

# Abschlussbericht

Im Rahmen des Förderprogramms „Forschung und Entwicklung (FuE) zur Optimierung der energetischen Biomassenutzung“

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

**SepaFlex – Co-Vergärung von separiertem  
Bioabfallpresswasser auf Kläranlagen zur flexiblen  
Energiegewinnung; Teilvorhaben: Effiziente, bedarfsorientierte  
Co-Vergärung von separiertem Bioabfallpresswasser zur  
Optimierung des Energiemanagements auf Kläranlagen**

**(FKZ-Nr: 03KB147A/B/C)**

**Koordinator: Universität Stuttgart**

Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA),  
Bandtäle 2, 70569 Stuttgart

**Projektpartner: BEM Umweltservice GmbH**

Teinacher Str. 34, 71634 Ludwigsburg

Stuttgart, Dezember 2022

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Inhaltsverzeichnis.....  | 2  |
| Tabelle Verzeichnis.....   | 4  |
| Abbildung Verzeichnis.....   | 4  |
| 1. Hintergrund und Ziele.....  | 8  |
| 1.1 Hintergrund.....   | 8  |
| 1.2 Potential getrennt gesammelter Bioabfälle für die Energieerzeugung in Kläranlagen..... | 9  |
| 1.3 Ziele.....   | 9  |
| 2. Grundlagen.....   | 11 |
| 2.1 Stand von Wissenschaft und Technik.....  | 11 |
| 2.2 Verfahrensbeschreibung.....  | 13 |
| 2.3 Kompostierungsanlage.....  | 14 |
| 2.4 Lehr- und Forschungskläwerk (LFKW).....  | 15 |
| 2.5 Der Anaerobe Abbauprozess.....   | 17 |
| 3. Material und Methode.....   | 19 |
| 3.1 Versuche zum Abpressen von Bioabfall.....  | 19 |
| 3.2 Probenahme und Laboranalyse.....   | 21 |
| 3.2.1 Trockensubstanzgehalt.....   | 23 |
| 3.2.2 Organische Trockensubstanz.....  | 24 |
| 3.2.3 pH Wert.....   | 25 |
| 3.2.4 Chemische Sauerstoffbedarf (CSB).....  | 25 |
| 3.2.5 Gesamte organische Kohlenstoff (TOC).....  | 25 |
| 3.2.6 CHN Analyse.....   | 25 |
| 3.2.7 Organische Säuren.....   | 26 |
| 3.2.8 Nährstoffgehalt.....   | 26 |
| 3.3 Batch Untersuchung.....  | 27 |
| 3.4 Halbtechnische Untersuchung.....   | 28 |
| 3.4.1 Versuchsplanung.....   | 31 |
| 3.4.2 Verweilzeit.....   | 33 |
| 3.4.3 Analyse der Biogasausbeute.....  | 33 |
| 3.4.4 Analyse des Methan- und Kohlendioxidgehalts.....                                     | 34 |
| 3.4.5 Zeitlicher Verlauf der Gasproduktion.....  | 34 |
| 3.5 Pilot Untersuchung.....  | 35 |
| 4. Ergebnisse.....   | 36 |
| 4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen.....  | 36 |
| 4.1.1 Rechtlicher Rahmen.....  | 36 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1.2 | Genehmigungsverfahren.....  | 44  |
| 4.2   | Versuche zum Abpressen von Bioabfall .....  | 45  |
| 4.3   | Proben und Charakterisierung.....   | 48  |
| 4.4   | Biogasertrag in Batch Untersuchungen .....  | 50  |
| 4.5   | Substratspezifische Biogaserzeugung.....  | 52  |
| 4.6   | Gebildete Biogasmenge in abhängig von zugegebenem Anteil Presswasser .....              | 57  |
| 4.7   | Auswirkungen unterschiedlicher Beschickungsfrequenzen auf Biogasproduktion ..           | 62  |
| 4.8   | Optimale OLR für Prozessstabilität.....   | 65  |
| 4.9   | Beschickung des Presswassers in Faulturm .....  | 66  |
| 4.10  | Kompostierungsuntersuchung.....   | 67  |
| 5.    | Eigenenergiebedarf LFKW und Autarke Energieversorgung der Kläranlage .....              | 71  |
| 5.1   | Berechnung des Methanbedarfs .....  | 71  |
| 5.2   | Empfehlung zur Deckung des durchschnittlichen Methanbedarfs.....                        | 73  |
| 5.3   | Empfehlung zur Deckung des schwankenden Bedarfs.....                                    | 74  |
| 5.4   | Simulation zur Anpassung der Methanproduktion an Tagesschwankungen .....                | 75  |
| 5.5   | Simulation zur Anpassung der Methanproduktion gemäß der aktuellen Klärschlammmenge..... | 76  |
| 6.    | Bilanzierung .....  | 78  |
| 6.1   | Massenbilanz .....  | 78  |
| 6.2   | Energiebilanz .....   | 79  |
| 6.3   | Ökologische Bilanzierung / LCA .....  | 81  |
| 6.3.1 | Systemgrenze .....  | 82  |
| 6.3.2 | Datenliste .....  | 82  |
| 6.3.3 | Ergebnisse .....  | 83  |
| 7.    | Kosten-Nutzung-Analyse.....   | 87  |
| 7.1   | Systemgrenze .....  | 87  |
| 7.2   | Ergebnisse der Kosten-Nutzung-Analyse .....   | 89  |
| 7.3   | Optimierungsmöglichkeiten .....   | 92  |
| 8.    | Systemseitige Bewertung.....  | 94  |
| 8.1   | Methode.....  | 94  |
| 8.2   | Energiepotenziale aus Klärschlammnutzung .....  | 97  |
| 8.3   | Gas-Gestehungskosten.....   | 97  |
| 8.4   | Modellgestützte Szenarioanalysen .....  | 99  |
| 8.5   | Zusammenfassung.....  | 102 |
| 9.    | Handlungsempfehlungen und Wissenstransfer .....   | 103 |
| 10.   | Zusammenfassung.....  | 106 |

## Tabelle Verzeichnis

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Tabelle 3-1 | Bestimmung der Nährstoffgehalte.....  | 27 |
| Tabelle 4-1 | Rechtliche Rahmen .....   | 36 |
| Tabelle 4-2 | Übersicht der Genehmigungsverfahren nach Bau- und Immissionsschutzrecht, in Anlehnung an (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020) (Zens 2011).....   | 41 |
| Tabelle 4-3 | Übersicht Pressversuche .....   | 48 |
| Tabelle 4-4 | Charakterisierung der Proben.....   | 50 |
| Tabelle 4-5 | Vergleich der Gas- und Methanproduktionsraten, des Methangehalts und des mittleren CSB-Gehalts der Substrate Primärschlamm PS, Überschussschlamm SS, Presswasser PW und der Mischung aus SS+PS.....   | 53 |
| Tabelle 4-6 | Übersicht über die durchschnittlichen und maximalen Methanproduktionsraten, die Zeit nach Erreichen der maximalen Methanproduktionsrate, den täglichen Methanertrag und die Steigerung der Methanproduktion für verschiedene Mischungen im Vergleich zur Vergärung einer Mischung aus SS+PS (0 % PW) und reiner Vergärung von PW (100 % PW) ..... | 61 |
| Tabelle 4-7 | Laboranalysen von Kompost aus ungepresste Bioabfälle und gepresste Bioabfälle.....  | 71 |
| Tabelle 5-1 | Durchschnitt, Median, 0,15- und 0,85-Quantil des Energie- und Gasbedarfs von LFKW und Testreaktor .....   | 72 |
| Tabelle 5-2 | Empfehlungen für die Beschickung des LFKW-Faulturms zur Deckung des durchschnittlichen und des 0,85-Quantils des Methanbedarfs .....  | 73 |
| Tabelle 6-1 | Energiebilanz SepaFlex Konzept.....   | 80 |
| Tabelle 6-2 | Energiebilanz Presswasser.....  | 80 |
| Tabelle 6-3 | Datenliste LCA.....   | 83 |
| Tabelle 7-1 | Kosten und Nutzen des konventionellen Konzepts pro Tag ohne Presswasser .....   | 90 |
| Tabelle 7-2 | Kosten und Nutzen des SepaFlex-Konzepts pro Tag mit Presswasser.....  | 90 |
| Tabelle 8-1 | Modellübersicht E2M2-Bio .....  | 94 |
| Tabelle 8-2 | Frachtabbau der Kläranlagen in BW .....   | 96 |
| Tabelle 8-3 | Potentialabschätzung für Modellanalyse E2M2-Bio .....   | 97 |
| Tabelle 8-4 | Kenndaten für Gasgestehungskosten.....  | 98 |
| Tabelle 8-5 | Kenndaten für die Analyse und die resultierenden Gas-Gestehungskosten.....  | 98 |
| Tabelle 8-6 | Szenariorahmen mit CO <sub>2</sub> -Reduktionsziel.....   | 99 |

## Abbildung Verzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 2-1 | SepaFlex Verfahrenskonzept – bedarfsorientierte Verwertung von separierten Bioabfällen..... | 13 |
| Abbildung 2-2 | Verfahrensablauf der Kompostierungsanlage.....  | 15 |
| Abbildung 2-3 | Fließschema der gesamten Anlage LFKW .....  | 16 |
| Abbildung 2-4 | Hauptreaktionen der Feststoffvergärung (Kranert, 2017).....                                 | 18 |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Abbildung 3-1  | Presse der Firma Doppstadt.....  | 19 |
| Abbildung 3-2  | Absiebung für Massenbilanz .....   | 20 |
| Abbildung 3-3  | Rohmaterial - Bioabfall .....  | 20 |
| Abbildung 3-4  | Transport LKW .....  | 20 |
| Abbildung 3-5  | Absaugen von Zwischen Container zur Transport-LKW .....  | 21 |
| Abbildung 3-6  | Probenahme von Presswasser.....  | 22 |
| Abbildung 3-7  | Probenahme von Bioabfall .....   | 22 |
| Abbildung 3-8  | Probenahme von abgepresste Bioabfall.....  | 23 |
| Abbildung 3-9  | Trockenofen bei 105 °C.....  | 23 |
| Abbildung 3-10 | Muffelofen bei 550°C.....  | 24 |
| Abbildung 3-11 | Proben vor der Trocknung & nach der Trocknung bei 105 °C & nach der Verbrennung in einem Muffelofen bei 550 °C ..... | 25 |
| Abbildung 3-12 | Elementar Vario MAX CHN für CHN-Analyse.....   | 26 |
| Abbildung 3-13 | Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gasmenge und des CH <sub>4</sub> -gehaltes aus Presswasser .....                   | 27 |
| Abbildung 3-14 | Versuchsanlage - Halb technische Untersuchung .....  | 29 |
| Abbildung 3-15 | Schematisches Fließbild des Versuchsreaktors - Halb technische Untersuchung.....                                     | 30 |
| Abbildung 3-16 | Trommelgaszähler Firma Ritter - Halb technische Untersuchung.....  | 30 |
| Abbildung 3-17 | Datenlogger der Firma Endress + Hauser - Halb technische Untersuchung .....  | 31 |
| Abbildung 3-18 | Biogasproduktion [l/10 min], mittlerer Biogasertrag und Methangehalt [%] .. ..                                       | 34 |
| Abbildung 3-19 | Substratspezifischen Methanproduktion [l/(10 min*kg CSB)] .....  | 34 |
| Abbildung 4-1  | Bioabfall in der Pressmaschine .....   | 45 |
| Abbildung 4-2  | Angemischter Bioabfall mit Sickerwasser in Presse .....  | 46 |
| Abbildung 4-3  | Abgepresster Bioabfall (< 80 mm) .....   | 46 |
| Abbildung 4-4  | Presswasser (mit Sickerwasser angemaischt) .....   | 46 |
| Abbildung 4-5  | Angemischter Bioabfall mit Leitungswasser in Presse.....   | 47 |
| Abbildung 4-6  | Presswasser (mit Leitungswasser angemaischt).....  | 47 |
| Abbildung 4-7  | Probe Bioabfall (links) und abgepresster Bioabfall (rechts) .....  | 49 |
| Abbildung 4-8  | PW <sub>LW</sub> (links) und PW <sub>SW</sub> (rechts) .....   | 49 |
| Abbildung 4-9  | Sickerwasser.....  | 49 |
| Abbildung 4-10 | (1)Primärschlamm, (2)Überschussschlamm, (3)PW <sub>LW</sub> .....  | 50 |
| Abbildung 4-11 | Biogasertrag der verschiedenen Substrate.....  | 51 |
| Abbildung 4-12 | Methankonzentration von Batch-Untersuchung.....  | 52 |

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Abbildung 4-13 | Substratspezifische Methanproduktion [ $l/(10 \text{ min} \cdot \text{kg CSB})$ ] für Primärschlamm PS, Sekundärschlamm SS und Presswasser PW während der ersten 24 h nach der Beschickung des Fermenter ..... | 54 |
| Abbildung 4-14 | Methanproduktion [ $l/10 \text{ min}$ ] pro Liter Substrat in den ersten 24 h nach der Beschickung des Fermenters mit Substrat .....   | 54 |
| Abbildung 4-15 | Biogasbildungsrate und Methangehalt mit Klärschlamm + Presswasser ..   | 55 |
| Abbildung 4-16 | Biogasbildungsrate und Methangehalt mit Presswasser.....   | 56 |
| Abbildung 4-17 | Biogasbildungsrate und Methangehalt von Presswasser, Klärschlamm und Klärschlamm+Presswasser .....   | 57 |
| Abbildung 4-18 | Spezifische Biogasertrag in Abhängigkeit der zugeführten Presswassermenge.....   | 57 |
| Abbildung 4-19 | Methanproduktion [ $l/(10 \text{ min} \cdot \text{kg CSB})$ ] der verschiedenen Mischungen ...   | 58 |
| Abbildung 4-20 | Biogasproduktion [ $l/(10 \text{ min} \cdot \text{kg CSB})$ ] und den Methangehalt [%] der verschiedenen Mischungen.....   | 59 |
| Abbildung 4-21 | Korrelation der durchschnittlichen und maximalen Methanproduktion pro kg CSB mit dem Anteil von PW in einer Mischung aus PS+SS.....  | 60 |
| Abbildung 4-22 | Methanausbeute [ $l/(\text{kg CSB} \cdot \text{d})$ ] für Mischungen mit unterschiedlichen Gehalten an PW.....   | 60 |
| Abbildung 4-23 | Korrelation der Zeit [h] nach der Beschickung bis zum Erreichen der max. Methanproduktion, mit dem Anteil [%] von PW in einer Mischung aus PS+SS. ....   | 62 |
| Abbildung 4-24 | Methanproduktion [ $l/10 \text{ min}$ ] für eine Beschickung (1x), zwei Beschickungen (2x) und drei Beschickungen (3x) pro Tag bei einer OLR von $0,86 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ .....       | 63 |
| Abbildung 4-25 | Verlauf des Methangehalts von einem Futter pro Tag (1x), zwei Beschickungen pro Tag (2x) und drei Beschickungen pro Tag (3x).....  | 63 |
| Abbildung 4-26 | Vergleich der Methanproduktion mit OLR von $1,71 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ , einmal Beschickung und 2-mal Beschickung (5 h später).....  | 64 |
| Abbildung 4-27 | Faulturm LFKW mit einem Fassungsvermögen von $320 \text{ m}^3$ .....   | 66 |
| Abbildung 4-28 | Einlagerung des abgepressten und unabgepressten Materials in die Intensivrotte .....   | 67 |
| Abbildung 4-29 | Auslagerung aus der Intensivrotte nach 14 Tagen .....  | 68 |
| Abbildung 4-30 | Beider Materialien auf der Nachrotte .....   | 68 |
| Abbildung 4-31 | Erster Pressversuch - Kerntemperaturen des gepressten und ungespressten Bioabfalls während der Rottezeit.....  | 69 |
| Abbildung 4-32 | Zweiter Pressversuch – Kerntemperaturen des gepressten und ungespressten Bioabfalls während der Rottezeit .....  | 69 |
| Abbildung 4-33 | Erster Pressversuch Kern- und Randtemperaturen des ungespressten Materials während der Intensiv- und Nachrotte .....   | 70 |
| Abbildung 4-34 | Zweite Pressversuch Kern- und Randtemperaturen des ungespressten Materials während Intensiv- und Nachrotte .....   | 70 |
| Abbildung 5-1  | Gesamtstromverbrauch der Kläranlage LFKW .....   | 72 |

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Abbildung 5-2 | Kumulierter Methanbedarf des Medians, des Mittelwerts, des 0,15- und 0,85-Quantils über einen Tag und der gemessene tatsächliche Methanproduktion von Mischung mit 58,75% PW. ....72  | 72  |
| Abbildung 5-3 | Simulation der Methanproduktion und Tagesverlauf des Methanbedarfs [m <sup>3</sup> /h] des LFKW zur Energieautarkie.....76  | 76  |
| Abbildung 5-4 | Fließschema der Zusammensetzung des Biogasgewinns der Kläranlage LFKW.....77  | 77  |
| Abbildung 6-1 | Massenbilanzierung Szenario A .....78   | 78  |
| Abbildung 6-2 | Massenbilanzierung Szenario B .....78   | 78  |
| Abbildung 6-3 | Massenbilanzierung Szenario C.....79  | 79  |
| Abbildung 6-4 | Prozentualer Anteil des Energieverbrauchs von Presswasser.....81  | 81  |
| Abbildung 6-5 | Systemgrenze LCA .....82  | 82  |
| Abbildung 6-6 | LCA Schema SepaFlex-Konzept.....84  | 84  |
| Abbildung 6-7 | Vergleich des gesamten Eco-indicator score des SepaFlex-Konzepts, Erdgas und Düngermittel.....85  | 85  |
| Abbildung 6-8 | Vergleich der Eco-indicator score für die einzelnen Indikatoren von Sepaflex-Konzept, Erdgas und Düngemittel .....85  | 85  |
| Abbildung 6-9 | Normalisierung der Eco-indicator score für die einzelnen Indikatoren .....86  | 86  |
| Abbildung 7-1 | Faktoren der Kosten-Nutzen-Analyse bei konventionellem Vorgehen ohne Presswasser .....88  | 88  |
| Abbildung 7-2 | Faktoren der Kosten-Nutzen-Analyse bei der Co-Fermentation von Presswasser .....89  | 89  |
| Abbildung 7-3 | Prozentanteil der von Presswasser verursachten Kosten.....92  | 92  |
| Abbildung 8-1 | Vorgehensweise und Szenariobildung .....95  | 95  |
| Abbildung 8-3 | Installierte Leistung (oben) und Anteil an der Bruttostromerzeugung (unten) im deutschen Strommix unter Berücksichtigung von BGA mit Presswassernutzung bei 95% CO <sub>2</sub> -Reduktion; (FF 1,1 = konstant fahrende BGA, FF5 = flexibel betriebene BGA mit max. 5-facher Überbauung). ... 100 | 100 |
| Abbildung 8-4 | Installierte Leistung des Anteils an Biogasanlagen im deutschen Strommix unter Berücksichtigung von BGA mit Presswassernutzung bei 95% CO <sub>2</sub> -Reduktion; (FF 1,1 = konstant fahrende BGA, FF5 = flexibel betriebene BGA mit max. 5-facher Überbauung)..... 100                          | 100 |
| Abbildung 8-5 | Installierte Leistung (oben) und Anteil an der Bruttostromerzeugung (unten) im deutschen Strommix bei 95% CO <sub>2</sub> -Reduktion für den bestehenden Referenzanlagenpark (Ref.), ausschließlich Presswasser nutzende BGA und einen durch PW-Nutzung ergänzten BGA-Anlagenpark (Ref_PW).. 101  | 101 |
| Abbildung 8-6 | Installierte Leistung des Anteils an Biogasanlagen im deutschen Strommix unter Berücksichtigung von 95% CO <sub>2</sub> -Reduktion; (Ref. = bestehender BG-Anlagenpark; Nur PW = ausschließlich Presswasser nutzende BGA; Ref_PW = durch PW-Nutzung ergänzten BGA-Anlagenpark). ..... 102         | 102 |
| Abbildung 9-1 | Workshop I.....103  | 103 |
| Abbildung 9-2 | Workshop II.....105   | 105 |

# 1. Hintergrund und Ziele

## 1.1 Hintergrund

Die hochwertige energetische Verwertung von Biomasse, insbesondere von biogenen Reststoffen für die effiziente Erzeugung von Bioenergie nimmt eine wichtige Rolle zum Erreichen der europäischen und nationalen energie- und klimapolitischen Zielsetzungen ein. In weniger als zehn Jahren soll der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Bereitstellung von Strom im Bereich von 40 bis 45 % liegen und bis zum Jahre 2035 weiter auf 55 bis 60 % ausgebaut werden. Bei einer angestrebten Energieversorgung mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien spielt die Integration der fluktuierenden Stromerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik eine wichtige Rolle. Eine zielgerichtete bedarfsorientierte energetische Verwertung biogener Reststoffe kann, neben einem nachhaltigen Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien und einer erhöhten Ressourceneffizienz, einen wichtigen Beitrag zur Systemintegration erneuerbarer Energien und zum Ausgleich fluktuierender Energieerzeugung leisten. Durch den flexiblen und anpassbaren Betrieb von biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken (BHKWs) kann die Stromerzeugung dann erfolgen, wenn andere erneuerbare Energieträger nicht zur Verfügung stehen. Die Stromerzeugung erfolgt dezentral in vorhandenen Anlagen, wodurch die Stromversorgung gestützt und der Netzbetrieb sicherer wird.

Hohe Investitionskosten, lange Genehmigungsverfahren und Widerstand in der Bevölkerung stellen unter anderem wesentliche Herausforderungen für einen zügigen Ausbau von Bioabfallvergärungsanlagen und damit die notwendige Bereitstellung von Biogasproduktionskapazitäten aus Bioabfällen und biogenen Reststoffen dar. Des Weiteren können bestehende Kompostierungsanlagen nicht immer mit Vergärungsstufen im Rahmen einer Kaskadennutzung erweitert werden, da Faktoren wie Anlagengröße und Bioabfallqualität eine entscheidende Rolle spielen. Vor diesem Hintergrund steigt der Bedarf an alternativen Verwertungspfaden für Bioabfälle zur Energieerzeugung.

In Deutschland gibt es rund 9 000 biologische Abwasserbehandlungsanlagen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2018), in über 1.200 Kläranlagen (KA) wird derzeit Faulgas erzeugt, davon 88% mit Stromgewinnung (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019). Aufgrund der spezifischen Energiedichte und der beschränkten Entwässerbarkeit von Schlämmen aus der Abwasserreinigung ist es nicht möglich die maximale technische Raumbelastung bei Schlammfaulungsanlagen zu realisieren (ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG 1996). Somit ist eine Co-Fermentation von Klärschlamm mit Bioabfall eine sinnvolle, effiziente und kostengünstige Alternative. Diese Art der Co-Fermentation wird in Deutschland aber nur im Einzelfall praktiziert, da Kläranlagenfaultürme dafür ggf. zusätzlich nach Hygienerecht, Immissionsschutzrecht und nach Abfallrecht genehmigt werden müssten und zudem Probleme durch Stör- und Fremdstoffeintrag über den heterogenen Bioabfall entstehen können (MILKOWSKI 2009).

Eine Möglichkeit den rechtlichen Rahmenbedingungen gerecht zu werden und dabei dennoch den Großteil des Energiepotenzials von Bioabfall auszuschöpfen ist die Nutzung des beim Abpressen zur Vorkonditionierung von Bioabfall zur Kompostierung anfallenden flüssigen Presswassers (PW). Dabei handelt es sich um Prozessabwasser, welches der Abwasserreinigung zuzuführen ist. Aufgrund des hohen Anteils gelöster, leicht abbaubarer organischer Substanz und der daraus resultierenden guten Zugänglichkeit der Nährstoffe für die Mikroorganismen ist zu erwarten, dass das PW sehr gut geeignet ist, um als Co-Substrat im Faulturm von KA zur bedarfsorientierten Biogasproduktion eingesetzt zu werden. Die produzierte Energie kann entweder an den variierenden Strombedarf der KA angepasst oder zur flexiblen Nutzung ins Netz eingespeist werden. Hierdurch kann wiederum ein Zubau von



Biogasspeichern eingespart werden, welcher für die angestrebte flexible Betriebsweise des BHKW notwendig wäre.

## 1.2 Potential getrennt gesammelter Bioabfälle für die Energieerzeugung in Kläranlagen

Insgesamt wurden 2017 deutschlandweit bereits rund 13,5 Mio. Mg Bio- und Grünabfälle getrennt erfasst und verarbeitet. Davon wurden rund 40 % (5,3 Mio. Mg) in Vergärungsanlagen einschl. kombinierter Kompostierungs- und Vergärungsanlagen behandelt. Etwa 53 % wurden in Bioabfallkompostierungsanlagen (3,5 Mio. Mg) und Grünabfallkompostierungsanlagen (3,7 Mio. Mg) und 7 % (1 Mio. Mg) in Klärschlammkompostierungs- bzw. sonstigen biologischen Behandlungsanlagen verarbeitet. (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019b). Aufgrund der im Jahr 2015 eingeführten Verpflichtung zur Getrenntsammlung nach § 11 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes der biologisch abbaubaren Abfallströme kann zudem ein weiterer Anstieg der verfügbaren Bio- und Grünabfälle erwartet werden.

Die Stromerzeugung aus Bioabfallvergärung liegt bei etwa 220 kWh<sub>el</sub>/Mg Bioabfall (STRIPPEL 2016). Die derzeit ausschließlich stofflich genutzte Menge in Höhe von rund 7,2 Mio. Mg Bio- und Grünabfälle lässt demnach eine mögliche Stromerzeugung bei einer direkten Vergärung der Bioabfälle in Bioabfallvergärungsanlagen in Höhe von ca. 5.700 TJ/a erwarten. Dafür müssten aber auch Vergärungskapazitäten geschaffen werden.

In Vorversuchen konnten etwa die Hälfte der organischen Trockensubstanz (oTS) des Bioabfalls in PW überführt und eine vergleichbare Biogasausbeute pro kg oTS bei der Vergärung von PW erreicht werden. Somit ergibt sich ein Potential für die Stromerzeugung aus PW von ca. 2.850 TJ/a.

Im Jahr 2018 wurden von 1.274 KA rund 22.700 TJ Klärgas gewonnen und daraus ca. 1.500 GWh Strom erzeugt (STATISTISCHES BUNDESAMT 2019a). Davon werden ca. 92 % auf den KA selbst verbraucht und ca. 8 % in das Stromnetz eingespeist. Bisher können die KA mit einem Faulturn ca. 50 % ihres Eigenenergiebedarfs über die Verwertung des Klärgases decken. Durch die Co-Vergärung von abgepresstem Bioabfall in Faultürmen könnte die Energieproduktion um ca. 55 % gesteigert werden. Dieses Potential kann aus derzeit nicht energetisch genutztem Material geschöpft werden und es müssen keine zusätzlichen Vergärungsanlagen gebaut werden. Auch müssen die Faultürme auf KA weder umgerüstet noch erweitert werden, wie sich in der Praxis zum Beispiel in Österreich gezeigt hat. Hier werden allein im Land Tirol 25.000 Mg/a getrennt gesammelter Bioabfall in 17 KA mitvergoren (Meirer et al. 2017). Insgesamt nimmt Klärgas bisher ca. 1 % an der Strombereitstellung aus Erneuerbaren Energien ein.

## 1.3 Ziele

Die Arbeitsziele des Vorhabens sind umfangreiche chemisch-physikalische Untersuchungen der einzelnen Stoffströme sowie technische, ökonomische und ökologische Machbarkeitsanalysen durchzuführen. Die Ergebnisse sollen darlegen, inwiefern ein vielversprechendes Konzept zur optimierten Verwertung von Bioabfällen und Klärschlamm für die Deckung des Eigenenergiebedarfs für kommunale KA und die flexible Energieproduktion hinsichtlich Systemintegration der Erneuerbaren Energien und dem Ausgleich fluktuierender Energien geeignet ist. Die Herausforderungen des Verfahrens bestehen darin, dass die Auswirkungen der Prozesse (Pressen, Presswasserlagerung, Presswassertransport, Presswasservergärung und Kompostierung des abgepressten Bioabfalls) auf die Qualität der Zwischenprodukte (PW, aBA) und der Hauptprodukte (Biogas, Kompost, Gärrest) sowie der Einsatz von PW zur flexiblen Biogasproduktion in Faultürmen im Praxismaßstab noch

weitestgehend unerforscht sind. Das Ziel des Vorhabens ist es, die technischen und ökonomischen Möglichkeiten und Grenzen des SepaFlex-Verfahrens im Pilotbetrieb durch das ISWA, das LFKW und das IER der Universität Stuttgart gemeinsam mit der BEM Umweltservice GmbH zu analysieren und validieren sowie die Integration des bedarfsorientiert erzeugten Stromes ins zukünftige Stromsystem und dadurch mögliche Systemdienstleistungen zu untersuchen.

Folgende Ziele sollen im Rahmen des Projektvorhabens verfolgt werden:

- Definition von Qualitätskriterien, Charakterisierung und Bewertung des PW für die Biogaserzeugung, zur Deckung des im Tagesverlauf variierenden Eigenenergiebedarfs einer KA und die bedarfsorientierte Netzeinspeisung, sowie des aBA zur Kompostherstellung.
- Technische Bewertung der Anwendung des Konzepts und Analyse ökonomischer Kenndaten im Pilotbetrieb.
- Betriebswirtschaftliche Beurteilung einer bedarfsorientierten Stromerzeugung auf KA durch Nutzung des PW als Co-Substrat.
- Wirtschaftliche und ökologische Bewertung des Verfahrenskonzeptes im Vergleich zu den gängigen Konzepten der Bioabfallverwertung: (a) Bioabfallvergärungsanlage (b) Kaskadennutzung (Vergärung mit anschließender Kompostierung des Gärrückstandes), (c) Kompostbetrieb, und Ableitung notwendiger Rahmenbedingungen für die wirtschaftliche Betriebsweise des Verfahrenskonzeptes.
- Analyse und Bewertung der Rolle des SepaFlex-Konzepts im Vergleich zu anderen Bioenergieanlagen und im zukünftigen Gesamtenergiesystem, einschließlich Systemeffekten und -dienstleistungen.
- Untersuchung der rechtlichen Rahmenbedingungen unter Einbindung zuständiger Behörden.
- Erarbeitung von Vorschlägen für Anreizsysteme/Förderinstrumente, die eine bedarfsorientierte Stromerzeugung und Lastmanagement auf KA ermöglichen.
- Handlungsempfehlungen - Transfer und Qualitätssicherung von Ergebnissen.

Der Durchführung des Vorhabens und der geplanten Ergebnisverwertung stehen keine Schutzrechte bzw. Patente und Rechte Dritter entgegen.

Mit dem Vorhaben werden zukunftsweisende, effiziente und kostengünstige Technologien als Demonstrations- und Pilotvorhaben realisiert und damit der großtechnischen Umsetzung nähergebracht. Des Weiteren entspricht der Forschungsschwerpunkt des geplanten Vorhabens die Ziele einer effizienten Erzeugung von Strom aus Biomasse und dessen Integration ins Stromsystem und damit die Wertsteigerung der Strom- und Wärmebereitstellung sowie der kostengünstigen „Erschließung von Biomassereststoff- und Abfallpotenzialen einschließlich Klärgas“ im Rahmen innovativer Verfahren. Die Nutzung CO<sub>2</sub>-neutraler sekundärer Rohstoffe impliziert dabei eine kostengünstige Minderung von Emissionen.

Teilvorhaben A, ISWA: Effiziente, bedarfsorientierte Co-Vergärung von separiertem Bioabfallpresswasser zur Optimierung des Energiemanagements auf Kläranlagen

Teilvorhaben B, Hauke Erden GmbH / BEM Umweltservice GmbH: Separierung von biogenen Reststoffen als Basis zur effizienteren Energieerzeugung bei gleichbleibend hochwertiger stofflicher Nutzung.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Stand von Wissenschaft und Technik

Nach DWA-Regelwerk (DWA-M 380 2019) wird Co-Vergärung definiert als „die Mitbehandlung begrenzter Mengen eines Materials in einer Vergärungsanlage, das von den bei der Planung und Genehmigung der Anlage (zunächst) vorgesehenen Substraten in seinen materiellen oder auch nur rechtlichen Eigenschaften abweicht“ (Jank et al. 2017). Im Kontext der Co-Vergärung auf Kläranlagen wird zur Faulung ein weiteres organisches Substrat zum Hauptsubstrat (Primär- und Sekundärschlamm) hinzugefügt. Co-Vergärung von häuslichen Bioabfällen mit Klärschlamm wird in Deutschland nur im Einzelfall praktiziert, da Kläranlagenfaultürme dafür ggf. zusätzlich nach Hygienerecht, Immissionsschutzrecht und nach Abfallrecht genehmigt werden müssten und zudem Probleme durch Stör- und Fremdstoffeintrag über den heterogenen Bioabfall (MILKOWSKI 2009) und darüber hinaus Mehrkosten für die Kläranlage durch Abrasion an Aggregaten, verlegten Leitungen und Sedimenten im Faulturm entstehen (Jank et al. 2017). FRICKE, ET AL. zeigten, dass durch Co-Vergärung über 40% Steigerung der Stromproduktion im Kläranlagenbetrieb zu erwarten sind, aber gleichzeitig Forschungsbedarf für die Umsetzung in der Praxis besteht (Technische Universität Braunschweig 2012). Im 30. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen der DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.) haben Anlagen mit Co-Substraten, gegenüber Anlagen ohne Zugabe von Co-Substraten, einen deutlich höheren spezifischen Gasanfall, welcher im Bereich zwischen 18 % und 39 % liegt (BMU 2018).

Neben der Steigerung der Faulgasmenge und der daraus resultierenden Verbesserung aus energetischer Sicht durch die Zugabe von Co-Substraten wird aber auch auf den Mehraufwand bei der Schlammmentwässerung und bei der Klärschlammmentsorgung sowie der Anstieg der Rückbelastung hingewiesen (BMU 2018). Angilella et al. (2019) schreiben, dass durch Co-Vergärung eine wirtschaftliche und ökologisch sinnvolle Verwertung von organischen Reststoffen an Kläranlagen durchgeführt, der verfahrenstechnische Ablauf des Gärprozesses verbessert sowie eine Steigerung der Qualität des Gärrückstandes bzw. eine Verbesserung des Klärschlammabbaus erreicht werden kann (ANGILELLA et al. 2019). Mattes (2015) beschreibt eine Kläranlage in Biberach, die mittlerweile durch Co-Vergärung energieneutral ist (MATTES et al. 2015). In Österreich, insbesondere im Bundesland Tirol, ist die kontinuierliche Co-Vergärung von Bioabfällen in KA bereits weit verbreitet und ein steigender Trend zu verzeichnen. Untersuchungen an der Universität Innsbruck zeigten Vor- und Nachteile verschiedener Aufbereitungstechniken für getrennt erfasste Bio- und Restabfälle für die Co-Vergärung in KA auf (Jank et al. 2015) (Meirer et al. 2017). In dem in JANK, ET AL. 2015 beschriebenen Projekt wurde das Verhalten der Störstoffe beim Abpressen des Bioabfalls betrachtet. Es wird ein großes Potenzial des Verfahrens, Bioabfälle abzupressen und beispielsweise mittels Co-Vergärung zu verwerten, gesehen. Allerdings ist die Störstoffproblematik dabei weiterhin zu beachten und wird nicht durch das Abpressen allein gelöst. In dem zweiten Projekt aus Tirol (Meirer et al. 2017) wird die Co-Vergärung von abgepresstem Restabfall mit Klärschlämmen betrachtet. Die Charakterisierung und die Ermittlung des Biogaspotentials lassen eine Eignung des Substrats erwarten, was jedoch zunächst durch weitere Untersuchungen bewiesen werden muss.

Es liegen verschiedene Studien zur Co-Vergärung organischer Reststoffe mit Klärschlamm und zu Einzelfragestellungen der PW-Nutzung für die Biogasproduktion vor. Die Eignung des PW aus verschiedenen Substraten für die Biogasproduktion wurde im Rahmen des IFBB

(Integrierte Festbrennstoff- und Biogasproduktion aus Biomasse) Verfahrens gezeigt und die hohe Verfügbarkeit der extrahierten Organik aus dem flüssigen Reststoff bewiesen (Hensgen et al. 2011) (Bühle et al. 2012) (Corton et al. 2014). Untersuchungen zur flexiblen Biogasproduktion mittels PW aus landwirtschaftlichen Substraten in Festbettfermentern wurden im Kontext des Rebi-Verfahrens durchgeführt (Hahn et al. 2014) (Hahn et al. 2015). In eigenen Vorarbeiten und im Rahmen des Projekts Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft - ESiTI FKZ: 02WER1322 wurde bereits die bedarfsgerechte Biogasproduktion durch Co-Vergärung von getrennt gesammelten Speiseresten mit Klärschlamm zur Flexibilisierung von KA untersucht und gezeigt (SCHAUM et al. 2015)

SÄNGER ET AL. (2011) und BRUNSTERMANN ET AL. (2015) haben zusätzlich zum Methanerzeugungspotential aus PW auch die Auswirkungen der Entfrachtung des Bioabfalls auf die Kompostierung im Rahmen des BMWi FuE- Vorhabens FKZ 0327846 A/B und FKZ 0327846 C-F untersucht (Sänger et al. 2011) (BRUNSTERMAN et al. 2015). Die Ergebnisse zeigen, dass sich für den Kompostierungsprozess sowohl Durchsatz und Kapazität, als auch die gesamte Energieeffizienz der Anlage erhöht. Für das PW wurde großtechnisch der Einsatz in einem kontinuierlich durchmischten Fermenter sowie in einem Biofilmreaktor untersucht. Der Einsatz im Rührkesselfermenter musste aufgrund von Sandablagerungen abgebrochen werden. Der Einsatz in Biofilmreaktoren ergab bessere Ergebnisse und verspricht im Vergleich zur Trockenvergärung geringeren Invest und Verschleiß sowie reduzierte Betriebskosten.

NAYONO ET AL. (2010) zeigten, dass durch die Zugabe von organischem Presswasser die gesamte Biogasproduktion verbessert und die Biogasproduktionsrate erhöht wurde (Nayono et al. 2010).

Das BMU fördert aktuell mittels Umweltinnovationsprogramm (UIP) verschiedene Projekte zur Co-Vergärung von Bioabfallpresswasser mit dem Ziel die Ressourcen- und Energieeffizienz der jeweiligen Anlagen zu verbessern. Bei dem Pilotprojekt: ‚Presswasservergärung aus getrennt erfassten Restabfällen mit überwiegender Eigenstrom- und Wärmenutzung‘ wurde die mechanisch-biologische-Abfallbehandlungsanlage mit einer Vergärungsstufe nachgerüstet, so dass die Bioabfälle weitgehend energieautark kompostiert und darüber hinaus, durch den Ersatz extern bezogener Energieträger, die Treibhausgas-Emissionen um 77% verringert werden können (BMU 2018). Es besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Nicht untersucht wurde bisher die Co-Vergärung von Bioabfall-PW und Klärschlamm mit dem Fokus auf der bedarfs-gerechten Energieproduktion und somit die Option zur bedarfsgerechten energetischen Verwertung der beiden Rest-stoffe: häuslicher Bioabfall und kommunaler Klärschlamm. Eine interessante Fragestellung ergibt sich zudem aus der Sicht der Kompostanlagen: Wieweit kann durch das Abpressen des Presswassers die anfallende Abwassermenge verringert und damit die Behandlungskosten für das in der Kompostanlage anfallende Abwasser gesenkt werden und welche Auswirkungen hat dies auf die Qualität des Kompostprozesses und dessen Produkt?

Durch die Zusammenführung der verschiedenen Reststoffe (häuslicher Bioabfall und Klärschlamm) gelten für das Verfahren Normen, Standards und Regulierungen aus den Bereichen des Abfall-, Abwasser- sowie Energierechts. Insbesondere ist zu klären, inwiefern Kläranlagen, die PW von häuslichem Bioabfall einsetzen, von Hygienerecht, Immissionsschutzrecht und dem Abfallrecht betroffen sind. Konkret stellt sich die Frage, ob das PW, welches auf einer Kompostierungsanlage (Abfallbehandlungsanlage) erzeugt wurde,

noch immer dem Abfallrecht unterliegt oder ob es Abwasser ist und somit einer KA zugeführt werden muss.

Als technische Herausforderung auf der KA ist zu untersuchen, ob der Anaerobschlamm im Faulturm durch die wässrige Lösung, sprich das PW, ausgeschwemmt wird und wie hoch der Störstoffanteil im PW ist? Unter anderem aus diesen Gründen sind Versuche zur Charakterisierung des PWs notwendig, um z.B. die maximale hydraulische Beschickung zu bestimmen.

## 2.2 Verfahrensbeschreibung

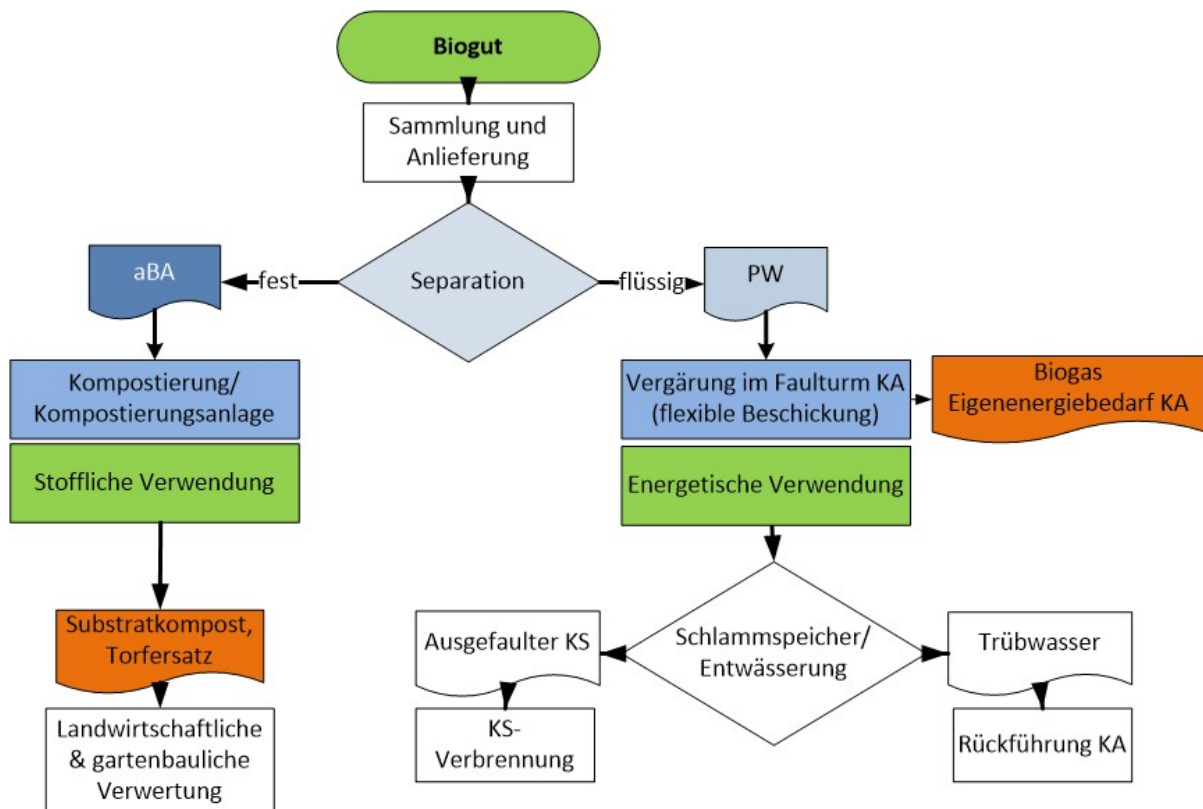


Abbildung 2-1 SepaFlex Verfahrenskonzept – bedarfsorientierte Verwertung von separierten Bioabfällen

Das innovative SepaFlex-Konzept ist die energetische Nutzung von Bioabfallpresswasser (PW) im Faulturm kommunaler KA zur bedarfsgerechten Stromerzeugung bei gleichzeitiger stofflicher Verwertung des vorkonditionierten abgepressten Bioabfalls (aBA) zur Kompostproduktion. Es verspricht eine vergleichbare Energieausbeute wie die Verwertung der Bioabfälle in Bioabfallvergärungsanlagen, kann aber durch Nutzung bestehender Verwertungs-kapazitäten mit erheblich geringerem Investitionsaufwand erreicht werden und ermöglicht zudem eine flexible Energieproduktion aus Klärschlamm und Bioabfall. Der vorsortierte Bioabfall wird unter Zugabe von Prozesswasser abgepresst und der abgepresste Bioabfall (aBA) wird in der Kompostierungsanlage zu hochwertigen Produkten weiterverarbeitet. Das beim Pressen entstandene Presswasser (PW) wird zur KA transportiert, dort gelagert und als Co-Substrat in den Faulturm eingebracht. Die Beschickungszeiten sollen nach einem für die bedarfsorientierte Biogasproduktion entwickelten Beschickungsfahrplan

unter Berücksichtigung des im Tagesverlauf variierenden Strombedarfs der KA und der Strompreisprognosen für die Netzeinspeisung erfolgen.

### 2.3 Kompostierungsanlage

Seit 1994 wird die immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Kompostieranlage betrieben. In der Anlage werden Abfälle aus der Biotonne und Grünabfall (z.B. Grünschnitt, Gras- und Rasenschnitt etc.) verarbeitet. Insgesamt hat die Anlage eine genehmigte Kapazität von 25.000 Mg/a, davon bis zu 22.000 Mg/a Bioabfall aus kommunaler Sammlung und bis zu 5.000 Mg/a Grüngut. Die Abfälle werden unter Verwendung einer semipermeablen, einhausenden Membran kompostiert und zu gütegesichertem Kompost verarbeitet. Für die Versuche des Projekts wurden nur Abfälle der Biotonne verwendet.

Im Wesentlichen werden auf der Anlage Bioabfälle aus der kommunalen Sammlung der Biotonne und Grünschnitt verarbeitet. Nachdem die Bioabfälle in der Anlieferungshalle abgeladen wurden, werden diese einer optischen Störstoffkontrolle unterzogen. Anschließend werden diese mit Grüngut als strukturgebendes Material vermischt und für 2-3 Wochen in die Intensivrotte eingelagert. Die Mieten der Intensivrotte sind durch Rinnen im Boden belüftet und die Luft wird über eine Absaugung einem Biofilter zugeführt. Anschließend wird das Material für 3-4 Wochen auf der offenen, belüfteten Nachrotte gelagert. Danach finden in Abhängigkeit der Materialeigenschaften, wie z.B. der Feuchte, unterschiedliche gestufte Absiebungen statt. Zunächst wird mit einer Maschenweite von 80 mm abgesiebt und das Material > 80 mm wird entweder der thermischen Verwertung zugeführt oder als Strukturmaterial wieder dem frischen Bioabfall zugemischt. Danach wird das Material üblicherweise noch 1-2 Wochen nachgereift, bevor es auf 40 mm abgesiebt wird. Der Siebüberlauf 40/80mm wird thermisch verwertet. Je nach Abnahmemengen, lagert bzw. reift nach Material dann noch nach bevor es final auf 15 mm abgesiebt wird und als Kompost vermarktet werden kann. Der Überlauf 15/40 mm wird entweder der thermischen Verwertung zugeführt oder als Strukturmaterial dem Kreislauf wieder zugeführt. Die einzelnen Schritte bzw. Absiebungen und Lagerzeiten sind im Betrieb variabel und können je nach Materialqualität auch abweichen. Die Menge an Kompost beträgt ca. 1/3 der Inputmenge.

Bei der Intensivrotte sowie bei der Nachrotte entsteht jeweils ein prozessbedingtes Sickerwasser, welches ca. 2 % der Inputmenge ausmacht. Problem ist, dass das anfallende Sickerwasser aus der Intensivrotte nicht als Düngemittel wie das aus der Nachrotte verwendete werden kann, da es nicht hygienisiert ist. Die Mengen müssen teuer über die Einleitung in Kläranlagen entsorgt werden. Den Kläranlagen macht wiederum die hohe organische Belastung des Abwassers zu schaffen.

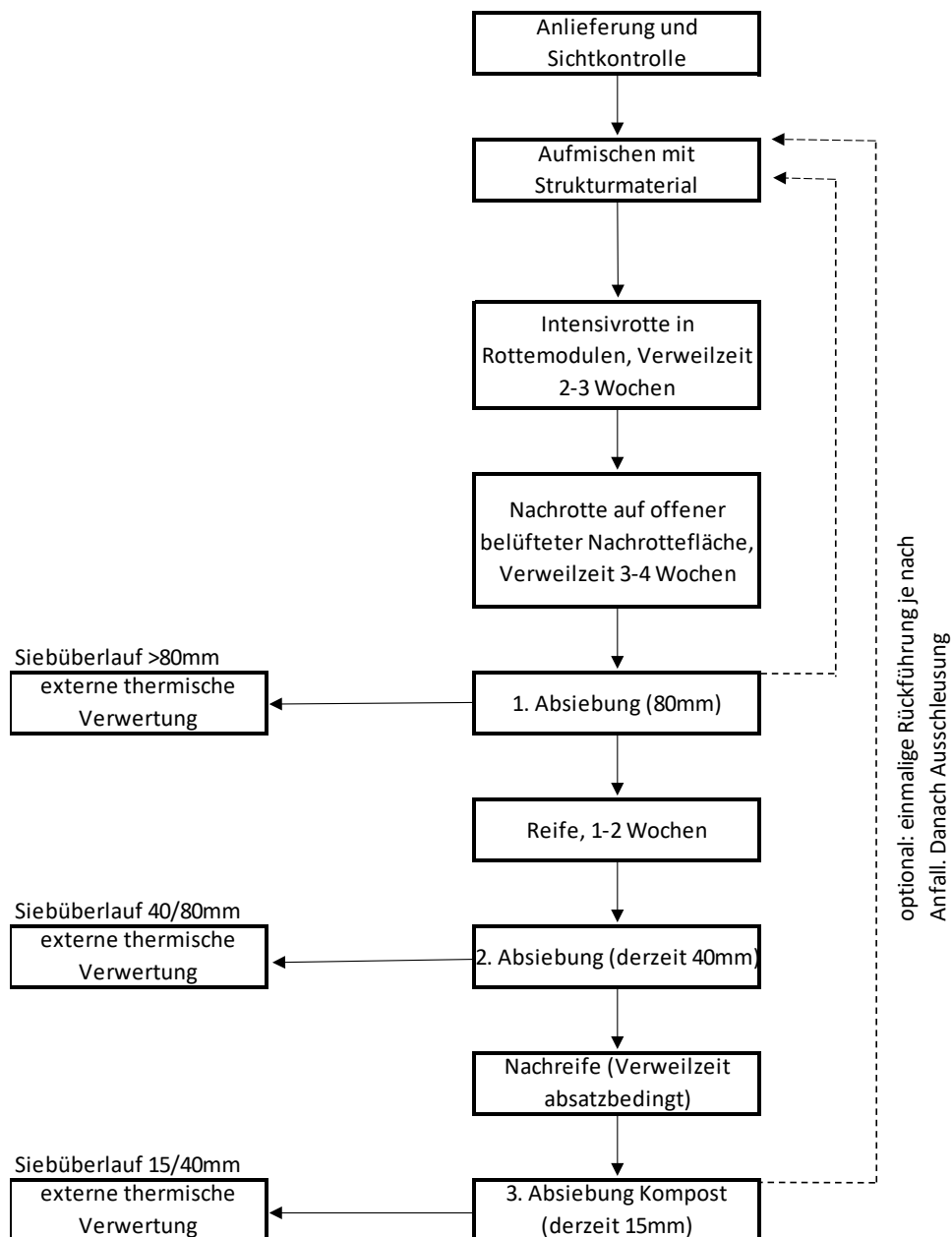


Abbildung 2-2 Verfahrensablauf der Kompostierungsanlage

## 2.4 Lehr- und Forschungsklärwerk (LFKW)

Das Lehr- und Forschungsklärwerk (LFKW) liegt unterhalb des Ortsteils Bösau am Rande des Naturschutzgebietes "Rot- und Schwarzwildpark" im Westen der Stadt Stuttgart. Es wurde 1966 nach vierjähriger Bauzeit fertiggestellt und es werden Abwässer aus den Stuttgarter Vororten Lauchhau, Bösau, dem nördlichen Bereich Vaihingens sowie aus großen Teilen des Universitätsbereichs Vaihingen-Pfaffenwald gereinigt. Die Kapazität der hydraulischen Einrichtungen zur Abwasserreinigung liegt bei 30 l/s. Sie reicht aus, um den gesamten Trockenwetterzufluss aus dem Einzugsgebiet aufzunehmen. Bei erhöhtem Mischwasseranfall infolge von Niederschlägen wird ein Teil des ankommenden Abwassers unmittelbar vor dem LFKW in den 2,7 km langen Pfaffenwaldstollen entlastet und über diesen zum Stuttgarter Talkessel hin abgeleitet. Die jährlich behandelte Abwassermenge liegt in der Größenordnung von 800.000 m<sup>3</sup>. Die zugeführte Schmutzfracht entspricht der von ca. 10.000 Einwohnern. Das

gereinigte Abwasser wird in den Bandtälesbach mit einem Trockenwetterabfluss von lediglich 3 - 5 l/s eingeleitet und gelangt über die Flüsse Glems, Enz und Neckar in den Rhein.

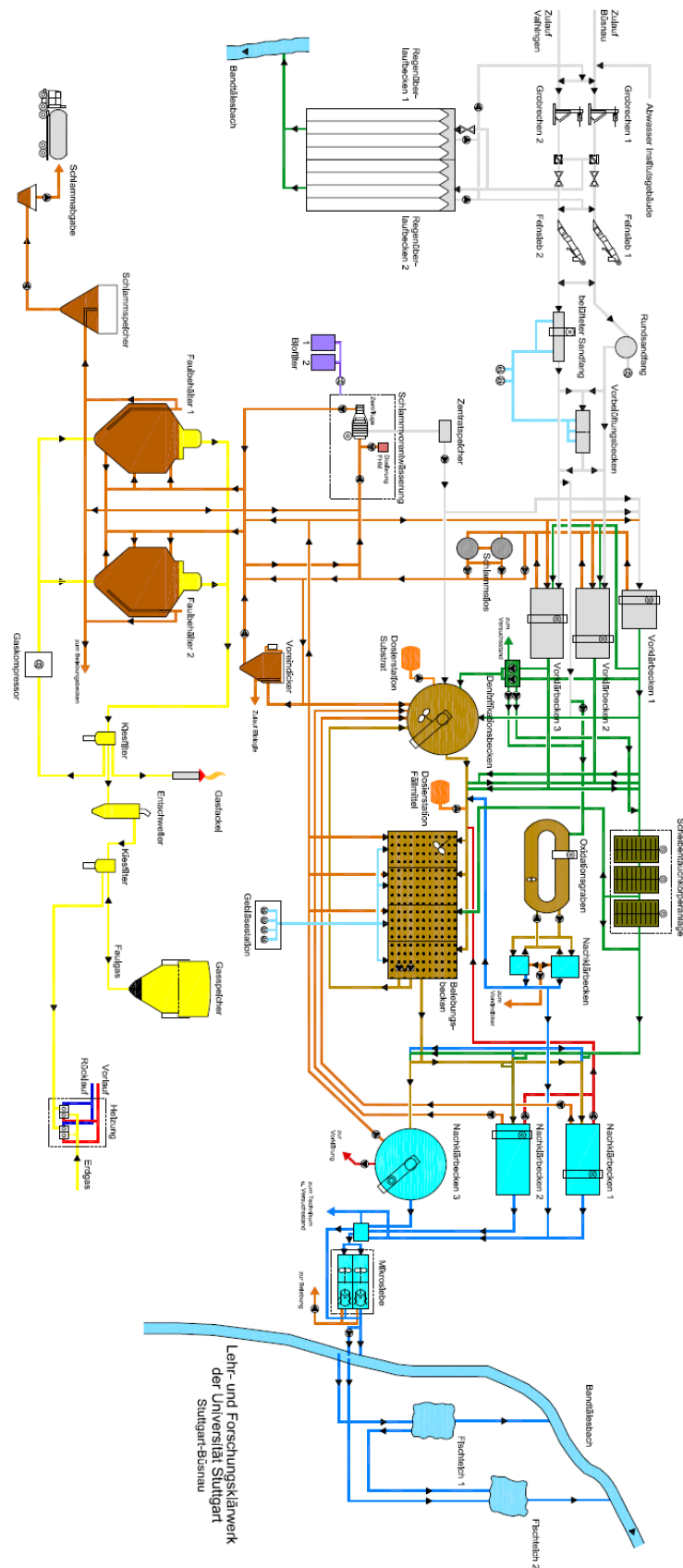


Abbildung 2-3 Fließschema der gesamten Anlage LFKW



An erster Stelle ist es dessen "Mehrgleisigkeit". Das relativ dicke häusliche Abwasser aus Büssnau und der eher einem dünnen industriellen Abwasser vergleichbare Zufluss aus dem Universitätsbereich und dem restlichen Einzugsgebiet werden dem LFKW in getrennten Kanälen zugeführt.

Im Gegensatz zu anderen Kläranlagen werden die Abwässer im LFKW daher nicht nach einem starren Fließschema gereinigt. Die Abwasser- und schlammführenden Rohrleitungen sind zum überwiegenden Teil in unterirdisch angelegten, begehbaren Rohr- und Kabelkanälen installiert. Unter der Maßgabe, dass das Abwasser für Forschungszwecke grundsätzlich von jedem Punkt des Fließschemas zu jedem beliebigen Punkt geführt werden können muss, wurden insgesamt über 10 km Rohrleitungen verlegt.

Schließlich kann mit Hilfe zweier beweglicher Wehre ober- und unterhalb des LFKW eine Bachstrecke mit definiertem Querschnitt über eine Länge von 350 m abgegrenzt und für Versuchszwecke genutzt werden.

Der anfallende Klärschlamm wird mittels Zentrifuge unter Einsatz von Flockungshilfsmitteln vorentwässert und anaerob stabilisiert. Zwei beheizbare Faulbehälter (Inhalt je 320 m<sup>3</sup>) werden zur anaeroben Stabilisierung der anfallenden Schlämme eingesetzt. Die Umwälzung erfolgt mittels Faulgaseinpressung oder Umpumpen. Einen Gasbehälter (nutzbarer Inhalt 100 m<sup>3</sup>) mit höhenbeweglicher Glocke dient zur Zwischenspeicherung des Faulgases vor dessen Nutzung zu Heizzwecken.

Das Faulgas wird im Blockheizkraftwerk (BHKW) in elektrische und thermische Energie umgewandelt, um die Kläranlage und die benachbarten Anwohner mit Wärme und Strom zu versorgen. Das BHKW wird im Sommer mit einer Leistung 32 kW und im Winter mit 48 kW betrieben. Somit ergibt sich im Sommer eine elektrische Tagesleistung von 768 kWh und im Winter von 1.152 kWh.

## 2.5 Der Anaerobe Abbauprozess

Unter anaerober Vergärung wird der biologische Abbau von organischem Material durch bestimmte Bakteriengruppen in Abwesenheit von Sauerstoff und die partielle Umsetzung des Materials in Biogas verstanden.

Der anaerobe Prozess findet in vier Schritten bzw. Phasen (Hydrolyse, Versäuerung, Acetogenese und Methanogenese) statt, an denen jeweils spezielle Bakteriengruppen beteiligt.

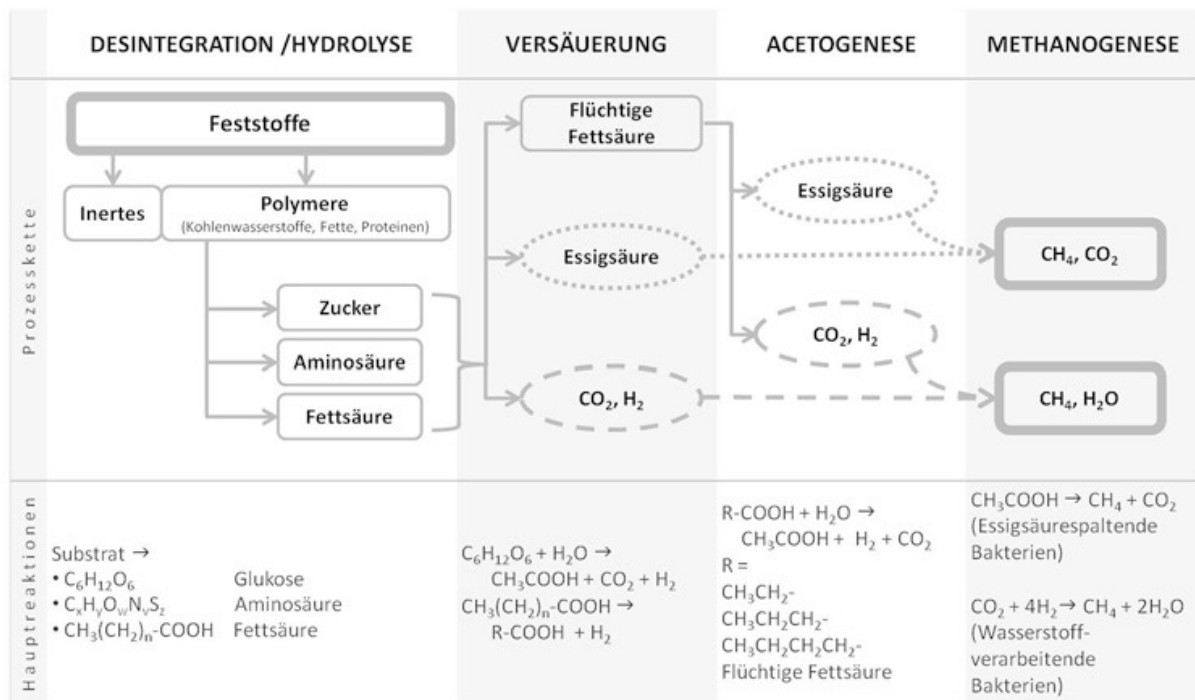


Abbildung 2-4 Hauptreaktionen der Feststoffvergärung (Kranert, 2017)

- In der Hydrolysephase werden die komplexen organischen Substratstrukturen desintegriert und in Monomere zerlegt, z.B. Kohlenhydrate in Monosaccharide, Eiweiß in Aminosäure und Fette in langkettige Fettsäure.
- Die vorhandenen Monomere werden schnell von Versäuerungs-bakterien als Substrat verwendet, wobei Alkohole und flüchtige Fettsäuren (darunter Essig-, Propion-, Valerian-, Buttersäure) entstehen.
- In der Acetogenese werden die Fettsäuren (ab C3-Kette) in Essig- oder Ameisensäure (C2 bzw. C1) umgewandelt. In beiden Phasen, Versäuerung und Acetogenese, werden Wasserstoff und Kohlenoxide freigesetzt.
- Die Methanerzeugung kann dann auf zwei Wegen erfolgen: ungefähr 30 % des Methans entsteht durch H<sub>2</sub>-Oxidation mit CO<sub>2</sub> und ca. 70 % aus Spaltung der Essigsäure in Methan und Kohlenstoffdioxid. Dieser letzte Schritt wird normalerweise als geschwindigkeitslimitierend angesehen, da die beteiligten Bakterien eine niedrigere Wachstumsrate und folglich eine höhere Empfindlichkeit gegenüber den Milieubedingungen aufweisen. (Kranert, 2017)

### 3. Material und Methode

#### 3.1 Versuche zum Abpressen von Bioabfall

Zum Abpressen soll nur das Material 0-80 mm verwendet werden, um den Störstoffgehalt zu reduzieren bzw. die Produktion von Mikroplastik durch Pressen zu Minimieren. Im Vorfeld der Pressversuche wurde deshalb durch Absieben mehrfach das Verhältnis von Siebdurchgang zu Siebüberlauf bestimmt. Hierzu wurde der frische Bioabfall mit einem 80 mm Sieb abgesiebt (Abbildung 3). Dies wurde vor allen drei Pressversuchen durchgeführt. Die Verhältnisse waren 3,9 : 1 und 3,2 : 1 und 3,3 : 1 (Siebdurchlauf : Siebüberlauf).

Pressmaschine von Doppstadt (Abbildung 3-1):

- Der Presskorb ist aus verschleißfestem Edelstahl mit konischen Öffnungen von 10 mm
- Verwendete Presskegeldrücke von 130 bar bzw. zeitweise 110 bar (in diesem Fall wurde der Durchsatz gedrosselt, wodurch sich die Verweilzeit in der Presse verlängerte, wobei auch bei diesem geringeren Druck eine gute fest-flüssig-Trennung erreicht wurde)
- Die Pressschneckendrehzahl lag zwischen  $16 \text{ min}^{-1}$  und  $20 \text{ min}^{-1}$
- Der Schieber (d. h. die Übergabe von Mischer zur Presse) wurde je nach Feuchtigkeit der Feststofffraktion auf dem Austragsband geschlossen oder geöffnet oder nur teilweise geöffnet und damit die aufgegebene Menge angepasst



Abbildung 3-1 Presse der Firma Doppstadt



Abbildung 3-2 Absiebung für Massenbilanz



Abbildung 3-3 Rohmaterial - Bioabfall



Abbildung 3-4 Transport LKW



Abbildung 3-5 Absaugen von Zwischen Container zur Transport-LKW

### 3.2 Probenahme und Laboranalyse

Die Probenahme erfolgte bei jedem Pressversuch vor Ort und wurde nach DIN 19698 durchgeführt, d. h. mehrdimensionale und multitemporale Probenahme, um sicherzustellen, dass eine repräsentative Probe erhalten wurde.

Die Charakterisierung der Substanz ist für die Erkennung von Substanzen und für die Planung von Experimenten notwendig. Im Anschluss an die Probenahme vor Ort werden der Roh-Bioabfall, das Presswasser, der gepresste Bioabfall und das zur Bewässerung verwendete Sickerwasser charakterisiert. Zur Charakterisierung wurden TS, oTS, pH sowie der Kohlenhydrat-, Fett- und Proteingehalt der Substanz als Parameter gewählt. Außerdem wurden der Nährstoff- und Säuregehalt der Substanzen gemessen, um die biologische Abbaugeschwindigkeit der Substanzen näher zu bestimmen.



Abbildung 3-6 Probenahme von Presswasser



Abbildung 3-7 Probenahme von Bioabfall



Abbildung 3-8 Probenahme von abgepresste Bioabfall

Um die Stabilität des anaeroben Abbaus zu überprüfen, werden von Montag - Freitag an den Tagen der Beschickung die Prozessparameter Betriebstemperatur und pH-Wert gemessen. Für die Beurteilung der zugeführten Fracht und den Abbaugrad wird täglich der CSB, TS-, und oTS-Gehalt analytisch bestimmt. Die Versuche wurden in einem diskontinuierlich beschickten Rührkesselreaktor durchgeführt. Die Temperatur ist konstant bei  $36^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.1 Trockensubstanzgehalt

Der Trockenrückstand gibt den prozentualen Feststoffgehalt in einem Stoffgemisch an. Die Bestimmung des Trockenrückstandes (TS) erfolgt gravimetrisch nach DIN 38414-2.



Abbildung 3-9 Trockenofen bei  $105^{\circ}\text{C}$

Der Trockensubstanzgehalt kann wie folgt berechnet werden:

$$TS = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} * 100\%$$

- Mit: TS    Trockenrückstand [%]  
m<sub>1</sub>    Masse Tiegel leer [g]  
m<sub>2</sub>    Masse Tiegel mit Frischprobe [g]  
m<sub>3</sub>    Masse Tiegel mit Trockenmasse [g] (nach dem Trocknen)

### 3.2.2 Organische Trockensubstanz



Abbildung 3-10    Muffelofen bei 550°C

Die organische Trockensubstanz gibt den Anteil an organischer Substanz an der gesamten Feststoffmenge der Probe an. Die organische Trockensubstanz wird ebenfalls gravimetrisch nach DIN 38414-3 bestimmt und der organische Trockenrückstand kann wie folgt berechnet werden:

$$oTS = \frac{(M_b - M_c)}{(M_b - M_a)} * 100\%$$

- Mit: oTS    organische Trockensubstanz [%]  
M<sub>a</sub>    Masse Tiegel leer [g]  
M<sub>b</sub>    Masse Tiegel mit Trockenmasse [g]  
M<sub>c</sub>    Masse Tiegel mit Asche [g] (nach dem Trocknen)





Abbildung 3-11 Proben vor der Trocknung & nach der Trocknung bei 105 °C & nach der Verbrennung in einem Muffelofen bei 550 °C

### 3.2.3 pH Wert

Um die Stabilität des Prozesses zu überwachen, wurde der pH-Wert im Reaktor täglich gemessen. Die pH-Werte wurden elektrometrisch mit pH-Meter der Firma Schott Geräte (TR 155) gemessen. Vor den Messungen wurde das pH-Meter täglich mit Standardlösungen von pH 4 und 7 kalibriert.

### 3.2.4 Chemische Sauerstoffbedarf (CSB)

Der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) gibt an, wie viele Oxidationsäquivalente (ausgedrückt als O<sub>2</sub>) für die Oxidation aller in der Probe enthaltenen oxidierbaren Stoffe erforderlich sind. Im Wesentlichen werden organische Kohlenstoffe in den Proben oxidiert. Der CSB wurde nach DIN 38409-41 analysiert.

Der CSB ist ein sehr wichtiger Parameter für die Bewertung der organischen Belastung der CSB ermöglicht Bilanzberechnungen für ein System (Rosenwinkel et al. 2015).

### 3.2.5 Gesamte organische Kohlenstoff (TOC)

Der gesamte organische Kohlenstoff (TOC) gibt an, wie viel organischer Kohlenstoff in einer Probe enthalten ist. Die Proben für die TOC-Analyse wurden vor der Analyse eine Woche lang getrocknet. Um die Verdunstung flüchtiger organischer Stoffe aus der Probe zu vermeiden, wurde die Temperatur im Trockenofen auf 60 °C eingestellt. Die TOC-Analyse nach der Methode DIN EN 15936 durchgeführt.

### 3.2.6 CHN Analyse

Bei der CHN-Analyse wird der Gehalt an Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Stickstoffelementen in einer Probe gemessen. Die Proben für die CHN-Analyse wurden eine Woche lang bei 60 °C in einem Trockenofen getrocknet und in einem Gerät von Elementar Vario MAX CHN analysiert.

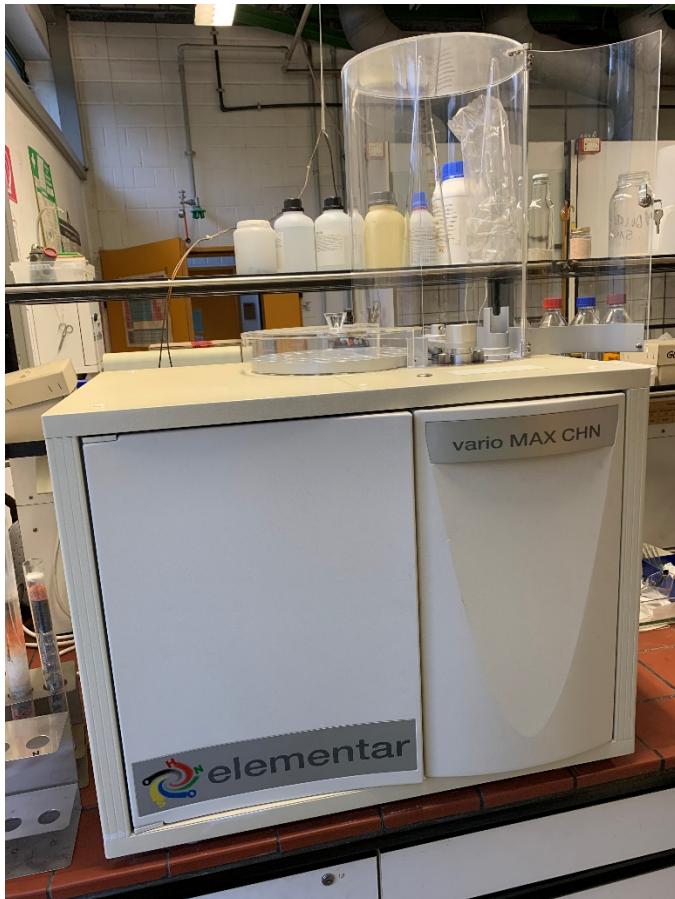


Abbildung 3-12 Elementar Vario MAX CHN für CHN-Analyse

### 3.2.7 Organische Säuren

Organische Säuren spielen eine sehr wichtige Rolle im anaeroben Vergärungsprozess. Die Hydrolyseprodukte werden in der Versäuerungsphase (Acidogenese) zu organischen Säuren (z. B. Essig-, Propion- und Buttersäure) abgebaut. In der Essigsäurephase (Acetogenese) werden die organischen Säuren zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid abgebaut. Der Gehalt an organischen Säuren stellt die Säureproduktion und das Gasproduktionspotenzial der Substanz dar. Es wurden folgende Säuren mit Hilfe der GC-Analytik gemessen: Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure, ISO Valerians., Valeriansäure und Capronsäure.

### 3.2.8 Nährstoffgehalt

Für die Bestimmung der Nährstoffgehalte sind die geprüften Parameter sowie die verwendeten Methoden und die Einheiten in folgender Tabelle 3-1 aufgelistet.

Tabelle 3-1 Bestimmung der Nährstoffgehalte

| Verfahren          | Parameter                     | Einheit |
|--------------------|-------------------------------|---------|
| DIN 38409-2-2      | AFS                           | mg/l    |
| DIN EN 25663       | TKN                           | mg/l    |
| DIN EN 25663       | TKN mf                        | mg/l    |
| DIN 38406-5-2      | NH <sub>4</sub> -N            | mg/l    |
| DIN EN ISO 10304-1 | NO <sub>2</sub> -N            | mg/l    |
| DIN EN ISO 10304-1 | NO <sub>3</sub> -N            | mg/l    |
| DIN EN ISO 10304-1 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l    |
| DIN 38414-11       | P <sub>ges.</sub>             | mg/kg   |
| DIN 38414-12       | P <sub>ges.</sub>             | mg/l    |
| DIN 38414-12       | P <sub>ges,mf</sub>           | mg/l    |
| DIN EN ISO 6878    | PO <sub>4</sub> -P            | mg/l    |

### 3.3 Batch Untersuchung

Der Biogas- und Methanertrag der Proben wurde in Batch-Versuchen nach VDI 4630 bestimmt. In diesen Batch-Versuchen werden die organischen Substrate oder Co-Substrate unter definierten anaeroben Bedingungen einer Vergärung unterzogen und werden Aussagen zur grundsätzlichen Umsetzbarkeit der Biomasse zu Biogas, zu eventuell auftretenden Hemmungen des Prozesses und zur Gasausbeute gewonnen.

In Abbildung 3-4 ist der Aufbau der konzipierten Laborbiogasanlage dargestellt.

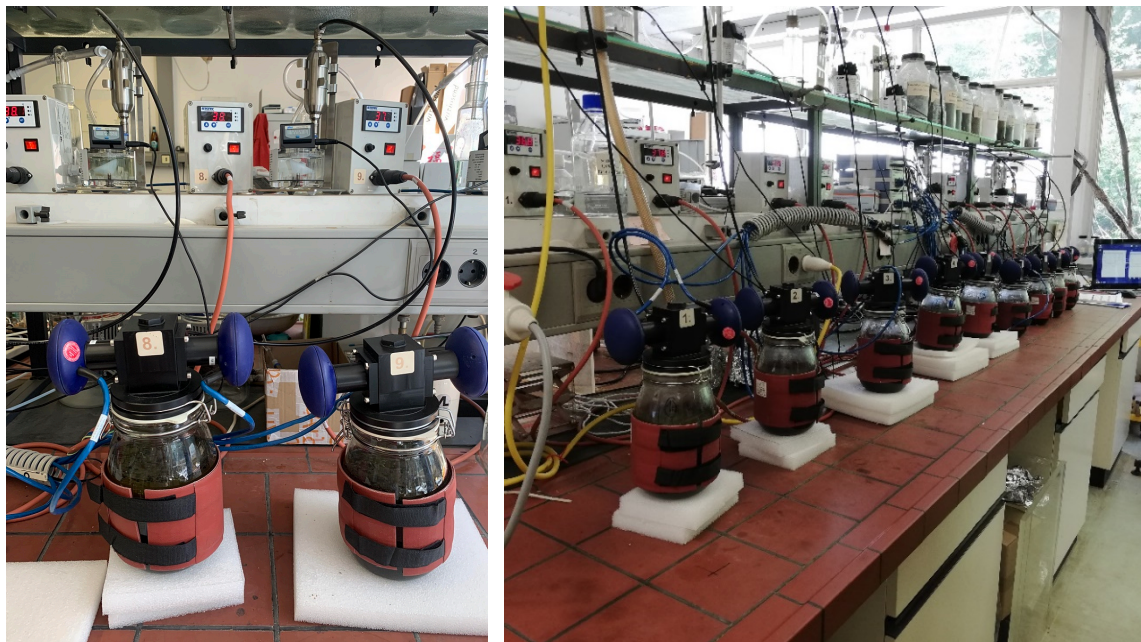


Abbildung 3-13 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Gasmenge und des CH<sub>4</sub>-gehaltes aus Presswasser

Im Rahmen dieses Projekts wurden vier diskontinuierliche Fermentationsversuche durchgeführt. Das erste Mal wurden die Probe von Hauke GmbH verwendet, gefolgt die Proben von 3 Pressversuchen mit BEM Umwelttechnik GmbH.

Bei allen vier Versuchsreihen fand die Co-Vergärung der verwendeten Substrate mit Faulschlamm aus der kommunale Kläranlage LFKW angeimpft und unter mesophilen anaeroben Bedingungen bei 32 - 42°C statt. Die Dauer der Gärversuche entspricht 25 Tage.

Die Berechnung der Impfschlamm- und Substrateinwaagen wurde in Anlehnung an die VDI Richtlinie 4630 durchgeführt. Bei der Festlegung des Mischungsverhältnisses von Impfschlamm und Substrat wurde folgende Gleichung eingehalten.

$$oTS_{\text{Substrat}} / oTS_{\text{Impfschlamm}} \leq 0,5$$

Als Nullprobe gilt der Faulschlamm ohne Zusatz einer Probe. Anhand des täglich mittleren gebildeten Gases der Nullprobe wurde später in der Auswertung rechnerisch vom anfallenden Biogas der Testsubstrate subtrahiert, um die Biogasproduktion durch die Co-Vergärung zu bestimmen. Der Impfschlamm für die Versuche wurde aus dem Faulbehälter der LFKW entnommen.

Vor der Abfüllung in der Gärflasche wurde der Impfschlamm homogenisiert. Die Nullprobe setzt sich aus 1000 ml Faulschlamm und 100 ml Wasser (Leitungswasser). Damit wird ein organischer Anteil von 1,91 % erreicht, der in empfohlenen Intervall nach VDI Richtlinie 4630 liegt. Die Tabelle 3-6 stellt die mittlere Mengenzusammensetzung der verschiedenen zu vergärenden Testsubstrate dar. Testsubstrate wie Bioabfall als Rohstoff (Bioabfall roh), abgepresste Bioabfall, Presswasser, Sickerwasser und die Nullprobe wurden parallel als Doppelansatz untersucht.

Die mikrokristalline Cellulose der Firma Merck wurde als Standardprobe hergestellt. Das Animpfen der Cellulose mit dem Faulschlamm ermöglicht die Prüfung der biologischen Aktivität, die Impfschlammqualität sowie die Beurteilung ihrer Biogasproduktion gegenüber allen Proben. Nach VDI-Richtlinie 4630 kann mikrokristalline Cellulose unter Berücksichtigung der Biomasseneubildung einen Biogasertrag von 740 bis 750 l<sub>N</sub>/kg oTS erreicht werden. Dieser Wert sollte laut VDI-Richtlinie 4630 im Kontrollansatz um weniger als 10 % unter- oder überschritten werden, um sicherzustellen, dass die biologisch aktive Masse eine ausreichende Leistungsfähigkeit zum Biomasseumsatz aufweist.

Der Yieldmaster ist ein System, das zur simultanen Messung von Methangaskonzentration und Gasbildungsrate verwendet wird und die Überwachung von Stoffwechselforgängen biologischer Prozesse beispielsweise Fermentation unterstützt. Dieses hochentwickelte Messsystem kann aus bis zu 12 CH<sub>4</sub> Infrarot-Sensoren, 12 CO<sub>2</sub>-Sensoren und der gleichen Anzahl Präzisionsvolumenmessern (Milligascounter) bestehen.

Über die speziell entwickelte Software werden die aktuellen Konzentrationskurvenverläufe aller Messproben auf einer graphischen Oberfläche angezeigt. Um die Gasvolumenproduktion zu überprüfen, wurde einmal pro Tag auf einem Protokollblatt die am Zählwerk des MGCs angezeigten Gasvolumen von jeder Messflasche und die Uhrzeit der Lesung notiert.

### 3.4 Halbtechnische Untersuchung

Für die Untersuchung der Auswirkungen von Feststoffarmen Co-Substrat auf den Faulbehälterbetrieb wird ein im Lehr- und Forschungsklärwerk in Bünsau geplanter und konstruierter Anaerober Reaktor, mit einem Gesamtvolumen von 250 L, eingesetzt. Die Beschickung des Faulbehälters mit einer Mischung aus Primärschlamm, voreingedickten Überschussschlamm und Co-Substrat erfolgt fünf Mal wöchentlich mittels einer

Zirkulationspumpe der Firma NETZSCH vom Typ NM021BY01L06B. Das Ablassen des ausgefaulten Schlammes erfolgt durch Verdrängung während der Beschickung. Auf diese Weise befindet sich ein konstantes Volumen von 210 Liter im Reaktor.



Abbildung 3-14 Versuchsanlage - Halb technische Untersuchung

Die Analytik des Faulschlammes und des Beschickungsvolumenstromes erfolgt täglich gravimetrisch und fotometrisch. Der Versuchsreaktor wird im mesophilen Bereich bei 32 - 42°C betrieben, die Temperatureinstellung erfolgt mit einem Wärmetauscher. Für die Betriebstemperaturmessung ist ein Temperatursensor im Reaktorinneren installiert, die Messwerte können jedoch durch Schlamm-Inkrustationen am Sensor verfälscht werden. Auf Grund dessen ist im Bereich der Schlammzirkulation ein pT-100 Temperatursensor eingebaut.

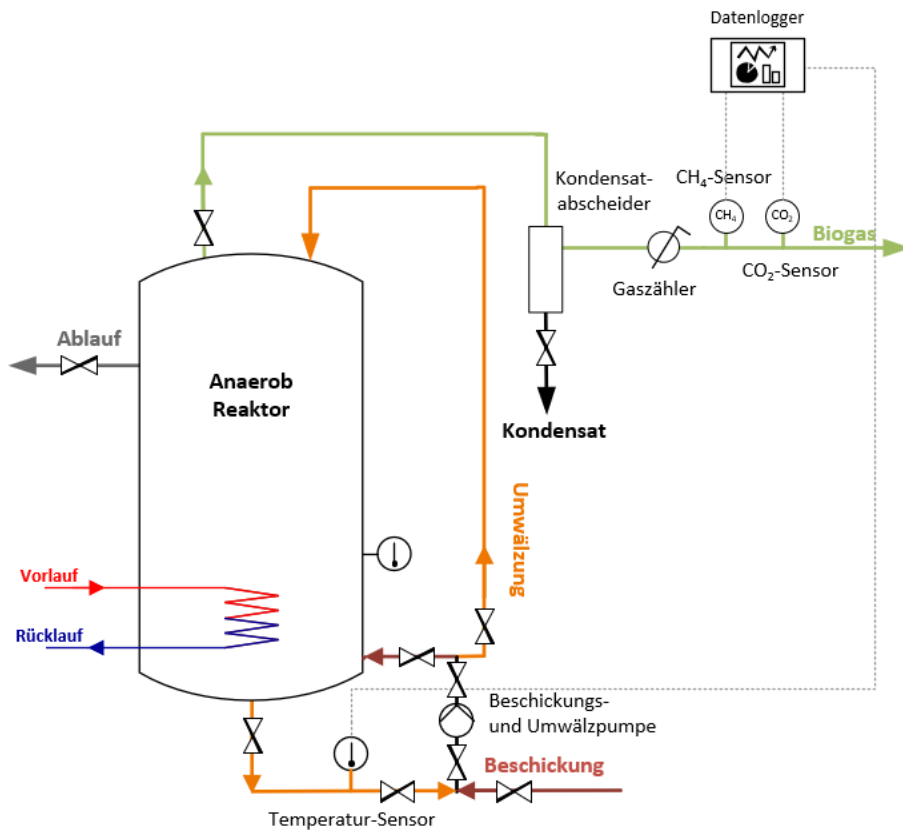


Abbildung 3-15 Schematisches Fließbild des Versuchsreaktors - Halb technische Untersuchung

Die während des anaeroben Abbaus produzierte Menge an Biogas wird mit einem Trommelgaszähler der Firma Dr. Ing. Ritter Apparatebau GmbH vom Typ TG 05 gemessen (siehe Abbildung 3-16). Das Methan und  $\text{CO}_2$  Gehalt des produzierten Biogases wird mittels Gas Sensoren der Firma Blue Sens gas sensor GmbH gemessen. Der Gasdruck im Behälter wird über ein Manometer am Kopf des Reaktors angezeigt. Die mittleren 10 Minuten der gemessenen Gasmenge, Betriebstemperatur und die Zusammensetzung des Biogas werden am Datenlogger der Firma Endress + Hauser vom Typ RSG10 dargestellt und können mit einer Diskette als Datenschnittstelle weiter ausgewertet werden (siehe Abbildung 3-17).



Abbildung 3-16 Trommelgaszähler Firma Ritter - Halb technische Untersuchung



Abbildung 3-17 Datenlogger der Firma Endress + Hauser - Halb technische Untersuchung

### 3.4.1 Versuchsplanung

#### 1) Einlaufphase

Halbtechnische Versuchsreaktoren können erst nach einer Anlaufphase stabil und optimal betrieben werden. Die Versuchsreaktoren wurden von Montag bis Freitag täglich mit jeweils 2,6 Liter Primärschlamm und 5 Liter voreingedicktem Überschussschlamm beschickt und mit einem Volumenstrom von 0,03 Liter/Sekunde umgewälzt. Die Einlaufphase dauerte 3 Wochen.

#### 2) Beschickung mit reinen Substraten

In dieser Phase, ein täglicher Gesamtinput von 10 Liter und ein Output von 10 Liter werden festgelegt, um ein konstantes Volumen von 210 Liter im Reaktor zu erhalten und die hydraulische Verweilzeit von 21 Tagen einzuhalten. Montags bis freitags wird der Reaktor um 8 Uhr morgens mit der Fracht beschickt, um einen Abstand von 24 Stunden zwischen der Beschickung zu erreichen.

Zur Bestimmung der substratspezifischen Gas- und Methanproduktion wurde der Reaktor eine Woche lang mit einer Substratart gefüttert. In dieser Versuchsphase wurden die gleiche Menge an Primärschlamm, Sekundärschlamm und Presswasser beschickt. Um einen besseren Vergleich und eine bessere Bewertung der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde die Biogasproduktion von Dienstag bis Freitag zusammengefasst und eine durchschnittliche Produktionsrate in Liter pro 10 min pro kg CSB berechnet.

Um die spezifische Gasbildungsrate des Primärschlammes zu bestimmen, wurden dem Reaktor täglich 3 Liter PS und 7 Liter Wasser zugeführt. Im Durchschnitt betrug die OLR 0,3 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d). Des Weiteren wurde der Reaktor mit einem Gemisch aus 8,5 Liter Sekundärschlamm und 1,5 Liter Wasser beschickt. Der OLR in dieser Woche betrug im Durchschnitt 0,28 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d). Zur Ermittlung der Methan- und Gasproduktionsrate für Presswasser wurden dem Reaktor täglich 1,1 Liter PW und 8,9 Liter Wasser mit einem konstanten OLR-Wert von etwa 0,37 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) zugeführt.

### 3) Chargenweise Erhöhung der Beschickungsfracht

Hier werden die maximale Belastung mit Co-Substrat auf den Faulbehälterbetrieb untersucht. Durch die Zudosierung des Co-Substrates wird die Raumbelastung gesteigert, wird die maximale Raumbelastung erreicht stagniert die Gasbildung und es ist ein Rückgang des Methangehalt zu beobachten. Die Überschreitung der maximalen Raumbelastung führt zu einer Überlastung der Mikroorganismen und somit zu einer Übersäuerung des Reaktors. Die Überlastung macht sich in einer irreversiblen pH-Wert Absenkung bemerkbar.

Der Reaktor wird als Basis täglich Klärschlamm mit CSB-Fracht von 0,294 kg zugeführt. Die Steigerung der zugeführten Co-Substrat bedingt einen höheren Volumenstrom, der dem Reaktor zugeführt wird. Eine Erhöhung des Beschickungsvolumen führt zu einer Reduzierung der Aufenthaltszeit, es ist darauf zu achten, dass die Generationszeit der Methanbakterien von 15 d eingehalten wird.

Um eine Versäuerung des Prozesses zu verhindern, wird insbesondere auf den Methangehalt und die Gasbildungsrate geachtet, bei einer Stagnation der Gasbildung und Rückgang des Methangehaltes wird die Zugabe von Co-Substrat eingestellt.

Die dem Reaktor zugeführten Chargen an Presswasser werden anhand des analysierten CSB-Gehaltes berechnet, der als Bemessungsparameter gewählt wird. Durch die Laboranalyse wird der CSB-Gehalt des täglich zugeführten Gemisches aus Primärschlamm und voreingedickten Überschussschlamm analysiert.

Um die gesamte zugeführte Fracht zu berechnen, wird die CSB-Fracht der jeweiligen Presswassercharge zu der täglichen Fracht summiert.

$$CSB_{z,ges} = CSB_{ps,üs} * V_{ps,üs} + CSB_{pw} * V_{pw}$$

|      |               |  |
|------|---------------|--|
| Mit: | $CSB_{z,ges}$ | Die dem Reaktor zugeführte gesamte CSB-Fracht [kg]           |
|      | $CSB_{ps,üs}$ | CSB-Konzentration Primärschlamm und Überschussschlamm [kg/l] |
|      | $V_{ps,üs}$   | Volumen an Primärschlamm und Überschussschlamm [l]           |
|      | $CSB_{pw}$    | CSB-Konzentration Presswasser [kg/l]                         |
|      | $V_{pw}$      | Presswasser Volumen [kg/l]                                   |

Die Menge des hinzugefügten Presswassers steigt chargenweise von 1 Liter, 1,5 Liter, 2 Liter, 2,5 Liter auf 3 Liter. Der hinzugefügte CSB wurde ebenfalls von 1,62 kg/m<sup>3</sup>/d auf 2 kg/m<sup>3</sup>/d erhöht.

### 4) Chargenweise Erhöhung der Presswasseranteil

Während dieser Versuchsphase betrug der tägliche Gesamtinput 10 Liter und der Output 10 Liter. Durch die chargenweise Erhöhung der täglichen Zugabe von PW wird auch die Zugabe von PS und SS entsprechend reduziert. Der Anteil von PW an der Zugabe steigt von 10% auf 40% und 58,75%. In diesem Versuchsphase liegt die OLR zwischen 0,28 und 2,54 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d). Die höchste OLR ist in der Woche, in der dem Substrat die größte Menge an PW zugeführt wird.

### 5) Tägliche Beschickung mit einer konstanten Menge an Presswasser

Des Weiteren wird untersucht, inwieweit eine Biogasvolumensteigerung durch eine Beschickung mit Presswasser erreicht werden kann. Dafür wird der Reaktor mit der 1 Liter Presswasser allein sowie eine Mischung aus 1 Liter Presswasser und 7,6 Liter Klärschlamm



beschickt. Durch den Vergleich der Ergebnisse der Gasproduktion kann ein Beitrag von PW bei synergistischen Reaktionen spezifiziert werden.

## 5) Unterschiedliche Beschickungsfrequenzen

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss von Mehrfachbeschickungen pro Tag auf den Ertrag und den Methangehalt untersucht. Die tägliche Belastung von 10 Liter Substrat wurde beibehalten. Es wurden zwei verschiedene Versuchsanordnungen getestet. Bei der ersten Versuchsanordnung wurde das Substrat gemischt und in zwei oder drei gleiche Teile aufgeteilt. Zwischen den einzelnen Beschickungen wurde eine Pause von 2 Stunden eingelegt. Bei der zweiten Versuchsanordnung wurde nur das Co-Substrat PW 5 Stunden nach der ersten Beschickung erneut zugegeben.

### 3.4.2 Verweilzeit

Die hydraulische Verweilzeit (HRT) ist das Verhältnis zwischen dem Reaktorvolumen und dem täglichen Volumen des, dem Reaktor zugeführten, Substrats. Die HRT wurde auf 21 Tage festgelegt, um eine ausreichend lange Verweilzeit der Mikroorganismen im Reaktor zu gewährleisten. Bei einem Fermentervolumen von 210 Liter ergibt dies einen täglichen Zu- und Abfluss von 10 Liter pro Tag.

Wenn die Reaktoren nicht kontinuierlich gerührt werden, können Feststoffe im Reaktor zurückgehalten werden. In diesem Fall sind SRT und HRT nicht mehr dasselbe. Die SRT kann weitere Informationen über die Verweildauer der Feststoffe im Reaktor liefern. Die Verweilzeit von Feststoffen wurde mit den anorganischen Verbindungen im Kreislauf des Reaktors und den anorganischen Verbindungen im Auslauf nach folgender Gleichung berechnet:

$$RT = \frac{V_R * (TS_{circ} - VS_{circ})}{Q_{out} * (TS_{out} - VS_{out})}$$

|      |           |   |
|------|-----------|---|
| Mit: | RT        | Verweilzeit [d]   |
|      | $V_R$     | Reaktorvolumen [m <sup>3</sup> ]                        |
|      | TS        | Trockensubstanzgehalt [%]                               |
|      | VS        | Gehalt an flüchtigen Feststoffen [%]                    |
|      | $Q_{out}$ | täglich abgeführtes Substratvolumen [m <sup>3</sup> /d] |

Es wurde festgelegt, die SRT mit den anorganischen Verbindungen zu berechnen, da diese das System nur über den Ausgangsstrom verlassen und nicht in Biogas umgewandelt werden. Die Verweilzeit der Feststoffe wurde für jede Woche einzeln berechnet. Die SRT der anorganischen Verbindungen kann auf die Verweilzeit aller Feststoffe im Reaktor übertragen werden.

### 3.4.3 Analyse der Biogasausbeute

Die während des anaeroben Abbaus entstehende Biogasmenge wurde mit einem Fassgaszähler (Ritter Apparatebau GmbH, Typ TG 05) gemessen. Für die vorliegende Arbeit wurde die Biogasbildung pro 10 Minuten ausgewertet. Um Veränderungen in der Gasbildung zu erfassen, wurde der mittlere Biogasertrag aus den Mittelwerten der letzten 70 Minuten berechnet, da dies das Intervall der Zirkulation war. Die Daten wurden in einem Diagramm aufgetragen, wie in Abbildung 3-18 beispielhaft dargestellt.

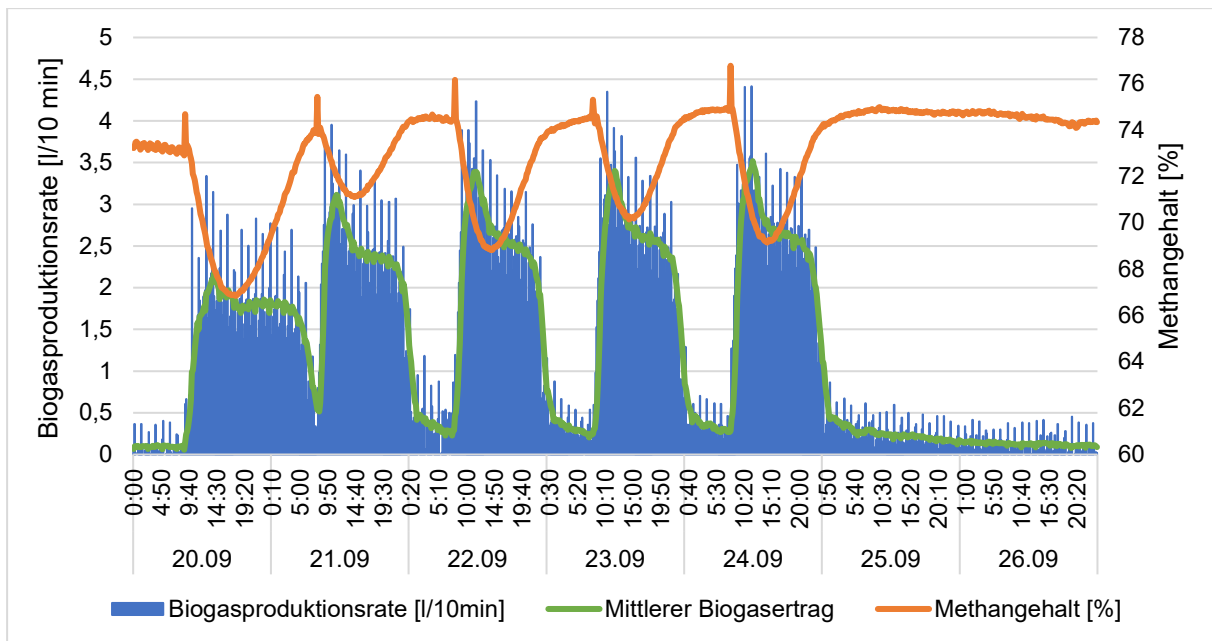


Abbildung 3-18 Biogasproduktion [l/10 min], mittlerer Biogasertrag und Methangehalt [%]

### 3.4.4 Analyse des Methan- und Kohlendioxidgehalts

Der Methan- und Kohlendioxidgehalt des erzeugten Biogases wurde mit Gassensoren der Blue Sens gas sensor GmbH gemessen. Der Gehalt wird in Vol.-% angegeben und durch Infrarotmessung nach dem Prinzip der Zweiwellenlängenmessung bestimmt. Die Methanausbeute wurde aus dem Methangehalt und dem Biogasvolumen berechnet.

### 3.4.5 Zeitlicher Verlauf der Gasproduktion

Eine substratspezifische Methanproduktionskurve wurde berechnet, indem die Methanproduktion pro kg CSB im Eingangssubstrat von Dienstag bis Freitag gemittelt wurde. Dies wurde für jedes 10-Minuten-Intervall der ersten 24 Stunden nach der Beschickung durchgeführt. Auf diese Weise wurde eine Kurve des zeitlichen Verlaufs der Methanproduktion für jede Inputmischung erstellt, wie in Abbildung 3-19 als Beispiel dargestellt.

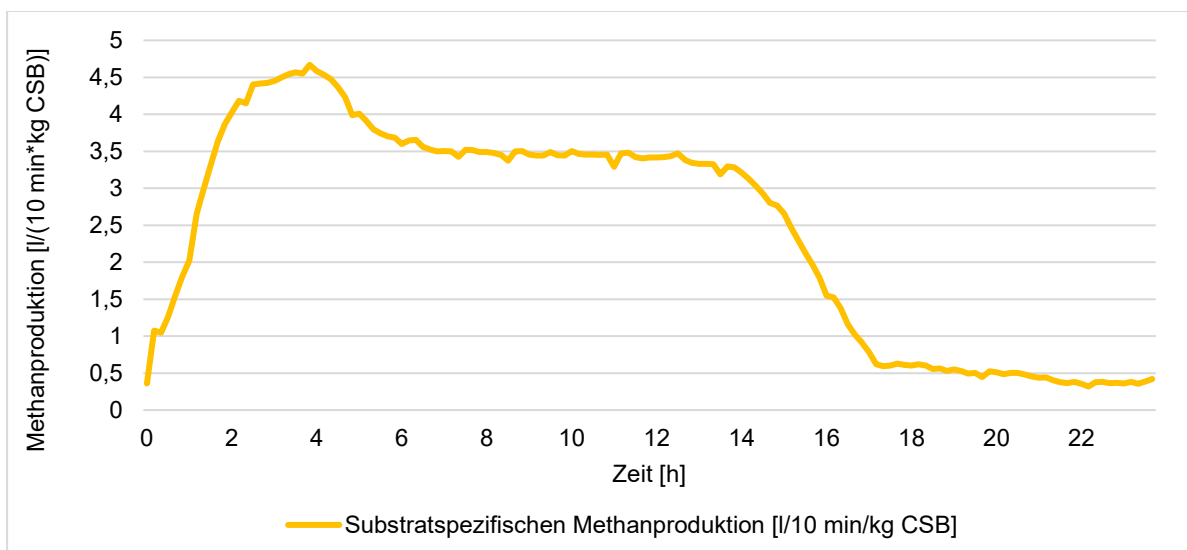


Abbildung 3-19 Substratspezifischen Methanproduktion [l/(10 min\*kg CSB)]

Die Fläche unter der Formationskurve stellt den gesamten Gasertrag dar, der sich in einem bestimmten Zeitintervall pro kg CSB bildet. So kann die in einem bestimmten Zeitraum produzierte Gasmenge berechnet werden. Die substratspezifische Gasbildungskurve kann verwendet werden, um die Methanausbeute in Abhängigkeit von der dem Reaktor zugeführten CSB-Fracht zu simulieren.

### 3.5 Pilot Untersuchung

Um die technisch-ökonomische Anforderungen einer großtechnischen Umsetzung des Verfahrenskonzepts zu identifizieren, wird ein Pilotbetrieb im Faulturm LFKW durchgeführt. Während des Pilotbetriebs werden die technischen Herausforderungen der Verfahrensprozesse (Lagerung des PW, Transport des PW, Einbringung in den Fermenter, optimierte bedarfsorientierte Vergärung) untersucht, Lösungskonzepte erarbeitet und umgesetzt.

Das von der Kompostierungsanlage transportierte Presswasser wird in einem Zwischenbehälter zwischengespeichert und dann täglich zusammen mit dem Schlamm zur anaeroben Vergärung in den Faulturm gegeben. Das Biogas wird durch BHKW in den Strom und Wärme umgewandelt. Das Einbringen des PW in den Faulturm der Kläranlage führt zu einem Mehraufkommen an Faulschlamm. Der Faulschlamm wird entwässert und weiter thermisch verwertet.

Die relevanten technischen Prozessdaten und Kostenkomponenten unter Realbedingungen wie beispielsweise Stoffströme, Mengen und Energiebedarf sollen erhoben werden.

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Trotz der Vorteile, die sich durch eine Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen ergeben können, bestehen oft Hemmnisse bei der Einführung dieser. Ein Haupthemmnis besteht in der komplexen, teils unklaren Rechtslage, da an der Schnittstelle zwischen verschiedenen Rechtsbereichen gearbeitet wird. Die vorliegenden Kapitel befasst sich mit diesen Rechtsfragen und hat zum Ziel, einen Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen der Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland zu geben. Dazu wird im Einzelnen auf die relevanten Rechtsbereiche und deren grundsätzliche Vorgaben sowie notwendige Genehmigungsverfahren eingegangen. Am Ende findet sich eine Zusammenfassung der möglichen Genehmigungsverfahren für eine Co-Vergärung. (Klasen 2019)

#### 4.1.1 Rechtlicher Rahmen

Das Thema der Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen befindet sich an der Schnittstelle zwischen verschiedenen Rechtsbereichen und hat eine komplexe rechtliche Grundlage. Wichtig sind vor allem das Wasserrecht, das Abfallrecht, das Immissionsschutzrecht und das Hygienerecht, aber auch Regelungen des Baurechts, des Düngerechts oder des Arbeitsschutzrechts können relevant sein. (Klasen 2019)

Tabelle 4-1 Rechtliche Rahmen

| <b>Rechtsbereich</b>        | <b>Rechtlicher Rahmen</b>   |
|-----------------------------|---|
| Wasserrecht                 | Wasserhaushaltsgesetz (WHG), Abwasserverordnung (AbwV), Abwassereigenkontrollverordnung (EKVO)  |
| Abfallrecht                 | Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) (veraltet), Nachweisverordnung (NachwV), Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV), Bioabfallverordnung (BioAbfV), Klärschlammverordnung (AbfKlärV)   |
| Immissionsschutzrecht       | Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV), TA Luft, TA Lärm   |
| Düngerecht                  | Düngemittelverordnung (DüMV), Düngeverordnung (DüV)   |
| Arbeitsschutzrecht          | Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), Gefahrstoffverordnung (GefStoffV), Biostoffverordnung (BiostoffV)   |
| Baurecht                    | Baugesetzbuch (BauGB)   |
| Hygienerecht/Veterinärrecht | Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 des Europäischen Rates und Parlaments (Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte), Tierisches Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG), Verordnung zur Durchführung des TierNebG (TierNebV) |

## a) Wasserrecht

Kläranlagen unterliegen als Abwasserbehandlungsanlagen grundsätzlich den Regelungen des Wasserrechts und sind in der Regel wasserrechtlich genehmigt. Das wichtigste Gesetz ist hierbei das Wasserhaushaltsgesetz des Bundes (WHG), das auf Länderebene durch die Landesgesetze ergänzt wird. Abwasseranlagen sind gemäß § 60 WHG so zu betreiben, dass die Anforderungen an das Einleiten von Abwasser (nach § 57 WHG) eingehalten werden. Für den Betrieb gelten die allgemein anerkannten Regeln der Technik und die Abwasserreinigung muss sich am Stand der Technik orientieren (§ 60 WHG). Für den Betrieb benötigen Kläranlagen zudem eine wasserrechtliche Erlaubnis (nach §§ 10, 11 WHG), um Abwasser in ein Gewässer einleiten zu dürfen (Einleiterlaubnis). Diese gibt unter anderem Grenzwerte von Seiten der Behörde für die Einleitung in das Gewässer vor. Die Anforderungen nach dem Stand der Technik und somit die vorgeschriebenen Grenzwerte ergeben sich aus der Abwasserverordnung (AbwV). Grundsätzlich ist Abwasser so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird, was beispielsweise durch eine Verschlechterung der Gewässerqualität der Fall sein könnte. Weitere wichtige Vorgaben ergeben sich aus § 55 WHG (3), nach dem flüssige Stoffe, die kein Abwasser sind, nur zusammen mit Abwasser beseitigt werden dürfen, wenn eine solche Entsorgung umweltverträglicher ist als eine Entsorgung als Abfall und wasserwirtschaftliche Belange nicht entgegenstehen. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020); (DWA 2005); (MILKOWSKI 2009); (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009); (DWA 2015)

Aufgrund dieser Vorgaben ist bei Anwendung einer Co-Vergärung Folgendes zu beachten: Durch den Einsatz von Co-Substraten dürfen sich die Ablaufwerte der Kläranlage nicht wesentlich verschlechtern. Das bedeutet, dass das bei der Entwässerung der Gärrückstände entstehende Trübwasser so unbedenklich sein muss, dass die Kläranlage nicht überlastet wird. Es darf zu keinen Störungen des Klärbetriebs inklusive der Schlammfäulung kommen, eine ausreichende Prozessstabilität muss gewährleistet sein. Der entstehende Klärschlamm darf keine wesentliche zusätzliche Schadstoffbelastung aufweisen (zumindest bei landwirtschaftlicher Anwendung) und der erforderliche Stabilisierungsgrad muss eingehalten werden. Von einer umweltverträglichen Entsorgung (bzw. Verwertung) ist im Allgemeinen auszugehen, wenn das Faulgas energetisch genutzt wird und mit der Co-Vergärung eine Steigerung des Eigenversorgungsgrades der Kläranlage verbunden ist, desweiteren freie Kapazitäten zur Mitbehandlung im Faulbehälter vorhanden sind und die Co-Substrate aus dem näheren Umfeld angeliefert werden. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020); (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

Im Regelfall dienen Faulbehälter auf Kläranlagen dazu, den bei der Abwasserreinigung anfallenden Schlamm zu stabilisieren, und sind aufgrund dieser Aufgabe (nach §§ 55, 54 WHG) (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020) Bestandteil der Abwasserbehandlung. Dies gilt auch für alle nachgeordneten Behälter und Aggregate zur Schlammbehandlung. Daher ist für die Durchführung einer Co-Vergärung in der Regel eine wasserrechtliche Genehmigung bzw. die Anpassung der bestehenden wasserrechtlichen Erlaubnisse durch die zuständige Wasserbehörde notwendig (Erlaubnisverfahren nach § 8 WHG) (LfU 2011). Dies gilt zumindest solange wie die Behandlung von Klärschlamm im Vergleich zur Behandlung von Abfällen eine übergeordnete Bedeutung hat und kein Faulturm ausschließlich zur Abfallbehandlung eingesetzt wird. Im Genehmigungsverfahren wird die Einhaltung der beschriebenen Vorschriften geprüft. Soweit die für den Einsatz geplanten Co-Substrate nicht bereits von der bestehenden Zulassung erfasst werden, müssen diese in der Einleiterlaubnis

ergänzt werden. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020); (MILKOWSKI 2009); (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

Eventuell kann auch die Verpflichtung zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) bestehen und es muss zusätzlich eine UVP erfolgen. Zum einen kann dies bei Überschreitung bestimmter Größenwerten bzw. Mengenschwellen der Fall sein, zum anderen kann die Notwendigkeit einer UVP dann gegeben sein, wenn von einem Vorhaben erhebliche nachteilige Umweltauswirkungen ausgehen können (DWA 2005). Für Kläranlagen mit einer Tagesfracht des biochemischen Sauerstoffbedarfs von mindestens 9000 kg besteht eine generelle UVP-Pflicht. Darunter ist generell eine allgemeine Vorprüfung bzw. eine standortbezogene Vorprüfung ausreichend. (LfU 2011)

## b) Abfallrecht

Wenn Abfälle als Co-Substrate eingesetzt werden, sind die Regelungen des Abfallrechts, insbesondere des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG)<sup>1</sup>, zu beachten. Nach § 7 KrWG sind Abfälle vorrangig zu verwerten und eine Beseitigung ist damit unzulässig, wenn eine Verwertung technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist. Die Verwertung hat dabei ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen. Ordnungsgemäß ist eine Verwertung dann, wenn sie in Einklang mit den öffentlich-rechtlichen Vorschriften steht, d.h. die relevanten Gesetze beachtet werden und die entsprechenden Genehmigungen vorliegen. Insbesondere sollte für eine Co-Vergärung als Abfallbehandlungsmaßnahme eine wasserrechtliche Genehmigung bestehen, die Art und Umfang der Tätigkeit regelt und genaue Vorgaben zu den verwendeten Abfällen macht. Diese sollten mit dem Abfallschlüssel gemäß Abfallverzeichnisverordnung in die Genehmigung explizit aufgenommen werden. Schadlos ist eine Verwertung dann, wenn Beeinträchtigungen des Allgemeinwohls nicht zu erwarten sind, insbesondere keine Anreicherung von Schadstoffen im Wertstoffkreislauf erfolgt. Wie oben beschrieben stellt diese Forderung analog auch das Wasserrecht und sofern die beschriebenen wasserrechtlichen Vorgaben und die Vorgaben des Hygienerechts (bezüglich Hygienisierung) eingehalten werden, kann von einer schadlosen Verwertung ausgegangen werden. Durch die Produktion von Klärgas und evtl. Düngern und der Betrachtung der weiteren Vorteile (z.B. Kapazitätsnutzung, evtl. bessere Schlammeeigenschaften) wird dem Verwertungsvorrang bei einer Co-Vergärung in der Regel genüge getan. (DWA 2005); (DWA 2015) Dennoch kann der Nachweis eines ausreichenden Gasbildungspotentials notwendig sein. Ein Hinweis darauf, dass eine ausreichende Verwertungseigenschaft eines Abfalls vorliegt, kann auch aus der Bioabfallverordnung (BioAbfV) entnommen werden. In Anhang 1 dieser Verordnung findet sich dort eine Liste mit potenziell gut geeigneten Substraten. (LfU 2011) Diese Substrate sind grundsätzlich für die Verwertung durch eine Ausbringung auf gärtnerische und land- und forstwirtschaftlich genutzte Böden geeignet und indizieren damit eine bodenbezogene Verwertbarkeit des entstehenden Gärrückstands. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020)

Für den Transport von Abfällen zur Kläranlage müssen die abfallrechtlichen Dokumentationspflichten gemäß der Nachweisverordnung (NachwV) und dem KrWG beachtet werden. Für gefährliche Abfälle bestehen Nachweispflichten, für nicht-gefährliche Abfälle

---

<sup>1</sup> Hinweis: In fast allen verwendeten Quellen kam nicht das KrWG, sondern nur dessen ältere Version, das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), vor. Das KrW-/AbfG wurde 2012 novelliert und in KrWG umbenannt. Die hier geschilderten Prinzipien bzw. Vorgaben des Gesetzes haben sich jedoch dadurch nicht geändert.

bestehen einfachere Registrierpflichten. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009); (Zens 2011)

Grundsätzlich sollte noch erwähnt werden, dass Stoffe, sobald sie in die Kanalisation oder eine Abwasserbehandlungsanlage eingebracht werden, formal ihre Eigenschaft als Abfall verlieren und zu Abwasser werden. Da jedoch vor Einbringen in die Kläranlage die Abfalleigenschaft eines Stoffes noch besteht, muss sich die gesamte Transportphase am Abfallrecht orientieren und es müssen der Zweck und eventuelle Folgen der Abfallbehandlung beleuchtet werden. Trotz der formal fehlenden Abfalleigenschaft während der Behandlung auf der Kläranlage müssen so für alle Abfälle die beschriebenen Vorgaben beachtet werden. (DWA 2005)

Ein anderer Fall liegt vor, wenn direkt Abwässer (z.B. hoch belastete Industrieabwässer) oder Substrate, die unmittelbar aus einer Abwasserbehandlungsanlage entnommen werden, Verwendung finden und diese Substanzen so bereits von Beginn an den Abwasserbegriff erfüllen. Dies ist z.B. bei Flotatschlämmen oder Fettabscheiderinhalten der Fall. Da diese Substanzen zu keiner Zeit den Abfallbegriff erfüllen, gelten die Regelungen des Abfallrechts (zumindest rein formal) nicht. Somit entfallen auch die abfallrechtlichen Dokumentationspflichten. Unabhängig davon sollte jedoch eine Dokumentation über Art und Mengen von angelieferten Co-Substraten durchgeführt werden (dies ist schon aus betriebswirtschaftlicher Sicht notwendig) und kann auch von der Behörde gefordert werden. (LfU 2011) Da die abfall- und wasserrechtlichen Regelungen in Bezug auf die Ausführung der Co-Vergärung in die gleiche Richtung weisen, ergeben sich jedoch auch in diesem Fall keine wesentlichen Unterschiede an die Anforderungen der Co-Vergärung (Prozessstabilität, Abwasserqualität usw.). Allerdings ist eine wasserrechtliche Genehmigung und eine Erweiterung der Einleiterlaubnis bei Verwendung solcher Substanzen grundsätzlich nicht notwendig, wenn diese von der bestehenden Einleiterlaubnis erfasst werden. Es kann jedoch bei bestimmten Abwässern (z.B. aus der chemischen oder pharmazeutischen Industrie) eine Indirekteinleitergenehmigung nach § 58 WHG erforderlich sein. Diese ist vom Abwassererzeuger einzuholen und dient dazu sicherzustellen, dass die Kläranlage nicht mit nicht-abbaubaren Schadstoffen belastet wird. (LfU 2011); (Zens 2011)

Wird der entstehende Klärschlamm bzw. Gärrückstand landwirtschaftlich verwertet, sind die Vorgaben der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) zu beachten. Diese regelt die Ausbringung von Klärschlamm und allen Gemischen, die durch Co-Vergärung mit Klärschlamm entstehen, auf landwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Flächen. (DWA 2015) Die AbfKlärV bestimmt unter anderem die Qualitätsanforderungen an die zu verwertenden Klärschlämme, gibt Untersuchungen und deren Inhalte vor, enthält Ausbringungsbeschränkungen bzw. -verbote und regelt den Transport von Klärschlämmen. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

### c) Immissionsschutzrecht und Baurecht

Der Bereich des Immissionsschutzes wird vor allem durch das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) und seine zugehörigen Verordnungen (BImSchV) geregelt. Weiterhin wichtig für die Genehmigung und den Betrieb von Anlagen sind die Technischen Anleitungen wie z.B. zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) und zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm).

- Behandlung von Abfall ohne übergeordnete Bedeutung

Die Genehmigung einer Anlage nach BImSchG ist dann notwendig, wenn der entsprechende Anlagentyp im Anhang der 4. BImSchV aufgelistet ist. Dies trifft auf Faultürme als Bestandteil einer kommunalen Abwasserbehandlungsanlage grundsätzlich nicht zu. Wie oben beschrieben werden Faultürme normalerweise nach Wasserrecht genehmigt. Trotzdem sind auch für Faultürme generell Vorgaben des BImSchG zu beachten: Nicht

genehmigungsbedürftige Anlagen sind nach § 22 BImSchG so zu betreiben, dass nach dem Stand der Technik vermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen vermieden werden, nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß reduziert werden und beim Anlagenbetrieb entstehende Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden. Bei auftretenden Geruchsproblemen können die Vorschriften der TA Luft herangezogen werden. Besonders die Anforderungen zur Vorsorge (Nr. 5 TA Luft) können zum Erkennen von Pflichten nach § 22 BImSchG dienen. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

Anlagen zur Annahme, Vorbehandlung und Einspeisung von Abfällen fallen jedoch nicht unter das Wasserrecht, da sie nicht direkt zur Abwasserreinigung gehören, und müssen je nach Menge und Qualität der Einsatzstoffe separat nach Baurecht (weniger, ungefährlicher) oder BImSchG (mehr, gefährlicher) genehmigt werden. Dies gilt auch für Anlagen zur Verwertung des Faulgases sowie zur Abgasableitung und –reinigung. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020) (LfU 2011); (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

- Behandlung von Abfall mit übergeordneter Bedeutung

Ein anderer Fall liegt vor, wenn bei einer Co-Vergärung die Menge an eingesetzten Abfällen die Menge an Klärschlamm übersteigt und der Hauptzweck der Anlage somit die Behandlung von Abfällen ist.<sup>2</sup> Die Faultürme werden so praktisch zur Abfallbehandlungsanlage und nach 4. BImSchV genehmigungsbedürftig. Die Anlage wird dann nicht mehr nach Wasserrecht, sondern entsprechend ihrer Größe bzw. der Menge an Substrateinsatz nach Baurecht oder BImSchG genehmigt. Dies gilt auch für Faultürme, die aus der Abwasser- bzw. Schlammbehandlung ausgegliedert und in denen nur noch Abfälle vergärt werden (LfU 2011) (DWA 2015). Ab einem Substratdurchsatz von mehr als 10 Mg pro Tag bei nicht-gefährlichen Abfällen und von mehr als 1 Mg bei gefährlichen Abfällen muss ein Genehmigungsverfahren nach BImSchG durchgeführt werden, darunter ist eine baurechtliche Genehmigung ausreichend. Ob hinsichtlich der genannten Mengenschwellen die gesamte Substratmenge oder nur die Menge an Co-Substrat berücksichtigt werden muss, ist umstritten und mit der zuständigen Behörde zu klären. Das Genehmigungsverfahren nach BImSchG wird unterteilt in ein „vereinfachtes“ und ein „förmliches“ Verfahren. Beträgt der Substratdurchsatz mehr als 50 Mg bei nicht-gefährlichen Abfällen bzw. mehr als 10 Mg bei gefährlichen Abfällen oder hat das Blockheizkraftwerk (BHKW) eine Gesamtfeuerungsleistung von mehr als 1 MW, so muss ein förmliches Verfahren durchlaufen werden. Die bei einer Co-Vergärung zum Einsatz kommenden Abfälle gelten in der Regel als nicht-gefährlich. Tabelle 4-2 gibt eine Übersicht über diese Genehmigungsverfahren. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020); (Zens 2011)

Bei Durchführung einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung erstreckt sich diese auch auf alle betroffenen Nebenanlagen und eine separate Genehmigung muss für diese nicht durchlaufen werden. (LfU 2011) Insgesamt stellt jedoch eine Genehmigung nach BImSchG die aufwendigste Variante der für die Co-Vergärung möglichen Genehmigungsverfahren dar. (Zens 2011) Die beschriebenen Regelungen gelten auch, wenn umgekehrt Klärschlämme als Co-Substrat in eine Abfallbehandlungsanlage eingebracht werden. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020)

---

<sup>2</sup> Die Bezugsgröße für die Menge bzw. das Mengenverhältnis Abfall/Klärschlamm ist hier vermutlich (wie im Folgenden überall) die durchgesetzte Masse pro Tag [Mg/d], was jedoch aus den untersuchten Quellen nicht eindeutig hervorgeht.



Tabelle 4-2 Übersicht der Genehmigungsverfahren nach Bau- und Immissionsschutzrecht, in Anlehnung an (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020) (Zens 2011)

| Nicht-gefährliche Abfälle                      |                                      |                                   | Gefährliche Abfälle       |                                      |                                   |
|--|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| < 10 Mg/d                                      | 10 – 50 Mg/d                         | > 50 Mg/d*                        | < 1 Mg/d                  | 1 – 10 Mg/d                          | > 10 Mg/d*                        |
| Genehmigung nach Baurecht                      | Vereinfachtes Verfahren nach BImSchG | Förmliches Verfahren nach BImSchG | Genehmigung nach Baurecht | Vereinfachtes Verfahren nach BImSchG | Förmliches Verfahren nach BImSchG |
| *Oder wenn Gesamtfeuerungsleistung BHKW > 1 MW |                                      |                                   |                           |                                      |                                   |

#### d) Hygienerecht bzw. Veterinärrecht

Die Vorschriften des Hygienerechts haben das Ziel, Mensch und Umwelt vor Krankheitserregern und anderen Schadorganismen zu schützen. Maßnahmen hierzu sind vor allem die Erhitzung (über einer bestimmten Zeit) und evtl. Zerkleinerung von potentiell gefährlichem Material, um Krankheitserreger abzutöten (dies wird „Hygienisierung“ genannt). Dies kann in Bezug auf die Co-Vergärung voraus- oder nachgehend zum Gärprozess erfolgen oder auch im Prozess selbst, wenn dieser entsprechend ausgelegt ist. Des Weiteren können im Hygienerecht Anforderungen an die Ausbringung bei landwirtschaftlicher Verwertung des Gärrückstands und Anforderungen an die Verfahrenstechnik anderer nachfolgender Entsorgungswege gestellt werden. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020)

Werden Bioabfälle als Co-Substrate angenommen sind die Regelungen der BioAbfV (§ 3 und Anhang 2) zu beachten. Danach muss bei der Vergärung von Bioabfällen eine Mindesttemperatur von 55 °C über einen Zeitraum von 24 Stunden sowie eine hydraulische Verweilzeit im Reaktor von 20 Tagen gewährleistet sein. Kann dies nicht eingehalten werden, so muss eine nachgeschaltete oder vorausgehende Erhitzung des Materials (70°C über 1 Stunde) oder eine aerobe Nachrotte bzw. Kompostierung der Gärreste erfolgen. Diese Anforderungen gelten auch für Energiepflanzen (Nachwachsende Rohstoffe - NawaRo), die als Co-Substrate verwendet werden. Wenn jedoch eine entsprechende Hygienisierung bereits beim Abfallerzeuger vorgenommen wurde, muss das Material nicht nochmals hygienisiert werden. Bei einer Verbrennung der Gärrückstände kommen diese Anforderungen nicht zum Tragen. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020)

Werden tierische Nebenprodukte als Co-Substrate eingesetzt, so sind insbesondere die Regelungen der EG-Verordnung Nr. 1774/2002 des Europäischen Parlaments und des Rates (mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte)<sup>3</sup> wichtig. Das Tierische-Nebenprodukte-Beseitigungsgesetz (TierNebG) und die Tierische-Nebenprodukte-Verordnung (TierNebV) regeln die Umsetzung dieser Verordnung in Deutschland. Als Tierische Nebenprodukte gelten z.B. Schlachtkörperteile, Tierblut oder auch gewerbliche Küchen- und Speiseabfälle. Für Küchen- und Speiseabfälle aus privaten Haushalten, die mit der häuslichen Bioabfallsammlung erfasst werden, gelten jedoch die Hygieneregeln der BioAbfV und nicht der (EG) Nr. 1774/2002.

Tierische Nebenprodukte werden nach (EG) Nr. 1774/2002 und TierNebG in drei Kategorien eingeteilt, an die unterschiedliche Hygienisierungsanforderungen gestellt werden. Materialien der Kategorie 1 (z.B. Körperteile BSE-verdächtiger Tiere) weisen das höchste seuchenhygienische Risiko auf, Materialien der Kategorie 3 (z.B. Küchen- und Speiseabfälle) das geringste. Für eine Verwendung als Co-Substrat kommen nur Materialien der Kategorien

<sup>3</sup> Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 wurde am 4. März 2011 von Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 abgelöst. (EG) Nr. 1069/2009 kam jedoch nur in einer der verwendeten Quellen (LfU 2011) am Rande vor, sodass eventuellen Neuregelungen nicht (ohne großen Aufwand) nachgegangen werden konnte. Die hier beschriebenen Regelungen dürften sich jedoch nicht wesentlich geändert haben.

2 und 3 in Frage. (EG) Nr. 1774/2002 beschreibt fünf unterschiedliche Methoden zuzüglich einer Standardmethode zur Hygienisierung von tierischen Nebenprodukten. Relevant für die Co-Vergärung sind im Wesentlichen jedoch nur Methode 1 (133 °C über 20 min bei 3 bar, 50 mm max. Teilchengröße) und die Standardmethode (70 °C, 60 min, 12 mm). Material der Kategorie 2 muss vor der Vergärung mit Methode 1 behandelt werden und ist wenn möglich mit einem Geruchsstoff zu markieren. Eine Ausnahme besteht jedoch für Darminhalt, der von Magen- und Darmtrakt getrennt wurde (und für Gülle bei hofinternen Biogasanlagen, was aber für Kläranlagen nicht relevant ist). Material der Kategorie 3 muss vor der Vergärung der Standardmethode unterzogen werden. Eine Ausnahme besteht hier für Milch, Kolostrum und andere Milcherzeugnisse der Kategorie 3, die mit Zustimmung der zuständigen Behörde nicht behandelt werden müssen. Wenn jedoch beim Abfallerzeuger schon eine entsprechende Behandlung durchgeführt wurde, so muss auch bei tierischen Nebenprodukten nicht nochmals eine Hygienisierung erfolgen (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020). Generell sieht (EG) Nr. 1774/2002 keine Ausnahmen von der Hygienisierungspflicht vor, sodass diese auch bei einer Verbrennung der Gärrückstände beachtet werden muss. Hier unterscheidet sich jedoch die Verwaltungspraxis der Bundesländer: Während beispielsweise in Baden-Württemberg an einer Hygienisierung in jedem Fall festgehalten wird, wird in Nordrhein-Westfalen eine Hygienisierung bei Verbrennung der Gärreste nicht gefordert (DWA 2015). Auch bei den für eine Co-Vergärung zulässigen Materialien kann es länderspezifische Besonderheiten geben: z.B. kommen nach einer Arbeitshilfe zur Co-Vergärung des Landes Hessen nur tierische Nebenprodukte der Kategorie 3 als Co-Substrate in Frage, während Materialien der Kategorien 1 und 2 der Beseitigungspflicht unterliegen. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

Neben den Pflichten zur Hygienisierung enthält (EG) Nr. 1774/2002 weiterhin Anforderungen in den Bereichen Lagerung, Transport und Reinigung und fordert die Erstellung eines Ungezieferbekämpfungsplanes, die Durchführung von Hygienekontrollen und die Erstellung eines HACCP-Konzeptes (HACCP: Hazard Analysis and Critical Control Point). Letzteres beinhaltet insbesondere die Durchführung einer Gefahrenanalyse, die Festlegung von kritischen Kontrollpunkten und deren Überwachung. Allgemein sind zur Überwachung des Verfahrens den Gärrückständen repräsentative Proben zu entnehmen. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020) Die Regelungen zum Transport tierischer Nebenprodukte ersetzen die abfallrechtlichen Regelungen, die normalerweise beim Transport von Abfällen zum tragen kommen (DWA 2015).

Bei Einsatz tierischer Nebenprodukte ist eine Zulassung der Anlage nach Artikel 15 (EG) Nr. 1774/2002<sup>4</sup> notwendig, bei der die beschriebenen Anforderungen überprüft werden. Diese Zulassung muss separat zu einer wasserrechtlichen Genehmigung der Anlage durchgeführt werden. Bei einer Genehmigung nach BImSchG ist eine separate veterinärrechtliche Genehmigung jedoch nicht notwendig, da diese schon Bestandteil der BImSchG-Genehmigung ist (Zens 2011).

Bei einer bodenbezogenen Anwendung der Gärreste sind auch die Hygieneanforderungen der Klärschlammverordnung und der Düngemittelverordnung zu beachten (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020).

---

<sup>4</sup> Nach der neuen Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 Zulassung nach Artikel 24 (LfU 2011).

#### e) Düngerecht

Bei einer bodenbezogenen Verwertung der entstehenden Gärrückstände bzw. des Klärschlammes sind die Regelungen des Düngerechts zu beachten, insbesondere die Düngemittelverordnung (DüMV) und die Düngeverordnung (DüV).

Die DüMV regelt das Inverkehrbringen von Düngemitteln (bzw. auch Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmittel und Kultursubstrate) und macht Vorgaben über Mindestgehalte von Nährstoffen, Grenzwerte für Schadstoffe und hygienische Anforderungen, die von Düngemitteln und somit auch von den zu verwertenden Gärresten der Co-Vergärung eingehalten werden müssen. Die Hygieneanforderungen der DüMV (nach § 5) gelten als erfüllt, wenn in 50 g Probenmaterial keine Salmonellen nachgewiesen werden können (Seuchenschutz) und keine pflanzlichen Ausgangsstoffe verwendet wurden, die von widerstandsfähigen Schadorganismen befallen sind, oder diese Ausgangsstoffe entsprechend hygienisiert wurden (Phytohygiene). Wenn Salmonellen nachgewiesen werden, darf das Material unter bestimmten Bedingungen trotzdem verwendet werden. Praktisch impliziert die Salmonellenfreiheit eines Materials auch nicht automatisch dessen hygienische Unbedenklichkeit, insbesondere bei Verdacht auf andere Belastungen. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020)

Weiterhin ist die DüMV für die Co-Vergärung auf Kläranlagen insofern relevant, als dass dort der Einsatz von Klärschlämmen als Hauptbestandteil von Düngemitteln erlaubt und beschrieben wird. Als Positivliste für den Einsatz von Substraten bei einer Co-Vergärung (in Bezug auf eine bodenbezogene Verwertung) wird auf Anhang 1 der BioAbfV hingewiesen, jedoch können auch andere Substrate in Abstimmung mit der Behörde zugelassen werden. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020) (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

Die DüV regelt die Anwendung von Düngemitteln (bzw. Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmittel und Kultursubstrate) auf landwirtschaftlich genutzten Flächen und macht Vorgaben zur Düngebedarfsermittlung, zu Ausbringzeiten und -mengen sowie zum Schutz von Böden und Gewässern. Diese Vorgaben sind auch bei der Anwendung von Klärschlämmen bzw. Gärresten aus einer Co-Vergärung zu beachten. (DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 2020)

#### f) Arbeitsschutzrecht

Bei Betrieb einer jeden Anlage müssen die Anforderungen des Arbeitsschutzes, die grundsätzlich im Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) und den dazugehörigen Verordnungen geregelt sind, eingehalten werden. Auf allen Klärwerken liegt in der Regel eine zu dokumentierende Beurteilung der Arbeitsbedingungen (Gefährdungsbeurteilung) nach § 5 ArbSchG unter Berücksichtigung der Gefahrstoff- (GefStoffV), der Biostoff- (BiostoffV) und der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) vor, die dazu dient, notwendige Maßnahmen zum Arbeitsschutz festzulegen. Diese Gefährdungsbeurteilung ist bei Einführung einer Co-Vergärung zu ergänzen und zu vervollständigen. Mit der Co-Vergärung wird eine neue Technologie eingeführt, die Veränderungen im Aufgabenbereich beschäftigter Mitarbeiter und den Einsatz neuer Arbeitsmittel mit sich bringen kann. Daher muss vor Inbetriebnahme eine entsprechende Unterweisung (nach § 12 ArbSchG) der Mitarbeiter erfolgen. Besonders beim Einsatz von tierischen Nebenprodukten, bei dem eine vermehrte Bildung von z.B. Schwefelwasserstoff nicht ausgeschlossen werden kann, sollte das Explosionsschutzdokument nach § 6 BetrSichV angepasst werden. Auch Aspekte der BiostoffV sollten vor allem bei Reinigungs- und Instandhaltungsarbeiten berücksichtigt werden. (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2009)

#### 4.1.2 Genehmigungsverfahren

Hier werden die für eine Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen möglichen Genehmigungsverfahren zusammengefasst. Insgesamt ist jedoch die Genehmigung einer Co-Vergärung in jedem Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzuklären, da -auch unter Berücksichtigung der jeweiligen landesrechtlichen Vorgaben- verschiedene Vorgehensweisen möglich sind. Manche Bundesländer (z.B. Hessen, Bayern) haben spezifische Vorgaben und Anleitungen für die Co-Vergärung auf Kläranlagen veröffentlicht, während andere Länder in diesem Bereich keine Regelungen oder Empfehlungen geben (z.B. Sachsen, Sachsen-Anhalt). Manche Länder haben mit Einrichtung einer Co-Vergärung auf Kläranlagen bereits viel Erfahrung gesammelt, während dies in anderen Ländern kein Thema darstellt. Das hier beschriebene Schema ist somit nicht unveränderlich festgeschrieben und nur als allgemeine Richtlinie zu verstehen, von der auch Abweichungen möglich sind. (Klasen 2019)

##### a) Behandlung von Abfällen mit untergeordneter Bedeutung

Grundsätzlich sind Faultürme aufgrund ihrer Aufgabe der Klärschlammbehandlung Teil der Kläranlage als Abwasserbehandlungsanlage und unterliegen zuerst dem Wasserrecht. Sie sind -so wie die gesamte Kläranlage- wasserrechtlich genehmigt. Diese Zuordnung gilt auch, wenn Abfälle im Rahmen einer Co-Vergärung in die Faultürme einer Kläranlage eingebracht werden, solange der Anteil des behandelten Klärschlammes den des Abfalls übersteigt. In diesem Fall ist also für die Durchführung einer Co-Vergärung eine wasserrechtliche Genehmigung der zuständigen Wasserbehörde mit Anpassung der Einleiterlaubnis erforderlich. Notwendige Nebenanlagen (z.B. zur Aufbereitung der Abfälle) sind je nach ihrer Größe nach Immissionsschutzrecht (größere Anlagen) oder Baurecht (kleinere Anlagen) zu genehmigen. Werden tierische Nebenprodukte als Co-Substrate verwendet, muss zusätzlich eine eigenständige hygienerechtliche Genehmigung nach (EG) Nr. 1069/2009 (bzw. hier veraltet beschrieben (EG) Nr. 1774/2002) erfolgen. Eine immissionsschutzrechtliche Genehmigung der Faultürme ist nicht notwendig, es gelten jedoch die Regelungen des BImSchG über nicht genehmigungsbedürftige Anlagen.

Gegebenenfalls muss auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchgeführt werden, wenn bestimmte Größenwerte überschritten werden oder die Befürchtung besteht, dass von der Einrichtung einer Co-Vergärung erhebliche nachteilige Umweltwirkungen ausgehen können. Dies gilt auch für die zwei folgenden Fälle.

##### b) Behandlung von Abfällen mit übergeordneter Bedeutung oder Behandlung von Abfällen in einem separaten Faulbehälter

Werden für eine Co-Vergärung mehr Abfälle als Klärschlamm eingesetzt oder werden Faultürme aus der Schlammbehandlung ausgegliedert und nur mit Abfällen beschickt, so muss eine Genehmigung nach Baurecht oder nach BImSchG (bei Überschreitung der vorgegebenen Mengenschwellen) erfolgen. Diese Genehmigung erstreckt sich dann jedoch auch auf alle Nebenanlagen und beinhaltet auch eine eventuell notwendige hygienerechtliche Genehmigung, die nicht mehr separat durchlaufen werden muss.

##### c) Behandlung von Abwasser bzw. von Substanzen direkt aus Abwasseranlagen

Werden für eine Co-Vergärung Substanzen eingesetzt, die von Beginn an den Abwasserbegriff erfüllen (also Abwasser direkt oder unmittelbar aus Abwasseranlagen

stammende Substanzen wie z.B. Flotatschlämme), muss eine wasserrechtliche Genehmigung grundsätzlich nicht erfolgen, wenn die Substrate direkt oder indirekt von der bestehenden Einleiterlaubnis erfasst werden. Die Entscheidung über die Annahme dieser Co-Substrate liegt eigenverantwortlich beim Betreiber der Anlage. Es kann jedoch bei bestimmten Substanzen bzw. Abwässern eine Indirekteinleitergenehmigung erforderlich sein.

#### 4.2 Versuche zum Abpressen von Bioabfall

In der Kompostieranlage wurden insgesamt drei Pressversuche durchgeführt. Die Zusammensetzung der gesammelten Bioabfälle variiert von Saison zu Saison, vor allem in Bezug auf den Gehalt an Trockensubstanz und den Gehalt an organischer Trockensubstanz. Das von der Presse erzeugte Presswasser kann daher auch eine andere Zusammensetzung haben. Zum besseren Vergleich wurden die drei Pressungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten vorgenommen: die erste im Juli in der Sommerzeit, die zweite im Februar in der Winterzeit und die dritte im Juni in der Frühlingzeit.

- Pressversuch Juli 2020:
  - 79 t Bioabfall (0/80mm) eingesetzt
  - 71 t Presswasser erzeugt
  - Ca. 59 m<sup>3</sup> Sickerwasser zum Anmischen verwendet
  - Das entstandene Presswasser wurde neben der Presse in einem Container gesammelt. Das Presswasser wurde in einen Lkw gepumpt und anschließend zur Kläranlage des Instituts transportiert
  - Gepresstes und ungespresstes 0-80 mm Material wurden optisch getrennt in dieselbe Miete der Intensivrotte eingelagert und nach 14 Tagen auf die Nachrotte umgelagert. Während beiden Rotten wurde die Temperatur über Temperaturmesslanzen aufgezeichnet.
  - Bei der Umlagerung wurden von beiden Materialien eine Probe zum Labor der Uni gebracht
  - Die Anlage hat ebenfalls eine Analyse der beiden Materialien durch ein Labor veranlasst (TS, oTS, CSB, Rottegrad).
  - Nach der Nachrotte erfolgte eine Absiebung auf 15 mm. Vom Kompost wurde eine Analyse gemäß BGK inklusive Hygieneuntersuchung gemacht



Abbildung 4-1 Bioabfall in der Pressmaschine



Abbildung 4-2 Angemischter Bioabfall mit Sickerwasser in Presse



Abbildung 4-3 Abgepresster Bioabfall (< 80 mm)



Abbildung 4-4 Presswasser (mit Sickerwasser angemischt)

- 2. Pressversuch Februar 2021:
  - 93,1 t Bioabfall (0/80mm) eingesetzt
  - 65,5 t Presswasser erzeugt
  - 28 m<sup>3</sup> Sickerwasser (erfasst mit MID) wurden zum Anmischen eingesetzt
  - Danach exakt selbes Vorgehen wie im 1. Pressversuch
  - Ebenfalls wurde während der Intensiv- und der Nachrotte die Temperaturverläufe beider Materialien aufgezeichnet, wobei aufgrund eines technischen Fehlers die Temperatur des Presskuchens erst ab der Nachrotte aufgezeichnet werden konnte.
  
- 3. Pressversuch Juni 2021:
  - 29,19 t Bioabfall (0/80mm) eingesetzt
  - 15,5 t Presswasser erzeugt
  - 5,18 m<sup>3</sup> Leitungswasser zum Anmischen verwendet
  - Presse im laufenden Versuch kaputt gegangen



Abbildung 4-5 Angemischter Bioabfall mit Leitungswasser in Presse



Abbildung 4-6 Presswasser (mit Leitungswasser angemischt)

In folgender Tabelle 4-3 befindet sich eine Übersicht zur den Pressversuchen.

Tabelle 4-3 Übersicht Pressversuche

|                 | Bioabfall [t] | Gepresster Bioabfall (0/80mm) [t] | Sickerwasser zum Mischen [m <sup>3</sup> ] | Anmerkungen  |
|-----------------|---------------|-----------------------------------|--|--|
| 1. Pressversuch | 19,9          | 40,0                              | ca. 40,0                                   | Nach Abholung durch Picker wurde weitergepresst. Dieses Presswasser wurde am 22.07. abgeholt zusammen mit dem bis dahin gepressten PW. |
|                 | 25,2          | 16,8                              | ca. 9,0                                    | Nach Abholung durch Picker wurde weitergepresst. Dieses Presswasser wurde am 23.07. abgeholt zusammen mit dem bis dahin gepressten PW. |
|                 | 26,0          | 22,0                              | 9,8  | Presse defekt ab 11:30 Uhr   |
| 2. Pressversuch | 27,8          | 43,7                              | 11,0                                       | Bioabfall sehr feucht. Evtl. da auf Umschlagplatz im freien gelagert war   |
|                 | 27,2          | 39,9                              | 13,5                                       | MID-Messung  |
|                 | 10,5          | 9,5                               | 3,4  | Presse lief nur ca. 1 Std. da Elektrik kaputt, Abholung PW am 11.03. wegen Schneechaos und kaputtem LKW                                |
| 3. Pressversuch | -             | -                                 | -  | keine Pressung da Fa. Schäfer keinen Container geliefert hat   |
|                 | 15,5          | 29,2                              | 5,2  | Pressung mit Leitungswasser  |
|                 | -             | -                                 | -  | keine Pressung da Presse defekt  |

#### 4.3 Proben und Charakterisierung

Im weiteren Verlauf wurden die Proben von Bioabfall (BA), Presswasser (PW), dem abgepressten Bioabfall (aBA) und Sickerwasser (SW) aus den Pressversuchen genommen und Laboranalysen durchgeführt. Es wurden die Parameter TOC, CSB, TS, oTS, pH, Nährstoffgehalt, CHN-Gehalt und organische Säuregehalt bestimmt. Damit können die wichtigsten Parameter des Presswassers, welches durch das Anmischen mit Sickerwasser (PW<sub>SW</sub>) gewonnen wurde, mit dem Presswasser, das durch Anmischen mit Leitungswasser (PW<sub>LW</sub>) gewonnen wurde, verglichen werden.





Abbildung 4-7 Probe Bioabfall (links) und abgepresster Bioabfall (rechts)



Abbildung 4-8  $PW_{LW}$  (links) und  $PW_{SW}$  (rechts)



Abbildung 4-9 Sickerwasser

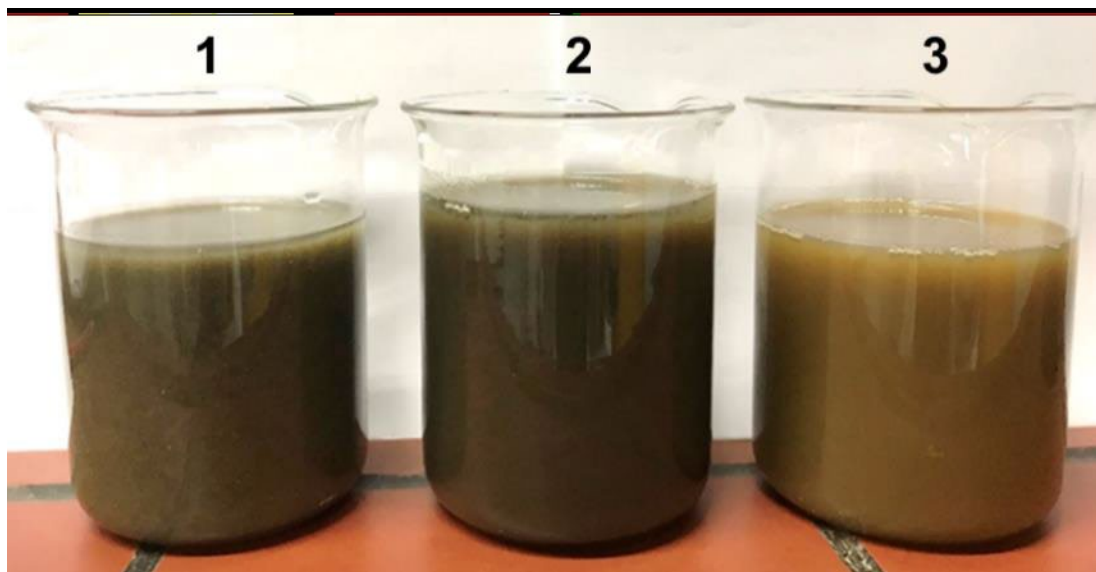


Abbildung 4-10 (1)Primärschlamm, (2)Überschussschlamm, (3)PW<sub>LW</sub>

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Parameter aufgelistet. Wie man sieht, ist der Feststoffgehalt in PW<sub>LW</sub> deutlich geringer als in PW<sub>SW</sub>, ebenso der Gehalt an organischen Säuren. Das bedeutet, dass durch Zugabe von Sickerwasser zum Anmischen der Bioabfälle, ein Teil des organischen Anteils aus dem Sickerwasser in das Presswasser gelangt.

Tabelle 4-4 Charakterisierung der Proben

| Parameter      | Einheit | PW <sub>LW</sub> | PW <sub>SW</sub> | BA    | aBA   | SW    |
|----------------|---------|------------------|------------------|-------|-------|-------|
| WS             | %       | 91,4%            | 82,2%            | 68,1% | 57,7% | 95,8% |
| TS             | %       | 8,6%             | 17,8%            | 31,9% | 31,1% | 4,2%  |
| oTS            | %       | 69,1%            | 75,9%            | 73,8% | 81,1% | 47,3% |
| oTS in FM      | %       | 5,9%             | 13,5%            | 23,5% | 25,2% | 1,99% |
| pH             |         | 4,8              | 4,8              | 5     | 5     | 6,9   |
| LF             | mS/cm   | 18,2             | 18,80            | 3,40  | 2,80  | 28,6  |
| Essigsäure     | mg/l    | 6980             | 7880             | 602   | 541   | 9415  |
| Propionsäure   | mg/l    | 615              | 1231             | <50   | 55    | 3675  |
| Buttersäure    | mg/l    | 998              | 1148             | <50   | 50    | 2451  |
| ISO Valerians. | mg/l    | 81               | 157              | n.a.  | <50   | 476   |
| Valeriansäure  | mg/l    | 87               | 442              | n.a.  | <50   | 1550  |
| Capronsäure    | mg/l    | 278              | <50              | <50   | <50   | 1304  |
| P ges          | mg/l    |                  | 601              | 27,6  | 24,5  | 115   |
| CSB            | mg/l    |                  | 147000           | 3590  | 2590  | 32200 |
| TOC            | mg/l    |                  |                  | 2190  | 1820  | 18700 |

n. a. = nicht analysiert

#### 4.4 Biogasertrag in Batch Untersuchungen

Die Abbildung 4-11 stellt die graphische Entwicklung der spezifischen Biogasertrag aus den untersuchten Substraten dar.

Wie bereits im Kapitel 3.3 erwähnt, liegt der Biogasertrag der Zellulose bei einem Durchschnittswert von 745 +/- 10% I<sub>N</sub>/kg oTS. Das heißt, die Werte sollen zwischen von 670,5 und 819,5 I<sub>N</sub>/kg oTS liegen. Damit wird die Leistungsfähigkeit der biologisch aktiven Massen zum Biomasseumsatz gewährleistet. Der Biogasertrag aus der Zellulose beträgt 656 I<sub>N</sub>/kg oTS. Der Wert befindet sich mit 2 % unterhalb der obengenannten Grenzbereich. Diese Abweichung liegt an der Messtoleranz. Durch die Messungen mit der Zellulose wird in den Versuchen eine gute Leistungsfähigkeit des Impfschlamm für beide Versuchsreihen gewährleistet.

Für alle Substrate ist eine Anstiegsphase des Biogasertrags bis zum 8. Tag festzustellen. Im Anschluss stabilisiert sich der Biogasertrag bis zum Ende der Versuchsreihe. Daraus ist zu erkennen, dass Presswasser mit 810 Normliter pro kg oTS einen höheren Biogasertrag als die festen Substrate, d.h. Bioabfall und abgepresste Bioabfall aufweist. Die niedrigsten Biogaserträge stammen von der Bioabfallprobe. In den ersten 6 Tage erreicht der Biogasertrag von Presswasser mehr als 700 I<sub>N</sub>/kg oTS. Dies bestätigt die Hypothese, dass sich durch das Abpressen des Bioabfalls die leicht abbaubaren organischen Bestandteile abtrennen lassen und zu einer höheren Konzentration im Presswasser führt und auch, dass das Presswasser flüssig ist, führt zu einer schnelleren Abbaubarkeit und ist vorteilhaft einzustufen. Diese zwei Kriterien erleichtern den Mikroorganismen die Zugänglichkeit zu gelösten Makro- und Mikroelementen für die Hydrolyse. Eine Betrachtung der Biogaserträge von Presswasser und Sickerwasser führt zu der Erkenntnis, dass der Unterschied zwischen Presswasser und Sickerwasser in Bezug auf die Gesamtbioasmengen relativ gering ist. Somit lassen sich die Unterschiede der Biogaserträge durch die ähnliche organische Trockensubstanzgehalt und Trockensubstanzgehalt von den Proben begründen. Der Biogasertrag von Bioabfall ist bei 567 I<sub>N</sub>/kg oTS, und ist somit niedriger als derjenige von abgepresstem Bioabfall. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Pressvorgang zu dem Aufschluss der Materialien führt, und für den Abbau des abgepressten Bioabfalls förderlich ist.

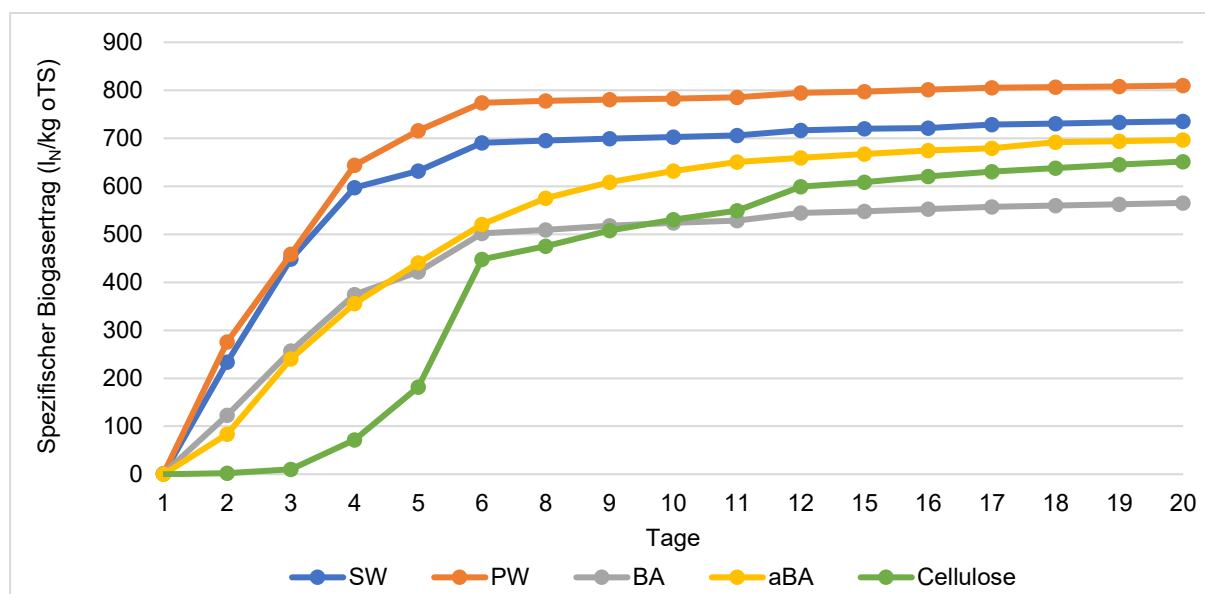


Abbildung 4-11 Biogasertrag der verschiedenen Substrate

Die Kurven der Methangehalt im Laufe der Batch-Versuche von jedem einzelnen Substrate sind in Abbildung 4-12 dargestellt.

Der prozentuale Anteil an Methan in Bezug auf den Biogasertrag steigt stetig bis zum 4. Tag an. Das stetige Wachstum verlängert sich für Cellulose bis zum Ende der Versuchsreihe, wobei eine Abflachung der Verläufe ab den 10. Tag festzustellen ist.

Anders ist es bei Presswasser, Sickerwasser, BA und aBA. Am 4. Tag ist bei diesen Substraten einen Rückgang der Anteile für Methan zu beobachten. Bei Presswasser ist eine leichte kontinuierliche Abnahme der Volumenprozent von 76% am 5.Tag bis 69 Vol.% am 21.Tag zu erkennen. Der Methangehalt im Biogas der BA und aBA liegt bei ca. 66 Vol.%. Der Methangehalt des Biogases aus Sickerwasser sinkt von 74 % auf 68 %. Diese Werte ab dem 4. Versuchstag sind allerdings unter messspezifischen Ungenauigkeiten als im Schnitt konstant einzustufen.

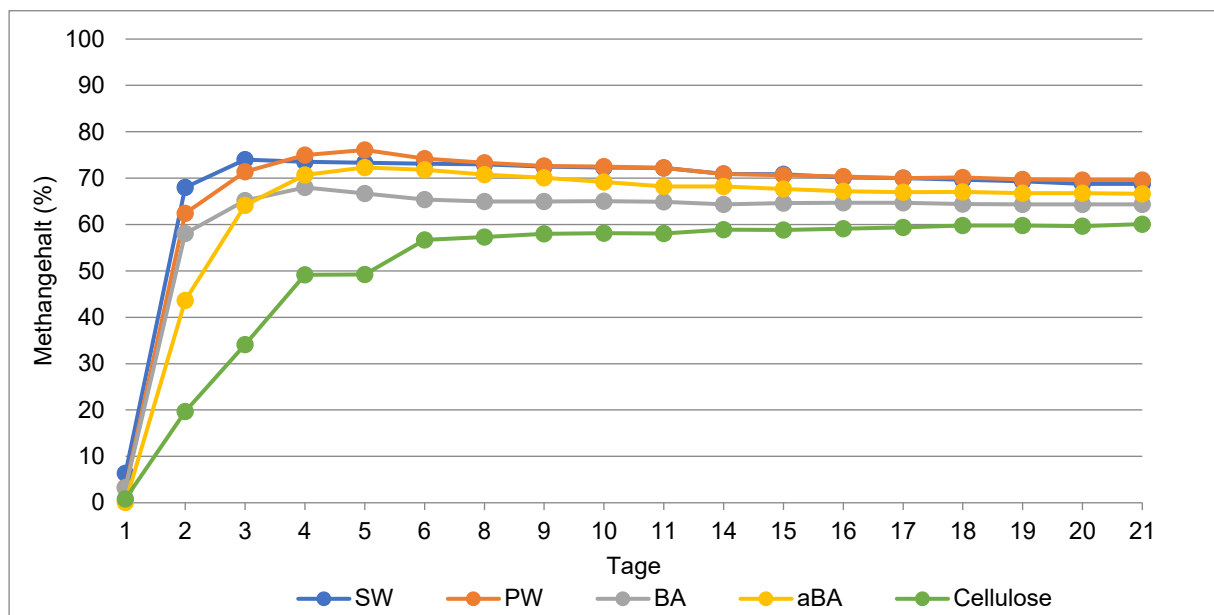


Abbildung 4-12 Methankonzentration von Batch-Untersuchung

#### 4.5 Substratspezifische Biogaserzeugung

Die gemessene Biogasmengen sollen in Normliter umgerechnet werden. Dazu wurden der Behälterdruck und der vom Deutschen Wetterdienst an der Wetterstation Stuttgart-Echterdingen gemessene Luftdruck benötigt. Da der Versuchsreaktor als geschlossenes System betrachtet wurde, entsprach die gemessene Temperatur des Faulschlammes der Biogastemperatur. Mit Hilfe von folgender Gleichung wurde die gemessene Biogasmenge in Normliter umgerechnet.

$$V_N = V_G * \frac{T_N * (P_R + P_A)}{(P_G + P_N)}$$

- Mit:
- $V_N$  Gasmenge in Standardlitern [ $l_N$ ]
  - $V_G$  Erzeugte Biogasmenge [ $l$ ]
  - $T_N$  Normtemperatur = 273,15 K
  - $P_R$  Betriebsdruck des Reaktors [hPa]
  - $P_A$  Luftdruck [hPa]

$P_N$  Standarddruck = 1013,25 hPa  
 $T_G$  Temperatur des Biogases [K]

Die drei Substrate zeigten unterschiedliche Abbaukinetiken. (Schmidt 2021)

Tabelle 4-5 gibt einen Überblick über die Ergebnisse des Abbaus für jedes einzelne Substrat sowie für die Co-Vergärung von Sekundärschlamm (SS)+ Primärschlamm (PS). (Schmidt 2021)

Tabelle 4-5 Vergleich der Gas- und Methanproduktionsraten, des Methangehalts und des mittleren CSB-Gehalts der Substrate Primärschlamm PS, Überschussschlamm SS, Presswasser PW und der Mischung aus SS+PS

| <b>Substrate</b>   | <b>PS</b> | <b>SS</b> | <b>PW</b> | <b>SS+PS</b> |
|--|-----------|-----------|-----------|--------------|
| <b>Durchschnittlicher CSB-Gehalt [mg/l]</b>  | 21.900    | 7.480     | 70.800    | 6.850        |
| <b>Durchschnittliche Biogasproduktion [l/(10 min*kg CSB)]</b>                        | 4,14      | 1,35      | 3,16      | 2,08         |
| <b>Methangehalt [%]</b>  | 64        | 67        | 71        | 71           |
| <b>Durchschnittliche Methanproduktion [l/(10 min*kg CSB)]</b>                        | 2,65      | 0,84      | 2,03      | 1,49         |
| <b>Durchschnittliche Methanproduktion pro Liter Substrat [l/(10 min*l Substrat)]</b> | 0,06      | 0,01      | 0,14      | 0,01         |

Die durchschnittliche Biogas- und Methanbildungsrate war bei PS im Vergleich zu SS und Presswasser (PW) am höchsten pro kg CSB (siehe Tabelle 4-5 und Abbildung 4-13). Im Vergleich zu den anderen Substraten hatte SS die niedrigste Gasproduktionsrate pro kg CSB und pro Liter Substrat. Pro Liter Substrat hatte PW die höchste Methanproduktion, die mehr als 2,4-mal höher war als bei PS (siehe Abbildung 4-14).

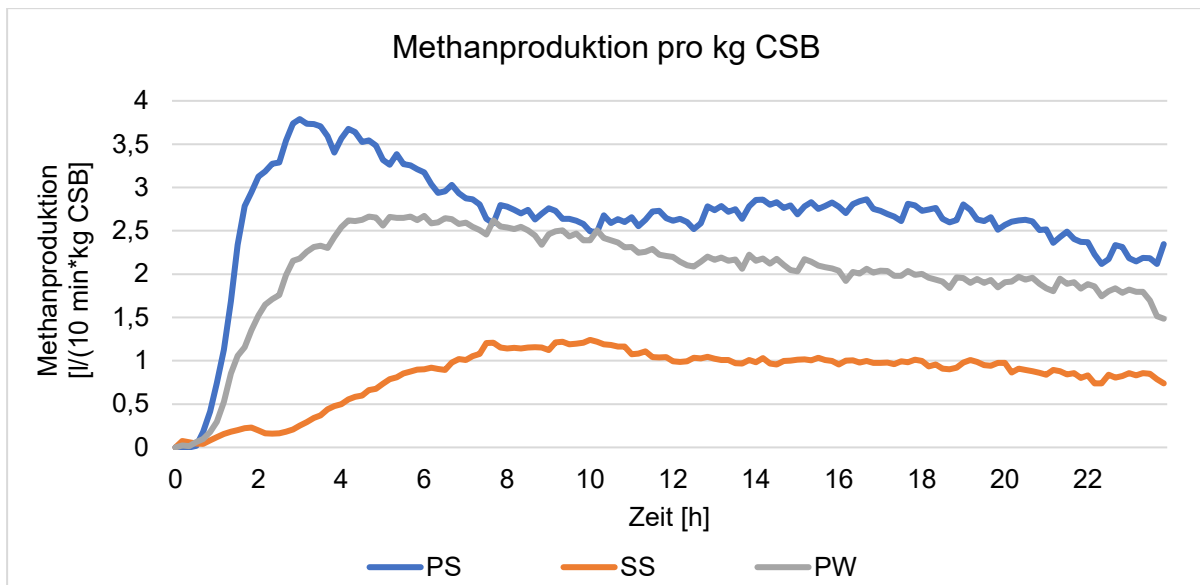


Abbildung 4-13 Substratspezifische Methanproduktion [l/(10 min\*kg CSB)] für Primärschlamm PS, Sekundärschlamm SS und Presswasser PW während der ersten 24 h nach der Beschickung des Fermenter

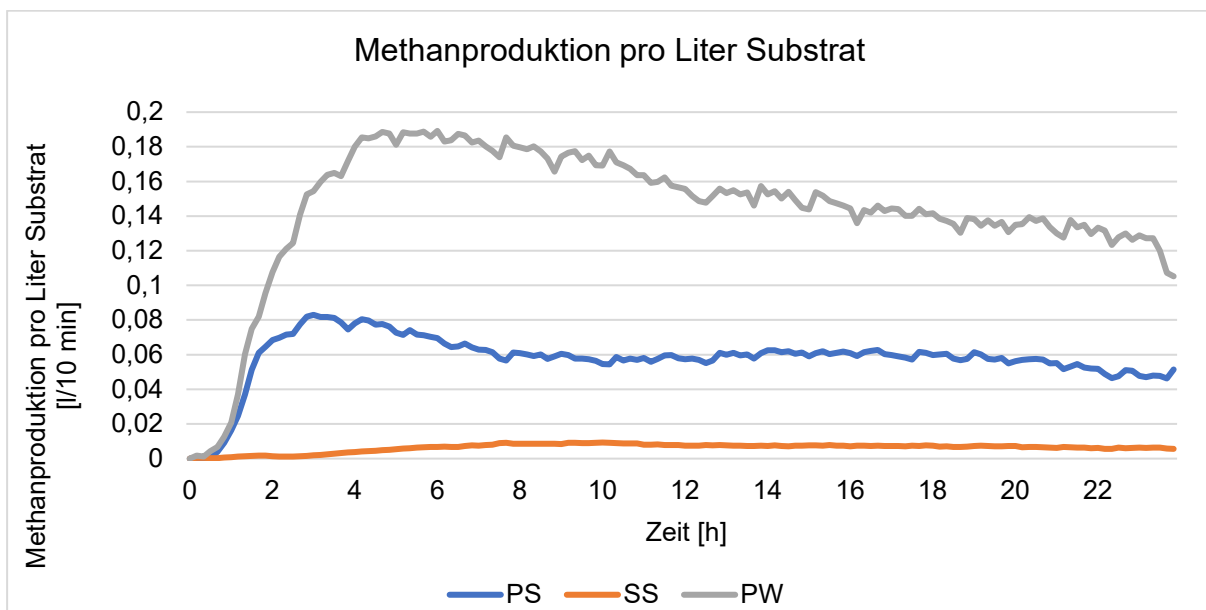


Abbildung 4-14 Methanproduktion [l/10 min] pro Liter Substrat in den ersten 24 h nach der Beschickung des Fermenters mit Substrat

Wie in Abbildung 4-15 zu sehen ist, stieg die Gasbildungsrate und erreichte ein Maximalniveau nach der Beschickung mit Substrat, während der Methangehalt gleichzeitig sank. Besonders deutlich war dies am ersten Tag nach dem Wochenende, als der Methangehalt von 62 % auf 55 % 6 Stunden nach der Beschickung sank. Anschließend begann die Gasbildungsrate zu sinken und der Methangehalt zu steigen. Die Methanbildungsrate sank jedoch 24 Stunden nach der Beschickung nicht auf den niedrigsten Ausgangszustand, und jeden Tag reicherte sich nicht abgebautes Substrat im Reaktor an.

Um das spezifische Abbauverhalten des Presswassers von mehreren Tagen zu beschreiben, wurde einen Woche täglich 1 Liter Presswasser ohne das Klärschlammgemisch zugegeben. Abbildung 4-16 zeigt die Biogasbildungsrate und den Methangehalt während der Woche. Die Biogasbildungsrate stieg sehr schnell nach der Beschickung an, wobei die maximale Biogasbildungsrate etwa 2 Stunden nach der Beschickung erreicht wurde und sich ohne Schwankungen auf  $0,8 \text{ m}^3$  für jeden Tag belief. Gleichzeitig stieg der Methangehalt langsam an und blieb dann während der gesamten Woche zwischen 68 % bis 70 %. Die Biogasbildungsrate sinkt 24 Stunden nach der Beschickung auf ihren niedrigsten Wert, was bedeutet, dass fast alle leicht abbaubaren Substrate im gefütterten Substrat während dieser 24 Stunden in Biogas umgewandelt werden und sich nicht täglich im Reaktor anreichern. (Wei 2020)

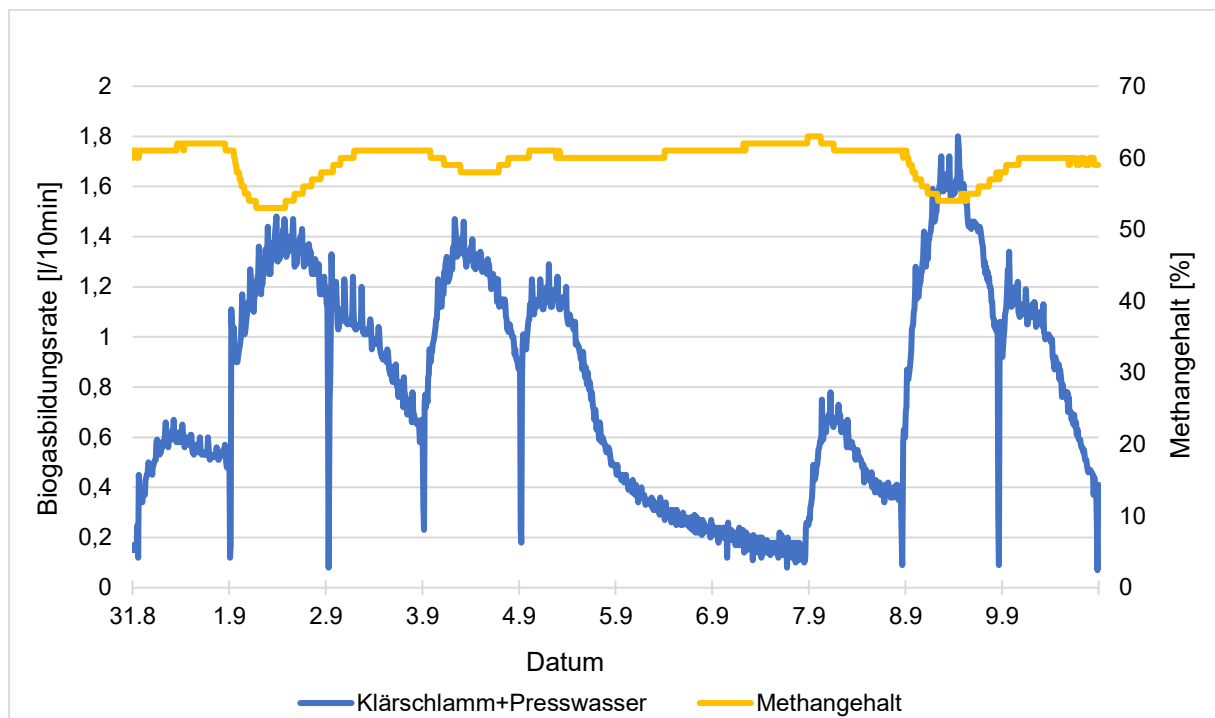


Abbildung 4-15

Biogasbildungsrate und Methangehalt mit Klärschlamm + Presswasser

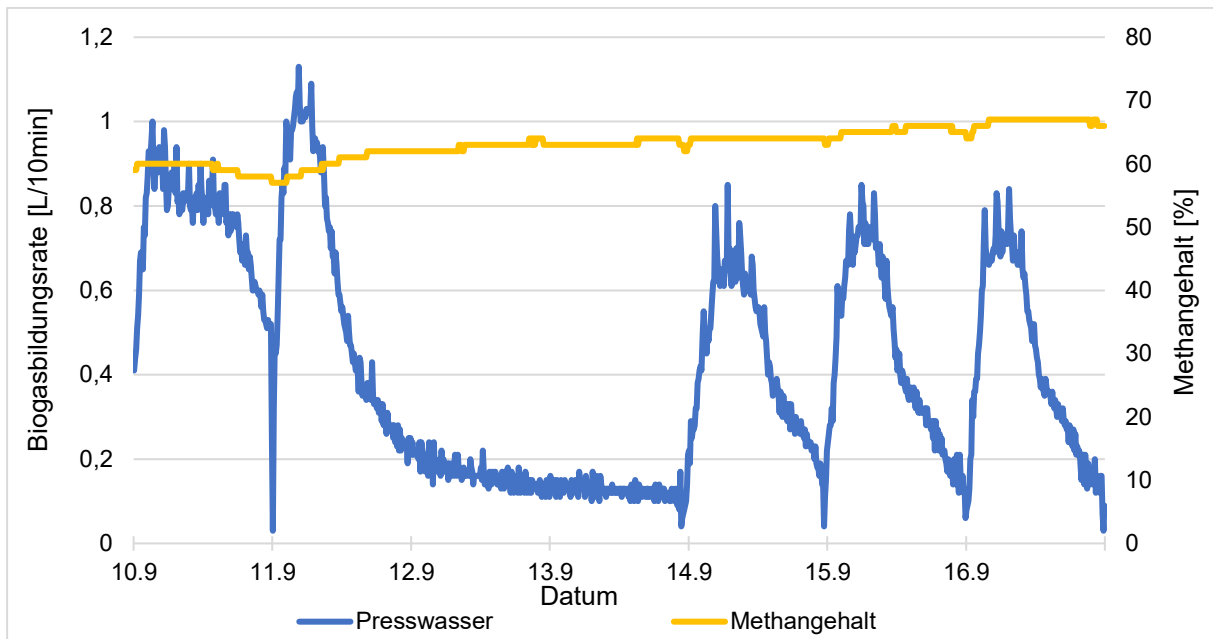


Abbildung 4-16 Biogasbildungsrate und Methangehalt mit Presswasser

Um den Beitrag des PW bei der Co-Fermentation zu bestimmen, wurden zwei Kurven zum Vergleich zusammengestellt, und zwar für Klärschlamm (orange Linie) und die Klärschlamm+Presswasser (blau Linie).

Obwohl die beiden Kurven einen vergleichbaren Verlauf zeigen, unterscheiden sich die maximalen Gasbildungsrate voneinander. Die Gasbildungsrate bei der Beschickung mit dem Klärschlamm+Presswasser Gemisch steigt weiter an als bei der Beschickung mit dem reinen Klärschlamm. Es ist auch zu sehen, dass der Methangehalt kurzzeitig abnimmt, wenn das Presswasser als Co-Substrat zugeführt wird. Darüber hinaus weisen die unterschiedlichen Biogasmengen zwischen den beiden Beschickungssubstraten darauf hin, dass diese durch den zusätzlichen 1L Presswasser erzeugt werden (graue Bereich). Diese Biogasproduktionsrate ist fast identisch mit der des Presswassers allein in der vorherigen Abbildung. Es ist jedoch anzumerken, dass der Gehalt an Trockensubstanz und organischer Substanz des Klärschlamm von Tag zu Tag schwankte, was einen großen Beitrag zu den Unterschieden in der Biogasproduktion leistet. Dieses Problem wurde im nächsten Versuch verbessert, bei dem am Montag genügend Klärschlamm entnommen und jeden Tag mit demselben Klärschlamm beschickt wird, um vergleichbare Versuchsergebnisse zu gewährleisten. (Wei 2020)



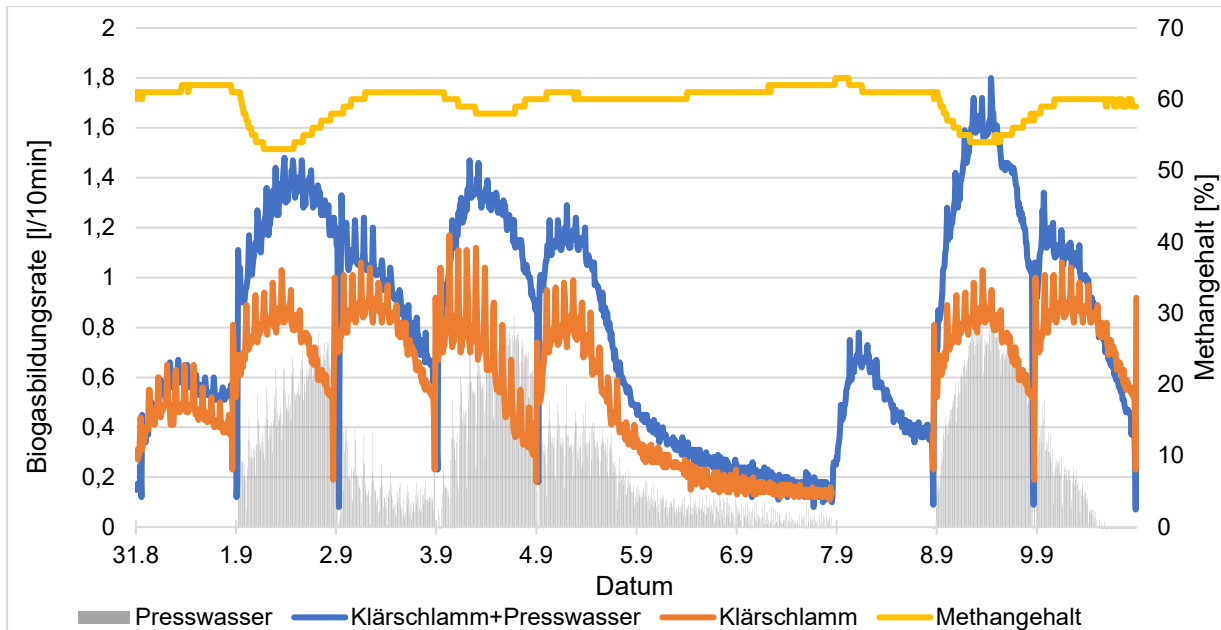


Abbildung 4-17 Biogasbildungsrate und Methangehalt von Presswasser, Klärschlamm und Klärschlamm+Presswasser

#### 4.6 Gebildete Biogasmenge in abhängig von zugegebenem Anteil Presswasser

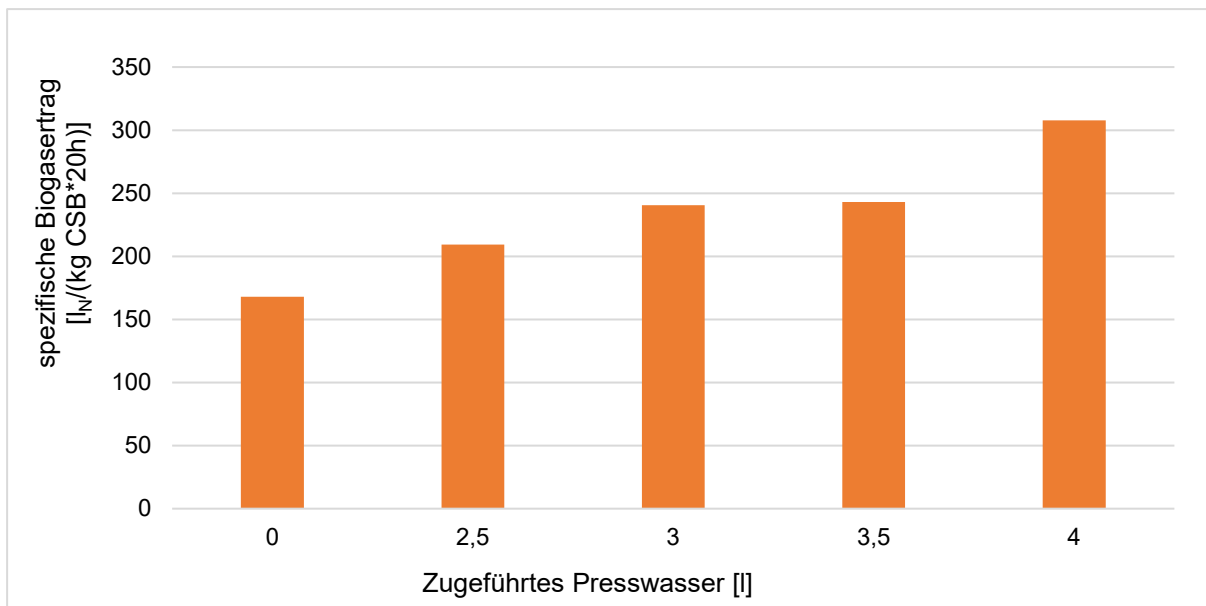


Abbildung 4-18 Spezifische Biogasertrag in Abhängigkeit der zugeführten Presswassermenge

In Abbildung 4-18 sind die gemittelten spezifischen Biogasausbeuten in Abhängigkeit der zugeführten Presswassermenge dargestellt. Bei gleicher täglicher Klärschlammzugabe steigt die Biogasproduktion mit zunehmender Menge an Presswasser. Gleichzeitig nimmt auch die spezifische Biogasproduktion pro kg CSB zu. Je höher der Anteil an Presswasser, desto größer ist die Biogasertrag. (Liener 2020)

Zusammenfassend ist durch die Zugabe des Co-Substrates Presswasser eine Steigerung der Biogasproduktion zu erzielen. Durch die Beschickung mit geringen Mengen an CSB wird eine Steigerung der Biogasproduktion und Qualität erreicht. Je höher der Anteil des Presswasser

an der gesamten Beschickungsmenge, umso mehr Biogas wird produziert. Anhand der Beobachtungen kann folgender Schluss für die Beschickung gezogen werden: Für eine Steigerung der Biogasproduktion sind geringe CSB-Beschickungsmengen mit einem hohen Anteil an Presswasser dem Reaktor zuzuführen. Mittels Optimierung der Umwälzung und Beschickung kann die Biogasqualität und die Prozessstabilität erhöht werden.

Um die Produktionsraten der verschiedenen Mischungen vergleichen zu können, werden die Biogas- und Methanproduktionsraten pro kg CSB, der über das Substrat zugeführt wird, ausgedrückt. Eine typische Form der Methanproduktionskurve zeigte sich bei den Versuchen mit PW-Gehalten zwischen 40 % und 58,75 % in den Eingangssubstraten. Abbildung 4-19 zeigt, dass die Methanproduktion für beide Gemische nach Erreichen eines Spitzenwerts abnimmt und sich bis zu 7 Stunden lang bei einer stabilen hohen Methanbildungsrate zwischen 3 und 3,5 l/(10min\*kg CSB) einpendelt. Danach fällt die Methanproduktion wieder ab. Bei 58,75 % PW sinkt die Produktion schneller und pendelt sich nach 18 Stunden bei 0,6 l/(10min\*kg CSB) ein. Die Produktion nach 18 Stunden ist im Vergleich zu allen anderen Gemischen niedriger. (Schmidt 2021)

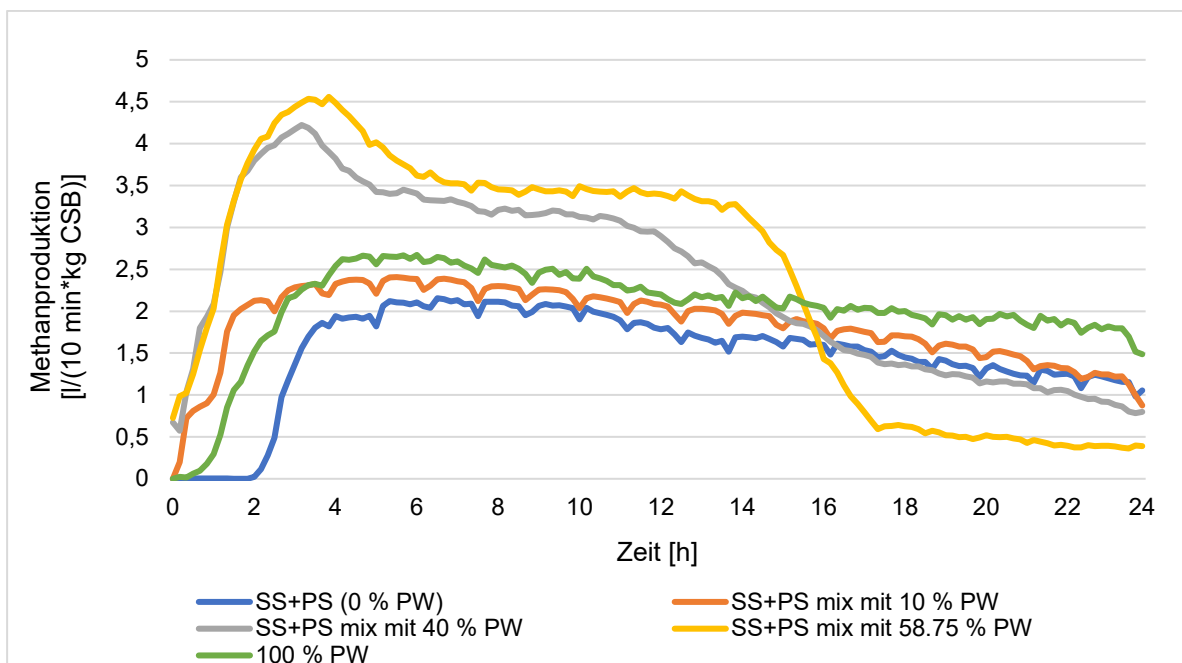


Abbildung 4-19 Methanproduktion [l/(10 min\*kg CSB)] der verschiedenen Mischungen

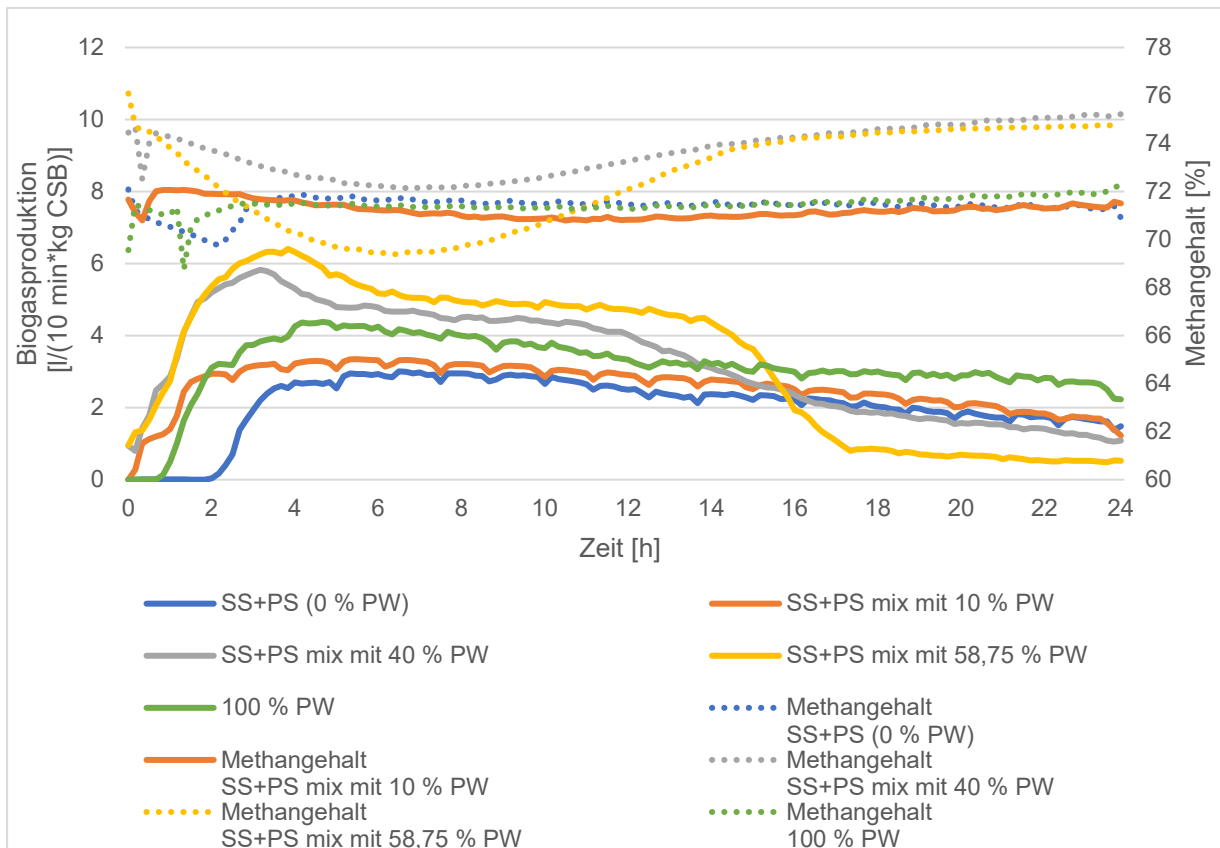


Abbildung 4-20 Biogasproduktion [l/(10 min\*kg CSB)] und den Methangehalt [%] der verschiedenen Mischungen

Die Qualität des Biogases wird in Abbildung 4-20 durch den Methangehalt angegeben. Der Methangehalt ist am höchsten bei 58,75 % und 40 % PW in der Mischung. Der Methangehalt sinkt bei der Mischung mit 58,75 % nach der Beschickung um 6 %. Die Verringerung des Methangehalts für das Gemisch mit 40 % PW beträgt nur 3 % nach der Beschickung und bleibt über dem Methangehalt aller anderen Gemische nach der Beschickung. Reiner Klärschlamm (0 % PW), reines PW (100 % PW) und eine Mischung mit 10 % PW weisen alle einen stabilen Methangehalt von etwa 71 % bis 72 % auf. Schwankungen treten nur kurz nach der Beschickung auf. Die Biogasproduktion zeigt die gleichen Ergebnisse wie in Abbildung 4-20 Die höchste Produktion wird mit dem höchsten PW-Gehalt in der Mischung erreicht.

Abbildung 4-21 zeigt die Korrelation zwischen dem PW-Gehalt in einem Gemisch mit PS+SS und der durchschnittlichen und maximalen Methanproduktionsrate pro kg CSB. Es zeigt sich, dass die höchste maximale Methanproduktion bei einem Gemisch mit einem Anteil von 58,75 % PW erreicht wurde. Die durchschnittliche Methanproduktion pro kg CSB ist bei Mischungen mit 40 % und 58,75 % PW fast gleich. Die Mischung aus PS+SS (0 % PW) zeigte die niedrigsten Werte sowohl für die durchschnittliche als auch für die maximale Methanproduktionsrate. Die Beschickung mit 100 % PW zeigte sowohl für die maximale als auch für die durchschnittliche Methanproduktion höhere Werte als die Mischung mit 10 % PW.

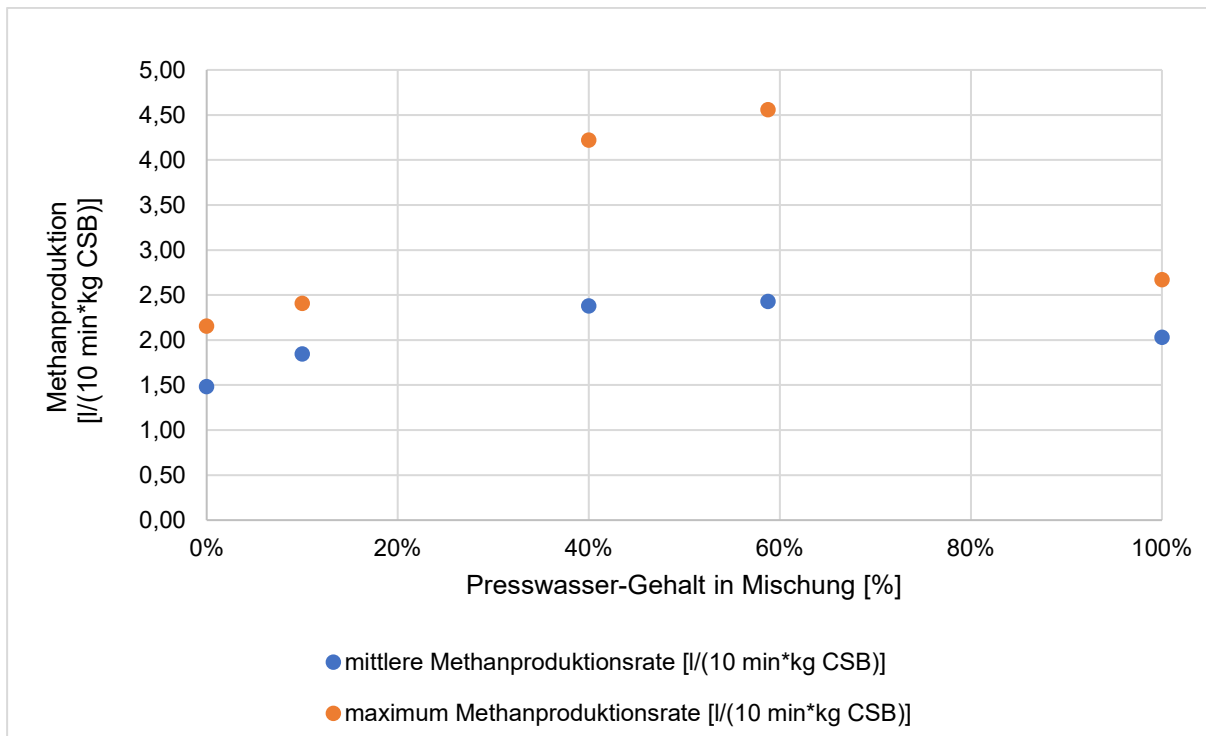


Abbildung 4-21 Korrelation der durchschnittlichen und maximalen Methanproduktion pro kg CSB mit dem Anteil von PW in einer Mischung aus PS+SS.

Abbildung 4-22 zeigt die Gesamtmethanausbeute nach 24 Stunden. Obwohl diese Ergebnisse dasselbe zeigen wie die Korrelation der durchschnittlichen Methanproduktion mit dem PW-Gehalt in der Mischung, wird diese Abbildung gezeigt, um das Ergebnis zu unterstreichen. Die Methanausbeute ist bei den Mischungen mit 40 % und 58,75 % PW am höchsten. Der geringste Ertrag wurde erzielt, wenn nur PS und SS mitvergoren wurden. Die reine Vergärung von PW führte zu einer höheren Ausbeute als die Co-Vergärung einer Mischung mit 10 % PW.

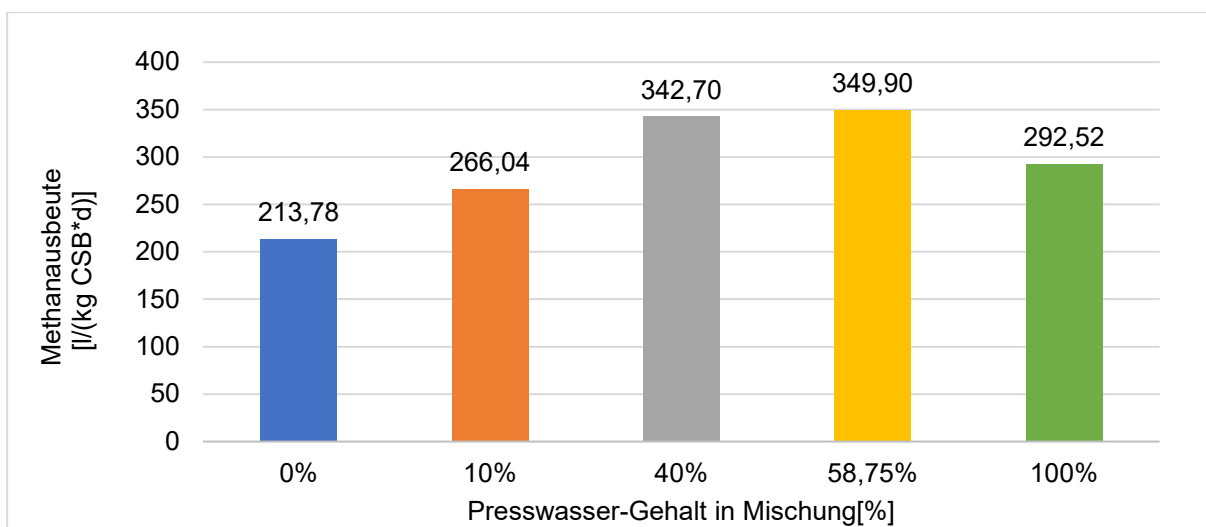


Abbildung 4-22 Methanausbeute [l/(kg CSB\*d)] für Mischungen mit unterschiedlichen Gehalten an PW

Die Co-Vergärung mit PW führte zu einem Anstieg der Methanproduktion pro kg CSB von 24 % bis 63 % im Vergleich zur Vergärung von reinem Klärschlamm. Je höher der Volumenanteil des PW ist, desto höher ist der Anstieg (siehe Tabelle 4-6). Der weitere Anstieg der Methanproduktion war jedoch nur gering, wenn der PW-Gehalt von 40 % auf 58,75 % erhöht wurde. Vergleicht man die Steigerung der Methanproduktion aus der Co-Vergärung mit den Ergebnissen von reinem PW, so lag die Steigerung zwischen 17 % und 19,6 %, wenn der PW-Gehalt zwischen 40 % und 58,75 % lag. Die Co-Vergärung mit einem Gemisch, das nur 10 % PW enthielt, ergab einen um 9 % geringeren Ertrag im Vergleich zur Vergärung von reinem PW.

Tabelle 4-6 Übersicht über die durchschnittlichen und maximalen Methanproduktionsraten, die Zeit nach Erreichen der maximalen Methanproduktionsrate, den täglichen Methanertrag und die Steigerung der Methanproduktion für verschiedene Mischungen im Vergleich zur Vergärung einer Mischung aus SS+PS (0 % PW) und reiner Vergärung von PW (100 % PW)

| <b>PW-Gehalt in Mischung</b>  | <b>0 %</b> | <b>10 %</b> | <b>40 %</b> | <b>58.75 %</b> | <b>100 %</b> |
|---|------------|-------------|-------------|----------------|--------------|
| Durchschnittliche Methanproduktionsrate<br>[l/(10 min*kg CSB)]  | 1.48       | 1.85        | 2.38        | 2.43           | 2.03         |
| Maximale Methanproduktionsrate<br>[l/(10 min*kg CSB)]   | 2.16       | 2.41        | 4.22        | 4.56           | 2.67         |
| Zeit bis zum Erreichen der maximalen<br>Methanproduktionsrate<br>[h]  | 6.30       | 5.30        | 3.10        | 3.50           | 6.00         |
| Methanertrag<br>[l/(kg CSB*d)]  | 213.78     | 266.04      | 342.70      | 349.90         | 292.52       |
| Steigerung der Methanproduktion für<br>verschiedene Mischungen im Vergleich zur<br>Vergärung einer Mischung aus SS+PS (0<br>% PW) | -          | 24.45 %     | 60.31 %     | 63.68 %        | -            |
| Steigerung der Methanproduktion für<br>verschiedene Mischungen im Vergleich zur<br>reiner Vergärung von PW (100 % PW)             | -          | -9.05 %     | 17.15 %     | 19.61 %        | -            |

Abbildung 4-23 zeigt, dass die maximale Methanproduktionsrate zuerst nach 3:10 Stunden mit der Mischung mit 40 % PW erreicht wurde. Die maximale Methanproduktionsrate wurde am spätesten mit der reinen SS+PS-Mischung erreicht, gefolgt von reinem PW. Die maximale Methanproduktionsrate wurde nach 3:50 h für das Gemisch mit 58,75 % PW erreicht.

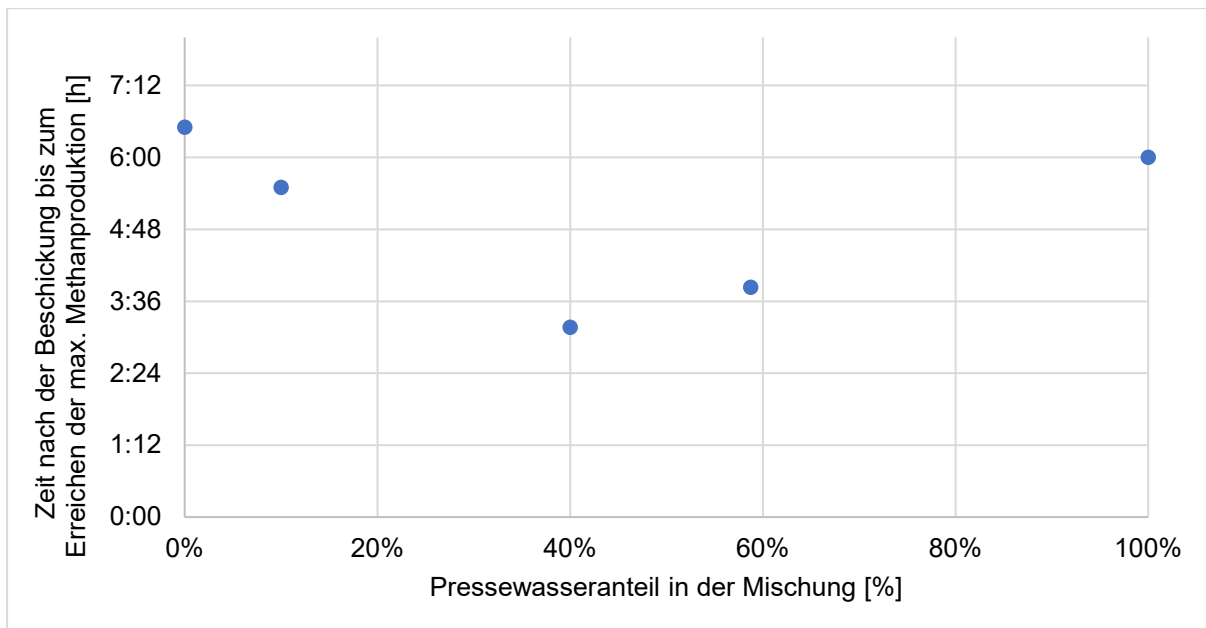


Abbildung 4-23 Korrelation der Zeit [h] nach der Beschickung bis zum Erreichen der max. Methanproduktion, mit dem Anteil [%] von PW in einer Mischung aus PS+SS.

#### 4.7 Auswirkungen unterschiedlicher Beschickungsfrequenzen auf Biogasproduktion

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss von Mehrfachbeschickungen pro Tag auf den Ertrag und den Methangehalt untersucht. Die tägliche Belastung von 10 l Substrat wurde beibehalten. Es wurden zwei verschiedene Versuchsanordnungen getestet. Bei der ersten Versuchsanordnung wurde das Substrat gemischt und in zwei oder drei gleiche Teile aufgeteilt. Zwischen den einzelnen Beschickung wurde eine Pause von 2 Stunden eingelegt. Bei der zweiten Versuchsanordnung wurde nur das Co-Substrat PW 5 Stunden nach der ersten Beschickung erneut zugegeben. (Schmidt 2021)

##### 1) Mehrfache Beschickungen mit derselben Mischung

Bei der ersten Versuchsreihe wurde eine Beschickung pro Tag (1x) mit zwei (2x) und drei (3x) Beschickungen pro Tag verglichen. Die OLR schwankte von Woche zu Woche aufgrund von Schwankungen der Substrate zwischen 0,77 und 0,90 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d), so dass die durchschnittliche Methanproduktionsrate pro kg CSB pro Woche berechnet und die Methanproduktion für die durchschnittliche OLR von 0,86 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) modelliert wurde. 0,86 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) war die durchschnittliche OLR während des dreiwöchigen Versuchs.

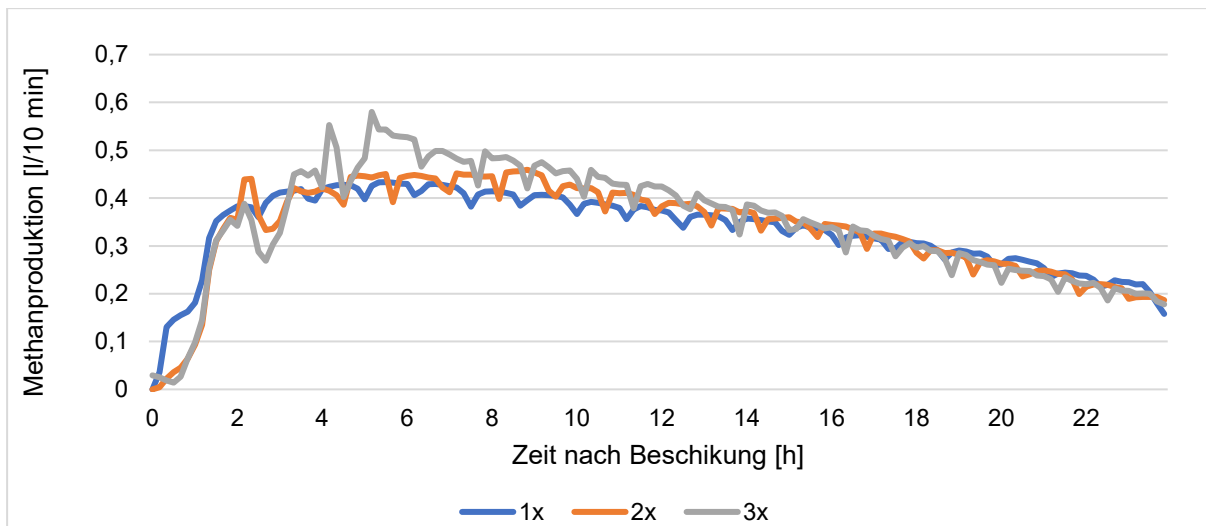


Abbildung 4-24 Methanproduktion [l/10 min] für eine Beschickung (1x), zwei Beschickungen (2x) und drei Beschickungen (3x) pro Tag bei einer OLR von 0,86 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d)

Abbildung 4-24 zeigt die Methanproduktion pro 10 Minuten für die drei verschiedenen Beschickungsschemata. Die Produktionsrate von 3x erreichte im Vergleich zu den anderen eine höhere maximale Produktionsrate. Bei näherer Betrachtung der Gesamterträge pro Tag war der Ertrag von 3x mit 50 l/d am höchsten, während 2x 48,2 l und 1x 47,9 l pro Tag produzierte. Obwohl der Gesamtertrag bei 3x um 4 % höher war, war der Ertrag im Vergleich zu den anderen Beschickungsschemata laut t-Test nicht signifikant höher.

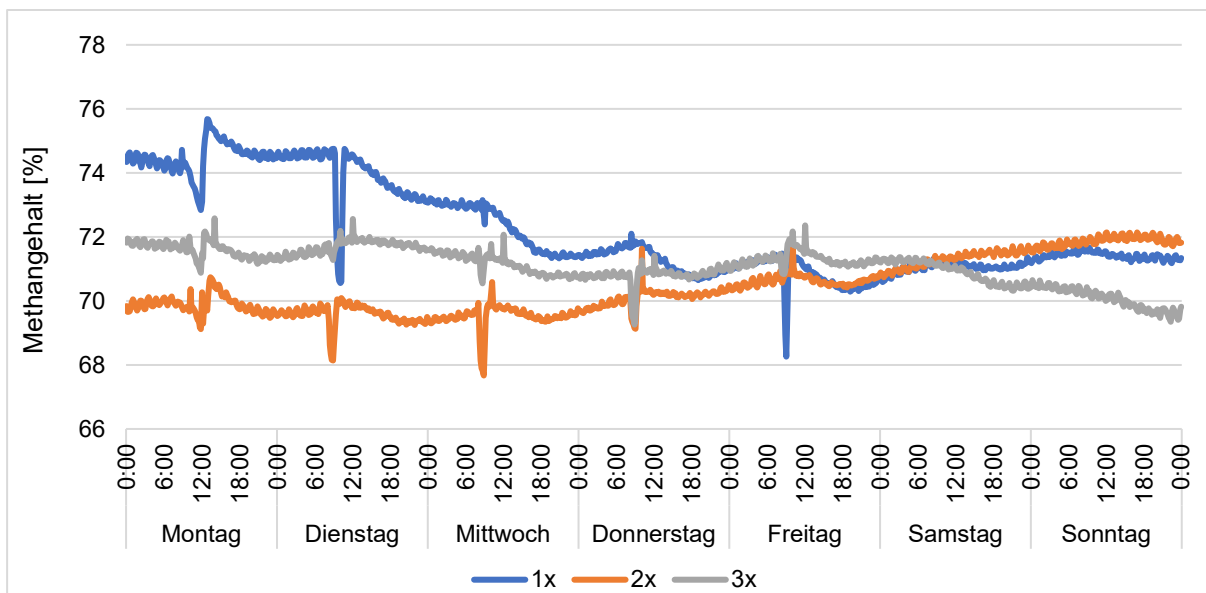


Abbildung 4-25 Verlauf des Methangehalts von einem Futter pro Tag (1x), zwei Beschickungen pro Tag (2x) und drei Beschickungen pro Tag (3x)

Die Methangehalte der verschiedenen Beschickungsschemata entwickelten sich im Laufe der Woche unterschiedlich (siehe Abbildung 4-25). Während der Methangehalt von 1x von Montag

bis Freitag um insgesamt 4 % abnahm, stieg der Methangehalt von 2x von Montag bis Sonntag um 2 %. Der Methangehalt von 3x blieb relativ stabil und sank nur am Wochenende um etwa 2 %. In der Abbildung ist auch der Rückgang des Methangehalts unmittelbar nach der Beschickung um 1-3 % zu erkennen. Die Mehrfachbeschickung führte nicht zu einer signifikanten Erhöhung des Tagesertrags, aber zu einer Stabilisierung des Methangehalts im Laufe der Woche.

## 2) Zugabe von PW nach 5 h

Ein anderer Beschickungsplan wurde getestet, indem nur das Co-Substrat PW 5 Stunden nach der ersten Beschickung in den Reaktor gegeben wurde. Ziel dieser Beschickungsmethode war die Verlängerung einer hohen Produktionsrate und die Bewertung der Auswirkungen einer Zugabe von PW in den Reaktor, während die AD des anderen Substrats im Gange war. Die Ergebnisse wurden mit dem Beschickungsplan verglichen, bei dem die gleiche Mischung auf einmal zugegeben wurde.

Das Beschickungsmodell bestand aus einer Mischung aus 2,25 l PS, 3,75 l SS und 2,8 l PW, die zu Beginn und 1,2 l PW, die 5 Stunden später in den Reaktor gegeben wurden.

Die Methanproduktionsrate pro kg CSB wurde für beide Beschickungsschemata berechnet und die Ergebnisse wurden für eine OLR von 1,71 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) modelliert, was der durchschnittlichen Belastung über die Wochen entsprach. Während die Belastung für W8 auf einmal zugeführt wurde, wurde die Belastung für W9 in zwei Portionen aufgeteilt. Die erste Belastung von W9 betrug 1,31 kg CSB/m<sup>3</sup> zum Zeitpunkt 0 und 0,4 kg CSB/m<sup>3</sup> 5 Stunden später. 0,4 kg CSB/m<sup>3</sup> entsprechen etwa 23,6 % der Gesamtfracht.

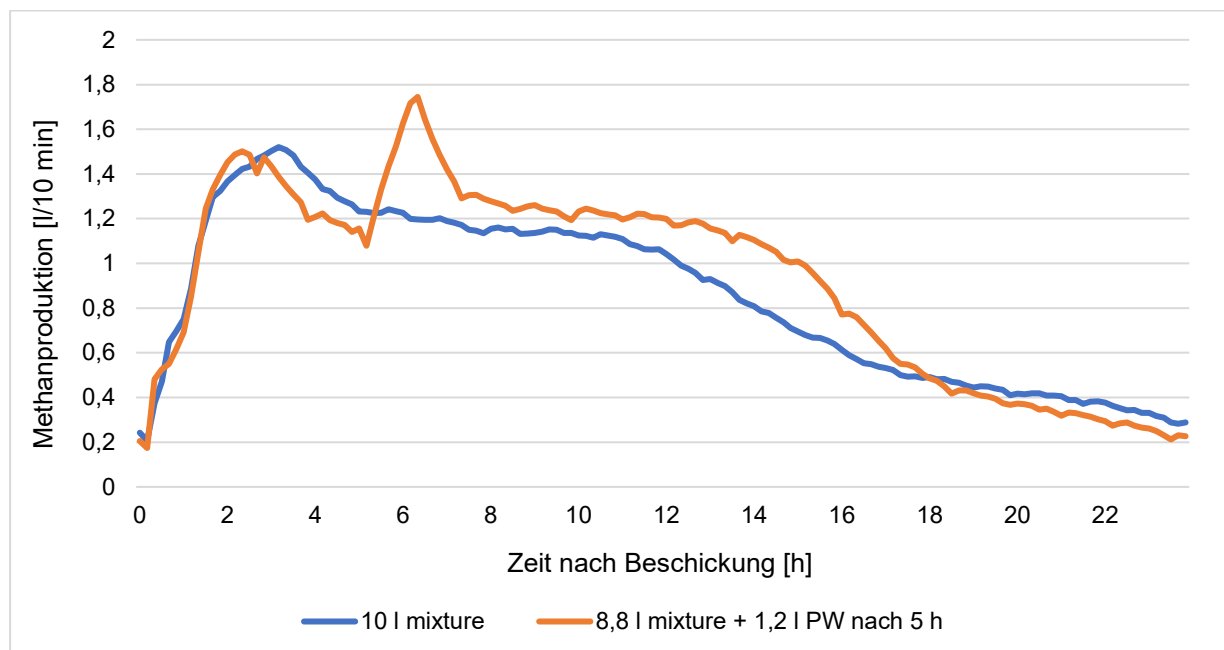


Abbildung 4-26 Vergleich der Methanproduktion mit OLR von 1,71 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d), einmal Beschickung und 2-mal Beschickung (5 h später)

Der Gesamtertrag nach 24 Stunden war bei Mehrfachbeschickung um 8 % höher als bei Einmalbeschickung. Dies führte zu einem Anstieg der Ausbeute um 10 l Methan pro 24 h. Wurde nach 5 h erneut PW zugegeben, blieb die Methanproduktionsrate noch 3 Stunden lang



über 1 l/10 min (siehe Abbildung 4-26). Die hohe Produktionsrate wurde verlängert. Außerdem führte die zweite Beschickung zu einem zweiten Spitzenwert, der innerhalb von 2 Stunden nach der Zugabe des Substrats erreicht wurde.

Die Methanausbeute der ersten 5 Stunden war bei einmaliger Beschickung nur 4 % höher, obwohl die OLR zu diesem Zeitpunkt 30 % höher war als bei Mehrfachbeschickung. Nicht nur die Erträge waren ähnlich, sondern auch die Kurven der Methanproduktion waren in den ersten 3 Stunden fast identisch. Nach 18 Stunden erreichten beide Kurven wieder das gleiche Niveau (siehe Abbildung 4-26).

#### 4.8 Optimale OLR für Prozessstabilität

Um Empfehlungen für ein Beschickungsschema für das LFKW abgeben zu können, ist es wichtig, weitere Informationen über den optimalen OLR-Wert des Reaktors zu erhalten. Eine optimale OLR ist wichtig, um eine hohe Prozessstabilität zu gewährleisten. Wird die OLR überschritten, wird der Reaktor überlastet, was zu einer Anhäufung von organischem Material im Reaktor führt, was einen Abfall des pH-Wertes und eine Verschlechterung der Biogasqualität zur Folge hat, die sich in einer Verringerung des Methangehalts zeigt. (Schmidt 2021)

Die CSB-Bilanz kann Hinweise auf die Prozessstabilität liefern, indem sie anzeigt, ob die organischen Stoffe im Reaktor ausreichend umgesetzt werden. Bei einem Anteil von 58,75 % PW im Gemisch und einer OLR von bis zu 2,53 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) verdoppelte sich die CSB-Belastung im Abwasser von Montag bis Freitag, was auf eine Anhäufung von unverdaulichem organischem Material im Reaktor im Laufe der Woche hindeutet. Die Zufuhr von bis zu 2,53 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) führte also dazu, dass mehr unverdaute organische Stoffe den Reaktor verließen, was bedeutet, dass die Mikroorganismen nicht in der Lage waren, die täglich zugeführte Menge innerhalb von 24 Stunden abzubauen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass im Reaktor eine maximale OLR erreicht wird. Wie bereits erwähnt, sank die Methanproduktionsrate jedoch bereits nach 18 Stunden auf ein konstant niedriges Niveau, was den Schluss zulässt, dass der Abbauprozess bei höherem PW-Gehalt beschleunigt und schneller abgeschlossen wurde. Daraus könnte man schließen, dass der steigende CSB-Gehalt im Abwasser durch schwer zugängliche und nur langsam abbaubare organische Stoffe wie Lignozelluloseverbindungen verursacht wurde. Der Abbau dieser Stoffe wurde in der folgenden Woche fortgesetzt, was zu dem hohen Methanertrag pro kg umgesetzten CSB führte. Die unverdaulichen Verbindungen, die sich im Laufe der Woche ansammelten, beeinflussten auch den Anteil des CSB-Gehalts im Abwasser in der Folgewoche. Der Anteil des CSB im Output im Vergleich zum Input war mit 36 % der höchste im Vergleich zu allen anderen Substraten. Dies deutet nicht darauf hin, dass der Abbau von PS ineffizient war. Aufgrund der Anhäufung von organischen Stoffen in der Vorwoche ist es nicht möglich, Rückschlüsse auf die Abbaueffizienz von PS und den Methanertrag pro kg umgesetzten CSB zu ziehen.

Das Verhältnis von OLR und Methanausbeute kann weitere Hinweise geben, wenn eine maximale OLR erreicht wird. Das Erreichen einer Überlast würde zu einer Stagnation der Methanausbeute mit zunehmender OLR und einer Versauerung im Reaktor führen, die sich in einer Absenkung des pH-Wertes zeigt.

Die Methanausbeute stieg linear zur OLR, aber auch eine polynomiale Regressionslinie der Ordnung 3 wurde zu den Daten aufgetragen und zeigte einen guten Bestimmtheitsgrad. Die polynomiale Regressionslinie kann darauf hinweisen, dass die Steigung der Kurve mit

zunehmender OLR abflacht. Die Methanausbeute erreicht eine Phase der Stagnation, was darauf hindeutet, dass man sich bald einem Maximum der OLR nähern könnte. Ein weiteres Indiz für die Annäherung an ein OLR-Maximum ist die Veränderung der Gasqualität mit zunehmender OLR. Es wurde beobachtet, dass bei einer OLR von mehr als 2 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) ein Rückgang des Methangehalts um mehr als 3 % auftrat. Dies ist eine verschlechternde Auswirkung hoher OLR auf die Biogasqualität. Der höchste Methangehalt des Biogases wurde bei einer OLR von 1,77 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) mit einem Gemisch mit 40 % DW erreicht. Diese Mischung wies auch eine sehr hohe durchschnittliche Methanproduktionsrate von 2,38 l/(10min\*kg CSB) auf. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Prozess immer noch sehr stabil ist und sehr gute Ergebnisse für die OLR von 1,77 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) liefert. Bei einer weiteren Erhöhung der OLR auf 2,53 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) traten verschlechternde Auswirkungen auf den Methangehalt auf. Die Verringerung des Methangehalts betrug im Durchschnitt 6 %. Dennoch lag der pH-Wert noch im optimalen Bereich und eine Stagnation der Methanausbeute war noch nicht deutlich erkennbar.

Zusammenfassend deuten die Ergebnisse darauf hin, dass sich die OLR einem Maximum nähert und eine weitere Erhöhung der OLR über 2,53 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) hinaus wahrscheinlich zu einer Stagnation der Methanausbeute führen würde. Eine weitere Erhöhung der OLR sollte mit Vorsicht erfolgen. Die Annahme, dass man sich der Belastungsgrenze nähert, wird durch die Ergebnisse einer Diplomarbeit gestützt, die mit demselben Reaktor durchgeführt wurde (Bauer 2013). Bauer beobachtete eine Stagnation der Gasbildungsrate bei einer OLR von 2,86 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d).

#### 4.9 Beschickung des Presswassers in Faulturm



Abbildung 4-27 Faulturm LFKW mit einem Fassungsvermögen von 320 m<sup>3</sup>

Der Faulturm LFKW wurde mit Presswasser beschickt. Das Presswasser wurde in einem Voreindicker zwischengespeichert und mit einer Drehkolbenpumpe in den Faulturm gefördert. Das geförderte Volumen wurde über den Füllstand gemessen und mit einem magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) kontrolliert. Das im Voreindicker gespeicherte Presswasser wurde in mehreren Tranchen dem Faulturm zudosiert. Die im Faulturm gebildete Gasbildung nahm jeweils abhängig von der Menge zu.

Durch die Zudosierung von Presswasser konnte festgestellt werden, dass sich im Behälter Feststoffe absetzten und mit abnehmender Feststoffkonzentration bei gleicher Zugabemenge die zusätzliche erzeugte Gasmenge abnahm. Die Gasqualität stieg bei allen Beschickungen an - von ca. 60% CH<sub>4</sub> auf bis zu 70% CH<sub>4</sub>. Nur bei der ersten Beschickung wurde wegen der problematischen Mengemessung der Faulturm mit einer sehr hohen Fracht beschickt,

dadurch ging der CH<sub>4</sub> Gehalt kurzfristig zurück auf 59% und stieg dann aber wieder auf 70% an.

Der Ausfallgrad erwies sich als sehr hoch. Durch die Nutzung von Presswasser konnte noch lange auch bei der wieder regulären Nutzung Störstoffe, wie kleine rote Kunststoffpartikel im Austrag dedektiert werden. Deshalb muss bei der regulären Nutzung von Presswasser im Faulturm zur Vergärung langfristig die sich ansammelnden Störstoffe entfernt werden.

#### 4.10 Kompostierungsuntersuchung

Der aus den Pressversuchen stammende Bioabfall (im Versuch wurden hierfür nur Bioabfälle der Biotonne verwendet) wurde zusammen mit dem nicht abgepressten Bioabfall (beide 0/80mm) in dieselbe Miete der Intensivrotte eingelagert und optisch getrennt gehalten.

Um einen Vergleichswert herzustellen, wurde von dem angelieferten Bioabfall jeweils auch ein unabgepresster Teil kompostiert und im Labor anschließend analysiert. Die Hypothese war das sich das Kompostierungs-Verhalten durch das Abpressen der Flüssigkeit ändert. Es wurden 3 Pressversuche gemacht, da der 3. Versuch nicht ausreichend Menge erzeugt hat wurden bei diesem auf die Einlagerung und weitere Untersuchung des Materials verzichtet.



Abbildung 4-28

Einlagerung des abgepressten und unabgepressten Materials in die Intensivrotte



Abbildung 4-29 Auslagerung aus der Intensivrotte nach 14 Tagen



Abbildung 4-30 Beider Materialien auf der Nachrotte

Das abgepresste Material zeigte im Vergleich des Temperaturverlaufs keinen Unterschied zum ungepressten Material und es konnten für beide Komposte ein Rottegrad von 4 festgestellt werden.

Abbildung 4-31 zeigt die beiden Kerntemperatur-Kurven von gepresstem und ungepresstem Material aus der Intensiv- und Nachrotte des ersten Pressversuchs und Abbildung 4-32 dasselbe aus dem 2. Pressversuch. Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, erreicht der gepresste Bioabfall in der Phase der Intensivrotte eine höhere Temperatur, d. h. 58°C. Der

ungepresste Bioabfall erreicht 46°C. In der Nachrottephase erreichen beide fast die gleiche Höchsttemperatur, aber der gepresste Bioabfall wird dabei rascher erwärmt. Dies zeigt, dass das Pressverfahren den Bioabfall besser aufschließt.

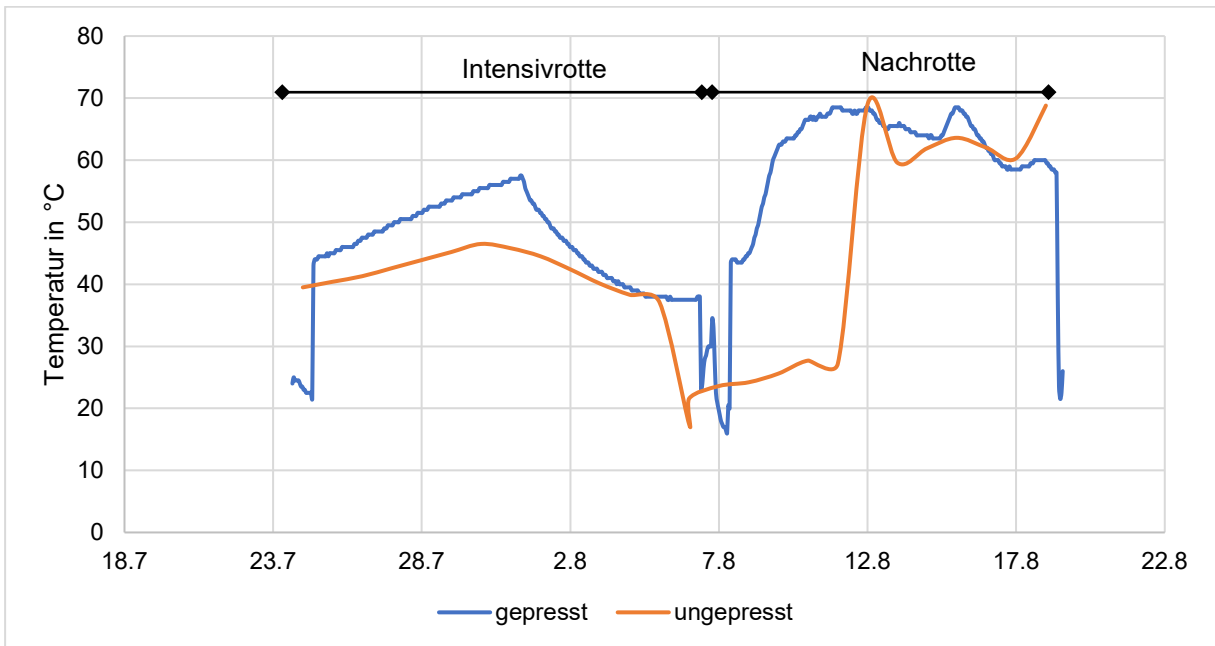


Abbildung 4-31 Erster Pressversuch - Kerntemperaturen des gepressten und ungespressten Bioabfalls während der Rottezeit

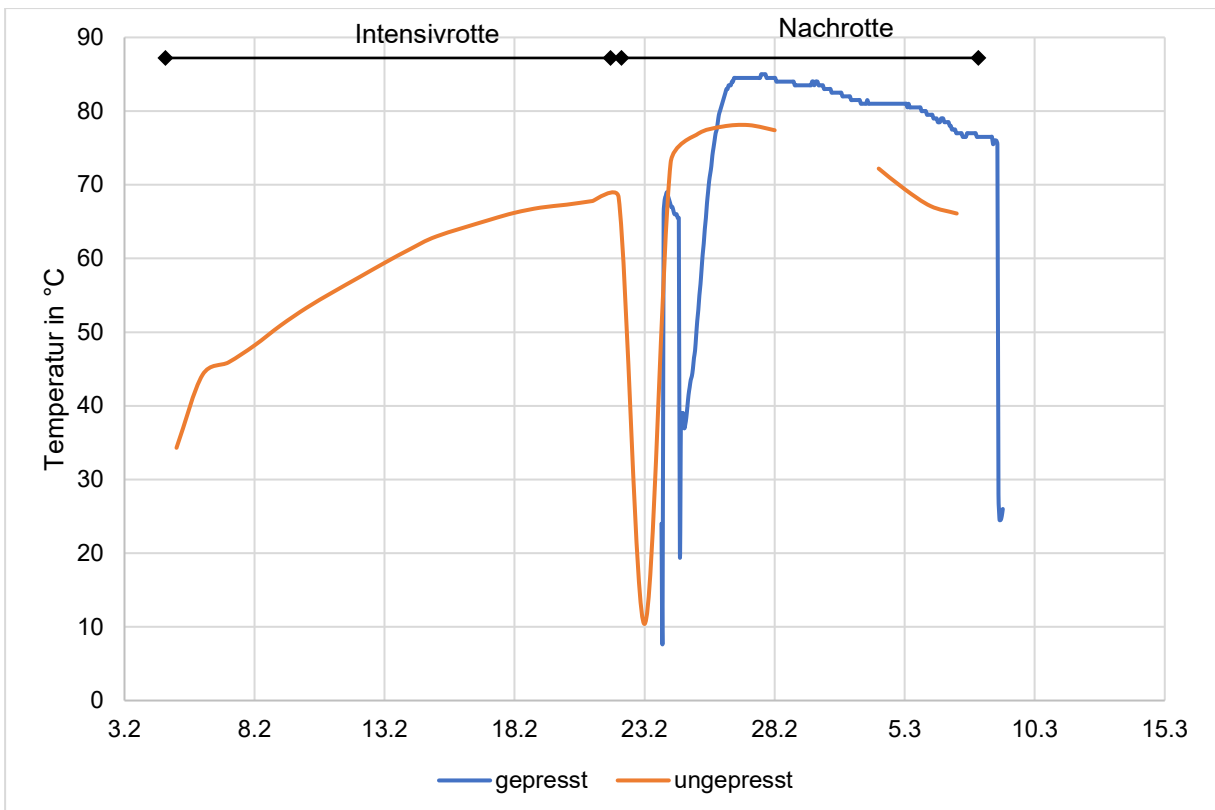


Abbildung 4-32 Zweiter Pressversuch – Kerntemperaturen des gepressten und ungespressten Bioabfalls während der Rottezeit

Für das ungepresste Material wurde zusätzlich noch die Randtemperatur der Miete erfasst (siehe Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34).

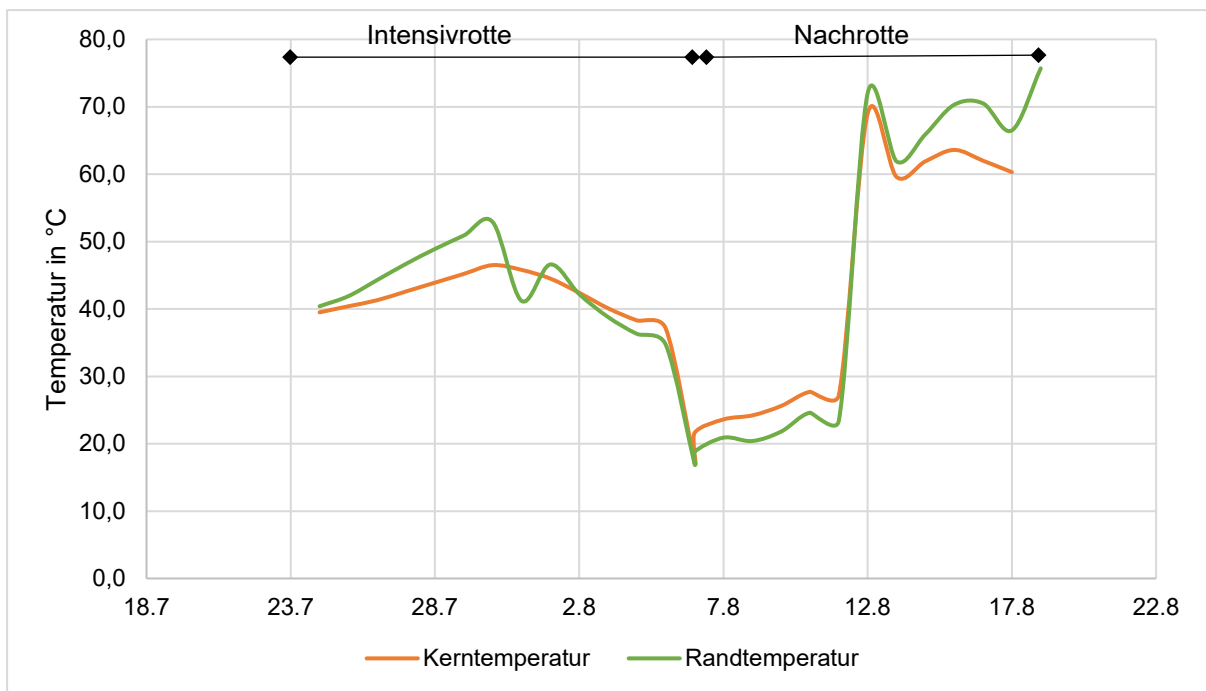


Abbildung 4-33 Erster Pressversuch Kern- und Randtemperaturen des ungepressten Materials während der Intensiv- und Nachrotte

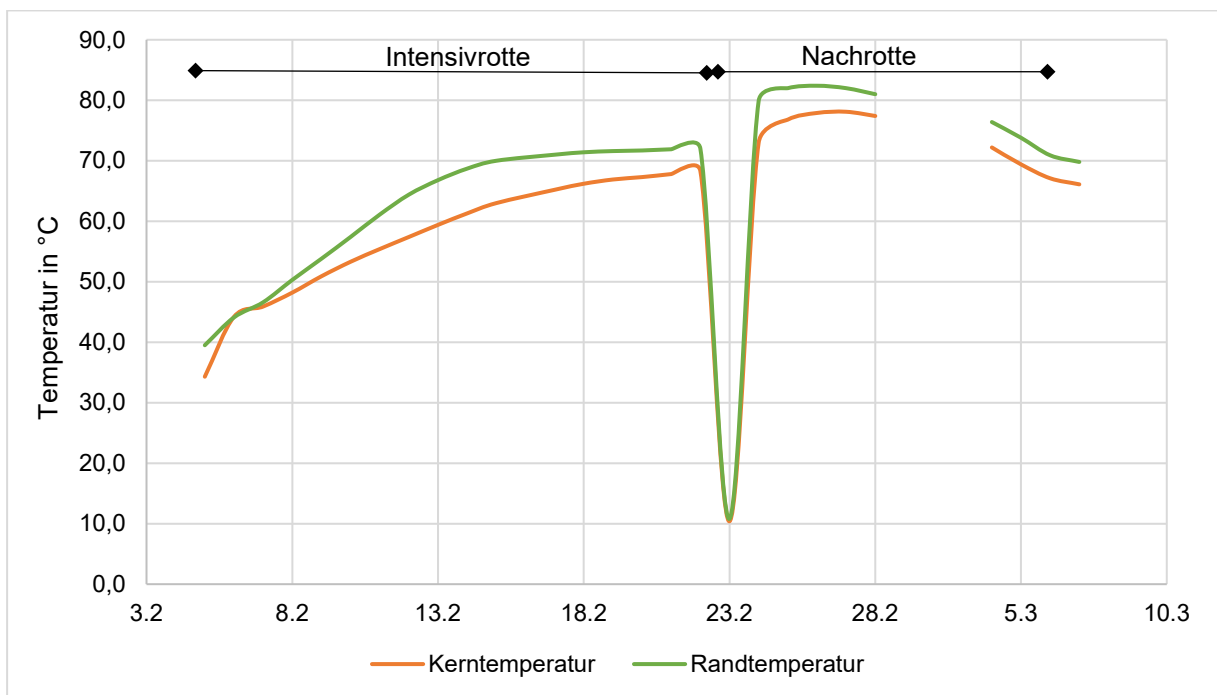


Abbildung 4-34 Zweite Pressversuch Kern- und Randtemperaturen des ungepressten Materials während Intensiv- und Nachrotte

Anhand der Laboranalysen konnte kein bedeutender Unterschied des Fertigkomposts festgestellt werden (siehe Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7 Laboranalysen von Kompost aus ungepresste Bioabfälle und gepresste Bioabfälle

|                                   | Einheit   | ungepresst      |                 | gepresst        |                 |
|-----------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                   |           | 1. Pressversuch | 2. Pressversuch | 1. Pressversuch | 2. Pressversuch |
| <b>Rohdichte (Volumengewicht)</b> | g/L FS    | 510             | 470             | 450             | 380             |
| <b>Trockenrückstand bei 105°C</b> | Gew.-% AZ | 57              | 52,1            | 60              | 57,6            |
| <b>Wassergehalt</b>               | Gew.-% AZ | 43              | 47,9            | 40              | 42,4            |
| <b>Glührückstand (450°C)</b>      | Gew.-% AZ | 38,1            | 32,9            | 37,5            | 33,8            |
| <b>Glühverlust (450°C)</b>        | Gew.-% AZ | 61,9            | 67,1            | 62,5            | 66,2            |
| <b>Fremdstoffe &lt; 1mm</b>       | Gew.-% AZ | 0,12            | 0,08            | 0,17            | 0,17            |
| <b>Selbsterhitzungsfähigkeit</b>  | °C        | 34              | 73              | 72              | 72              |
| <b>Salzgehalt</b>                 | g/L FS    | 9,03            | 8,74            | 8,18            | 6,12            |
| <b>Stickstoff, gesamt</b>         | Gew.-% AZ | 2,02            | 2,27            | 1,99            | 2,37            |
| <b>Ammonium-Stickstoff</b>        | mg/L FS   | 540             | 560             | 640             | 220             |
| <b>Nitrat-Stickstoff</b>          | mg/L FS   | 0,5             | 0,5             | 1,1             | 0,5             |

## 5. Eigenenergiebedarf LFKW und Autarke Energieversorgung der Kläranlage

Nach den Daten des Jahresberichts 2018 (LFKW 2019) wurden 81,099 m<sup>3</sup> Biogas mit einem durchschnittlichen Methangehalt von 66 % produziert. Davon wurden 50,490 m<sup>3</sup> Methan im vorhandenen Blockheizkraftwerk (BHKW) verbrannt. Bei der Verbrennung dieser Methanmenge wurden 176.184 kWh Strom erzeugt. Der Stromverbrauch der Kläranlage, betrug 2018 304.740 kWh (LFKW 2019). Daraus ergibt sich ein Selbstversorgungsgrad von 57,8 % im Jahr 2018. Die durchschnittliche OLR des LFKW lag zwischen 2014 und 2018 bei 1,6 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d).

### 5.1 Berechnung des Methanbedarfs

Der Strom- und Methanbedarf einer Anlage ist nicht stabil. Der Bedarf schwankt sowohl während des Tages als auch während des Jahres. Der durchschnittliche Bedarf ist ein guter Parameter, um zu beurteilen, ob die Selbstversorgung über einen längeren Zeitraum gewährleistet werden kann. An manchen Tagen kann der Bedarf jedoch aufgrund verschiedener Faktoren höher oder niedriger als der durchschnittliche Gasbedarf sein. Um die Selbstversorgung auch an Tagen mit höherem Bedarf zu erreichen, muss die Methanproduktion entsprechend angepasst werden. Um Tage mit höherem Bedarf zu simulieren, wurde der 0,85-Quantilbedarf verwendet.

Für die Berechnung des Methanbedarfs wurden die Werte von 2018 und 2019 verwendet. Um die Energieautarkie für LFKW zu erreichen, werden im Durchschnitt 242,12 m<sup>3</sup> Methan pro Tag benötigt. Um die Ergebnisse aus dem Testreaktor mit dem Bedarf des LFKWs zu

vergleichen, wurde der Methanbedarf heruntergerechnet. Daraus ergeben sich die in Tabelle 5-1 dargestellten Mengen. Der durchschnittliche Tagesbedarf für den Testreaktor beträgt 189 l/d. (Schmidt 2021)

Tabelle 5-1 Durchschnitt, Median, 0,15- und 0,85-Quantil des Energie- und Gasbedarfs von LFKW und Testreaktor

|                               |                                  | 0.15   | Durchschnitt | Median | 0.85    |
|-------------------------------|----------------------------------|--------|--------------|--------|---------|
| <b>LFKW</b>                   | Energiebedarf [kWh/d]            | 728.31 | 844.86       | 825.25 | 1001.95 |
|                               | Methanbedarf [m <sup>3</sup> /d] | 208.71 | 242.12       | 236.49 | 287.13  |
| <b>Halbtechnische Reaktor</b> | Energiebedarf [kWh/d]            | 0.57   | 0.66         | 0.64   | 0.78    |
|                               | Methanbedarf [m <sup>3</sup> /d] | 163.06 | 189.15       | 184.76 | 224.32  |

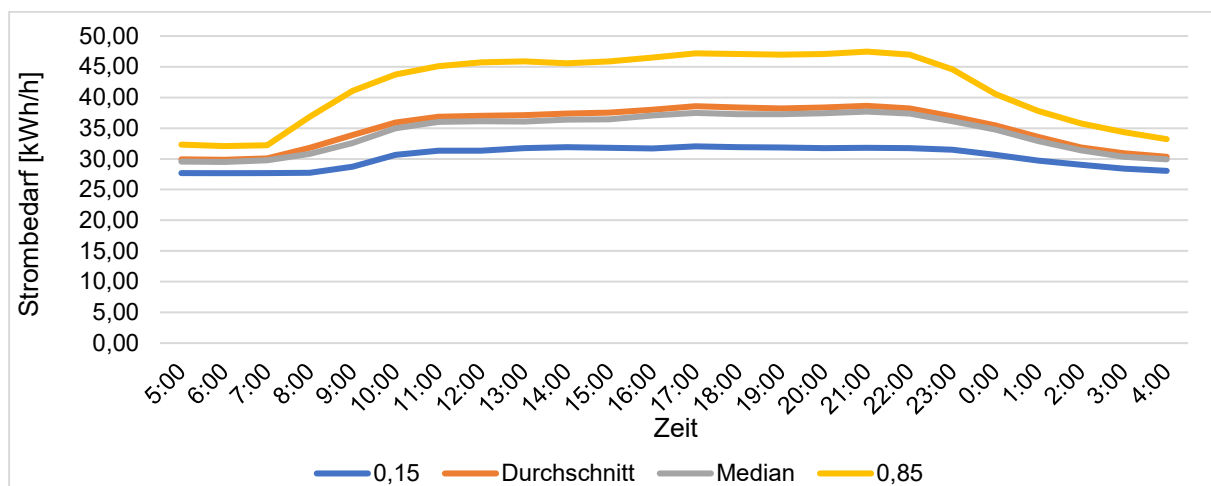


Abbildung 5-1 Gesamtstromverbrauch der Kläranlage LFKW

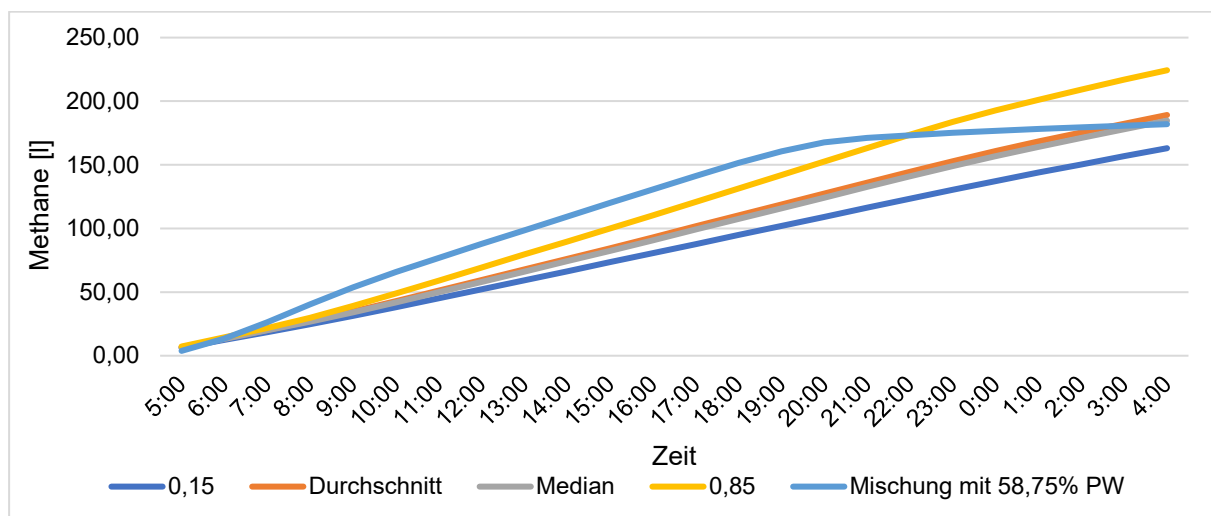


Abbildung 5-2 Kumulierter Methanbedarf des Medians, des Mittelwerts, des 0,15- und 0,85-Quantils über einen Tag und der gemessene tatsächliche Methanproduktion von Mischung mit 58,75% PW.



Abbildung 5-2 zeigt den Median, den Mittelwert, das 0,15- und 0,85-Quantil des Methanbedarfs sowie die Methanproduktion von Mischung mit 58,75% PW. Die Methanausbeute betrug im Durchschnitt 182 Liter pro Tag, was fast dem mittleren Gasbedarf (184 Liter) entspricht. Die Differenz zum durchschnittlichen Gasbedarf betrug 7 Liter. Für das 0,85-Quantil konnte der Methanbedarf in der Zeitspanne zwischen 22.00 und 16.00 Uhr nicht gedeckt werden.

Der durchschnittliche Methanbedarf pro Tag beträgt  $242 \text{ m}^3$ , der mit einer OLR von ca.  $2,57 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  gedeckt werden kann. Für die Berechnungen wurde ein CSB-Gehalt für PS von  $30.500 \text{ mg/l}$ , für voreingedickten SS von  $16.000 \text{ mg/l}$  und für PW von  $70.800 \text{ mg/l}$  angenommen.

Die Methanausbeute von  $242 \text{ m}^3$  kann mit folgendem Gemisch erreicht werden.

Tabelle 5-2 Empfehlungen für die Beschickung des LFKW-Faulturms zur Deckung des durchschnittlichen und des 0,85-Quantils des Methanbedarfs

|   | PS                            | SS    | PW     |
|---|-------------------------------|-------|--------|
|   | <b>Durchschnittsverbrauch</b> |       |        |
| <b>Mixture 1</b>                                    |                               |       |        |
| CSB Beschickung [mg/l]                              | 30500                         | 16000 | 70800  |
| Volume [ $\text{m}^3$ ]                             | 2,56                          | 1,92  | 8,32   |
| OLR [ $\text{kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ] | 2,57                          |       |        |
| <b>Mixture 2</b>                                    |                               |       |        |
| CSB Beschickung [mg/l]                              | 30500                         | 16000 | 100000 |
| Volume [ $\text{m}^3$ ]                             | 4,48                          | 3,2   | 5,12   |
| OLR [ $\text{kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ] | 2,6                           |       |        |
|   | <b>0.85 Quantile</b>          |       |        |
| <b>Mixture 3</b>                                    |                               |       |        |
| CSB Beschickung [mg/l]                              | 30500                         | 16000 | 70800  |
| Volume [ $\text{m}^3$ ]                             | 1,92                          | 0,64  | 10,24  |
| OLR [ $\text{kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ] | 2,95                          |       |        |
| <b>Mixture 4</b>                                    |                               |       |        |
| CSB Beschickung [mg/l]                              | 30500                         | 16000 | 100000 |
| Volume [ $\text{m}^3$ ]                             | 6,4                           | 2,56  | 6,4    |
| OLR [ $\text{kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ] | 3,0                           |       |        |

## 5.2 Empfehlung zur Deckung des durchschnittlichen Methanbedarfs

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass bei einem Gemisch mit 58,75 % PW und einer durchschnittlichen OLR von  $2,48 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$  der Median der Methanproduktion fast erreicht wurde. Der Medianwert ist der Wert, bei dem die Hälfte der Daten über und die Hälfte der Daten unter dem Zentralwert liegt. Das bedeutet, dass mit dieser Beschickung der Energiebedarf der Anlage an mindestens der Hälfte aller Tage im Jahr voll gedeckt werden kann.

In Kapitel 5.1 wurde eine angepasste Mischung entwickelt, die genügend Methan liefern sollte, um den durchschnittlichen Bedarf pro Tag zu decken. Dies würde zu einer 100 %igen Autarkie am Ende des Jahres führen, wenn man Energieproduktion und Energiebedarf der Anlage vergleicht.

Hinsichtlich der Mischungen musste ein Kompromiss für Mischung 1 gefunden werden. Da die geforderte OLR mit 2,57 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) sehr hoch war, konnte sie nur durch die Zugabe des größten Teils der organischen Substanz über den PW erreicht werden, da sowohl die PS- als auch die SS-Belastung in den Annahmen eher niedrig waren. Diese Mischung ist nicht unbedingt eine wünschenswerte Lösung, da der Schlammgehalt mit nur 35 % des gesamten Substratvolumens gering ist. Das Hauptziel einer Kläranlage ist jedoch die Stabilisierung des Schlammes mit AD. Die Behandlung des täglichen Schlammes könnte nachteilig sein, was kein Kompromiss zur Erzeugung von mehr Biogas ist.

Daher wurde eine zweite Empfehlung ausgesprochen, die von einem höheren CSB-Gehalt für PW ausgeht. Dies ist sinnvoll, da, wie bereits erwähnt, der für die Versuche verwendete Klärschlamm bei der Entnahme aus dem Lagertank nicht richtig durchmischt war. Proben des PW aus der Charge sowie aus anderen Chargen wiesen noch höhere CSB-Frachten auf. Unter dieser Annahme wurde ein Gemisch mit 40 % PW entwickelt. Dieses Verhältnis wurde auf der Grundlage der Ergebnisse von Kapitel 4.6 gewählt, da sowohl die durchschnittliche Methanproduktion pro kg CSB als auch die Abbaukinetik sehr gute Ergebnisse für dieses Verhältnis erwarten ließen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der durchschnittliche Methanbedarf der Anlage durch die Verwendung von PW als Co-Substrat gedeckt werden kann. Die OLR wird 2,57 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) betragen, was noch in einem Bereich liegt, in dem Kläranlagen betrieben werden. Es wird nicht davon ausgegangen, dass dadurch die Prozessstabilität beeinträchtigt wird.

Durch die Anwendung der empfohlenen Mischungen und deren Anpassung an die schwankenden CSB-Gehalte der Substrate bieten sie das Potenzial, am Ende des Jahres die vollständige Energieautarkie zu erreichen. Für dieses Szenario werden nur der Gesamtenergiebedarf und die Gesamtenergieproduktion betrachtet, unabhängig davon, ob zwischenzeitlich Energie ins Netz eingespeist oder aus dem Netz bezogen wurde. Für dieses Szenario sind Speichertanks eine wichtige Maßnahme, um überschüssiges Gas zu speichern und so einen höheren Bedarf abzufangen. Um die Autarkie auch für längere Zeiträume mit einer überdurchschnittlichen Nachfrage zu gewährleisten, wäre es sinnvoll, die Gasspeicherkapazität der Anlage weiter auszubauen. Dies ermöglicht die Speicherung von überschüssigem Gas, das in Zeiten mit höherem Bedarf verwendet werden kann. (Schmidt 2021)

### 5.3 Empfehlung zur Deckung des schwankenden Bedarfs

Durch die dynamische Anpassung der Methanproduktion an den schwankenden Energiebedarf kann die Notwendigkeit, große Gasspeicherkapazitäten zu errichten, entfallen. Um dynamisch auf einen höheren Methanbedarf pro Tag zu reagieren, wurden Mischungen entwickelt, die genügend Methan produzieren können, um das 0,85-Quantil zu erreichen. Steigt der Bedarf einer Anlage, kann das Eingangssubstrat angepasst werden, indem die Zusammensetzung der Beschickung in Richtung einer Mischung geändert wird, die höhere Gaserträge liefert. Durch die Durchführung von Simulationen wurde eine Mischung entwickelt, die den Methanbedarf des 0,85-Quantils decken kann. Da die OLR für diese Mischung mit 2,95 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) sogar höher war als für den durchschnittlichen Methanbedarf, mussten die gleichen Kompromisse wie im vorherigen Kapitel eingegangen werden. Auch hier ist

Mischung 4 wünschenswerter als Mischung 3, da das Verhältnis von 1:1 von Schlamm und PW für den Betrieb der Kläranlage besser ist.

Die Ergebnisse aus den Versuchen zeigten jedoch bereits den Beginn der verschlechternden Auswirkungen bei einer OLR von bis zu 2,53 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d). Bei diesen Belastungen waren die Auswirkungen jedoch noch akzeptabel. Es scheint unwahrscheinlich, dass der Prozess bei einer Erhöhung der OLR auf 2,95 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d) stabil bleibt und eine Überlastung zu erwarten ist. Weitere Untersuchungen sind erforderlich, um herauszufinden, bei welcher Belastung eine Überlastung des Reaktors und damit eine Stagnation der Methanproduktion eintritt. Langfristige Experimente mit hohen Belastungen sind notwendig, um mögliche negative Auswirkungen auf den Prozess zu erkennen.

Zusammenfassend zeigen die Simulationen, dass das vorgeschlagene Gemisch den Methanbedarf voraussichtlich decken kann, allerdings ist zu erwarten, dass die Prozessstabilität bei diesem hohen OLR beeinträchtigt wird, was sich auch auf die Methanausbeute negativ auswirkt. Es lohnt sich nicht, dieses Beschickungsschema zu testen, solange keine weiteren Untersuchungen zur maximalen OLR durchgeführt wurden.

Mit dieser Schlussfolgerung ist es nicht möglich, den schwankenden Energiebedarf der Kläranlage zu decken, der über dem durchschnittlichen Energiebedarf liegt. Die Ergebnisse schließen auch die Möglichkeit aus, die Biogaserzeugung flexibel an die Stromnachfrage im Netz anzupassen. Um auf den schwankenden Bedarf der Kläranlage zu reagieren, muss das Fermentervolumen vergrößert werden, um die Methanproduktion zu erhöhen und gleichzeitig im Bereich einer optimalen OLR zu bleiben. Dies kann die Möglichkeit bieten, einen wichtigen Beitrag zur Systemintegration erneuerbarer Energien und zum Ausgleich der schwankenden Energieerzeugung zu leisten. (Schmidt 2021)

#### 5.4 Simulation zur Anpassung der Methanproduktion an Tagesschwankungen

Der Methanbedarf der Anlage schwankt im Laufe des Tages, wobei der Bedarf zwischen 10 und 22 Uhr höher und in der Nacht und am frühen Morgen niedriger ist. Um die Methanproduktion an den schwankenden Bedarf im Tagesverlauf anzupassen, wurde ein Beschickungsschema entwickelt und die erwartete Methanproduktionskurve simuliert.

Die durchgeführte Simulation ergab eine Methanproduktionskurve wie in Abbildung 5-3 dargestellt. Die CSB-Fracht wurde in zwei Frachten aufgeteilt, wobei die erste Einspeisung um 7 Uhr morgens 2/3 der täglichen Eingangsfracht enthielt. Zusätzlich wird nach 8 Stunden um 15 Uhr die zweite Charge mit 1/3 der Einspeisung zugeführt. Die OLR der simulierten Mischung betrug insgesamt 2,5 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d).

Zwischen 8 Uhr morgens und 22 Uhr abends liegt die Produktion über dem Bedarf und erzeugt einen Gasüberschuss. In der Nacht ist die Produktion niedriger als der Bedarf.

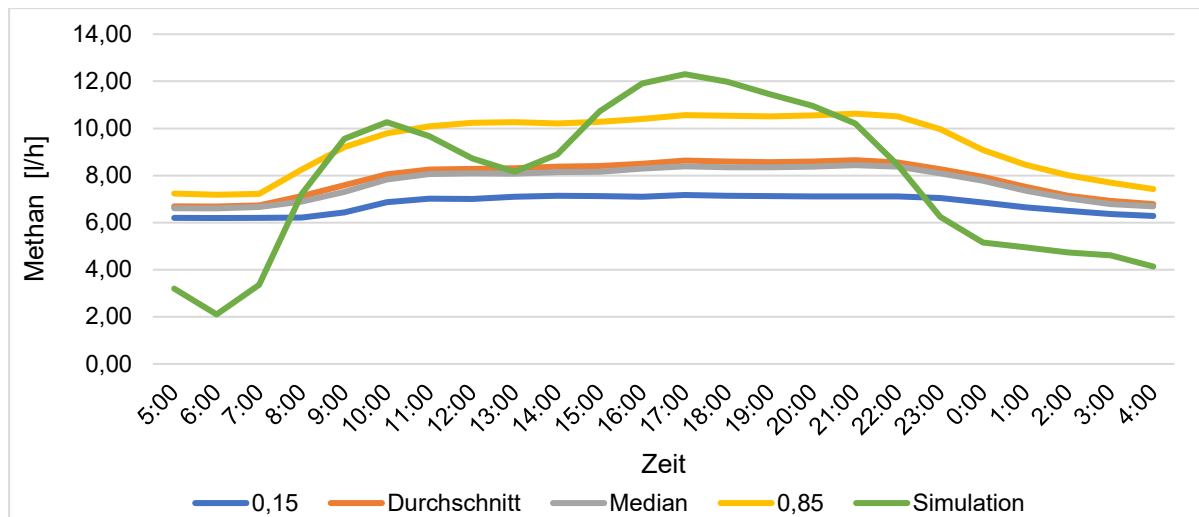


Abbildung 5-3 Simulation der Methanproduktion und Tagesverlauf des Methanbedarfs [m<sup>3</sup>/h] des LFKW zur Energieautarkie

Für diese Berechnungen wird der mittlere Stromverbrauch der Kläranlage des Instituts herangezogen. Der Gesamtstromverbrauch der Kläranlage im Tagesablauf ist der Grafik (Abbildung 5-1) zu entnehmen. Aus diesen Werten wurde ein mittlerer Gesamtwert von 844,86 kWh pro Tag ermittelt. (Schmidt 2021)

### 5.5 Simulation zur Anpassung der Methanproduktion gemäß der aktuellen Klärschlammmenge

Zurzeit werden etwa 55 % des Strombedarfs von Kläranlagen durch mit Faulgas erzeugten Strom gedeckt. Im Idealfall soll genügend Strom aus Schlamm und Presswasser erzeugt werden. Das bedeutet, dass zum einen aus dem Schlamm genug Faulgas erzeugt wird und zum anderen aus dem zugefügten Presswasser genügend Biogas gewonnen wird. Damit kann die Menge des Presswassers berechnet werden, die zugefügt werden muss, um genügend Biogas zu erzeugen. Hieraus wiederum lässt sich die Menge des Bioabfalls berechnen, die abgepresst werden muss, um ausreichend Presswasser zur Verfügung zu stellen, so dass Gesamtstromverbrauch der Kläranlage gedeckt werden kann.

Aus dem Gesamtstromverbrauch der Kläranlage lässt sich eine hierfür notwendige Menge von ca. 360 m<sup>3</sup> Biogas berechnen. Die Biogasmenge, die aus Faulgas in der Kläranlage produziert wird, beträgt ca. 55%, das entspricht einem Tageswert von ca. 200 m<sup>3</sup>. Die Menge an Biogas, die aus Presswasser erzeugt werden sollte, beträgt demnach ca. 160 m<sup>3</sup>, um den Eigenstrombedarf der Kläranlage zu decken. Aus der Aufstellung ist ersichtlich, dass täglich 3,91 m<sup>3</sup> Bioabfall gepresst werden müssten, um 1,77 m<sup>3</sup> Presswasser (mit oTS von 118,1 g/TS) zu erzeugen und somit genügend Biogas zu erzeugen. Alternativ wären 5,96 m<sup>3</sup> Bioabfall notwendig, um 2,69 m<sup>3</sup> Presswasser zu produzieren, falls das oTS des Presswassers nur 71,2 g/kg beträgt.

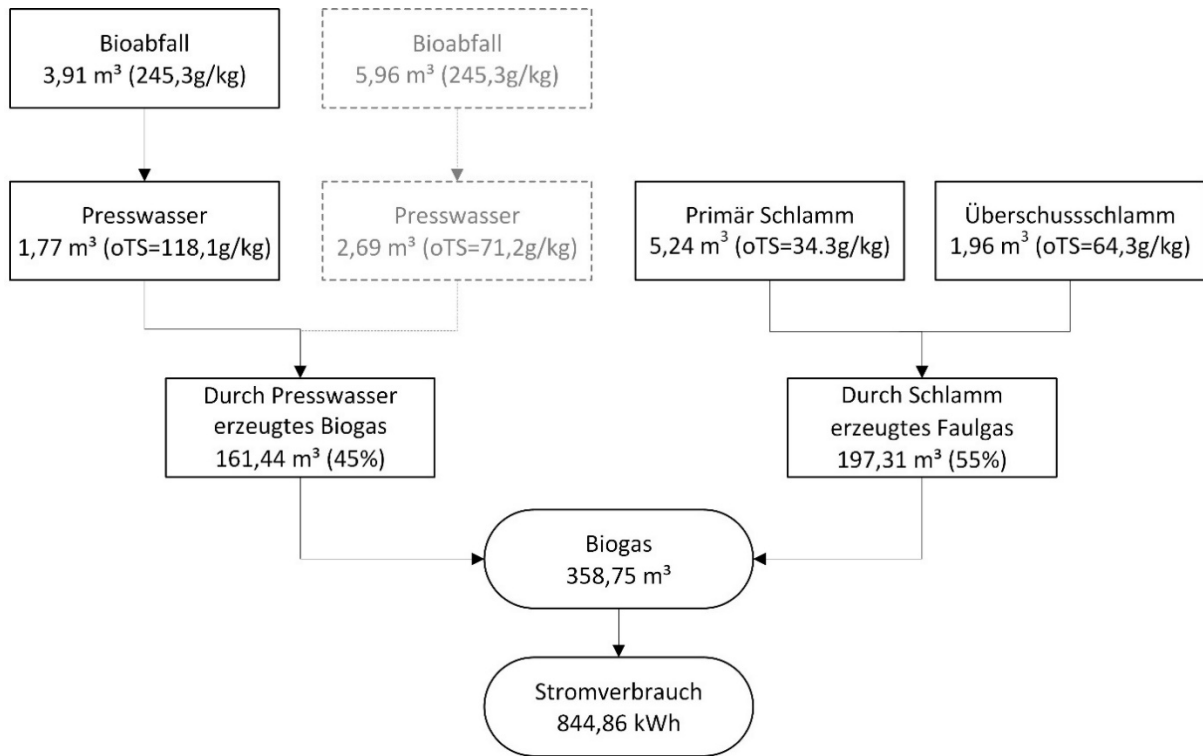


Abbildung 5-4 Fließschema der Zusammensetzung des Biogasgewinns der Kläranlage LFKW

## 6. Bilanzierung

### 6.1 Massenbilanz

Mit der Massenbilanz werden die Massenströme des "SepaFlex"-Konzepts in verschiedenen Szenarien dargestellt und analysiert. Im Szenario A wird das gesamte bei der Kompostierung anfallende Sickerwasser (606 Tonnen pro Jahr) zur Anmischung des Bioabfalls (2.015 Tonnen pro Jahr) verwendet. Die erzeugten 1.417 Tonnen PW wurden zusammen mit dem Klärschlamm in den LFKW-Faulturm zur Vergärung geleitet. Die Biogasproduktion betrug 193.103 m<sup>3</sup> pro Jahr, damit wurden 454,76 MWh Strom und 909,52 MWh Wärme werden durch BHKW erzeugt.

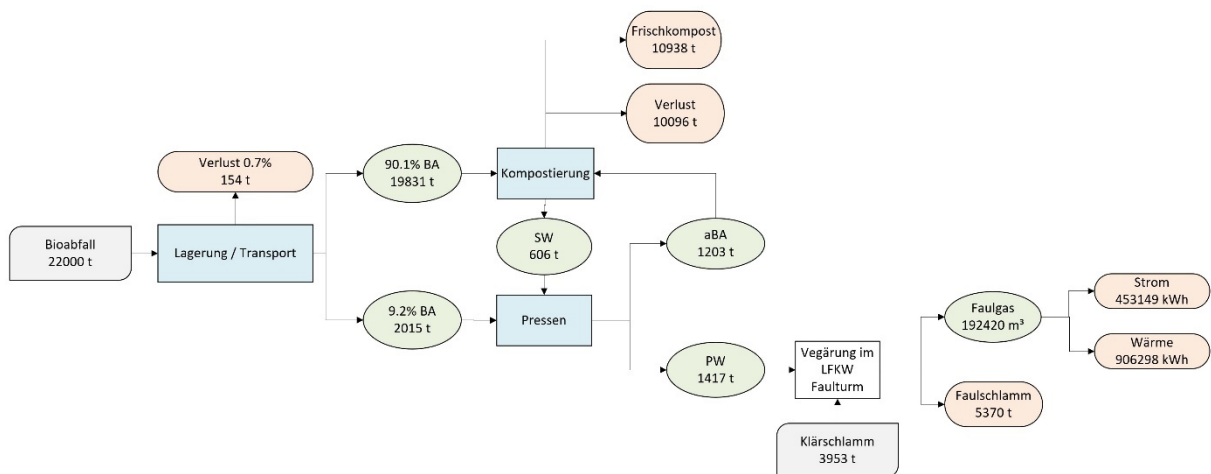


Abbildung 6-1 Massenbilanzierung Szenario A

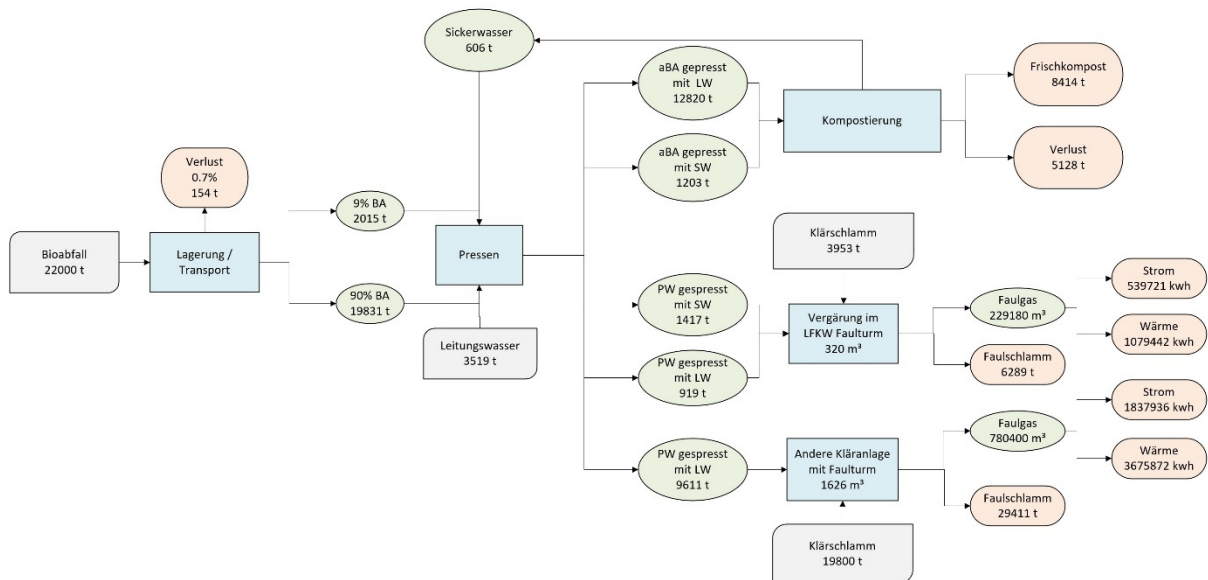


Abbildung 6-2 Massenbilanzierung Szenario B

In der Massenbilanz von Szenario B wird die Verwendung von Leitungswasser zum Anmischen für die Presse berücksichtigt, so dass der gesamte Bioabfall aus der Kompostierungsanlage gepresst werden kann. Auf diese Weise kann das benötigte Faulturm-volumen abgeschätzt werden, wenn das gesamte Presswasser als Co-Substrat in den Faulturm gelangt. Der erzeugte Strom und Wärme würden ebenfalls kalkuliert werden. Aus

den Ergebnissen der Bilanzierung ergibt sich ein zusätzlicher Bedarf von 3.519 t Leitungswasser und ein Faultrum von 2.696 m<sup>3</sup> zusätzlich zu dem 320 m<sup>3</sup> Faultrum des LFKW. Als Energieerzeugnisse werden insgesamt 2.378 MWh Strom und 4.755 MWh Wärme erzeugt. Außerdem gibt es 8414 t Kompost, die auf landwirtschaftlichen Flächen zur Bodenverbesserung eingesetzt werden können.

In der Massenbilanz von Szenario C wird das zu pressende Inputmaterial auf 10.000 t festgelegt und das Sickerwasser aus dem aeroben Kompostierungsprozess und das Leitungswasser als Bewässerungswasser verwendet. Neben den 153 t anfallenden Sickerwässern werden rechnerisch zusätzlich 2.279 t Leitungswasser benötigt, während beim Pressvorgang 6.579 t Presswasser gewonnen werden können. Das Gesamtvolumen des Faultrums, der für die Co-Fermentation dieses Presswassers und des Schlammes erforderlich ist, beträgt 900 Kubikmeter. Während des Co-Fermentationsprozesses können 11.120 t Klärschlamm vergoren werden. Dafür können 1.143 MWh Strom und 2.287 MWh Wärme sowie 2.903 t organischer Dünger erzeugt werden.

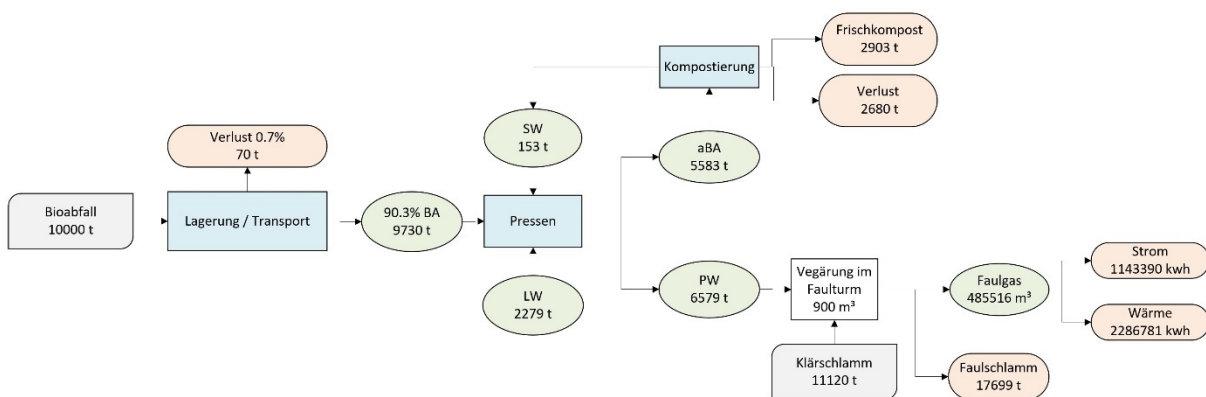


Abbildung 6-3 Massenbilanzierung Szenario C

## 6.2 Energiebilanz

Ein Vergleich der flexibel aus dem PW bereitgestellten Nutzenergie (Strom, Wärme) mit dem Energiebedarf der einzelnen Teilprozesse ermöglicht eine Bewertung der Energieeffizienz des Verfahrenskonzepts. In der Energiebilanz wurden die eintretenden und austretenden Energieströme aller Teilprozesse des Verfahrenskonzepts dargestellt und ein Gesamtwirkungsgrad des Konzepts erarbeitet.

Hier wurden 2 Energiebilanzen berechnet, wobei die erste Energiebilanz das gesamte SepaFlex-Konzept betrachtet, die zweite Energiebilanz lediglich die vom Presswasser benötigte und erzeugte Energie betrachtet.

Die Energiebilanz des SepaFlex-Verfahrens berücksichtigt die Co-Vergärung des Presswassers und des Klärschlammes. Die Berechnungsgrundlage basiert auf der Pressung von 1 Tonne Bioabfall. Der Energieverbrauch umfasst den Energieaufwand für die Presse sowie den Energieverbrauch des Transports des Presswassers von Kompostwerk bis zu der Kläranlage, in Höhe von 11,2 kWh und 1,3 kWh. Der Energiebedarf für die Co-Vergärung von Presswasser und Klärschlamm beträgt 28,91 kWh und setzt sich aus drei Teilen zusammen: Erwärmung, Rühren und Dosierung. Darüber hinaus hat das BHKW auch einen gewissen Eigenenergieverbrauch von 11,47 kWh sowie einen Energiebedarf von 1,17 kWh für die Schlammmentwässerung. Ein weiterer großer Energieverbraucher ist der Kompostierungsprozess mit 25,11 kWh. Der Energieverbrauch für das gesamte Konzept beträgt 79,16 kWh.

Bei der erzeugten Energie handelt es sich um die elektrische und thermische Energie, die durch die Co-Fermentation des Klärschlammes und des Presswassers entsteht. Die gesamte erzeugte Energiemenge beträgt 343,02 kWh. Das gesamte Konzept ist daher unter energetischen Aspekten sehr vorteilhaft.

Detaillierte Daten zum Energiebilanz sind in der Tabelle 6-1 zusammengefasst.

Tabelle 6-1 Energiebilanz SepaFlex Konzept

| Energieverbraucher |                   |          |         |                   |
|--------------------|-------------------|----------|---------|-------------------|
| Prozess            | Input oder Output | Material | Einheit | Value/t Bioabfall |
| Press              | Input             | Energie  | kWh     | 11,2              |
| Transport          | Input             | Energie  | kWh     | 1,3               |
| Fermentation       | Input             | Energie  | kWh     | 28,91             |
| BHKW               | Input             | Energie  | kWh     | 11,47             |
| Schlammwässerung   | Input             | Energie  | kWh     | 1,17              |
| Kompostierung      | Input             | Energie  | kWh     | 25,11             |
| Summe              |                   |          |         | 79,16             |

| Energie Erzeugung |                   |          |      |                   |
|-------------------|-------------------|----------|------|-------------------|
| Prozess           | Input oder Output | Material | Unit | Value/t Bioabfall |
| BHKW              | Output            | Strom    | kWh  | 114,34            |
| BHKW              | Output            | Wärme    | kWh  | 228,68            |
| Summe             |                   |          |      | 343,02            |

Tabelle 6-2 Energiebilanz Presswasser

| Energieverbraucher |                   |          |         |               |
|--------------------|-------------------|----------|---------|---------------|
| Prozess            | Input oder Output | Material | Einheit | Value/t Input |
| Press              | Input             | Energie  | kWh     | 11,2          |
| Transport          | Input             | Energie  | kWh     | 1,3           |
| Fermentation       | Input             | Energie  | kWh     | 19,74         |
| BHKW               | Input             | Energie  | kWh     | 4,277         |
| Schlammwässerung   | Input             | Energie  | kWh     | 0,4343        |
| Kompostierung      | Input             | Energie  | kWh     | 25,11         |
| Summe              |                   |          |         | 62,0613       |

| Energie Erzeugung |                   |          |         |               |
|-------------------|-------------------|----------|---------|---------------|
| Prozess           | Input oder Output | Material | Einheit | Value/t Input |
| BHKW              | Output            | Strom    | kWh     | 56,723        |
| BHKW              | Output            | Wärme    | kWh     | 113,445       |
| Summe             |                   |          |         | 170,168       |

In der zweiten Energiebilanz wird nur das Presswasser einbezogen, einschließlich des Pressvorgangs und der anaeroben Vergärung des Presswassers, des Kompostierungsprozesses der abgepresste Bioabfälle und Schlammwässerung. Die im BHKW erzeugte Wärme und Elektrizität stammt ebenfalls ausschließlich aus dem Presswasser. Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass bei der Pressung von 1 Tonne Bioabfall, der anaeroben Vergärung des Presswassers und der Kompostierung der



abgepresste Bioabfälle insgesamt 62,06 kWh Energie benötigt werden und 170,17 kWh Energie gewonnen werden kann, was ein sehr vorteilhafter Prozess ist (siehe Tabelle 6-2). Wie in Abbildung 6-4 dargestellt, ist der Energieverbrauch beim Kompostieren mit 40 % des Gesamtenergieverbrauchs am höchsten. Danach folgt die anaerobe Vergärung mit 32% und dem Pressen, die 18% ausmacht.

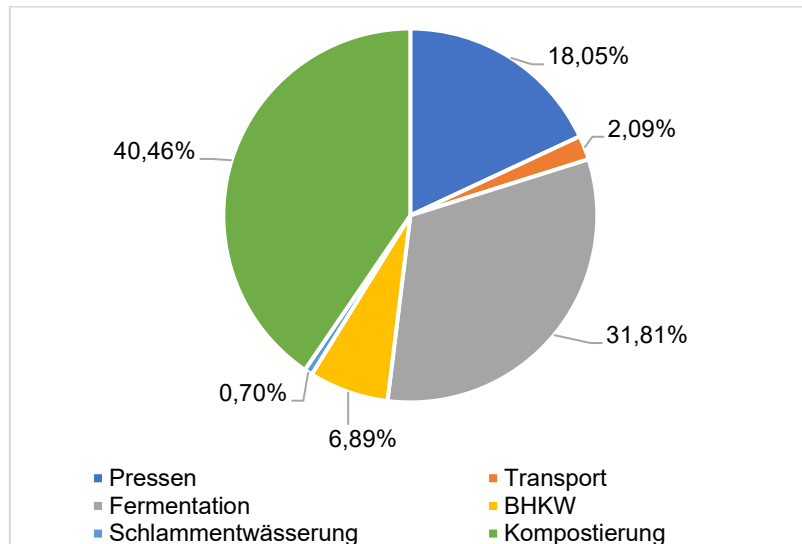


Abbildung 6-4 Prozentualer Anteil des Energieverbrauchs von Presswasser

### 6.3 Ökologische Bilanzierung / LCA

Das SepaFlex-Konzept wurde unter Anwendung der Lebenszyklusanalyse (LCA) untersucht und im Vergleich zu konventionellem Energieträger und Düngermittel bewertet. Hier wurde die Ökologische Bilanzierung mit der Software SimaPro7 unter Verwendung der Methode Eco-Indicator 99 (E) V2.06/Europa EI 99E/E erstellt.

Eco-Indicator 99 ist eine Methode zur schadensorientierten Wirkungsabschätzung der Umwelteinflüsse eines Produkts während seines gesamten Lebenszyklus. Eco-Indicator 99 liefert als Ergebnisse eine Punktzahl in Form eines zusammengesetzten Indikators (Eco-indicator score). Je niedriger die Punktzahl ist, desto umweltfreundlicher ist das Produkt oder das System. Eco-Indicator 99 erfüllt die Anforderungen der ISO- 14042-Standards.

Der Eco-Indikator 99 drückt das Europa betreffenden Umweltauswirkungen aus. Es wird in folgende Schadenkategorien untergliedert.

- Schadenkategorie Humangesundheit

Hier werden die Auswirkungen auf die Gesundheit heutiger und zukünftiger Generationen betrachtet. Es gibt viele Krankheiten, die zum Beispiel durch Strahlung oder Luftverschmutzung verursacht werden. Hier wird Indikatoren wie Karzinogen, Respiratorische organische Stoffe, Respiratorische anorganische Stoffe, Klimaveränderung, Strahlung und Ozonschicht betrachtet werden.

- Schadenkategorie Ökosystemqualität

Als Indikator für die Ökosystemqualität wird die Artenvielfalt herangezogen. Hierbei wird der Prozentsatz an Arten die vom Aussterben bedroht sind oder bereits ausgestorben sind in einer bestimmten Region und Zeitraum ermittelt. Es wird unterschieden in Ökotoxizität, Versauerung, Eutrophierung und Flächenverbrauch.

- Schadenskategorie Ressourcenvorrat

Hier liegt der Schwerpunkt auf Bodenschätzen und fossiler Energie, da andere Ressourcen bereits in die Schadenskategorie der Ökosystemqualität eingeschlossen sind. Da angenommen wird, dass hochwertige Ressourcen vorrangig gewonnen werden, wird davon ausgegangen, dass ihre Qualität mit der Zeit abnimmt und der Energieaufwand für den Abbau steigt.

### 6.3.1 Systemgrenze

Der gesamte SepaFlex-Konzept besteht aus sechs Schritten: Pressen, Transport, Co-fermentation, BHKW, Kompostierung und Schlammwässerung. Jeder Prozessschritt erfordert den Eintrag von Energie und Materie. Das Ausgangsprodukt des gesamten Systems ist in Form von Energie und Kompost, aber auch entwässertem Schlamm und Wasser. Innerhalb des Systems befindet sich der Durchfluss von Presswasser und Sickerwasser, sowie die Produktion von Faulschlamm und Biogas, die jedoch weiter verwertet wird.

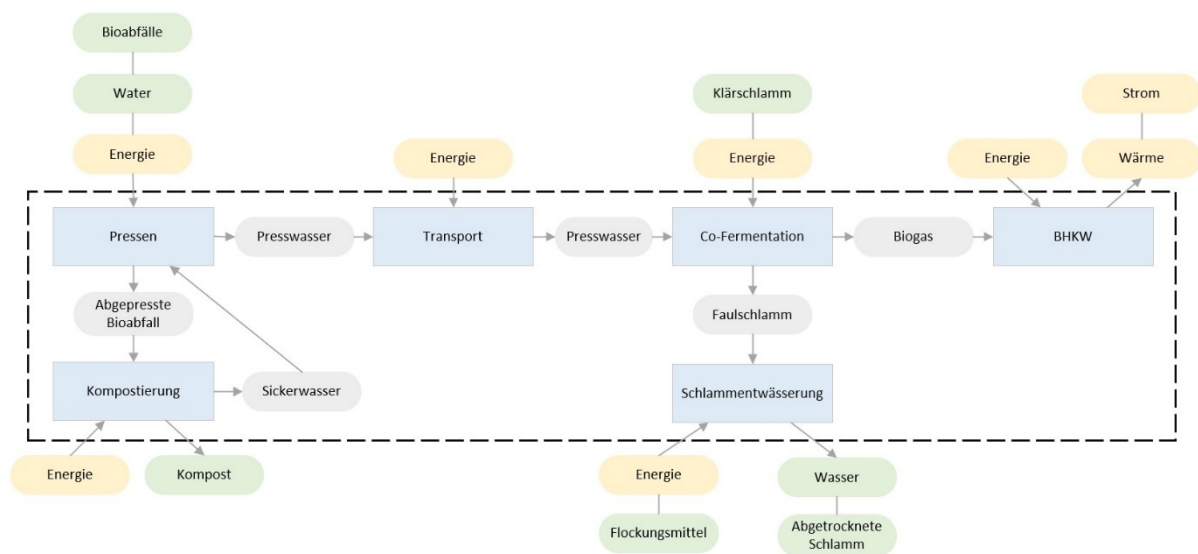


Abbildung 6-5 Systemgrenze LCA

### 6.3.2 Datenliste

Es wurde eine detaillierte Analyse der Inputs und des Outputs von Energie und Material für jeden Prozess in der Systemgrenze durchgeführt, wie in der Tabelle 6-3 dargestellt, wobei der Ökobilanz auf der Grundlage von 1 Tonne Bioabfall erfolgte.

Tabelle 6-3 Datenliste LCA

| <b>Prozess</b>          | <b>Input &amp; Output</b> | <b>Material &amp; Energie</b> | <b>Unit</b>    | <b>Value/t Input</b> |
|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|----------------------|
| <b>Press</b>            | Input                     | Bioabfall                     | t              | 1                    |
|                         | Input                     | Energie                       | kWh            | 11,2                 |
|                         | Input                     | Sickerwasser                  | t              | 0,0153               |
|                         | Input                     | Frischwasser                  | t              | 0,228                |
|                         | Output                    | Presswasser                   | t              | 0,658                |
|                         | Output                    | Abgepresste Bioabfall         | t              | 0,558                |
| <b>Transport</b>        | Input                     | Energy                        | kWh            | 1,3                  |
| <b>Fermentation</b>     | Input                     | Presswasser                   | t              | 0,658                |
|                         | Input                     | Klärschlamm                   | t              | 1,112                |
|                         | Input                     | Energie                       | kWh            | 28,91                |
|                         | Output                    | Biogas                        | m <sup>3</sup> | 48,5516              |
|                         | Output                    | Gärrest                       | t              | 1,77                 |
| <b>BHKW</b>             | Input                     | Biogas                        | m <sup>3</sup> | 48,5516              |
|                         | Input                     | Energy                        | kWh            | 11,47                |
|                         | Output                    | Strom                         | kWh            | 114,339              |
|                         | Output                    | Wärme                         | kWh            | 228,678              |
| <b>Schlammwässerung</b> | Input                     | Gärrest                       | t              | 1,77                 |
|                         | Input                     | Energie                       | kWh            | 1,168                |
|                         | Input                     | Flockungshilfsmitteln         | g              | 5,31                 |
|                         | Output                    | Trocknende Schlamm            | t              | 0,542                |
|                         | Output                    | Wasser                        | t              | 1,228                |
| <b>Kompostierung</b>    | Input                     | Abgepresste Bioabfall         | t              | 0,558                |
|                         | Input                     | Energie                       | kWh            | 25,11                |
|                         | Output                    | Kompost                       | t              | 0,29                 |
|                         | Output                    | Sickerwasser                  | t              | 0,0153               |

### 6.3.3 Ergebnisse

Die Ökobilanz des SepaFlex-konzepts wurde anhand der Datenliste untersucht. Das nachstehende Diagramm stellt die Ökobilanzergebnisse der einzelnen Prozesse im Rahmen des Gesamtkonzepts dar, wobei der Prozess der Kompostierung, der am meisten zu den Umweltauswirkungen beiträgt, die höchsten Werte erzielt. Es folgt die Entstehung von Sickerwasser, das trotz seiner geringen Menge einen erheblichen Beitrag zur Umweltbelastung leistet. Auch bei der Schlammwässerung und der BHKW-Umwandlung entsteht eine gewisse Umweltbelastung.

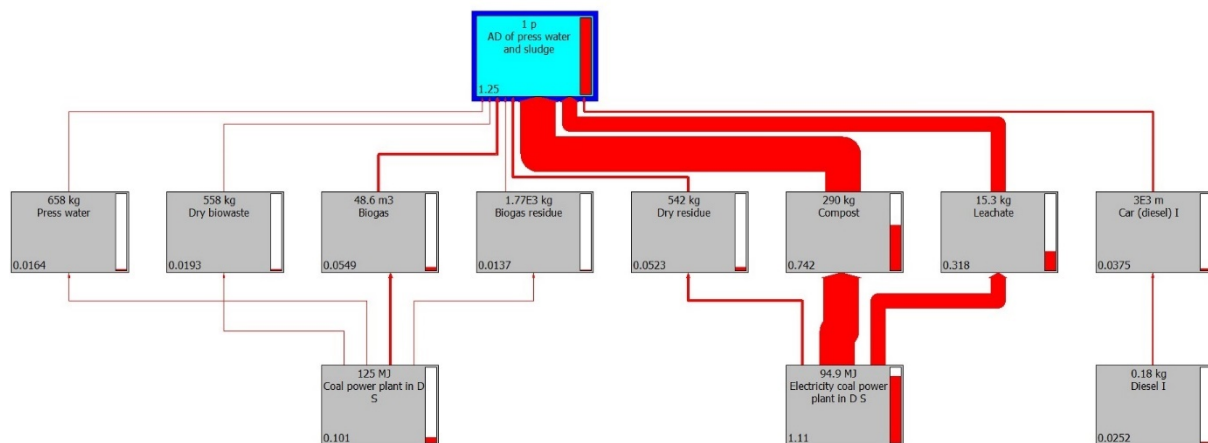


Abbildung 6-6 LCA Schema SepaFlex-Konzept

Das Sepaflex-Verfahren erzeugt 48,55 m<sup>3</sup> Biogas, das zur Erzeugung von Strom und Wärme durch BHKW genutzt wird. Dies entspricht einer Einsparung von 48,55 m<sup>3</sup> Erdgas. Es wurde ein Vergleich der Ökobilanz zwischen dem Erdgasproduktionsprozess und SepaFlex Konzept durchgeführt, um die geringeren Umweltauswirkungen des Ersatzes konventioneller Energiequellen durch die Produktion von Biogas durch SepaFlex zu analysieren.

Außerdem produziert der gesamte Prozess 0,29 Tonnen Kompost, der als Düngemittel in der Landwirtschaft verwendet werden kann, wodurch 0,29 Tonnen Düngemittel eingespart werden. Daher wurde die Ökobilanz des SepaFlex-Konzepts mit der Ökobilanz des Düngemittelprozesses von 0,29 Tonnen verglichen.

Daraus ergibt sich, dass das Ergebnis der ökologischen Bilanzierung für den SepaFlex-Konzept 1,25 pt (Eco-indicator score) beträgt, während das Ergebnis der Ökobilanz für die Erzeugung des entsprechenden Erdgases 5,96 pt beträgt, also 4,4-mal höher ist. Im Gegensatz dazu liegt das Ergebnis der Ökobilanz für konventionelle Düngemittel bei 15,3 pt. Der Gesamtwert der beiden alternativen Energiequellen beträgt 21,26 pt, was 17 Mal höher ist als der des Sepaflex-Konzept (siehe Abbildung 6-7). Hierdurch wird nachgewiesen, dass der Sepaflex-Konzept wesentlich geringere Auswirkungen auf die Umwelt und die Menschen hat als eine entsprechende Menge an Primärenergie und konventionelle Düngemittel.

Beim Vergleich der einzelnen Indikatoren wird der Prozess mit der größten ökologischen Auswirkung auf 100 % gesetzt, so dass der prozentuale Anteil der Auswirkungen der beiden anderen Prozesse ersichtlich wird. Auf den Indikator Ozonschicht hat das SepaFlex-Verfahren die größte ökologische Auswirkung, die beiden anderen liegen bei 62 % und 83 %. Auch beim Indikator Strahlung hat SepaFlex-Konzept den höchste Eco-indicator score, wobei traditionelle Düngemittel keinen Einfluss haben. Die ökologische Bewertung von Sepaflex-Konzept hat in vielerlei Hinsicht einen sehr niedrigen Eco-indicator score von 5 bis 40 % des Scores der konventionellen Düngerproduktion, einschließlich der Indikatoren Karzinogen, Respiratorische anorganische Stoffe, Klimaveränderung, Ökotoxizität, Versauerung, Eutrophierung und fossile Energie. Der Erdgasprozess hat höchste Eco-indicator score für die Indikatoren Respiratorische organische Stoffe und Bodenschätzen, nämlich eine hohe Belastung. Für den Indikator Bodenschätze ist ebenfalls einen hohe Eco-indicator score für SepaFlex-Konzept zu verzeichnen, wobei es sich um den fast gleichen Score wie für Erdgas handelt (siehe Abbildung 6-8).

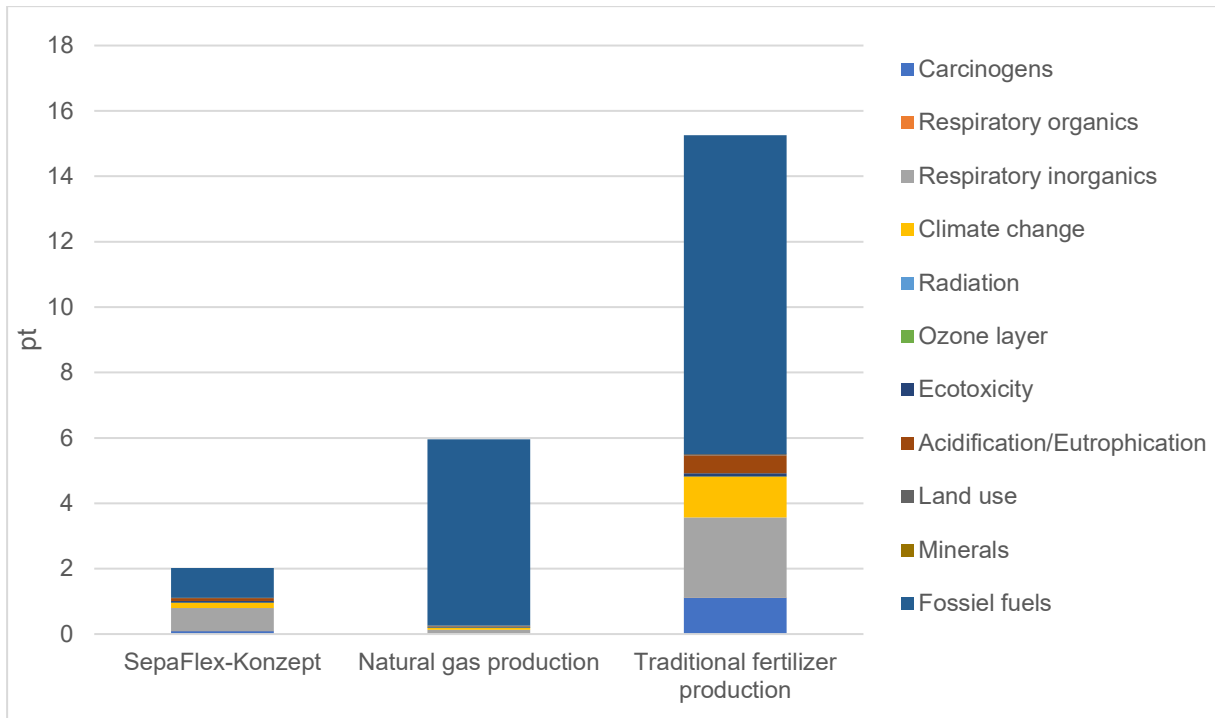


Abbildung 6-7 Vergleich des gesamten Eco-indicator score des SepaFlex-Konzepts, Erdgas und Düngemittel

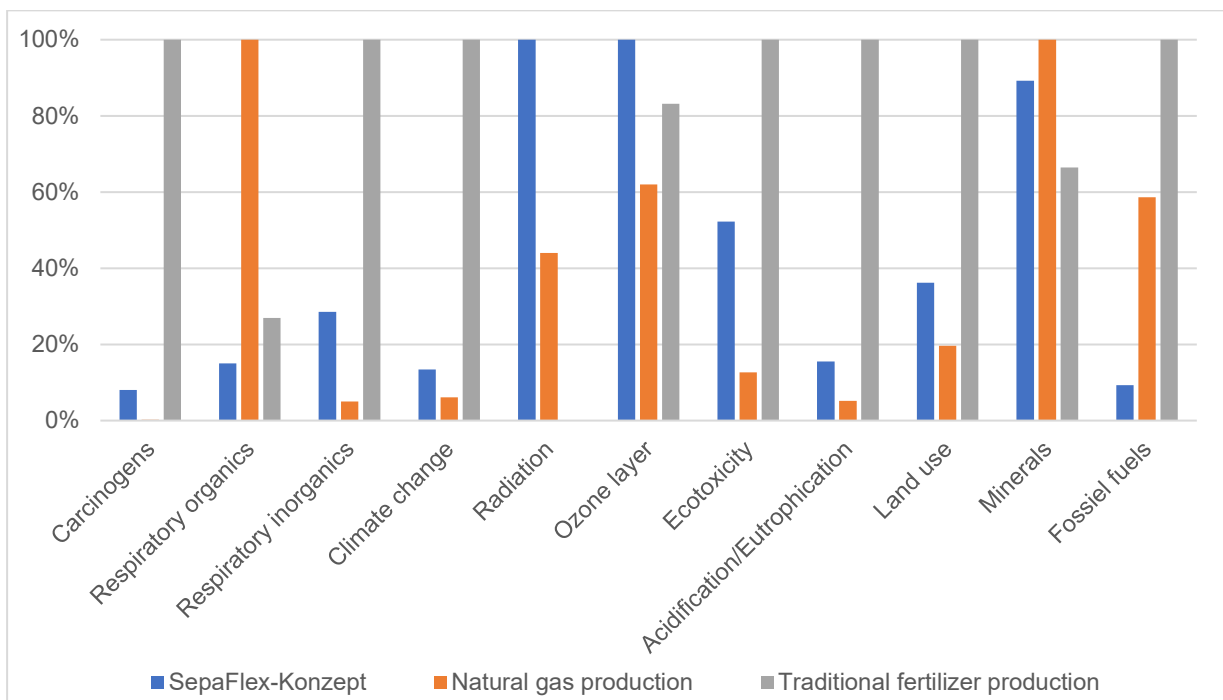


Abbildung 6-8 Vergleich der Eco-indicator score für die einzelnen Indikatoren von Sepaflex-Konzept, Erdgas und Düngemittel

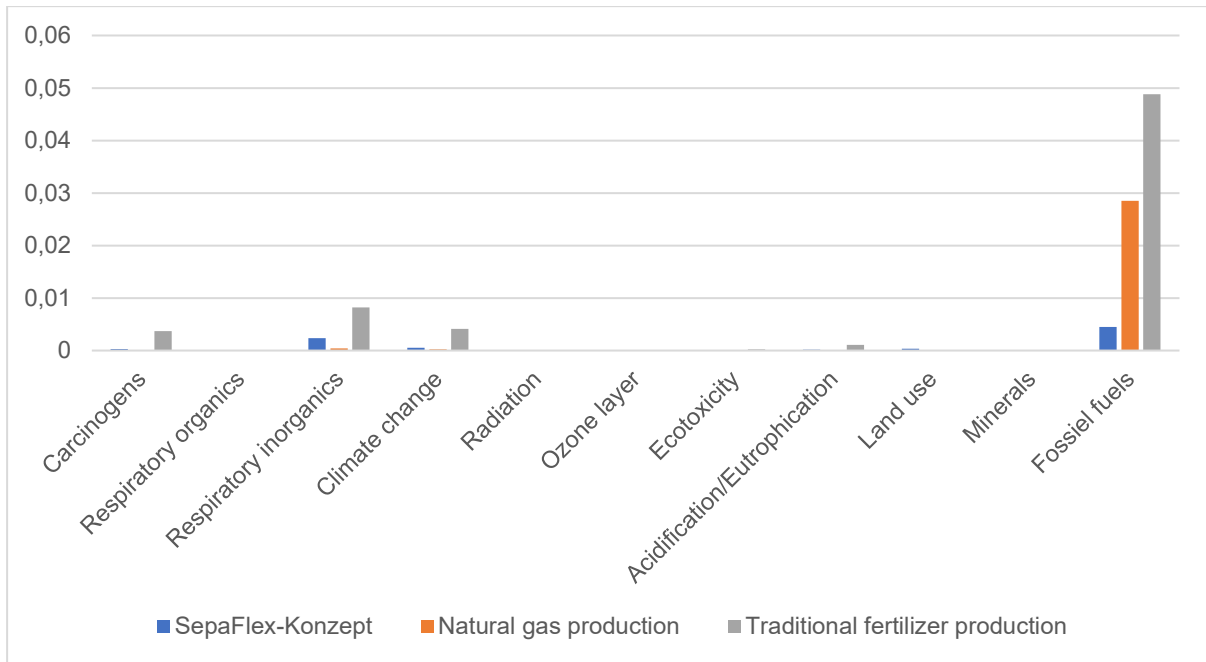


Abbildung 6-9 Normalisierung der Eco-indicator score für die einzelnen Indikatoren

Nach der Normalisierung der Eco-indicator score für jeden Indikator können die absoluten Werte eingesehen und verglichen werden (siehe Abbildung 6-9). Alle drei Prozesse haben die größte Belastung für fossile Energie gebracht im Vergleich zu anderen Indikatoren, wobei die konventionellen Düngemittel am schlechtesten sind. Es folgt die Belastung bei Respiratorische anorganische Stoffe und die Klimaänderung, die auch durch das SepaFlex-Konzept belastet werden. SepaFlex-Konzept hat fast keine Belastung auf die anderen 8 Indikatoren.

## 7. Kosten-Nutzung-Analyse

Die Kosten-Nutzen-Analyse (KNA) dient zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit von Projekten und wird vor der Umsetzung eingesetzt. Sie wird als Grundlage für Entscheidungen eingesetzt. Im Gegensatz zu Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit, welche als Ergebnis den erzielbaren Gewinn haben, dient die KNA zum Vergleich der Kosten der Handlung mit dem wirtschaftlich bewerteten Nutzen. Als Bewertungsmaßstab dient das „*Verhältnis von Nutzen zu Kosten und die Differenz zwischen Nutzen und Kosten*“ (Angermeier 2005a). Ob ein positives Ergebnis der KNA vorliegt, entscheidet ob die durchgeführte Maßnahme den dafür aufgebrauchten Kosten gerecht wird (Angermeier 2005b).

Das Ergebnis der KNA kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Zum einen durch den Vergleich verschiedener durchgeführter Maßnahmen oder zum anderen durch den Vergleich des Ergebnisses mit und ohne die durchgeführte Maßnahme (Horisberger and van Eimeren 2013). Letzteres, also der Vergleich der Ist- Situation mit der der durchgeführten Maßnahme wird Teil dieses Projekts sein.

Ob eine Maßnahme als vorteilhaft gilt wird anhand des Nettonutzens bestimmt, dieses ist "*die Differenz zwischen dem bewerteten Nutzen und den bewerteten Kosten einer Investition*". Bei der KNA werden bei der Durchführung lediglich die Folgen aufgelistet, die als monetär zu betrachten sind (Homann 2005).

### 7.1 Systemgrenze

Als zeitlicher Rahmen für die Betrachtung wird ein Tag angenommen. Als Tag wird hierbei bei Maschinen oder Vorgängen, die rund um die Uhr laufen 24 Stunden verstanden. Bei personellen Handlungen oder der Laufzeit der Presse wird wiederum von einem Arbeitstag von 8 Stunden ausgegangen.

Die unterschiedlichen Faktoren, die bei der Aufstellung der Kosten bzw. Nutzen eine Rolle spielen sind in Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 dargestellt.

Der Prozess bezieht die Sammlung des Bioabfalls, die komplette Kompostierungsanlage, der Transport von der Kompostierungsanlage zur Kläranlage, sowie die komplette Kläranlage mit Blockheizkraftwerk mit ein. Hierbei spielen auch die Personalkosten der Sammlung, der Kompostierungs- als auch der Kläranlage eine Rolle. (Waggershauser 2021)

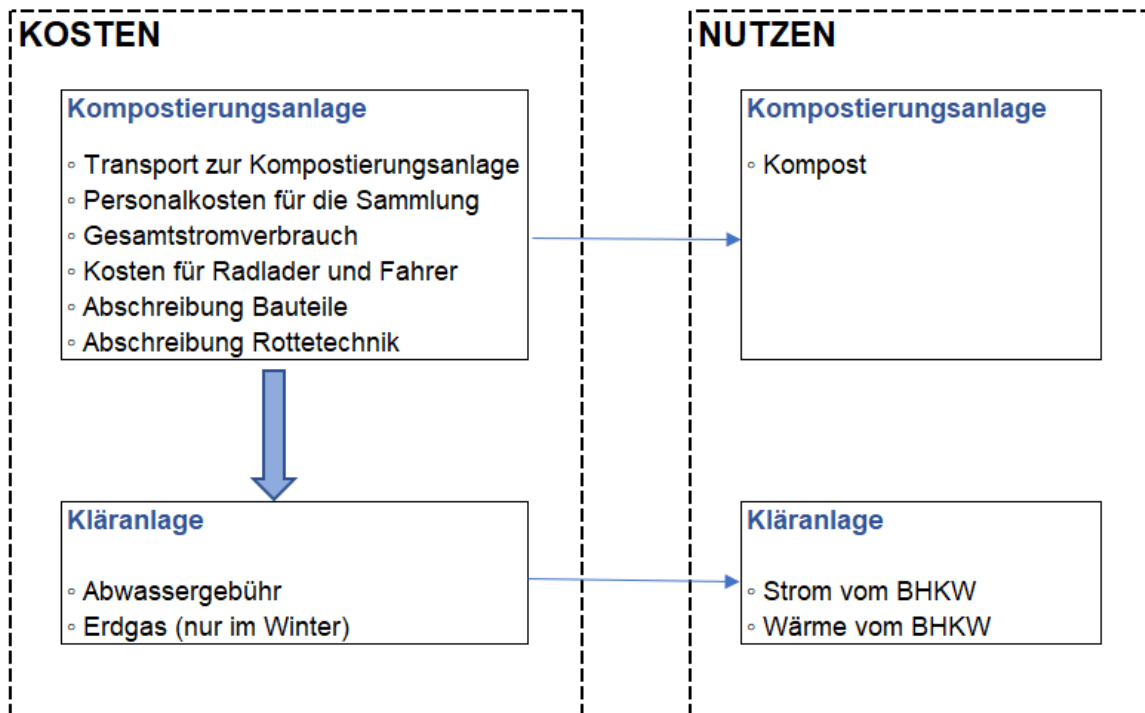


Abbildung 7-1 Faktoren der Kosten-Nutzen-Analyse bei konventionellem Vorgehen ohne Presswasser

Die Faktoren, die bei der Betrachtung mit Presswasser gegenüber dem konventionellen Vorgehen zusätzlich dazu kommen sind rot unterlegt.

Zusätzlich zu den Kosten der konventionellen Methode kommen folgende Aspekte hinzu, die zusätzliche Kosten des Presswassers verursachen:

- Kosten Presse
- Kosten für den Dieselmotorkraftstoff für die Presse
- Gesamtleistung der Presse
- Transport von der Kompostierungsanlage zur Kläranlage
- Wärme Presswasser
- Pumpe Presswasser

Der zusätzliche Nutzen, den das Presswasser einbringt sind zusätzliche Wärme und Strom, die erzeugt werden.



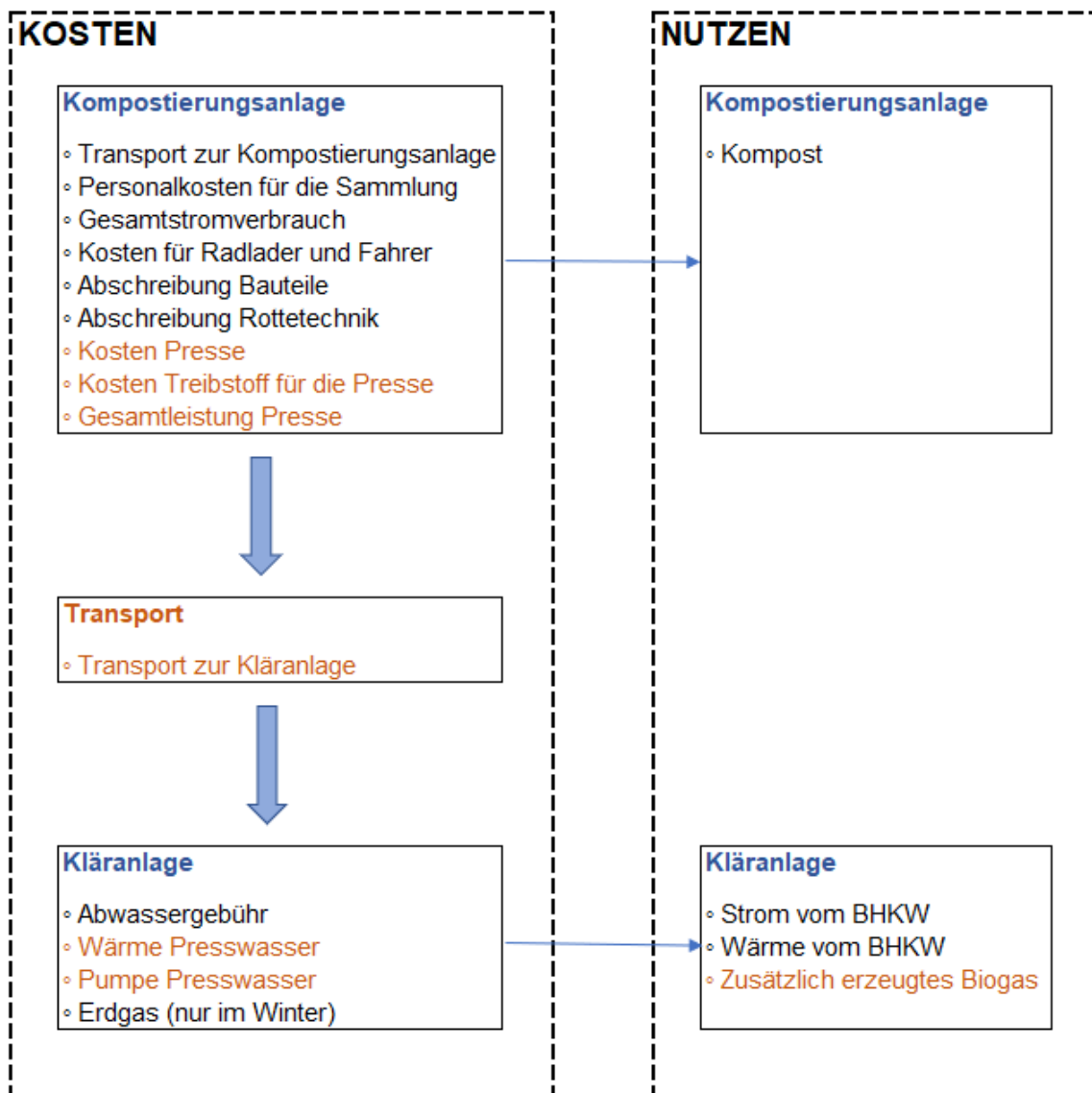


Abbildung 7-2 Faktoren der Kosten-Nutzen-Analyse bei der Co-Fermentation von Presswasser

## 7.2 Ergebnisse der Kosten-Nutzung-Analyse

Eine Übersicht der Werte ist in den Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 dargestellt, wobei Tabelle 7-1 die Werte für den Fall ohne Presswasser zeigt, Tabelle 7-2 für den Fall mit Presswasser.

Tabelle 7-1 Kosten und Nutzen des konventionellen Konzepts pro Tag ohne Presswasser

| KOSTEN  | €/ Pro Tag        |
|---|-------------------|
| Kompostierungsanlage Transport für Abfallsammlung   | 380,10 €          |
| Kompostierungsanlage Personalkosten                 | 1.792,83 €        |
| Kompostierungsanlage Gesamtstromverbrauch           | 88,00 €           |
| Kompostierungsanlage Abschreibung Bauteile          | 219,18 €          |
| Kompostierungsanlage Abschreibung Rottetechnik      | 397,26 €          |
| Kompostierungsanlage Kosten Behandlung Sickerwasser | 7,65 €            |
| Kläranlage Abwassergebühr                           | 3.550,87 €        |
| <b>Summe KOSTEN</b>                                 | <b>6.427,27 €</b> |
|   |                   |
| NUTZEN  | €/ Pro Tag        |
| Kompost   | 110,27 €          |
| Strom vom BHKW                                      | 168,96 €          |
| Wärme vom BHKW                                      | 161,28 €          |
| <b>Summe NUTZEN</b>                                 | <b>440,51 €</b>   |

Tabelle 7-2 Kosten und Nutzen des SepaFlex-Konzepts pro Tag mit Presswasser

| KOSTEN  | €/ Pro Tag        |
|---|-------------------|
| Kompostierungsanlage Transport für Abfallsammlung             | 380,10 €          |
| Kompostierungsanlage Personalkosten (Sammlung)                | 1.792,83 €        |
| Kompostierungsanlage Gesamtstromverbrauch                     | 88,00 €           |
| Kompostierungsanlage Abschreibung Bauteile                    | 219,18 €          |
| Kompostierungsanlage Abschreibung Rottetechnik                | 397,26 €          |
| Kompostierungsanlage Kosten für Radlader und Fahrer           | 521,52 €          |
| Kompostierungsanlage Kosten Presse                            | 2.016,67 €        |
| Kompostierungsanlage Kosten Treibstoff                        | 109,41 €          |
| Kompostierungsanlage Transport zur Kläranlage                 | 750,00 €          |
| Kläranlage Abwassergebühr                                     | 3.550,87 €        |
| Kläranlage Vergärung Presswasser (Wärme, Dosierung, Rührwerk) | 9,22 €            |
| Kläranlage Eigeneenergiekosten BHKW Presswasser               | 3,67 €            |
| Kläranlage Schlammwässerung Presswasser                       | 0,37 €            |
| <b>Summe KOSTEN</b>   | <b>9.838,14 €</b> |
| <b>Summe KOSTEN Presswasser</b>                               | <b>3.410,87 €</b> |
|   |                   |
| NUTZEN  | €/ Pro Tag        |
| Kompost   | 110,27 €          |
| Strom vom BHKW  | 168,96 €          |
| Wärme vom BHKW  | 161,28 €          |
| Zusätzlich erzeugter Strom                                    | 83,45 €           |
| Zusätzlich erzeugte Wärme                                     | 79,65 €           |
| <b>Summe NUTZEN</b>   | <b>603,61 €</b>   |
| <b>Summe NUTZEN Presswasser</b>                               | <b>163,10 €</b>   |

Die Gesamtkosten für die Kompostierungsanlage und die Kläranlage beliefen sich vor dem Einsatz von Sepaflex-Konzept auf 6.427 € pro Tag und die Gesamtnutzen auf 441 € pro Tag.

Im Rahmen des Sepaflex-Projekts stiegen die Kosten für die Kompostierungsanlage und Kläranlage auf 9.838 € pro Tag. Diese Erhöhungen betrafen vor allem die Miete der Pressgeräte und den Transport des Presswassers. Auch die Kosten für die Abwasseranlage erhöhen sich durch den zusätzlichen Energieverbrauch für das Presswasser, einschließlich der für den anaeroben Vergärungsprozess erforderlichen Erwärmung, Dosierung und Umwälzung, sowie durch den Eigenenergiebedarf des BHKW und den Energiebedarf für die Schlammwässerung. Durch die Zugabe von Presswasser hat sich die Biogasproduktion erhöht, ebenso wie die tägliche Produktion von Strom und Wärme, deren Gesamtwert nun 603 Euro pro Tag beträgt.

Die Verwendung von Presswasser im sepaFlex-Projekt verursacht zusätzliche Kosten von 3.411 Euro pro Tag im Vergleich zum traditionellen Modell. Darüber hinaus bringt es eine Erhöhung der Einnahmen um 163 Euro pro Tag, wie in Tabelle 7-2 blau markiert.

Obwohl jeweils als zeitlicher Rahmen ein Tag (24 Stunden) bzw. ein Arbeitstag (8 Stunden) festgelegt wurde, lassen sich keine Gesamtkosten beziehungsweise Gesamtnutzen aufstellen. Das liegt daran, dass in der Kompostierungsanlage pro Tag 31,0 m<sup>3</sup> Presswasser produziert werden, während in der Kläranlage pro Tag im Idealfall 5,4 m<sup>3</sup> zugeführt werden.

Daraus lässt sich schließen, dass in der Kompostierungsanlage pro Tag mehr Presswasser produziert wird, als in der Kläranlage genutzt werden kann. Das bedeutet, dass die Kosten oder der Nutzen unterschiedlicher Behandlungsvolumen in Kläranlagen und Kompostieranlagen nicht verglichen werden können. Um einen Vergleich herstellen zu können, werden die Kosten und der Nutzen pro Kubikmeter Presswasser ermittelt und verglichen.

Werden die anfallenden Kosten mit dem Wissen der täglichen Presswassermenge auf einen Kubikmeter Presswasser projiziert, ergibt sich ein Gesamtpreis von 112,07 €. Der zusätzliche Nutzen, den das Presswasser einbringt sind zusätzliche Wärme und Strom, die erzeugt werden. Pro Kubikmeter Presswasser werden 30,32 Euro zusätzlich Nutzen eingebracht. Eine deutliche Diskrepanz zwischen den zusätzlichen Kosten und dem zusätzlichen Nutzen ist erkennbar.

Wie aus dem untenstehenden Abbildung 7-3 hervorgeht, werden 58 % der Kosten für die Miete von Pressgeräten eingesetzt. Die Mietkosten für die Presse ist ein Pauschalbetrag. Dieser umfasst den Transport zur Kompostierungsanlage, die Maschinenmiete, den Bediener, sowie der Rücktransport. Ein weiterer kostenintensiver Teil ist der Transport (22%), da der Standort der Bioabfallpresse im Rahmen des SepaFlex-Projekts sich in großer Entfernung von der Kläranlage befindet und die Transportkosten daher ziemlich hoch sind. Weitere Ausgaben wie Treibstoff für die Pressgeräte, Personalkosten und zusätzliche Energiekosten für die anaerobe Vergärung des Presswassers in der Kläranlage betragen 3%, 15% bzw. 2%. Folglich können sowohl die Gerätekosten als auch die Transportwege optimiert werden, um Kosteneinsparungen zu erzielen.

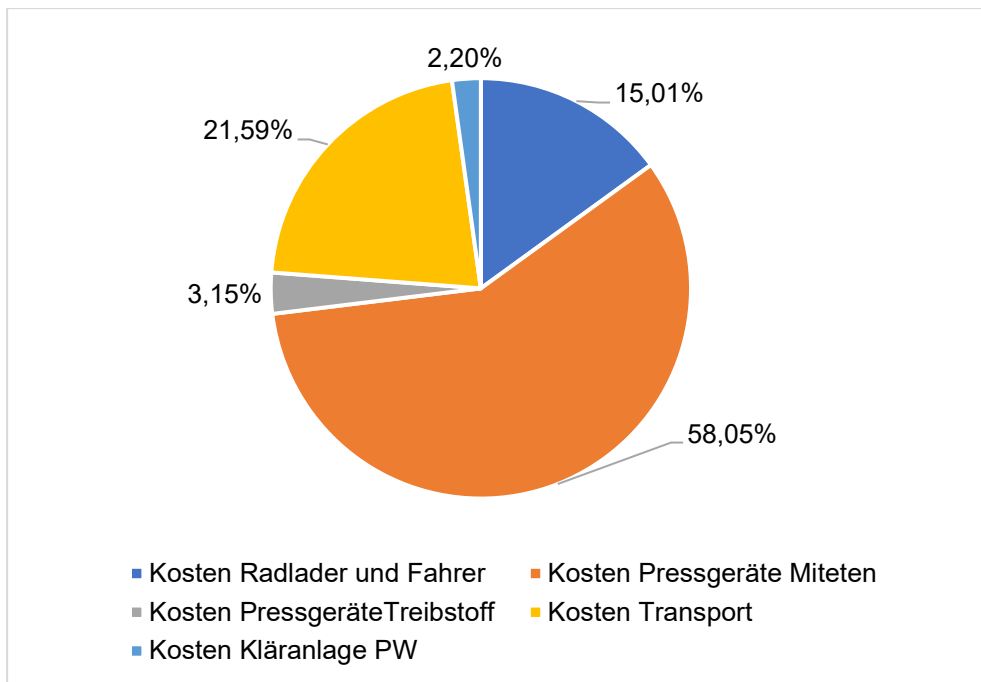


Abbildung 7-3 Prozentanteil der von Presswasser verursachten Kosten

Zusätzlich wird zudem jedoch auch die Behandlung des Sickerwassers eingespart. Für die Herstellung von einem Kubikmeter Presswasser wird 0,63 m<sup>3</sup> Sickerwasser benötigt. Das bedeutet, dass durch diese Nutzung das Sickerwasser nicht mehr separat behandelt werden muss, sondern als Presswasser bei dem Faulturm beigemischt wird. Neben den Nutzen, die aus dem Verfahren zusätzlich gewonnen werden können, gibt es weitere positive Auswirkungen des Verfahrens.

Eine Einsparung der Kosten ergibt sich aus der Nutzung vorhandener Kapazitäten bezüglich der Vergärung in Faultürmen der Kläranlagen. Das bedeutet, dass keine neuen Vergärungsanlagen gebaut werden müssen, um der Abfallhierarchie gerecht zu werden und alle getrennt gesammelten Bioabfälle zu verwerten. Die freien Vergärungskapazitäten in Faultürmen der Kläranlagen ergeben sich laut der Hessischen Umweltverwaltung „*als Folge des Strukturwandels in Industrie und Gewerbe, des Bevölkerungsrückgangs und von Planungsreserven aus der Vergangenheit.*“ (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie 2009)

Als Motivation zählen für dieses Vorhaben neben wirtschaftlichen Vorteilen, auch das Umgehen von Genehmigungsverfahren, die sich in die Länge ziehen können, sowie eine Ablehnungshaltung der Bevölkerung gegenüber neuer Vergärungsanlagen. Somit wäre eine schnellere Durchsetzung der Verwertung von getrennt gesammelten Bioabfällen möglich.

### 7.3 Optimierungsmöglichkeiten

Das Verfahren enthält jedoch einige Möglichkeiten zur Optimierung.

Für den weiteren Verlauf wären verschiedene Optimierungen vorteilhaft, um die zusätzlichen Kosten, die bei der Pressung entstehen zu minimieren. Momentan wird mittels einer gemieteten Schneckenpresse gepresst. Die täglichen Mietpreise mit 2.016,67 € pro Tag relativ hoch. Bei Beschluss des dauerhaften Durchführens der Pressung wäre ein Kauf von Vorteil, um die Kosten an dieser Stelle auf Dauer zu senken.

Mobile Pressen können in gebrauchtem Zustand für 170.000 € gekauft werden. Stationäre Pressen kosten je nach Ausstattung zwischen 231.530 € (nur Pressaggregat mit Körben) und

415.570 € (Presse mit Körben, Trichter, Trichterhöhung, Filtratpumpe, Retentat-austragsband, Fernbedienung und Profibusanbindung). Die Kapazität der Pressen wurde mit 10-12 t/h und einem Maximum von 20 t/h bestimmt.

Auch die Distanz der Kompostierungsanlage und der Kläranlage stellen eine Option dar die Kosten zu minimieren. Die Entfernung zwischen der Kompostierungsanlage und der Kläranlage betragen derzeit knapp 92 km. Bei der Wahl einer näheren Kompostierungsanlage können die Transportkosten gesenkt werden.

Bei Anschaffung der Pressmaschine und einer Betriebslaufzeit von 20 Jahren können die Kosten bei 27 € pro Tonne Presswassers gehalten werden, wenn die Transportentfernung weniger als 20 km beträgt. Verglichen mit einem Ertrag von 30 Euro pro Kubikmeter sind diese Kosten niedriger als der Ertrag, was aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist.

Weitere Option der Einsparung ist die Verwendung des Sickerwassers der Kompostierungsanlage vor Ort. Dies kann durch die Verwendung des Sickerwassers zur Befeuchtung des Bioabfalls geschehen. Dadurch würden keine zusätzlichen Kosten der Behandlung des Sickerwassers entstehen.

Allerdings steht durch diesen Einsatz des Sickerwassers dieses nicht mehr als Befeuchtung beim Pressvorgang zur Verfügung. Das bedeutet, dass entweder Frischwasser zur Befeuchtung beim Pressen verwendet werden müsste oder der Pressvorgang nicht mehr durchführbar wäre und es auch kein Presswasser zum Zuführen in den Faulturm der Kläranlage geben würde. Das Zuführen von Frischwasser, wäre allerdings wenig wirtschaftlich und auch unter Umweltaspekt kritisch zu bewerten.

## 8. Systemseitige Bewertung

### 8.1 Methode

Im AP 5 soll die Rolle des SepaFlex-Konzepts im Vergleich zu anderen Bioenergieanlagen-Konzepten und im Gesamtenergiesystem analysiert und bewertet werden. Dafür werden die Daten aus der technischen Bewertung und der Kosten-Nutzen-Analyse in ein Elektrizitätsmarktmodell eingepflegt und im Rahmen von Szenario-Analysen untersucht. Es wird das Modell E2M2-Bio genutzt, das speziell am IER für die Bewertung von „Bioenergieanlagen im Energiesystem“ entwickelt wurde. Diese Modellversion bietet dabei einen höheren Detailgrad der Biogas- und anderer Bioenergieanlagen (siehe Übersicht in Tabelle 8-1). Dabei spielt die Betrachtung der Flexibilität eine besondere Rolle.

Tabelle 8-1 Modellübersicht E2M2-Bio

| <b>E2M2</b>   |  |  |
|---|--|--|
| Input   | Modell   | Output   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einsatzplanung</li> <li>• Einspeisung fEE</li> <li>• Existierender Kraftwerkspark</li> <li>• Techn. + ökon. Parameter</li> <li>• Investitionen</li> <li>• Kraftwerke (konv. + EE)</li> <li>• Flexibilitätsoptionen</li> <li>• Rahmenbedingungen</li> <li>• Elektrizitäts-/Wärmenachfrage</li> <li>• Politische Zielsetzungen</li> <li>• Biomasse</li> <li>• Technologien, Potentiale</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lineare Programmierung (LP/MIP)</li> <li>• Zielfunktion</li> <li>• Restriktionen (Lastdeckung, CO<sub>2</sub>-Cap, Leistungsbilanz, Anteil EE)</li> <li>• Mehrstufig mehrperiodischer Modellansatz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kraftwerkspark</li> <li>• Dispatch/Einsatz (MIP)</li> <li>• Erzeugung</li> <li>• Systemkosten</li> <li>• Strompreise</li> <li>• Marktwert</li> <li>• Nutzung Bioenergie</li> <li>• Erschließung Wärmeregionen</li> <li>• Integrations-Kosten</li> <li>• Marktwert EE</li> </ul> |
| <b>Modellversion E2M2-Bio</b>   |  |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Investitionsentscheidung als Lineare Programmierung (LP) für Kraftwerke, erneuerbare Energien, Speicher, Net Transfer Capacity (NTC), weitere Flexibilitätsoptionen, und simultane Optimierung der Einsatzplanung (Linear Programming (LP)/Mixed Integer Programming (MIP))</li> <li>• Detailliert abgebildete Technologieoptionen zur Nutzung von Bioenergie</li> <li>• Erweiterungen zur modellendogenen Analyse der Sektorenkopplung Strom-Wärme</li> <li>• Myopische Optimierung auf jährlicher Basis mit stündlicher Auflösung</li> </ul> |  |  |

Mit Blick auf die Erarbeitung der Szenarien wurde von Seiten des IER die Vorbereitung für die benötigten Daten der Modellierung angefangen, hierzu wurden zwei Abstimmungstreffen organisiert, um die Modellierungsschnittstellen intern zu diskutieren und den Datenaustausch zu planen. Im 5. Projekttreffen wurde die geplante Vorgehensweise des IERs den Partnern vorgestellt und zusammen abgestimmt. Folgende Hauptschritte sind geplant:

- a. Gemeinsame Festlegung von techno-ökonomischen Daten/Parametern zur SepaFlex Konzept
- b. Erstellung des Szenariorahmens für die Energie- und klimapolitische Ziele

- c. Nachfrageseitige Rahmenbedingungen
- d. Angebotsseitige Rahmenbedingungen
- e. Modellanpassung und Erweiterung
- f. Szenario-Rechnungen

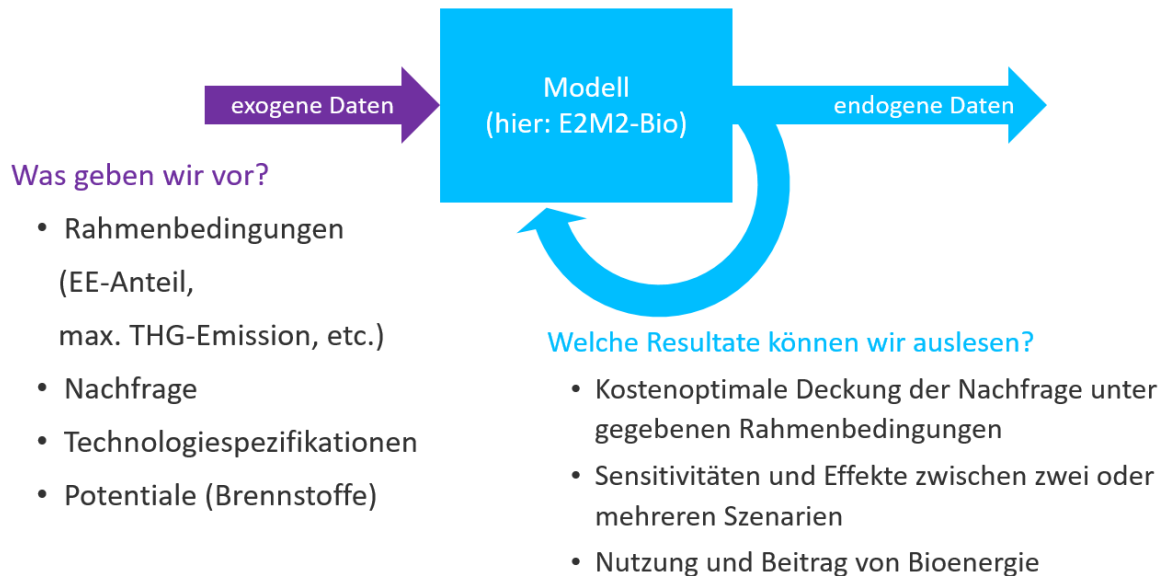


Abbildung 8-1 Vorgehensweise und Szenariobildung

Für diese systemseitige Bewertung wurden in der Berichtsperiode weitere technisch-ökonomische Kenndaten erhoben.

**A) Hierzu gehörten als zentrales Element des Konzeptes die Kosten für die Bioabfall-Pressung:**

1. Mobile Pressen können in gebrauchtem Zustand für 170.000 € gekauft werden. Basis ist eine Presse mit Baujahr 2012 und ca. 1.600 Betriebsstunden.
2. Stationäre Pressen kosten je nach Ausstattung zwischen 231.530 € (nur Pressaggregat mit Körben) und 415.570 € (Presse mit Körben, Trichter, Trichterhöhung, Filtratpumpe, Retentataustragsband, Fernbedienung und Profibusanbindung).
3. Die Kapazität der Pressen wurde mit 10-12 t/h und einem Maximum von 20 t/h bestimmt.

**B) Weiter wurden die Anzahl und Dimensionierung von kommunalen Kläranlagen für Baden-Württemberg erfasst**

Das Land BW hat kürzlich den Lagebericht 2021 zu kommunalen Abwasseranlagen herausgegeben (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2021). Berichtsstand dort ist der 31.12. 2020 (alle aktuellen Werte aus dieser Studie). Danach sind:

1. 99% der Bewohner an eine kommunale Abwasserbehandlungsanlage angeschlossen. Nur ca. 66.000 Einwohner hatten keinen Anschluss.
2. werden in BW 894 Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von 20,8 Mio. EW-Werten betrieben. Hieraus werden die Abwässer der 11,1 Mio. Einwohner zuzüglich 9,7 Mio. EW-Vergleichswerte für Gewerbe- und Industrieabwässer gereinigt.

3. Mit 4% der Anlagen werden große Abwassermengen > 100.000 EW-Werte gereinigt. Dies entspricht einem Drittel des anfallenden Abwassers.
4. Mit 303 Anlagen werden Ausbaugrößen zwischen 10.000 und 100.000 EW-Werte betrieben. Mit einem Drittel der Anlagen werden also ca. 89% der Abwässer gereinigt.
5. Weitere 553 kleine Anlagen decken den Bereich unter 10.000 EW-Werten ab.
6. 330 Anlagen betreiben eine (einfache) Belebungsanlage, insbesondere ein Großteil der größeren Anlagen, weitere 444 Anlagen (vorwiegend die kleineren Anlagen) haben hierzu eine Schlammstabilisation installiert
7. 92 Anlagen haben eine biologische Behandlung für Siedlungsabfälle, davon sind 66 Anlagen Kompostierungsanlage für Bio- und Grünabfälle

Der Frachtabbau der Kläranlagen in BW ist in Tabelle 8-2 dargestellt (CSB, N<sub>ges</sub> und P<sub>ges</sub>) (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft 2021).

Tabelle 8-2 Frachtabbau der Kläranlagen in BW

| Größenklasse                 | CSB              |                  |              | N <sub>ges</sub> |                  |              | P <sub>ges</sub> |                  |              |
|------------------------------|------------------|------------------|--------------|------------------|------------------|--------------|------------------|------------------|--------------|
|                              | Zulauf<br>[kg/d] | Ablauf<br>[kg/d] | Abbau<br>[%] | Zulauf<br>[kg/d] | Ablauf<br>[kg/d] | Abbau<br>[%] | Zulauf<br>[kg/d] | Ablauf<br>[kg/d] | Abbau<br>[%] |
| ≤ 2.000                      | 21               | 1,2              | 94           | 2,7              | 0,7              | 74           | 0,3              | 0,1              | 71           |
| > 2.000 – 10.000             | 157              | 6,9              | 96           | 17               | 3,1              | 81           | 2,2              | 0,3              | 87           |
| > 10.000 – 100.000           | 821              | 37               | 95           | 78               | 18               | 77           | 11               | 0,7              | 94           |
| > 100.000                    | 745              | 28               | 96           | 63               | 14               | 79           | 10               | 0,4              | 96           |
| <b>Alle Anlagen</b>          | 1744             | 73               | 96           | 161              | 36               | 78           | 23               | 1,4              | 94           |
| <b>Anlagen EW &gt; 2.000</b> | 1723             | 72               | 96           | 158              | 35               | 78           | 23               | 1,3              | 94           |

In Bezug auf den Energiebedarf bzw. die Energiegewinnung in Kläranlagen kann festgestellt werden:

1. Als große Stromverbraucher liegt ihr Anteil am Strombedarf der Kommunen bei mehr als 20%
2. Größere Anlagen haben häufiger auch Maßnahmen zur Wärme- und Stromerzeugung auf der Anlage umgesetzt. Der anteilige Stromverbrauch ist niedriger als bei kleinen Anlagen.
3. Der spezifische Stromverbrauch ist bei allen Anlagentypen 2020 weiter angestiegen. Er liegt bei kleinen Anlagen (< 2.000 EW-Werten) mit 100 kWh/E um das Doppelte über dem Wert von großen Anlagen > 100.000 mit ca. 38 kWh/E.
4. Die Stromerzeugung macht jedoch nur ca. die Hälfte des Gesamtstromverbrauches der Anlagen aus. Dieser Anteil liegt bei kleinen Anlagen noch wesentlich niedriger. Die Kläranlagen benötigen also ihr Potenzial zur Stromerzeugung fast ausschließlich für den Eigenbetrieb.



In BW fielen in 2020 ca. 231.400 t TS Klärschlamm an, der zu 99,3% energetisch verwertet wurde, in vier Zementwerken, zwei Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen und je einer Klärschlammvergasungsanlage, Kohlekraftwerk und Papierfabrik. Wegen der potenziell enthaltenen Schadstoffe wird gegenwärtig in der praktizierten energetischen Verwertung der einzig gangbare Weg gesehen.

Für die Szenarienanalyse wurde von Seiten des IER die spezifischen Daten zur betrachteten Technologie in das Modell eingepflegt. Hierzu wurden Abstimmungstreffen mit dem ISWA bzw. Projektpartnern organisiert und die Modellierungsschnittstellen diskutiert und die Datennutzung harmonisiert. In einem Projekttreffen wurde die geplante Vorgehensweise des IERs allen Partnern vorgestellt und zusammen abgestimmt. Folgende Ergebnisse wurden als Datengrundlage für die Szenarioanalyse herangezogen:

## 8.2 Energiepotenziale aus Klärschlammnutzung

Im Modell wurden Anpassungen für die Berücksichtigung des Biogaspotentials gemacht und hierbei die Potenziale für Baden-Württemberg (BaWü) vom Gesamtpotenzial Deutschland (Quelle: Stat. BA) abgeleitet. Für das Potenzial für Biogas aus PW in Deutschland wurde auf Basis vom Potenzial der Kläranlagen mit Faultürmen in Baden-Württemberg bestimmt und nach Einwohneranzahl für bestimmte Quellen („Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen“, „Daten zur Anlagentechnik und zu den Standorten der thermischen Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland“). Der Upper Bound (obere Grenze des Potenzials) wurde im E2M2-Modell als Restriktion für das Potenzial genutzt.

Tabelle 8-3 Potentialabschätzung für Modellanalyse E2M2-Bio

|                                  | Klärschlamm-<br>verbleib 1.000 t TM | Klärschlamm-<br>verbleib Anteil % | ist          | Best case    | Upper bound  |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Potenzial Stromerzeugung [GWh/a] |                                     |                                   |              |              |              |
| Deutschland                      | 2.429                               | 100%                              | <b>1.433</b> | <b>1.935</b> | <b>2.000</b> |
| BaWü                             | 304,7                               | 13%                               | 179,8        | 242,7        |              |

## 8.3 Gas-Gestehungskosten

Die Gasgestehungskosten wurden anhand der analysierten Daten und in Absprache mit den Projektpartnern für den speziellen Fall der Mitnutzung von Presswasser (PW) ermittelt. Folgende Kenndaten wurden allgemein zugrunde gelegt:

Tabelle 8-4 Kenndaten für Gasgestehungskosten

|                                     | <b>Einheit</b> | <b>Value</b> |
|-------------------------------------|----------------|--------------|
| <b>Diskontierungssatz</b>           | %              | 0,075        |
| <b>Preisänderungsrate Invest</b>    | %              | 1,01         |
| <b>Preisänderungsrate Rest</b>      | %              | 1,02         |
| <b>Lebensdauer Bauliche Anlagen</b> | Jahre          | 20           |
| <b>Lebensdauer Pumpen</b>           | Jahre          | 7            |
| <b>Lebensdauer Feststoffeintrag</b> | Jahre          | 10           |
| <b>Lebensdauer Mobiltechnik</b>     | Jahre          | 10           |

In den Voranalysen ergab sich schnell, dass kleine BG-Anlagenklassen für eine Nutzung nicht sinnvoll zur Verfügung stehen, da sie durchschnittlich eher sehr hohe Gestehungskosten aufweisen. Dies gilt auch für den Fall, dass die Vergärung durch den Zusatz von Presswasser erhöht wird. Daher wurden die Gestehungskosten nur für Anlagenklassen größer als 500 kW<sub>el</sub> berechnet.

Die Kenndaten für die Analyse und die resultierenden Gas-Gestehungskosten sind in nachfolgender Tabelle 8-5 zusammengetragen:

Tabelle 8-5 Kenndaten für die Analyse und die resultierenden Gas-Gestehungskosten

| <b>Parameter</b>             | <b>Einheit</b>     | <b>BGA 500 kW</b> | <b>BGA 1000 kW</b> | <b>BGA 2000 kW</b> |
|------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Rohbiogasmenge               | m <sup>3</sup> /a  | 1.918.640         | 3.944.050          | 7.413.500          |
| Methanmenge                  | m <sup>3</sup> /a  | 594.000           | 1.215.000          | 1.800.000          |
| Heizwert Methan              | kWh/m <sup>3</sup> | 9,97              | 10                 | 9,97               |
| Bruttoenergiemenge           | MWh/a              | 5.922             | 12.114             | 17.946             |
| Geschätzter Wirkungsgrad el. | %                  | 40                | 42                 | 42                 |
| Anteil Eigenstrom            | %                  | 5                 | 5                  | 5                  |
| Bruttoenergiemenge bereinigt | MWh/a              | 5.804             | 11.859             | 17.569             |
| Rohgasproduktion             | mN <sup>3</sup> /h | 219               | 450                | 846                |
| Gasgestehungskosten          | EUR/MWh            | 18,69             | 17,44              | 16,44              |

Die Gasgestehungskosten liegen also trotz einer relativ großen Größenabstufung relativ nahe beieinander im Bereich von 16,44 bis 18,69 EUR pro MWh. Das ist ein relativ hohes Niveau und signalisiert schon, dass in einem kostengetriebenen ‚freien‘ Energiemarkt diese Art von Biogasanlagen auch nur schwer marktwirtschaftlich eingesetzt werden. Ihr Einsatz würde zumindest eine Förderung voraussetzen.

#### 8.4 Modellgestützte Szenarioanalysen

Im Szenariorahmen wurden verschiedene Nutzungsvarianten mit einem CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel verknüpft. Zudem wurde die wichtige Rahmenbedingung eines „flexiblen“ Betriebes von Biogasanlagen (BGA) berücksichtigt.

Der Szenarienrahmen sieht danach so aus.

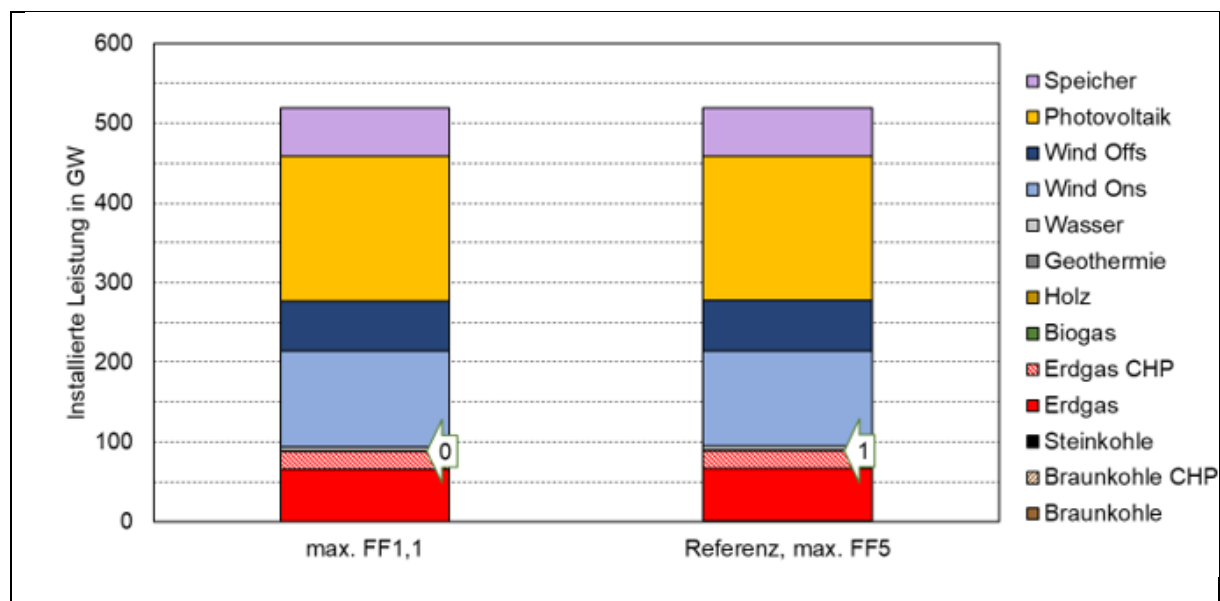
Tabelle 8-6 Szenariorahmen mit CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel

| CO <sub>2</sub> -Reduktionsziel |   | 65% | 80% | 95% | 100% |
|---------------------------------|---|-----|-----|-----|------|
| 1                               | Flex vs. Konstant (nur BGAPW)                 | x   |     | x   |      |
| 2                               | Konst. BGAPW + Weitere Flex. BGA Technologien | x   | x   | x   | x    |
| 3                               | Flex. BGAPW + Weitere Flex. BGA Technologien  | x   |     | x   |      |

Danach ist auch die Ergebnisdarstellung strukturiert.

##### A) Vergleich Flex-Betrieb vs. Presswassernutzung (Szenario 1)

In den folgenden Grafiken ist der Anteil und die installierte Leistung von Anlagen zur Stromerzeugung im deutschen Strommix gezeigt mit besonderer Berücksichtigung von Biogasanlagen mit Nutzung von Presswasser aus Abfall.



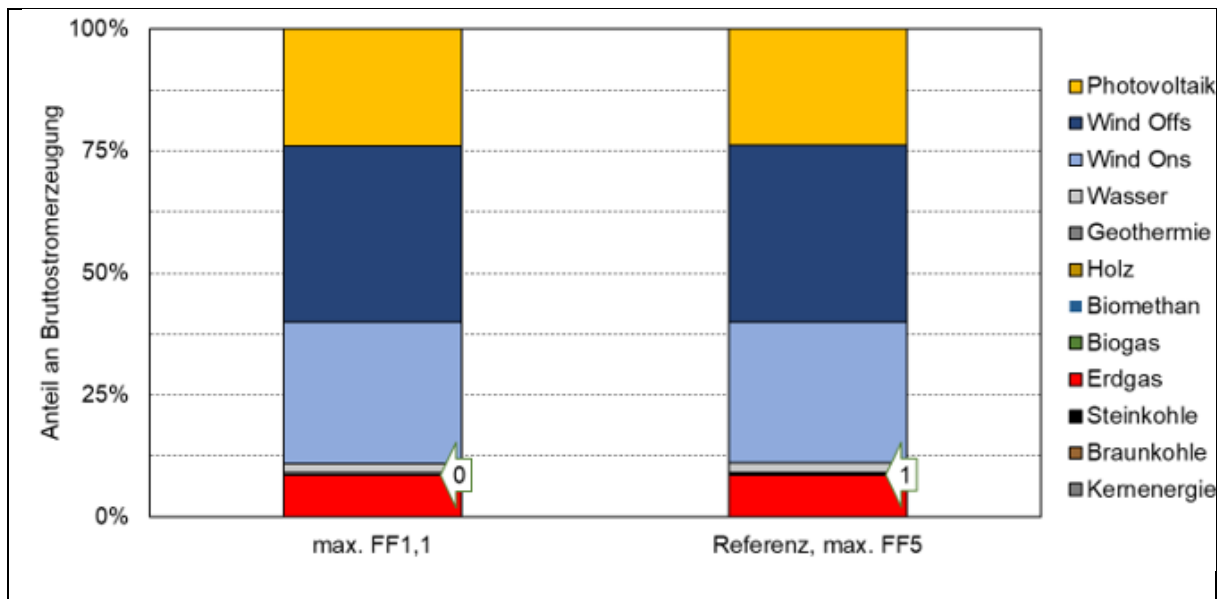


Abbildung 8-2 Installierte Leistung (oben) und Anteil an der Bruttostromerzeugung (unten) im deutschen Strommix unter Berücksichtigung von BGA mit Presswassernutzung bei 95% CO<sub>2</sub>-Reduktion; (FF 1,1 = konstant fahrende BGA, FF5 = flexibel betriebene BGA mit max. 5-facher Überbauung).

In der Analyse wurden nur Biogasanlagen mit PW berücksichtigt. Im Ergebnis stellt sich heraus, dass der Anteil an BGA-Anlagen mit PW im System sehr gering ist. Die Anlagen werden vor allem dann nicht genutzt (Anteil = 0%) wenn sie unflexibel gefahren werden. Der Betrieb dieser Anlagen ist allerdings in einer Situation kostengünstig, wenn sie flexibel betrieben werden. In der Konsequenz lässt sich schlussfolgern, dass die (flexible) Betriebsweise einer Biogasanlage für ihre Wirtschaftlichkeit im bestehenden Energiesystem wichtiger ist, als die Nutzung von Presswasser. Unter den gewählten Bedingungen spielt die leichte Erhöhung der Fermentierbarkeit in BGA durch Presswasser eine untergeordnete Rolle.

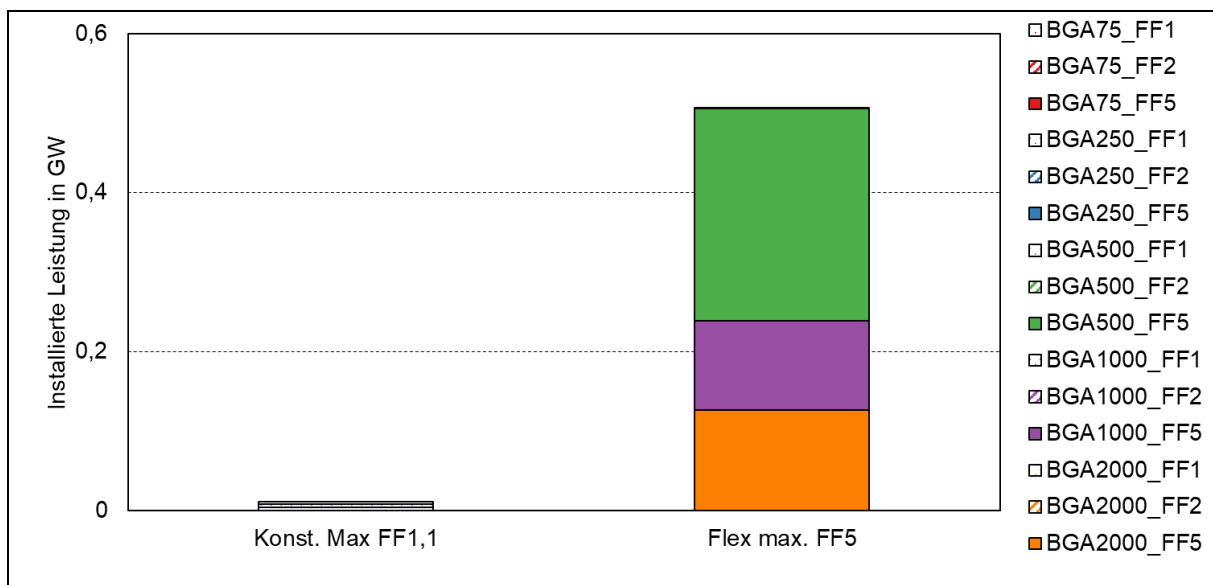


Abbildung 8-3 Installierte Leistung des Anteils an Biogasanlagen im deutschen Strommix unter Berücksichtigung von BGA mit Presswassernutzung bei 95% CO<sub>2</sub>-Reduktion; (FF 1,1 = konstant fahrende BGA, FF5 = flexibel betriebene BGA mit max. 5-facher Überbauung).

Die Detailansicht der Installierten Leistung von Biogasanlagen im deutschen Strommix zeigt, dass im Fall der flexibel betriebenen Anlagen alle drei Größenklassen (500, 1000 und 2000 KW) eingesetzt werden. Insgesamt werden für diesen Anlagentyp bei ca. 0,5 GW Leistung 1,2 TWh Strom erzeugt. Damit ist auch das Gesamtpotenzial für Biogasanlagen aus Abfallanlagen von 2 TWh<sub>th</sub> erschöpft.

B) Vergleich Betrieb mit und ohne Presswassernutzung (Szenarien 2 und 3)

In weiteren Modellrechnungen wurden analysiert, inwieweit BGA mit Presswasser im Energiesystem bevorzugt eingesetzt werden. In den folgenden Grafiken ist dazu das Stromerzeugungssystem in Deutschland für den bestehenden BGA-Anlagenpark (Referenz – Ref.), BGA ausschließlich mit Presswasser PW und ein ergänzter BGA-Anlagenpark unter Einschluss von PW-Nutzung verglichen. Dabei wurden 780 TWh elektrische Stromnachfrage gesamt, 100 TWh thermisches Potenzial für BGA und 20 TWh thermisches Potenzial für BGA-PW (mit Presswasser PW) angesetzt.

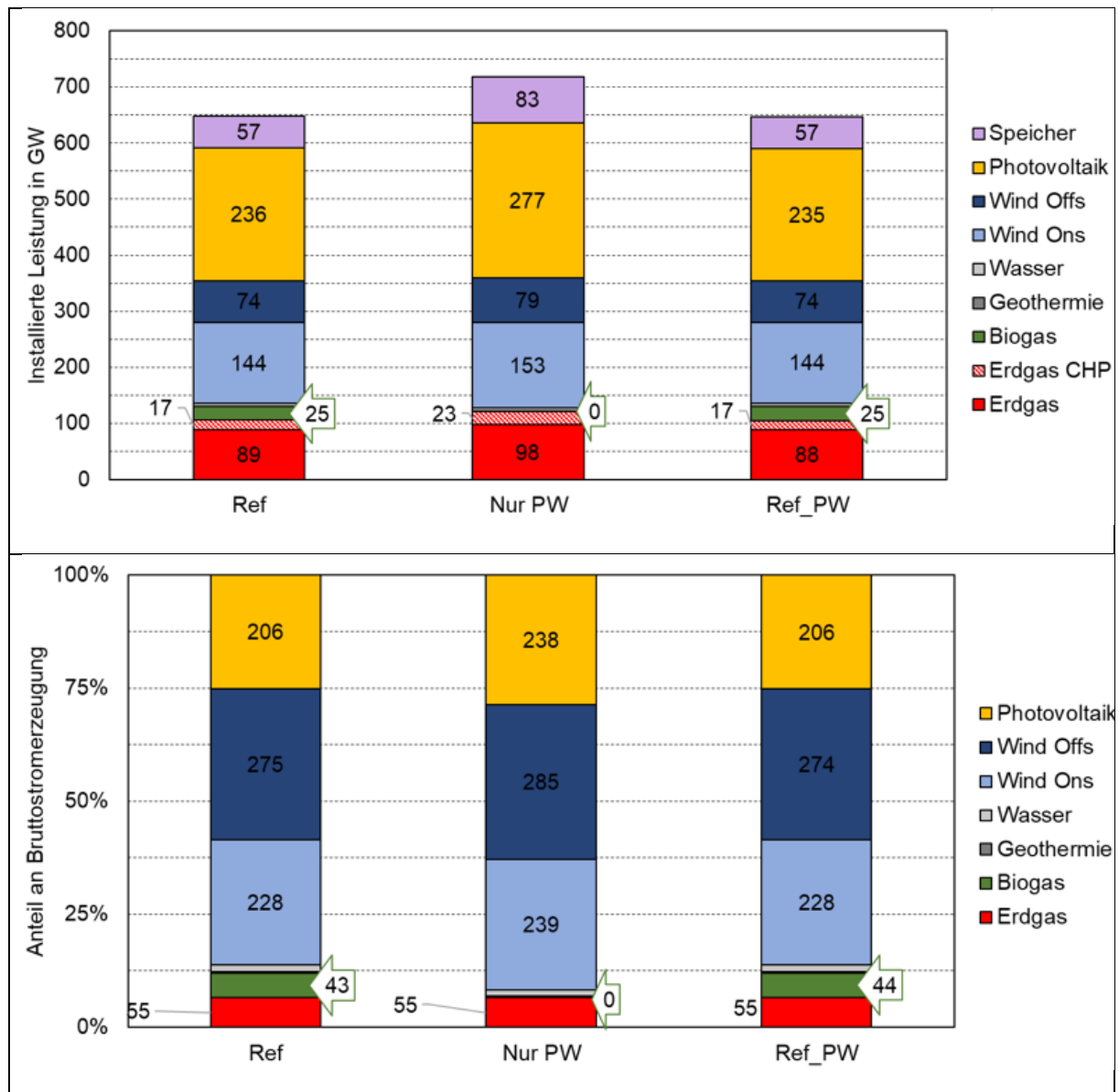


Abbildung 8-4 Installierte Leistung (oben) und Anteil an der Bruttostromerzeugung (unten) im deutschen Strommix bei 95% CO<sub>2</sub>-Reduktion für den bestehenden Referenzanlagenpark

(Ref.), ausschließlich Presswasser nutzende BGA und einen durch PW-Nutzung ergänzten BGA-Anlagenpark (Ref\_PW).

Es zeigt sich in den Ergebnissen, dass in diesen Szenarien wieder derselbe Effekt auftritt wie zuvor, nämlich dass der Zusatz von Presswasser allein noch nicht ausreicht, um Biogasanlagen wettbewerbsfähig zu machen. Wenn sie allerdings flexibel betrieben werden, können die zusätzlichen Potenziale aus Presswasser einen erhöhten Beitrag für das Energiesystem erbringen.

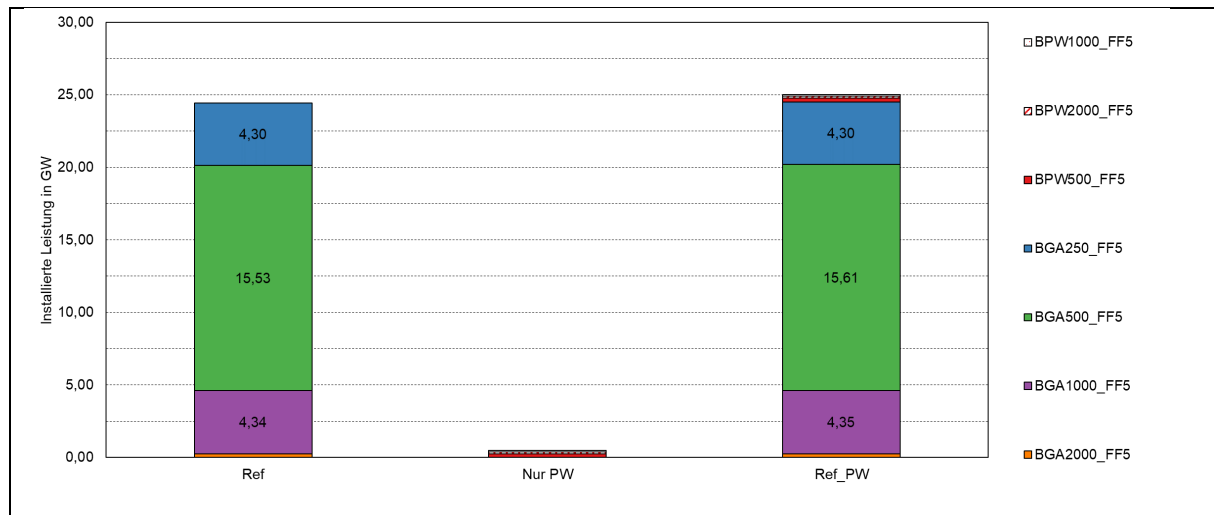


Abbildung 8-5 Installierte Leistung des Anteils an Biogasanlagen im deutschen Strommix unter Berücksichtigung von 95% CO<sub>2</sub>-Reduktion; (Ref. = bestehender BG-Anlagenpark; Nur PW = ausschließlich Presswasser nutzende BGA; Ref\_PW = durch PW-Nutzung ergänzten BGA-Anlagenpark).

Unter Berücksichtigung der weiteren Biogastechnologien kann festgestellt werden, dass die PW-BGA, aus System-sicht kostengünstig sind und nicht in Konkurrenz mit anderen BGA-Technologien fallen, sondern ergänzend wirken. Der Effekt auf die Gesamtsystemkosten liegt bei einer Einsparung von 0,182% im Vergleich zum Referenz-Biogasanlagenpark.

### 8.5 Zusammenfassung

Der Anteil an BGA mit Presswasser bringt zwar keinen deutlichen Unterschied im Vergleich zum bestehenden Strom- und Wärmesystem, aus systemischer Sicht werden BGA mit Presswasser dennoch weiter eingesetzt und sind im Systemzusammenhang wichtig und werden für eine kostenoptimale Stromerzeugung benötigt und zusätzlich mit anderen Biogastechnologien eingesetzt. Das ist ein Hinweis dafür, dass die Anlagen mit PW ein Potenzial haben, einen Beitrag für die Unterstützung der Dekarbonisierung und zur Erreichung der Klimaschutzziele zu leisten, auch wenn er verhältnismäßig bescheiden ist.

## 9. Handlungsempfehlungen und Wissenstransfer

Am 18.10.2018 wurde das erste Projekttreffen (Kick Off) an der Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft durchgeführt. Im Wesentlichen wurden die Arbeitspakete mit zeitlichem Horizont allen Partnern von der Projektkoordination vorgestellt, da es kleine Modifikationen und Nachforderungen im Vergleich zum ersten Entwurf gab. Des Weiteren wurden die „Aufgaben und Pflichten der Zahlungsempfänger während der Projektlaufzeit“ allen Mitgliedern des Konsortiums vorgestellt.

Am 22.02.2019 wurde der erste Workshop an der Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft erfolgreich durchgeführt. Alle Projektpartner sowie Herr Zürn (Abteilung 2, Grundsatz, Nachhaltigkeit, Klimaschutz, Umwelttechnik, Kreislaufwirtschaft) und Frau Seifert (Abteilung 5, Wasser und Boden) aus dem Umweltministerium Baden-Württemberg haben sich am Workshop beteiligt. Insgesamt waren es zehn Teilnehmerinnen und Teilnehmer. Mit einer Vorstellung des SepaFlex Projektes hat Frau Claudia Mauer den Workshop eröffnet. Herr Peter Maurer hat die rechtlichen Anforderungen an das Verfahren im Rahmen einer Präsentation „Rechtlicher Rahmen und Ausblick“ den Teilnehmerinnen und Teilnehmern vorgestellt. Nach der Präsentation wurde rege diskutiert und im weiteren Verlauf des Workshops in den Teilen I und II die rechtlichen und technischen Hemmnisse, Schwächen und Risiken aufgezeigt, diskutiert und dokumentiert und dafür Lösungsansätze erarbeitet und ebenfalls an Stellwänden dokumentiert. Alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben mit eigenen Erfahrungen, Bewertungen und Überlegungen beigetragen. Einige Themen wie „Verbrennungskapazität für höhere Schlammmenge“, „Einfluss der höheren Schlammmenge auf Wirtschaft“, „Gasspeicher & BHKW für Flexibilisierung“, usw. sind im Projekt bereits im Rahmen der Versuche, Berechnungen und Modellierungen als Themen eingeplant. Die Themen „Rechtlicher Rahmen: Abfall vs. Abwasser“, „Anerkennung als Hochwertige Verwertung nach Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)“ und „Akzeptanz bei Betreibern & Kommunen & Politik“, die nicht durch Versuche oder andere Vorhaben im Projekt abgedeckt sind, wurden deshalb intensiv diskutiert und kreative Lösungsmöglichkeiten gesammelt.



Abbildung 9-1 Workshop I

Das zweite Projekttreffen fand am 5. Februar 2019 statt, um die bevorstehenden Workshops zu besprechen und vorzubereiten sowie einige organisatorische Angelegenheiten zu diskutieren, wie z. B. den Entwurf des Logos und die Vorlage des Projektzwischenberichts.

Am 16.09.2019 fand das 3. Projekttreffen in Leipzig statt. Dabei sind die Ergebnisse der Charakterisierung des Materials vorgestellt und diskutiert worden.

Am 18.06.2020 fand das 4. Projekttreffen (auch Kick-off Meeting mit neuem Projektpartner BEM Umweltservice GmbH) als Online Meeting statt. In diesem Rahmen konnte sich BEM Umweltservice allen Projektpartnern vorstellen und alle Projektbeteiligten kennenlernen. Dabei sind die Ergebnisse der Laborversuche und der halbtechnischen Versuche vorgestellt und diskutiert worden. Es wurde besprochen, an welcher Stelle BEM Umweltservice ins Projekt einsteigt und wie das weitere Vorgehen ist. Es wurde auch intensiv diskutiert, wie die weiteren Schritte hinsichtlich der Fortsetzung des Pilotversuches im Faulturn der Kläranlage aussehen sollen.

Am 5. Mai. 2021 fand das 5. Projekttreffen mit allen Projektpartnern statt. Die Erfahrungen der Pressversuche wurden vorgestellt, andere Ergebnisse (Kosten-Nutzung-Analyse, Flexible Biogasproduktion und systemseitige Bewertung) wurden diskutiert und die weiteren Schritte wurden ebenfalls besprochen.

Am 13.05.2021 wurde das „SepaFlex“-Projekt bei der 5th CIGR International Conference 2021 virtuell vorgestellt.

Wir haben Kontakt zu Hochschulen in Österreich (Universität Innsbruck, MCI Innsbruck) aufgenommen, diese haben Kontakte zu Kläranlagen, die Bioabfall im Faulturn einer Kläranlage mitvergären. Wir hatten ein virtuelles Treffen, um die Vor- und Nachteile der jeweiligen Konzepte zu besprechen. Gegebenenfalls kann sich daraus eine zukünftige Zusammenarbeit ergeben.

10. Statuskonferenz BMWi-Forschungsnetzwerk Bioenergie: „Bioenergie – Eine Partnerin für alle Fälle“ hat vom 29. November bis 01. Dezember 2021 stattgefunden. Einen Vortrag über Status und Ergebnisse des SepaFlex-Projekts wurde präsentiert.

Am 22.09.2021 wurde das SepaFlex-Projekt bei Progress in Biogas V virtuell vorgestellt.

Am 06. bis 07.10.2021 wurde ein Poster über das SepaFlex-Projekt bei dem SRI ValBio Kick-off Workshop eingereicht.

Eine Projektidee mit zusätzlichem Ultraschallaufschluss von Bioabfall für ein Folgeprojekt ist vorgesehen, die Projektskizze wurde bis 01.03.2022 über Easy Online eingereicht.

Am 18.03.2022 wird der 11. DGAW- Wissenschaftskongress „Abfall- und Ressourcenwirtschaft“ an der TU Dresden stattgefunden. Auf der Tagung wurde ein Vortrag über das SepaFlex-Projekt gehalten, und in den Tagungsband wurde eine Publikation veröffentlicht.

Des Weiteren wurden der zweite Workshop im ISWA am 18.05.2022 stattgefunden. Das Ziele des Workshops ist „Erfolgreiche Umsetzung in die Breite“, wobei die Ergebnisse und Erfahrungen von SepaFlex präsentiert und die Hindernisse und Lösungsansätze für die Umsetzbarkeit dieses Konzepts in anderen Kompostierungs- und Kläranlagen ermittelt wurden. Alle Projektpartner sowie Frau Huber aus LUBW, Herr Wehner aus Uni-Innsbruck und Herr Fuchs aus AKG Kompost haben sich am Workshop beteiligt. Herr Fuchs hat einen Vortrag über dem Thema „Umgang mit Prozesswasser aus der Kompostierung bei der Firma AKG Kompost“ gehalten. In einem ersten Part zu den „Hürden & Anforderungen“ diskutieren die Teilnehmer/innen in zwei Gruppen unter der Vorgabe der Themen „Kläranlage“, „Kompostierung“ und „Gemeinsame Schnittstelle“ und der Unterpunkte „Rechtlich“, „Technisch“ und „Wirtschaftlich“. Einige grundsätzliche Fragen wie „Rechtliche Sicherheit“, „Schlammverwertung mit Nährstoffrückbelastung“, „Prozessstabilität in Faulturn“,



„Mikropraktik in Kompost“ und „geeignete Pressmaschine“ wurden angesprochen. In einem zweiten Part „Maßnahmen & Akteure“ diskutieren die Teilnehmer/innen in zwei Gruppen unter der Vorgabe der Themen „Nächste Schritte“, „Maßnahmen“ und „Akteure“ Lösungen zu den vorher aufgestellten Hürden & Anforderungen. Einige Maßnahmen wie "Austausch mit UM / LUBW / BMU", "Handreichung", "Bedarfsanfrage" und "neue Projekt" können als nächsten Schritte zur Förderung des Sepaflex-Konzepts sein.

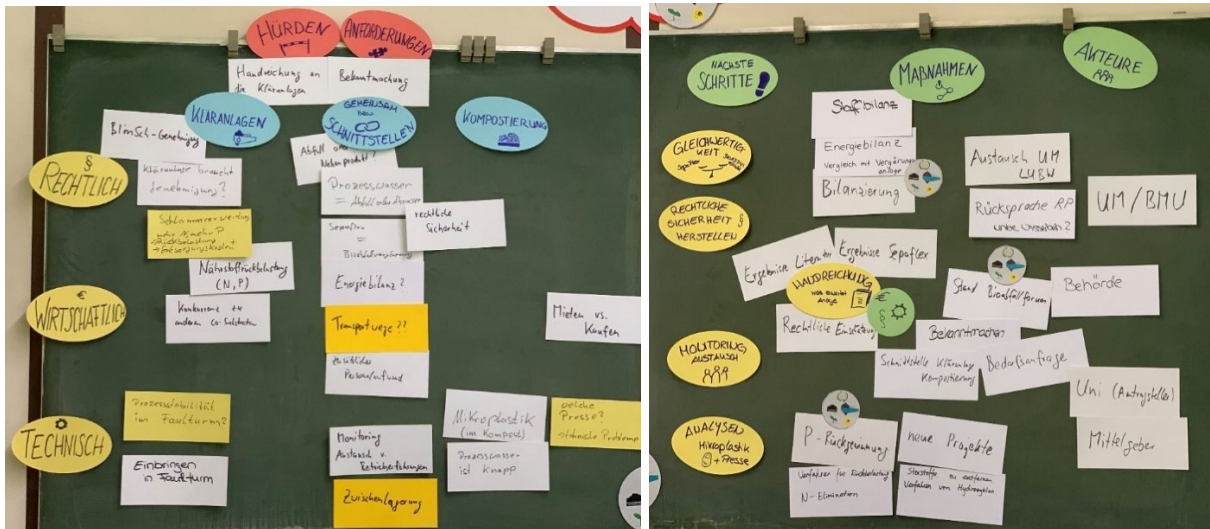


Abbildung 9-2 Workshop II

Am 27. und 28. Juni 2022 wurde ein Poster über das SepaFlex-Projekt bei dem Bioabfallforum 2022 eingereicht.

Am 20.10.2022 wurde Projekt Konzept und Ergebnisse bei Abwasserkolloquium vorgestellt.

## 10. Zusammenfassung

Die hochwertige energetische Verwertung von Biomasse, insbesondere von biogenen Reststoffen für die effiziente Erzeugung von Bioenergie nimmt eine wichtige Rolle zum Erreichen der europäischen und nationalen energie- und klimapolitischen Zielsetzungen ein. Daher ist der zügige Ausbau von Bioabfallvergärungsanlagen oder an alternativen Verwertungspfaden für Bioabfälle zur Energieerzeugung ein wichtiger Meilenstein bei der Umsetzung dieser Ziele. In Deutschland gibt es rund 9.000 biologische Abwasserbehandlungsanlagen, wovon in über 1.200 der Kläranlagen (KA) derzeit Faulgas erzeugt wird. Aufgrund der spezifischen Energiedichte und der beschränkten Entwässerbarkeit von Schlämmen aus der Abwasserreinigung ist es nicht möglich die maximale technische Raumbelastung bei Schlammfäulungsanlagen zu realisieren. Dennoch sind Kläranlagen nach wie vor auf eine externe Energieversorgung (Strom, Erdgas) angewiesen, um eine konstante Stromversorgung der Anlage zu gewährleisten. Durch den gezielten Einsatz von leicht abbaubaren Co-Substraten wie Presswasser aus Bioabfall können Kläranlagen die anaerobe Vergärung nutzen, um die Biogasproduktion an den dynamischen Energiebedarf anzupassen und die Effizienz der Anlage zu verbessern.

Das innovative SepaFlex-Konzept umfasst die energetische Nutzung von Bioabfallpresswasser (PW) im Faulturm kommunaler KA zur bedarfsgerechten Stromerzeugung bei gleichzeitiger stofflicher Verwertung des vorkonditionierten abgepressten Bioabfalls (aBA) zur Kompostproduktion. Die umfangreichen chemisch-physikalischen Untersuchungen der einzelnen Stoffströme sowie technische, ökonomische und ökologische Machbarkeitsanalysen sollen ermitteln, inwiefern ein vielversprechendes Konzept zur optimierten Verwertung von Bioabfällen und Klärschlamm für die Deckung des Eigenenergiebedarfs für kommunale KA und die flexible Energieproduktion hinsichtlich Systemintegration der Erneuerbaren Energien und dem Ausgleich fluktuierender Energien geeignet ist.

Es wurden drei Bioabfallpressversuche mit einer Pressmaschine der Firma Doppstadt durchgeführt, bei denen insgesamt 152 Tonnen Presswasser gewonnen. Der Bioabfall aus der Biotonne wurde für die Presse verwendet und als Bewässerungswasser wurde Sickerwasser aus der Kompostierungsanlage oder Leitungswasser eingesetzt. Bei jedem Pressversuch wurden Probenahmen vor Ort durchgeführt. Nach Anlieferung des Presswassers ans ISWA wurden neben der Charakterisierung durch Laboranalysen auch Co-Vergärungsversuche in der halbtechnischen Versuchsanlage durchgeführt und ein Pilotbetrieb im Faulturm beim LFKW unternommen. Das Biogaspotenzial von Presswasser ist mit  $805 \text{ m}^3$  pro kg oTS größer als das von Bioabfall und abgepresstem Bioabfall.

Die Ergebnisse der Co-Vergärung von Klärschlamm mit PW zeigten, dass die Co-Vergärung mit PW synergetische Effekte auf den Methanertrag hat. Die Methanproduktion einer Mischung, die alle drei Substrate enthält, führte zu höheren Erträgen (im Durchschnitt 18 - 26%) als die Summe der einzelnen Substraterträge. Je höher der Volumenanteil des PWs im Substrat war, desto größer war der Anstieg des Methanertrags im Vergleich zu den erwarteten Erträgen. Die Zugabe von PW zu einer Mischung führte zu einer verbesserten Methanproduktionsrate der Mischung. Dies bewies, dass sich das PW positiv auf die anaerobe Vergärung auswirkt und den gesamten Abbauprozess des Substrats verbessert. Dieser Effekt wurde auch bei der Betrachtung der durchschnittlichen Methanproduktionsrate pro kg CSB im Eingangssubstrat deutlich. Die durchschnittliche Methanproduktionsrate pro kg CSB und die Methanausbeute pro kg CSB stiegen mit höherem PW-Gehalt in der Mischung. Die höchsten Methanproduktionsraten wurden für einen PW-Gehalt von 40 % und 58,75 % in der Mischung verzeichnet.

Hinsichtlich des zeitlichen Verlaufs der Methanproduktion zeigten die Ergebnisse einen früheren Anstieg der Produktionsrate für die Co-Vergärung mit PW. Die maximale Produktionsrate wurde nach 3:10 h und 3:50 h erreicht, wenn die Co-Vergärung mit einer 40 % und 58,75 % PW enthaltenden Mischung erfolgte. Bei der alleinigen Vergärung von Klärschlamm wurde die maximale Produktionsrate erst nach 6 Stunden erreicht. Dies deutet darauf hin, dass der Abbauprozess bei der Co-Vergärung mit hohen PW-Gehalten schneller abgeschlossen wird.

Einen verbesserten Abbau von organischen Stoffen und einen geringeren Abfluss von unverdaulichem Substrat durch die Co-Vergärung mit hohen Gehalten an PW wurde bewiesen. Die Co-Vergärung mit PW kann den Abbau organischer Substanzen fördern und folglich die Menge an organischen Stoffen im Abfluss reduzieren.

Die Ergebnisse der Kosten-Nutzen-Analyse zeigen, dass die Gesamtkosten für einen Kubikmeter Presswasser bei diesem Konzept in Höhe von 112,07 € liegen. Davon entfallen 58 % der Kosten auf die Miete für die Pressgeräte. Eine weitere kostenintensive Komponente ist der Transport (22 %), da der Standort der Bioabfallpresse im SepaFlex-Projekt weit von der Kläranlage entfernt ist und die Transportkosten daher recht hoch sind. Der zusätzliche Nutzen, den das Presswasser einbringt sind die zusätzliche Wärme- und Stromerzeugung, wodurch pro Kubikmeter Presswasser 30,32 € Euro eingebracht werden können. Die zusätzlichen Kosten werden nicht durch den zusätzlichen Nutzen kompensiert. Hierzu wären verschiedene Optimierungen vorteilhaft, um die zusätzlichen Kosten des Presswassers zu minimieren. Bei Beschluss des dauerhaften Durchführens der Pressung wäre ein Kauf von Vorteil, um die Kosten an dieser Stelle auf Dauer zu senken. Bei der Wahl einer näheren Kompostierungsanlage können die Transportkosten gesenkt werden. Wenn die Transportentfernung weniger als 20 km beträgt, können die Kosten bei 27 € pro Tonne Presswasser gehalten werden, so dass die Kosten gegenüber der Nutzung niedriger sind, was aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist.

In der Energiebilanz wird das gesamte SepaFlex-Konzept einbezogen, einschließlich des Pressvorgangs und der anaeroben Vergärung des Presswassers, des Kompostierungsprozesses, der abgepressten Bioabfälle und der Schlammentwässerung. Die im BHKW erzeugte Wärme und Elektrizität stammt ebenfalls ausschließlich aus dem Presswasser. Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass bei der Pressung von einer Tonne Bioabfall, der anaeroben Vergärung des Presswassers und der Kompostierung der abgepressten Bioabfälle insgesamt 62,06 kWh Energie benötigt werden und 170,17 kWh Energie gewonnen werden können, was ein sehr vorteilhafter Prozess ist.

Das SepaFlex-Konzept wurde unter Anwendung der Lebenszyklusanalyse (LCA) untersucht und im Vergleich zu konventionellen Energieträgern und Düngemitteln bewertet. Hier wurde die Ökologische Bilanzierung mit der Software SimaPro7 unter Verwendung der Methode Eco-Indicator 99 (E) V2.06/Europa EI 99E/E erstellt. Daraus ergibt sich, dass das Ergebnis der ökologischen Bilanzierung für das SepaFlex-Konzept 1,25 pt (Eco-indicator score) beträgt, während das Ergebnis der Ökobilanz für die Erzeugung des entsprechenden Erdgases 5,96 pt beträgt, also 4,4-mal höher ist. Im Gegensatz dazu liegt das Ergebnis der Ökobilanz für konventionelle Düngemittel bei 15,3 pt. Der Gesamtwert der beiden alternativen Energiequellen beträgt 21,26 pt, was 17-mal höher ist als beim Sepaflex-Konzept. Hierdurch wird nachgewiesen, dass das Sepaflex-Konzept wesentlich geringere Auswirkungen auf die Umwelt und die Menschen hat als eine entsprechende Menge an Primärenergie und konventionellen Düngemitteln.

Ein Hauptziel des SepaFlex-Konzepts ist es, die Energieeffizienz der Kläranlage LFKW zu verbessern und durch Co-Vergärung die Energieautarkie zu erreichen. Dazu wurde der schwankende Energiebedarf der Kläranlage analysiert und eine Beschickungsempfehlung zur

Deckung des durchschnittlichen Methanbedarfs der Anlage ausgesprochen. Für die Berechnung des Methanbedarfs wurden die Werte von 2018 und 2019 (herangezogen ginge auch) verwendet. Der Stromverbrauch der Kläranlage betrug 844,86 kWh. Daraus ergibt sich ein Selbstversorgungsgrad von 57,8 %. Um die Energieautarkie für das LFKW zu erreichen, werden im Durchschnitt 242,12 m<sup>3</sup> Methan pro Tag benötigt. Der Methanbedarf der Anlage schwankt im Laufe des Tages, wobei der Bedarf zwischen 10 und 22 Uhr höher und in der Nacht niedriger ist. Um die Methanproduktion an den schwankenden Bedarf im Tagesverlauf anzupassen, wurde die Beschickung in zwei Frachten aufgeteilt, wobei die erste Beschickung um 7 Uhr morgens 2/3 der täglichen Mischung enthielt. Zusätzlich wurde nach 8 Stunden um 15 Uhr die zweite Charge mit 1/3 der Mischung zugeführt. Die OLR der simulierten Mischung betrug insgesamt 2,5 kg CSB/(m<sup>3</sup>\*d). Um die Autarkie auch für längere Zeiträume mit einem über dem Durchschnittsbedarf liegenden Bedarf zu gewährleisten, ist es ratsam, die Gasspeicherkapazität der Kläranlage weiter auszubauen. Dies ermöglicht die Speicherung von überschüssigem Gas, das zu Zeiten mit höherem Bedarf genutzt werden kann.

Der Anteil an Biogasanlagen mit Presswasser bringt zwar keinen deutlichen Unterschied im Vergleich zum bestehenden Strom- und Wärmesystem, aus systemischer Sicht werden Biogasanlagen mit Presswasser dennoch weiter eingesetzt und sind im Systemzusammenhang wichtig. Zudem werden sie für eine kostenoptimale Stromerzeugung benötigt und zusätzlich mit anderen Biogastechnologien eingesetzt. Das ist ein Hinweis dafür, dass die Anlagen mit PW ein Potenzial haben, einen kleinen aber wichtigen Beitrag für die Unterstützung der Dekarbonisierung und zur Erreichung der Klimaschutzziele zu leisten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Co-Vergärung von Klärschlamm und PW im Faulturm der Kläranlagen eine gute und einfache Möglichkeit ist, den Bioabfall energetisch zu verwerten und gleichzeitig die Methanausbeute erheblich zu steigern. PW ist ein geeignetes Co-Substrat, da es einen hohen Anteil an organischen Stoffen enthält und die höchste Methanproduktionsrate pro Liter Substrat aufweist. Durch den Einsatz von PW können freie Kapazitäten in Faultürmen von Kläranlagen genutzt und die Biogasausbeute deutlich erhöht werden. Das PW trägt nicht nur zur Biogaserzeugung bei, sondern die Co-Vergärung führt zu Sekundäreffekten, die den gesamten Abbauprozess der Substrate verbessern. Des Weiteren wird die Behandlung des anfallenden Sickerwassers eingespart werden, da dieses der Pressung zugeführt wird. Das SepaFlex-Konzept ist sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht machbar. Darüber hinaus trägt das Konzept zur Energieeffizienz und zum Umweltschutz bei, so dass es zum Erreichen der europäischen und nationalen energie- und klimapolitischen Zielsetzungen beitragen kann.

## Literaturverzeichnis

- ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG (1996): Klärschlamm. File number 4. Auflage, ISBN 3-433-00909-0.
- Angermeier, Georg (2005a): Kosten-Nutzen-Analyse. Available online at <https://www.projektmagazin.de/glossarterm/kosten-nutzen-analyse>, checked on 4/18/2020.
- Angermeier, Georg (2005b): Kosten-Nutzen-Vergleich. Available online at <https://www.projektmagazin.de/glossarterm/kosten-nutzen-vergleich>, checked on 4/21/2020.
- ANGILELLA et al. (2019): WerAA - Erschließung neuer Wertschöpfungsketten in der Abfall- und Abwasserwirtschaft: Kombinierte Vergärung von Klärschlamm und biogene Haushaltsabfälle für einen energieautarken Kläranlagenbetrieb.
- Bauer, Patrick (2013): Versuche und Grundlagen zur diskontinuierlichen Beschickung von anaeroben Faulanlagen. Diplomarbeit. Universität Stuttgart. Institut für Siedlungswasserbau,
- BMU (2018): Energieautarke Abfallbehandlung, Pressemitteilung vom 22.01.2018.
- BRUNSTERMAN et al. (2015): ): Innovative Energieeffiziente Bioabfallverwertung. Vergärung von Bioabfallpresswasser. In *Müll und Abfall* (Ausgabe 01/2015.), pp. 27–35. DOI: 10.37307/j.1863-9763.2015.01.
- Bühle, Lutz; Reulein, Jürgen; Stülpnagel, Reinhold; Zerr, Walter; Wachendorf, Michael (2012): Methane Yields and Digestion Dynamics of Press Fluids from Mechanically Dehydrated Maize Silages Using Different Types of Digesters. In *Bioenerg. Res.* 5 (2), pp. 294–305. DOI: 10.1007/s12155-011-9127-5.
- Corton, John; Toop, Trisha; Walker, Jonathan; Donnison, Iain S.; Fraser, Mariecia D. (2014): Press fluid pre-treatment optimisation of the integrated generation of solid fuel and biogas from biomass (IFBB) process approach. In *Bioresource technology* 169, pp. 537–542. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.07.040.
- DWA (2005): Zur Zulässigkeit der Mitbehandlung organischer Stoffe in kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen -Co-Vergärung. Hennef.
- DWA (2015): Anfrage an die Bundesländer. Rechtliche Aspekte bei der Co-Vergärung. Available online at [http://www1.gfa-news.de/gfa/news/news.nsf/webcode/20160902\\_002/\\$FILE/10-20150217%20Synopsis%20Co-Vergärung%20Länderregelungen.docx](http://www1.gfa-news.de/gfa/news/news.nsf/webcode/20160902_002/$FILE/10-20150217%20Synopsis%20Co-Vergärung%20Länderregelungen.docx).
- DWA-Arbeitsgruppe KEK-42 (2020): Merkblatt DWA-M 380 Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen. September 2020. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA-Regelwerk, 380).
- Hahn, Henning; Hartmann, Kilian; Bühle, Lutz; Wachendorf, Michael (2015): Comparative life cycle assessment of biogas plant configurations for a demand oriented biogas supply for flexible power generation. In *Bioresource technology* 179, pp. 348–358. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.007.
- Hahn, Henning; Krautkremer, Bernd; Hartmann, Kilian; Wachendorf, Michael (2014): Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, pp. 383–393. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.085.
- Hensgen, F.; Richter, F.; Wachendorf, M. (2011): Integrated generation of solid fuel and biogas from green cut material from landscape conservation and private households. In *Bioresource technology* 102 (22), pp. 10441–10450. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.08.119.

Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie (2009): Co-Vergärung organischer Materialien in Faulbehältern von kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen. Arbeitshilfe, checked on 4/23/2020.

Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2009): Arbeitshilfe: Co-Vergärung organischer Materialien in Faulbehältern von kommunalen Abwasserbehandlungsanlagen. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Available online at [https://rp-giessen.hessen.de/sites/rp-giessen.hessen.de/files/2021-12/arbeitshilfe\\_co-vergaerung.pdf](https://rp-giessen.hessen.de/sites/rp-giessen.hessen.de/files/2021-12/arbeitshilfe_co-vergaerung.pdf).

Homann, Klaus (2005): Kommunales Rechnungswesen. Buchführung, Kostenrechnung und Wirtschaftlichkeitsrechnung. 6., überarb. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Lehrbuch). Available online at <https://books.google.de/books?id=KJr660LBIZsC&pg=PA264&dq=schritte+kosten-nutzen-analyse&hl=de&sa=X&ved=0ahUKEwj20pWUfn0AhVDLewKHYYqDATcQ6AEIMDAB#v=onepage&q=schritte%20kosten-nutzen-analyse&f=false>.

Horisberger, B.; van Eimeren, W. (2013): Die Kosten — Nutzen — Analyse: Methodik und Anwendung am Beispiel von Medikamenten: Springer Berlin Heidelberg (Gesundheitssystemforschung). Available online at <https://books.google.de/books?id=hGyrBgAAQBAJ>.

Jank, Anna; Ebner, Christian; Müller, Wolfgang; Fimml, Christian; Markt, Rudolf; Bockreis, Anke (2017): Kosten und Erlöse bei der Co-Vergärung von mechanisch aufbereitetem Bioabfall in Faultürmen kommunaler Kläranlagen. In *Österr Wasser- und Abfallw* 69 (9-10), pp. 388–396. DOI: 10.1007/s00506-017-0409-9.

Jank, Anna; Müller, Wolfgang; Schneider, Irene; Gerke, Frederic; Bockreis, Anke (2015): Waste Separation Press (WSP): a mechanical pretreatment option for organic waste from source separation. In *Waste management (New York, N.Y.)* 39, pp. 71–77. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.02.024.

Klasen, Fabian (2019): Rechtliche Rahmenbedingungen der Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen. Recherchearbeit.

LFKW (2019): Jahresbericht 2018. With assistance of Maurer. Edited by LFKW. Available online at <https://www.iswa.uni-stuttgart.de/lehr-forschungsklaerwerk/klaerwerk/betriebsdaten/>, updated on 10/26/2021.

LfU (2011): Co-Vergärung auf kommunalen Kläranlagen. Edited by Bayerisches Landesamt für Umwelt. Available online at [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop\\_app000003?SID=122830731&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27lfu\\_abfall\\_00181%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000003?SID=122830731&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_abfall_00181%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27)).

Liener, Selina (2020): Untersuchung der Auswirkung von feststoffarmen Co-Substrat auf den Faulbehälterbetrieb. Master Thesis. Universität Stuttgart.

MATTES et al. (2015): Eine energieneutrale Kläranlage.

Meirer, Michael; Müller, Wolfgang; Bockreis, Anke (2017): Mechanische Abtrennung biogener Reststoffe aus Restabfall für die Co-Vergärung in Faultürmen kommunaler Kläranlagen. In *Österr Wasser- und Abfallw* 69 (9-10), pp. 397–404. DOI: 10.1007/s00506-017-0411-2.

MILKOWSKI, N. (2009): Rechtliche Rahmenbedingungen für die Co-Vergärung in Baden-Württemberg. Umweltministerium Baden-Württemberg. DWA Landesverbandstagung Baden-Württemberg. 22.- 23. Oktober, 2009.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft (2021): kommunales abwasser lagebericht 2021.

Nayono, Satoto E.; Gallert, Claudia; Winter, Josef (2010): Co-digestion of press water and food waste in a biowaste digester for improvement of biogas production. In *Bioresource technology* 101 (18), pp. 6998–7004. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.03.123.

Rosenwinkel, Karl-Heinz; Kroiss, Helmut; Dichtl, Norbert; Seyfried, Carl-Franz; Weiland, Peter (Eds.) (2015): Anaerobtechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Sänger, Dorothee; Bauerschlag, Nils; Brunstermann, Ruth; Pretz, Thomas (2011): Energieeffizienzsteigerung in der Bioabfallverwertung. In *Müll und Abfall* (3). DOI: 10.37307/j.1863-9763.2011.03.06.

SCHAUM, C.; RÜHL, J.; LUTZE, R.; CORNEL, P.; ZHUKOVA, E. (2015): Sewage Sludge and Co-Substrates as Flexible Energy Sources. Poster,. 12th IWA Leading Edge Conference on Water and Wastewater Technologies, 2015.

Schmidt, Simone (2021): Feed optimization of sewage sludge and co-substrate for energy self-sufficient operation of a municipal wastewater treatment plant. Master Thesis, University of Hohenheim.

Technische Universität Braunschweig (2012): Steigerung der Energieeffizienz bei der Verwertung biogener Reststoffe : Endbericht zu Förderprojekt 03KB022. In *Steigerung der Energieeffizienz bei der Verwertung biogener Reststoffe*. DOI: 10.2314/GBV:773389504.

Waggershauser, Simone (2021): Kosten-Nutzen-Analyse bei der Co-Fermentation von Presswasser. Master Thesis. Universität Stuttgart.

Wei, Shaoyan (2020): Untersuchung zum Einsatz von Abpresswasser aus Biomüllsammmlung für eine stromautarken Betrieb des Lehr und Forschungsklärwerk. master thesis. Universiät Stuttgart.

Zens, Korbinian (2011): Kofermentation biologischer Abfallstoffe in Faultürmen von Kläranlagen. Bachelorarbeit zum Erlangen des akademischen Grades. Fachhochschule Landschut.