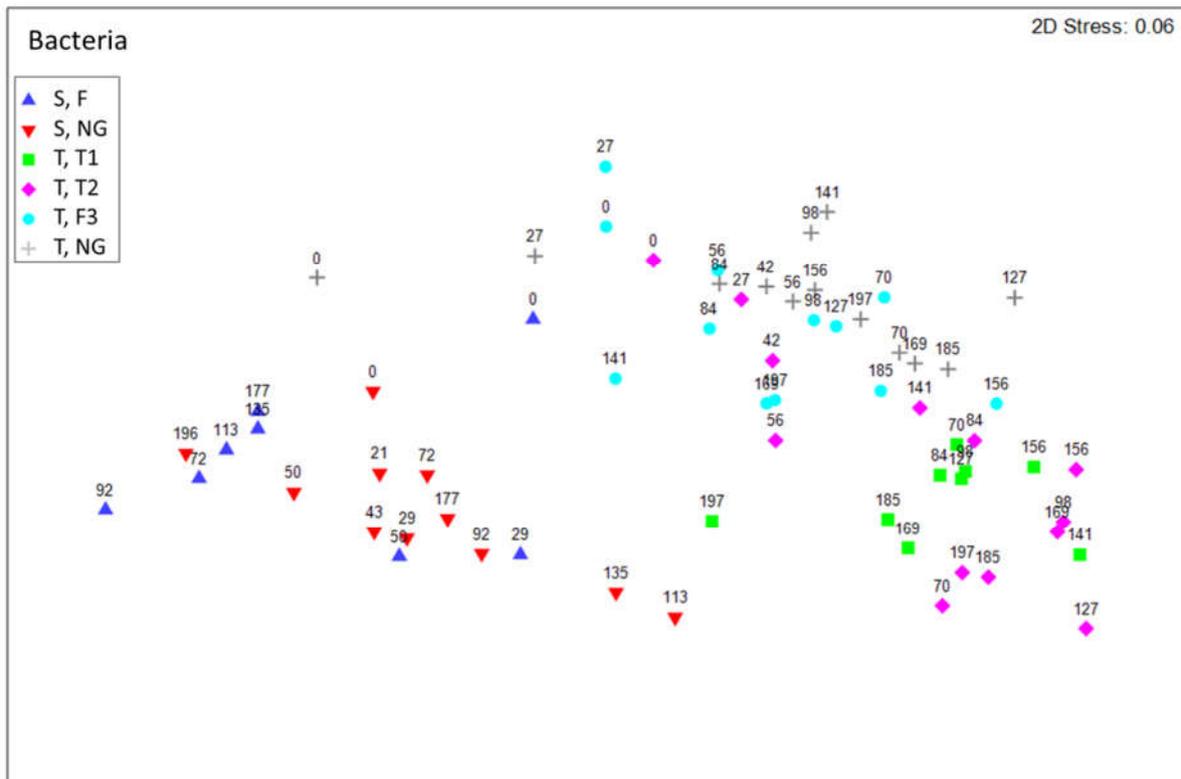


Abbildung 21. ARISA-Ergebnisse für Bakterien für den Zeitraum August 2018 – März 2019

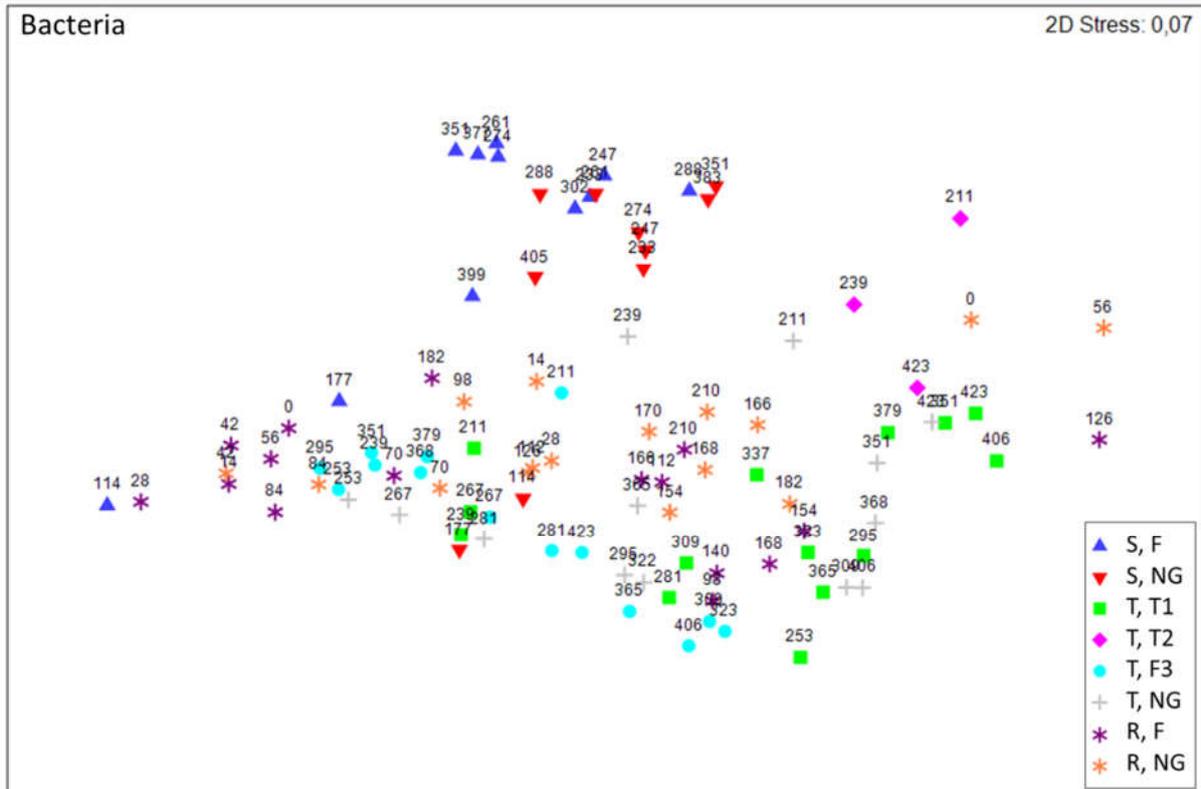


Abbildung 22. ARISA-Ergebnisse für Bakterien für den Zeitraum April 2019 – Oktober 2019

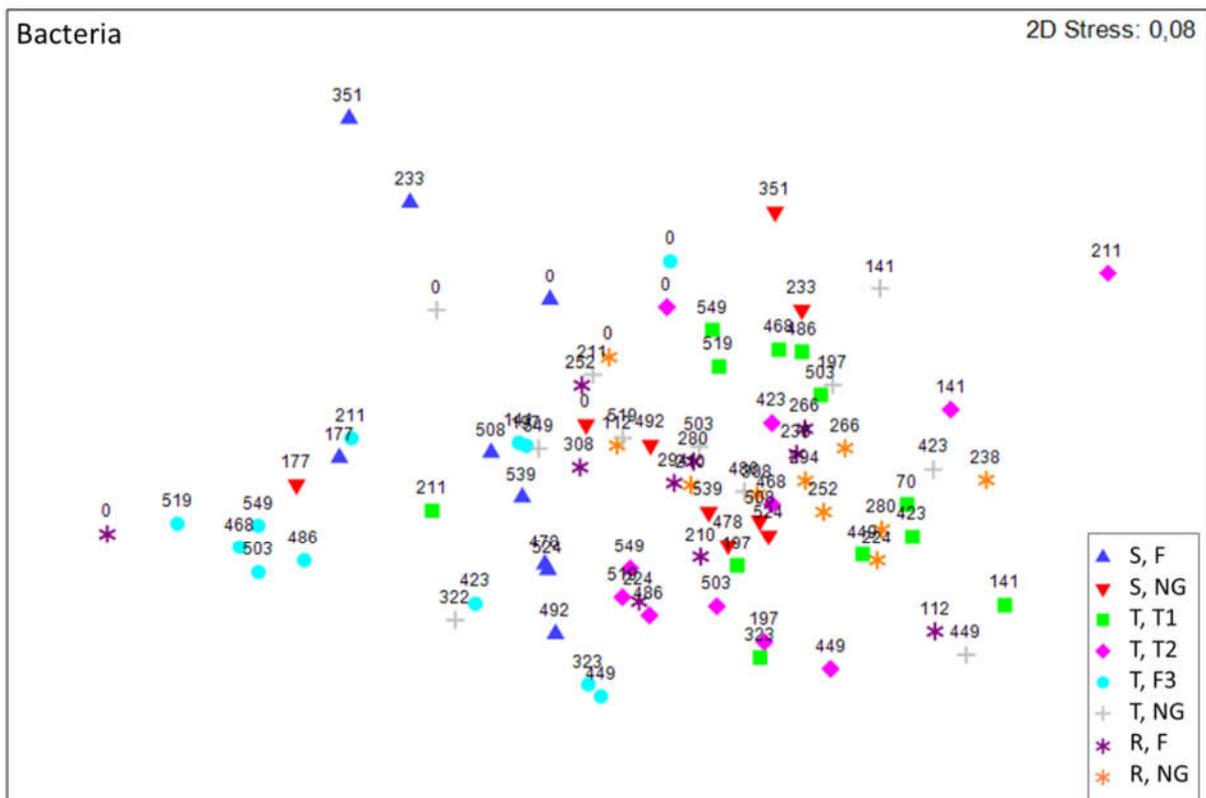


Abbildung 23. ARISA-Ergebnisse für Bakterien für den Zeitraum November 2019 – März 2020 und manche der alten Proben



## Sequenzierung, Bar-Plots

Neben methanogenen Archaeen sind auch Bakterien sehr wichtig für den Prozess der anaeroben Vergärung, da sie für die ersten Schritten des anaeroben Abbaus zuständig sind und in manchen Fällen auch Acetat abbauen können. *Abbildung 25 - Abbildung 27* präsentieren Änderungen der relativen Häufigkeit aller Mikroorganismen in den analysierten Proben. Die „Top 10 Ordnungen“ beziehen sich auf allen Proben (aus allen Anlagen).

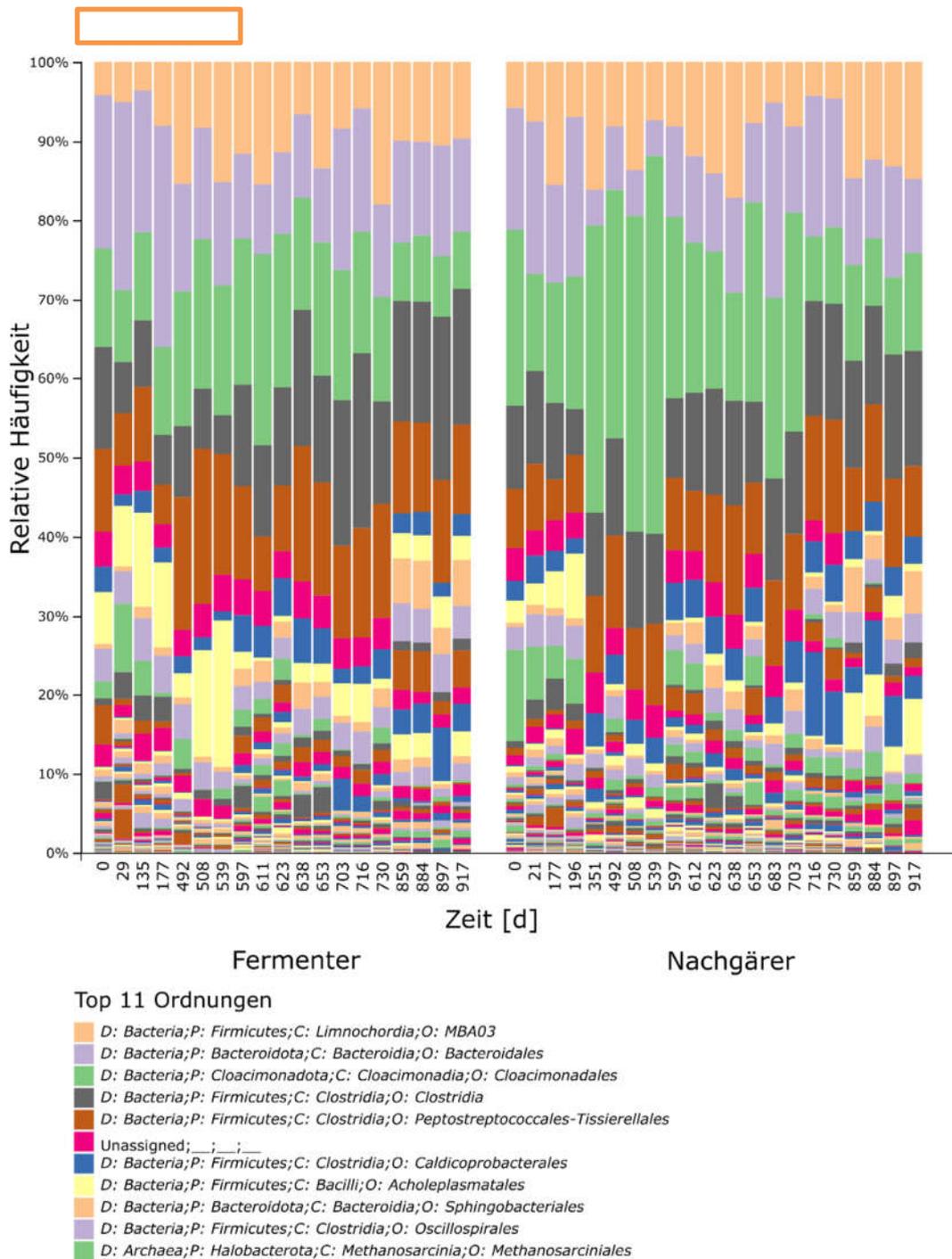
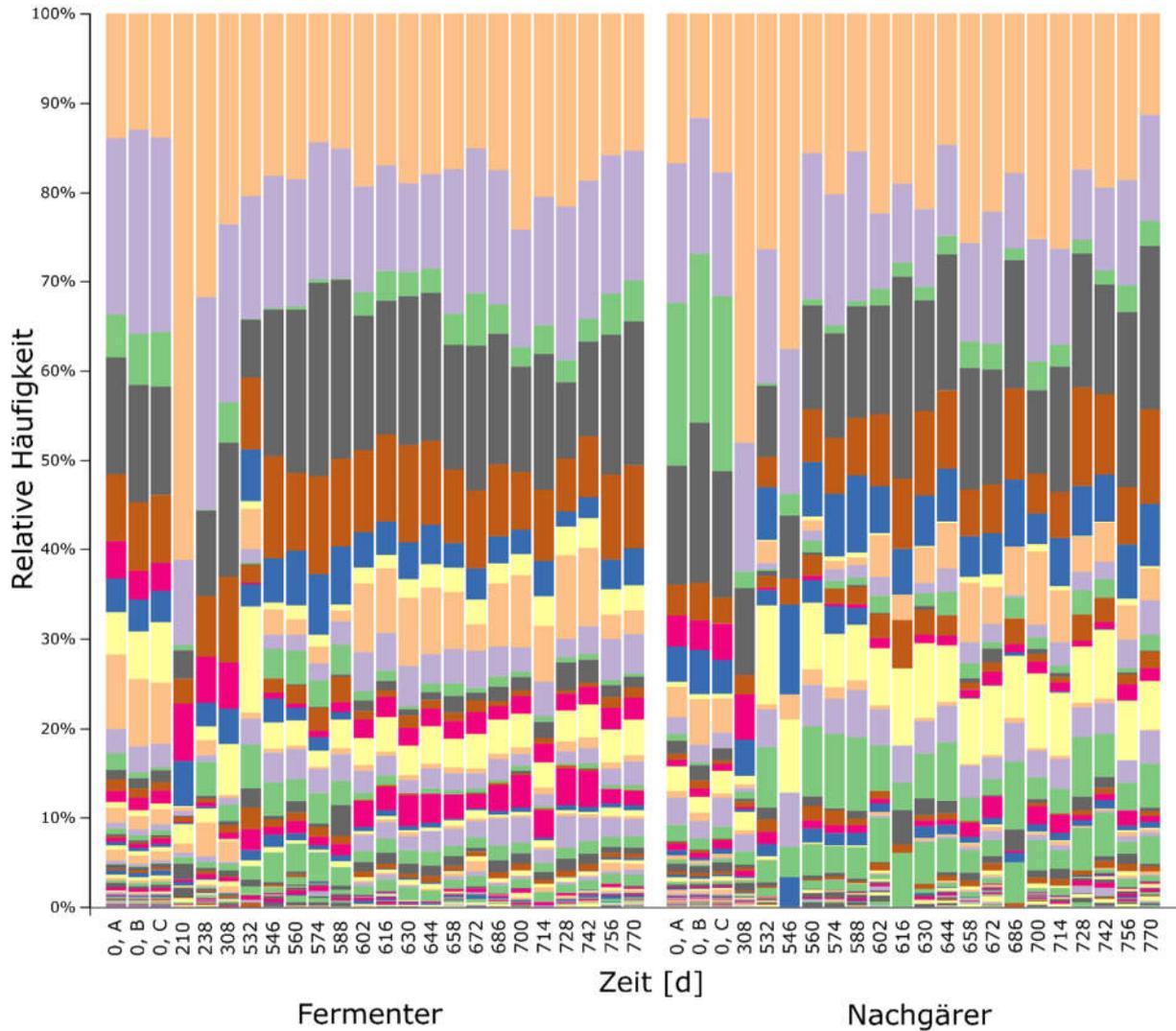


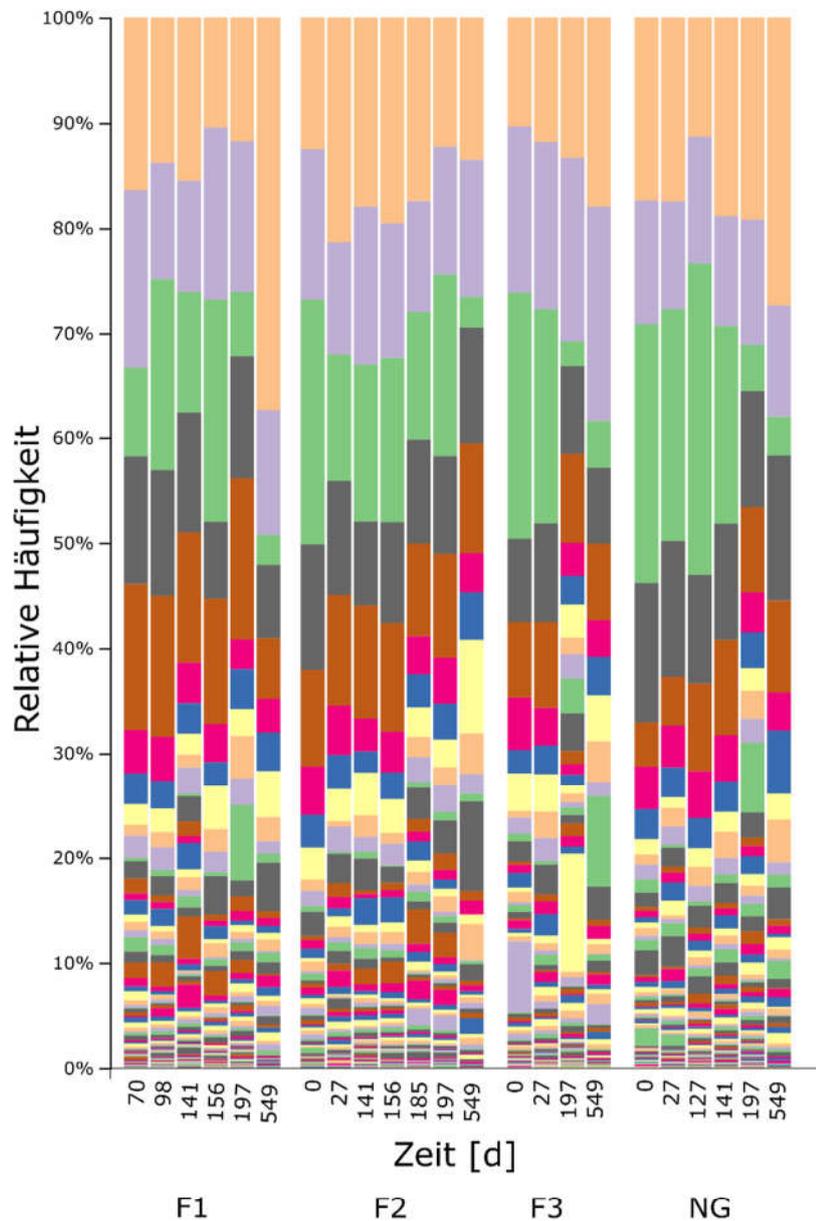
Abbildung 25. Relative Häufigkeit von Archaeen und Bakterien in Betrieb B



Top 11 Ordnungen

- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Limnochordia;O: MBA03
- D: Bacteria;P: Bacteroidota;C: Bacteroidia;O: Bacteroidales
- D: Bacteria;P: Cloacimonadota;C: Cloacimonadia;O: Cloacimonadales
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Clostridia
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Peptostreptococcales-Tissierellales
- Unassigned;\_\_;\_\_;\_\_
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Caldicoprobacterales
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Bacilli;O: Acholeplasmatales
- D: Bacteria;P: Bacteroidota;C: Bacteroidia;O: Sphingobacteriales
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Oscillospirales
- D: Archaea;P: Halobacterota;C: Methanosarcinia;O: Methanosarciniales

Abbildung 26. Relative Häufigkeit von Archaeen und Bakterien in Betrieb C



### Top 11 Ordnungen

- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Limnochordia;O: MBA03
- D: Bacteria;P: Bacteroidota;C: Bacteroidia;O: Bacteroidales
- D: Bacteria;P: Cloacimonadota;C: Cloacimonadia;O: Cloacimonadales
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Clostridia
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Peptostreptococcales-Tissierellales
- Unassigned;\_\_;\_\_;\_\_
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Caldicoprobacteriales
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Bacilli;O: Acholeplasmatales
- D: Bacteria;P: Bacteroidota;C: Bacteroidia;O: Sphingobacteriales
- D: Bacteria;P: Firmicutes;C: Clostridia;O: Oscillospirales
- D: Archaea;P: Halobacterota;C: Methanosarcinia;O: Methanosarciniales

Abbildung 27. Relative Häufigkeit von Archaeen und Bakterien in Betrieb A

## Sequenzierung, Heat-Map

„Heatmap“ ist auch eine Art der Darstellung von Ähnlichkeiten verschiedener Proben (*Abbildung 28*). Die erste Stufe der Gruppierung präsentiert, welche Proben am ähnlichsten sind. Meistens sind die zeitnahen Proben aus demselben Reaktor zuerst gruppiert. Eine weitere Gruppierung findet zwischen allen Proben einer Anlage statt und erst danach kann eine Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Anlagen gesehen werden. Dies zeigt, dass zum Beispiel der Nachgärer einer Anlage dem Fermenter dieser Anlage ähnlicher ist als einem Nachgärer einer anderen Anlage. Die spezielle Zusammensetzung von Mikroorganismen jeweiliger Anlage ist der Kombination Substrat-Prozessparameter-Anlagegeometrie zugeschrieben.

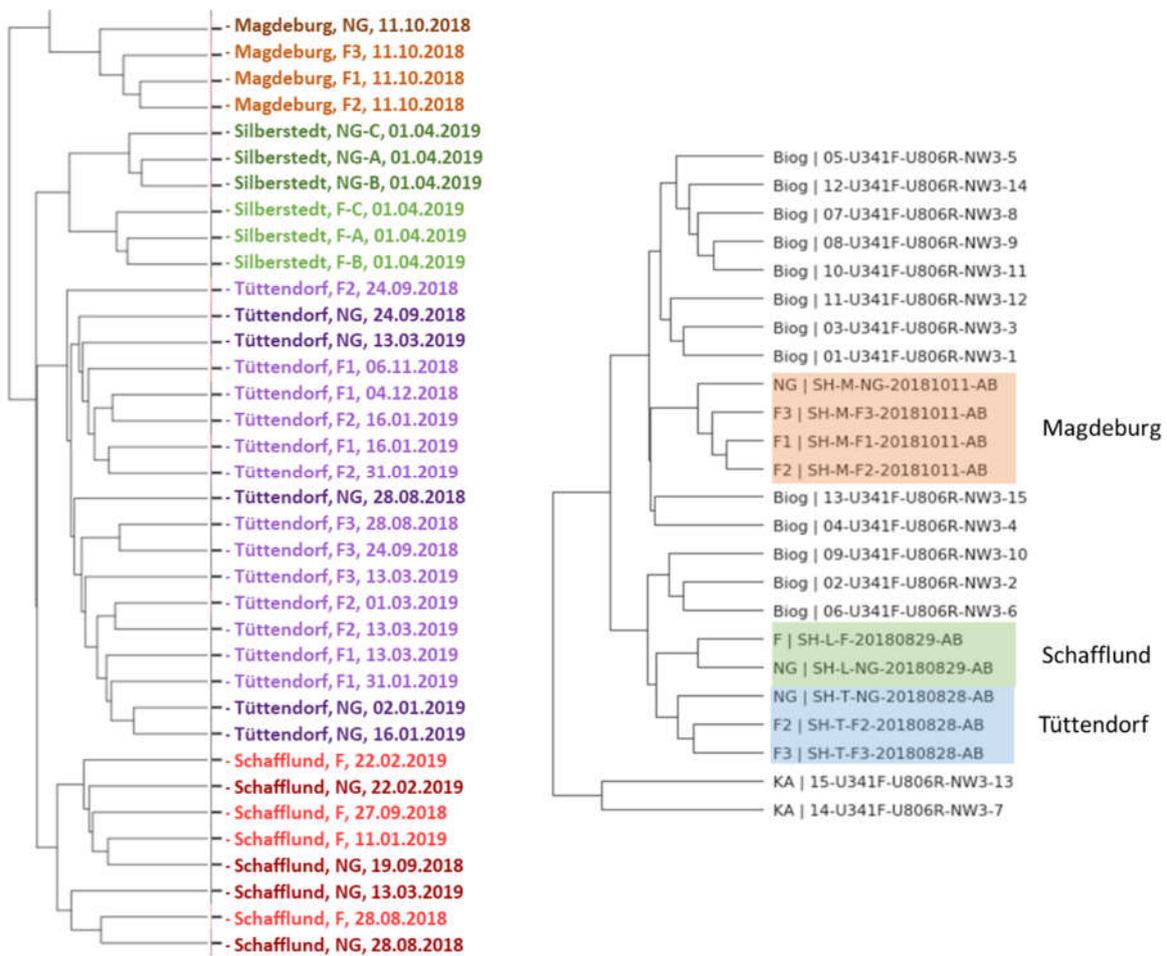


Abbildung 28. Heatmap – Gruppierung von ähnlichen Proben aus ENEGÜLL-Anlagen (links) und zusätzlichen früher am Lehrstuhl analysierten Proben (rechts)

### Gesamt-Stickstoffkonzentration

In *Abbildung 29* sind die Gesamt-Stickstoffkonzentrationen (TAN) in den Anlagen in Betrieb B (oben) und Betrieb C (unten) zu sehen. Da die Proben für eine längere Zeit gefroren wurden und erst danach analysiert wurden, sollen diese Ergebnisse mit Vorsicht berücksichtigt werden.

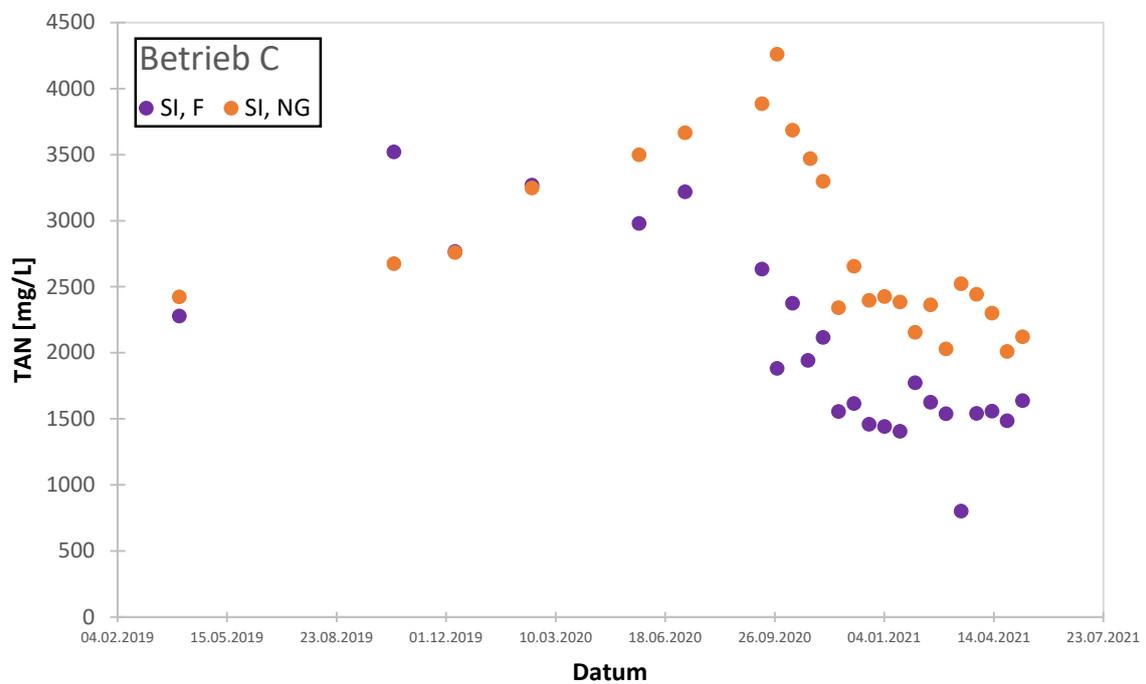
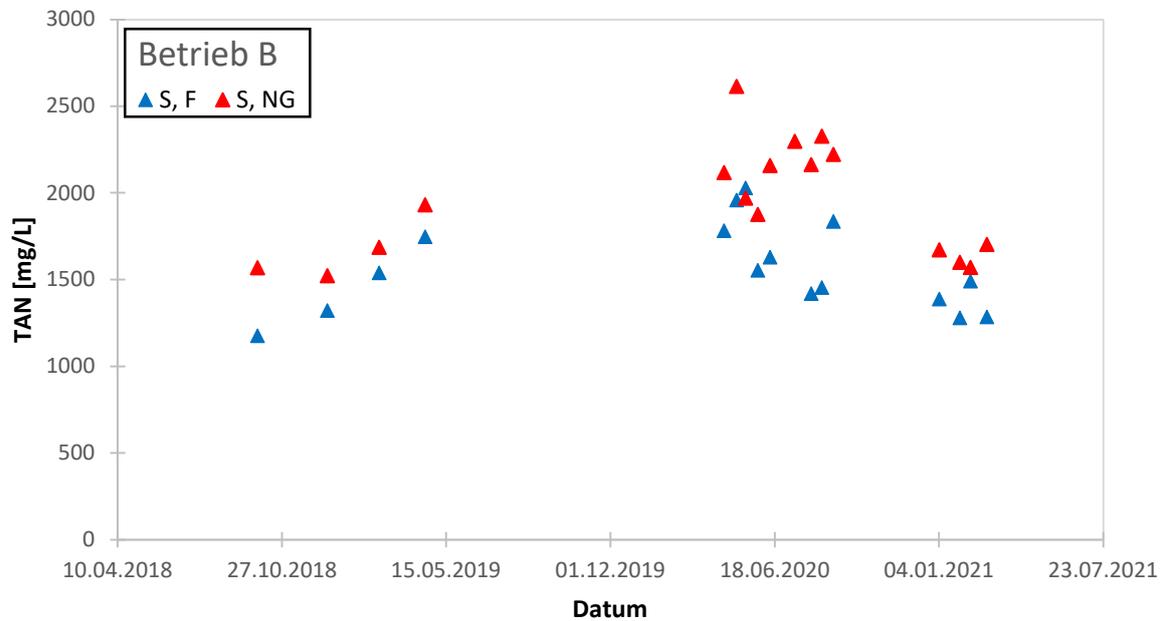


Abbildung 29. Gesamt-Stickstoffkonzentration in Fermenter und Nachgärer über die Zeit in Betrieb B (oben) und Betrieb C (unten)

## 6. Literaturverzeichnis

Angelidaki I., Ahring B.K. Thermophilic anaerobic digestion of livestock waste: the effect of ammonia.

*Appl Microbiol Biotechnol* 38, 1993

FNR (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe). Mit Zuckerrüben die Biogasproduktion flexibilisieren

<https://biogas.fnr.de/service/presse/presse/aktuelle-nachricht/mit-zuckerrueben-die-biogasproduktion-flexibilisieren-1>, 17.06.2021, Stand: 30.07.2021

Garrity G., Boone D.R., Castenholz R.W. Bergley's Manual of Systematic Bacteriology. Volume One: The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria, 2nd edn. Springer-Verlag New York, 2001

McCarty P.L. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals 95, 1964

Mlinar S., Weig A.R., Freitag R. Influence of mixing and sludge volume on stability, reproducibility, and productivity of laboratory-scale anaerobic digestion. *Bioresource Technology Reports* 11:100444, 2020

Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F., Weiland, P. Anaerobtechnik, 3rd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015

Weiland P. Biogas production: current state and perspectives. *Appl Microbiol Biotechnol* 85, 2010