

Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger

Abschlussbericht

FLX
SYnErgy

Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger (FLXsynErgy)

Abschlussbericht

Christian Hubert, Bettina Steiniger, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum
*Universität der Bundeswehr München (UniBwM) – Institut für Wasserwesen
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Schwerpunkt AP1, AP3, AP4, AP5 (Kap. 1.4.2) und APK (Gesamtkoordination FLXsynErgy)*

Prof. Dr. rer. nat. Jörg Kretzschmar, Manuel Winkler, Dr.-Ing. Eric Mauky
*DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH –
Fachbereich Biochemische Konversion, Schwerpunkt AP1, AP2 und AP5 (Kap. 1.4.3)*

Dr.-Ing. Konstantinos Athanasiadis, Jens Henker
Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH, Schwerpunkt AP5 (Kap. 1.4.1)

Dr. Stefan Einsiedel, Univ.-Prof. Dr. Dr. Johannes Wallacher
Hochschule für Philosophie - Zentrum für Globale Fragen, Schwerpunkt AP6

Markus Heinrich
Wolter Hoppenberg - Rechtsanwälte Partnerschaft mbB, Schwerpunkt AP5 (Kap. 1.4.5)

im Unterauftrag der UniBwM
Lorenz Zimmer, Lemar Schwarz, Lea Berger, Martin Mergelmeyer
john becker ingenieure GmbH & Co. KG, Schwerpunkt AP5 (Kap. 1.4.4)

*FLXsynErgy wurde gefördert durch das
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
innerhalb des 7. Energieforschungsprogramms im Themenfeld
„Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe“,
Förderkennzeichen: 03EI5420 A-F (Okt. 2020 - März 2024)*

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Copyright 2024

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ CC BY- Lizenz 3.0 DE (Namensnennung 3.0 Deutschland) zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/legalcode>.

ISBN 978-3-98997-004-5

DOI:10.18726/2024_2

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	IX
Vorwort.....	X
Danksagung.....	XI
I. Kurze Darstellung.....	1
1 Aufgabenstellung	1
2 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	1
3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	3
4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
II. Eingehende Darstellung.....	5
1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	5
1.1 AP 1/ AP 2 - Definition/Harmonisierung der Randbedingungen und Wissenstransfer zwischen Kläranlagen und Biogasanlagen.....	5
1.1.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Faulungs- und Biogasanlagen ...	5
1.1.2 Flexibilisierung auf Kläranlagen und Biogasanlagen	15
1.1.3 Wissenstransfer Kläranlage – Biogasanlage	20
1.2 AP 3 - Flexibilisierung Gaserzeugung, Substrat als Speicher.....	21
1.2.1 Hintergrund und Stand der Technik.....	21
1.2.2 Zielsetzung der Untersuchungen	22
1.2.3 Material und Methoden	23
1.2.4 Ergebnisse der Versuche in AP 3.....	29
1.2.5 Handlungsempfehlungen.....	41
1.3 AP 4 - Wärmespeicher Faulung	43
1.3.1 Hintergrund und Stand der Technik.....	43
1.3.2 Zielsetzung der Untersuchungen	44
1.3.3 Material und Methoden	45
1.3.4 Ergebnisse der Betriebsdatenauswertung und Versuchsergebnisse	48
1.3.5 Einfluss auf die Wärmebilanz der gesamten Kläranlage	55
1.3.6 Handlungsempfehlungen.....	57

1.4	AP 5 - Flexibilisierung im Kontext der Energiewirtschaft.....	59
1.4.1	Untersuchung der Flexibilisierung am Beispiel einer Modellkläranlage.....	59
1.4.2	Untersuchung der Teilnahme am Regelenergiemarkt	74
1.4.3	Untersuchungen zum Potential einer Day-Ahead-Vermarktung	81
1.4.4	Untersuchungen zur Erhöhung des Eigenversorgungsgrades am Beispiel größtechnischer Anlagen	87
1.4.5	Rechtliche Aspekte im Hinblick auf eine Interaktion mit externen Systemen	100
1.5	AP 6 - Akzeptanz einer energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen ..	109
1.5.1	Umweltethische Einordnung	109
1.5.2	Handlungsempfehlungen aus den Stakeholder- und Fachdialogen: Aufgaben für die Projekt- und Wissenschaftskommunikation	114
1.6	AP K - Projektkommunikation und -koordination.....	119
2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	121
3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	121
4	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	122
5	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	122
6	Literaturverzeichnis	126
7	Berichtsblatt	132
8	Document Control Sheet.....	135

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Darstellung der Arbeitspakete im Rahmen von FLXsynErgy	2
Abbildung 2:	Factsheet Faulbehälter auf Kläranlagen vs. Biogasanlagen.....	6
Abbildung 3:	Vereinfachter verfahrenstechnischer Vergleich Faulungs- und landwirtschaftlicher Biogasanlagen (Primärschlamm (PS), Überschussschlamm (ÜSS), Nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo)) (Steiniger, 2022)	7
Abbildung 4:	Entsorgungswege von den anfallenden Faulschlämmen auf Kläranlagen und Gärresten auf Biogasanlagen (Daten: 2019) (DESTATIS 2020b, sowie Schätzungen des DBFZ)	13
Abbildung 5:	Vereinfachte Darstellung der Zusammenhänge zwischen den in FLXsynErgy betrachteten Flexibilisierungsbausteinen innerhalb der Klärschlammbehandlung und Gasverwertung auf Kläranlagen und an der Schnittstelle zu anderen Energiesystemen	17
Abbildung 6:	Gegenüberstellung von Chancen und Hemmnissen zur Etablierung der Flexibilisierung bei Faulungs- und Biogasanlagen (Steiniger, 2022)	19
Abbildung 7:	Zusammensetzung der Workshop Teilnehmerinnen und Teilnehmer sortiert nach Tätigkeitsbereich, FuE. Forschung und Entwicklung	20
Abbildung 8:	Vereinfachte Schemazeichnung der Versuchsfaulbehälter	23
Abbildung 9:	Foto der Versuchsfaulbehälter der Universität der Bundeswehr München (Foto: Siebold/UniBwM).	24
Abbildung 10:	Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung in Versuchsphase 1; die Balken stellen den jeweiligen Beschickungszeitpunkt dar und deuten die Höhe der zugeführten Raumbelastung an (Hubert 2024/25). .	26
Abbildung 11:	Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung in Versuchsphase 2; die Balken stellen den jeweiligen Beschickungszeitpunkt dar und deuten die höhe der zugeführten Raumbelastung an (Hubert, 2024/25)..	27
Abbildung 12:	Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung in Versuchsphase 3; die Balken stellen den jeweiligen Beschickungszeitpunkt dar und zeigen die Höhe der zugeführten Raumbelastung an, RS: Rohschlamm, CS: Co- Substrat (Hubert 2024/25).	28
Abbildung 13:	oTR-Bilanz innerhalb der Versuchsphase 1.....	29
Abbildung 14:	Kapillare Fließzeit (CST) in den jeweiligen Reaktoren (Hubert, 2024/25).	30
Abbildung 15:	Ergebnisse der Entwässerungsversuche mittels Filterpresse (Hubert, 2024/25).....	31

Abbildung 16: Verlauf der Essigsäure (oben) und der Propionsäure (unten) (Hubert, 2024/25).....	31
Abbildung 17: oTR-Bilanz innerhalb der Versuchszeitraumes (Hubert, 2024/25).....	33
Abbildung 18: Gasproduktionsraten im Reaktor FB2. Die Zugabe von Rohschlamm erfolgte alle zwei Stunden und die Zugabe von Flotatschlamm täglich. ...	34
Abbildung 19: Propionsäure-Konzentration in den Reaktoren FB2 bis FB4 nach Zugabe von Flotatschlamm. (Hubert, 2024/25).....	35
Abbildung 20: Kapillare Fließzeit der jeweiligen Faulschlämme (Hubert, 2024/25).....	36
Abbildung 21: Erzielte TR-Konzentrationen der jeweiligen Faulschlämme nach den Filterpressversuchen (Hubert, 2024/25).	36
Abbildung 22: CSB-Bilanz der Faulbehälter FB1 - 3; CSB_{abb} : abgebauter CSB, CSB_{ab} : gemessene CSB-Fracht im Ablauf, CSB_{Gas} : berechneter CSB-Äquivalent aus der gemessenen Methangasmenge (Hubert, 2024/25)..	38
Abbildung 23: Konzentration der Essigsäure in den Faulbehältern FB1 - 3 (Hubert 2024/25).....	38
Abbildung 24: Konzentration der Propionsäure in den Faulbehältern FB1 - 3 (Hubert 2024/25).....	38
Abbildung 25: kapillare Fließzeit (CST) der ausgefaulten Schlämme aus FB1 - 3 (Hubert, 2024/25).....	39
Abbildung 26: Trockenrückstand der ausgefaulten Schlämme nach Behandlung mit der Filterpresse (Hubert, 2024/25).	39
Abbildung 27: Akkumulierte Gasmengen bei 25 °C gelagerten Flotatschlamm in 4 Parallelbestimmungen.	40
Abbildung 28: Gaszusammensetzung im Verlauf der Lagerung.....	40
Abbildung 29: Gelagerte Proben bei einer Temperatur von 8, 20 und 40 °C nach 24 h aus zwei unterschiedlichen Perspektiven.	41
Abbildung 30: Gelagerte Proben bei einer Temperatur von 8, 20 und 40 °C nach 9 d aus zwei unterschiedlichen Perspektiven.	41
Abbildung 31: Versuchsaufbau der Laborfäulungen im Technikum der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr München (Foto: Marcel Hagen)	47
Abbildung 32: Übersicht über die Analysen in den jeweiligen Stoffströmen	48
Abbildung 33: Temperaturprofile der Faulraumtemperatur und der Abwasser- bzw. Umgebungstemperatur in Winterhausen und Holzkirchen (in Anlehnung an Steiniger et al. (2022b))	49

Abbildung 34: Spezifische Methanausbeuten und Methangehalte für die großtechnischen Faulungen (A, C) und die Laborfaulungen (B, D) in Abhängigkeit der Faulraumtemperatur (in Anlehnung an Steiniger et al. (2022b)).....	51
Abbildung 35: Konzentrationen von gelöstem CSB (A) und Ammonium (B) im Schlammwasser (in Anlehnung an Steiniger et al. (2022)).....	52
Abbildung 36: Entwässerungsergebnisse des spezifischen CST und TR nach Zentrifugation im Labormaßstab (A) sowie des TR(A), thermogravimetrisch ermittelt, und der Bestimmung des Polymerbedarfs, gemessen mittels Strömungspotentialmessung (B) für eine Mischung von PS:ÜSS (in Anlehnung an Steiniger et al. (2022))	53
Abbildung 37: Wärmebilanzen der Modellkläranlage für die drei Betriebsweisen in Abhängigkeit der Faulraumtemperatur und Identifikation von Phasen mit Wärmedefiziten und -überschüssen (verändert nach Steiniger et al. (2021), Steiniger et al. (2022))	56
Abbildung 38: Exemplarischer täglicher Gasanfall über mehrere Jahre einer Kläranlage mit 200.000 EW	61
Abbildung 39: Exemplarischer stündlicher Gasanfall über eine Woche einer Kläranlage mit 200.000 EW im Szenario 1 (Sz1) und 2 (Sz2) (Beispiel).	61
Abbildung 40: stündlicher Gasanfall, Gasspeicherung und Gasverwertung einer Kläranlage mit 200.000 EW (Beispiel)	62
Abbildung 41: Elektrischer BHKW-Wirkungsgrad am Beispiel eines 250 KW Motors im Teillastbetrieb ($kW_{\text{elektr.}}$).....	63
Abbildung 42: stündlicher Gasanfall für die Modellkläranlage des Szenarios 1.....	65
Abbildung 43: stündlicher Gasanfall für die Modellkläranlage des Szenarios 3.....	70
Abbildung 44: Szenario 3 – Strombedarf und Eigenerzeugung nach Eigenbedarf.....	72
Abbildung 45: Strombezugsdaten der Modellanlage mit randomisierten Werten unter Berücksichtigung von definierten Standardabweichungen.	74
Abbildung 46: Gasproduktionsrate der Modellanlage. Durch Vorwärtsauffüllung wurden fehlende Werte ergänzt.....	75
Abbildung 47: Preise für vorgehaltene Leistung im Jahr 2021 (Quelle: Regelleistung.net)	76
Abbildung 48: Einfluss eines Regelenergieabrufes von 71 s (grauer Balken) auf den Gasspeicherfüllstand	77

Abbildung 49: Ergebnisse der Simulation eines Regelenergieabrufes mit einer Dauer von 4.400 s (grauer Balken) bei einem täglichen Gasanfall der dem 25-Quantil entspricht, sowie einem täglichen Stromverbrauch der dem 75-Quantil entspricht	78
Abbildung 50: Ergebnisse der Simulation eines Regelenergieabrufes mit einer Dauer von 4.400 s (grauer Balken) und einem täglichen Gasanfall der dem 75-Quantil entspricht, sowie einem täglichen Stromverbrauch der dem 25-Quantil entspricht	79
Abbildung 51: Ergebnisse der Simulation von 36 Abrufen mit Dauern zwischen 3 und 891 s (grauer Bereich)	80
Abbildung 52: Gasproduktion gemessen (Viertelstundenwerte) und simuliert (mit ADM1-R3, Stundenwerte); Raumbelastung (Tagesdurchschnittswert).....	83
Abbildung 53: Gemessene und simulierte spezifische Methanbildung eines Flotatschlammes (1-Fraktions-Modell 1.Ordnung).....	84
Abbildung 54: Optimierungsergebnis mit dynamischem Eigenbedarf während der EPEX-Hochpreiswoche. Nettogewinn: 4.167,44 €	86
Abbildung 55: Optimierungsergebnis mit dynamischem Eigenbedarf während der EPEX-Niedrigpreiswoche. Nettogewinn: 1.155,05 €	87
Abbildung 56: Heatmap Kläranlage A	90
Abbildung 57: Heatmap Kläranlage B	90
Abbildung 58: Heatmap Kläranlage C	91
Abbildung 59: Teppichdiagramm für Kläranlage A	91
Abbildung 60: Teppichdiagramm für Kläranlage B	92
Abbildung 61: Teppichdiagramm für Kläranlage C	92
Abbildung 62: Kläranlage A – Photovoltaik (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. PV)	93
Abbildung 63: Kläranlage A – Windkraftanlage (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. WEA)	94
Abbildung 64: Kläranlage B – Verdopplung des Gasspeichers (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. verdoppeltem Gasspeicher)	95
Abbildung 65: Kläranlage C: Verdopplung des Gasspeichers (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. verdoppeltem Gasspeicher)	96
Abbildung 66: Gemeinwohlorientierte, multiperspektivische Diskussionsmuster zur lösungsorientierten Einbindung möglichst vieler Stakeholderinteressen	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Gegenüberstellung einer Auswahl von organischen Materialien hinsichtlich TR, GV und spezifischer Methanausbeute (DWA 2009, 2014, 2020b) (Steiniger, 2022)	8
Tabelle 2:	Vergleich einer Auswahl von verfahrenstechnischen Kenndaten und relevanten Aspekten im Betrieb von Faulbehältern auf Kläranlagen und Biogasanlagen (DWA 2014; FNR 2016, 2021)	10
Tabelle 3:	Kennwerte zur Speicherkapazität von Gasspeichern und der Überbauung von BHKW (FNR 2021).....	15
Tabelle 4:	in AP 3 und AP 4 verwendete Messmethoden	24
Tabelle 5:	Betriebsparameter in den Reaktoren FB1 bis FB4	29
Tabelle 6:	Betriebsparameter innerhalb der Versuchsphase.....	32
Tabelle 7:	Betriebsparameter der Versuchsphase 3.....	37
Tabelle 8:	Übersicht und standortspezifische Randbedingungen der Kläranlagen ...	45
Tabelle 9:	Menge, und Frachten des Klär- und Flotatschlammes	60
Tabelle 10:	Abbaugrad des Primär- und Überschussschlammes sowie des Flotatschlammes in der Faulung und Methankonzentration des Faulgasanteils.....	60
Tabelle 11:	Kenndaten der Methanproduktion des Primär- und Überschussschlammes für den Gasanfall des Szenarios 1	64
Tabelle 12:	elektrische Leistung aus Gasanfall mit Schwankungsbreiten des Gasanfalls und der Gasverwertung nach Schwankungsbreiten des Leistungsbedarfes der Kläranlage für Szenario 1	66
Tabelle 13:	elektrische Leistung aus Gasanfall mit Schwankungsbreiten des Gasanfalls und der Gasverwertung nach Schwankungsbreiten des Leistungsbedarfes der Kläranlage für Szenario 2.....	68
Tabelle 14:	Kenndaten der Methanproduktion des Primär-, Überschuss- und Flotatschlammes für den Gasanfall des Szenarios 3.....	70
Tabelle 15:	elektrische Leistung aus Gasanfall mit Schwankungsbreiten des Gasanfalls und der Gasverwertung nach Schwankungsbreiten des Leistungsbedarfes der Kläranlage für Szenario 3	73
Tabelle 16:	Kenngößen der Kläranlage für die nachfolgenden Betrachtungen.....	74
Tabelle 17:	Eckdaten der beiden EPEX-Preiswochen.....	85

Tabelle 18: Zusammenfassung der Auswirkungen verschiedener Parameter auf den Selbstversorgungsgrad der Kläranlagen im Vergleich zum Bestand97

Kurzzusammenfassung

Das Projekt *Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger (FLXsynErgy)* hatte das Ziel, Hinweise für eine weitestgehend energetische Nutzung biogener Reststoffe bereitzustellen. Dabei wurde neben der elektrischen Verstromung des anfallenden Faulgases auch eine effiziente Nutzung der anfallenden Wärmeenergie untersucht. Die betrachteten Kernkonzepte stellen dabei eine bedarfsgerechte Substratzugabe und Faulgaserzeugung dar, sowie die Nutzung der Faulung als Wärmespeicher. Darüber hinaus wurde untersucht, wie die Eigenstromnutzung erhöht werden kann, welche Auswirkungen eine Partizipation am Regelenenergiemarkt auf den Gasspeicher und die erforderlichen Gasmengen hat und welches Potential für Kläranlagen bezüglich einer Teilnahme am Day-Ahead-Markt besteht. Umrahmt wurde das Projekt von einer sozio-ökologischen Untersuchung. In dieser Untersuchung wurden Hemmnisse einer technologischen Umsetzung in der Praxis bewertet. Neben den wissenschaftlichen Fragestellungen, wurde auch im Rahmen von Workshops Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Biogasanlagen und Faulungsanlagen diskutiert. Das Projekt gliederte sich in 6 Arbeitspaketen (AP). Im ersten AP wurden Definitionen und Begrifflichkeiten harmonisiert. In AP 2 erfolgte ein Wissenstransfer zwischen Faulgasanlagen und Biogasanlagen. In AP 3 erfolgten die labortechnischen Untersuchungen zur bedarfsgerechten Faulgaserzeugung. Es wurden verschiedene Beschickungsstrategien unter Anwendung verschiedener Co-Substrate untersucht. Im Rahmen des Arbeitspaketes konnte die Möglichkeit zur bedarfsgerechten Faulung anhand von Betriebsparametern eingegrenzt werden sowie die Auswirkungen der Beschickung auf die Entwässerungseigenschaften des Faulschlammes bewertet werden. Zudem wurde die Lagerungsfähigkeit verschiedener Substrate untersucht und Hinweise zur Lagerung gegeben. Versuche zum Betrieb der Faulung bei unterschiedlichen Temperaturen erfolgte in AP 4. Ergänzt wurden die Untersuchungen um die Auswertung großtechnischer Anlagen. Es konnten Hinweise zu tolerierbaren Temperaturänderungsraten gegeben sowie der Mehrwert einer saisonalen Anpassung der Faulraumtemperatur dargestellt werden. Die Untersuchungen zur Erhöhung der Eigenstromnutzung, den Auswirkungen einer Teilnahme am Regelenenergiemarkt sowie Untersuchungen zum Potential einer Day-Ahead-Vermarktung erfolgte in AP 5. Es zeigte sich, dass der Einfluss der Regelenergie auf den Anlagenbetrieb von untergeordneter Rolle ist. Für den gegebenen Untersuchungsrahmen war die Deckung des Eigenstrombedarfes höherwertiger als die Teilnahme am Day-Ahead-Markt. Ab Marktpreisen > 400 €/MWh gewann in den untersuchten Szenarien der Day-Ahead-Markt zunehmend an Bedeutung. Zudem konnte aufgezeigt werden, wie PV und Windkraftanlagen durch eine Optimierung des BHKW-Betriebes sinnvoll integriert und den Eigenstromversorgungsgrad von Anlagen gezielt erhöhen können. In AP 6 erfolgten schließlich die sozio-ökologischen Untersuchungen. Die Ergebnisse werden in einem Impulspapier/Handlungsempfehlung zusammengeführt und in Papierform sowie als Onlinedokument kostenfrei der Fachöffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Vorwort

Kläranlagen sind für die moderne Zivilisation unerlässlich. Die Reinigung von Abwasser sorgt für den Erhalt der hohen Wasserqualität von Gewässern und verhindert zudem die Verbreitung von Krankheiten. Zusätzlich können Kläranlagen, gemeinsam mit Biogasanlagen, einen wichtigen Beitrag zur Energiewende leisten. Das im Prozess der Klärschlammbehandlung entstehende Faulgas kann in elektrische wie thermische Energie umgewandelt werden. Diese kann für den Eigenbedarf oder gar für externe Verbraucher bereitgestellt werden. Vielfach wird dieses vorhandene Potenzial zur Gewinnung von Energie allerdings nicht gänzlich ausgeschöpft.

Das Verbundprojekt FLXsynErgy - Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger - verfolgte mit einem interdisziplinären Projektteam den ganzheitlichen Ansatz die Flexibilisierung von Kläranlagen zu untersuchen. In den vergangenen drei Jahren wurden in den verschiedenen Arbeitspaketen Lösungsansätze entwickelt: Angefangen von einem Wissenstransfer zwischen Kläranlagen über Biogasanlagen, über die verfahrenstechnischen Lösungsansätze zur bedarfsgerechten Faulgaserzeugung und der Nutzung der Faulung als Wärmespeicher sowie den Umsetzungsmöglichkeiten in der Praxis einschließlich einer Interaktion mit dem Energiemarkt bis hin zur Adressierung sozio-ökologischer Fragen.

Die vergangenen drei Jahre waren auch mit Herausforderungen verbunden, insbesondere waren die ersten Monate durch die Corona-Pandemie, mit den daraus resultierenden Einschränkungen, geprägt. Diese Herausforderung wurde auch als Chance genutzt bspw. durch die Umsetzung von virtuellen Workshops, die eine Teilnahme von Expertinnen und Experten aus ganz Deutschland ermöglichte.

Der Klimawandel stellt eine gesamt gesellschaftliche Herausforderung dar. Der Erfolg zur Eingrenzung der Folgen hängt im großen Maße von dem Umfang der Beteiligung aller Akteure ab. Dies umfasst auch Kläranlagen, welche mit ihrer bereits vorhandenen Infrastruktur einen Beitrag leisten können. Sei es durch einen verantwortungsbewussten Einsatz der Energie, durch Anpassung des Verbrauchsverhaltens durch eine mögliche Teilnahme am Day-Ahead-Markt oder durch Vorhalten von Leistungsreserven um als Systemdienstleister am Regelenergiemarkt zu partizipieren.

Der Abschlussbericht fasst die Forschungsergebnisse zusammen auch mit dem Hinweis auf noch offene Fragestellungen für die Zukunft.

Danksagung

FLXsynErgy - Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz innerhalb des 7. Energieforschungsprogramms im Themenfeld „Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe“ gefördert.

FLXsynErgy wurde begleitet durch den Projektträger Jülich. Ganz herzlichen Dank an Frau Panning für die Unterstützung bei der Projektabwicklung.

Ein besonderer Dank gilt den assoziierten Partnern, die das Projekt von der Antragsphase bis zum Projektabschluss unterstützt haben, vor allem durch die Bereitstellung von Betriebsdaten, Unterstützung und Bereitstellung von Klärschlamm- und Substratproben sowie als Diskussionspartner:

- Gemeindliche Einrichtungen und Abwasser Holzkirchen
- Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Raum Ochsenfurt
- Abwasserzweckverband Kempten
- Stadtentwässerung Rosenheim
- Münchner Stadtentwässerung
- Entsorgungsbetriebe der Landeshauptstadt Wiesbaden
- Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg
- Next Kraftwerke GmbH

Darüber hinaus haben zahlreiche weitere Institutionen, wissenschaftliche Einrichtungen, Betreiber von Kläranlagen, Behörden sowie Ingenieurbüros FLXsynErgy unterstützt, insbesondere als Diskussionspartner im Rahmen der durchgeführten Workshops

Die Digitale Dialogplattform zur sozial-ökologischen Transformation („DigiLog“), auf dem im Rahmen von AP 6 umweltethische Reflexionen zu FLXsynErgy veröffentlicht wurden, wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) finanziert.

Die Forschungsarbeit der Universität der Bundeswehr München erfolgte zusammen mit dem Labor der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Prof. Dr.-Ing. Steffen Krause (wissenschaftlicher Laborleiter), Marcel Hagen (technischer Laborleiter) sowie Hannelore Bauer, Karolina Eggersdorfer, Sybille Rupertseder und Renate Solmsdorf. Darüber hinaus war FLXsynErgy in das Forschungszentrum RISK - Risiko, Infrastruktur, Sicherheit, Konflikt der Universität der Bundeswehr München integriert.

Allen die FLXsynErgy in vielfältiger Weise unterstützt und gefördert haben, gilt ein ausdrücklicher Dank.

I. Kurze Darstellung

1 Aufgabenstellung

Das Forschungsvorhaben „*Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger (FLXsynErgy)*“ war Teil des 7. Energieforschungsprogramms „Innovationen für die Energiewende“, indem der Technologie- und Innovationstransfer umgesetzt sowie systemübergreifende Fragestellungen beantwortet werden. Mit dem Förderschwerpunkt „Energetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe“ standen die anwendungsnahe Erprobung von effizienten Technologien zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung, insbesondere auch deren gekoppelte Nutzung (Kraft-Wärme-Kopplung, KWK) im Fokus. Zudem wurden in FLXsynErgy die Förderschwerpunkte „Stromspeicher“, „Sektorkopplung“ und „Energiewende und Gesellschaft“ mit eingebunden.

Die übergeordnete Zielstellung von *FLXsynErgy* war die Entwicklung von praxisorientierten Handlungsempfehlungen für die flexible vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe auf Kläranlagen. Hierzu wurden fünf Oberziele abgeleitet, die auf eine Systembetrachtung aller Energieströme über die Grenzen der Kläranlagen unter Berücksichtigung von technischen, rechtlichen, sozio-ökonomischen und ethischen Aspekten abzielt:

- (A) Entwicklung von Bemessungsansätzen zur vollenergetischen Substratnutzung
- (B) Wissenstransfer zwischen Kläranlage (Faulung) und Biogasanlage
- (C) Flexibilisierung im Kontext der Energiewirtschaft
- (D) Ganzheitliche Bewertung der energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen

2 Planung und Ablauf des Vorhabens

FLXsynErgy gliedert sich u. a. in zwei Bausteine; einerseits dem Baustein „Flexibilisierung Faulung“, andererseits dem Baustein „Energiewirtschaft“. Als Grundlage und Harmonisierung der beiden Bausteine wurde ein grundlegendes Arbeitspaket (AP 1) definiert. Umrahmt wurden die Bausteine von den Arbeitspaketen „Akzeptanz und Transfer“. Die Projektkommunikation und -koordination (AP K) sollte die enge Verzahnung sowohl organisatorisch als auch wissenschaftlich sowie den reibungslosen Ablauf des Projektes gewährleisten. Insgesamt ist das Projekt in sieben Arbeitspakete untergliedert.

In AP 1 wurden gemeinsame Definitionen/Harmonisierungen der Ausgangs- und Datenbasis zur Bearbeitung der Forschungsfragen von FLXsynErgy festgelegt, u. a. bezogen auf eine einheitliche Verwendung von Begrifflichkeiten (insbesondere für die Zusammenarbeit der verschiedenen Fachdisziplinen), Ableitung von Anforderungsprofilen (sowohl energetisch als auch verfahrenstechnisch) und Methoden für (Betriebs-)Datenauswertungen.

In AP 2 wurde das vorhandene Wissen aus dem Biogasbereich im Hinblick auf die Modellierung anaerober Prozesse und einer Marktbeteiligung am Day-Ahead-Markt auf die gegebenen Randbedingungen der Kläranlagen übertragen.

In AP 3 erfolgten im Wesentlichen labortechnische Untersuchungen zu einer bedarfsge- rechten Substratzugabe in die Faulung. Besonderer Fokus wurde auf die Auswirkungen einer diskontinuierlichen Beschickung auf die Prozessstabilität, Gasertrag und Gasqualität sowie dem Einfluss auf die Entwässerungseigenschaften gelegt.

Eine Untersuchung wie variabel die Faulung im Hinblick auf Temperaturveränderungen be- trieben werden kann erfolgte in AP 4.

In AP 5 erfolgte die Betrachtung, wie die vorhandene Flexibilität genutzt werden kann, um an den verschiedenen Strommärkten aktiv zu werden.

In AP 6 erfolgte projektbegleitend die Untersuchung der Akzeptanz einer energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen. Eine schematische Übersicht der Herangehensweise kann **Abbildung 1** entnommen werden.

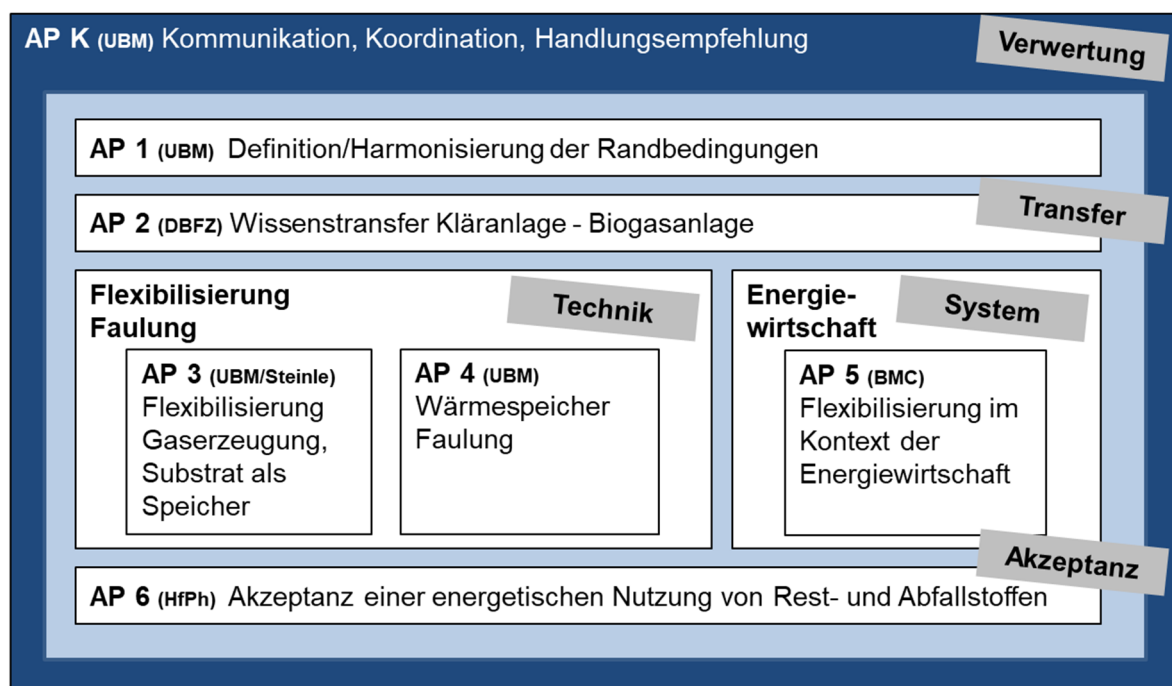


Abbildung 1: Darstellung der Arbeitspakete im Rahmen von FLXsynErgy

3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Mit dem Klimaschutzplan 2050 gibt die Bundesregierung eine Modernisierungsstrategie für die Transformation zum kohlenstoffarmen Wirtschaften in Deutschland vor. Die dort definierten Klimaschutzziele beinhalten eine vollständige Energieversorgung bis 2050 durch erneuerbare Energien auf allen Anwendungsgebieten, wofür alle Energieeffizienzpotentiale angeschlossen, erneuerbare Energien ausgebaut und Sektorkopplungstechniken zur Dekarbonisierung integriert werden (Bundesregierung 2016). Im Positionspapier des Umweltbundesamts (UBA) „Klimaschutz und Abwasserbehandlung – Sinnvolle Beiträge zur Energiewende“ (UBA, 2018) wird in diesem Zusammenhang die besondere Stellung von Kläranlagen betont, wobei selbstverständlich Biogasanlagen ebenfalls einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende beitragen.

Der Betrieb von Kläranlagen erfordert den Einsatz sowohl von elektrischer als auch thermischer Energie, sodass diese häufig lokale Großenergieverbraucher sind und gleichzeitig ein hohes Potential bieten, den Energieverbrauch zu reduzieren, die Effizienz zu steigern und durch die Faulgasproduktion fossile Energieträger einzusparen. Das UBA geht davon aus, dass bei Kläranlagen noch ungenutzte Potenziale im Elektrizitätssektor von rd. 2 TWh/a bestehen, wobei das Potential mit Berücksichtigung der Wärme um ein Vielfaches höher ist (UBA 2018). Insbesondere Kläranlagen mit Faulbehältern, ebenso wie Biogasanlagen, bieten mit den vorhandenen KWK-Anlagen und den Gasspeichern optimale technische Voraussetzungen, um einerseits biogene Rest- und Abfallstoffe (sogenannte Co-Substrate und Rohschlamm) flexibel und vollenergetisch zu verwerten und andererseits als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger, insbesondere an der Schnittstelle zu weiteren Energiesystemen, zu agieren.

Mit Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) 2012 wurde erstmalig die Flexibilisierung von Faulungs- und Biogasanlagen mit dem finanziellen Anreiz einer Flexibilitätsprämie gesetzlich verankert. Der Begriff „Flexibilität“ ist im Kontext der Interaktion mit Energiesystemen allgemein als die Fähigkeit einer technischen Anlage, ihre elektrische Leistungsaufnahme oder -abgabe aufgrund eines externen Signals kurzfristig für einen begrenzten Zeitraum anzupassen, zu verstehen (Elsner 2015). Kläranlagen halten aufgrund von Belastungsschwankungen ohnehin Flexibilitäten in der Betriebsweise vor, wobei im Wesentlichen KWK-Anlagen in Kombination mit Gasspeichern aber auch die Einbindung von Netzersatzanlagen in virtuelle Kraftwerke als Flexibilisierungsbausteine genutzt werden.

In den vergangenen Jahren erfolgten zahlreiche Untersuchungen zur Flexibilisierung von Biogasanlagen, wobei mittlerweile mehrere Konzepte der Flexibilisierung von Biogasanlagen unterschieden werden (Hahn *et al.* 2014), wie z. B. Nutzung und/oder Zubau von Gasspeicher- und KWK-Kapazitäten, modellgestützte Fütterung von schnell abbaubaren Substraten (Weinrich und Nelles 2015; Mauky *et al.* 2016; Mauky *et al.* 2017). Wenngleich, prozess- und verfahrenstechnisch betrachtet, landwirtschaftliche/abfallwirtschaftliche Biogasanlagen

und Faulungen auf Kläranlagen ähnlich sind, findet zwischen den Fachgebieten kaum ein Wissenstransfer, insbesondere im Bereich der Flexibilisierung, statt. Insbesondere die Synergieeffekte der Flexibilisierung der Faulung auf Kläranlagen und von Biogasanlagen bleiben derzeit weitestgehend ungenutzt.

Darüber hinaus spielt auch die breitere politisch-gesellschaftliche Debatte der energetischen Nutzung von biogenen Ressourcen von diversen Interessensgruppen und der Öffentlichkeit eine entscheidende Rolle und legt zugleich die Notwendigkeit der Berücksichtigung von rechtlichen, sozio-ökonomischen und ethischen Aspekten in diesem Themenfeld offen.

4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Für die Bearbeitung wurde von verschiedenen Kläranlagen, insbesondere von den assoziierten Partnern, Betriebsdaten zur Verfügung gestellt. Dies betraf vor allem die Auswertungen, die im Rahmen von AP 4 und AP 5 gemacht wurden.

Zur Durchführung der Versuche in AP 3 und AP 4 waren entsprechende Rohschlammengen und Co-Substrate erforderlich. Rohschlamm wurde von der Kläranlage Holzkirchen und Co-Substrate von einer bayerischen Großmolkerei bezogen.

Eine enge Zusammenarbeit erfolgte mit der NextKraftwerke GmbH, die bei der Auswertung von Marktdaten, sowie der Erklärung von Marktmechanismen ihr Wissen zur Verfügung stellten. Zudem hat Nextkraftwerke entsprechende Marktdaten bereitgestellt.

Am 08.12.2021 fand ein Online-Workshop zum vertieften Austausch mit den assoziierten Partnern zu den Tagesordnungspunkten „Vorstellung des Projektkonsortiums“, „Zielsetzung des Projekts“ und dem „geplanten Vorgehen“ statt. Die 17 Teilnehmerinnen und Teilnehmer hatten die Möglichkeit mittels interaktivem Online-Whiteboard die Erwartungen, spezifische Wünsche und Interessen zu teilen.

Am 12.01.2022 fand ein Online-Workshop mit dem Titel „Flexibilisierung von Biogas/Faulgasanlagen – Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden“ mit 28 Expertinnen und Experten statt. Der Schwerpunkt lag auf den Themen Chancen, Hemmnissen und Wünschen für eine zukünftige Flexibilisierung auf Faulungs- und Biogasanlagen.

In der Online-Veranstaltung im Rahmen der Veranstaltungsreihe rAusblick zum Thema „Klärschlamm – grüne Energie aus dem Faulturm?“ veranstaltet von der Domberg Akademie am 22.03.2022 erfolgte in einem gemeinsamen Dialog zwischen der Philosophie und den Ingenieurwissenschaften eine Diskussion zu FLXsynErgy.

Eine Zusammenarbeit erfolgte zudem mit dem Begleitvorhaben, mit deren Unterstützung am 05.07.2023 ein Online-Workshop zur Überarbeitung und Erweiterung der Messmethodensammlung durchgeführt wurde.

II. Eingehende Darstellung

1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1 AP 1/ AP 2 - Definition/Harmonisierung der Randbedingungen und Wissenstransfer zwischen Kläranlagen und Biogasanlagen

1.1.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Faulungs- und Biogasanlagen

Struktur der beiden Branchen und Zielsetzungen

Faulungs- und Biogasanlagen tragen durch die Umwandlung der in der Biomasse gespeicherten Energie zu Faul- bzw. Biogas unter anaeroben Bedingungen und dessen Verstromung in Blockheizkraftwerken einen wichtigen Anteil an der Bereitstellung von Strom und Wärme durch erneuerbare Energien. Im Gegensatz zur Solarenergie und Windkraft, ist die Erzeugung von Strom und Wärme aus Biogas witterungsunabhängig, grundlastfähig und steuerbar. Für das Jahr 2020 betrug der Anteil aus Faulgas rd. 0,7 % und aus Biogas rd. 12 % an der Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien (EE) in Deutschland (BMWi 2021).

Allein in Deutschland werden 9.105 Kläranlagen betrieben, von denen 1.271 Anlagen Faulgas und 88 % davon Strom und Wärme erzeugen (Daten: 2019) (DESTATIS 2020a). Dem gegenüber stehen ca. 8.600 Biogasanlagen und 245 Biogasaufbereitungsanlagen (Stand: 2021) (Rensberg et al. 2023). Während Kläranlagen i. d. R. von öffentlichen Betreibern bzw. Verbänden organisiert werden, sind Betreiber von Biogasanlagen i. d. R. privatwirtschaftliche Unternehmen. Dies führt trotz dem verbindenden anaeroben Abbau und der vergleichbaren Betriebsparameter (wie z. B. spez. Faulgasproduktion, Abbaugrade, Gaszusammensetzung, etc.) zu unterschiedlichen Beweggründen um Faulbehälter auf Kläranlagen bzw. Biogasanlagen zu betreiben. Faulbehälter stehen dabei in unmittelbarem Zusammenhang mit der Abwasserbehandlung auf Kläranlagen, wodurch sich das Eigenverständnis des Aufgabenspektrums auf Kläranlagen in erster Linie auf die Behandlung des im Einzugsgebiet anfallenden Abwassers zum Schutz des Gewässers bezieht. Das primäre Ziel des Betriebs von Faulbehältern auf Kläranlagen ist die Stabilisierung und Verringerung des zu entsorgenden Klärschlammes, während die Erzeugung von Strom und Wärme im Fokus des Betriebs auf Biogasanlagen steht. Die Energieerzeugung auf Kläranlagen, zwar auch ein wichtiger Aspekt, wird der Stabilisierung oftmals untergeordnet oder gleichgesetzt. In **Abbildung 2** sind die wesentlichen Fakten der Faulung auf Kläranlagen mit Biogasanlagen gegenübergestellt.

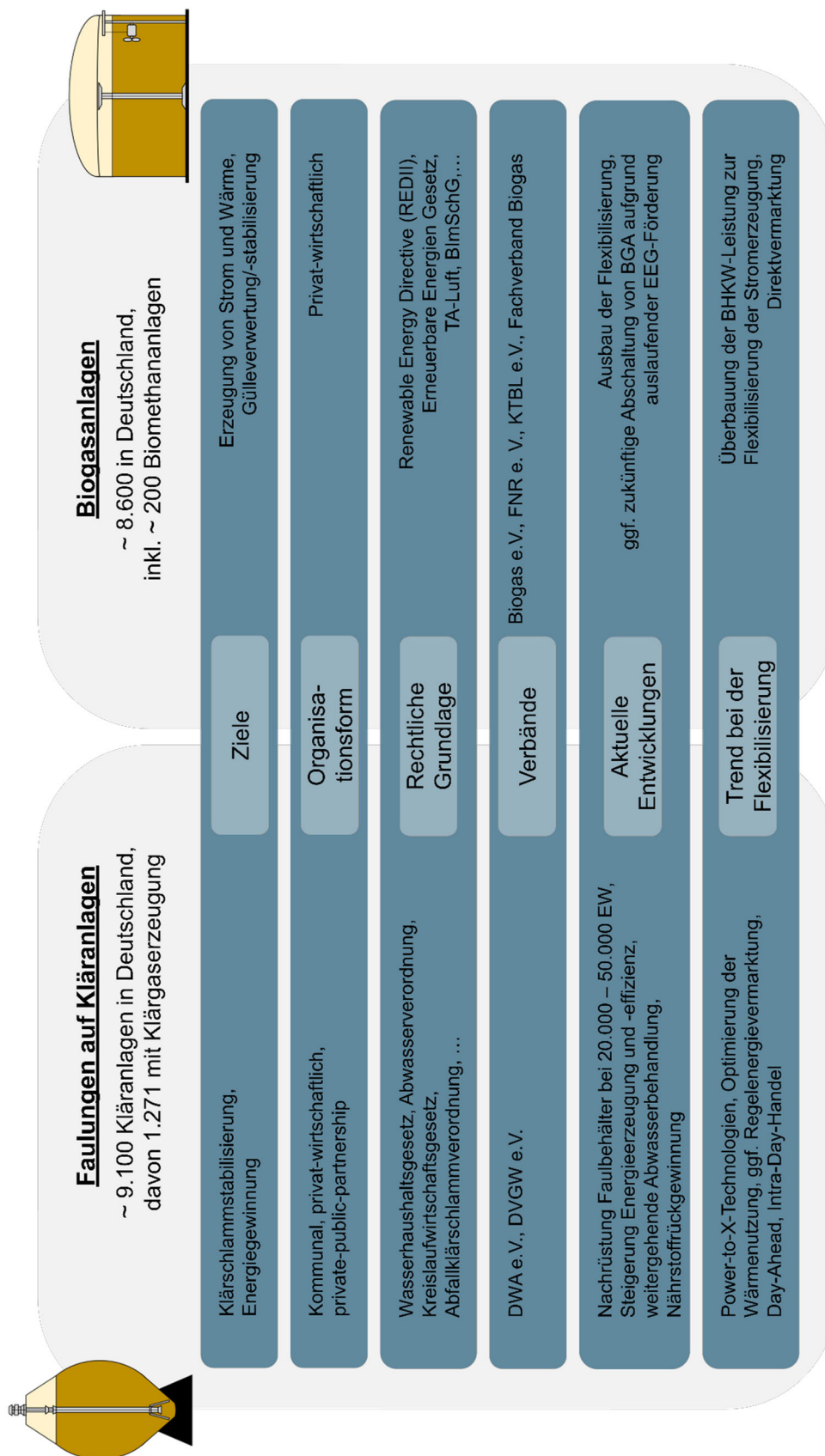


Abbildung 2: Factsheet Faulbehälter auf Kläranlagen vs. Biogasanlagen

Verfahrenstechnische Umsetzung

Sowohl Faulbehälter auf Kläranlagen als auch Biogasanlagen basieren auf dem grundlegenden Prozess des anaeroben Abbaus von unterschiedlichen, organischen Substraten, wobei sich Faulbehälter auf Kläranlagen und landwirtschaftliche/abfallwirtschaftliche Biogasanlagen in der Prozessführung und teilweise in der Verfahrenstechnik ähneln. Während bei den Biogasanlagen einerseits zwischen Trocken- und Nassfermentation und andererseits zwischen abfall- und landwirtschaftlichen Biogasanlagen unterschieden wird, gibt es für Faulbehälter auf Kläranlagen nur ein grundsätzliches Anlagenkonzept, das um die Co-Vergärung ergänzt werden kann. Die grundlegenden, verfahrenstechnischen Anordnungen sind am Beispiel von Faulungs- und landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Nassfermentation in **Abbildung 3** schematisch skizziert.

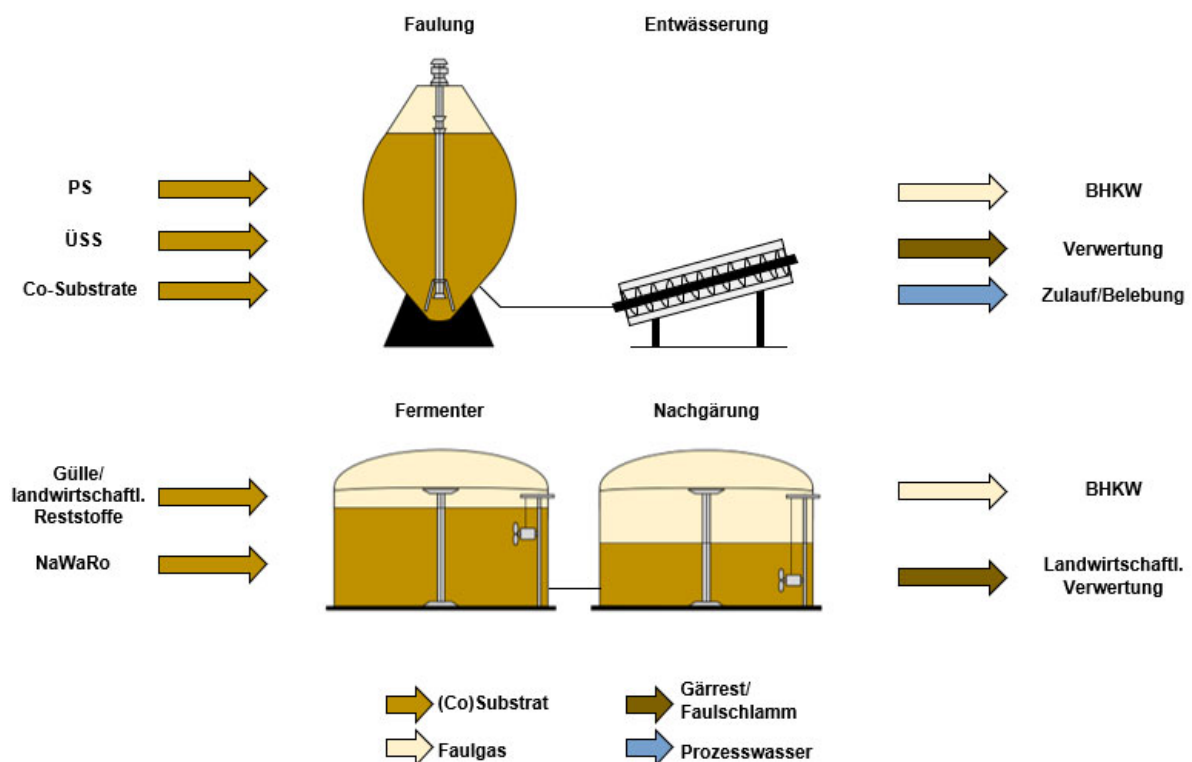


Abbildung 3: Vereinfachter verfahrenstechnischer Vergleich Faulungs- und landwirtschaftlicher Biogasanlagen (Primärschlamm (PS), Überschussschlamm (ÜSS), Nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo)) (Steiniger, 2022)

Substrate

Als Substrate werden für Faulbehälter auf Kläranlagen die bei der Abwasserreinigung anfallenden Klärschlämme eingesetzt, während auf Biogasanlagen je nach Art der Anlage (abfall- oder landwirtschaftliche Biogasanlagen) entweder organische Abfälle und industrielle Reststoffe bzw. Wirtschaftsdünger, landwirtschaftliche Reststoffe und nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo) gefüttert werden. Die Klärschlämme werden vor der Beschickung statisch bzw. maschinell eingedickt. Die Vorbehandlung der Substrate auf Biogasanlagen, wie für Co-Substrate auf Kläranlagen, umfasst die (in Abhängigkeit der lokalen Erfordernisse) Störstoffabtrennung, Zerkleinerung und Anmischung sowie weitere physikalisch-chemische bzw. biochemische Aufschlussverfahren (Schumacher *et al.* 2014). Eine Auswahl von eingesetzten Substraten für Faulbehälter auf Kläranlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen ist in **Tabelle 1** dargestellt.

Tabelle 1: Gegenüberstellung einer Auswahl von organischen Materialien hinsichtlich TR, GV und spezifischer Methanausbeute (DWA 2009, 2014, 2020b) (Steiniger, 2022)

	Substrate	TR [%]	GV [%]	Spez. Methanertrag [NL CH ₄ /kg oTR]
Faulbehälter	Rohschlamm	3 - 6	~ 73	~ 286 ¹
	Fettabscheiderinhalte	2 - 70	69 - 99	600 - 700
	Speiseabfälle	9 - 37	74 - 98	400 - 500
Biogasanlage	Rindergülle	6 - 11	68 - 85	150 - 220
	Maissilage	~ 30	~ 95	250 - 350
	Futtermüllsilage	12 - 15	~ 80	300 - 350
	Getreidestroh	85 - 90	85 - 89	~ 200

Anmerkung:

¹ mit 440 NL/kg oTR bei einem Methangehalt von 65 %

Eine detaillierte Erfassung der beschickten Substratmengen auf Kläranlagen existiert nicht. Für Biogasanlagen werden auf Basis einer Hochrechnung einer Betreiberbefragung für das Bezugsjahr 2017 rd. 67 Mio. t FM Energiepflanzen, 53 Mio. tierische Exkremente sowie 1,6 bis 2 Mio. t. FM Bio- und Grünabfall gefüttert (Daniel-Gromke 2020).

Bauformen und Durchmischung

Im Detail unterscheiden sich die Bauform und Ausrüstung von Faulbehältern auf Kläranlagen und Biogasanlagen. Während die Faulbehälter auf Kläranlagen entweder als Zylinder mit oberem und unterem Konus oder als Eiform konstruiert sind, werden Biogasanlagen zur Nassfermentation (TR < 15 %) i. d. R. als Zylinder und jene Biogasanlagen zur Fermentation von Bioabfällen und landwirtschaftlichen Reststoffen (TR von rd. 15 bis 40 %) als sogenannten Garagen- oder Boxenfermentern gebaut. Nach der bundesweiten Befragung von Betreibern von Biogasanlagen betreiben rd. 90 % eine Nassfermentation (FNR 2021).

Die Durchmischung wird an Faulbehältern entweder über eine außenliegende Umwälzpumpe, Faulschlammischer (z. B. Schraubenschaufler), außenliegende Verdichter zur Faulgaseinpressung oder einem Rührwerk realisiert (DWA 2014). Die besondere Bauform der Faulbehälter dient sowohl einer optimalen Durchmischung als auch der Vermeidung von Schwimmdecken, dem Eindringen von Schaum in die Gasleitungen und Bodenablagerungen (DWA 2014). Bei Biogasanlagen zur Nassfermentation werden i. d. R. Rührwerke und Umwälzpumpen eingesetzt, wobei die Einpressung von Biogas zur Durchmischung nur eine untergeordnete Rolle spielt (FNR 2016).

Verfahrenstechnische Kenndaten

Eine Auswahl von verfahrenstechnischen Kenndaten von Faulbehältern auf Kläranlagen und Biogasanlagen ist in **Tabelle 2** gegenübergestellt. Die Zusammenstellung zeigt, dass die Datendichte für verfahrenstechnische Kenndaten in der Praxis in beiden Branchen sehr unterschiedlich ist. Mit dem Biogas-Messprogramm III der FNR (2021) existiert eine detaillierte Auswertung von 618 Betreibern von Biogasanlagen in Deutschland im Jahr 2016, wobei sich wiederum 345 Betreiber zur Teilnahme am Messprogramm bereit erklärt haben. Für Kläranlagen wird jährlich ein Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen von der DWA durchgeführt, an diesen haben beispielsweise 5.220 Kläranlagen im Jahr 2020 teilgenommen. Die Leistungsvergleiche beinhalten Angaben zur Qualität der Abwasserreinigung einschl. Kenndaten und nehmen zudem jährlich wechselnd einen weiteren Aspekt in den Fokus (z. B. Entwicklung des Stromverbrauchs, Faulgasanfall – Eigenstromerzeugung, Klärschlammmanfall). Die dort aufgeführten Kenndaten werden i. d. R. bezogen auf die an die Kläranlage angeschlossene Einwohnerzahl angegeben, sodass eine Gegenüberstellung mit den Kenndaten von Biogasanlagen nicht zielführend ist. Eine detaillierte Zusammenstellung von verfahrenstechnischen Daten der Faulbehälter auf Kläranlagen aus dem praktischen Betrieb existiert derzeit nicht. Für die Gegenüberstellung in **Tabelle 2** sind Vorgaben für die Dimensionierung bzw. Literaturwerte von Faulbehältern auf Kläranlagen angegeben, während für Biogasanlagen zusätzlich zwischen Empfehlungen und Literaturwerten sowie den Ergebnissen aus dem Biogas-Messprogramm III differenziert wird.

Tabelle 2: Vergleich einer Auswahl von verfahrenstechnischen Kenndaten und relevanten Aspekten im Betrieb von Faulbehältern auf Kläranlagen und Biogasanlagen (DWA 2014; FNR 2016, 2021)

Parameter	Einheit	Faulbehälter	Biogasanlagen	
		Empfehlungen/ Literaturwerte	Empfehlungen/ Literaturwerte	Biogas-Mess- programm III
Temperatur Faulung	°C	35 – 37 °C (i. d. R.) 50 – 55 °C (vereinzelt)	37 – 42 °C 50 – 60 °C	≥ 35 – 42 (30 %) ⁴ > 42 – 48 (52 %) ⁴ > 48 – 55 (18 %) ⁴
Verweilzeit	[d]	16 bis 28 (einstufig) ¹ 12 bis 19 (zweistufig) ¹	150 ¹ (für Neubauten ab EEG 2017)	45 – 100, ø 67 (einstufig) 36 – 231, ø 100 (zweistufig)
Raum- belastung	[kg oTR/ (m ³ ·d)]	1,0 – 1,7 ¹ (einstufig) 2,9 – 4,5 ¹ (zweistufig)		ø 2,5 ² (einstufig) ø 2,6 (zweistufig)
Spez. Methan- produktion	[L CH ₄ / kg oTR _{zu}]	286 ³ (RS)		291 – 425, ø 361 (je nach Substrat)
Gaszusam- mensetzung	[% CH ₄] [% CO ₂]	~ 65 ³ ~ 35 ³	50 – 75 25 - 50	46,8 – 60,3, ø 52 (je nach Substrat) -
oTR- Abbaugrad	[%]	~ 48 ³ (RS) ~ 60 ³ (PS) ~ 38 ³ (ÜSS)		50 – 90, ø 80 (je nach Substrat)
<p>Anmerkung:</p> <p>¹ Vorgaben für Dimensionierung</p> <p>² Anlagen bei mittlerer Raumbelastung; Spannbereite von 1,2 – 17, ø 5,7 für einstufige bzw. erste Stufe bei mehrstufigen Anlagen</p> <p>³ Literaturwerte</p> <p>⁴ Prozentangaben entsprechen der relativen Häufigkeit der Biogasanlagen</p>				

Grundsätzlich orientieren sich die Temperaturen in Faulbehältern und Biogasanlagen an den meso- und thermophilen Temperaturoptima der am anaeroben Abbau beteiligten Biozönose. Die Faulbehälter auf Kläranlagen werden bei einer möglichst konstanten Temperatur, i. d. R. zwischen 35 und 37 °C und nur vereinzelt zwischen 50 und 55 °C, betrieben. Nach DWA (2014) kann zudem die Zwischenspeicherung von überschüssiger Wärme in den Sommermonaten zur Erhöhung der Faulraumtemperatur genutzt werden, sofern Temperaturänderungen kleiner als 2 °C pro Woche eingehalten werden, vgl. auch AP 4 (Kapitel 1.4). Bei Biogasanlagen zeigt sich aus dem Biogas-Messprogramm III, dass rd. 70 % der Anlagen Faulraumtemperaturen über 42 °C betreiben. Während die Selbsterwärmung beim Abbau von Rohschlamm in Faulbehältern eine untergeordnete Rolle spielt, tritt diese insbesondere beim Abbau von kohlenhydrathaltigen Substraten und gut isolierten Behältern auf.

Die Verweilzeit bedingt den Kompromiss zwischen wirtschaftlichem Aufwand und Optimum an Abbauleistung. Die Verweilzeit in Faulbehältern auf Kläranlagen wird in Abhängigkeit der an die Kläranlage angeschlossenen Einwohner zwischen 16 und 28 Tagen für einstufige und zwischen 12 und 19 Tagen für zweistufige Anlagen ausgelegt (DWA 2014). Neugebaute Biogasanlagen sind ab dem EEG (2012) auf Verweilzeiten von mindestens 150 Tagen auszulegen. Faulbehälter auf Kläranlagen werden auf organische Raumbelastungen von 1,0 bis 1,7 kg oTR/(m³·d) für einstufige und von 2,9 bis 4,5 kg oTR/(m³·d) für zweistufige System ausgelegt (in Abhängigkeit von der Anzahl an angeschlossenen Einwohnern an die Kläranlage) (DWA 2014). Für Biogasanlagen gibt es keine konkreten Vorgaben für die Dimensionierung. Aus dem Biogas-Messprogramm III geht hervor, dass die durchschnittliche Raumbelastung bei einstufigen Biogasanlagen im Mittel bei 2,5 kg oTR/(m³·d) liegt.

Im Kontext der Auslastung von Faulbehältern ergeben sich vielerorts freie Faulraumkapazitäten aufgrund von Veränderungen im Einzugsgebiet der Kläranlage (rückläufige Bevölkerungsentwicklung, Strukturwandel in Industrie und Gewerbe), technischen Fortschritts (Weiterentwicklung Klärschlammeindickung) und/oder Überdimensionierung (Zeig 2013). Diese stehen grundsätzlich der Mitbehandlung von Co-Substraten zur Verfügung oder können mit Erhöhung des Feststoffgehalts des Rohschlammes ausgedehnt werden.

Die Methanerträge und erzielbare Abbaugrade auf Faulungs- und Biogasanlagen sind stark von den eingesetzten Substraten und deren Zusammensetzung von Kohlenhydraten, Proteinen und organischen Fetten abhängig. Zugegebener Rohschlamm in Faulbehältern erzielt mit einem Methangehalt von rd. 65 % einen spezifischen Methanertrag von 286 L CH₄/kg oTR, wobei Co-Substrate wie Fettabscheiderinhalte und Speiseabfälle spezifische Methanerträge zwischen 600 bis 700 L CH₄/kg oTR bzw. 400 bis 500 L CH₄/kg oTR erzielen. Biogasanlagen mit hohem Gülleanteil erzielen im Mittel rd. 200 L CH₄/kg oTR einen eher geringen spezifischen Methanertrag im Vergleich zu Biogasanlagen mit einem hohen Anteil an NaWaRo mit im Mittel rd. 400 L CH₄/kg oTR einen höheren spezifischen Methanertrag. Die erzielbaren Abbaugrade liegen bei Biogasanlagen mit Werten von im

Mittel 80 % höher als jene des Literaturwerts von Rohschlamm. Aus dem Biogas-Messprogramm III geht hervor, dass beispielsweise Biogasanlagen mit sehr hohem Anteil an leicht und nahezu vollständig abbaubarer Mais-Ganzpflanzensilage die höchsten oTR-Abbaugrade mit bis zu 82 % und jene mit hohem Anteil an Wirtschaftsdüngern (Rindermist/-gülle) die niedrigsten oTR-Abbaugrade in der Größenordnung von 50 bis 64 % aufweisen (FNR 2021).

Behandlung und Verwertung von Faulschlämmen und Gärresten

Die weitere Behandlung und Verwertung des Faulschlammes aus den Faulbehältern und den Gärresten aus Biogasanlagen gestaltet sich u. a. aufgrund von gesetzlichen Vorgaben (Klärschlamm-, Düngeverordnung etc.) und den Entsorgungskosten sehr unterschiedlich. Während die weitere Behandlung des Faulschlammes i. d. R. die Klärschlammmentwässerung (einschl. Rückführung in den Zulauf der Kläranlage bzw. der Belebungsstufe der Abwasserreinigung und ggf. zusätzlicher gezielter Stickstoffelimination des dabei anfallenden Prozesswassers). Hingegen wird der Gärrest auf Biogasanlagen in einem Nachgärer bzw. einem Gärrestlager gelagert, wobei eine Fest-Flüssig-Trennung nur in seltenen Fällen, insbesondere bei Biogasanlagen zur Behandlung von organischen Abfällen mit anschließender Kompostierung der Feststofffraktion, oder zur generellen Erhöhung der Transportwürdigkeit der Gärreste stattfindet.

Von Seiten der öffentlichen Abwasserbehandlung wurden im Jahr 2019 rd. 1.740.089 t TM Klärschlamm entsorgt, wobei rd. 74 % einer thermischen und rd. 25 % einer stofflichen Verwertung zugeführt wurden (DESTATIS 2020b). Seit der Novellierung der Klärschlammverordnung im Jahr 2017 nimmt die thermische Verwertung stetig zu. Die Mengen an anfallendem Gärrest auf Biogasanlagen ist derzeit nicht exakt mit Zahlen zu belegen, wobei das DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ) ausgehend vom derzeitigen Substrateinsatz eine Menge von ca. 100 Mio. t/a Frischmasse (~ 86,4 % der eingesetzten Substratmenge) schätzt, die zu fast 90 % landwirtschaftlich verwertet wird. Die prozentualen Anteile an den Entsorgungswegen von Faulschlamm auf Kläranlagen und Gärresten auf Biogasanlagen sind in **Abbildung 4** dargestellt.

Spätestens mit Inkrafttreten der neuen Düngeverordnung stellt sich für landwirtschaftliche Betriebe die Frage, wie mit überschüssigen Wirtschaftsdüngern und Gärresten aus Biogasanlagen umzugehen ist. Dabei spielen Biogasanlagen als Zwischenlager für energetisch genutzte Wirtschaftsdünger bzw. Gärprodukte unter Berücksichtigung der notwendigen Erweiterung der Lagerkapazitäten eine wichtige Rolle.

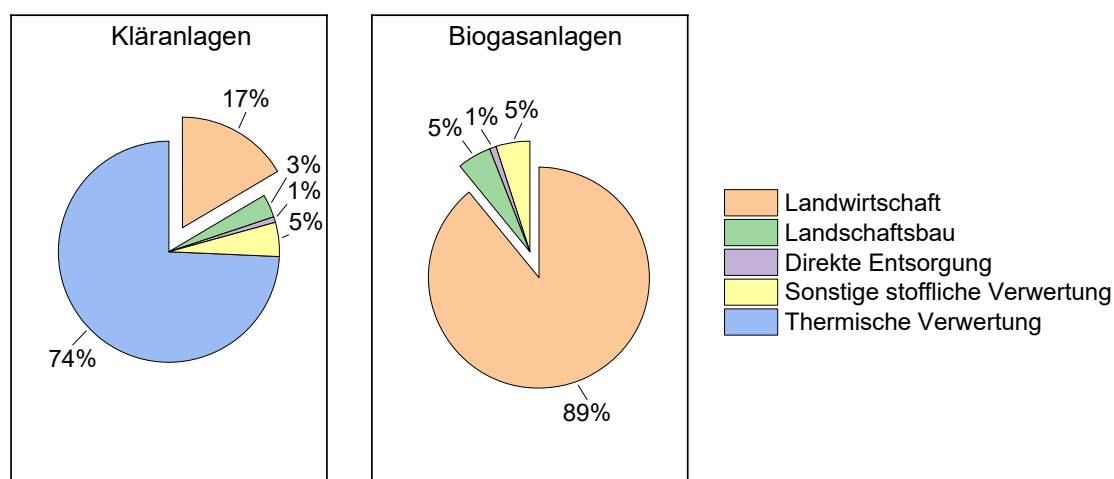


Abbildung 4: Entsorgungswege von den anfallenden Faulschlamm auf Kläranlagen und Gärresten auf Biogasanlagen (Daten: 2019) (DESTATIS 2020b, sowie Schätzungen des DBFZ)

Gasspeicher und -verwertung

Während auf Kläranlagen das Faulgas üblicherweise in einem externen Gasspeicher zwischengespeichert wird, finden sich auf Biogasanlagen häufig in den Fermentern integrierte Folienhaubenspeicher und im Falle der flexiblen Stromerzeugung aus Biogas auch externe Gasspeicher. Die Investitionskosten der Gasspeicher auf Kläranlagen sind häufig aufgrund der komplexeren Art der Umsetzung (externe Speicher für höhere Drücke) und der höheren Standzeiten im Vergleich zu jenen auf Biogasanlagen höher.

Sowohl auf Kläranlagen als auch auf Biogasanlagen erfolgt die Verstromung in Blockheizkraftwerken (BHKW). Der Strom auf Kläranlagen wird primär zur Deckung des Eigenbedarfs (insbesondere für energieintensive Aggregate wie die Belüftung der biologischen Abwasserreinigungsstufe und den Betrieb von Rühr- und Pumpwerken im Abwasser- und Schlammweg) eingesetzt, wobei der überschüssige Strom auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen in das Stromnetz eingespeist wird. Nach dem 33. Leistungsvergleich der DWA werden für das Jahr 2020 der Anteil der Eigenstromerzeugung am Gesamtstromverbrauch von 898 Kläranlagen (mit einer Ausbaugröße von 75,7 Mio. EW) mit 36 % angegeben (DWA 2020a).

Für das Bezugsjahr 2019 lag die Stromerzeugung aus Faulgas bei rd. 1.515 GWh ((DESTATIS 2022) und jener bei Biogas- und Biomethananlagen bei rd. 30.000 GWh (DBFZ, 2023). Der Stromverbrauch der 4.827 Kläranlagen (entspricht 129 Mio. EW Ausbaugröße), die am 32. Leistungsvergleich der DWA teilgenommen haben, beläuft sich auf 3.234 GWh für das Jahr 2019 (DWA 2019a). Mit einem Eigenstrombedarf von 8,8 % liegt der Stromverbrauch von Biogasanlagen in der Größenordnung von 8.000 GWh (FNR 2021).

Die Abwärme aus den BHKW wird sowohl auf Faulungs- als auch Biogasanlagen für die Deckung des Eigenbedarfs genutzt oder in Notkühlern umgewandelt, sofern kein Anschluss an ein Wärmenetz vorhanden ist. Auf Kläranlagen sind neben der Faulung, der Beheizung von Betriebsgebäuden und dem Warmwasserbedarf nur wenige weitere Wärmesenken, wie z. B. Schlamm Trocknung oder Deammonifikation zur gezielten Elimination von Stickstoff im Prozesswasser der Klärschlammmentwässerung, vorhanden. Auf Biogasanlagen hingegen hat die Wärmenutzung einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der gesamten Anlage (Daniel-Gromke *et al.* 2019), insbesondere wenn die BHKW als Satelliten-Lösung in der Nähe von Wärmeverbrauchern, z. B. Wohngebieten oder Schwimmhallen, eingesetzt sind. Dieses Konzept ist jedoch derzeit in Deutschland nicht weit verbreitet. Mit zunehmendem Ausbau der installierten Leistung der BHKW, insbesondere auf Biogasanlagen, gewinnt die Verwertung der Wärme an Bedeutung, wobei u. a. die Einbindung von Wärmespeichern auf Biogas- und Faulungsanlagen Gegenstand aktueller Diskussionen und Entwicklungen ist. Wenngleich Biogasanlagen mit Anbindung an ein Wärmenetz mit der möglichen Inanspruchnahme des KWK-Bonus im Vorteil sind, besitzen Biogasanlagen im ländlichen Raum diese Möglichkeit aufgrund der dezentralen Lage i. d. R. nicht.

Zur Einordnung der bundesweiten Wärmeerzeugung und den Wärmebedarf auf Kläranlagen gibt es derzeit keine aktuellen, statistisch erfassten Daten. Nach (DWA 2013) betrug für das Bezugsjahr 2011 die Wärmeerzeugung rd. 1.100 GWh und der Wärmebedarf bei rd. 3.200 GWh. Auf Biogasanlagen hingegen betrug die Wärmeerzeugung rd. 19.300 GWh und der Wärmebedarf rd. 2.600 GWh (mit 13,3 % Eigenwärmebedarf) im Jahr 2019 (FNR 2021).

Wesentliche Kennzahlen zur Einordnung der Speicherkapazität von Gasspeichern und der Auslegung von BHKW sind die spezifische Speicherkapazität und die Überbauung. Unter Überbauung ist im Biogasbereich die Erhöhung der installierten elektrischen Leistung des BHKW im Vergleich zur Bemessungsleistung zu verstehen, um einen flexibilisierten Betrieb zu erleichtern.

In **Tabelle 3** sind die jeweiligen Werte für Kläranlagen und Biogasanlagen aufgeführt. Anhand des spezifischen Gasspeichervolumens in Bezug auf die installierte elektrische Leistung des BHKW kann die Speicherkapazität der Gasspeicher beurteilt werden. Auswertungen der Universität der Bundeswehr München, zeigen im Mittel eine spezifische Gasspeicherkapazität von $14 \text{ m}^3/\text{kW}_{\text{el}}$, wobei Biogasanlagen im Mittel bei $4,3 \text{ m}^3/\text{kW}_{\text{el}}$ liegen. Insbesondere bei den Biogasanlagen zeigt sich eine Erhöhung dieser Kapazität aufgrund der Anforderungen an die Anlagentechnik für eine Flexibilisierung der Stromerzeugung (FNR 2021).

Tabelle 3: Kennwerte zur Speicherkapazität von Gasspeichern und der Überbauung von BHKW (FNR 2021)

Parameter	Einheit	Kläranlagen	Biogasanlagen
Gasspeicher/BHKW elektrisch installierte Leistung	[m ³ /kW _{el}]	ø 11 (n = 14)	ø 4,3
Überbauung	[-]	2 (n = 17)	≥ 2 bei Flexibilisierung

1.1.2 Flexibilisierung auf Kläranlagen und Biogasanlagen

Faulungsanlagen auf Kläranlagen sowie Biogasanlagen haben die Möglichkeit mittels Flexibilisierung einen immer wichtiger werdenden Beitrag zur Energiewende und der Stabilität des Stromnetzes zu leisten. Mit Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) aus dem Jahr 2012 ist die Flexibilisierung von Faulungs- und Biogasanlagen mit dem finanziellen Anreiz einer Flexibilitätsprämie gesetzlich verankert. Allgemein ist der Begriff der „Flexibilität“ im Kontext der Interaktion von Energienetzen als die Fähigkeit einer technischen Anlage, ihre elektrische Leistungsaufnahme oder -abgabe aufgrund eines externen Signals kurzfristig für einen begrenzten Zeitraum anzupassen, zu verstehen (Elsner 2015). Im Detail unterliegen Kläranlagen und Biogasanlagen unterschiedlichen gesetzlichen Vorgaben und technischen Regelwerken und weisen ein unterschiedliches Eigenverständnis der primären Aufgaben (Abwasserreinigung vor Klärschlammbehandlung, Strom- und Wärmeerzeugung auf Kläranlagen vs. Stromerzeugung auf Biogasanlagen) bzw. dem ganzheitlichen Aufgabenspektrum auf. Dadurch gestaltet sich in beiden Branchen eine unterschiedliche Haltung und Herangehensweise zur Flexibilisierung von Faulbehältern auf Kläranlagen und Biogasanlagen, welcher sich letztlich im Stand der Etablierung und aktuellen Entwicklungen in der Praxis widerspiegelt.

Während im Jahr 2019 rd. 15 % der Biogasanlagen, bezogen auf die installierte elektrische Leistung noch die EEG-Festvergütung erhielten, boten rd. 85 % der Biogasanlagen in Deutschland den erzeugten Strom direkt an der Börse an. Rd. 3.146 Biogasanlagen mit einer Gesamtleistung von 2.022 MWh_{el} und 191 Biomethan-BHKW mit 169 MWh_{el} erhielten die Flexprämie (Daniel-Gromke, 2019). Die exakte Erfassung der Anzahl an flexibel betriebenen Kläranlagen in Deutschland ist hingegen nicht bekannt. Es ist davon auszugehen, dass nur einzelne größere Kläranlagen die Vermarktung von Strom am (Regel-)Energiemarkt tätigen.

Derzeit wird die Flexibilisierung von Faulbehältern auf Kläranlagen und Biogasanlagen im Kontext der 5. Novellierung des EEG 2021, dem Inkrafttreten des Redispatches 2.0 im Oktober 2021 aber auch im Zusammenhang mit den zuletzt gestiegenen Energiepreisen in beiden Branchen diskutiert. Das EEG 2021 beinhaltet beispielsweise Neuerungen u. a. hin-

sichtlich der Aufhebung der Deckelung der Flexibilitätsprämie, der Anhebung des Flexibilitätszuschlags für neu bezuschlagte Anlagen über 100 kW, der Anpassung der Bemessungsleistung für die unterschiedlichen Flexibilisierungsoptionen sowie der Einführung von Qualitätskriterien für die Flexibilisierung (FNR, 2022). Mit dem Redispatch 2.0 werden Betreiber von EE-Anlagen und KWK-Anlagen sowie nunmehr auch sonstiger Anlagen zur Erzeugung oder Speicherung elektrischer Energie mit einer installierten Leistung von > 100 kW zur Übermittlung der Fahrpläne ihrer Aggregate an die Übertragungsnetzbetreiber verpflichtet. Den Übertragungsnetzbetreibern ermöglicht dies kurzfristige Änderungen des Aggregateinsatzes vorzunehmen, um Netzengpässe zu vermeiden und ein lukratives Einspeisemanagement zu etablieren (Next Kraftwerke GmbH, 2022).

Motivation der Flexibilisierung

Die Motivation zur gezielten Nutzung der Flexibilisierung auf Kläranlagen und Biogasanlagen unterscheidet sich insbesondere aufgrund der jeweiligen spezifischen Randbedingungen (zuvor ausführlich dargestellt). Auf Kläranlagen liegt die Motivation der Flexibilisierung in einem Beitrag zur Energiewende und der verfahrenstechnischen und betriebswirtschaftlichen Optimierung des Anlagenbetriebs (Schaum *et al.* 2019). Kommunale Kläranlagen sind ohnehin aufgrund von Schwankungen zwischen Trocken- und Regenwetterzufluss bereits für einen großen Arbeitsbereich ausgelegt, wodurch die Leistungsaufnahme und -abgabe variabel den gegebenen Umständen angepasst werden kann.

Bei der Flexibilisierung von Biogasanlagen hingegen liegt die Motivation im Ausgleich der Schwankungen der Stromeinspeisung anderer erneuerbarer Energiequellen, wie Wind- und Sonnenenergie, und in einem Beitrag zur Netzstabilität (FNR 2018). Im Gegensatz zu Kläranlagen, sind Biogasanlagen traditionell auf die kontinuierliche Stromeinspeisung ausgelegt, wobei seit Inkrafttreten des EEG der flexibilisierte Betrieb immer weiter etabliert wird.

Flexibilisierungsstrategien und -bausteine auf Kläranlagen

Flexibilisierungsstrategien können grundsätzlich nach sowohl nach betrieblichem (Verschiebung energieintensiver Prozesse) und überbetrieblichem Lastmanagement unterschieden werden. Letzteres kann wiederum in system- (Stabilisierung der Stromnetze), markt- (Kosten- und Erläsoptimierung) oder netzdienlichem Einsatz (lokales Netzkapazitätsmanagement) unterteilt werden. Die Umsetzung von Flexibilisierungsstrategien dürfen auf keinen Fall zu wesentlichen Störungen der Prozess- und Betriebsabläufe führen.

Als Flexibilitätsbausteine sind grundsätzlich alle Technologien bzw. Aggregate zu verstehen, die Flexibilität bereitstellen. Auf Kläranlagen sind das im Wesentlichen sowohl Erzeugungsanlagen wie Blockheizkraftwerke (in Kombination mit Gasspeichern) und Netzersatzanlagen als auch die einzelnen Stromverbraucher der Abwasserreinigung und Klärschlammbehandlung. Zur bedarfsgerechten Stromerzeugung auf Biogasanlagen wird ebenfalls die Kombination von Blockheizkraftwerken und Gasspeicher genutzt, wobei v.a. die Erhöhung der Gasspeicherkapazitäten mit dem Zubau an BHKW-Kapazitäten (Über-

bauung) wesentlich zur Flexibilisierung von Biogasanlagen beiträgt. Zudem bestehen weitere Flexibilitätsbausteine einerseits in der direkten Beeinflussung der Biogaserzeugung durch modellprädiktive Prozessführung und andererseits in der Einbindung von Substratspeichern bzw. Silos zur bedarfsorientierten Zugabe von energiereichen (Co-)Substraten zur Flexibilisierung der Gasproduktion. Der Flexibilitätsgrad sowohl auf Kläranlagen als auch auf Biogasanlagen ist dabei maßgeblich über die Robustheit der anaeroben Prozesse, das (Gas-)Speichervolumen sowie der installierten Leistung und Regelbarkeit der Blockheizkraftwerke definiert.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Flexibilisierungsstrategien sind Flexibilitätsbausteine innerhalb des Systems der Kläranlage und an der Schnittstelle zu anderen Infrastrukturen, wie den öffentlichen Erdgas-, Strom- und Wärmenetzen, zu differenzieren. Strom- und Wärmeüberschüsse eröffnen dabei das Potential innovative Technologien wie z. B. die Gasaufbereitung, Power-to-X, Einbindung von Strom- und Wärmespeicher, Photovoltaik- und Windkraftanlagen in Interaktion mit anderen Infrastrukturen in ein ganzheitliches Energiekonzept einzubinden. Eine vereinfachte Übersicht der in FLXsynErgy betrachteten Flexibilisierungsbausteine ist in **Abbildung 5** dargestellt.

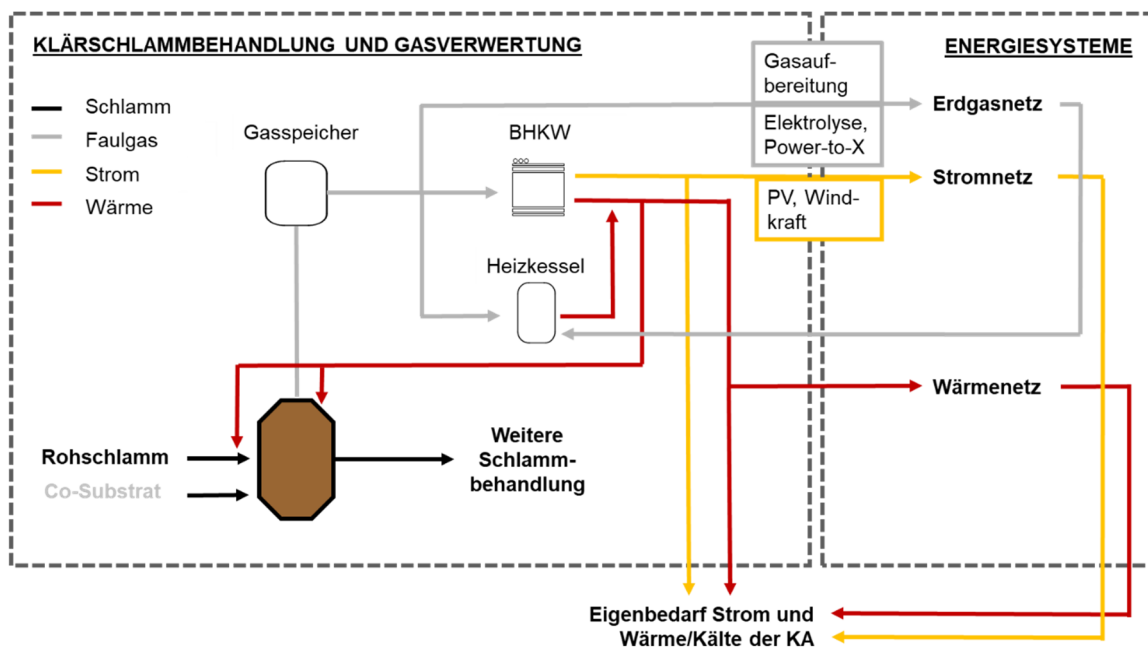


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung der Zusammenhänge zwischen den in FLXsynErgy betrachteten Flexibilisierungsbausteinen innerhalb der Klärschlammbehandlung und Gasverwertung auf Kläranlagen und an der Schnittstelle zu anderen Energiesystemen

Im Rahmen von FLXsynErgy beschäftigten sich die einzelnen Arbeitspakete mit unterschiedlichen betrieblichen bzw. technischen Aspekten der Flexibilisierung auf Kläranlagen. In den AP 3 und AP 4 wurde auf die Flexibilisierung der Faulung hinsichtlich einer flexiblen Gaserzeugung und dem Substrat als Speicher bzw. der Faulung als Wärmespeicher mit saisonaler Anpassung der Faulraumtemperatur fokussiert. Darüber hinaus stand in im AP 5 das Zusammenspiel einerseits von Gasspeicher und BHKW und andererseits von Kläranlage und anderen Energiesystemen im Fokus.

Chancen und Hemmnisse für eine zukünftige Flexibilisierung auf Faulungs- und Biogasanlagen

Im Workshop zum Thema „Flexibilisierung auf Faulungs- und Biogasanlagen“ des Forschungsvorhabens FLXsynErgy wurden Erfahrungen und Wissen rund um das Thema zwischen 27 Expertinnen und Experten ausgetauscht. Dabei wurden zudem Chancen, Hemmnisse und Wünsche für eine zukünftige Flexibilisierung des Anlagenbetriebs zusammengetragen, die grafisch aufbereitet in **Abbildung 6** dargestellt sind. Die hier aufgeführten Aspekte spiegeln damit nur bedingt die wesentlichen Aspekte der aktuellen Diskussion in beiden Branchen wider.

Die übergeordneten Chancen der Flexibilisierung wurden von den Teilnehmenden des Workshops in einem Beitrag zur Energiewende, dem Ausgleich von Schwankungen der Stromeinspeisungen von Erneuerbaren Energien und damit zur Netzstabilität gesehen. Die Auseinandersetzung mit Möglichkeiten zur Flexibilisierung bedingt die detaillierte Analyse der relevanten Prozesse und der Umsetzung von ganzheitlichen Energiekonzepten, um betriebliche Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren. Da bei den meisten Kläranlagen der Strombedarf die Strombereitstellung übersteigt, geht dies im besten Falle zunächst mit der Deckung des Eigenstrombedarfs einher. Dadurch minimiert sich der Strombezug und auch die Netzeinspeisung, wodurch Nutzungsentgelte und Stromkosten gesenkt werden können. Wie auf Biogasanlagen kann mit Stromüberschüssen von Kläranlagen am Regelenergiemarkt teilgenommen werden und Strom an der europäischen Strombörse EPEX Spot direkt vermarktet werden.

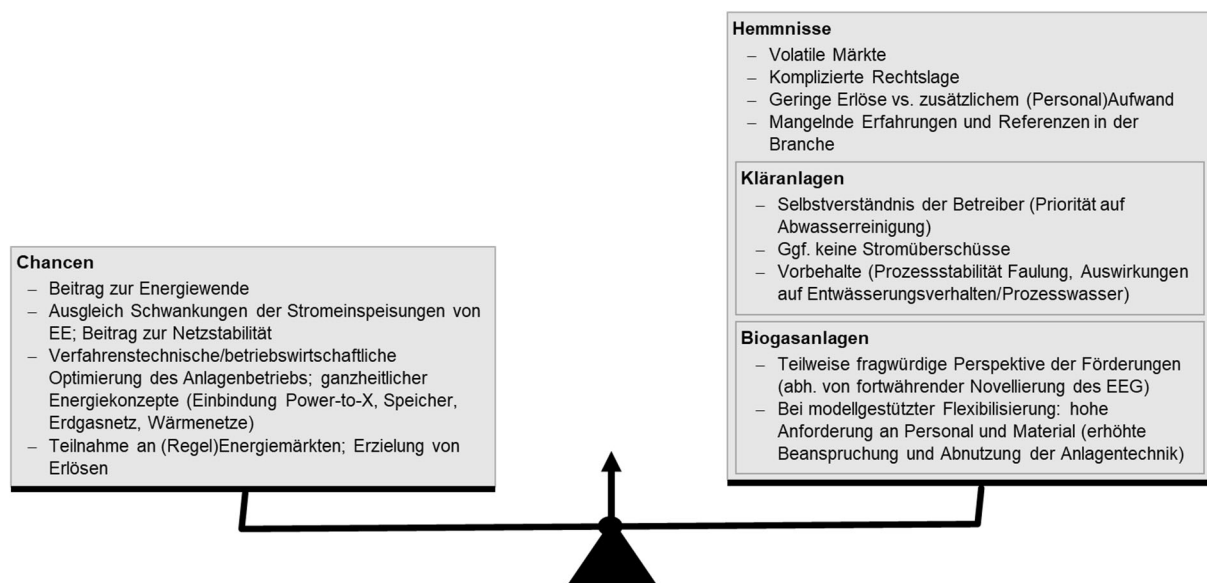


Abbildung 6: Gegenüberstellung von Chancen und Hemmnissen zur Etablierung der Flexibilisierung bei Faulungs- und Biogasanlagen (Steiniger, 2022)

Die übergeordneten Hemmnisse sowohl für Faulungs- als auch Biogasanlagen wurden von den Teilnehmenden des Workshops in der volatilen Marktdynamik hinsichtlich der Planung und Erlösen für Produkte der Regelleistung, der Bandbreite an (energie-)rechtlichen, verfahrenstechnischen und betriebswirtschaftlichen Anforderungen, vergleichsweise geringe Erlösen im Verhältnis zum zusätzlichen Personalaufwand und unerwarteten Kostenforderungen, die den Mehraufwand einer bedarfsgerechten Stromerzeugung nicht immer ausreichend decken, gesehen. Im Falle des gezielten Substratmanagements werden von Betreiberseite immer wieder Unsicherheiten einerseits in Bezug auf die Prozessführung und der Prozessstabilität und andererseits auf hohe Anforderungen an die Anlagen- und Messtechnik sowie an das Personal geäußert. Diese Unsicherheiten werden durch mangelnde Erfahrungen in der Branche verschärft.

Für Kläranlagen hemmen weiterhin das Selbstverständnis der prioritären Aufgabe der Abwasserreinigung einschl. weiteren derzeit anstehenden Maßnahmen (z. B. vierte Reinigungsstufe, Phosphorrückgewinnung), die fehlenden Stromüberschüsse und Vorbehalte des Eingriffs in den anaeroben Abbau in Hinblick auf die Prozessstabilität und auf negative Auswirkungen auf die Klärschlammmentwässerung und auf die Qualität des dabei anfallenden Prozesswassers.

Die Hemmnisse bei der Flexibilisierung von Biogasanlagen umfassen ökologische, technische, ökonomische sowie (genehmigungs-)rechtliche Aspekte, die von Daniel-Gromke (2020) umfänglich dargestellt werden. Die (rechtlichen) Anforderungen für die Flexibilisierung ist mit zusätzlichen baulichen bzw. technischen Anlagen- und Messtechnikkomponenten und einem höheren (Investitions-)Kostenaufwand verbunden. Gleichzeitig bestehen Unsicherheiten über den fortwährenden Betrieb bestehender Anlagen bzw. von neugebauten

Biogasanlagen aufgrund des Wegfalls des Flexibilitätszuschlags, Neuerungen bei den Ausschreibungsverfahren, erhöhte Anforderungen an Umweltwirkungen und Effizienz sowie erhöhte Substratpreise (Daniel-Gromke 2020). Darüber hinaus ergeben sich Unsicherheiten bei passenden Betriebskonzepten und Vielfalt von Vertragspartnern (Daniel-Gromke, 2019).

1.1.3 Wissenstransfer Kläranlage – Biogasanlage

Hauptgegenstand des AP 2 war die Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden bestehender wissenschaftlich/ technischer Ansätze der Anlagen- und/ oder Prozessflexibilisierung bei Faul- und Biogasanlagen für eine bedarfsgerechte Strom- und Wärmebereitstellung. Um einen derartigen Austausch zu ermöglichen, wurden im Rahmen des AP 2 zwei online Workshops durchgeführt, zu denen Vertreter der genannten Branchen eingeladen wurden. Ursprünglich war die Durchführung von zwei Präsenzworkshops im Rahmen des Vorhabens geplant, diese konnten aufgrund der Corona-Pandemie und den damit einhergehenden Beschränkungen und Sicherheitsmaßnahmen nicht durchgeführt werden.

Am 12.01.2022 wurde in Kooperation mit allen Projektpartnern der Online-Workshop „Flexibilisierung von Biogas/Faulgasanlagen – Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden“ durchgeführt (siehe auch <https://www.dbfz.de/flxsynergy>). Am Workshop nahmen insgesamt 28 geladene Gäste teil. **Abbildung 7** zeigt die Zusammensetzung der Teilnehmenden des Workshops sortiert nach Arbeitsbereichen.



Abbildung 7: Zusammensetzung der Workshop Teilnehmerinnen und Teilnehmer sortiert nach Tätigkeitsbereich, FuE. Forschung und Entwicklung

Im Rahmen des Workshops wurde in insgesamt drei Diskussionsrunden mit jeweils drei neu zusammengesetzten Gruppen zu den Themengebieten 1) Motivation, 2) Risiken und Hemmnisse sowie 3) Wünsche im Zusammenhang mit der Flexibilisierung von Kläranlagen diskutiert. Die Ergebnisse des Workshops wurden in einer gemeinsamen Publikation veröffentlicht (Steiniger et al. 2022).

Mit Unterstützung durch das Begleitvorhaben wurde am 05.07.2023 ein zweiter Projektworkshop zur Überarbeitung und Erweiterung der Messmethodensammlung Biogas durchgeführt. Die Messmethodensammlung Biogas ist ein vom Begleitvorhaben veröffentlichtes und ständig aktualisiertes Übersichtswerk, welches standardisierte und neu entwickelte Messmethoden im Biogasbereich zusammenfasst. Ziel der, mit dem Workshop initiierten Überarbeitung war, die Erweiterung der Messmethodensammlung auf Methoden im Bereich der Faulgaserzeugung, welche in der Form noch nicht enthalten waren. Die Neuauflage der Messmethodensammlung stellt damit die erste Zusammenführung von Messmethoden der ähnlichen, aber in der Praxis doch nach wie vor häufig getrennt betrachteten, Prozesse der Biogas- und Faulgaserzeugung dar. Nach Durchführung des Workshops schloss sich die Konkretisierung und Umsetzung der Änderungen an. Dieser Prozess hat weitere Teilnehmende des Forschungsnetzwerks Bioenergie eingebunden und konnte aufgrund der notwendigen Abstimmungen nicht bis zum Ende des Vorhabens FLXsynErgy (03.2024) umgesetzt werden, wird aber über das Vorhaben hinaus von der Begleitforschung weiterverfolgt.

Ein weiterer Inhalt des AP 2 war der Vergleich bisher verwendeter Modellansätze zur Anlagen- und Prozessflexibilisierung in den Bereichen Faulgas- und Biogaserzeugung. Die Aktivitäten auf dem Gebiet des Modelltransfers mündeten in der Modellierung des flexiblen Betriebes einer Modellkläranlage im Rahmen des Day-Ahead-Marktes anhand eines am DBFZ entwickelten und im Rahmen von FLXsynErgy angepassten Modells. Die konkreten Ergebnisse der Modellierung sind in Kapitel 1.4.3 beschrieben.

1.2 AP 3 - Flexibilisierung Gaserzeugung, Substrat als Speicher

1.2.1 Hintergrund und Stand der Technik

Eine bedarfsgerechte Faulgaserzeugung erlaubt es die verfügbaren Gasspeicherkapazitäten effektiver zu nutzen. Dies ist vor allem von Bedeutung, wenn ein Lastmanagement über einen längeren Zeithorizont betrieben werden soll, oder wenn über einen Zeitraum von einigen Stunden höhere Gasverbrauchsraten auftreten, wie es beispielsweise der Fall ist bei einer Vermarktung von Strom auf dem Strommarkt.

Eine Zugabe von Substrat nimmt immer einen Einfluss auf die biologischen, chemischen und physikalischen Gleichgewichtszustände. Je kontinuierlicher die Zugabe erfolgt, desto geringer fallen diese Störungen aus. In Abhängigkeit der Gleichgewichtszustände werden sich entsprechende Biozönosen entwickeln, welche wiederum auf die Prozesse Einfluss nehmen. So zeigten Untersuchungen zum Vergleich von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Zugaberegimen eine Veränderung des Mikrobioms (de Vrieze et al., 2013). Eine Veränderung der mikrobiellen Zusammensetzung kann grundsätzlich Einfluss auf Methanerträge, Prozessstabilität sowie auf die Entwässerungseigenschaften nehmen. Hinsichtlich der Auswirkung der diskontinuierlichen Zugabe von Substrat auf die spez. Methanproduktion und erzielten Abbaugrade sind der Literatur unterschiedliche Beobachtungen zu

entnehmen. Hier werden sowohl von abnehmenden Gasmengen (Svensson, 2018) als auch von Mehrerträgen (Mulat et al., 2016) berichtet. Dabei unterschieden sich die Arbeiten stark in der Raumbelastung sowie der hydraulischen Aufenthaltszeit (HRT).

Somit scheint im Kontext der Flexibilisierung nicht nur die Raumbelastung pro Zugabezeitpunkt ein wichtiges Kriterium zu sein, gleichfalls die mittlere Raumbelastung über den Betrachtungszeitraum und damit die HRT. Rasit et al. (Rasit, 2024) verglich eine tägliche Beschickung mit einer Beschickung, welche zweimal am Tag erfolgte, bei zwei unterschiedlichen mittleren Raumbelastungen unter Zugabe von Fettabscheiderinhalten. Zwischen den Beschickungsregimen konnte im Hinblick auf die spez. Methanproduktion keine Unterschiede festgestellt werden. Hingegen zeigten sich geringfügig geringere langkettige Fettsäuren (LCFA, long chain fatty acids) im Ablauf des täglich beschickten Reaktors, woraus er schlussfolgerte, dass bei geringer Raumbelastung eine mehrmalige Beschickung erfolgen sollte, hingegen bei höherer Raumbelastung auf eine stoßweise Beschickung gewechselt werden könnte. In einer weiteren Untersuchung wurde eine fünfmalige, dreimalige und einmalige Beschickung pro Woche miteinander verglichen, mit dem Ergebnis, dass eine Veränderung des Gasanfalls zwischen den Reaktoren nicht zu beobachten war (Ezieke et al., 2024) Auch konnte in diesem Fall keine Veränderung der mikrobiologischen Zusammensetzung beobachtet werden. Eine Erhöhung der Raumbelastung von 1 g oTR/L/d auf 2 g oTR/L/d führte zur Störung der Prozesse in allen Reaktoren unabhängig von der Zugabestrategie.

De Vrieze (de Vrieze et al., 2013) berichtet von einer Erhöhung der Stabilität in Folge einer nicht kontinuierlichen Beschickung. Das wechselnde Nährstoffangebot, scheint Nischen für weitere konkurrierende Mikroorganismen zu bieten, wodurch die Diversität der Mikroorganismen sowie die Umsatzrate zunehmen. In einem Stressversuch zeigte der stoßweise beschickte Reaktor höhere Toleranzen gegenüber hohen Ammoniumfrachten. Ähnliche Beobachtungen erfolgten durch Bonk et al. (Bonk et al. 2018). In dessen Untersuchungen mit einem synthetischen Substrat mit flüchtigen organischen Säuren (oHAc) als einziger Kohlenstoffquelle, wies der Reaktor mit einer stoßweisen Zugabe von Substrat die höchsten Toleranzen gegenüber der oHAc auf. Das Mikrobiom wies gleichfalls eine höhere Diversität auf. Eine höhere Umsatzrate sowie eine höhere metabolische Flexibilität stellte auch Ziels et al. (2017) bei der Untersuchung von unterschiedlichen Beschickungsregimen unter Zugabe von Oleat fest.

1.2.2 Zielsetzung der Untersuchungen

Zielsetzung des Arbeitspaketes 3 war es, die Möglichkeiten einer bedarfsgerechten Beschickung der Faulung zu untersuchen. Hierfür wurden verschiedene Beschickungsstrategien im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf die Prozessstabilität, die Entwässerungseigenschaften des ausgefaulten Schlammes sowie auf den Gasertrag untersucht.

1.2.3 Material und Methoden

Für die Durchführung der Arbeiten standen vier Reaktoren mit einem Gesamtvolumen von 20 L zur Verfügung. Eine schematische Abbildung der Reaktoren zeigt **Abbildung 8**. Primärschlamm und Überschussschlamm wurden von einer konventionellen, kommunalen Kläranlage mit 50.000 EW bezogen. Flotatschlamm und Spülmilch wurde einer Molkerei mit Flotationsanlage entnommen. Der Messumfang sowie die angewandten Messmethoden können **Tabelle 4** entnommen werden.

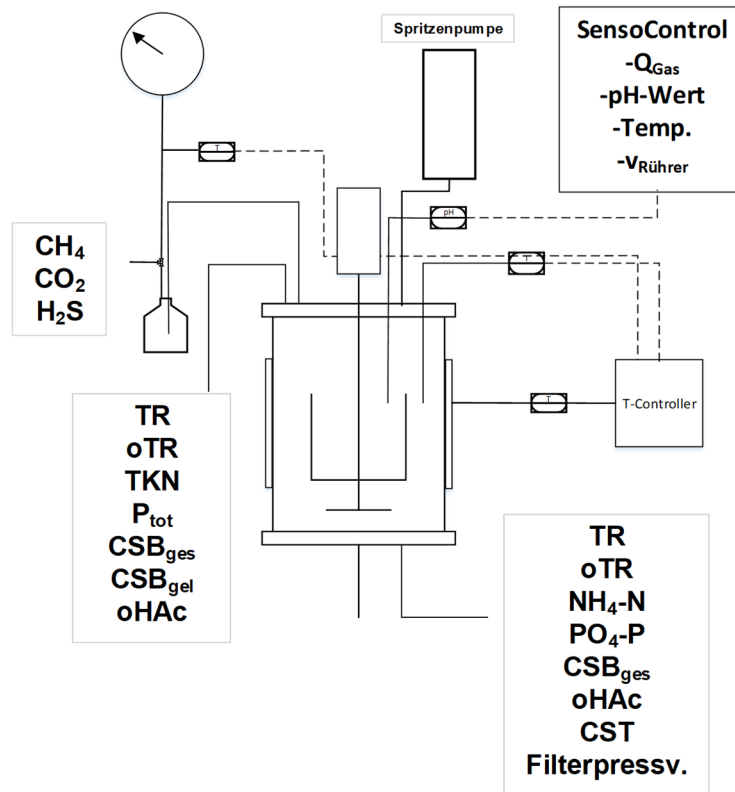


Abbildung 8: Vereinfachte Schemazeichnung der Versuchsfaulbehälter



Abbildung 9: Foto der Versuchsfaulbehälter der Universität der Bundeswehr München (Foto: Siebold/UniBwM).

Tabelle 4: in AP 3 und AP 4 verwendete Messmethoden

Parameter	Methoden
Trockenrückstand	DIN EN 12880
Glühverlust	DIN EN 12879
CSB	DIN 38409-H41 bzw. DIN ISO 15705 H 45
NH ₄ -N	DIN EN ISO 11732 und DIN 38406 E5
PO ₄ -P	DIN EN ISO 15681-2
Org. Säuren	GC/FID
TKN	DIN EN 25663
P _{ges}	DIN EN ISO 15681-2

Die Bilanzierung der Faulung erfolgte insbesondere im Hinblick auf den CSB. Hierzu wurde die CSB-Fracht im Ausgangssubstrat (CSB_{KS,zu}) sowie im Auslauf der Laboranlagen (CSB_{ab}) erfasst. Aus der Differenz wurde der abgebaute Anteil des CSB (CSB_{abb}) ermittelt [1].

$$B_{\text{CSB,abb}} = B_{\text{CSB,KS,zu}} - B_{\text{CSB,ab}} \quad [1]$$

Zur Plausibilitätsprüfung wurde die erfasste Methangasmenge entsprechend Formel [2] in CSB-Äquivalente umgerechnet.

$$B_{\text{CSB, Gas}} = \frac{Q_{\text{Gas}} \cdot c_{\text{methan}}}{s} \quad [2]$$

Mit $s = 0,35 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgCSB}_{\text{abb}}$

Über Formel [3] wurde der Grad der Übereinstimmung zwischen $B_{\text{CSB Gas}}$ und $B_{\text{CSB abb}}$ ermittelt.

$$\text{Übereinstimmung} = \frac{B_{\text{CSB, Gas}} - B_{\text{CSB, abb}}}{B_{\text{CSB, Gas}}} \quad [3]$$

Der Untersuchungsumfang gliedert sich in 4 Versuchsphasen.

Versuchsphase 1:

In vier Versuchsreaktoren wurde kontinuierlich (FB1), in Intervallen von 12 h (FB2), 24 h (FB3) und 48 h (FB4) Primärschlamm und Überschussschlamm im Massenverhältnis von 1:1 in die Reaktoren gegeben. Über den Betrachtungszeitraum war die Raumbelastung für alle Reaktoren mit $3 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ identisch. Unterschiede ergaben sich durch die punktuelle Raumbelastung pro Beschickungsvorgang (Einheit $\text{kg CSB pro Volumen und Beschickungsintervall } [\text{kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})]$). Diese betragen für die Reaktoren $0,1 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (FB1), $1,4 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (FB2), $3 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (FB3) und $6 \text{ kg CSB}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ (FB4). Eine schematische Darstellung des Versuchskonzeptes kann **Abbildung 10** entnommen werden. Eine Untersuchung erfolgte hinsichtlich der Prozessstabilität, der Gasausbeute sowie den Entwässerungseigenschaften über die Analyse der kapillaren Fließzeit sowie der Durchführung von Filterpressversuchen.

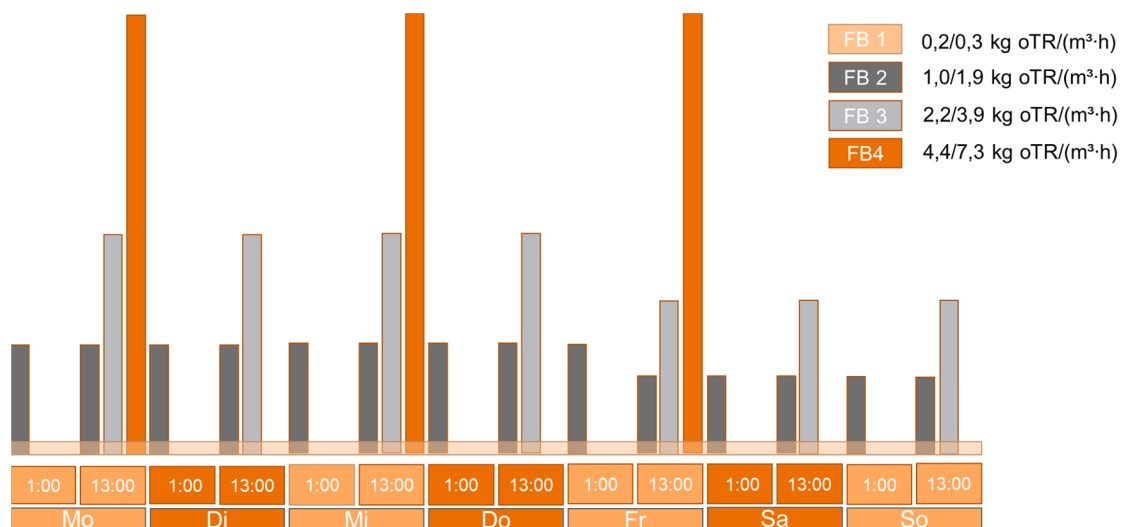


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung in Versuchsphase 1; die Balken stellen den jeweiligen Beschickungszeitpunkt dar und deuten die Höhe der zugeführten Raumbelastung an (Hubert 2024/25).

Versuchsphase 2:

Im Rahmen von Versuchsphase 2 wurden Versuche zur Flexibilisierung der Faulgaserzeugung mittels Flotatschlamm aus der Milchindustrie durchgeführt. **Abbildung 11** zeigt den Versuchsaufbau. Faulbehälter 8 (FB8) fungierte als Blindwert und wurde lediglich mit einer Mischung aus Primärschlamm und Überschussschlamm im Massenverhältnis von 1:1 („Rohschlamm“) „kontinuierlich“ in einem Intervall von 2 h beschickt. In FB5 erfolgte ebenfalls eine kontinuierliche Zugabe von Rohschlamm; zusätzlich erfolgte täglich eine Beschickung von Flotatschlamm. In FB6 erfolgte die Zugabe von Rohschlamm ebenfalls kontinuierlich. Die Zugabe von Flotatschlamm erfolgte alle drei Tage. In FB7 wurde Rohschlamm im Intervall von 12 h zugegeben. Einmal täglich wurde zusätzlich Flotatschlamm dosiert, wobei ein zeitlicher Abstand von ca. 6 h zur Rohschlammdosierung eingehalten wurde. Die Raumbelastungen der Reaktoren FB5 bis FB7 einschließlich der zugegebenen Mengen an Flotatschlamm war identisch. Tabelle 1 gibt die Versuchsparameter wieder. Es wurde eine oTR-Bilanz erstellt sowie die Entwässerungseigenschaften mittels kapillarer Fließzeit (CST) untersucht.

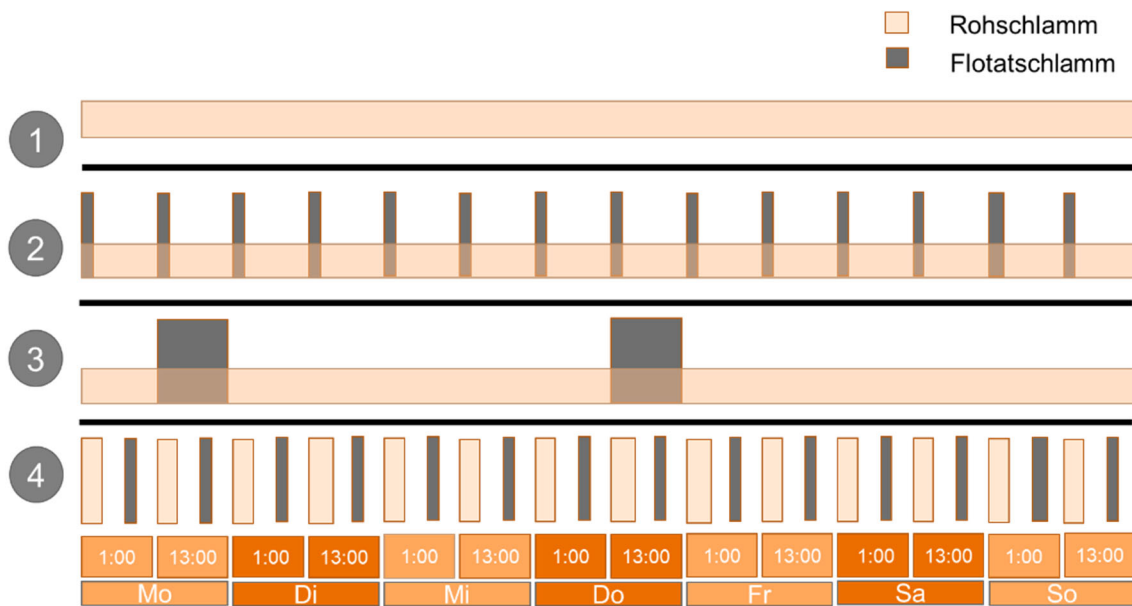


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung in Versuchsphase 2; die Balken stellen den jeweiligen Beschickungszeitpunkt dar und deuten die Höhe der zugeführten Raumbelastung an (Hubert, 2024/25).

Versuchsphase 3

In Versuchsphase 3 wurden Substrate gegenübergestellt, welche sich hinsichtlich ihrer Reaktionskonstante unterscheiden. Im Untersuchungsumfang waren Flotatschlamm, Spülmilch und Glycerin enthalten. Die Substrate wurden in jeweils eigenen Reaktoren täglich zugegeben. Zudem wurde Rohschlamm kontinuierlich allen Reaktoren zugegeben. Die tägliche Stoßbelastung durch die Substrate sowie die tägliche Zugabe von Rohschlamm war jeweils in allen Reaktoren identisch. **Abbildung 12** zeigt die jeweilige Stoßbeschickung vom Co-Substrat und Rohschlamm je Beschickungsvorgang.

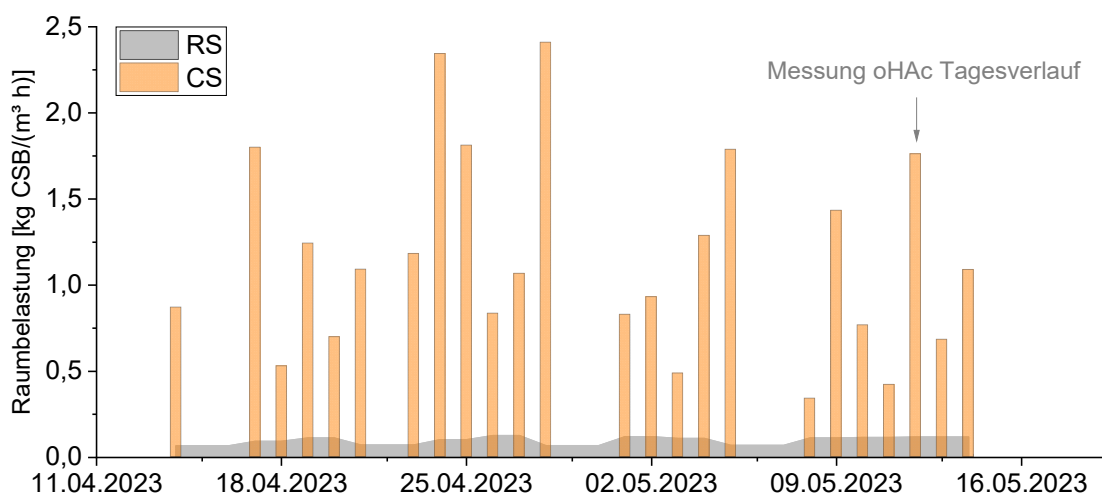


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Versuchsdurchführung in Versuchsphase 3; die Balken stellen den jeweiligen Beschickungszeitpunkt dar und zeigen die Höhe der zugeführten Raumbelastung an, RS: Rohschlamm, CS: Co-Substrat (Hubert 2024/25).

Versuchsphase 4

In AP 3 wurden Versuche zur Untersuchung der Lagerstabilität von Flotatschlämmen durchgeführt (Versuchsphase 4). Im Gegensatz zu trocken gelagerten Substraten, sind Substrate mit hohem Wassergehalt in aller Regel einem stetigen biologischen Abbauprozess unterworfen, welche mit der Bildung von Faulgas, Versäuerung und dem Verlust nutzbarer Energie einhergehen kann. Die Auslegung und entsprechende Vorrichtungen zur Lagerung richten sich somit direkt an der entsprechenden Lagerstabilität des jeweiligen Substrates aus. In Versuchsphase 4 wurde die Lagerung von Flotatschlämmen in einem Zeitraum von zwei Wochen untersucht. Nach aktueller Einschätzung muss die entsprechende Lagerkapazität eine gezielte Beschickung im Tagesverlauf ermöglichen. Allerdings kann eine entsprechende systematische Zugabe im Wochengang ebenfalls von Interesse sein, so dass zwei Wochen als Betrachtungszeitraum gewählt wurde. Der Anfall und die Zusammensetzung des Gases während einer Lagerung, wurde in 250 ml Batches mit OxiTop Messköpfen bei Raumtemperatur untersucht. Zudem wurden bei 8°C (F8), 20°C (F20) und 40°C (F40) jeweils 11 parallele Aliquote mit einem Füllvolumen von 80 ml aufgestellt. Um Überdrücke zu vermeiden, wurden die Proben nicht luftdicht verschlossen, sondern ein Deckel zur Vermeidung von Verdunstung aufgebracht. In den ersten 5 Tagen wurden täglich der CSB, oTR sowie der pH gemessen. Nach entnommener Probe wurde das entsprechende Aliquot verworfen.

1.2.4 Ergebnisse der Versuche in AP 3

Versuchsphase 1:

Tabelle 5 zeigt die Betriebsparameter innerhalb der vier Reaktoren. Die Raumbelastung je Beschickung beträgt $0,2 \text{ kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ für den kontinuierlich betriebenen Reaktor und $4,4 \text{ kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ für den Reaktor welcher alle zwei Tage beschickt wurde. Es zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Betriebsstrategien hinsichtlich Gaserzeugung und erreichten Abbaugraden. Die spez. Methanproduktion war in FB2 mit $318 \text{ m}^3/\text{kg oTR}$ am höchsten. In FB4 war die Methanmenge um rund 4 % ($308 \text{ m}^3/\text{kg oTR}$) geringer. Die Abbaugrade liegen bezogen auf den zugeführten oTR zwischen 62 % in (FB1) und 69 % (FB4). **Abbildung 13** zeigt die oTR-Bilanz der Reaktoren.

Tabelle 5: Betriebsparameter in den Reaktoren FB1 bis FB4

Parameter	Einheit	FB1	FB2	FB3	FB4
T	°C	37	37	37	37
Intervall	h	1	12	24	48
HRT	d	17	17	17	17
B_{oTR}	$\text{kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$	2,2	2,2	2,2	2,2
$B_{\text{oTR, Besch.}}$	$\text{kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$	0,2	1	2,2	4,4

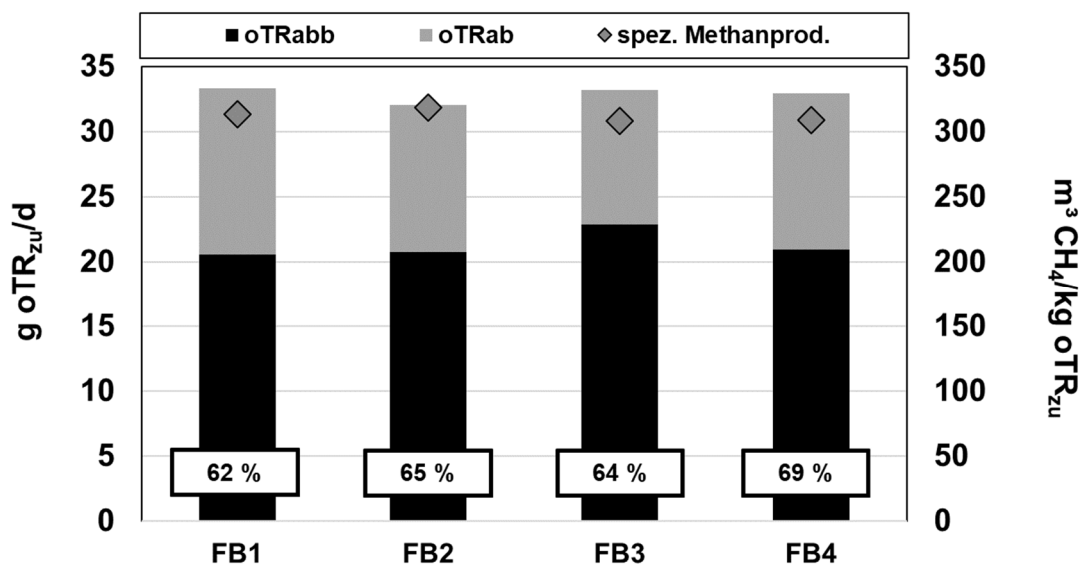


Abbildung 13: oTR-Bilanz innerhalb der Versuchsphase 1

Für die eingestellte Raumbelastung von $2,2 \text{ kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ über die Versuchsdauer zeigt sich sowohl für die Untersuchung der kapillaren Fließzeit als auch für die Pressversuche eine Verschlechterung der Entwässerungseigenschaften, sobald die Beschickung nicht kontinuierlich erfolgt. Der Faulschlamm des kontinuierlich betriebenen Reaktors FB1 weist den geringsten CST sowie den höchsten TR nach durchlaufen der Filterpresse auf. FB2

und FB4 weisen hinsichtlich der Entwässerungseigenschaften sowohl im Abgleich mit dem CST als auch mit den Ergebnissen der Pressversuche ähnliche Ergebnisse auf. Für FB3 zeigen CST und Pressversuche gegenläufige Ergebnisse. Während der CST nach dem Faulschlamm aus FB1 die kürzeste Zeit aufweist, zeigt der Pressversuch für FB3 die schlechtesten Ergebnisse. Die Abweichung des erzielten TR in FB3 gegenüber FB1 betrug etwa 2 %. Allerdings muss an dieser Stelle auf die hohe Standardabweichung in FB3 hingewiesen werden. Die Ergebnisse des CST und der Filterpressversuche können **Abbildung 14** und **Abbildung 15** entnommen werden.

Abbildung 16 zeigt den Verlauf der organischen Säuren nach Zugabe des Rohschlammes. Die maximal beobachteten Konzentrationen steigen von FB1 zu FB4 deutlich an. Dennoch sind die Konzentrationen für alle Faulbehälter auf einem niedrigen Niveau.

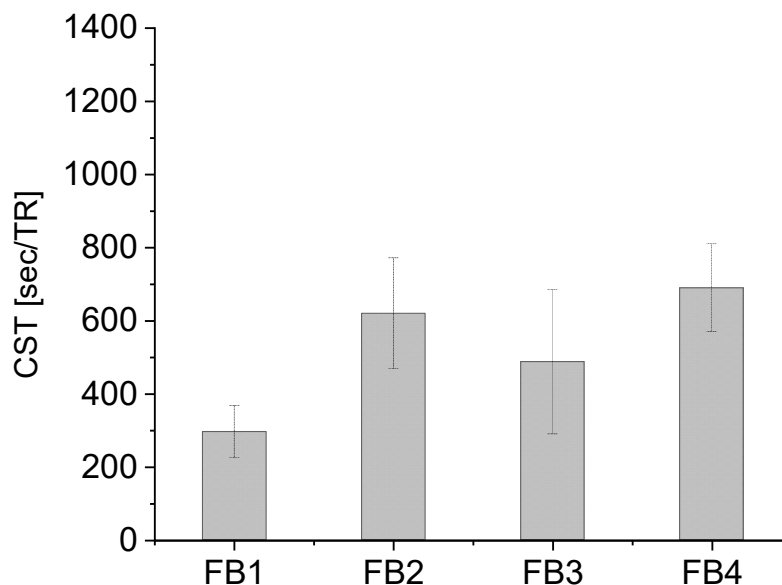


Abbildung 14: Kapillare Fließzeit (CST) in den jeweiligen Reaktoren (Hubert, 2024/25).

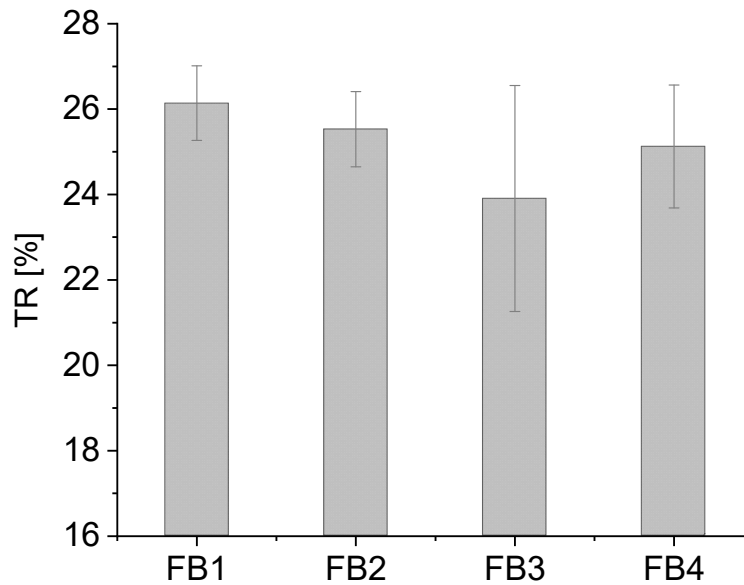


Abbildung 15: Ergebnisse der Entwässerungsversuche mittels Filterpresse (Hubert, 2024/25).

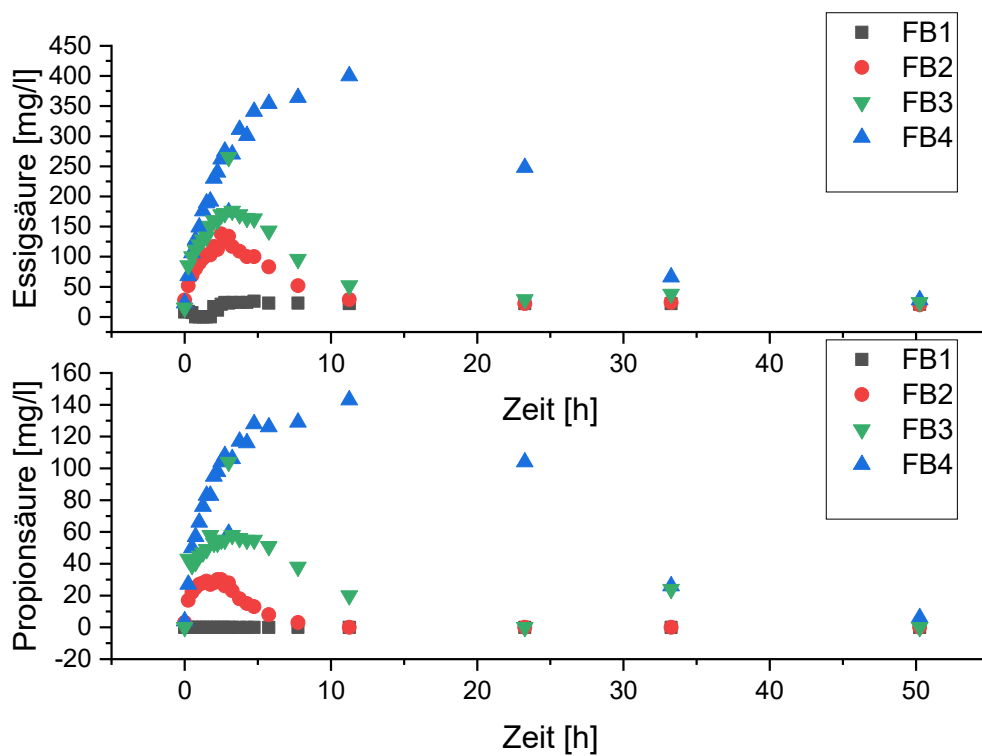


Abbildung 16: Verlauf der Essigsäure (oben) und der Propionsäure (unten) (Hubert, 2024/25)

Versuchsphase 2:

Tabelle 6 zeigt die entsprechenden Betriebsparameter der vier betriebenen Versuchsreaktoren. In FB3 wurde im Vergleich zu FB1 gleichfalls die Zugabe des Klärschlammes flexibilisiert und war im Zeitraum nicht kontinuierlich.

Tabelle 6: Betriebsparameter innerhalb der Versuchsphase

Parameter	Einheit	FB1	FB2	FB3	FB4
T	°C	37	37	37	37
org. Belastung	kg CSB/(m ³ ·d)	3,9	3,9	3,9	3,9
HRT	d	19,5	19,5	19,5	19,5
Intervall der Flotatzugabe	d	1	2,5	1	-
Raumbelastung pro Flotatzugabe	g CSB/(m ³ ·h)	1,5	4	1,5	-

Abbildung 17 zeigt die oTR-Bilanz für einen Zeitraum von 41 Tagen. Die spez. Methanproduktion in FB1, dem Blindwert, ist am geringsten. Der höchste Wert wird in FB4 mit 447 NI/kg oTR erreicht. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den Erkenntnissen aus den vorherigen Versuchen und wurde so erwartet. Interessanterweise konnte die höhere Methanproduktion aus der Differenz zwischen zu- und abgeführten oTR nicht abgeleitet werden. Die höhere Intervallzeit führte in FB4 zu einem höheren TR im Faulbehälter, was ggf. auf eine höhere Wachstumsrate der Biozönose hindeuten könnte. Zwischen den Reaktoren FB2 und FB3 lagen keine großen Unterschiede bezüglich der Bilanz und der spez. Methanproduktion vor. Der Einfluss der Stoßbeschickung von Flotatschlämmen bei gleichzeitig kontinuierlicher Zugabe von Rohschlamm ist bei der eingestellten Raumbelastung vernachlässigbar.

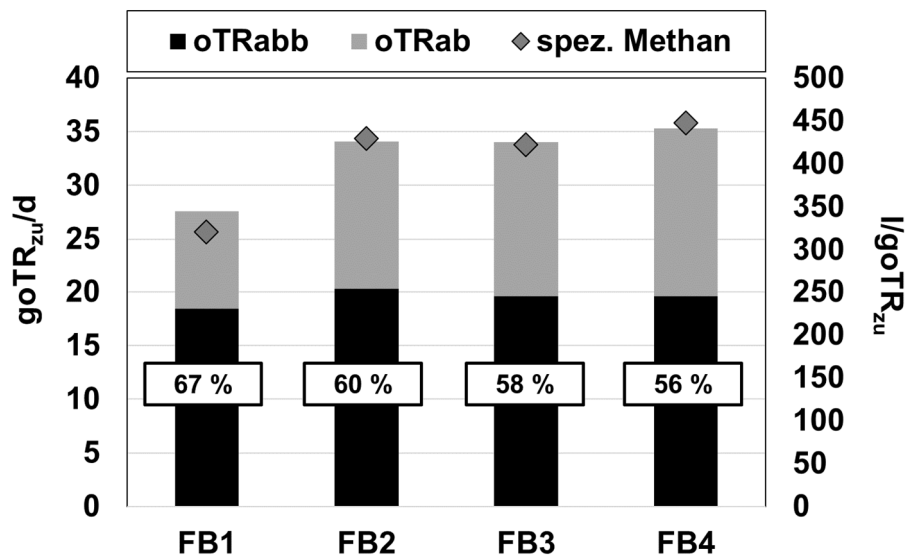


Abbildung 17: oTR-Bilanz innerhalb der Versuchszeitraumes (Hubert, 2024/25).

Exemplarisch ist in **Abbildung 18** für FB1 der Verlauf der Gasproduktionsrate dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Gaserzeugungsraten durch die Zugabe von Flotatschlämmen, gezielt zu bestimmten Zeitfenstern, erhöht werden kann.

Der Flotatschlammanteil an der gesamt zugeführten Substratmenge betrug für FB2 bis FB4 über den Beobachtungszeitraum etwa 20 %. Aufgrund des doppelt so hohen CSB-Gehaltes im Flotatschlamm (95.100 mg/l gegenüber 52.500 mg/l im Rohschlamm) und seiner hohen biologischen Abbaubarkeit beträgt der Anteil der Methangasmengen nur aus der Flotatschlammzugabe 35 - 40 %. In FB2 kann die Gasproduktionsrate durch die Zugabe von Flotatschlamm innerhalb von 6 Stunden um 81 % oder innerhalb von 2 Stunden sogar um 112 % gesteigert werden. In FB3 wurden die Gasproduktionsraten innerhalb von 20 Stunden um 80 % oder innerhalb von 4 Stunden um 130 % erhöht. Maximale Umsatzraten wurden nach 1 - 2 Stunden nach der Substratzugabe erreicht.

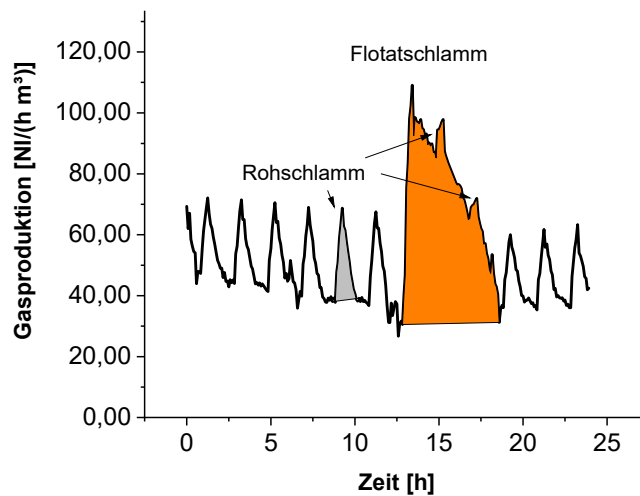


Abbildung 18: Gasproduktionsraten im Reaktor FB2. Die Zugabe von Rohschlamm erfolgte alle zwei Stunden und die Zugabe von Flotatschlamm täglich.

Alle Faulbehälter waren hinsichtlich der Konzentration an oHAc stabil. **Abbildung 19** zeigt den Verlauf der organischen Säuren nach Zugabe des Flotatschlammes. Die Ausschläge der Konzentration an organischen Säuren steht in einem direkten Zusammenhang mit der Zugabemenge an Flotatschlamm. In Faulbehälter FB3 wurden mit ca. 350 mg/l die höchste Konzentration an organischen Säuren erreicht. Diese liegen nach der einschlägigen Literatur auf einem noch moderaten Niveau. Für alle Faulbehälter war die Konzentration der organischen Säuren unmittelbar vor der nachfolgenden Substratzugabe auf einem niedrigen Niveau von < 75 mg/l.

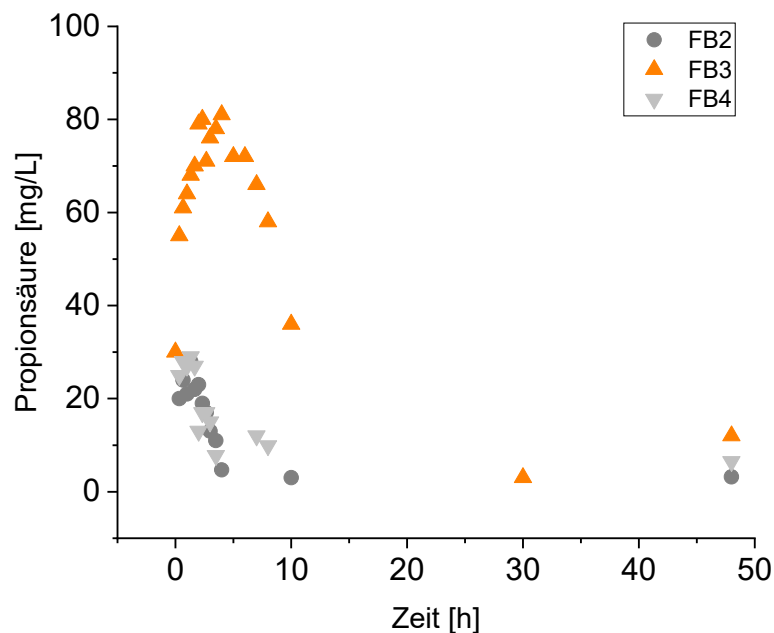


Abbildung 19: Propionsäure-Konzentration in den Reaktoren FB2 bis FB4 nach Zugabe von Flo-tatschlamm. (Hubert, 2024/25).

Die Entwässerungseigenschaften wurden in Analogie zu den vorangegangenen Versuchen mittels kapillarer Fließzeit (CST) analysiert (siehe **Abbildung 20**). Der stark flexibilisierte Betrieb in FB4 führte zu dem höchsten CST-Wert und somit dem schlechtesten Ergebnis. FB2 hat den kürzesten CST gefolgt von FB3. Der stärker flexibilisierte Betrieb in FB3 wies ein um 16 % schlechteres Ergebnis auf als in FB2. Anders als erwartet, wurde im FB4 ein schlechterer Wert als in FB2 und FB3 gemessen. Phasen ohne Substratzugabe scheinen bei der vorliegenden Raumbelastung eine deutliche Verschlechterung der Entwässerungseigenschaften zu verursachen. Der CST war in FB4 um 25 % gegenüber FB2 erhöht. Die Filterpressversuche bestätigten die Ergebnisse des CST (vgl. **Abbildung 21**). Von FB2 zu FB4 verschlechterte sich der erzielte TR von 26 % auf 24 %.

Zur Bewertung des Einflusses der Zugabestrategie auf die Entwässerungseigenschaften wurden in Anlehnung an die vorangegangenen Berichtszeiträume, Pressversuche mit ausgefaultem Schlamm aus den Reaktoren FB1 - FB4 durchgeführt. Zur Konditionierung der Faulschlämme wurde Polymer mit einer Konzentration von 10 mgWS/gTR verwendet. FB1 und FB2 zeigen ähnliche Ergebnisse der Entwässerung (vgl. **Abbildung 21**). FB3 wies im Vergleich zu FB1 und FB2 deutlich schlechtere Ergebnisse hinsichtlich des erzielten TR auf.

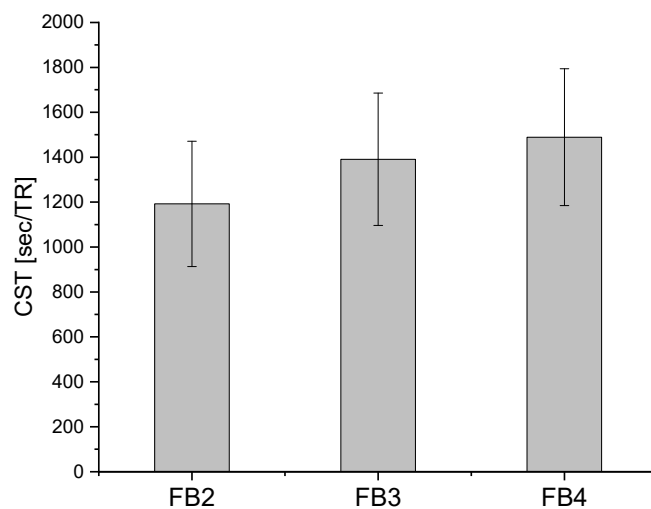


Abbildung 20: Kapillare Fließzeit der jeweiligen Faulschlämme (Hubert, 2024/25).

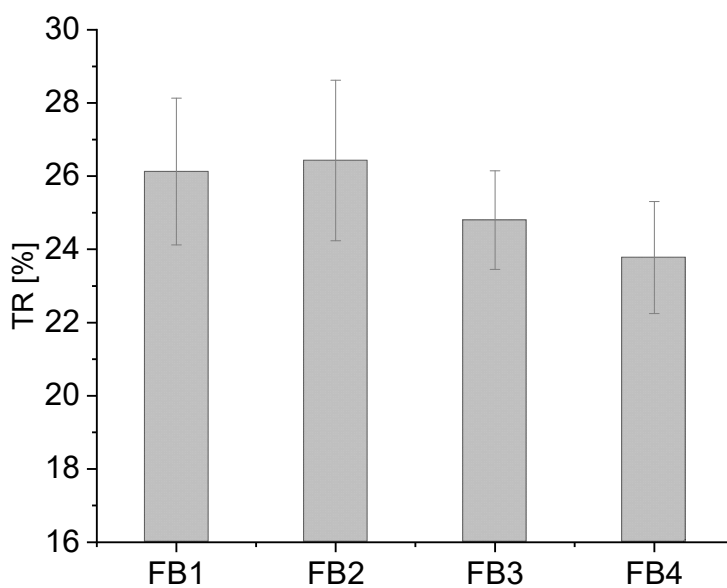


Abbildung 21: Erzielte TR-Konzentrationen der jeweiligen Faulschlämme nach den Filterpressversuchen (Hubert, 2024/25).

Versuchsphase 3

Die Eigenschaften eines Substrates, etwa der erreichbare Abbaugrad, die Abbaugeschwindigkeit sowie enthaltene Störstoffe sind von entscheidender Bedeutung in der Bewertung einer flexibilisierten Gaserzeugung. In den vorangegangenen Versuchen innerhalb von AP3 wurden mit Spülmilch und Flotatschlamm Substrate untersucht, die aufgrund ihrer hohen Pufferkapazität stabilisierend gegenüber hohen Konzentrationen an organischen Säuren wirken. Demgegenüber steht allerdings eine im Vergleich zu anderen Substraten, bspw. solche mit höheren Kohlenhydratanteilen, trägere Abbaukinetik. In diesem Berichtszeitraum wurde die Untersuchung auf Glycerin, ein ebenfalls häufig anzutreffendes Substrat, welches im Gegensatz zu den oben genannten Substraten eine schnellere Abbaugeschwindigkeit aufweist, zudem aufgrund fehlender Alkalinität die Pufferkapazität im Fermenter nicht erhöht, ergänzt. In drei Faulreaktoren wurde bei kontinuierlicher Zugabe von Rohschlamm, jeweils täglich Flotatschlamm, Spülmilch und Glycerin den Reaktoren zugeführt. Dabei wurde die zugegebene Menge jeweils variiert und die Prozessstabilität, durch Erfassung der organischen Säuren, sowie die Prozessparameter Abbaugrad, spezifische Methanproduktion erfasst. Ergänzend wurde in Anlehnung an die vorherigen Versuche ebenfalls die Entwässerungseigenschaften mittels CST und Filterpressen untersucht und bewertet. **Tabelle 7** zeigt die jeweiligen Betriebsparameter der einzelnen Reaktoren auf.

Tabelle 7: Betriebsparameter der Versuchsphase 3

Reaktor	Co-Substrat	CSB	Raumbelastung	HRT	T	Anteil Co-Substrat % (CSB _{ges})
		mg/L	kg CSB _{zu} /(m ³ ·d)	d	°C	
FB1	Flotatschlamm	105.000	3,6	17	37	25
FB2	Spülmilch	125.000	3,6	17	37	25
FB3	Glycerin	153.110	3,7	17	37	25

Abbildung 22 zeigt die CSB-Bilanz für die drei Reaktoren. Wie vermutet ist, aufgrund der hohen Abbaubarkeit des Glycerins, der ermittelte Abbaugrad für Reaktor FB3 am höchsten. Die Reaktoren mit der Spülmilch sowie dem Flotatschlamm weisen hingegen den gleichen Abbaugrad auf.

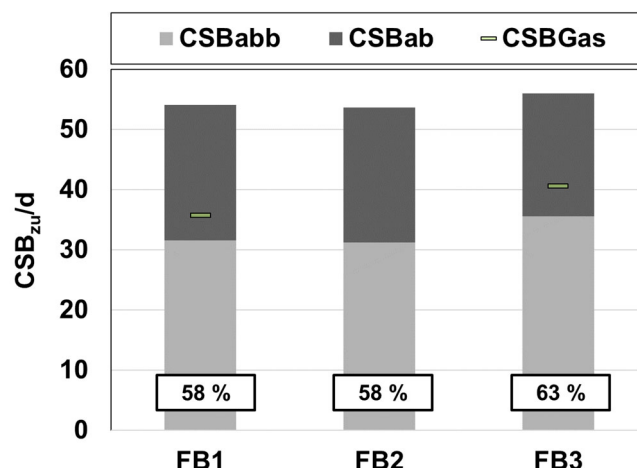


Abbildung 22: CSB-Bilanz der Faulbehälter FB1 - 3; CSB_{abb}: abgebauter CSB, CSB_{ab}: gemessene CSB-Fracht im Ablauf, CSB_{Gas}: berechneter CSB-Äquivalent aus der gemessenen Methangasmenge (Hubert, 2024/25)..

Hinsichtlich des Verlaufs der organischen Säuren weisen die Flotatschlämme sowie die Spülmilch ebenfalls Ähnlichkeiten auf. Insgesamt sind die organischen Säuren während der gesamten Versuchszeit auf einem niedrigen Niveau und erreichen für die oHAc nie 200 mg/L. Für die Propionsäure beträgt der maximale Wert 75 mg/L. Das Glycerin hingegen weist einen sehr starken Anstieg an organischen Säuren auf. Vor allem die Propionsäure erreicht mit einem Wert von 325 mg/L, trotz über den Betrachtungszeitraum moderaten Raumbelastung, einen doch kritischen Wert und relativiert die Ergebnisse der vorangegangenen Versuchsphasen.

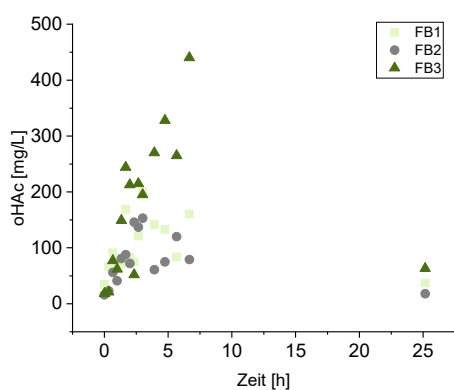


Abbildung 23: Konzentration der Essigsäure in den Faulbehältern FB1 - 3 (Hubert 2024/25).

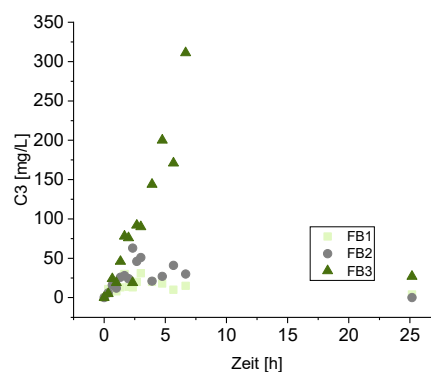


Abbildung 24: Konzentration der Propionsäure in den Faulbehältern FB1 - 3 (Hubert 2024/25).

Abbildung 25 und **Abbildung 26** zeigen die Ergebnisse der CST-Bestimmung und der Versuche mittels Filterpresse. Es wurde angenommen, dass je höher der Abbaugrad ist,

desto geringer der Einfluss auf das Entwässerungsverhalten. Aus den vorangegangenen Versuchen ist bekannt, dass die Flotatschlämme zu einer Verschlechterung der Entwässerungseigenschaften führen. Somit wurde für das Glycerin eine bessere und für die Spülmilch mit schlechteren Entwässerungseigenschaften gerechnet. Dies konnte im Rahmen der Versuche teilweise bestätigt werden. Für Glycerin zeigt sich sowohl nach Bestimmung des CST, sowie unter Anwendung der Filterpresse eine im Vergleich zum Flotatschlamm bessere Eigenschaft zur Entwässerung. Die Spülmilch zeigte hingegen einen ähnlichen CST wie das Flotat, nach Konditionierung mit einem Polymer und Entwässerung mittels Filterpresse erreichte der TR ein ähnlich hohes Ergebnis wie das Glycerin.

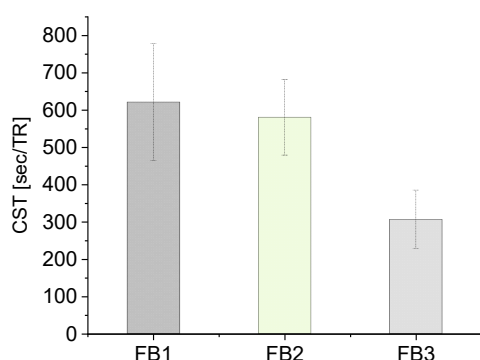


Abbildung 25: kapillare Fließzeit (CST) der ausgefaulten Schlämme aus FB1 - 3 (Hubert, 2024/25).

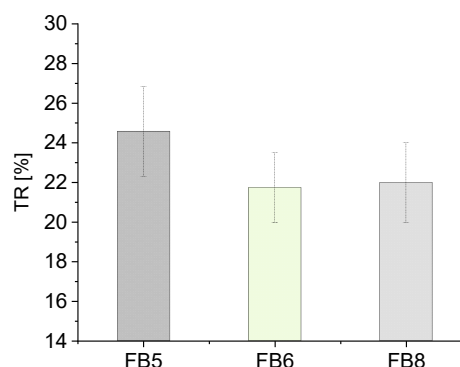


Abbildung 26: Trockenrückstand der ausgefaulten Schlämme nach Behandlung mit der Filterpresse (Hubert, 2024/25).

Versuchsphase 4

Eine Fotodokumentation der Proben an Tag 1 und Tag 9 kann der **Abbildung 29** und **Abbildung 30** entnommen werden. **Abbildung 27** zeigt den akkumulierten Verlauf der anfallenden Faulgasmengen auf. Es sind starke Unterschiede ab dem 2. Tag zu erkennen, welche mit der Ausbildung eines Schwimmschlammes an der Oberfläche in Zusammenhang stehen könnte. Mit Ausnahme von Probe 4 weisen alle Proben ab einem bestimmten Zeitpunkt eine Abnahme der Faulgasmengen auf. Dies ist ggf. darauf zurückzuführen, dass entstandenes Gas bzw. eingetragener Sauerstoff von der sich aufgebauten Biomasse zunehmend gezehrt wird und in weitere Biomasse umgesetzt wird. **Abbildung 28** zeigt die Zusammensetzung des Faulgases im Verlauf der Lagerung auf. Anhand der Gaszusammensetzung kann eine zunehmende Abnahme des Redoxpotentials angenommen werden, welche im Verlauf zunehmend zur Bildung von H_2S und CH_4 führt. Aufgrund des sich auf etwa 9 stabilisierenden pH-Wertes (siehe **Abbildung 27**) kann von einem fortlaufenden anaeroben Abbau unter der Bildung von Methangas und dem Abbau der Organik (siehe **Abbildung 28**) ausgegangen werden, woraus sich für eine mögliche Lagerung die Erfordernis nach Maßnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasen sowie für den Ex-Schutz ableiten lassen. In **Abbildung 30** sind in den Proben F20 eine leichte und in F40 eine starke

Schwimmschlammbildung nach 9 Tagen sichtbar. Bereits nach 24 h Lagerung ist für die Proben mit F20 und F40 eine Schwimmschlammbildung aufgrund eingelagerter Gastaschen sichtbar. An Tag 3 ist für die Probe mit Lagertemperatur von 40 °C bereits ein deutlicher Schwimmschlamm erkennbar, der mit einer Verfärbung der Oberfläche einhergeht.

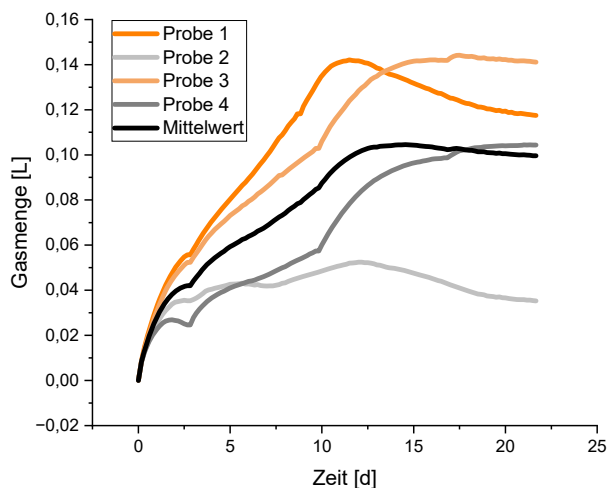


Abbildung 27: Akkumulierte Gas Mengen bei 25 °C gelagerten Flotatschlamm in 4 Parallelbestimmungen.

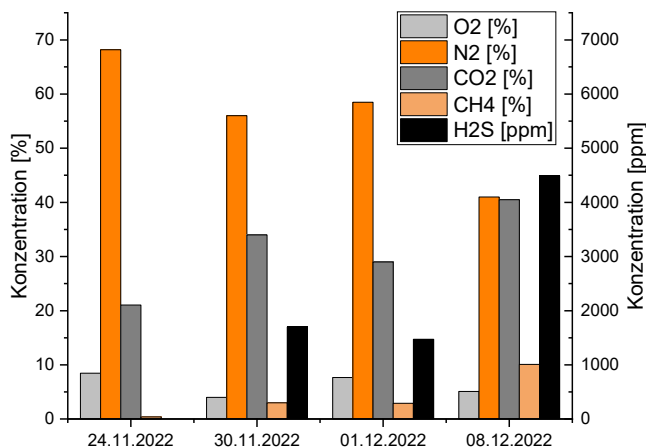


Abbildung 28: Gaszusammensetzung im Verlauf der Lagerung.



Abbildung 29: Gelagerte Proben bei einer Temperatur von 8, 20 und 40 °C nach 24 h aus zwei unterschiedlichen Perspektiven.

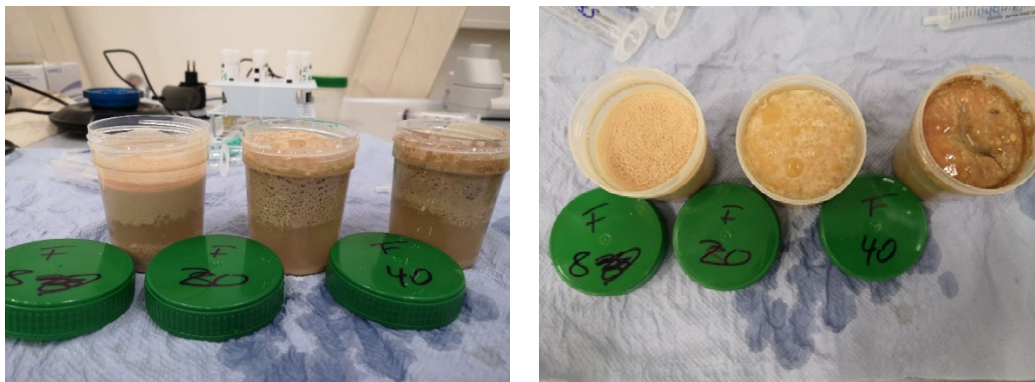


Abbildung 30: Gelagerte Proben bei einer Temperatur von 8, 20 und 40 °C nach 9 d aus zwei unterschiedlichen Perspektiven.

1.2.5 Handlungsempfehlungen

Zusammenfassend können im Rahmen von AP 3 folgende Hinweise und Handlungsempfehlungen gegeben werden:

- Unter den Randbedingungen der durchgeführten Versuche hatte das Intervall (täglich und zweimal wöchentlich) der Co-Substratzugabe bei kontinuierlicher Zugabe von Rohschlamm weder einen Einfluss auf den Gasanfall noch auf die Entwässerungseigenschaften des Faulschlammes.
- Die Zugabe des Flotatschlammes hatte einen charakteristischen Verlauf der organischen Säuren zur Folge. Je nach zugegebener Menge sind die organischen Säuren in einem Zeitraum von 5 bis 30 h nach einer Co-Substratzugabe erhöht. In diesen Zeiten ist ggf. ein Ungleichgewicht in den Faulbehältern gegeben, welches im Hinblick auf zusätzliche Störungen bspw. eine weitere Substratzugabe zu berücksichtigen ist.

- Die Zugabe von Co-Substraten verändert in Abhängigkeit der Massenanteile die Charakteristik des Faulschlammes auch im Hinblick auf dessen Entwässerungseigenschaften. Eine Anpassung der Polymere sollte bei Einführung einer Co-Vergärung geprüft werden.
- Substrate mit ähnlicher oder leicht erhöhter Umsatzgeschwindigkeit wie Rohschlamm eignen sich gut zur Co-Vergärung. Die Gefahr der Versäuerung, auch bei höheren Stoßbeschickungen, ist in diesem Falle moderat. Substrate mit hoher Umsatzrate (z. B. Glycerin) bieten das Potential die Gasbildungsraten stark in einem spezifischen Zeitfenster zu erhöhen. Gegenteilig stellt sich die höhere Gefahr der Akkumulation der organischen Säuren dar.
- Co-Substrate mit einem hohen Feuchtegehalt weisen generell eine geringe Lagerstabilität auf. Ein Abbau erfolgt in aller Regel über eine Absenkung des pH-Wertes und der Bildung von CO₂. Bei hoher Alkalinität des Substrates kann der Abbau allerdings auch über die Bildung von CH₄ erfolgen. In diesem Falle ist dem Emissionsschutz im höheren Maße durch entsprechende Maßnahmen gerecht zu werden. Grundsätzlich kann bei einer Lagerung eine Phasentrennung einsetzen, womit ggf. eine entsprechende Durchmischung vorzusehen ist.

1.3 AP 4 - Wärmespeicher Faulung

1.3.1 Hintergrund und Stand der Technik

Faulbehälter agieren sowohl als Wärmeverbraucher als auch indirekt als Wärmeerzeuger durch die Verbrennung des methanhaltigen Faulgases in Blockheizkraftwerken (BHKW) und nehmen dadurch eine entscheidende Rolle im Wärmemanagement von Kläranlagen ein. Der Wärmeverbrauch von Faulbehältern ist maßgeblich von der Faulraumtemperatur abhängig, die sich grundlegend an den Temperaturoptima der Biozönose, insbesondere den temperatursensiblen Methanogenen, bei mesophilen (35 bis 37 °C) oder thermophilen Temperaturen (53 bis 55 °C) orientieren. Die Faulbehälter in gemäßigten Klimazonen, wie in Mitteleuropa, werden i.d.R. über das ganze Jahr bei konstanten 37 °C betrieben, wodurch sich aufgrund ausgeprägter Jahreszeiten in der Wärmebilanz der gesamten Kläranlage saisonale Phasen von Wärmedefiziten und -überschüssen ergeben. Dadurch bietet sich der Einsatz von saisonalen Wärmespeichern auf Kläranlagen an, wobei mit der Faulung bereits ein potentielles Speichervolumen für die Wärmespeicherung zur Verfügung steht. Im Kontext der energetischen Optimierung und Flexibilisierung auf Kläranlagen kann mit dem Konzept der Nutzung der Faulung als Wärmespeicher ein wertvoller Beitrag zur vollenergetischen Nutzung und einem ganzheitlichen Wärmemanagement geleistet werden.

Energetische Einordnung

Die Nutzung der Faulung als Wärmespeicher erfordert, entgegen der gängigen Betriebsweise in der Praxis, eine Anpassung der Faulraumtemperatur im Jahresverlauf, wodurch die Faulung bei Temperaturniveaus außerhalb der Temperaturoptima der Methanogenen betrieben wird. Die Erhöhung der Faulraumtemperatur in den Frühlings- und Sommermonaten ermöglicht die Speicherung von überschüssiger Wärme, sodass die Wärmedefizite in den Wintermonaten entweder anteilig auszugleichen oder, falls dies nicht ausreicht, durch die Absenkung der Faulraumtemperatur zu kompensieren. Auf kommunalen Kläranlagen werden im einfachsten Falle grundsätzlich die Faulung (Schlammaufheizung und Aufrechterhaltung der Faulraumtemperatur aufgrund von Transmissionsverlusten), die Beheizung von Betriebs- und Werkgebäuden, dem Warmwasserbedarf und allgemeinen Speicher-, Verteilungs- und Umwandlungsverlusten als Wärmeverbraucher angenommen (DWA 2015; MULNV 2018).

Die Wärmebereitstellung erfolgt über die Verbrennung des methanhaltigen Faulgases in BHKWs, wobei mit der Verbrennung von Faulgas oder anderen fossilen Energieträgern, wie Erdgas, in Heizkesseln Wärmedefizite ausgeglichen werden. Zudem können Wärmedefizite mit dem Betrieb von Wärmepumpen und Schlammerkuperatoren, mit der Abwärme aus der Druckluftherzeugung und aus Adsorptionskühlanlagen zur Kühlung von Schalträumen, Büros und Warten kompensiert werden (MULNV 2018).

Überschüssige Wärme wird in Notkühlern umgewandelt und bleibt oft ungenutzt, sofern keine weiteren standortspezifischen Wärmeverbraucher (wie Hygienisierung, Schlamm-trocknung, thermische Desintegration, Prozesswasserbehandlung mittels Deammonifika-

tion, Kältebedarf etc.) am Standort existieren. Zudem kann ein externes Wärmenetz Wärmeüberschüsse und -defizite ausgleichen, wobei nur in den seltensten Fällen ein Anschluss auf Kläranlagen vorhanden ist.

Flexibilität der Faulraumtemperatur

Die Faulraumtemperatur wird grundsätzlich bei konstanten mesophilen Temperaturen, i.d.R. zwischen 35 und 37 °C, und nur in einzelnen Fällen bei konstanten thermophilen Temperaturen, i. d. R. zwischen 53 und 55 °C, betrieben, um den Methanogenen optimale Wachstumsbedingungen zu ermöglichen. Dennoch berichten Temper (1983) und Rossol *et al.* (2005), dass ein stabiler Betrieb der Faulung auch zwischen 40 und 50 °C möglich ist, sofern Temperaturänderungen klein gehalten werden. Dennoch können bereits kurzzeitige Schwankungen der Faulraumtemperatur zu Prozessstörungen führen, insbesondere auch beim Betrieb bei den Temperaturoptima (Bischofsberger *et al.* 2005; WEF 2018). Empfehlungen zur Aufrechterhaltung der Prozessstabilität belaufen sich auf die Unterschreitung von maximalen Temperaturänderungen von 0,5 bis 2,5 K pro Tag (de la Rubia *et al.* 2005; de Lemos Chernicharo 2007; WEF 2018).

Auf die Möglichkeit der Speicherung von überschüssiger Wärme in den Sommermonaten durch die Erhöhung der Faulraumtemperatur wird in der gängigen Literatur hingewiesen (Bischofsberger *et al.* 2005; DWA 2014; MULNV 2018). Detailliertere Erfahrungen aus der großtechnischen Umsetzung sind jedoch lediglich für zwei Kläranlagen in Deutschland mit ausgeprägter Variation der Faulraumtemperatur im Jahresverlauf zwischen 33 und 55 °C auf Basis von eigenen Auswertungen von Hubert *et al.* (2019) und für eine Kläranlage in Österreich mit Temperaturen zwischen 38 und 53 °C von Loidl (2020) veröffentlicht worden. Beide Artikel zeigen, dass der anaerobe Abbau auch zwischen meso- und thermophilen Temperaturen ohne Einbußen der Faulgasproduktion und somit eine saisonale Anpassung der Faulraumtemperatur und Nutzung der Faulung als Wärmespeicher in der großtechnischen Umsetzung möglich ist. Dennoch gibt es auch mündliche Berichte von Kläranlagenbetreibern, die die Variation der Faulraumtemperatur aufgrund von Betriebsproblemen zwischenzeitlich wiedereingestellt haben. Die genauen Gründe wurden bisher nicht hinreichend genau untersucht und unterstreichen den Forschungsbedarf.

1.3.2 Zielsetzung der Untersuchungen


Ziel ist es einen Überblick über die energetischen und betrieblichen Auswirkungen der Variation der Faulraumtemperatur im Kontext eines ganzheitlichen Wärmemanagements zu geben. Auf Basis der Auswertung von Betriebsdaten der assoziierten Partner und der Durchführung von ergänzenden Untersuchungen im halb-technischen Maßstab sollen die betrieblichen Grenzen hinsichtlich der Raumbelastung bei Temperaturen zwischen 33 und 53 °C und die Auswirkungen auf die Prozessstabilität, die Zusammensetzung des Prozesswassers und das Entwässerungsverhalten identifiziert werden. Letztlich sollen konzeptionelle, betriebliche, energetische und planerische Handlungsempfehlungen für den Betrieb der Faulung als Wärmespeicher für den Leitfaden erarbeitet werden.

1.3.3 Material und Methoden

Die durchgeführten Auswertungen und Untersuchungen beziehen sich auf die Betriebsdaten von zwei kommunalen Kläranlagen, dem Betrieb von Laborfaulungen und ergänzenden Analysen. Die Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit teilweise bereits veröffentlicht (vgl. Kapitel 5).

Als Datengrundlage für die Untersuchungen dienen die Betriebsdaten von zwei kommunalen Kläranlagen in Süddeutschland, die einerseits eine ausgeprägte Variation der Faulraumtemperatur im Jahresverlauf seit Jahren praktizieren und andererseits FLXsynErgy als assoziierte Partner unterstützen. Die beiden Kläranlagen und deren standortspezifischen Spezifikationen sind in **Tabelle 8** zusammengetragen. Die Betriebsdaten der großtechnischen Faulungen umfassen Faulraumtemperaturen zwischen 34 und 52 °C, sodass diese in Temperaturniveaus von 34, 37, 40, 43, 46, 49 und 52 °C eingeteilt wurden. Dabei wurden nur Zeiträume ausgewertet, die mind. für einen Monat bei dem Temperaturniveau und ± 1 K betrieben wurden. Aufgrund der ausgeprägten Temperaturprofile in den Faulungen liegt eine unterschiedliche Anzahl an auswertbaren Zeiträumen vor, wobei nur wenige Zeiträume für die minimalen und maximalen Temperaturniveaus vorliegen. Für die einzelnen Zeiträume wurden CSB-Bilanzen aufgestellt, die Aussagen über die spezifischen Methanausbeuten, dem Methangehalt und der organischen Raumbelastung bei den einzelnen Temperaturniveaus liefern.

Tabelle 8: Übersicht und standortspezifische Randbedingungen der Kläranlagen

 <p>(Michel, 2023)</p>	<p>Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Raum Ochsenfurt</p> <ul style="list-style-type: none">• 95.000 EW• zwei nacheinander geschaltete Faulbehälter (zweiter Faulbehälter ist unbeheizt und nicht durchmischt)• Variation der Faulraumtemperatur im ersten Faulbehälter zwischen 30 und 56 °C• rd. 28 Tage Verweilzeit im ersten Faulbehälter• Co-Vergärung; Klärschlamm-trocknung• Betriebsdaten von 2012 bis 2020
---	--

	<p>Gemeindliche Einrichtungen und Abwasser Holzkirchen</p> <ul style="list-style-type: none"> • 50.000 EW • zwei nacheinander geschaltete Faulbehälter (zweiter Faulbehälter ist unbeheizt und nicht durchmischt) • Variation der Faulraumtemperatur im ersten Faulbehälter zwischen 33 und 50 °C • rd. 35 Tage Verweilzeit im ersten Faulbehälter • Betriebsdaten von 2017 bis 2020
---	--

In Ergänzung zu den großtechnischen Betriebsdaten wurden im halbertechnischen Maßstab Faulungen mit einem Arbeitsvolumen von 15 bis 20 L und einer hydraulischen Verweilzeit von 20 Tagen betrieben. Als Inokulum wurde Faulschlamm und Mischungen aus Primär- und Überschussschlamm (PS:ÜSS) von der Kläranlage Holzkirchen als Substrat verwendet. In einer weiteren Versuchsphase wurde der Mischung aus PS:ÜSS als Co-Substrat noch Flotatschlamm (PS:SS:Co) aus der Milchindustrie beigemischt. Die Substratmischungen wurden vor der Zugabe in die Faulungen eingefroren und wieder aufgetaut.

- Versuchsphase I: Konstante Temperaturen von 33, 37, 43, 47 und 53 °C für PS:ÜSS
- Versuchsphase II: Konstante Temperaturen von 37, 45 und 53 °C für PS:ÜSS:Co
- Versuchsphase III: Gezielte Temperaturänderungen von ± 2 und 4 K pro Tag bei 33, 37, 43, 47 und 53 °C über 2 Wochen

Die Beschickung mit dem Substrat erfolgte händisch an 5 bzw. 6 Tagen in der Woche. Die Laborfaulungen bestehen aus dem Reaktionsvolumen mit integriertem Rührwerk, das kontinuierlich den Inhalt mit 20 U/min durchmischt. Der Faulschlamm wurde vor der Beschickung über einen Entnahmehahn am Boden der Laborfaulungen entnommen. Das produzierte Biogas wiederum wurde in einem Trommelgaszähler kontinuierlich mit einer Auflösung von 15-Minuten-Werten quantifiziert. Während der Beschickung und der Substratentnahme wurde der Trommelgaszähler abgeklemmt und ein separater Folienbeutel als Gasausgleichsvolumen genutzt, um den Eintritt von Luft zu verhindern. Der Versuchsaufbau der Laborfaulungen ist in **Abbildung 32** zu erkennen.



Abbildung 31: Versuchsaufbau der Laborfäulungen im Technikum der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr München (Foto: Marcel Hagen)

Das zugegebene Substrat wurde einmalig hinsichtlich den Parametern TR, GV und CSB analysiert. Die Quantifizierung der Gasmenge erfolgte kontinuierlich als 15-Minuten-Werte, wobei die Zusammensetzung des Gases einmal die Woche und bei den gezielten Temperaturänderungen arbeitstäglich analysiert wurde. Die Gasmengen wurden mit der Magnus-Formel hinsichtlich dem Wasserdampfdruck korrigiert und auf Standbedingungen normiert (VDI 2016). Aus den Faulschlämmen wurde arbeitstäglich der TR und GV sowie einmal in der Woche die Konzentrationen an gesamtem und gelöstem CSB, Orthophosphat, Ammonium sowie organische Säuren bestimmt. Eine Übersicht über die Analysen des Substrats, des Faulgases und des Faulschlammes ist in

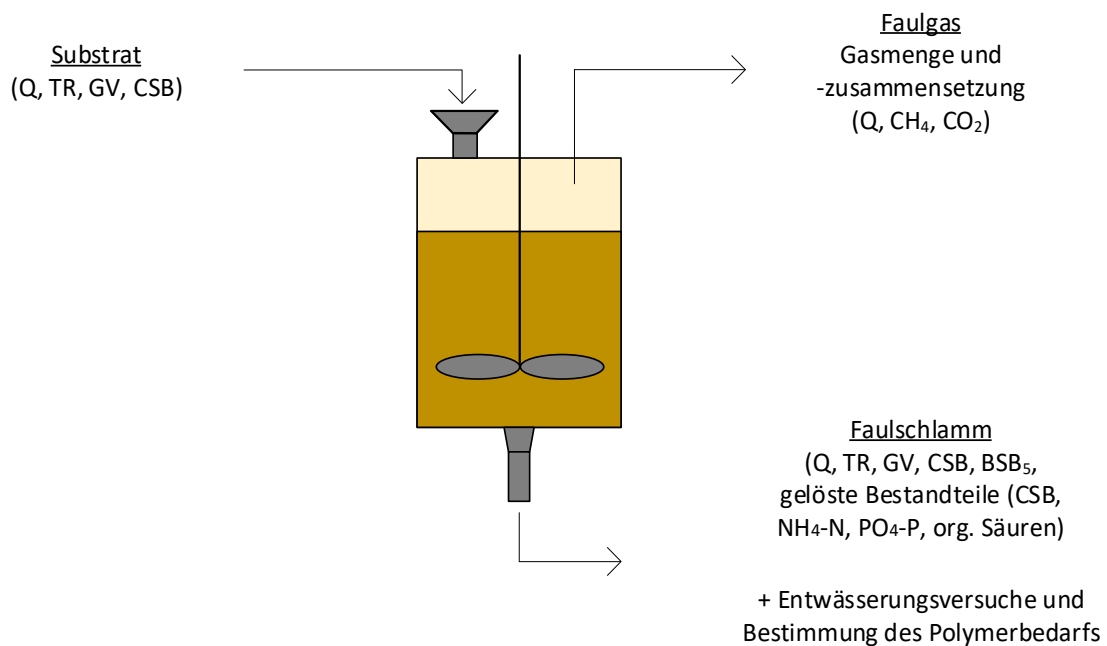


Abbildung 32: Übersicht über die Analysen in den jeweiligen Stoffströmen

Zusätzlich wurden nach Bedarf die Konzentrationen an gelösten Proteinen, im Vergleich zum Rinderalbumin-Komplex, nach dem Bradford-Protokoll und der BSB₅ bestimmt. Zur Beschreibung des Entwässerungsverhaltens wurden unterschiedliche Methoden angewendet, wobei die Versuche nach Abkühlung der Faulschlämme auf Raumtemperatur durchgeführt wurden. Nach den Empfehlungen der DWA (2019b) wurden die kapillare Fließzeit, der Gehalt an freiem, ungebundenem Wasser mittels Thermogravimetrie (TR(A)), der Polymerbedarf mittels Strömungspotentialmessung (Polymer: 9148FS von Zetag) bestimmt sowie der Zentrifugentest im Labormaßstab durchgeführt.

Die Auswertungen der großtechnischen Betriebsdaten als auch der Versuche an den Laborfaulungen erfolgten über CSB-Bilanzen. Nähere Informationen zu den Analysen sind der Publikation Steiniger et al. (2022b) zu entnehmen.

1.3.4 Ergebnisse der Betriebsdatenauswertung und Versuchsergebnisse

Variation der Faulraumtemperatur in den großtechnischen Faulbehältern

Auf den beiden Kläranlagen werden im Jahresverlauf die Faulraumtemperatur in Abhängigkeit der überschüssigen Wärme erhöht. Die Betriebsweise der Faulraumtemperatur beginnt typischerweise in den Frühjahrs- bzw. Sommermonaten mit der sukzessiven Aufheizung der Faulraumtemperatur, sodass mit abkühlenden Umgebungstemperaturen und dem dadurch steigenden Wärmebedarf in den Herbst- und Wintermonaten die Faulraumtemperatur bis in das Frühjahr des folgenden Jahres abkühlt.

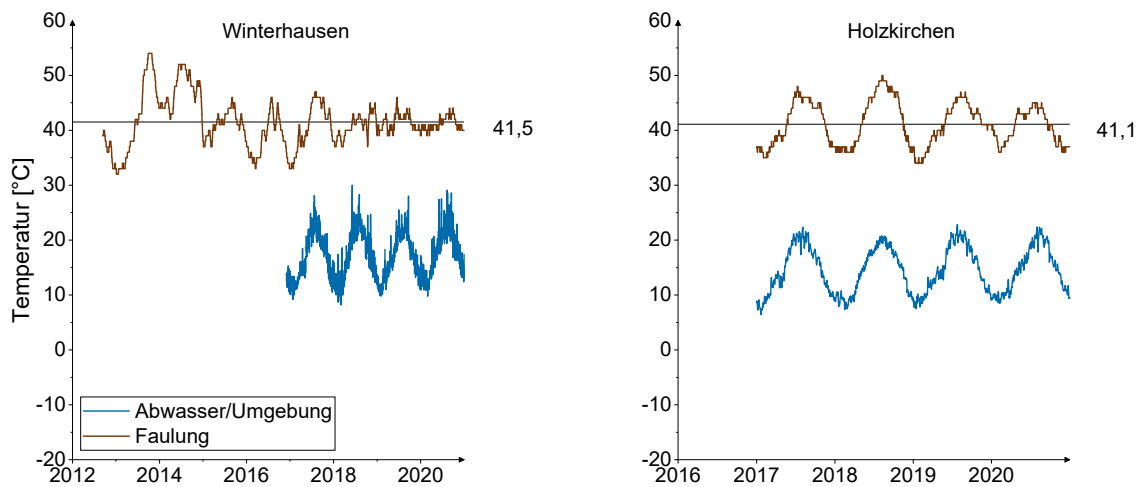


Abbildung 33: Temperaturprofile der Faulraumtemperatur und der Abwasser- bzw. Umgebungstemperatur in Winterhausen und Holzkirchen (in Anlehnung an Steiniger et al. (2022b))

Die Variation der Faulraumtemperatur variiert je nach Wärmebereitstellung (z. B. Betrieb von BHKW und Heizkessel; Co-Vergärung) und Wärmeverbrauch (z. B. Trocknung), der Rohschlamm- bzw. Umgebungstemperatur aber auch dem Betrieb von Heizkühlern am jeweiligen Standort. Die Ausprägung der Temperaturprofile ist maßgeblich abhängig von der Menge an überschüssiger Wärme, die nach Deckung des Wärmebedarfs der gesamten Kläranlage, noch zur Verfügung steht. In **Abbildung 33** sind die Temperaturprofile für die beiden Kläranlagen über die vorliegenden Zeiträume seit 2012 bzw. 2016 dargestellt. Die mittlere Faulraumtemperatur über die betrachteten Jahre ergeben sich zu 41,5 °C in Winterhausen bzw. 41,1 °C in Holzkirchen, sodass das Temperaturoptima im mesophilen Bereich von rd. 37 °C überschritten wird. Die Faulraumtemperatur variiert zwischen 32 und 54 °C in Winterhausen und zwischen 34 und 50 °C in Holzkirchen, wobei in beiden Fällen die täglichen Temperaturänderungen kleiner als 1 K pro Tag gehalten werden.

Die Ausprägung der Temperaturprofile ist maßgeblich abhängig von den standortspezifischen Randbedingungen, die Einfluss auf die Wärmebereitstellung und den Wärmeverbrauch nehmen. Während in Winterhausen eine Klärschlamm-trocknung betrieben und Co-Vergärung praktiziert wird, existieren in Holzkirchen keine zusätzlichen Wärmeverbraucher. Entsprechend folgen die Faulraumtemperaturen in Holzkirchen deutlich dem Jahresgang und somit auch der Abwasser- bzw. Umgebungstemperatur, wohingegen das Temperaturprofil des Faulbehälters in Winterhausen weniger deutlich den Jahreszeiten folgt.

Einfluss der Faulraumtemperatur auf die Prozessstabilität des anaeroben Abbaus

Die Prozessstabilität wird anhand der spezifischen Methanausbeute, dem Methangehalt und der Konzentrationen an organischen Säuren bei den einzelnen Temperaturniveaus beurteilt. Die detaillierteren Ergebnisse für die spezifischen Methanausbeuten und dem Methangehalt sind sowohl für die Faulungen der beiden Kläranlagen und im Labormaßstab in

Abbildung 34 dargestellt. Nähere Informationen sind ebenfalls in Steiniger et al. (2022b) zu finden.

Die spezifischen Methanausbeuten der großtechnischen Faulung in Winterhausen liegen bei Faulraumtemperaturen zwischen 34 und 49 °C in etwa auf einem Niveau. Bei 52 °C treten die geringsten spezifischen Methanausbeuten auf, wobei bei diesem Temperaturniveau nur zwei auswertbare Zeiträume vorlagen. Im Vergleich zu den Werten der Faulbehälter in Holzkirchen, weist die Faulung in Winterhausen aufgrund der Co-Vergärung höhere spezifische Methanausbeuten auf. Die Methangehalte liegen zwischen 63,9 und 65,4 % in Winterhausen und zwischen 62,7 und 64,2 % in Holzkirchen. Sowohl die spezifischen Methanausbeuten als auch die Methangehalte weisen keine signifikanten Auffälligkeiten in Bezug auf die Faulraumtemperatur auf. Die Konzentrationen an organischen Säuren werden auf beiden Kläranlagen mit unterschiedlichen Methoden analysiert (Küvetten-tests, GC-Analyse), wobei jeweils die Konzentrationen für alle Temperaturniveaus kleiner als 500 mg/L und als unkritisch einzustufen sind.

Die Ergebnisse sind zudem unter Berücksichtigung der empfohlenen Raumbelastungen in Abhängigkeit der Anlagengrößen und der hydraulischen Verweilzeiten zu interpretieren. Die organischen Raumbelastungen in der Faulung in Winterhausen betrug bei den Temperaturniveaus zwischen 34 und 49 °C zwischen 1,5 bis 1,9 kg CSB/(m³·d) und 2,2 kg CSB/(m³·d) bei 52 °C. Die Faulung in Holzkirchen wurde mit Raumbelastungen zwischen 1,7 und 2,1 kg CSB/(m³·d) betrieben. Zudem weisen sowohl die organischen Raumbelastungen als auch die hydraulischen Verweilzeiten von > 25 Tagen in den Faulungen an beiden Standorten noch freie Faulraumkapazitäten auf; befinden sich dennoch innerhalb der Empfehlungen für organische Raumbelastungen nach DWA-Merkblatt 368 (DWA 2014). Insgesamt ist aus dem Betrieb der großtechnischen Faulungen abzuleiten, dass ein stabiler Prozess im Temperaturbereich zwischen 33 und 53 °C ohne Einbußen der Prozessstabilität, unter den spezifischen Randbedingungen, möglich ist.

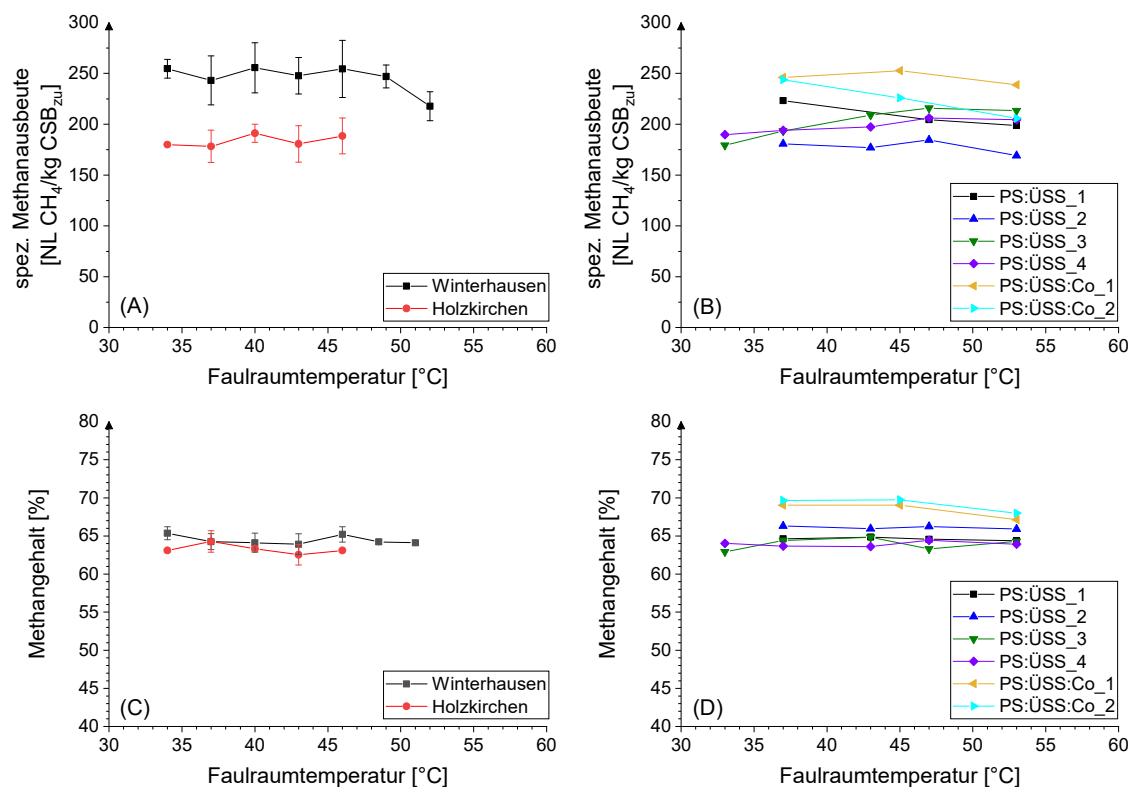


Abbildung 34: Spezifische Methanausbeuten und Methangehalte für die großtechnischen Faulungen (A, C) und die Laborfaulungen (B, D) in Abhängigkeit der Faulraumtemperatur (in Anlehnung an Steiniger et al. (2022b))

Die spezifischen Methanausbeuten für die Mischungen mit PS:ÜSS zwischen 33 und 53 °C verbleiben mehrheitlich auf einem konstanten Niveau bei organischen Raumbelastungen im Mittel von 1,7 kg CSB/(m³·d). Die Methangehalte liegen in der Größenordnung zwischen 63,5 und 64,8 %. Die Konzentrationen an organischen Säuren steigen mit höherer Faulraumtemperatur von im Mittel 311 mg/L bei 33 °C auf 488 mg/L bei 53 °C leicht an (als Essigsäureäquivalente mittels Titration).

Für die Mischungen mit PS:ÜSS:Co deuten sich höhere spezifische Methanausbeuten, Methangehalte und Konzentrationen an organischen Säuren bei den einzelnen Temperaturniveaus im Vergleich zu den Mischungen mit PS:ÜSS an. Sowohl bei den spezifischen Methanausbeuten als auch den Methangehalten zeigte sich eine Verringerung bei steigender Faulraumtemperatur, was sich insbesondere bei der zweiten, gefütterten Charge mit PS:ÜSS:Co deutlich zeigt (vgl. **Abbildung 34** B,D). Die organischen Raumbelastungen lagen bei den einzelnen Temperaturniveaus bei rd. 2,3 kg CSB/(m³·d). Für die Mischungen PS:ÜSS:Co zeigt sich mit steigender Faulraumtemperatur ein leichte Abnahme der mittleren Methangehalte von 69,3 bei 37 °C bzw. 69,7 % bei 45 °C auf 67,6 % bei 53 °C. Die Konzentrationen an organischen Säuren erhöhen sich sukzessive bis auf 700 mg/L für PS:ÜSS:Co_1 bzw. 1.200 mg/L für PS:ÜSS:Co_2 53 °C.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit den Laborfaulungen zeigen, dass für Mischungen mit PS:ÜSS der anaerobe Abbauprozess bei Temperaturen zwischen 33 und 53 °C im eingefahrenen Zustand stabil abläuft. Für Mischungen mit PS:SS:Co hingegen deuten die spezifischen Methanausbeuten, der Methangehalt und die Akkumulation der organischen Säuren eine Verschlechterung der Prozessstabilität insbesondere bei 53 °C an.

Einfluss der Faulraumtemperatur auf die gelösten Bestandteile im Schlammwasser und auf das Entwässerungsverhalten

Die Temperatur der Faulung nimmt sowohl Einfluss auf die Rückbelastung sowie auf die Entwässerungseigenschaften. Zur Beurteilung des Einflusses der Faulraumtemperatur werden die Ergebnisse der Untersuchungen mit den Faulschlämmen aus den Laborfaulungen, die unter kontrollierten Bedingungen betrieben wurden, herangezogen.

Die Konzentrationen an gelöstem CSB und Ammonium im Schlammwasser der einzelnen Substratchargen sind in **Abbildung 35** dargestellt. Während die Konzentrationen an gelöstem CSB mit zunehmender Faulraumtemperatur deutlich ansteigen, ergeben sich im Vergleich zu 37 °C bis zu 3,6- bis 8,3-mal höhere Konzentrationen bei 53 °C. Der Anstieg kann einerseits auf die erhöhte Hydrolyserate bzw. verlangsamte Methanogenese (Donoso-Bravo *et al.* 2009) sowie auf die Zerstörung der Schlammflocken bei höheren Faulraumtemperaturen (Bouskova *et al.* 2006) zurückgeführt werden. Eine signifikante Bildung von refraktären Verbindungen, wie sie bei der Schlammvorbehandlung mittels Thermodruckhydrolyse bei Temperaturen zwischen 160 und 180 °C bekannt sind, die den Deammonifikationsprozess hemmen, die nachfolgende aerobe Behandlungsstufe passieren, oder in den Ablauf der WRRF gelangen, wird im hier betrachteten Temperaturbereich von 33 bis 53 °C als vernachlässigbar angenommen (Zhang *et al.* 2016; Balasundaram *et al.* 2022).

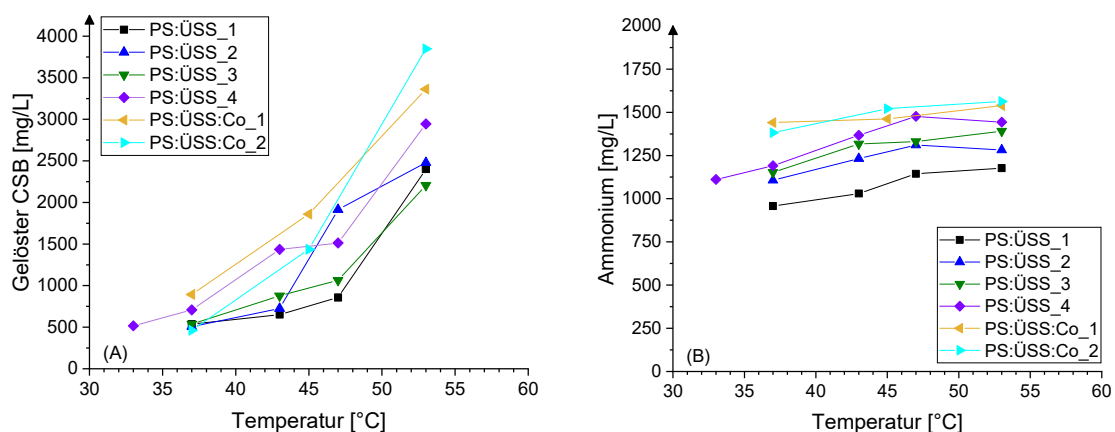


Abbildung 35: Konzentrationen von gelöstem CSB (A) und Ammonium (B) im Schlammwasser (in Anlehnung an Steiniger *et al.* (2022))

Die Konzentration an Ammonium steigt mit Erhöhung der Faulraumtemperatur nur geringfügig an. Für die Mischungen mit PS:ÜSS werden bis zu 1,2-mal höhere Konzentrationen und für die Mischungen mit PS:ÜSS:Co 1,1-mal höhere Konzentrationen bei 53 °C im Ver-

gleich zu jenen bei 37 °C erzielt. Die Konzentrationen an Ammonium befinden sich, insbesondere bei Temperaturen > 43 °C in der Größenordnung von 1.500 mg/L, ab der eine Ammoniakhemmung auftreten kann (Chen *et al.* 2008). Für die Mischungen mit PS:ÜSS korreliert der Anstieg der Ammoniumkonzentrationen mit höheren spezifischen Methanausbeute wohingegen für Mischungen mit PS:ÜSS:Co eine Verringerung der spezifischen Methanausbeute auftritt (vgl. **Abbildung 34**). Wie bereits in der Literatur bekannt, können insbesondere proteinreiche Substrate, wie Flotatschlamm, der Gefahr bei thermophilen Temperaturen in eine Ammoniakhemmung unterliegen, um dies zu bestätigen oder auszuschließen sind jedoch weitere Versuche mit einem längeren Beobachtungszeitraum notwendig. Denn grundsätzlich kann sich die Biozönose auch an höhere Ammoniumkonzentrationen adaptieren.

Die Ergebnisse verschiedener Entwässerungstests von sCST, TS nach Zentrifugation, TR(A) und die Bestimmung des Polymerbedarfs bei den einzelnen Temperaturniveaus einer Mischung von PS:ÜSS sind in **Abbildung 36** zusammengefasst. Während der sCST von 128 s/% bei 37 °C auf 383 s/% bei 53 °C fast linear mit der Faulraumtemperatur ansteigt, zeigt sich für den berechneten TR nach der Zentrifugation eine Erhöhung von 16,5 % bei 37 °C auf 19,8 % bei 53 °C mit der Faulraumtemperatur (vgl. **Abbildung 36** (A)). Die thermogravimetrische Messung des TR(A) zeigt einen leichten Anstieg von 28,1 % bei 37 °C auf 30 % bei 53 °C. Die ermittelten Polymerbedarfe zeigen wiederum fast eine Verdoppelung von 18,5 kg AS/Mg TS bei 37 °C auf 30,8 kg AS/Mg TS bei 53 °C.

Für die Mischungen mit PS:ÜSS:Co ist zu erwarten, dass sich der sCST mit der Faulraumtemperatur erhöht. Der Einfluss auf das Entwässerungsergebnis bei anteiliger Zugabe von Flotatschlamm im Substrat wurde bereits von Hubert *et al.* (2020) mittels Bestimmung des sCST aufgezeigt.

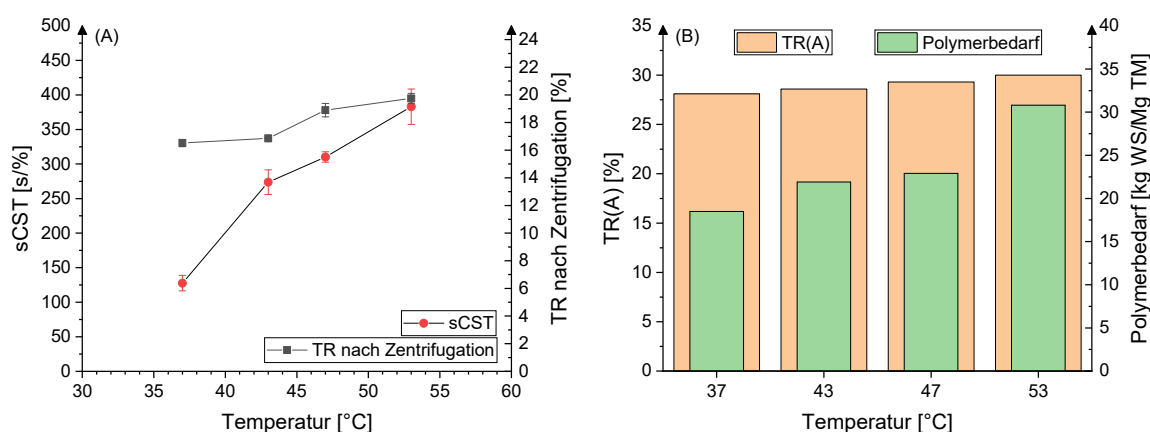


Abbildung 36: Entwässerungsergebnisse des spezifischen CST und TR nach Zentrifugation im Labormaßstab (A) sowie des TR(A), thermogravimetrisch ermittelt, und der Bestimmung des Polymerbedarfs, gemessen mittels Strömungspotentialmessung (B) für eine Mischung von PS:ÜSS (in Anlehnung an Steiniger *et al.* (2022))

Die angewendeten Methoden ermöglichen einerseits die Beurteilung des Einflusses auf das Entwässerungsergebnisse bei Mischungen von PS:ÜSS, mit dem TR in Zentrifugentests und dem TR(A), sowie andererseits die Abschätzung des Polymerbedarfs, mit dem sCST und der Messung des Strömungspotentials. Die Ergebnisse sowohl der Entwässerungstests als auch Polymerbedarfe ergeben sich sehr hohe Zusammenhänge mit Korrelationskoeffizienten von 0,96 bzw. 0,81. Entsprechend lässt sich eine Verbesserung der Entwässerbarkeit und eine deutliche Zunahme des Polymerbedarfs mit steigender Faulraumtemperatur schlussfolgern. Vergleichbare Ergebnisse werden ebenfalls von Bouskova *et al.* (2006) für die Temperaturniveaus 33, 35, 37, 39 und 55 °C berichtet, wobei hier jedoch anderen Methoden angewendet wurden. Eine Erhöhung des Polymerbedarf bei Erhöhung der Faulraumtemperatur wird zudem auch von Kopp (2001) und Rossol *et al.* (2005) berichtet.

Einfluss von Temperaturänderungen auf die Prozessstabilität

In den großtechnischen Faulungen auf beiden Kläranlagen zeigte sich anhand der bisherigen Ausführungen, dass die Faulung saisonaler Variation der Faulraumtemperatur prozessstabil mit täglichen Temperaturänderungen von kleiner 1 K pro Tag betrieben werden kann. Zur Identifikation von Grenzen von täglichen Temperaturänderungen wurden ausgehend von einem an das jeweilige Temperaturniveau adaptiertem Faulschlamm in den Laborfaulungen gezielte Temperaturänderungen über zwei Wochen von ± 2 und 4 K bei 33, 37, 43, 47 und 53 °C durchgeführt und ein Reaktor wurde als Referenzwert konstant bei 37 °C betrieben. Unter Berücksichtigung der Betriebsweise in der Großtechnik ist die Wahl der täglichen Temperaturänderungen an den Laborfaulungen als eine Worst-Case-Betrachtung einzuordnen.

Die Versuche an den Laborfaulungen zeigen, dass sowohl für tägliche Temperaturänderungen von ± 2 als auch ± 4 K pro Tag und bei organischen Raumbelastungen von rd. 2 kg CSB/(m³·d) keine signifikanten Instabilitäten des anaeroben Abbaus zu erkennen. Die Prozessstabilität wird hier über die Konstanz der spezifischen Methanausbeuten, dem Methangehalt und der Konzentration an organischen Säuren (mittels Titration) beurteilt. Zwar kam es zwischenzeitlich zur Akkumulation von organischen Säuren, diese verblieben jedoch unter 1.000 mg/l und wurden innerhalb der nachfolgenden Tage wieder abgebaut. Die spezifischen Methanausbeuten und der Methangehalt zeigen jedoch keine Instabilitäten im anaeroben Abbauprozess an.

In Ergänzung zu diesen Erkenntnissen muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass gleichwohl bei der Inbetriebnahme der Laborfaulungen und der Einstellung der jeweiligen Temperaturniveaus (ausgehend von 37 °C) ebenfalls Temperaturerhöhungen von 4 K pro Tag vorgenommen wurden. Hierbei kam es zu kurzfristigen Instabilitäten in Bezug auf die Gasproduktion und dem Methangehalt bei Erhöhung von 43 auf 47 °C bzw. 47 auf 53 °C. Es ist davon auszugehen, dass die Adaption an das jeweilige Temperaturniveau eine entscheidende Rolle in Bezug auf die Prozessstabilität bei den durchgeführten Versuchen spielt.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass bei der Flexibilisierung der Faulraumtemperatur die täglichen Temperaturänderungen pro Tag möglichst geringgehalten werden sollten. Im Sinne der Aufrechterhaltung der Prozessstabilität aus den großtechnischen Erfahrungen dient die Unterschreitung von 1 K pro Tag bei allen Temperaturen zwischen 33 und 53 °C als Orientierungswert.

1.3.5 Einfluss auf die Wärmebilanz der gesamten Kläranlage

Die saisonale Variation der Faulraumtemperatur ermöglicht durch die Zwischenspeicherung der überschüssigen Wärme einen wertvollen Beitrag zu einem ganzheitlichen Wärmemanagement auf Kläranlagen. Die energetische Beurteilung erfolgt hierbei anhand von Wärmebilanzen, wobei diese am Beispiel einer bereits energetisch optimierten Modellkläranlage mit 500.000 EW, angelehnt an die Ausführungen in MULNV (2018), mit einem Faulbehältervolumen von 16.000 m³ bei einer hydraulischen Verweilzeit von 20 Tagen ausgeführt wird. Es werden drei Betriebsweisen der Faulraumtemperatur miteinander verglichen:

- Betriebsweise I: konstante Faulraumtemperatur von 37 °C („konventionell“)
- Betriebsweise II: flexible Faulraumtemperatur zwischen 37 und 42 °C („Faulung mit erhöhter Temperatur“)
- Betriebsweise III: vollflexible Faulraumtemperatur mit minimalen, jährlichen Wärmedefiziten und -überschüssen („Faulung als saisonaler Wärmespeicher“)

In der Wärmebilanz wird im Jahresverlauf der monatliche Wärmebedarf der monatlichen Wärmebereitstellung aus der Verbrennung des methanhaltigen Faulgases in BHKWs gegenübergestellt. Der Wärmebedarf setzt sich aus der Schlammaufheizung, der Aufrechterhaltung der Faulraumtemperatur aufgrund von Transmissionsverlusten, allgemeinen Speicher-, Verteilungs- und Umwandlungsverlusten, der Beheizung von Betriebs- und Werkgebäuden sowie dem Warmwasserbedarf zusammen. Für die Wärmebereitstellung wird anhand der zuvor ermittelten, spezifischen Methanausbeuten und Literaturwerte von einer konstanten spezifischen Methanausbeute bei Temperaturen zwischen 33 und 53 °C für kommunalen Rohschlamm ausgegangen. Zudem wird vereinfacht angenommen, dass die Menge und Qualität des Rohschlammes über das Jahr konstant ist. Die Ergebnisse der Wärmebilanzen werden für die drei Betriebsweisen anhand der monatlichen Wärmebereitstellung und dem Wärmebedarf in Abhängigkeit der Faulraumtemperatur in **Abbildung 37** aufgezeigt.

Im Jahresverlauf sind die Wärmebereitstellung bei allen Betriebsweisen identisch, wobei der Wärmebedarf in Abhängigkeit der Jahreszeiten aufgrund saisonaler Schwankungen der Umgebungs- und Rohschlammtemperatur sowie der Faulraumtemperatur variiert. Bei der „konventionellen“ Betriebsweise mit einer konstanten Faulraumtemperatur von 37 °C über

das ganze Jahr treten mit steigenden Umgebungstemperaturen im Frühjahr Wärmeüberschüsse auf, die über den Sommer bis in den Herbst hinein andauern. In den Wintermonaten mit geringen Umgebungstemperaturen wiederum übersteigt der Wärmebedarf die Wärmbereitstellung, wodurch Wärmedefizite auftreten.

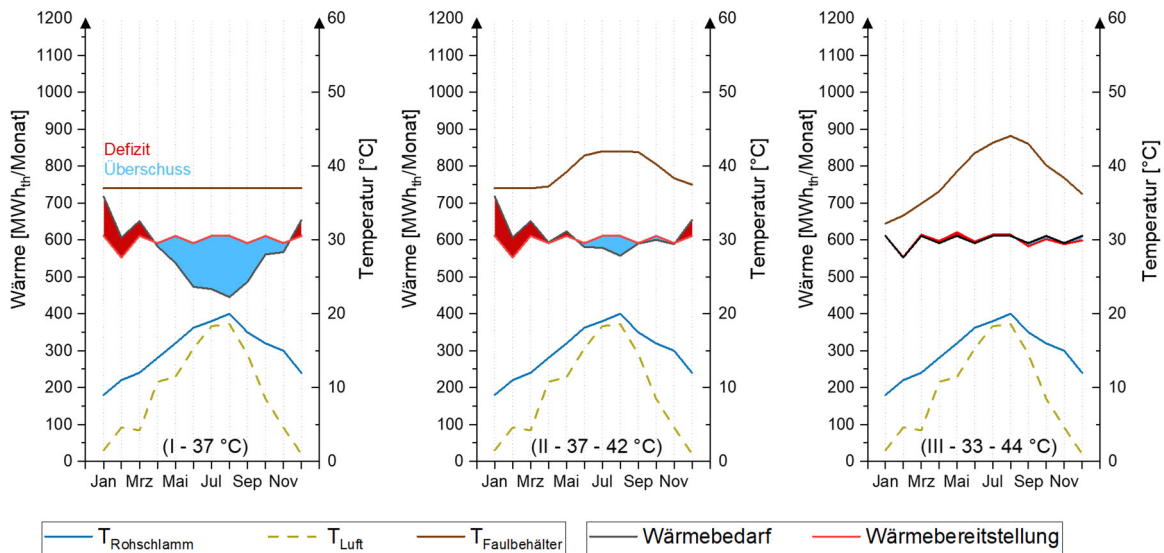


Abbildung 37: Wärmebilanzen der Modellkläranlage für die drei Betriebsweisen in Abhängigkeit der Faulraumtemperatur und Identifikation von Phasen mit Wärmedefiziten und -überschüssen (verändert nach Steiniger et al. (2021), Steiniger et al. (2022))

Die zeitliche Entkopplung von Phasen mit Wärmeüberschüssen und -defiziten macht die Zwischenspeicherung von überschüssiger Wärme durch die Erhöhung der Faulraumtemperatur zu einer Betriebsweise, bei der die Faulung bereits als Wärmespeicher fungiert. Die Zwischenspeicherung der überschüssigen Wärme wird in der Betriebsweise „Faulung mit erhöhter Temperatur“ und „Faulung als saisonaler Wärmespeicher“ in unterschiedlichem Ausmaß angewendet. In beiden Fällen wird jedoch die Faulraumtemperatur über dem Temperaturoptimum der beteiligten Biozönose betrieben, wodurch sich die Menge an überschüssiger Wärme deutlich (Betriebsweise II) oder sogar auf ein Minimum (Betriebsweise III) reduziert. Je höher die Faulraumtemperatur, desto größer ist wiederum der Wärmebedarf der Faulung, wobei die Schlammaufheizung grundsätzlich die größte Einzelposition ausmacht. Dies hat zur Folge, dass das jährliche Wärmedefizit in der Betriebsweise II sogar geringfügig höher ist als das Wärmedefizit der Betriebsweise I.

Die zusätzliche Absenkung der Faulraumtemperatur in den Wintermonaten in der Betriebsweise III wirkt dem entgegen, sodass sich sowohl die Wärmeüberschüsse als auch die Wärmedefizite auf ein Minimum reduzieren können. Rein rechnerisch bedeutet dies, dass die Faulraumtemperatur im Jahresverlauf zwischen 33 und 44 °C betrieben wird. Zur Aufrechterhaltung der Prozessstabilität sind insbesondere die Größenordnung der Temperaturänderungen zu berücksichtigen, wobei bei den Betriebsweisen II und III die hier erarbeitenden Empfehlungen zur Unterschreitung von 1 K pro Tag bei allen Temperaturniveaus

eingehalten werden. Sowohl der Temperaturbereich der Faulraumtemperatur und die Temperaturänderungen liegen zudem in der Größenordnung der Betriebsweise der beiden großtechnischen Faulbehälter in Winterhausen und Holzkirchen.

Bezogen auf die Wärmebilanz der gesamten Kläranlage kann die Betriebsweise der Faulung als Wärmespeicher auch aus energetischer Sichtweise einen Beitrag zum Energiemanagement auf Kläranlagen leisten. Die Ausprägung der Temperaturprofile im Betrieb in der Praxis ist dabei maßgeblich von der Menge an überschüssiger Wärme und den standort-spezifischen Randbedingungen abhängig. Dabei sind beispielsweise einerseits weitere Wärmeverbraucher (wie z. B. Hygienisierung, Schlamm-trocknung, thermische Desintegration, Prozesswasserbehandlung mittels Deammonifikation, Kältebedarf etc.) und andererseits die Co-Vergärung zu berücksichtigen.

1.3.6 Handlungsempfehlungen

Aus den betrieblichen Erfahrungen und den Betriebsdaten der großtechnischen Faulbehälter sowie den Untersuchungen mit den Laborfaulungen werden folgende Empfehlungen bei der Variation der Faulraumtemperatur im Jahresverlauf festgehalten:

- Vor der Variation der Faulraumtemperatur ist die kritische Überprüfung der spezifischen Randbedingungen der Faulungen am Standort zu prüfen (wie bspw. die hydraulische Verweilzeit, org. Raumbelastung etc.).
- Die Erhöhung der Faulraumtemperatur nimmt aufgrund des steigenden Temperaturgradienten zwischen Faulraum- und Umgebungstemperatur maßgeblich Einfluss auf die Statik des Faulbehälters. Entsprechend ist zwingend der statische Nachweis vor Variation der Faulraumtemperaturen zu führen, insbesondere bei Betonbauwerken.
- Für Rohschlamm von kommunalen Kläranlagen und hydraulischen Verweilzeiten von > 20 Tagen ist die saisonale Variation der Faulraumtemperatur prozessstabil möglich. Anhand der durchgeführten Untersuchungen ist mit einer Erhöhung des gelösten CSB und des Ammoniums zu rechnen. Darüber hinaus kann sich das Entwässerungsergebnis verbessern auf Kosten eines erhöhten Polymerbedarfs.
- Die täglichen Temperaturänderungen spielen eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung der Prozessstabilität. In Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Wärme sind die Temperaturänderungen insbesondere bei den Aufheizphasen in den Frühjahrs- und Sommermonaten für einen stabilen anaeroben Abbauprozess auf ein Minimum zu halten. Grundsätzlich scheinen tägliche Temperaturänderungen von 1 K pro Tag bei Temperaturen zwischen 33 und 53 °C einen prozessstabilen anaeroben Abbau zu ermöglichen.
- Die Zugabe von Co-Substraten erhöht die Menge an überschüssiger Wärme in der Wärmebilanz. In Vorversuchen ist die Abbaubarkeit bei erhöhten Temperaturniveaus zu

prüfen. Insbesondere die vermehrte Zugabe von leicht abbaubaren sowie proteinhaltigen (Co-)Substraten können die Prozessstabilität des anaeroben Abbaus und den Stabilisierungsgrad des Faulschlammes negativ beeinträchtigen.

1.4 AP 5 - Flexibilisierung im Kontext der Energiewirtschaft

Im Rahmen von AP 5 wurde zum einen der Einfluss einer Regelernergievermarktung zum anderen das Potential einer Beteiligung am Day-Ahead-Markt untersucht. Die Untersuchungen erfolgten anhand einer Modellkläranlage die auf Grundlage von Standardparametern und in Anlehnung an den bestehenden Bemessungshinweisen der DWA definiert wurde. Darüber hinaus wurde am Beispiel von drei Kläranlagen unterschiedlicher Größe Lastganalysen durchgeführt. Auf Grundlage der Analysen konnten Hinweise zur Erhöhung der Eigenstromquote gegeben werden,.

1.4.1 Untersuchung der Flexibilisierung am Beispiel einer Modellkläranlage

Entwicklung von Szenarien zur Flexibilisierung

Am Beispiel einer Modellkläranlage wurden verschiedene Szenarien zur Flexibilisierung definiert und untersucht:

- **Szenario 1 (Sz1):** 200.000 EW, Normalbetrieb (Status quo)
 - Deckung Eigenstrombedarf ca. 80 %
 - Kontinuierliche Beschickung der Faulung
 - Konventionelle Auslegung Gasspeicher und BHKW
- **Szenario 2 (Sz2):** 200.000 EW, Idealbetrieb
 - Optimale Belüftung/Verdichter / geringer Aufwand für Pumpen
 - Deckung Eigenstrombedarf 100 %
 - Flexibilisierte Beschickung der Faulung (ohne Co-Substratzugabe)
 - Angepasste Auslegung Gasspeicher und BHKW
 - Kein Strombezug; keine Stromeinspeisung
- **Szenario 3 (Sz3):** 200.000 EW, Idealbetrieb und Zugabe von Co-Substrat
 - Optimale Belüftung/Verdichter/geringer Aufwand für Pumpen
 - Deckung Eigenstrombedarf > 100 %
 - Flexibilisierte Beschickung der Faulung mit Co-Substrat (Betrachtung ausschließlich Flotatschlämme Molkerei)
 - Angepasste Auslegung Gasspeicher und BHKW
 - Optimiertes Zusammenspiel von Zugabestrategie, Gasspeicher und BHKW
 - Stromeinspeisung; kein Strombezug

Aufbau der Modellkläranlage

Für die Auslegung der Modellkläranlage wird für alle Szenarien von einer kommunalen Belastung von 200.000 EW ausgegangen. Die Abwasserbehandlung erfolgt mittels konventionellem Verfahren, bestehend aus Rechen, Sandfang, Vorklärung, Belebtschlammverfahren. Die Klärschlammbehandlung besteht aus einer maschinellen Überschussschlammverdickung, mesophiler Faulung (Aufenthaltszeit 25 d) sowie einer Klärschlammmentwässerung.

Die nachfolgende Tabelle zeigt Mengen, Frachten und den spezifischen Methangas-Anfall der Schlämme im Mittel.

Tabelle 9: Menge, und Frachten des Klär- und Flotatschlammes

	CSB-Konz.	Menge	CSB-Fracht
	kg/m ³	m ³ /d	kg/d
Primärschlamm	50	140	7.200
Überschussschlamm	60	109	6.596
Flotatschlamm	150	10,7	1.600

Für den Methangasanfall wurden 350 NI CH₄/ kg CSB_{abgebaut} angesetzt.

Tabelle 10: Abbaugrad des Primär- und Überschussschlammes sowie des Flotatschlammes in der Faulung und Methankonzentration des Faulgasanteils

Schlamm/ Co-Substrat	CSB Abbaugrad	Methankonzentration
	%	%
Primärschlamm	55	65
Überschussschlamm	35	63
Flotatschlamm	80	63

Die Modelkläranlage wurde ergänzt durch Betriebsdaten einer realen Kläranlage. Die reale Kläranlage ist ebenfalls konventionell aufgebaut und hat eine Ausbaugröße von 200.000 EW. In **Abbildung 38** ist ein beispielhafter Verlauf vom täglichen Gasanfall über mehrere Jahre dargestellt. Das Verhältnis des Gasanfalls vom Maximum zum Minimum des täglichen Gasanfalls beträgt ca. 1,75. Das Verhältnis vom Maximum zum Mittelwert beträgt ca. 1,33. Die Schwankungen entstehen aus saisonalen Einflüssen aus dem Einzugsgebiet. Das Maximum des täglichen Gasanfalls ist bei der Bemessung der Gasverwertung mittels BHKW zu berücksichtigen.

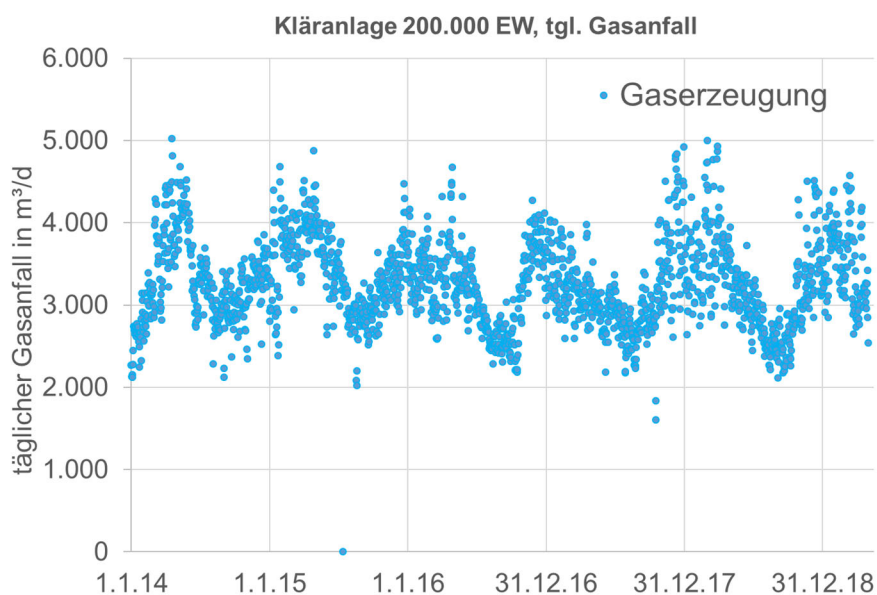


Abbildung 38: Exemplarischer täglicher Gasanfall über mehrere Jahre einer Kläranlage mit 200.000 EW

Außerdem muss noch von einer Schwankung des Gasanfalls im Tagesgang also jeden einzelnen Punktes in der Graphik von bis zu 60 % des mittleren stündlichen Gasanfalls (m^3/h) ausgegangen werden. In **Abbildung 39** ist ein beispielhafter Verlauf eines stündlichen Gasanfalls über eine Woche hinweg zu sehen.

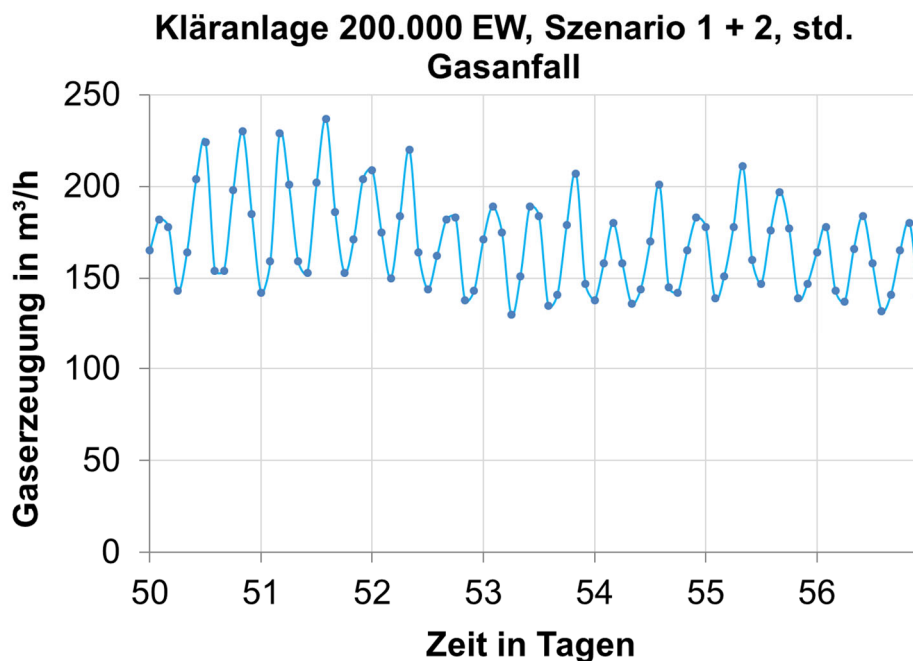


Abbildung 39: Exemplarischer stündlicher Gasanfall über eine Woche einer Kläranlage mit 200.000 EW im Szenario 1 (Sz1) und 2 (Sz2) (Beispiel).

Gasspeicher (Sz1, Sz2, Sz3)

Gemäß (Merkblatt DWA-M 363, Herkunft und Verwertung von Biogas, 2022) Tabelle 12 für Kläranlagen ab GK 4 mit deutlichen Schwankungen des Gasanfalls und BHKW-Eigenenergienutzung wird

- ein Speichervolumen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Gasanfall im Bereich von 20% bis 40% und eine Reserveleistung der Blockheizkraftwerke von 20% bis 30% oder
- ein Speichervolumen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Gasanfall von 50% bei kaum BHKW-Reserveleistung empfohlen.

Ziel der Gasverwertung (Gasverwertungsstrategie) ist die weitestgehende Deckung des Energiebedarfes im Tages- und Jahresgang.

Eine Auswertung der Betriebsdaten (2 h-Werte des Gasanfalls auf einer Kläranlage der Größenklasse 5 mit 100%-iger Deckung des Eigenstrombedarfs über einen Zeitraum von 2 Monaten) ergab ein erforderliches Gasspeichervolumen von 60 % des durchschnittlichen täglichen Gasanfalls. Dadurch wurde eine nahezu vollständige Abdeckung des Strombedarfs bei gleichzeitiger Ausnutzung des gesamten Speichervolumens erreicht (siehe **Abbildung 40**).

Die Auswertung ergab außerdem, dass das Maximum des Strombedarfs der Kläranlage doppelt so hoch ist wie das Minimum (Faktor 2). Die Differenzen zwischen dem Gasanfall (mit Faktor 1,75) und dem Strombedarf (mit Faktor 2) gleicht der Gasspeicher aus.

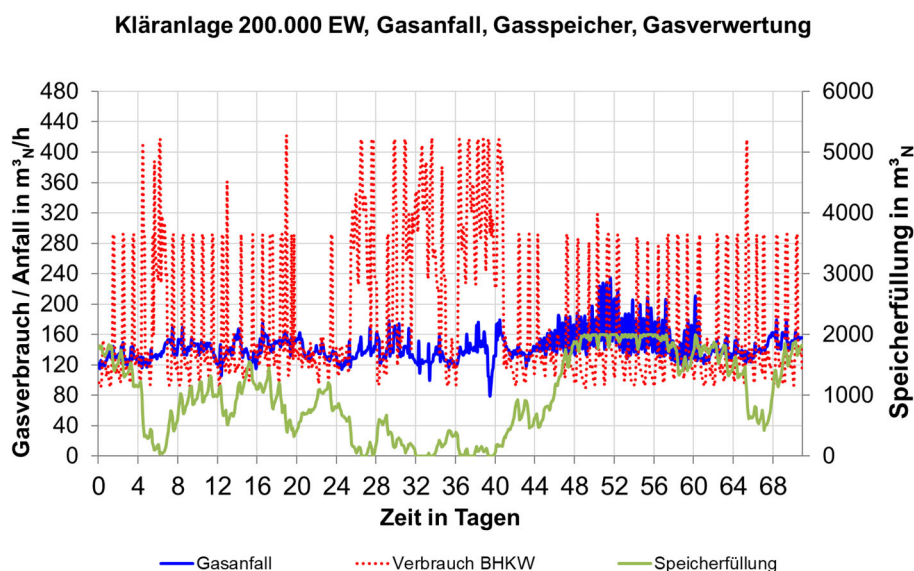


Abbildung 40: stündlicher Gasanfall, Gasspeicherung und Gasverwertung einer Kläranlage mit 200.000 EW (Beispiel)

Der Gasspeicher dient zum Ausgleich der Tagesschwankungen zwischen Gasanfall und Gasverwertung. Der Betrieb der Blockheizkraftwerke zur Teildeckung des Strombedarfes kann sich dabei nach mehreren Gasverwertungsstrategien richten:

- a) Betrieb BHKW nach Gasanfall
- b) Betrieb BHKW möglichst gleichmäßig konstant
- c) Betrieb BHKW nach Hoch- und Niedrigtarif
- d) Betrieb BHKW bedarfsgerecht

Diese Strategien haben ebenfalls Auswirkungen auf das erforderliche Gasspeichervolumen.

Gasverwertung (Sz1, Sz2, Sz3)

Die Verwertung des Faulgases erfolgt mittels Kraft-Wärmekopplung in Blockheizkraftwerken. Die Dimensionierung der Blockheizkraftwerke orientiert sich am maximalen täglichen Gasanfall (bzw. 95%-Wert) und sollte möglichst auf mehrere Aggregate aufgeteilt werden, um den Gasanfallschwankungen wirtschaftlich effizient folgen zu können. Dafür kommen BHKW-Größen zwischen $200 \text{ kW}_{\text{elektr.}}$ und $400 \text{ kW}_{\text{elektr.}}$ zum Einsatz. Gemäß (Brennstoffzellen/BHKW, 2014) haben Klärgas-Blockheizkraftwerke in diesem Leistungsbereich einen elektrischen Wirkungsgrad von etwa 39%. Dieser elektrische Wirkungsgrad wird für die Blockheizkraftwerke im Folgenden angesetzt.

Abbildung 41 zeigt als Beispiel die elektrischen Wirkungsgrade eines BHKW mit einer max. elektrischen Leistung von 250 kW. Im Teillastbereich zwischen 100 % und 50 % (125 kW) reduziert sich der Wirkungsgrad von 40,2 % auf 38,5 %.

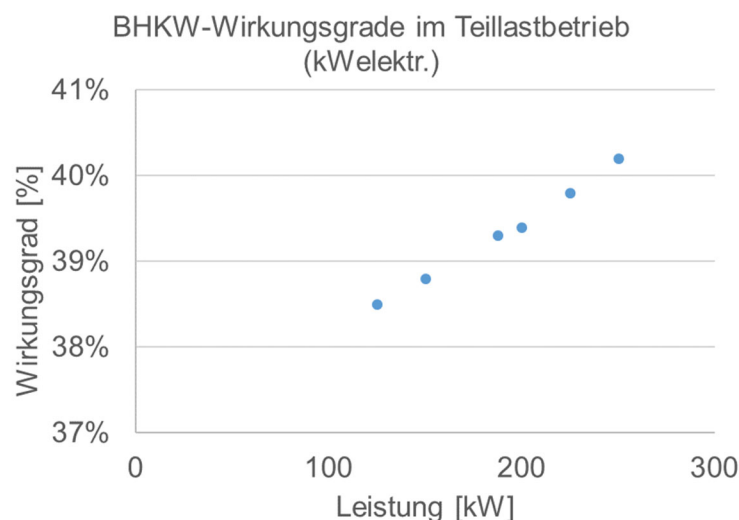


Abbildung 41: Elektrischer BHKW-Wirkungsgrad am Beispiel eines 250 kW Motors im Teillastbetrieb ($\text{kW}_{\text{elektr.}}$)

Szenario 1 (Sz1): 200.000 EW, Normalbetrieb

Schlammbehandlung (Sz1)

Im Szenario 1 fallen im Mittel pro Tag ca. 250 m³ an Rohschlamm (Primär- und Überschussschlamm) an. Für eine Faulzeit von 25 Tagen wird ein Faulraum von 6.248 m³ benötigt. Es wird ein Faulbehälter mit einem Nutzvolumen von 6.500 m³ gewählt. Daraus ergibt sich eine mittlere tatsächliche Faulzeit von 26 Tagen und eine CSB-Raubelastung von 2,1 kg CSB/(m³·d).

Gasanfall (Sz1)

Der Methangasanfall aus dem Primärschlamm beträgt 1.386 Nm³ CH₄/d und der Faulgasanfall 2.132 Nm³/d. Der Methangasanfall aus dem Überschussschlamm beträgt 808 Nm³ CH₄/d und der Faulgasanfall 1.282 Nm³/d. Insgesamt ergibt sich somit ein Gesamtmethangasanfall von 2.194 Nm³ CH₄/d mit einem Methangehalt von ca. 64% (Gesamtfaulgasanfall 3.415 Nm³/d). In der nachfolgenden Tabelle sind die Kenndaten des Primär- und Überschussschlammes noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 11: Kenndaten der Methanproduktion des Primär- und Überschussschlammes für den Gasanfall des Szenarios 1

Schlamm/ Co-Substrat	Abgebauter Chemischer Sauerstoff- bedarf CSB	Methan CH ₄	Methangehalt	Faulgas G _d
	kg/d	Nm ³ /d	Vol-%	Nm ³ /d
Primär- schlamm	3.960	1.386	65	2.132
Überschuss- schlamm	2.308	808	63	1.282
Gesamt		2.194	64	3.415

Das Verhältnis des täglichen Gasanfalls vom Maximum zum Minimum des Gasanfalls beträgt ca. 1,75. Aus den Betriebsdaten der realen Kläranlage (siehe Abbildung 38) wurde ein exemplarischer Verlauf des Gasanfalls eines Tages auf den Tagesgasanfall des Szenarios 1 angewandt und eine Modell-Gasanfallkurve (siehe Abbildung 42) ermittelt. Der Gasanfall entspricht dabei dem Gaszustrom zum nachgelagerten Gasbehälter. Das Minimum des stündlichen Gasanfalls liegt bei 112 Nm³/h und das Maximum bei 180 Nm³/h.

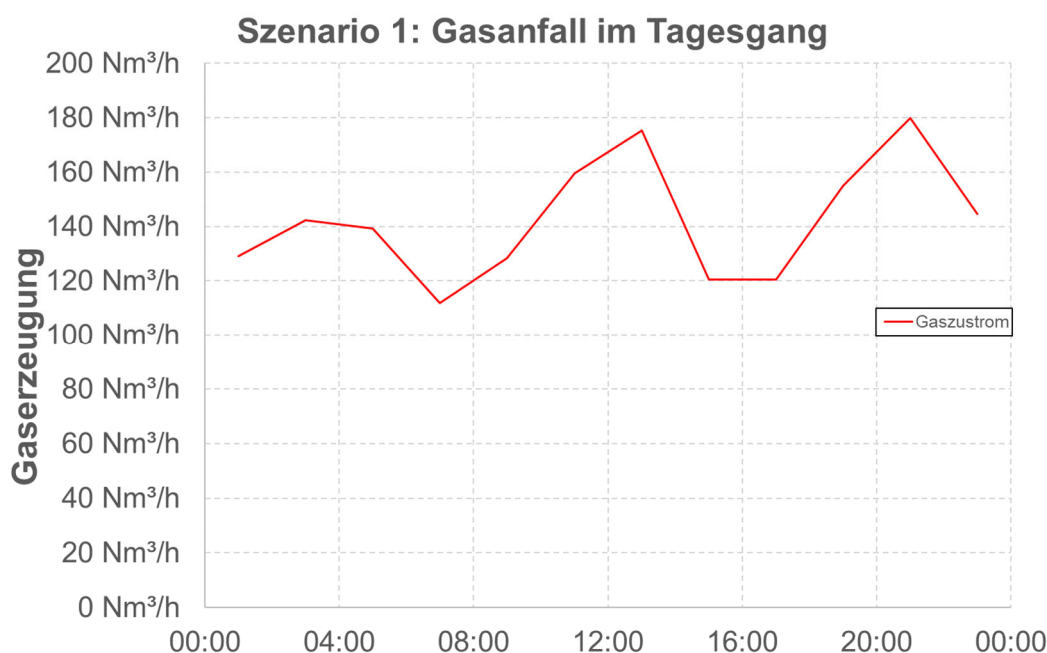


Abbildung 42: stündlicher Gasanfall für die Modellkläranlage des Szenarios 1

Gasspeicherung (Sz1)

Für das Szenario 1 wird der möglichst konstante Betrieb der Blockheizkraftwerke gewählt, da es kaum Überdeckungen (Stromeinspeisung) gibt und dieser Betrieb die wirtschaftlichste Variante darstellt. Bei dieser Variante ist ein mittleres Gasspeichervolumen erforderlich. Deshalb wird unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite des Gasanfalls im Jahresverlauf von 1,75 (Max/Min) das Gasspeichervolumen mit 40% des mittleren täglichen Gasanfalls gleich ca. 1.500 m³ gewählt.

Gasverwertung (Sz1)

Der tägliche Gasanfall und tägliche Strombedarf im Jahresgang weist unterschiedliche Verläufe bzw. Charakteristiken (Kurvenverläufe) auf. Im Szenario 1 wird durch die vollständige Gasverwertung der Eigenstrombedarf nur zu ca. 80% gedeckt. Somit weist der Strombedarf je nach Verwertungsstrategie überwiegend eine Unterdeckung und nur selten eine Überdeckung auf.

Wird der tägliche Faulgasanfall von 3.415 Nm³/d (Methan 2.194 Nm³/d) mit Blockheizkraftwerken mit einem mittleren elektrischen Wirkungsgrad von 39% verwertet, so wird daraus ein elektrischer Strom von ca. 8.556 kWh/d erzeugt. Auf ein ganzes Jahr und 200.000 EW bezogen ergibt sich damit eine spezifische Stromproduktion von 15,6 kWh/(EW·a). Kann der Eigenstrombedarf nur zu ca. 80% gedeckt werden, so ergibt sich daraus ein durchschnittlicher Strombedarf von ca. 10.700 kWh/d bzw. ein spezifischer Strombedarf von ca. 19,5 kWh/(EW·a).

Für den konstanten Betrieb der Blockheizkraftwerke wird ausgehend vom durchschnittlich täglichen Gasanfall (3.415 Nm³/d) eine BHKW-Leistung mit einer Reserve von mindestens 30% bemessen (wegen der Schwankungsbreite von 1,75 (Max/Min) des Gasanfalls im Jahresgang). So ergibt sich eine Gesamtleistung von mind. 463 kW_{elektr.}

Die Auslegung der Blockheizkraftwerke erfolgt deshalb mit folgenden Leistungen:

- BHKW 1: 250 kW_{elektr.}
- BHKW 2: 250 kW_{elektr.}

Mit dieser Leistung kann jedoch noch keine bedarfsgerechte Verstromung erreicht werden.

Die nachfolgende Tabelle enthält die Zusammenstellung der Leistungen aus dem Gasanfall (bei einem mittleren elektr. Wirkungsgrad von 39%) und dem Leistungsbedarf der Kläranlage.

Tabelle 12: elektrische Leistung aus Gasanfall mit Schwankungsbreiten des Gasanfalls und der Gasverwertung nach Schwankungsbreiten des Leistungsbedarfes der Kläranlage für Szenario 1

	Elektr. Leistung aus mittlerem täglichem Gasanfall	Elektr. Leistungsbedarf der Kläranlage
Max/Min	im Jahresgang 1,75	2,0
Minimum	259 kW _{elektr.}	297 kW _{elektr.}
Mittelwert	357 kW _{elektr.}	445 kW _{elektr.}
Maximum	454 kW _{elektr.}	594 kW _{elektr.}

Mit den gewählten 500 kW_{elektr.} kann bei maximalem täglichem Gasanfall (454 kW_{elektr.}) das ganze Gas verwertet werden. Zum Ausgleich der Unterdeckung des Strombedarfes ist ein Stromliefervertrag erforderlich.

Szenario 2 (Sz2): 200.000 EW, Idealbetrieb

Im Szenario 2 ist die Kläranlage gegenüber dem Szenario 1 energetisch so weit optimiert, dass der Eigenstrombedarf über den Gasanfall gedeckt werden kann.

Da Strombezugskosten viel höher sind als die Erträge aus der Stromeinspeisung, wird die Gasverwertung auf eine bedarfsgerechte Verwertung ausgelegt.

Schlammbehandlung (Sz2)

In Szenario 2 gelten die Mengen in Analogie zu Szenario 1

Gasanfall (Sz2)

In Szenario 2 fallen die Gasmengen in Analogie zu Szenario 1 an.

Gasspeicherung (Sz2)

Wie in Szenario 1 gezeigt, ist für die 100%-ige Deckung des Eigenstrombedarfs ein Gasspeichervolumen von 60% des durchschnittlichen täglichen Gasanfalls erforderlich. Daraus ergibt sich für das Szenario 2 ein Gasspeichervolumen von 2.000 m³.

Gasverwertung (Sz2)

Ziel der Gasverwertung (Gasverwertungsstrategie) ist die weitestgehende Deckung des Energiebedarfes im Tages- und Jahregang. Im Szenario 2 wird eine bedarfsgerechte Gasverwertung gewählt. Diese stellt an sich schon einen Beitrag zur Entlastung des Stromnetzes dar und ermöglicht auch den geringsten durchgehenden Strombezug, welches sich bei entsprechender Vertragsgestaltung positiv auf die Strombezugskosten auswirkt.

Durch die bedarfsgerechte Gasverwertung und der 100%-igen Deckung des Eigenbedarfs im Mittel liegen die Kurven des Strombedarfs und der Stromeigenerzeugung unmittelbar übereinander. Wird der tägliche Faulgasanfall von 3.415 Nm³/d (Methan 2.194 Nm³/d) mit Blockheizkraftwerken analog zum Szenario 1 mit einem mittleren elektrischen Wirkungsgrad von 39% verbrannt, so wird daraus ein elektrischer Strom von 8.556 kWh/d erzeugt. Auf ein ganzes Jahr und 200.000 EW bezogen, ergibt sich damit eine spezifische Stromproduktion von 15,6 kWh/(EW·a). Kann der Eigenstrombedarf zu 100% gedeckt werden, so ergibt sich für den Eigenbedarf ebenfalls ein spezifischer Wert von 15,6 kWh/(EW·a).

Da der tägliche Gasanfall und tägliche Strombedarf im Jahregang nicht deckungsgleich sind, wird es nur im Durchschnitt zu einer 100%-igen Deckung des Eigenstrombedarfes kommen. Der Strombedarf weist damit immer wieder Über- und Unterdeckungen auf. Die BHKW-Leistung wird ausgehend vom durchschnittlichen täglichen Gasanfall auf das Maximum des Strombedarfes der Kläranlage (mit dem Schwankungsfaktor 2,15) bemessen, um den Strombedarf der Kläranlage soweit wie möglich zu decken. Die nachfolgende Tabelle enthält die Zusammenstellung der Leistungen aus dem Gasanfall (bei einem mittleren elektr. Wirkungsgrad von 39%) und dem sich daraus zu deckenden Anteil des Leistungsbedarfes der Kläranlage.

Tabelle 13: elektrische Leistung aus Gasanfall mit Schwankungsbreiten des Gasanfalls und der Gasverwertung nach Schwankungsbreiten des Leistungsbedarfes der Kläranlage für Szenario 2

	Elektr. Leistung aus Gasanfall	Elektr. Leistung der Gasverwertung	Elektr. Leistungsbedarf der Kläranlage
Max/Min	1,6	2,15	2,15
Minimum	280 kW _{elektr.}	257 kW _{elektr.}	257 kW _{elektr.}
Mittelwert	357 kW _{elektr.}	357 kW _{elektr.}	357 kW _{elektr.}
Maximum	451 kW _{elektr.}	552 kW _{elektr.}	552 kW _{elektr.}

Die Auslegung der Blockheizkraftwerke erfolgte deshalb mit folgenden Leistungen:

- BHKW 1: 400 kW_{elektr.}
- BHKW 2: 200 kW_{elektr.}
- BHKW 3: 200 kW_{elektr.} (Redundanz)

Um die Eigenbedarfsdeckung der Kläranlage zu ermöglichen und nicht hohe Vorhalteleistungen mit dem Energieversorger vereinbaren zu müssen, wird ein Reserve-BHKW berücksichtigt, um bei Ausfall des großen Blockheizkraftwerks zumindest den mittleren Strombedarf decken zu können.

Für die Gasverwertung wird

- bei Min-Strombedarf das 400 kW_{elektr.} BHKW in Teillast (257 kW_{elektr.}) und
- bei Max-Strombedarf werden beide BHKW's (400 kW_{elektr.} + 200 kW_{elektr.}) bei naher Vollast (368 kW_{elektr.} + 184 kW_{elektr.})

betrieben.

Die Gesamtbilanz des Strombedarfes der Kläranlage muss im Rahmen des Faulgasanfalls, -speicherung und energetischer -verwertung ausgeglichen sein.

Um die Unterdeckung mit Strom auszugleichen, ist ein Stromversorgungsvertrag erforderlich. Gelegentlich können bei geringem Strombedarf und hohem Gasbehälterfüllstand bei ausreichender BHKW-Leistung auch kurzzeitige Einspeisungen auftreten. Sollte ein Einspeisung von Strom nicht möglich sein, so müsste dieses kurzzeitig überschüssige Faulgas sonst abgefackelt werden.

Szenario 3 (Sz3): 200.000 EW, Idealbetrieb + Co-Substrat**Schlammbehandlung (Sz3)**

Neben den Schlämmen wie in Sz 1 und 2 werden täglich 10,7 m³ Flotatschlamm mit einer CSB-Konzentration von 150 kg/m³ in der Faulung mitbehandelt und verwertet. Daraus errechnet sich eine tägliche Fracht von 1.600 kg CSB/d. Dabei werden ca. 80% des zugeführten CSB in Faulgas umgewandelt. Für den Mischschlamm ergibt sich ein erforderliches Faulraumvolumen von 6.515 m³. Es wird ein Nutzvolumen der Faulbehälter von 6.500 m³ gewählt. Für die Annahme und Zwischenspeicherung des Flotatschlammes wird ein Flotatschlamm-Speicher (zusätzlich im Vergleich zu den Szenarien 1 und 2) sowie Mischeinrichtungen, Pumpwerke und Verrohrungen installiert. Für den Wochenausgleich und als praktikable Größe für die Anlieferung bei gleichzeitigem vorgehaltenem Mindestvolumen wird ein Flotatschlamm-Speicher mit einer 5-fachen Tageskapazität von ca. 50 m³ vorgesehen.

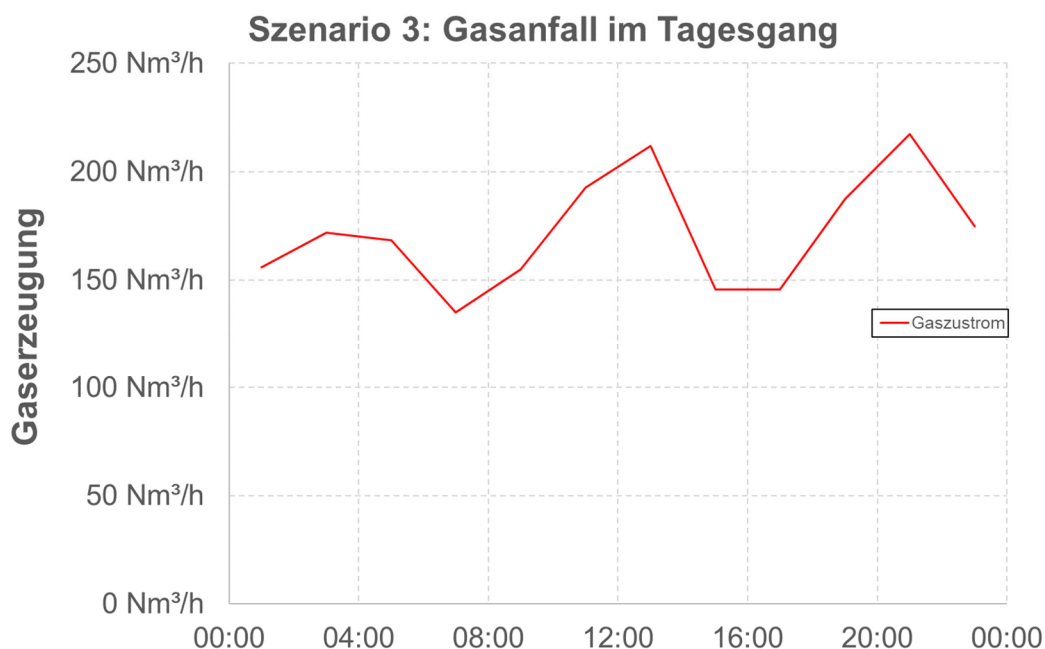
Gasanfall (Sz3)

Der Methangasanfall aus dem Primärschlamm beträgt 1.386 Nm³ CH₄/d und der Faulgasanfall 2.132 Nm³/d. Der Methangasanfall aus dem Überschussschlamm beträgt 808 Nm³ CH₄/d und der Faulgasanfall 1.282 Nm³/d. Der Methangasanfall aus dem Flotatschlamm beträgt 448 Nm³ CH₄/d und der Faulgasanfall 711 Nm³/d. Insgesamt ergibt sich somit ein Gesamtmethangasanfall von 2.642 Nm³ CH₄/d mit einem Methangehalt von ca. 64% (Gesamtfaulgasanfall 4.126 Nm³/d). In der nachfolgenden Tabelle sind die Kenn-
daten des Primär-, Überschuss- und Flotatschlammes noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 14: Kenndaten der Methanproduktion des Primär-, Überschuss- und Flotatschlammes für den Gasanfall des Szenarios 3

Schlamm/ Co-Substrat	Abgebauter Chemischer Sauerstoff- bedarf CSB	Methan CH ₄	Methangehalt	Faulgas G _d
	kg/d	Nm ³ /d	Vol-%	Nm ³ /d
Primärschlamm	3.960	1.386	65	2.132
Überschuss- schlamm	2.308	808	63	1.282
Flotatschlamm	1.280	448	63	711
Gesamt		2.642	64	4.126

Der jahreszeitliche Verlauf des Gasanfalls aus dem Primär- und Überschussschlamm ist analog zum Szenario 1 und 2 zu bewerten. Das Minimum des stündlichen Gasanfalls liegt bei 135 Nm³/h und das Maximum bei 217 Nm³/h.

**Abbildung 43:** stündlicher Gasanfall für die Modellkläranlage des Szenarios 3

Der Anfall des Methangases kann durch eine gezielte Beschickung in den Faulraum gesteuert werden (siehe AP 3). Dies beeinflusst dementsprechend die Gasanfallkurve und kann helfen das erforderliche Gasspeichervolumen etwas zu minimieren. Dies wird umso

interessanter und wichtiger, umso mehr der Anteil des Co-Substrates am Gesamtschlamm steigt. Diese Optimierung bleibt hier jedoch zunächst noch unberücksichtigt. Auf diese Gasanfallkurve im Tagesverlauf setzt noch der jahreszeitliche Verlauf des Gasanfalls aus der Mitbehandlung des Flotatschlammes auf, für den jedoch keine Beobachtungen vorliegen. Dieser Gasanfall richtet sich nach den mitbehandelten Co-Substraten (Flotatschlamm), deren Vergleichmäßigung im Wochen- und Jahresgang und der täglichen Beschickungsstrategie. Aus den Versuchen in AP 3 konnte bei kontinuierlicher Beschickung ($2,2 \text{ kg oTR}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$) und einer stoßweisen Beschickung mit Flotatschlämmen ($0,91 \text{ kg oTR}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) eine temporäre Erhöhung der Faulgaserzeugungsraten um 80 % innerhalb von 6 h bzw. 112 % innerhalb von 2 h erzielt werden. Der Faulgasanfall soll passend zur gewählten Verwertungsstrategie gesteuert werden, um das dafür erforderliche Gasspeichervolumen möglichst gering zu halten.

Gasspeicherung (Sz3)

Der Gasspeicher dient weiterhin zum Ausgleich der Tagesschwankungen zwischen Gasanfall und Gasverwertung. Da das Co-Substrat gezielt zur Gaserzeugung zu Bedarfszeiten oder zum Ausgleich eingesetzt werden soll, wird hierfür kein weiteres Speichervolumen angesetzt. Somit wird das Gasspeichervolumen auch für das Szenario 3 mit 2.000 m^3 berücksichtigt. Dies entspricht ca. 50% des mittleren täglichen Gasanfalls und damit der Empfehlung des (Merkblatt DWA-M 363, Herkunft und Verwertung von Biogas, 2022).

Gasverwertung (Sz3)

Primäres Ziel der Gasverwertung (Gasverwertungsstrategie) ist die Deckung des Energiebedarfes im Tages- und Jahresgang. Im Szenario 2 ist die Bedarfsdeckung nur im Mittel zu 100% gegeben, wodurch es im Jahresgang immer noch zu Unter- und Überdeckungen des Strombedarfes kommt. Um diese Unter- und Überdeckungen im Jahresgang zu minimieren und gleichzeitig steuerungsbedingte Unterdeckungen im Tagesgang zu vermeiden (die Blockheizkraftwerke können nicht minutengenau den Bedarf abfahren) wird die Bedarfsdeckung mit einer konstanten Überdeckung gefahren (siehe Abbildung 44). D.h., die Beschickung des Co-Substrates erfolgt möglichst gleichmäßig über den Tages- und Wochengang hinweg, so dass sich die Gasanfallschwankungen möglichst mit gleicher Charakteristik nur um das Niveau des zusätzlichen Gasanfalls anheben. Das überschüssige Gas ($711 \text{ Nm}^3/\text{d}$, $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$, ca. 70 kW) wird gleichmäßig über den Tag verwertet.

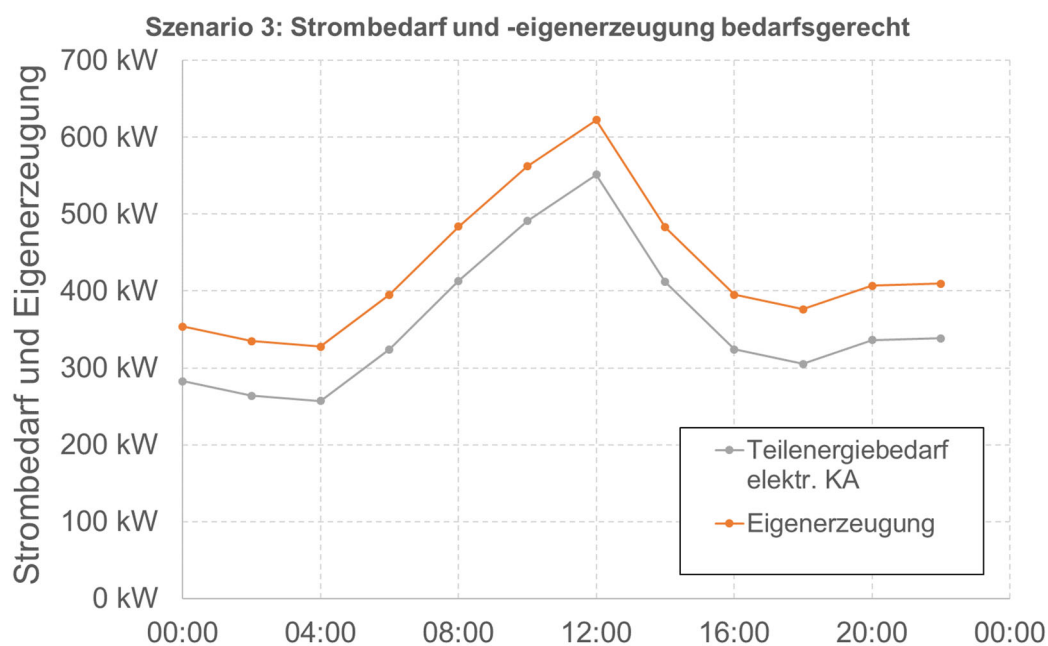


Abbildung 44: Szenario 3 – Strombedarf und Eigenerzeugung nach Eigenbedarf

Der durchschnittliche tägliche Faulgasanfall beträgt $4.126 \text{ Nm}^3/\text{d}$ ($2.642 \text{ Nm}^3/\text{d}$ Methan). Bei einer Verwertung in Blockheizkraftwerken mit einem mittleren elektrischen Wirkungsgrad von 39% werden daraus $10.304 \text{ kWh}/\text{d}$ an Strom erzeugt. Dies entspricht einer spezifischen Stromproduktion von $18,8 \text{ kWh}/(\text{EW}\cdot\text{a})$, dem ein spezifischer Strombedarf von $15,6 \text{ kWh}/(\text{EW}\cdot\text{a})$ gegenübersteht. Es entsteht im Durchschnitt ein Überschuss von $1.704 \text{ kWh}/\text{d}$. Durch den Überschuss des Energieanfalls in Form von Faulgasanfall im Vergleich zum Strombedarf in Form der Gasverwertung im Szenario 3, werden die Unterdeckungen des Strombedarfes im Vergleich zum Szenario 1 und 2 abnehmen. Für die Verwertung des zusätzlichen Gasanfalls aus dem Co-Substrat wird kein zusätzliches BHKW benötigt. Die nachfolgende Tabelle enthält die Zusammenstellung der Leistungen aus dem Gasanfall (bei einem mittleren elektr. Wirkungsgrad von 39%) und dem sich daraus zu deckenden Anteil des Leistungsbedarfes der Kläranlage.

Tabelle 15: elektrische Leistung aus Gasanfall mit Schwankungsbreiten des Gasanfalls und der Gasverwertung nach Schwankungsbreiten des Leistungsbedarfes der Kläranlage für Szenario 3

	Elektr. Leistung aus Gasanfall	Elektr. Leistung der Gasverwertung	Elektr. Leistungsbedarf der Kläranlage
Max/Min	1,6	2,0	2,15
Minimum	338 kW _{elektr.}	305 kW _{elektr.}	257 kW _{elektr.}
Mittelwert	429 kW _{elektr.}	457 kW _{elektr.}	357 kW _{elektr.}
Maximum	543 kW _{elektr.}	609 kW _{elektr.}	552 kW _{elektr.}

Die BHKW-Leistung wird auf das des Strombedarfes der Kläranlage bemessen, um den Strombedarf der Kläranlage zu decken - zuzüglich des konstant verwerteten Gasüberschusses.

Die Auslegung der Blockheizkraftwerke erfolgt deshalb (analog dem Szenario 2) mit folgenden Leistungen:

- BHKW 1: 400 kW_{elektr.}
- BHKW 2: 200 kW_{elektr.}
- BHKW 3: 200 kW_{elektr.}

Das BHKW 3 wird während der Spitzenlastzeit benötigt und steht in dieser Zeit nicht mehr als Reserve zur Verfügung. Sollte ein kleines BHKW ausfallen, kann jedoch noch immer der gesamte Gasanfall verwertet werden. Fällt das große BHKW aus, so kann immer noch der größte Teil des Gasanfalls verwertet werden, jedoch muss ein kleiner Teil über die Gasfackel verbrannt werden.

Für die Gasverwertung wird

- bei Min-Strombedarf wird das 400 kW_{elektr.} BHKW in Teillast,
- bei Max-Strombedarf werden alle drei BHKW's (400 kW_{elektr.} + 200 kW_{elektr.} + 200 kW_{elektr.}) in ca. 75% Teillast

betrieben.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei minimalem Gasanfall und maximalem Energiebedarf der Kläranlage oder zu Zeiten der Wartung der Blockheizkraftwerke zu jeder Zeit der Strombedarf selbst gedeckt werden kann. Deshalb ist trotzdem ein Stromversorgungsvertrag erforderlich.

Zusammenfassung der Kläranlagenauslegung

Für die nachfolgenden Betrachtungen können folgende Größen für die Modellanlage festgelegt werden (vgl. **Tabelle 16**):

Tabelle 16: Kenngrößen der Kläranlage für die nachfolgenden Betrachtungen

			Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Gasanfall		Nm ³ CH ₄ /d	2.194	2.194	2.642
Gasspeicher		m ³	1.500	1.500	2.000
BHKW	1	kW _{el}	250	400	400
	2	kW _{el}	250	200	200
	3	kW _{el}	-	200	200

1.4.2 Untersuchung der Teilnahme am Regelenergiemarkt

Nachfolgend wird die Teilnahme am Regelenergiemarkt unter den gegebenen Randbedingungen ermittelt.

Als Grundlage für das Modell standen die Stromverbrauchsdaten sowie die Gasproduktionsdaten einer Kläranlage mit einer Ausbaugröße von 200.000 EW, der Größe der definierten Modellanlage (vgl. Aufbau der Modellkläranlage) im Zeitraum von November bis Dezember 2016 zur Verfügung.

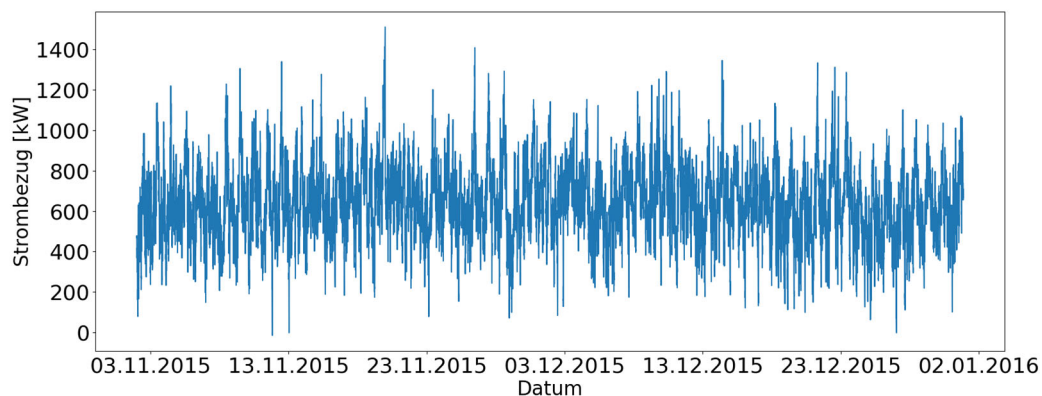


Abbildung 45: Strombezugsdaten der Modellanlage mit randomisierten Werten unter Berücksichtigung von definierten Standardabweichungen.

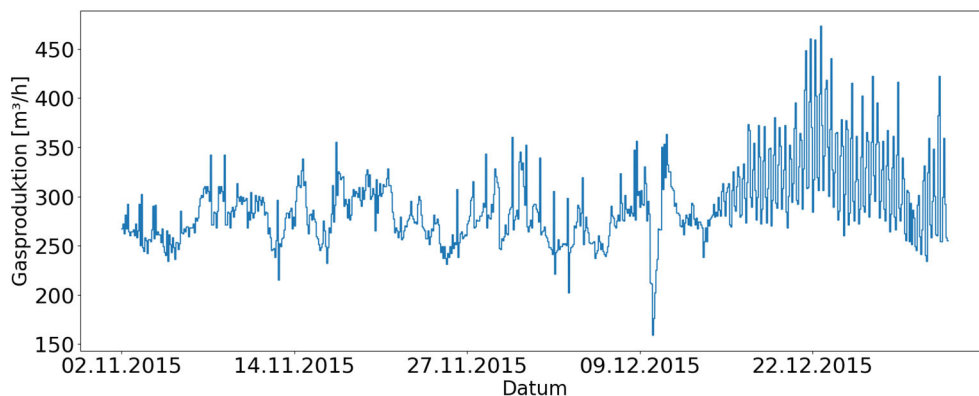


Abbildung 46: Gasproduktionsrate der Modellanlage. Durch Vorwärtsauffüllung wurden fehlende Werte ergänzt.

Für die Modellanlage wurde für Szenario 1 für die Blockheizkraftwerke eine installierte Leistung von $2 \times 250 \text{ kW}_{\text{el}}$ vorgesehen. Es wurde weiterhin von einem Dauerbetrieb eines Blockheizkraftwerke ausgegangen. Die Betriebsweise des zweiten BHKW (BHKW_2) wird über einen Optimierer festgelegt. Optimierungsziel ist dabei die Minimierung des Strombezugs unter Berücksichtigung eines maximalen Gasspeicherfüllstandes von $0,9 \times V_{\text{Gasspeicher}}$ sowie eines minimalen Gasspeicherfüllstandes von $0,2 \times V_{\text{Gasspeicher}}$. Der Gasverbrauch der Blockheizkraftwerke wird über eine Verbrauchsfunktion einer bekannten Anlage für jeden Zeitschritt errechnet. Um die Anzahl der Schaltvorgänge des BHKW_2 einzugrenzen wurden diese im Optimierer pönalisiert.

Zur Untersuchung des Einflusses der Regelenenergievermarktung, stehen die Vermarktungsdaten einer externen Kläranlage zur Verfügung. Die Daten hinsichtlich der erfolgten Abrufzeiten und Dauern, sowie der vergüteten Arbeit wurden von dieser Anlage auf die Modellanlage übertragen. Aufgrund der unterschiedlichen Zeiträume der verfügbaren Daten der Kläranlage und den Daten erfolgter Abrufe, war eine Übertragung über den Zeitschlüssel nicht möglich. Somit wurden jeweils tägliche Datensätze der Regelarbeit auf zufällig ausgewählte Tage der Modellanlage übertragen. Zur Berechnung der Erlöse aus der Vorhaltung von Regelenenergie wurden die durchschnittlichen erzielten Marktpreise angesetzt. Auch hier stimmten die Zeiträume der Marktpreise und Anlagendaten nicht überein. **Abbildung 47** stellt die Marktpreise für die Regelenenergie aus dem Jahr 2021 dar.

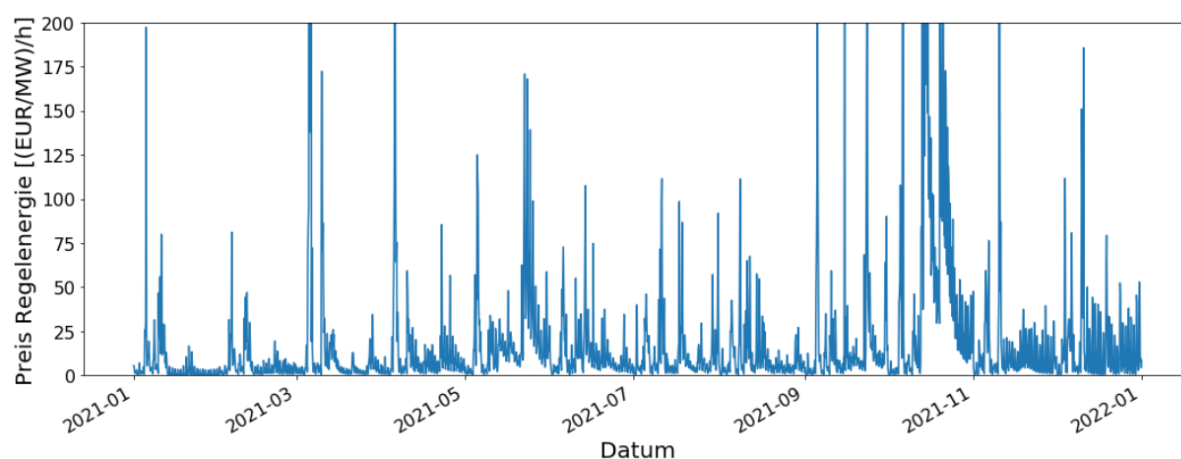


Abbildung 47: Preise für vorgehaltene Leistung im Jahr 2021 (Quelle: Regelleistung.net)

Abbildung 48 zeigt das Ergebnis für den Abruf mit einer Dauer von 71 sec, etwa der durchschnittlichen Dauer eines Abrufes. Es ist kaum ein Einfluss auf den Füllstand des Gasspeichers erkennbar. Der tägliche Erlös beläuft sich auf 39 € für die Vorhaltung und 33 € für die geleistete Arbeit. Da Abrufe äußerst selten vorkommen, im Falle der teilnehmenden Kläranlage im Mittel ein Abruf pro Monat, ist der Anteil der geleisteten Arbeit im Vergleich zum Erlös durch Vorhaltung als gering zu sehen.

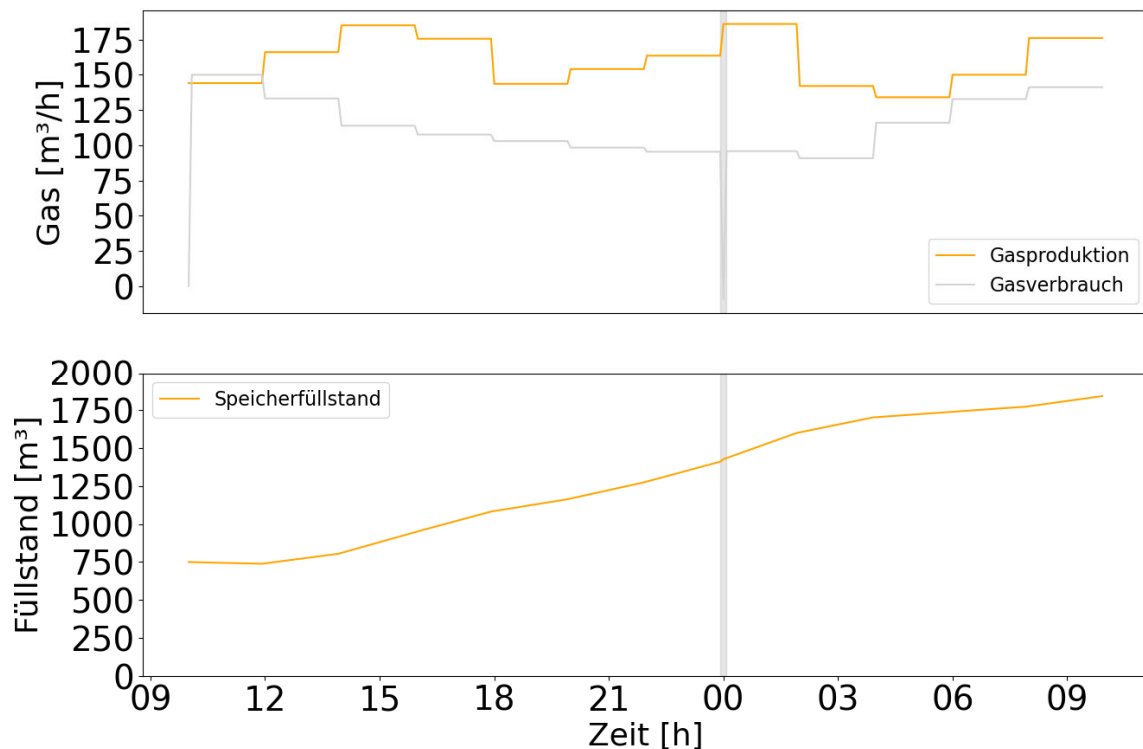


Abbildung 48: Einfluss eines Regelenergieabrufes von 71 s (grauer Balken) auf den Gasspeicherfüllstand

Es konnte gezeigt werden, dass Abrufe im Rahmen der Regelenergie aufgrund der geringen Dauern (im Median von < 100 sec) nur einen geringen Einfluss auf den Gasspeicher haben (vgl. Abbildung 48). Nachfolgend soll der Einfluss der beobachteten extremen Abrufe ausgewertet werden.

Die extremen Regelenergieabrufe im Rahmen der negativen Sekundärregelleistung (SRL) umfassten:

- Maximale Dauer von 4.400 sec an einem Tag
- 36 Abrufe mit Dauern zwischen 3 und 891 s

Diese Regelenergieabrufe wurden für folgende, aus den Daten extrahierten, Randbedingungen simuliert:

- Das zusammenfallen eines täglichen Gasanfalles der dem 25 %-Quantil entspricht, sowie einem täglichen Stromverbrauch der dem 75 %-Quantil entspricht
- Das zusammenfallen eines täglichen Gasanfalles der dem 75 %-Quantil entspricht, sowie einem täglichen Stromverbrauch der dem 25 %-Quantil entspricht

Die Regelenergieabrufe wurden für eine angebotene Leistung von 250 kW simuliert.

Die Ergebnisse der Simulation sind in Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. bis **Abbildung 51** dargestellt.

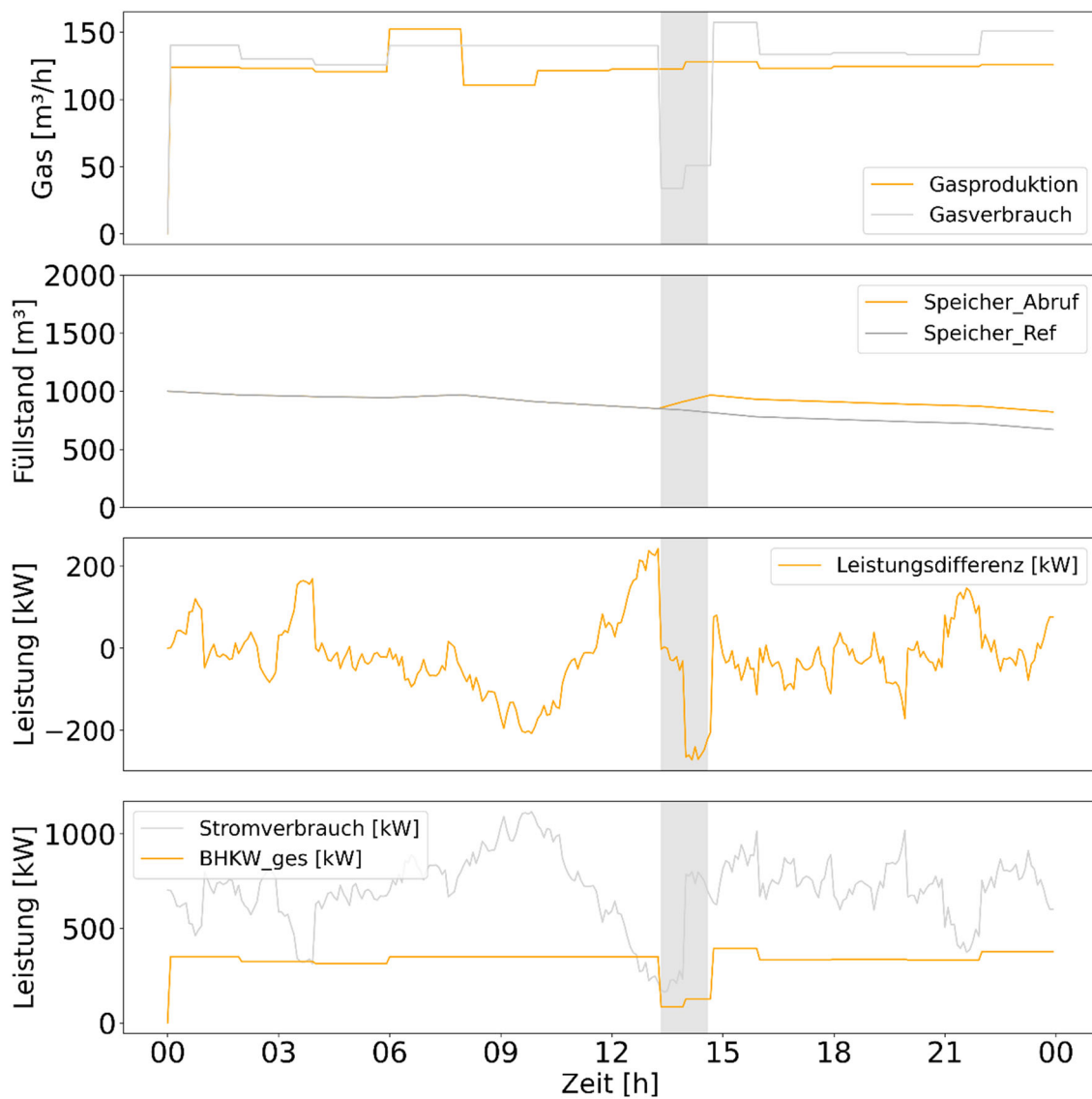


Abbildung 49: Ergebnisse der Simulation eines Regelenergieabrufes mit einer Dauer von 4.400 s (grauer Balken) bei einem täglichen Gasanfall der dem 25-Quantil entspricht, sowie einem täglichen Stromverbrauch der dem 75-Quantil entspricht

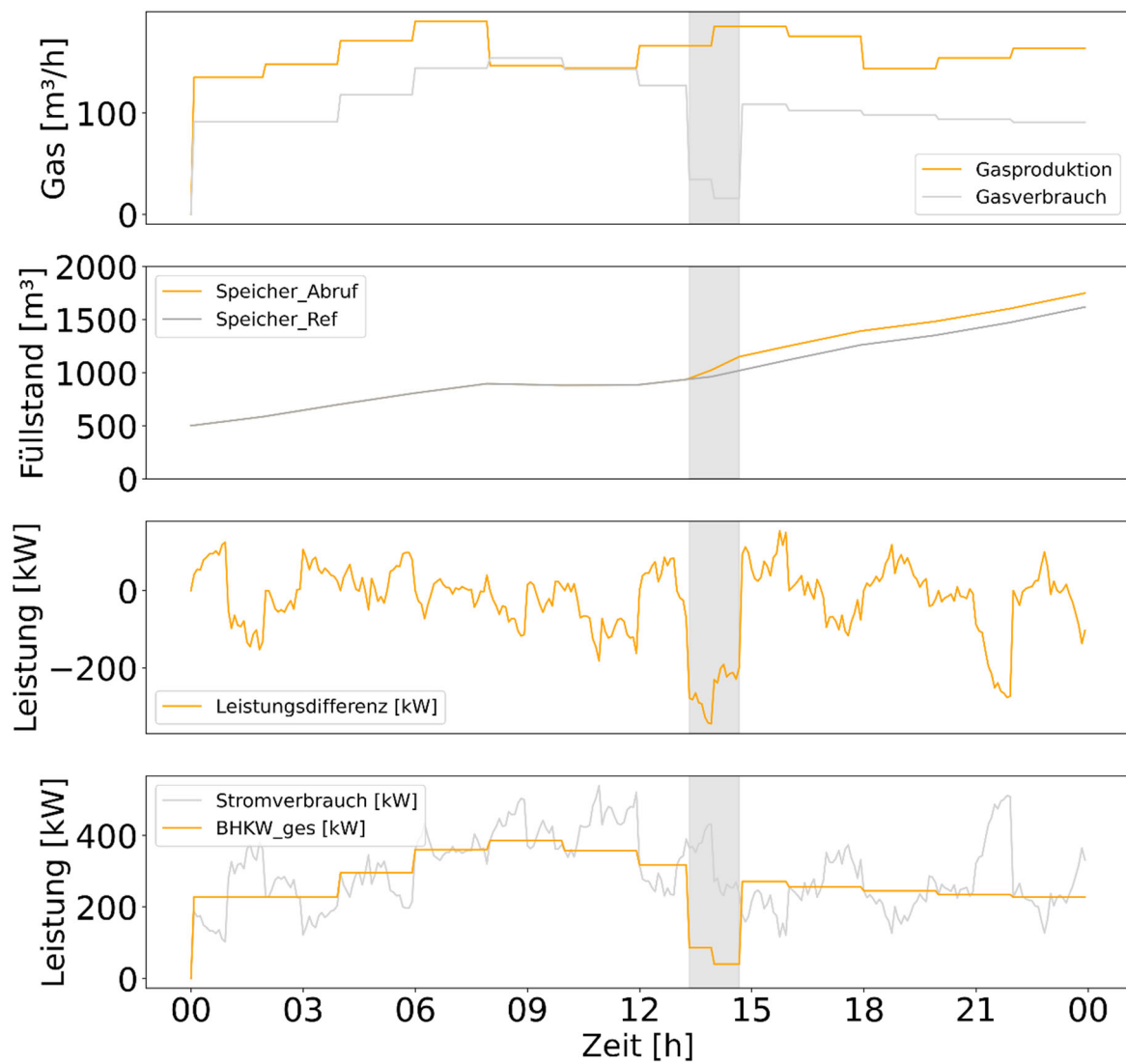


Abbildung 50: Ergebnisse der Simulation eines Regelenergieabrufes mit einer Dauer von 4.400 s (grauer Balken) und einem täglichen Gasanfall der dem 75-Quantil entspricht, sowie einem täglichen Stromverbrauch der dem 25-Quantil entspricht

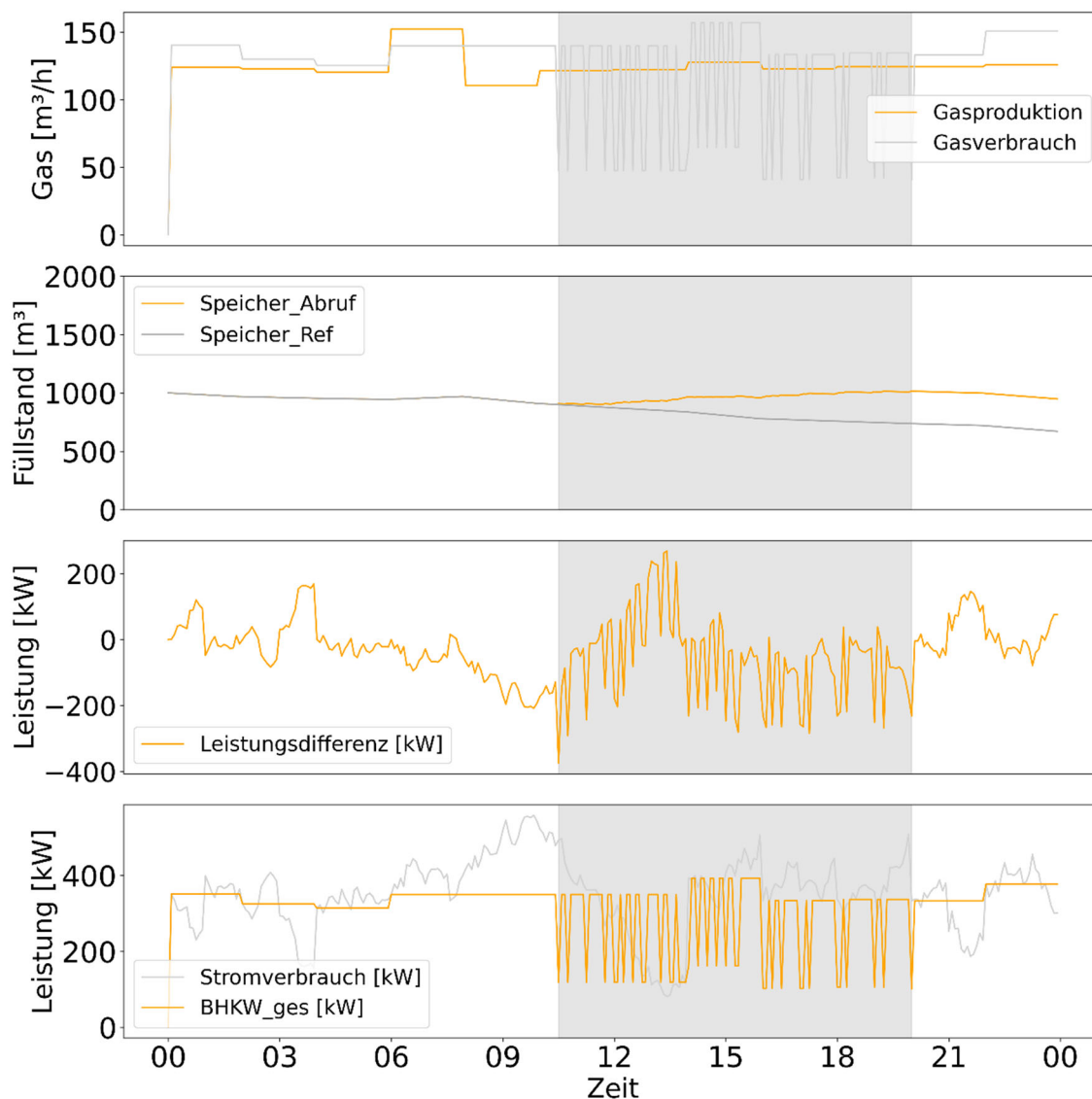


Abbildung 51: Ergebnisse der Simulation von 36 Abrufen mit Dauern zwischen 3 und 891 s (grauer Bereich)

In seltenen Ausnahmen, wie im Fall einer Kläranlage können Abrufe bis zu 70 min andauern. Solche Ereignisse traten an der Anlage einmal im Jahr 2022 auf. Der Einfluss dieses Abrufes ist in **Abbildung 49** und **Abbildung 50** dargestellt. Der Einfluss auf den Gasspeicher ist ersichtlich, allerdings mit einer Zunahme des Füllstandes um 17 % weiterhin unkritisch. Die Erlöse aus der geleisteten Arbeit steigen auf etwa 2.060 €. Dem Erlös stehen die erhöhten Stromkosten für den Zeitraum des Abrufes gegenüber. Diese belaufen sich unter der Annahme von Strombezugskosten von 0,5 €/kWh auf ca. 153 €. Wie aus **Abbildung 49** und **Abbildung 50** ersichtlich, erzeugt der Abruf eine deutliche maximale Lastspitze. Leistungspreise werden über den maximalen mittleren Leistungsbezug innerhalb des Abrechnungszeitraumes ermittelt. Stellt diese Lastspitze, welche durch den Abruf hervorgerufen wurde, den im Abrechnungszeitraum höchsten Leistungsbezug dar, muss mit einem deutlichen Anstieg der Kosten gerechnet werden.

Die verfügbare Leistungskapazität, welche auf dem Regelenenergiemarkt vermarktet werden kann, richtet sich nach der Betriebsweise der BHKW, welche wiederum vom verfügbaren Gas und, bei einem stromgeführten BHKW, vom aktuellen Verbrauch der Anlage abhängt. Im Hinblick auf Szenario 1 unterschreitet die Stromerzeugung im Mittel den Bedarf, somit sollten die Kapazitäten zur Vermarktung von positiver Regelleistung äußerst begrenzt sein. Sofern Gas verfügbar ist, wird dieses zur Deckung des Eigenstromes aufgewendet. Im Hinblick auf eine zusätzliche Vermarktung von negativer Regelleistung ist eine detaillierte Betrachtung der abgerufenen Leistung mittels Histogramm erforderlich. Durch statistische Auswertung der abgerufenen Leistung kann gleichfalls die Vermarktung der negativen SRL optimiert werden. Beispielsweise eine Vermarktung weiterer 200 kW zu den jeweiligen Tagesspitzen. Eine Beschreibung der Herangehensweise zur Ermittlung von Regelenergie sowie eine Bewertung des Risikos zur Erzeugung von Lastspitzen sowie eine detailliertes Erlöspotential findet sich in Hubert (2024/25).

Für Szenario 2 ergibt sich für die negative SRL ebenfalls ein ganzjähriges Vermarktungspotential von 250 kW, der Grundlast. Zusätzlich ergibt sich ein Potential von 50 kW in der positiven SRL durch BHKW 2. Zudem kann auch eine Vermarktung des redundanten BHKW 3 in der positiven SRL erfolgen. Eine Vermarktung von positiver Regelleistung kann problemlos erfolgen, wenn das entsprechende BHKW bereits in Teillast betrieben wird. Aufgrund der sehr geringen Abrufzeiten ist die Vermarktung der Gesamtleistung eines Blockheizkraftwerks als kritisch zu betrachten. Die Start/Stop Vorgänge bewirken einen erhöhten Verschleiß am Aggregat, entsprechend sind technische Maßnahmen, wie z. B. Vorölung und Vorwärmung der Anlagen, vorzusehen, wenn eine Vermarktung in Betracht gezogen werden sollte. Wie bereits für Szenario 1 beschrieben ist eine Optimierung der Vermarktung durch detaillierte Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der Leistungsabgabe der BHKW, sowie der Tagesganglinien des Strombedarfes möglich.

Für Szenario 3 ergibt sich Grundsätzlich aufgrund der gleichen Struktur der installierten Blockheizkraftwerke ähnliche Potentiale. Aufgrund der höheren mittleren Gasdargebots ergeben sich leicht erhöhte potentiale in der negativen SRL, während das Potential der positiven SRL tendenziell weniger werden sollte. Aufgrund des deutlichen Stromüberschusses stellt sich für Szenario 3 die Frage nach einer optimalen Verwertung des Stromes. An dieser Stelle macht es Sinn über die Vermarktung am Day-Ahead-Markt nachzudenken vgl. Kapitel 1.4.3). Hierzu steht die gesamte Kapazität von BHKW 3 zur Verfügung.

1.4.3 Untersuchungen zum Potential einer Day-Ahead-Vermarktung

Komplexe Prozessmodelle, bspw. das Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) (Batstone et al., 2002), beschreiben detailliert die verschiedenen physiko-chemischen Reaktionen und gegenseitigen Wechselwirkungen der stofflichen Komponenten der anaeroben Vergärung. Sie enthalten etliche Zustandsgrößen und dutzende Parameter, welche jedoch häufig nicht experimentell gemessen und noch weniger in Echtzeit überwacht werden können. Daher sind solche komplexen Modelle häufig strukturell nicht identifizierbar und können bis

heute nur bedingt an Praxisanlagen zur Prozessbeobachtung eingesetzt werden (Gaida 2014).

Typische landwirtschaftliche Biogassubstrate bestehen v.a. aus komplexen Strukturkohlenhydraten, sodass die Hydrolyse den geschwindigkeitsbestimmende Prozessschritt darstellt. Daher wurde das etablierte ADM1 auf Massenbasis umgerechnet und in mehreren Stufen soweit vereinfacht, dass Identifizierbarkeit nachgewiesen werden konnte. So weist z. B. das ADM1-R3 lediglich 17 Komponenten und 24 Parameter auf, im Gegensatz zum ADM1 mit 34 Komponenten und 52 Parametern.

Zur Simulation kontinuierlicher Vergärungsversuche sind die Prozessmodelle auf Inputdaten angewiesen. Die unbekanntes Modellparameter wie Fermentierbarkeiten und Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten müssen entweder aus kontinuierlichen Messungen geschätzt, oder aus diskontinuierlichen Labortests (z. B. BMP-Test) ermittelt werden. Obwohl kontinuierliche und diskontinuierliche Versuche oft unterschiedliche Kenngrößen aufweisen und daher keine direkte Übertragbarkeit vom diskontinuierlichen Laborexperiment in den kontinuierlichen Labor- und Praxisbetrieb gewährleistet werden kann (Batstone et al., 2009), ist sie zumindest in erster Näherung zulässig.

Im Verlauf des Vorhabens FLXsynErgy wurden seitens der UniBWM kontinuierliche Versuchsdatensätze bereitgestellt und am DBFZ mit dem ADM1-R3 simuliert. Die Umrechnung der CSB-Frachten auf Massenbasis erfolgte über die zugrundeliegende Stöchiometrie. Für Größen im Zulauf, zu denen keine Angaben vorlagen, wurden Standardwerte aus der Literatur verwendet. Die gemessenen (Viertelstundenwerte) der Klärschlammfäulung und die mit dem ADM1-R3 simulierte Gasproduktion (Stundenwerte) sind vergleichend in **Abbildung 52** dargestellt. Zudem ist die zugeführte Raumbelastung als Tagesmittelwert dargestellt.

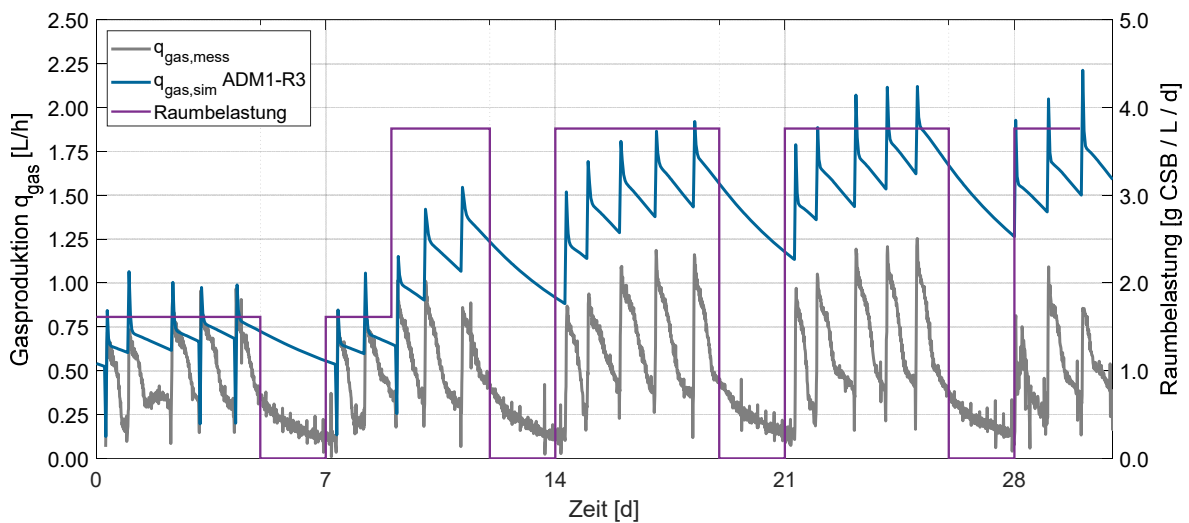


Abbildung 52: Gasproduktion gemessen (Viertelstundenwerte) und simuliert (mit ADM1-R3, Stundenwerte); Raumbelastung (Tagesdurchschnittswert)

Während der ersten neun Tage stimmt die simulierte Gasproduktion qualitativ noch gut mit den vorliegenden Messwerten (graue Kurve in **Abbildung 52**) überein. Danach steigt die simulierte Gasproduktion zusehends an, während der Messwert nur leicht zunimmt, und das vor allem in der Amplitude zwischen Maximal- und Minimalwert. Die Zunahme im Modell lässt sich durch eine starke Erhöhung des CSB im Zulauf (quasi Verdoppelung der täglichen Raumbelastung) anhand der vorliegenden Daten erklären. Warum die gemessene Gasproduktion kaum ansteigt, konnte anhand der verwendeten Versuchsdaten nicht sicher beurteilt werden.

Wie erwähnt, werden kontinuierliche Versuche oft mit Daten aus diskontinuierlichen Laborexperimenten kalibriert, da diese einfacher aufgebaut sind und ihre Auswertung weitgehend standardisiert ist. Zur Bestimmung der Biogaspotenziale typischer Substrate von Faulgasanlagen wurden seitens des Projektkoordinators (UniBwM) Batch-Versuche mit Primär-, Überschuss- und Flotatschlamm durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden seitens des DBFZ aufbereitet und mittels einfacher kinetischer Modelle zur Bestimmung der Biogasbildungskinetik und der Biogaspotenziale ausgewertet.

Dabei stellte sich heraus, dass bestimmte Substratproben, z. B. Flotatschlämme, deutlich höhere BMPs als die im Modell zugrunde gelegten $420 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ FoTS}$ (Weißbach 2009) aufwiesen, welche sich auf typische landwirtschaftliche Substrate beziehen. Für fettreiche Substrate ist es notwendig, deren Makronährstoffverteilung laboranalytisch zu bestimmen, z. B. per Futtermittelanalyse nach WEENDER/VAN SOEST, und so das Methanpotenzial entsprechend höher anzusetzen. Das Methanpotenzial von Fetten liegt üblicherweise bei $945 - 970 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1}$ und damit deutlich höher als das Methanpotenzial von Kohlenhydraten. Daher wurde zur weiteren Harmonisierung der Modellansätze aus dem landwirtschaftlichen Biogas- mit dem Klärgasbereich die Basis zur Berechnung des Methanpotenzials auf $880 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ FoTS}$ festgelegt. Ein Beispiel für eine damit angefertigte Simulation findet sich in **Abbildung 52**.

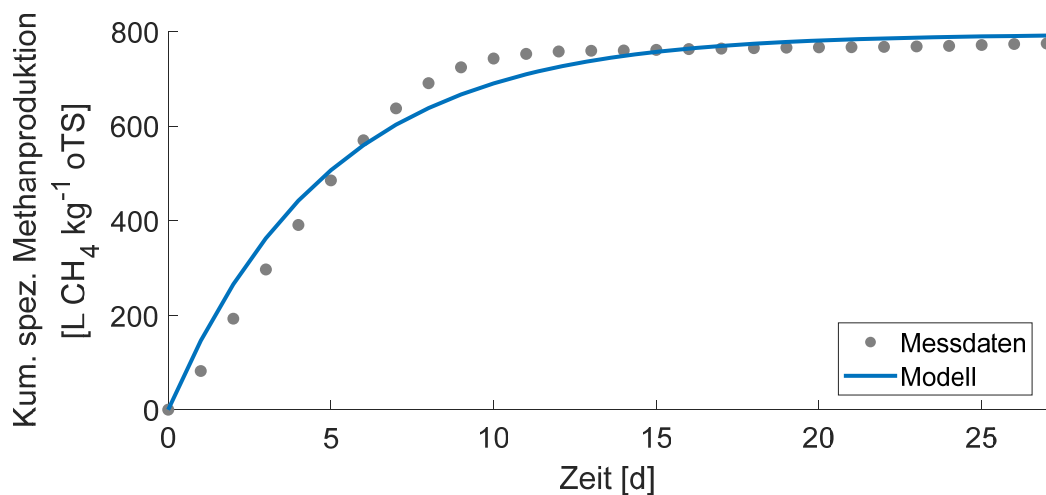


Abbildung 53: Gemessene und simulierte spezifische Methanbildung eines Flotatschlammes (1-Fraktions-Modell 1.Ordnung).

Das biochemische Methanpotenzial des Flotatschlammes in **Abbildung 53** beträgt $759,9 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ oTR}$ (experimentell), bzw. $794,7 \text{ L CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ oTR}$ (modellbasiert). Die Modelleffizienz (=Übereinstimmung des Modells mit den Messwerten) liegt bei sehr guten $0,976$. Die ermittelte kinetische Geschwindigkeitskonstante 1. Ordnung beträgt $0,203 \text{ d}^{-1}$, was etwas höher liegt als die im ADM1 für reine Fette zugrunde gelegte Kinetik von $0,1 \text{ d}^{-1}$ (Batstone et al., 2002).

Insgesamt jedoch stellte sich insbesondere die einheitliche Substrat- und Prozesscharakterisierung als Herausforderung dar. Als Bezugseinheit in der Abwassertechnik dient in erster Linie der CSB, welcher jedoch in der Biogastechnik unüblich ist, wo in der Regel die oTR bilanziert wird. Die Umrechnung der Parameter ins jeweils andere Bezugssystem ist nur mit erheblichen Unsicherheiten möglich, was die Aussagekraft der berechneten Ergebnisse schmälert.

Aufgrund der Herausforderungen bei der Substratanalyse bzw. der experimentellen Ermittlung der notwendigen Inputparameter für die modellbasierte Strommarkt-Optimierung wurde von einem detaillierten Prozessmodell Abstand genommen, da dieses ohnehin nicht mit befriedigender Genauigkeit an Messwerte kalibriert werden kann. Hingegen wurde entschieden, die Dynamik der Klärgasbildung über ein vereinfachtes lineares sog. „Rampenmodell“ zu beschreiben. Die einzigen vier Parameter, die dieses Modell benötigt, sind:

- Minimale und maximale Gasproduktionsrate,
- Max. Steigerungsrate der Gasproduktion (+ Δ),
- Max. Senkungsrate der Gasproduktion (- Δ).

Dadurch, dass in diesem Modell alle Bezugsgrößen auf die Bezugseinheit kW bzw. kWh umgerechnet sind, ist es leicht verständlich. Die einfache Programmstruktur, welche als Aufeinanderfolge von Matrizenmultiplikationen darstellbar ist, erlaubt kurze Rechenzeiten auch auf Standard-PC-Desktop-Hardware. Dank vorgefertigter Solver-Bibliotheken ist die

softwaretechnische Implementierung sowohl in der kommerziellen Umgebung Matlab (The MathWorks, Inc.), als auch in der Open-Source-Programmiersprache Python möglich.

Im Gegensatz zu landwirtschaftlichen Biogasanlagen, deren eingespeister Strom nach EEG vergütet wird und damit deutlich höhere Preise pro kWh erzielt als der Eigenstrom, liegt bei Kläranlagen der Fokus primär auf der Deckung des Eigenbedarfs. Lediglich Überschüsse werden eingespeist, und der Eigenbedarf schwankt über den Tagesverlauf. Als Datengrundlage wurden die Eckdaten der Modellkläranlage aus AP 5 (vgl. *Aufbau der Modellkläranlage*) verwendet, wobei von einer mittleren Pufferdauer des Gasspeichers von 8 Stunden ausgegangen wurde. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass die BHKWs in Teillast gefahren werden dürfen, auch wenn damit ein Wirkungsgradverlust gegenüber dem AN-AUS-Betrieb einhergeht. Um gezielt Grenzfälle der Optimierung zu beleuchten, wurde beispielhaft eine EPEX-Day-Ahead-Preiswoche mit hohen und eine mit niedrigen Preisen gewählt. Minimaler, mittlerer und maximaler Strompreis der jeweiligen Woche finden sich in **Tabelle 17**.

Tabelle 17: Eckdaten der beiden EPEX-Preiswochen.

[€/MWh]	Min.	Max.	Spread	Mittelwert
Hochpreiswoche	79,82	500,00	420,18	270,69
Niedrigpreiswoche	-109,45	154,56	264,01	63,28

Beispielhafte Ergebnisse der strommarktoptimierten Fahrweise über eine Woche (Hochpreiswoche) sind in **Abbildung 54** dargestellt.

Dabei wurden von den aus der Faulgaserzeugung insgesamt zur Verfügung stehenden 430 kW elektrischer Bemessungsleistung 77,3 kW am Strommarkt gehandelt, während die restlichen 352,7 kW für den Eigenbedarf verwendet wurden. Da der mittlere Eigenbedarf bei 370 kW liegt, bedeutet das, dass 17,3 kW zusätzlich am Strommarkt angeboten wurden, weil dort offensichtlich höhere Preise zu erzielen waren als durch die Bedienung des Eigenbedarfs Kosten vermieden werden konnten. Der erzielte Nettogewinn setzt sich zusammen aus Einnahmen von 5331,99 € für den Stromverkauf, abzüglich 1164,55 € für aus dem Netz bezogenen Eigenstrom. Nicht einberechnet sind an dieser Stelle evtl. zu entrichtende Abgaben an den Direktvermarkter, welche üblicherweise um 30 % liegen.

In einem weiteren Szenario wurde dieselbe Anlage über eine Niedrigpreiswoche optimiert, vgl. **Abbildung 55**.

Dabei wurden die 370 kW Eigenbedarf komplett selbst erzeugt und nur Überschüsse aus der Verstromung ins öffentliche Stromnetz eingespeist. Die erzielten Gewinne lagen dabei aufgrund der niedrigen Preise bei lediglich 1155,05 €. Da keine Kosten für den Eigenstrombezug aus dem Netz entstanden, entspricht dies dem Nettogewinn dieses Szenarios.

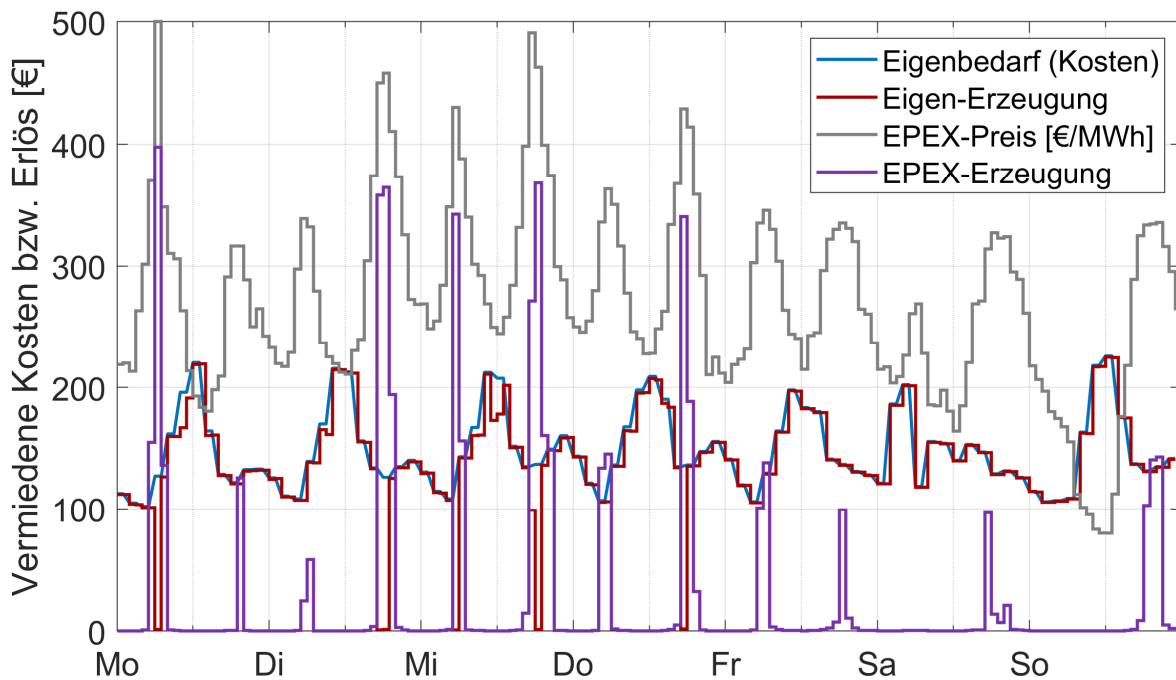


Abbildung 54: Optimierungsergebnis mit dynamischem Eigenbedarf während der EPEX-Hochpreiswoche. Nettogewinn: 4.167,44 €

Die betrachtete EPEX-Day-Ahead-Preiszeitreihe wies in der Spitze Preise von 500 bzw. 154,56 €/MWh auf, während für Eigenstrombezug aus dem Netz ca. 400 €/MWh zu zahlen ist. Da selbst die Hochpreiswoche im Mittel nur 270,69 €/MWh erzielte, lohnt es sich in der Regel immer, primär den Eigenbedarf zu decken und den Strommarkt erst nachrangig zu bedienen. Sobald allerdings Preisschwankungen der Natur auftreten, dass die Marktpreise Spitzen über 400 €/MWh erreichen, kann eine Einspeisung lukrativ sein, wie die vorgelegten Ergebnisse zeigen.

Durch die Linearisierung der Gasproduktion muss zur Rampenoptimierung angemerkt werden, dass die Genauigkeit der erzielten Ergebnisse eingeschränkt und nicht direkt auf den Praxisbetrieb einer realen Anlage übertragbar ist. Durch die Auflösung in Stundenintervallen liegt der Zeitraum, den man realistisch auf handelsüblicher PC-Hardware simulieren kann, bei max. 14 Tagen bzw. 336 Stunden. Größere Zeiträume weisen exponentiell wachsende Rechenzeiten auf, führen z.T. sogar zu Speicherüberläufen („out-of-memory-error“), würden also deutlich leistungsstärkere Server-Hardware voraussetzen.

Perspektivisch könnten die ermittelten Gasproduktions-Zeitreihen im Nachgang noch einmal mit mechanistischen Prozessmodellen abgeglichen werden. Diese erfordern allerdings substratspezifische Kenngrößen, welche aus entsprechenden zeitaufwändigen Experimenten zu ermitteln sind und damit nicht mehr im Rahmen des Vorhabens FLXsynErgy umgesetzt werden können.

Auf Seiten des Eigenbedarfs wäre betrachtenswert, wie sich dynamische Einkaufspreise auf das Optimierungsergebnis und damit den Nettogewinn auswirken.

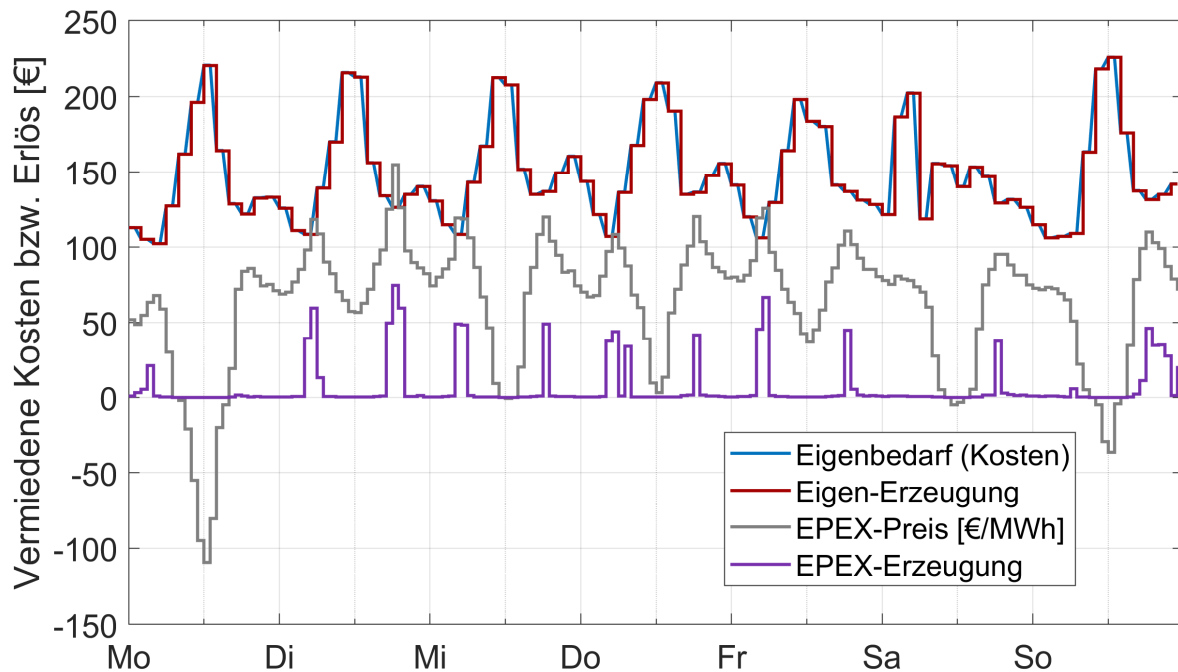


Abbildung 55: Optimierungsergebnis mit dynamischem Eigenbedarf während der EPEX-Niedrigpreiswoche. Nettogewinn: 1.155,05 €

1.4.4 Untersuchungen zur Erhöhung des Eigenversorgungsgrades am Beispiel großtechnischer Anlagen

Nachfolgend sollen die Lastgänge von drei Kläranlagen unterschiedlicher Größe und Ausstattung mittels künstlicher Intelligenz analysiert und daraus Erkenntnisse zum Speicherbedarf und zu der KWK-Steuerung in Anbetracht eines Ausbaus erneuerbarer Energien auf Kläranlagen abgeleitet werden. Dabei wurden folgende Fragestellungen bearbeitet:

- Wie kann die Ist-Situation der Kläranlagen adäquat dargestellt werden?
- Wie verändern sich die Lastgänge und der Selbstversorgungsgrad der Kläranlagen bei verschiedenen Parametern?
- Welche Handlungsempfehlungen können für Betreiber von Kläranlagen formuliert werden?

Der vorliegende Bericht fasst die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen des Projekts zusammen.

Methodik und Grundlagen

Grundlagen

Die Lastganganalyse wurde für drei Kläranlagen durchgeführt, die sich in ihrer Größe, ihrer BHKW-Anlage, ihrer Faulgasspeicherung und ihrer Nutzung von erneuerbaren Energien –

Photovoltaik (PV) und Windenergieanlagen (WEA). Die Kläranlagen wurden wie folgt bezeichnet:

- Kläranlage A: mittelgroße Kläranlage mit 3 + 1 BHKW mit je 1,0 MWel, einem ND-Speicher mit 200 Nm³ und einem HD-Speicher mit 9.700 Nm³
- Kläranlage B: große Kläranlage mit 3 + 1 BHKW mit je 1,5 MWel, einem ND-Speicher mit 3 300 Nm³ und einer WEA mit 4,2 MWel
- Kläranlage C: kleine Kläranlage mit 3 BHKW mit je 0,36 MWel, einem ND-Speicher mit 1 500 Nm³ und einer WEA mit 2,3 MWel

Für jede Kläranlage wurden die Daten zum Gasanfall, zum Stromverbrauch, zur Stromerzeugung, zur Speicherbeladung und zum Netzaustausch für ein Jahr erhoben und in einem KI-Modell verarbeitet. Die Daten wurden von den Kläranlagen freigegeben und als 15-Minutenwerte zur Verfügung gestellt.

Methodik

Die erhaltenen Daten der Kläranlagen wurden auf Plausibilität und Ausreißer geprüft. Unplausible Daten und einzelne fehlende Daten wurden korrigiert. Zusätzlich wurde ein Machine-Learning-Algorithmus entwickelt, der auf historischen Wetterdaten des jeweiligen Standorts der letzten 20 Jahre basiert, um fehlende Wetterdaten realistisch zu ergänzen.

Das zentrale Modell wurde unter Einsatz linearer Optimierungstechniken entwickelt und verifiziert. Die zugrundeliegenden Daten zur Gaserzeugung, Gasspeichervolumina sowie die technischen Daten der BHKW-Anlagen wurden in das Modell eingegeben. Mithilfe linearer Optimierung wurde der optimale Betrieb der Anlagen unter verschiedenen Bedingungen ermittelt, um den Eigenversorgungsgrad zu maximieren und die Energieeffizienz zu steigern.

Der generierte Erzeugungslastgang für elektrische Energie und die Speicherbewirtschaftung wurde mit den Bestandsdaten verglichen. Das Modell wurde iterativ angepasst, bis es die realen Ergebnisse mit hoher Übereinstimmung reproduzieren konnte und somit als digitaler Zwilling für den Verfahrensbereich genutzt werden konnte.

Das verifizierte Modell ermöglichte die Simulation von verschiedenen Szenarien, in denen die Parameter der Kläranlagen verändert wurden, um die Auswirkungen auf die Lastgänge und den Selbstversorgungsgrad zu untersuchen. Die Parameter umfassten die Installation von zusätzlichen PV- bzw. WEA-Anlagen, die Erhöhung der BHKW-Leistung oder des elektrischen Wirkungsgrades, die Verdopplung des Faulgasspeichervolumens oder die Nutzung eines Batteriespeichers. Die Ergebnisse der Simulationen wurden grafisch und tabellarisch dargestellt und verglichen.

Methodik maschinelles Lernen

Problemstellung:

Bei der Modellierung von Energiesystemen, die auf erneuerbaren Quellen wie Solar- und Windenergie basieren, sind präzise Wetterdaten essenziell. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) liefert zwar hochwertige und verlässliche Daten, allerdings kommt es aufgrund von Ausfällen und Wartungsarbeiten der Sensoren regelmäßig zu Datenlücken, die jährlich etwa 5 % der Daten betreffen. Diese Lücken erschweren eine akkurate Modellierung und Vorhersage der Energieproduktion.

Lösungsansatz:

Ein einfaches Auffüllen der fehlenden Daten durch Nullwerte wäre unzureichend, da dies zu erheblichen Verfälschungen der Ergebnisse führen würde. Eine lineare Interpolation stellt eine alternative Methode dar, würde jedoch ebenfalls ungenaue Ergebnisse liefern, insbesondere bei größeren Datenlücken über mehrere Tage. Beispielsweise könnte durch lineare Interpolation der Eindruck entstehen, dass die Sonne auch in der Nacht scheint.

Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde ein Machine-Learning-Algorithmus entwickelt und eingesetzt. Dieser Algorithmus greift auf historische Wetterdaten des jeweiligen Standorts der letzten 20 Jahre zurück. Durch die Analyse dieser Daten lernt der Algorithmus die komplexen Zusammenhänge und Muster des lokalen Wetters. Auf dieser Grundlage kann er die fehlenden Wetterdaten realistischer und präziser auffüllen, indem er die typischen Wetterverläufe für die betreffenden Zeiträume rekonstruiert.

Bestandsanalyse

Zur Klassifizierung der Kläranlagen wurden zunächst die Lastgänge auf Regelmäßigkeiten untersucht. Die Ergebnisse der Verbrauchsdaten wurden graphisch in Form von Heatmaps und Teppichdiagrammen aufbereitet.

Eine Heatmap zeigt dabei die Quantität (Ordinate, in Klassen) über den Tagesverlauf (Abszisse, in Viertelstunden). Die Häufigkeitsverteilung der Messpunkte wird über eine Einfärbung erreicht. So ergeben sich Verbrauchsverlaufskurven. Die Breite der Häufigkeitsverteilung, hier die Farbintensität, kann als Rückschluss auf die Gleich- und Regelmäßigkeit der Belastung der Kläranlagen und damit als ein Maß für die Prognosequalität des Verbrauches genutzt werden.

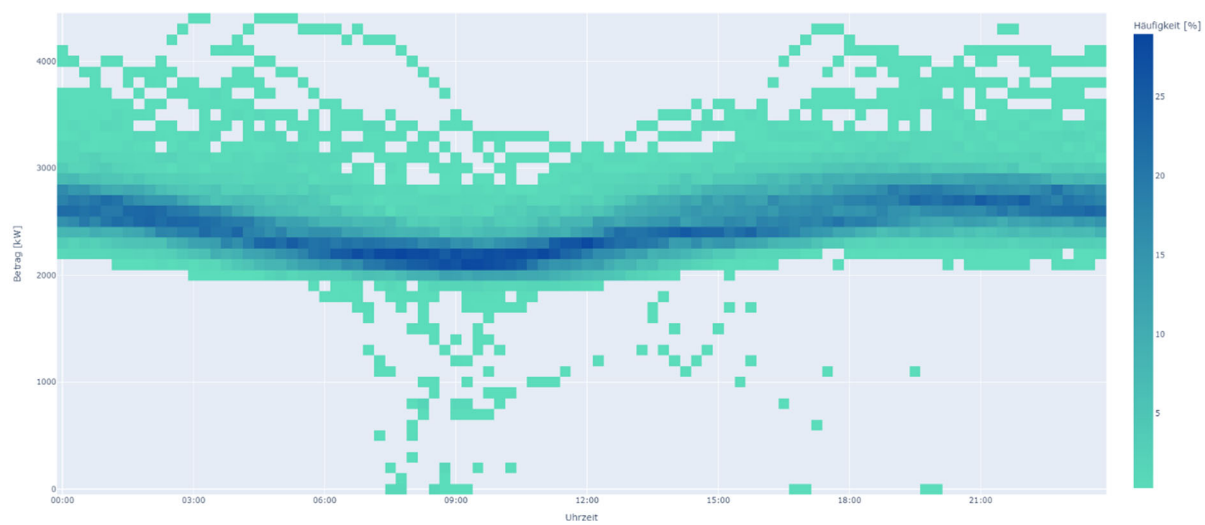


Abbildung 56: Heatmap Kläranlage A

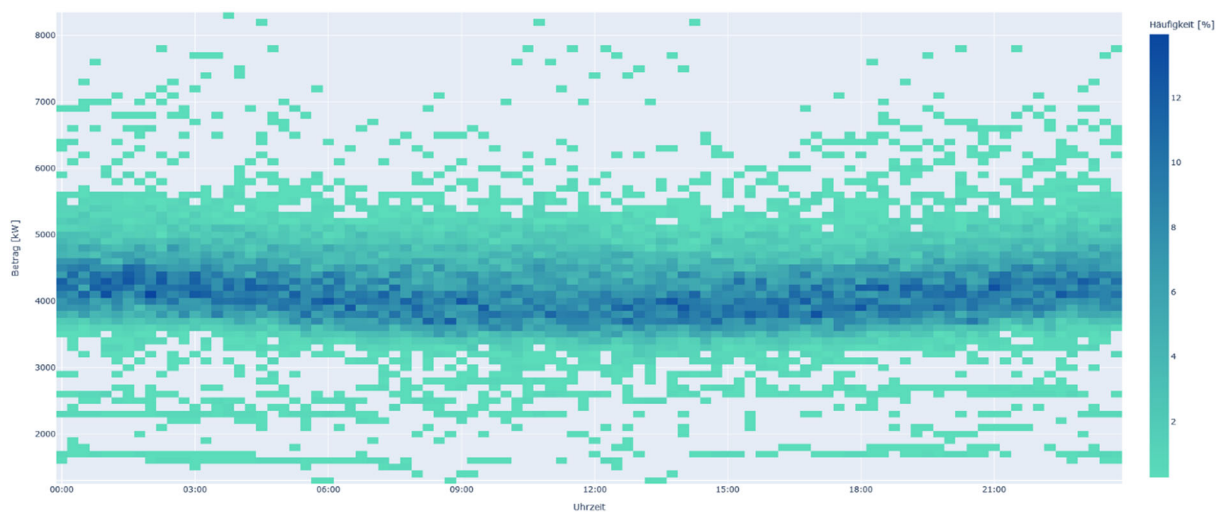


Abbildung 57: Heatmap Kläranlage B

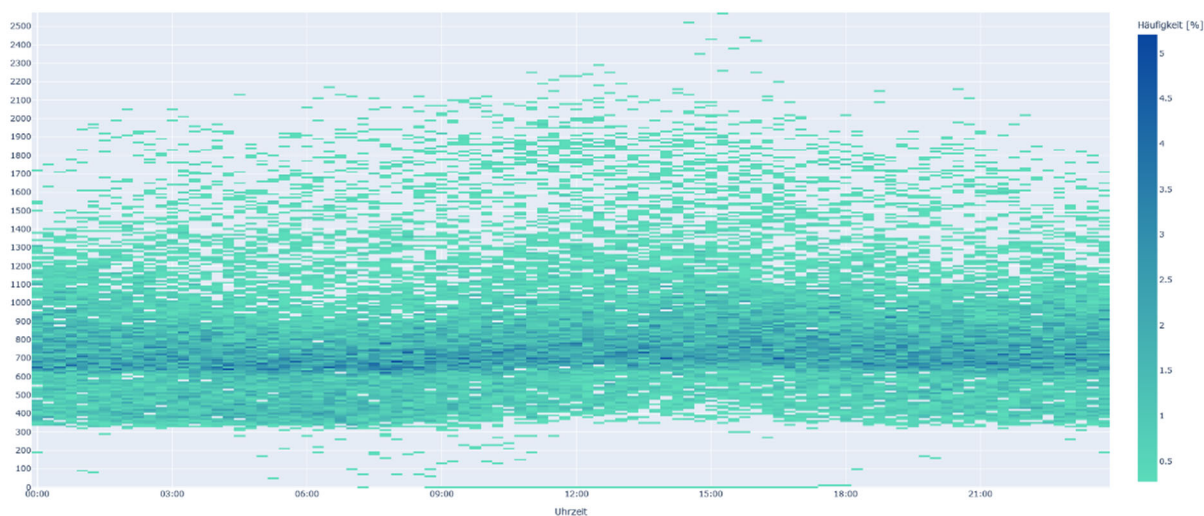


Abbildung 58: Heatmap Kläranlage C

Es zeigen sich unterschiedliche Muster in den verschiedenen Kläranlagen. Während der Verbrauchsverlauf für Kläranlage A einer sehr hohen Regelmäßigkeit unterliegt und klar abgegrenzt ist, ist dieser für Kläranlagen B wesentlich breiter und individueller. Bei Kläranlage C ist ebenfalls ein typischer Verlauf der Verbrauchswerte über den Tag zu erkennen, die Abweichung ist vergleichsweise hoch.

Eine weitere Analyse ist das Teppichdiagramm. Es zeigt auf der Ordinate den Tagesverlauf und auf der Abszisse die Kalendertage. So wird jeder Messpunkt eines Jahres individuell dargestellt. Die Einfärbung erfolgt anhand der Höhe des Wertes. Das Ziel ist das Erkennen von saisonalen Schwankungen und Regelmäßigkeiten, die in einem einfachen Tagesverlauf in der Heatmap nicht ersichtlich sind.

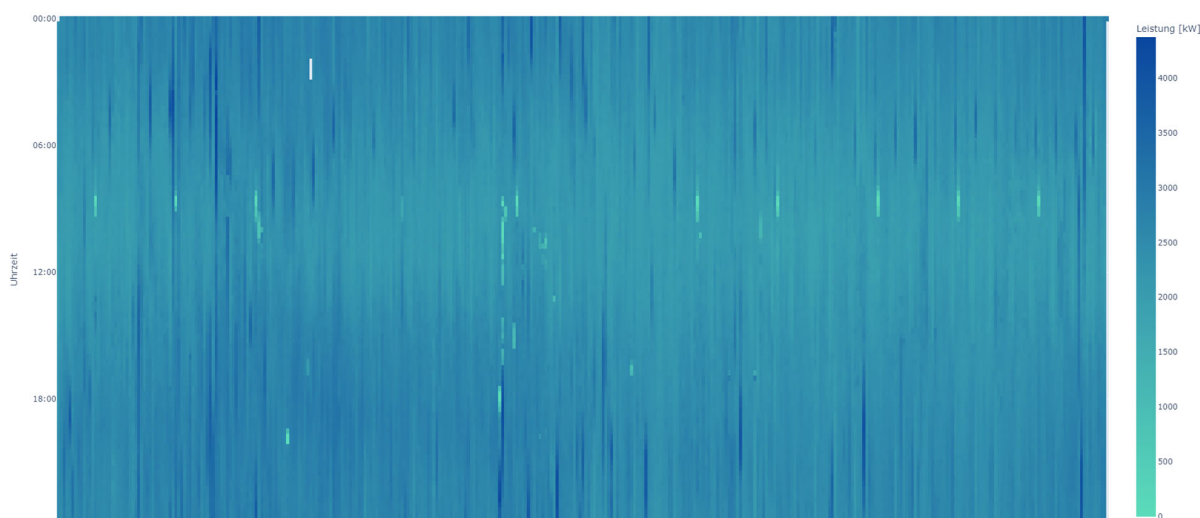


Abbildung 59: Teppichdiagramm für Kläranlage A

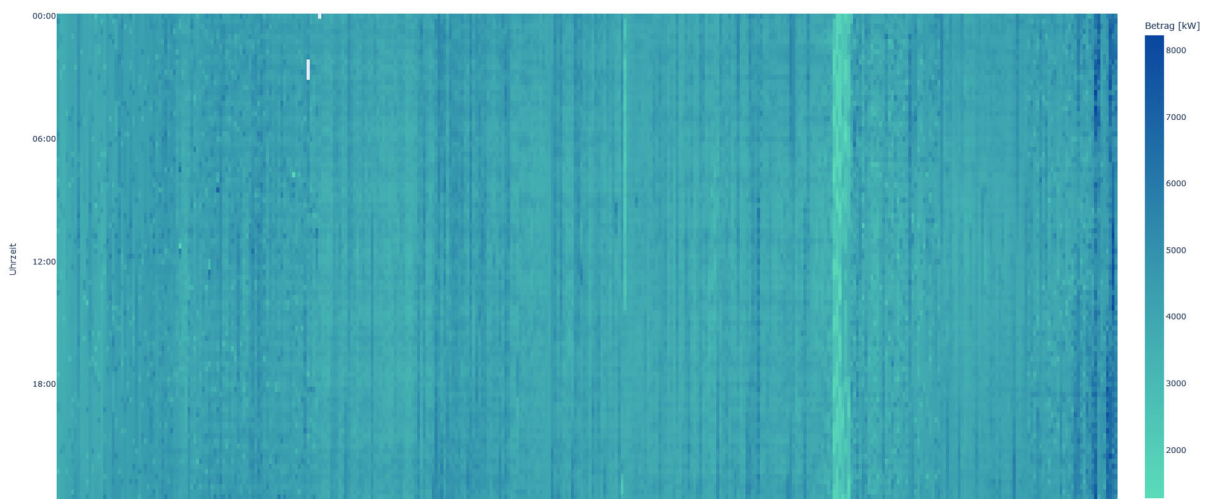


Abbildung 60: Teppichdiagramm für Kläranlage B

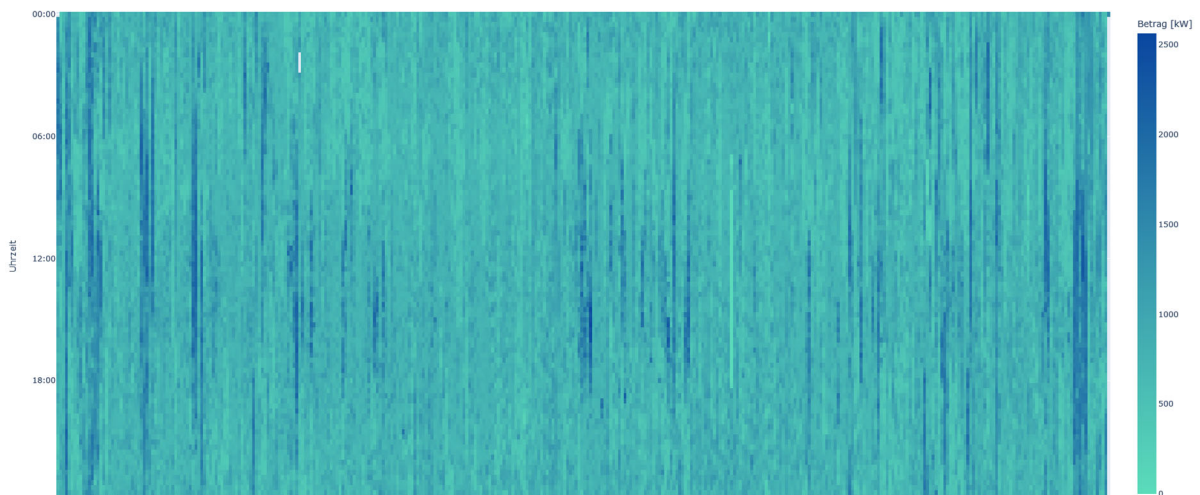


Abbildung 61: Teppichdiagramm für Kläranlage C

Aus den Teppichdiagrammen konnten keine signifikanten Erkenntnisse gewonnen werden. Muster, wie sie in Kläranlage A auffallen, sind auf Wartungsintervalle von Notstromaggregaten und deren mangelnde individuelle Erfassung in den Verbrauchsdaten zurückzuführen. Weitere Muster und Unregelmäßigkeiten deuten auf Abhängigkeiten außerhalb des betrachteten Bereiches hin. Eine Korrelation mit z. B. der Zugabe von Cosubstraten in die Faulbehälter konnte aufgrund von unzureichender Datenqualität der Cosubstratgaben nicht sinnvoll erzielt werden.

Ergebnisse der weiterführenden Analysen

Die Ergebnisse der Lastganganalysen zeigten, dass die Kläranlagen unterschiedliche Voraussetzungen für die Implementation von Maßnahmen besitzen. Um den Effekt zu untersuchen, wurden verschiedene Ansätze angewendet. Dabei wurden untersucht:

- der Einfluss von PV- und Windkraftanlagen

- der Einfluss einer Verdopplung des Gasspeichervolumens
- der Einfluss von effizienteren BHKW-Modulen
- der Einfluss von Batteriespeichern

Kläranlage A

Der bestehende Plan der Kläranlage A sieht die Erzeugung von erneuerbaren Energien am Standort vor. Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss einer Photovoltaikanlage mit 476 kWp auf die elektrische Energiebilanz der Kläranlage.

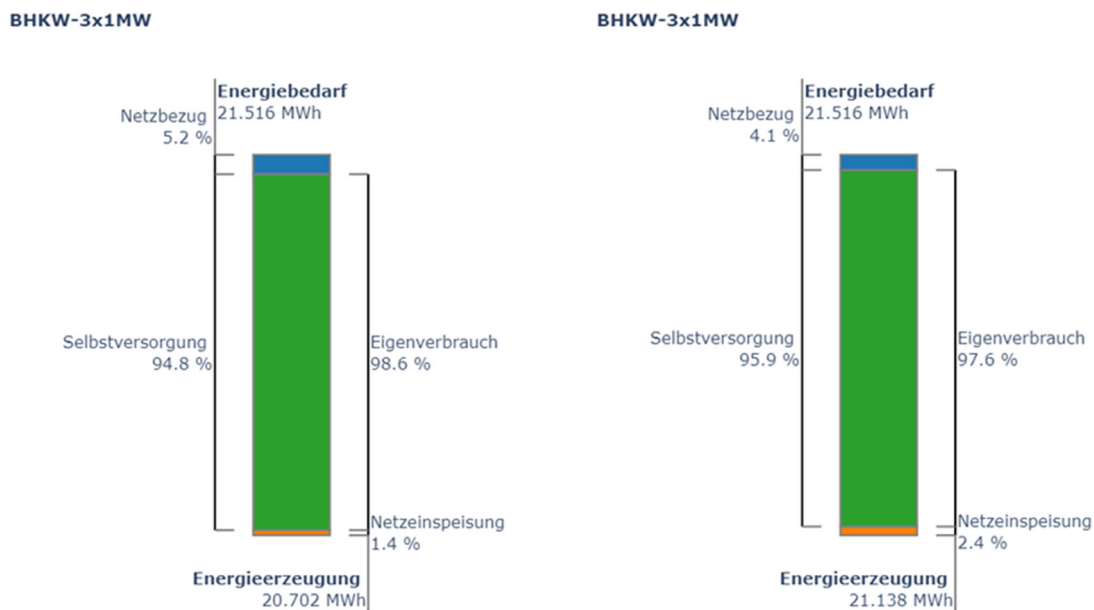


Abbildung 62: Kläranlage A – Photovoltaik (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. PV)

Die Kläranlage besitzt bereits einen hohen Selbstversorgungsgrad, welcher mit der PV-Anlage um einen Prozentpunkt gesteigert werden konnte. Der Netzbezug sinkt im entsprechenden Maße.

Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss einer Windkraftanlage mit 5,6 MWh.

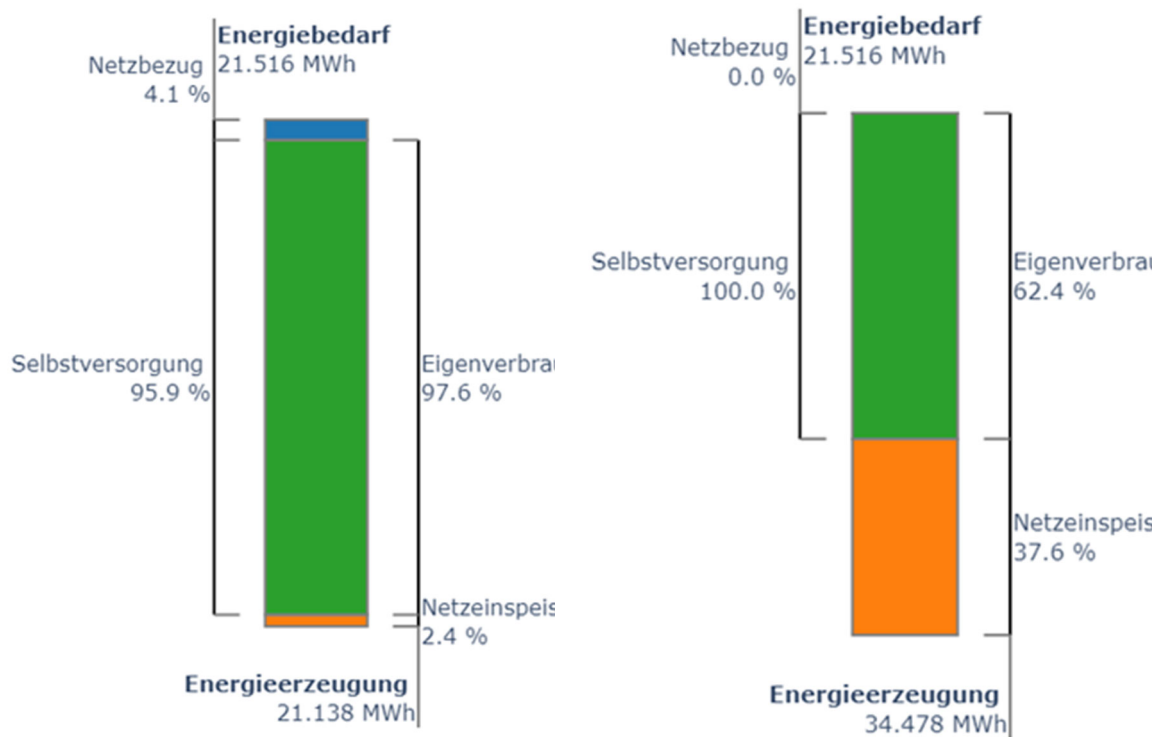


Abbildung 63: Kläranlage A – Windkraftanlage (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. WEA)

Der Selbstversorgungsgrad kann mit der Windkraftanlage auf 100 % gesteigert werden. Die Windkraftanlage ist fast doppelt so groß wie die elektrische Leistung der aktiven BHKW. Circa ein Drittel der elektrischen Energie wird ausgespeist.

Die Verdopplung des Gasspeichers führte zu keinen nennenswerten Änderungen an dem Selbstversorgungsgrad.

Kläranlage B

Für die Kläranlage B lagen keine Pläne für die Erzeugung von erneuerbaren Energien in Form von PV oder Wind vor.

Die folgende Abbildung zeigt die Änderung der Bilanz durch die Verdopplung des Gasspeichervolumens:

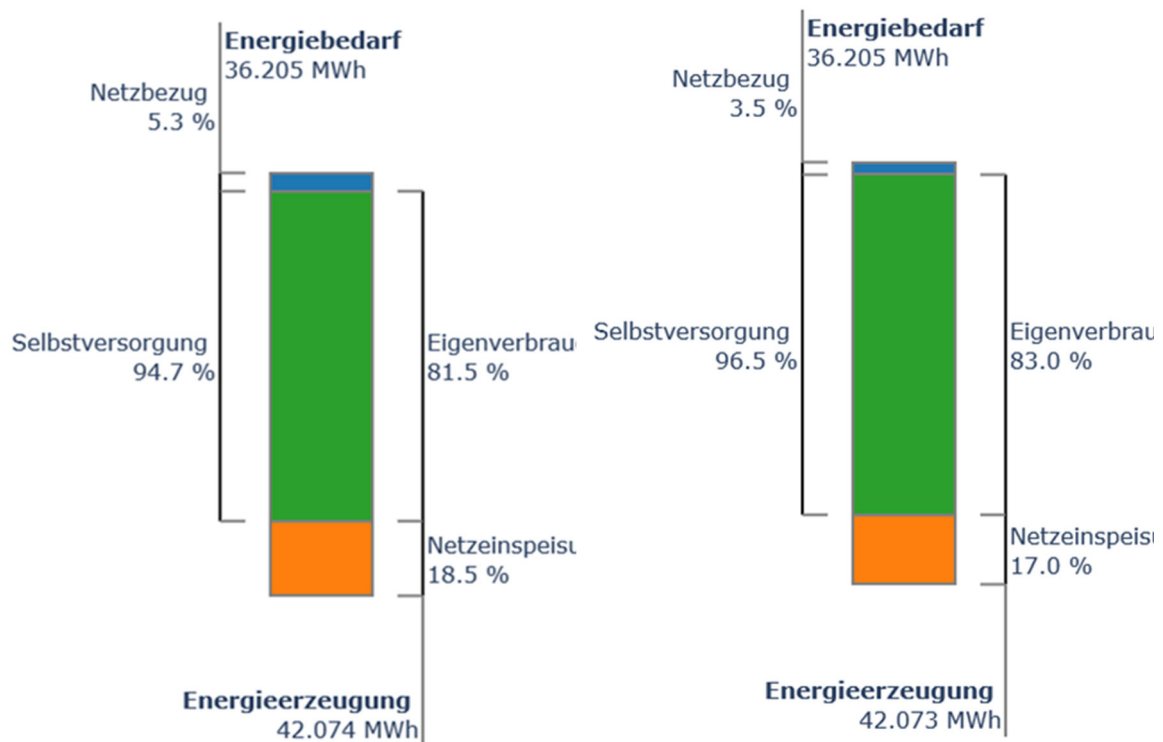


Abbildung 64: Kläranlage B – Verdopplung des Gasspeichers (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. verdoppeltem Gasspeicher)

Der Grad der Selbstversorgung steigt durch die Maßnahme um ca. zwei Prozentpunkte. Der Netzbezug wird entsprechend verringert. Es ist zu beachten, dass durch die Vergrößerung des Volumens auch die absolute Menge des verpackelten Faulgases verringert wurde.

Kläranlage C

Für die Kläranlage C lagen keine Pläne für die Erzeugung von erneuerbaren Energien in Form von PV oder Wind vor.

Die Folgende Abbildung zeigt die Änderung der Bilanz durch die Verdopplung des Gasspeichervolumens.

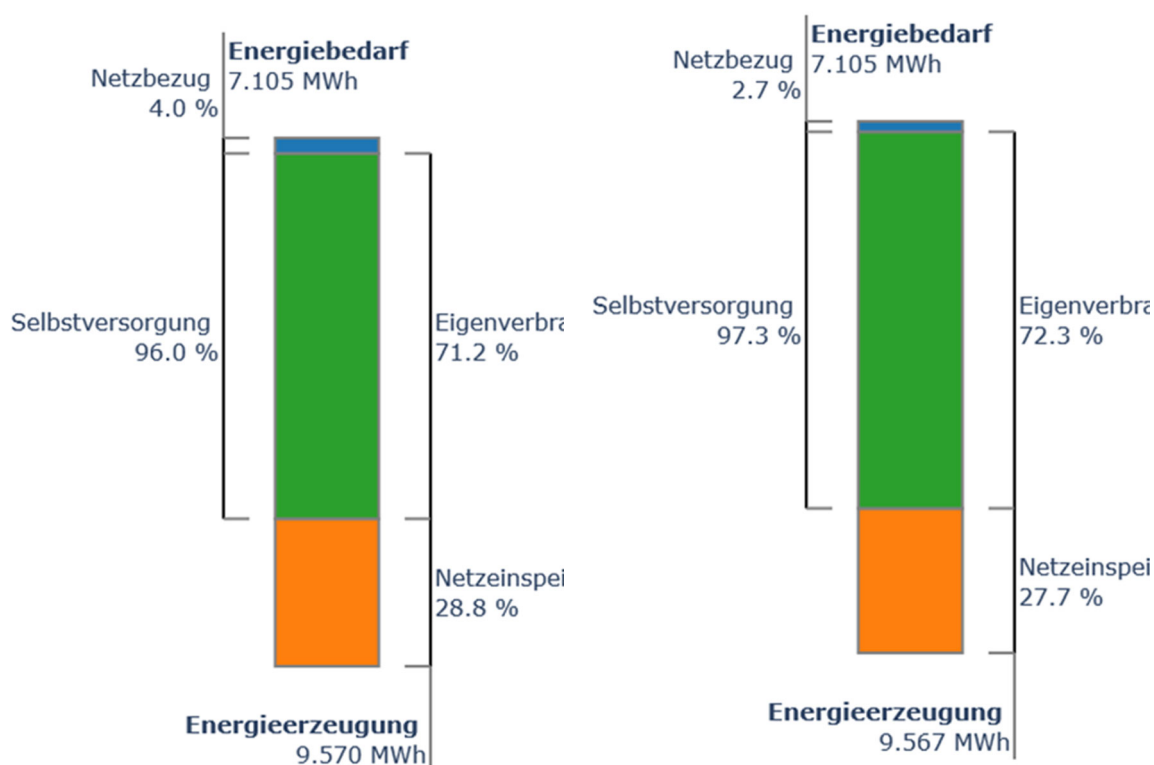


Abbildung 65: Kläranlage C: Verdopplung des Gasspeichers (linke Darstellung: Bestand, rechte Darstellung: inkl. verdoppeltem Gasspeicher)

Der Grad der Selbstversorgung steigt durch die Maßnahme um ca. einen Prozentpunkt. Der Netzbezug wird entsprechend verringert.

Zusammenfassung

Die wichtigsten Erkenntnisse sind:

- Die Installationen von PV- und Windenergie haben einen positiven Einfluss auf den Selbstversorgungsgrad; allerdings sind die Größe und Ausrichtung der Anlagen entscheidend für die optimale Nutzung der erzeugten Energie.
- Eine Erhöhung des Gasspeichervolumens kann einen Einfluss auf den Eigenversorgungsgrad der Kläranlagen haben, wenn dadurch eine flexiblere Nutzung des anfallenden Faulgases ermöglicht wird. Dabei sind nicht nur das Volumen des anfallenden

Faulgases entscheidend, sondern auch die verfügbare BHKW-Leistung und der elektrische Wirkungsgrad.

- Eine Erhöhung der verfügbaren BHKW-Leistung sowie des elektrischen Wirkungsgrads durch einen Neubau kann einen positiven Einfluss auf den Eigenversorgungsgrad der Kläranlage haben, wenn dadurch die Eigenverbrauchsquote erhöht wird.
- Auch bei einer Netzeinspeisung, die deutlich höher ist als der Netzbezug, ist nicht grundsätzlich davon auszugehen, dass der Netzbezug durch eine Zwischenspeicherung der Überschussenergie in einem Batteriespeicher reduziert werden kann. Dies hängt von der Größe und dem Ladeverhalten des Batteriespeichers ab.

Die folgende Tabelle zeigt die Auswirkungen der verschiedenen Parameter auf den Selbstversorgungsgrad der Kläranlagen im Vergleich zum Bestand.

Tabelle 18: Zusammenfassung der Auswirkungen verschiedener Parameter auf den Selbstversorgungsgrad der Kläranlagen im Vergleich zum Bestand

Kläranlage	Parameter	Selbstversorgungsgrad [%]	Veränderung zum Bestand [%]
A	Bestand	94,8	-
	PV 476 kWp	95,9	+ 1,1
	WEA 5,6 MW	100	+ 5,2
	4 + 0 BHKW	98	+ 3,2
	FG-Speicher x 2	98,8	+ 0,8
B	Bestand	94,7	-
	FG-Speicher x 2	96,5	+ 1,8
	Batteriespeicher	94,7	0
	BHKW x 2	94,7	0
C	Bestand	96	-
	FG-Speicher x 2	97,3	+ 1,3
	Neue BHKW	97,7	+ 1,7
	Batteriespeicher	96	0
	Kombi V1 & V2	98,7	+ 2,7

Handlungsempfehlungen und Ausblick

Aus den Ergebnissen der Lastganganalysen lassen sich folgende Handlungsempfehlungen für Betreiber von Kläranlagen ableiten:

- Gasspeicher sind günstigere und langlebigere Energiespeicher als Batterien und sollten daher bevorzugt werden, um die Flexibilität der Kläranlagen zu erhöhen.
- Die Größe und Ausrichtung der PV- und WEA-Anlagen sollte an den Lastgang der Kläranlagen angepasst werden, um die Eigenverbrauchsquote zu maximieren.
- Die BHKW-Anlage sollte regelmäßig gewartet und gegebenenfalls erneuert werden, um den elektrischen Wirkungsgrad zu verbessern und die Eigenverbrauchsquote zu erhöhen.
- Die Lastganganalyse sollte individuell für jede Kläranlage durchgeführt werden, um die optimale Kombination von Parametern zu ermitteln.

Das Projekt FLXsynErgy hat gezeigt, dass die Lastganganalyse mittels KI ein nützliches Instrument zur Optimierung der Energieversorgung von Kläranlagen ist. Für eine weitere Vertiefung des Themas sind folgende Schritte vorgesehen:

- Anwendung der Lastganganalyse auf Kläranlagen anderer Größenklassen und mit unterschiedlichen Cosubstraten
- Ableitung allgemeingültiger Herangehensweisen und Handlungsempfehlungen für Betreiber von Kläranlagen
- Berichterstellung und Veröffentlichung der Ergebnisse
- lineare Optimierung der Kosten und Nutzen der verschiedenen Parameter

Ausblick lineare Optimierung

Die lineare Optimierung ermöglicht es, komplexe Entscheidungsprobleme mit einer Vielzahl von Variablen und Einschränkungen auf eine effiziente Weise zu lösen. Im Kontext der Energieversorgung und -nutzung auf Kläranlagen bietet die lineare Optimierung wertvolle Einblicke und Erkenntnisse, die zur Steigerung der Effizienz, zur Kostenreduktion und zur Optimierung der Nachhaltigkeit beitragen können. Folgende Aspekte sind hervorzuheben:

- **Optimale Ressourcenallokation:** Durch die lineare Optimierung kann die optimale Nutzung von Ressourcen wie Faulgas, elektrischer Energie und erneuerbarer Energien ermittelt werden, um den Eigenversorgungsgrad zu maximieren und externe Energiezufuhren zu minimieren. Dies umfasst die optimale Dimensionierung und den Einsatz von BHKW-Anlagen, PV- und Windkraftanlagen sowie die strategische Planung von Gasspeicherkapazitäten.

- **Kosten-Nutzen-Analyse:** Diese ermöglicht eine detaillierte Kosten-Nutzen-Analyse für Investitionen in erneuerbare Energien, Speichertechnologien und Effizienzmaßnahmen. Durch die Berücksichtigung von Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten sowie Energieerträgen können Betreiber fundierte Entscheidungen über zukünftige Investitionen treffen.
- **Reduzierung von Umweltauswirkungen:** Die Optimierung kann dazu beitragen, die Umweltauswirkungen durch den Einsatz erneuerbarer Energien zu minimieren und den CO₂-Fußabdruck der Kläranlagen zu reduzieren. Durch die effiziente Nutzung von Ressourcen und die Reduzierung von Energieverlusten kann ein bedeutender Beitrag zum Umweltschutz geleistet werden.
- **Flexibilität in der Energieversorgung:** Die Analyse bietet Lösungen zur Erhöhung der Flexibilität in der Energieversorgung und -nutzung, insbesondere im Hinblick auf die Volatilität erneuerbarer Energiequellen. Dies umfasst Strategien für den Einsatz von Energiespeichern, um Überschussenergie effektiv zu speichern und bei Bedarf zu nutzen.
- **Anpassungsfähigkeit an zukünftige Veränderungen:** Durch die lineare Optimierung können Szenarien simuliert werden, die zukünftige Entwicklungen wie Veränderungen im Energiebedarf, technologische Fortschritte und Schwankungen der Energiepreise berücksichtigen. Dies ermöglicht es, flexible und zukunftssichere Strategien für die Energieversorgung und Energienutzung zu entwickeln.

Insgesamt bietet die lineare Optimierung ein mächtiges Werkzeug, um die Energieeffizienz und Nachhaltigkeit von Kläranlagen zu verbessern. Sie unterstützt die Identifizierung optimaler Lösungen für die Energieversorgung, die nicht nur wirtschaftlich vorteilhaft, sondern auch umweltfreundlich sind. Durch die fortlaufende Anwendung und Weiterentwicklung dieser Methoden können Betreiber von Kläranlagen einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren und effizienteren Energienutzung leisten.

1.4.5 Rechtliche Aspekte im Hinblick auf eine Interaktion mit externen Systemen

Bei Nutzung der oben erläuterten Optionen gilt es, die rechtliche Rahmenbedingungen zu beachten und deren Potentiale auszuschöpfen.

Flexibilitätsprämie

Die Flexibilitätsprämie wird ausschließlich für bestehende Anlagen gezahlt, die vor dem 1. August 2014 in Betrieb genommen worden sind. Zahlungspflichtig und Ansprechpartner ist gem. § 50 I EEG 2023 der Netzbetreiber.

Ansprechpunkt:

Bundesamt für Wirtschaft und Ausführungkontrolle (BAFA)
Referat 513 – Energieeffizienz in der Wirtschaft
Frankfurter Straße 29–35
65760 Eschborn

Diese erhalten über eine Dauer von zehn Jahren je zusätzlich installiertem Kilowatt pro Jahr 130 Euro. In § 50b S. 1 EEG 2023 heißt es dazu:

„Betreiber von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus Biogas, die nach dem am 31. Juli 2014 geltenden Inbetriebnahmebegriff vor dem 1. August 2014 in Betrieb genommen worden sind, können ergänzend zu einer Veräußerung des Stroms in den Veräußerungsformen einer Direktvermarktung von dem Netzbetreiber eine Prämie für die Bereitstellung zusätzlich installierter Leistung für eine bedarfsorientierte Stromerzeugung (Flexibilitätsprämie) verlangen.“

Die Anlage 3 zu § 50b EEG 2023 konkretisiert die Voraussetzungen für die Flexibilitätsprämie in Absatz 1 Nr. 1 wie folgt:

„Anlagenbetreiber können die Flexibilitätsprämie verlangen,

- a) wenn für den gesamten in der Anlage erzeugten Strom keine Einspeisevergütung in Anspruch genommen wird und für diesen Strom unbeschadet des § 27 Absatz 3 und 4, des § 27a Absatz 2 und des § 27c Absatz 3 des Erneuerbare-Energien-Gesetzes in der am 31. Juli 2014 geltenden Fassung dem Grunde nach ein Vergütungsanspruch nach § 19 in Verbindung mit § 100 Absatz 2 besteht, der nicht nach § 52 in Verbindung mit § 100 Absatz 2 verringert ist,
- b) wenn die Bemessungsleistung der Anlage im Sinne der Nummer II.1 erster Spiegelstrich mindestens das 0,2fache der installierten Leistung der Anlage beträgt,
- c) wenn der Anlagenbetreiber die zur Registrierung der Inanspruchnahme der Flexibilitätsprämie erforderlichen Angaben an das Register übermittelt hat und
- d) sobald ein Umweltgutachter mit einer Zulassung für den Bereich Elektrizitätserzeugung aus erneuerbaren Energien bescheinigt hat, dass die Anlage für den zum Anspruch auf

die Flexibilitätsprämie erforderlichen bedarfsorientierten Betrieb nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik technisch geeignet ist.“

Umweltgutachter ziehen in ihre einzelfallbezogene Entscheidung über die Zuteilung der Flexibilitätsprämie insbesondere die folgenden Kriterien ein:

- a) Die Anlage muss nach EEG gefördert werden. Andere Anlagen, die beispielsweise nach Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWK-G) gefördert werden, erhalten die Flexibilitätsprämie nicht.
- b) Es müssen ein geschlossenes Endlager für Gärreste sowie eine Gasfackel oder eine andere zusätzliche Gasverbrauchseinrichtung vorhanden sein.
- c) Es muss der Nachweis über die erforderlichen Gasspeicherkapazitäten für den flexiblen Betrieb der Anlage erbracht werden, insbesondere was Anlagenstillstandzeiten und Zeiten mit reduzierter Fahrweise in Teillast betrifft. Es muss zudem der Nachweis erbracht werden, dass BHKW und Gasspeichervolumen harmonisieren.
- d) Es muss der Nachweis über die flexible Fahrweise der Anlage erbracht werden. Dies geschieht über das Fahren einer dreitägigen fahrplangestützten Lastkurve. Ein Umweltgutachter muss die Anlage während dieses dreitägigen Probetriebs besuchen.
- e) Es müssen Nachweise über 100%ige Direktvermarktung des produzierten Biogasstroms, über die Durchleitung über das öffentliche Netz, über die Nichtausstellung von Rechnungen über vermiedene Netzentgelte und über die Anpassung von Einspeisesusage und Trafo des Netzbetreibers auf die höhere Leistung erbracht werden.
- f) Es müssen reale Bedarfsverläufe (etwa der Fahrplan des Vermarkters oder des Netzbetreibers) vorgelegt werden, die von der Anlage verarbeitet werden.
- g) Es muss der Nachweis über die Möglichkeit zur viertelstündlichen Messung und Bilanzierung der Ist-Einspeisung erbracht werden.
- h) Es muss die behördliche Genehmigung für die gesamte installierte Leistung am Standort der Biogasanlage vorgelegt werden. Hier muss besonders auf den flexiblen Betrieb und seine sicherheitstechnischen und anlagentechnischen Besonderheiten geachtet werden.
- i) Es muss nachgewiesen werden, dass das Brandschutzkonzept der Anlage für den Einsatz der Feuerwehr auf die neuen Gegebenheiten der flexiblen Fahrweise abgestimmt wurde.
- j) Es müssen eine aktuelle Gefährdungsbeurteilung, ein aktuelles Explosionsschutzdokument sowie ein aktueller Prüfbericht nach BetrSichV vorgelegt werden, welche die neue, flexible Fahrweise der Biogasanlage und mögliche Sicherheitsimplikationen berücksichtigen.
- k) Es muss der Nachweis über fachgerechte Wartungen der Anlage erbracht werden.

- l) Es muss die Versicherungsgesellschaft über die veränderte Betriebsweise informiert werden, ebenso wie ggfs. der Anlagenhersteller, falls noch Gewährleistung besteht.
- m) Es muss schließlich ggfs. eine Anzeige nach Störfallverordnung (ab 7600 m³ Biogas inkl. Gasspeicher) vorgelegt werden.

Flexibilitätszuschlag

Für alle Anlagen, die ab dem 1. August 2014 errichtet wurden, greift seit Einführung des EEG 2014 stattdessen der Flexibilitätszuschlag in Höhe von 65 Euro pro Kilowatt installierter Leistung und Jahr. Die gilt weiterhin für ältere Bestandsanlagen. Der Flexibilitätszuschlag ist ein Investitionsanreiz in den Zubau von flexiblen Kraftwerkskapazitäten, die eine bedarfsorientierte Stromproduktion ermöglichen. Die Voraussetzung zur Gewährung dieses Zuschlages sind in § 50a Abs. 1 S. 1 EEG 2023 geregelt. Danach muss es sich um solche Anlagen handeln

„zur Erzeugung von Strom aus Biogas mit einer installierten Leistung von mehr als 100 Kilowatt, deren anzulegender Wert gesetzlich bestimmt wird“

bzw.

„zur Erzeugung von Strom aus Biogas, deren anzulegender Wert durch Ausschreibungen ermittelt worden ist“.

Gemäß § 50a Abs. 1 S. 2 EEG 2023 verringert sich der Anspruch jedoch für solche Anlagenbetreiber, die für ihre Anlage bereits die Flexibilitätsprämie nach § 50b EEG 2023 Gesetzes in Anspruch genommen haben.

Betreiber von Kläranlagen sind bei Einhaltung der unter 1. bzw. 2. genannten Anforderungen anspruchsberechtigt bzgl. Flexibilitätsprämie/Flexibilitätszuschlag. Dies betrifft uneingeschränkt auch solche Kläranlagen, welche unmittelbar durch Kommunen oder sonstige Einheiten der öffentlichen Hand betrieben werden.

Vor- und Nachteile einer Ausgründung der Klärschlammbehandlung aus Sicht von Kommunen?

Ausgründung meint den Fall der Ausgliederung und Verselbstständigung eines Betriebsteils in eigener Rechtsform, z. B. einer GmbH oder AG. Für Kommunen kann es Sinn machen, die Klärschlammbehandlung auszugründen.

Bei der Entscheidungsfindung sind die folgenden Aspekte zu beachten:

- 1) Gemäß Merkblatt Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft, Version 7.1 vom 01.08.2024, werden Maßnahmen zur Prozesswärmebereitstellung aus hocheffizienten Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) zur Erzeugung/Bereit-

stellung von Wärme und elektrischer Energie durch Nutzung von fester pflanzlicher Biomasse, Sonnenstrahlung oder Geothermie basierend auf den o. g. Technologien bei Verzicht auf Förderung nach EEG und KWKG¹ gefördert.

Nicht antragsberechtigt sind ausdrücklich Kommunen und deren unselbständige Regie- und Eigenbetriebe. Kommunale Unternehmen in privater Rechtsform – also Ausgründungen (z. B. GmbH) - sind indes antragsberechtigt (vgl. S. 5 des Merkblatts).

Anmerkung: Ob dieser Verzicht und damit eine Ausgründung zum Erhalt der Förderungsberechtigung Sinn macht, kommt auf Folgendes an: Bei einer Förderung nach Art. 17 AGVO/Art. 41 AGVO liegt maximale Förderungshöhe bei 200.000 €, abhängig von der Unternehmensgröße und Förderungsanspruch (Siehe S.2 des Merkblatts Merkblatt Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft – Zuschuss). Beim Kraft-Wärme-Kopplung Gesetz errechnet sich der Preis gem. § 7 an die Menge der eingespeisten Strommenge. Ob sich ein Verzicht auf die Förderung gem. KWKG lohnt, richtet sich also an Größe und eingespeiste Strommenge, es ist eine Einzelfallbetrachtung notwendig.

- 2) Auch eine Vermarktung von Strom auf dem Day-Ahead-Markt ist Unternehmen im Sinne des Umsatzsteuergesetzes vorbehalten² (dazu unten mehr).
- 3) Während eine Ausgründung zudem Vorteile wie eine stärkere Fokussierung und ein vereinfachtes Management bieten kann, ist es wichtig, die rechtlichen Risiken im Auge zu behalten. Eine Ausgründung ist nur unter Beachtung der Anforderungen der jeweiligen Gemeindeordnung (GO) des Landes zulässig. Zudem ist in aller Regel ein Ratsbeschluss erforderlich und darüber hinaus wird das Verfahren auch durch die jeweils zuständige Kommunalaufsicht geprüft.

Was gilt es bei der Regelennergievermarktung zu berücksichtigen?

Regelennergie wird von den 4 Übertragungsnetzbetreibern zum Ausgleich von unvorhergesehenen Schwankungen in der Stromerzeugung bzw. der Energielast eingesetzt. Um dabei jederzeit über genügend Kapazität verfügen zu können, wird Regelleistung über eine Beschaffungsplattform ausgeschrieben und von qualifizierten Anbietern vorgehalten. Im Bedarfsfall wird die reservierte Regelennergie abgerufen.

Regelennergie muss sofort abrufbar sein. Deshalb wird deren Vorhaltung ausgeschrieben und bei Regelennergieanbietern, die dafür zugelassen (präqualifiziert) sind, vertraglich gebunden. Dieses Vorhalten von Regelennergie wird als Regelleistung bezeichnet. Erst, wenn die vorgehaltene Leistung tatsächlich benötigt wird, wird sie aktiviert und es kommt zum Stromfluss. Dieser Einsatz von Regelennergie wird als „Regelarbeit“ bezeichnet.

¹ https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/eew_merkblatt_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=9

² <https://www.eex.com/de/schulungen/eex-haendlerpruefung>

Gem. § 22 Abs. 2 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) haben die Betreiber von Übertragungsnetzen bei der Beschaffung von Regelenergie ein diskriminierungsfreies und transparentes Ausschreibungsverfahren anzuwenden, bei dem die Anforderungen, die die Anbieter von Regelenergie für die Teilnahme erfüllen müssen, soweit dies technisch möglich ist, von den Betreibern von Übertragungsnetzen zu vereinheitlichen sind. Für diese Ausschreibung haben sie eine gemeinsame Internetplattform einzurichten.

Voraussetzung für eine Beteiligung an Regelenergieausschreibungen und damit für eine Teilnahme am Regelenergiemarkt ist eine erfolgreiche Präqualifikation des Erzeugers.

Für Betreiber von Anlagen von dem Zuschnitt, wie sie in Kläranlagen üblicherweise zu finden sind, stellt die hohe Mindestleistung zwar grundsätzlich eine Herausforderung dar. Diese lässt sich durch den Beitritt zu einem virtuellen Kraftwerk indes überwinden.

Die ÜNB beschaffen notwendige Strommengen regelzonenübergreifend durch Ausschreibungsverfahren. Bei der Zurverfügungstellung durch die Anbieter der Leistung ist zu unterscheiden in

- Primärregelleistung (FCR)
- Sekundärregelleistung (aFRR) und
- Minutenreserveleistung (mFRR)

Wegen der üblicherweise auf Kläranlagen vorhandenen technischen Ausstattung zur Eigenstromerzeugung (positive Regelleistung) bzw. zuschaltbaren Verbraucher (negative Regelleistung) werden nachfolgend nur die real infrage kommenden Bedingungen betrachtet.

Kläranlagenbetreiber mit eigenen Erzeugungsanlagen können am Markt teilnehmen, wenn sie Bioenergie- oder Wasserkraftanlagen, Erd- bzw. Klärgas betriebene KWK-Anlagen oder Notstromaggregate betreiben. Der Marktzugang ist wegen der Mindestgröße der angebotenen Regelleistung nur mittels regelzoneninternen Poolens weiterer Betreiberanlagen über Stromhandelsunternehmen (Stromhändler) durch ein virtuelles Kraftwerk möglich. Die angebotenen Leistungen müssen ebenfalls regelzonenintern durch präqualifizierte Dritte besichert werden.

Zur Aktivierung der Leistungsreserven sind fernwirktechnische Einrichtungen vorzusehen, um einen automatisierten Austausch zwischen Anbietern und Stromhändler sicherzustellen. Diese werden durch den Stromhändler zur Verfügung gestellt bzw. deren technische Ausgestaltung vorgegeben.

Die Qualifikation der Marktteilnehmer beim jeweiligen Anschluss-ÜNB ist Bedingung für die Zulassung als Anbieter. Diese erfolgt mittels Präqualifikation (PQ) durch den ÜNB der entsprechenden Regelzone. Die Bedingungen sind unter <https://www.regelleistung.net/ext/> abrufbar.

Sofern eine Reserveeinheit für die Teilnahme am Regelenenergiemarkt qualifiziert wurde, muss diese für den Einsatz bereitstehen. Sofern die angemeldete Einheit nicht nutzbar ist – außer bei technischem Versagen – muss der Betreiber mit entsprechender Sanktion rechnen.

Die gemeldete Anlage darf nicht für „eigene“ Zwecke zur Stromerzeugung belegt sein, da sie dann nicht dem Markt zur Verfügung steht.

Die Bereitstellung der Einheit verpflichtet zum Betrieb nach Aufforderung in einem vorgegebenen Zeitfenster und für die angeforderte Periode. Nicht alle Erzeuger sind für den schnellen Anlauf und den kurzfristigen Betrieb gleichermaßen geeignet. Dieser Umstand muss unbedingt vor der Anmeldung bedacht werden.

Was gilt es bei der Vermarktung von Strom auf dem Day-Ahead-Markt zu beachten?

Bei dem Day-Ahead-Handel wird der Strompreis für jede Stunde des folgenden Tages anhand von Angebot und Nachfrage bestimmt. Der Handel findet täglich am Spotmarkt der European Power Exchange (EPEX) in Paris, an der EXAA in Wien oder außerhalb der Börse im Over-the-Counter-Handel statt. Stromanbieter geben Gebote für Stromlieferungen für den folgenden Tag ab, welche von Stromhändlern gekauft werden.

In Deutschland müssen Gebote bis spätestens 12 Uhr des Vortages abgegeben werden. Anschließend bestimmt die Börse den Marktpreis anhand der abgegebenen Gebote und veröffentlicht die Ergebnisse der entsprechenden Zuschläge um 12:40 Uhr. Ab 15 Uhr können Gebote für den Folgetag abgegeben werden. Die gehandelten Strommengen dürfen 0,1 MWh nicht unterschreiten. Der Preisrahmen liegt zwischen -500 Euro/MWh und 3.000 Euro/MWh. Bei Blockangeboten dürfen Teilnehmer täglich maximal 100 Blöcke zu je maximal 400 MW handeln. Ein Tätigwerden ist nur nach dem Zulassungsverfahren des EEX möglich.

Sie wird nur Unternehmen im Sinne des Umsatzsteuergesetzes angeboten³. Auch dies spricht für eine Ausgründung im o. g. Sinne.

Festlegung von Bilanzkreisen

Unter Bilanzkreisen versteht man ein virtuelles Energiemengenkonto, das dem Ordnen des Strom- und Gasmarktes dient.

Der Zweck der Bilanzkreise liegt darin, eine beliebige Anzahl von Energieeinspeisungen und -ausspeisungen auszugleichen und so die Über- und Unterproduktion zu verhindern und Energie effizient nutzbar zu machen. Dies führt zu einer zusätzlichen Abwicklung von Handelsgeschäften. Vor diesem Hintergrund ist es ratsam, sich in Bilanzkreisen zusammenzuschließen.

³ <https://www.eex.com/de/schulungen/eex-haendlerpruefung>

Der organisatorische Aufwand liegt vorrangig Bilanzkreisverantwortlichen (z. B. Energieversorger oder Energiehändler), der den Bilanzkreis bewirtschaftet.

Beim Strom gibt es in Deutschland die vier Übertragungsnetzbetreiber TenneT, 50Hertz, Amprion und TransnetBW, welche die Bilanzkreise in ihrem jeweiligen Zuständigkeitsgebiet verwalten und die Tätigkeiten der Bilanzkreisverantwortlichen kontrolliert.

Beim Gas nehmen diese Rolle die Marktgebietsverantwortlichen Gaspool und NetConnect wahr.

PV-Anlage auf Kläranlagengrundstück

Im Zusammenhang mit der EU-seitig geforderten Energieautarkie kann auch die Errichtung einer PV-Anlage auf dem Kläranlagengebiet interessant sein. Eine solche Anlage ist i. Ü. als Nebenanlage gem. den Bauordnungen der Bundesländer (z. B. §65 der Landesbauordnung NRW) genehmigungsfrei. Dies fördert die Einspeisung und Energiegewinnung, indem die PV-Anlage die Stromnutzung der Kläranlage reduzieren bzw. unterstützen kann.⁴

Was gilt es bei der Nutzung der Wärme zu beachten (Stichpunkt KWK-Förderung)?

Die Förderung im Rahmen der Kraft-Wärme-Kopplung ist im KWKG 2023 normiert. Danach wird **KWK-Strom** gefördert. Dies meint nach § 2 Nr. 16 KWKG 2023

*„das rechnerische **Produkt aus Nutzwärme und Stromkennzahl der KWK-Anlage**; bei Anlagen, die nicht über Vorrichtungen zur Abwärmeabfuhr verfügen, ist die gesamte Nettostromerzeugung KWK-Strom“.*

Unter einer **KWK-Anlage** versteht man wiederum gemäß § 2 Nr. 14 KWKG 2023

*„Anlagen, in denen **Strom und Nutzwärme erzeugt** werden; mehrere KWK-Anlagen an einem Standort gelten in Bezug auf die in den §§ 4 bis 8 genannten Leistungsgrenzen für den jeweils zuletzt in Betrieb genommenen Generator als eine KWK-Anlage, soweit sie innerhalb von zwölf aufeinanderfolgenden Kalendermonaten in Dauerbetrieb genommen worden sind; zu KWK-Anlagen gehören:*

- a) Feuerungsanlagen mit Dampfturbinen-Anlagen, beispielsweise Gegendruckanlagen, Entnahme- oder Anzapfkondensationsanlagen,*
- b) Feuerungsanlagen mit Dampfmotoren,*
- c) Gasturbinen-Anlagen mit Abhitzeessel,*
- d) Gasturbinen-Anlagen mit Abhitzeessel und Dampfturbinen-Anlage,*
- e) Verbrennungsmotoren-Anlagen,*
- f) Stirling-Motoren,*
- g) Organic-Rankine-Cycle-Anlagen und*

⁴ <https://www.erdgas-suedwest.de/natuerlichzukunft/photovoltaikanlage-klaerwerk-schemmerhofen/>

h) Brennstoffzellen-Anlagen“.

Das Gesetz unterscheidet nun zwischen zwei Arten von Förderungen. Das Projekt müsste daher die nachfolgenden Voraussetzungen erfüllen, um eine Förderung nach dem KWKG 2023 zu erhalten.

Gemäß §§ 6 Abs. 1 S. 1, 7 KWKG 2023 haben Betreiber von neuen, modernisierten oder nachgerüsteten KWK-Anlagen gegenüber dem Netzbetreiber, mit dessen Netz ihre KWK-Anlage unmittelbar oder mittelbar verbunden ist, einen Anspruch auf Zahlung eines Zuschlags für KWK-Strom. Dies ist der Fall, wenn

„1. die Anlagen

a) bis zum 31. Dezember 2026 in Dauerbetrieb genommen worden sind,

b) über einen in einem Zuschlagsverfahren nach § 11 der KWK-Ausschreibungsverordnung erteilten Zuschlag verfügen, der nicht nach § 16 der KWK-Ausschreibungsverordnung entwertet wurde, oder

c) nach dem 31. Dezember 2026, aber vor dem 1. Januar 2030 in Dauerbetrieb genommen worden sind,

2. die Anlagen Strom auf Basis von Abfall, Abwärme, Biomasse, gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen gewinnen,

3. die Anlagen hocheffizient sind,

4. die Anlagen keine bestehende Fernwärmeversorgung aus KWK-Anlagen verdrängen,

5. die Anlagen, die Anforderungen nach § 9 Absatz 1, 1a oder 2 des Erneuerbare-Energien-Gesetzes erfüllen,

6. im Fall von neuen KWK-Anlagen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 10 Megawatt, die Strom auf Basis von gasförmigen Brennstoffen gewinnen und die nach dem 30. Juni 2023 nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigt worden sind, die Anlagen ab dem 1. Januar 2028 mit höchstens 10 Prozent der Kosten, die eine mögliche Neuerrichtung einer KWK-Anlage mit gleicher Leistung nach dem aktuellen Stand der Technik betragen würde, so umgestellt werden können, dass sie ihren Strom ausschließlich auf Basis von Wasserstoff gewinnen können, und

7. eine Zulassung von dem Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle erteilt wurde.“

Neben diesem Zuschlag ist in § 7a KWKG 2023 ein Bonus für innovative erneuerbare Wärme geregelt. Dort heißt es in Abs. 1

„Der Zuschlag für KWK-Strom nach § 7 Absatz 1 oder nach § 8a in Verbindung mit der KWK-Ausschreibungsverordnung erhöht sich ab dem 1. Januar 2020 pro Kalenderjahr für KWK-Anlagen in innovativen KWK-Systemen mit einer elektrischen Leistung von mehr als 10 Megawatt abhängig von dem Anteil innovativer erneuerbarer Wärme an der Referenz-

wärme, die die Komponente zur Bereitstellung innovativer erneuerbarer Wärme des innovativen KWK-Systems in einem Kalenderjahr in das Wärmenetz einspeist, in das auch die KWK-Anlage die erzeugte Nutzwärme einspeist oder in ein hiermit über einen Wärmetauscher oder sonst hydraulisch verbundenes, weiteres Wärmenetz oder Teilnetz. Besteht kein unmittelbarer oder mittelbarer Anschluss des innovativen KWK-Systems an ein Wärmenetz im Sinn des Satzes 1, ist eine anderweitige Wärmebereitstellung der innovativen erneuerbaren Wärme für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Kälteerzeugung oder Prozesswärme der Einspeisung in ein Wärmenetz im Sinn des Satzes 1 gleichzustellen.“

Aus dem Merkblatt für innovative KWK-Systeme unter Punkt 2.1.2 Komponente zur Bereitstellung innovativer erneuerbarer Wärme (§ 24 Absatz 1 Nummer 2 KWKAusV), geht hervor, dass Erneuerbare Wärme die Nutzung natürlicher Wärmequellen (Luft, Erdreich, Grundwasser, Solarstrahlung) voraussetzt. Abwärme erfüllt diese Anforderung nicht.⁵

⁵ https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/kwk_anlagen_mb_innovative_kwk-systeme.pdf?__blob=publicationFile&v=2

1.5 AP 6 - Akzeptanz einer energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen

Die Frage nach der „gesellschaftlichen Akzeptanz einer energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen“ erwies sich im Projektverlauf als spannender Einstieg in eine Vielzahl von umwelt- und wirtschaftsethischen Grundsatzfragen. Sie führte von der Erkenntnis, dass Bedenken und Vorbehalte *gegen* die geplante Flexibilisierung nur recht diffus ausgeprägt und verhältnismäßig leicht auszuräumen sind, zu der Einsicht, dass es an den relevanten Stellen im öffentlichen Meinungsbildungsprozess vor allem an positiven Leitbildern *für* eine flexiblere Nutzung der vorhandenen Potentiale mangelt.

Aus diesem Grund beinhaltete AP 6 im Projektverlauf zwei eng miteinander verwobene Arbeitsstränge: (1.) Fokussierte **Stakeholder-Dialoge** und eine auf die interessierte (Fach-) Öffentlichkeit ausgerichtete **Wissenschaftskommunikation**, um zunächst möglichst viele potenziell betroffene gesellschaftlichen Gruppen zu identifizieren, gemeinsame und gegenläufige Interessen zu verstehen und deren verschiedene Perspektiven und Anfragen in das Gesamtprojekt miteinzubringen. Zudem sollten allgemeinverständliche Artikel und Onlinebeiträge einen Beitrag dazu leisten, dass die Einsichten und Empfehlungen des Forschungsprojekts weitere Verbreitung finden und die gesellschaftliche Akzeptanz der Flexibilisierungsmaßnahmen langfristig weiter gesteigert wird. Dies erfolgte in enger Verzahnung mit Arbeitsstrang (2.): Die **umwelt- und wirtschaftsethische Verortung** der geäußerten Motive und Erwartungen, um tieferliegende Gemeinsamkeiten zu identifizieren und ein mögliches gemeinsames positives Leitbild zu entwickeln. Da die ethische Einordnung auch die Struktur der Stakeholder-Dialog erklärt und einige der dortigen Ergebnisse vorwegnimmt, wird sie im Folgenden vorgezogen.

1.5.1 Umweltethische Einordnung

Am Beispiel der geplanten Flexibilisierung von Kläranlagen zeigen sich einige Grundprobleme, aber auch Entwicklungspotentiale der zeitgenössischen Umweltethik. Als „Bereichsethik“ wird sie (wie beispielsweise die Medien- und die Medizinethik) zur „Praktischen Philosophie“ gerechnet und bedient sich vieler „Werkzeuge“ unterschiedlicher philosophischer Denkschulen und Traditionen. Häufig gehen ethische Reflexionen von einem konkreten Interessenskonflikt aus und fragen, welche Bewertungsmaßstäbe herangezogen werden können, um übergeordnete Ziele (wie den Schutz der Natur) und damit verbundene Handlungen (wie die Allokation, also die angemessene Verteilung, einer begrenzten Ressource) zu rechtfertigen und untereinander zu vergleichen. Die am häufigsten verhandelte Ressource ist Geld – welches aber oft nur als vordergründiges Tausch- und Vergleichsmittel herangezogen wird, hinter dem tiefergehende Fragen nach einer „gerechten“ oder zumindest „zielführenden“ Verteilung von Macht und Mitbestimmungsmöglichkeiten liegen.

In der klassischen Umweltethik lassen sich „vereinfacht drei Grundrichtungen ethischer Reflexion unterscheiden“ (Reder et al. 2019, S. 12). Im öffentlichen Meinungsbildungsprozess

werden diese allerdings kaum noch trennscharf voneinander unterschieden und häufig ergänzend verwendet – weshalb alle drei Argumentationsmuster herangezogen wurden, um die Diskussion über Flexibilisierungsziele und -optionen zu bereichern: (1.) *Eudaimonistische Ansätze*, die in aristotelischer Tradition nach den Voraussetzungen für ein „gelingendes Leben“ (griechisch „Eudaimonia“: „Glück, Erfüllung“ – wozu aber auch ein „gesundes Maß“ gehört) fragen. Dr. Thomas Steinforth nutzte zu Projektbeginn diese klassischen Argumentationsmuster, um in mehreren wissenschaftlichen Blogbeiträgen zu fragen, welchen Beitrag Kläranlagen zu einem „guten Leben“ von Individuum und Gesellschaft leisten können. Eudaimonistische Ansätze gehen in alter tugendethischer Tradition davon aus, dass einsichtige Bürgerinnen und Bürger die notwendigen Einschränkungen freiwillig auf sich nehmen (bzw. diese mit entsprechenden Regeln gemeinsam implementieren), wenn sie begreifen, dass beispielsweise eine bessere Ressourcenverwertung in Kläranlagen zu einem harmonischen, ausgeglichenen Lebensstil „dazugehört“ - selbst wenn das Individuum von dieser freiwilligen Selbstbeschränkung in materieller Hinsicht nicht unmittelbar profitiert.

Die Diskussionen im Workshop „Kläranlage der Zukunft“, die im Rahmen von AP 6 angestoßen wurden, beruhten zunächst auf diesem klassischen Ansatz, eine gemeinsame, motivierende Zukunftsvision vom „gutem Leben“ an den Beginn schwieriger Detailverhandlungen zu stellen. Sehr bald dominierten im Workshop allerdings Argumentationsmuster des zweiten Typs ethischer Reflexionen: (2.) *Konsequentialistische Ansätze* fragen nach den Folgen von Handlungen – diese sind (etwas vereinfacht gesagt) „gut“, wenn sie zur Steigerung eines vorher definierten „Guten“ beitragen. Die bekannteste Form des Konsequentialismus ist der Utilitarismus, der vor allem danach fragt, ob Handlungen dazu beitragen, den „Gesamtnutzen“ aller Betroffenen zu steigern. Nach dieser Logik wäre es beispielsweise ethisch zulässig, wenn Kläranlagen *etwas weniger* Aufwand betreiben, die Abwasserreinigung zu perfektionieren, wenn sie dafür einen *deutlich höheren* Beitrag zur Energiewende oder zur Rückgewinnung von Phosphor leisten können. Dies führt unmittelbar zur Frage, ob die entsprechenden Marktpreise (insb. für die Entnahme bzw. Einspeisung von Strom) so gestaltet sind, dass sie breitgefächerte Anreize bieten, einen möglichst „gemeinwohldienlichen Ressourceneinsatz“ anzustreben. Fast alle Gesprächspartner, die im Rahmen von FLXsynErgy befragt wurden, beklagten an verschiedenen Stellen „unattraktive Preise“, bzw. die schwer vorhersehbaren Auswirkungen staatlicher Regulierungsmaßnahmen auf ihre Kostenprognosen und wünschten sich ein gemeinwohldienlicheres, übersichtlicheres Kostenregime.

Einige Kritiker, die (zugespitzt formuliert) dem eudaimonistischen Ansatz vorwerfen, zu sehr auf die Tugendhaftigkeit des einzelnen Menschen zu vertrauen und dem Utilitarismus entgegen, dass der „der Markt nicht alles regeln kann und darf“ setzen auf (3.) *Deontologische Ansätze* (griechisch „deon“ für „Pflicht“). In der Tradition Immanuel Kants vertrauen sie auf die logische und (damit moralische) Einsichtsfähigkeit des Menschen und fragen, welche offensichtlichen „Rechte und Pflichten Menschen sich selbst und anderen gegenüber ha-

ben“ (Reder et al. 2019, S. 13). Die Frage nach dem „ethisch korrekten“ Umgang mit Lebensmitteln wird häufig auch in deontologischer Weise diskutiert – wobei hier auch religiöse und kulturelle Traditionen und Wertvorstellungen eine immer noch prägende Rolle spielen.

Von beinahe allen Gesprächspartner in AP 6 wurde die „energetische Verwertung von Lebensmittelresten“ zunächst als „wichtiger Beitrag zum Ressourcenschutz“ begrüßt. Kam aber die Frage hinzu, wie eine „Gewinnerzielung durch diese Verwertungsmöglichkeiten“ zu beurteilen ist, so zeigte sich – je nach persönlicher Erfahrung und kultureller Prägung der Gesprächspartner – ein differenzierteres Bild: Dies reichte von „richtig, da effizienzsteigernd“ über „hilfreich, aber leicht zu Fehlanreizen führend“ bis hin zu „verwerflicher Kommerzialisierung“. Interessanterweise vertrauten viele deutschsprachige Diskussionspartner (auch aus kirchlichen Kreisen, wie sich bei den Veranstaltungen der Domberg-Akademie zeigte) stärker darauf, mit marktwirtschaftlichen Anreizen zur bestmöglichen Ressourceneffizienz beizutragen, während die von spanischsprachigen Wissenschaftlerinnen und Aktivistinnen dominierten Diskurse (insb. bei der Mitarbeit an der Broschüre „Wasting Food“) viel stärker die grundlegende moralische Pflicht betonten, den Ressourcenverbrauch (und den dahinter liegenden Flächenverbrauch) insgesamt zu reduzieren.

Eine zentrale Erkenntnis von AP 6 ist, dass diese verschiedenen (und durchaus bewährten) Reflexionsmuster und -traditionen unterschiedlicher Stakeholder den gesellschaftlichen Meinungsbildungsprozess über Flexibilisierungschancen von Kläranlagen deutlich erschweren können, wenn sie mit dem Anspruch auf Alleingültigkeit vorgetragen werden. Werden sie aber in wertschätzender Weise nebeneinandergestellt und auf das Ziel einer „**gemeinwohlorientierten Flexibilisierung**“ hin geordnet, unterstützen und ergänzen sich die unterschiedlichen Bewertungs- und Reflexionsmuster gegenseitig. Als besonders hilfreich erwies sich dafür die Einbindung in drei Lehrveranstaltungsreihen zur Umwelt- und Ressourcenethik an der Hochschule für Philosophie und in die Arbeit der „Sachverständigengruppe Weltwirtschaft und Sozialethik“: Bei der dort geleisteten Diskursarbeit zeigte sich, dass die **Betonung des Gemeinwohls** (und die eng damit verbundene Überzeugung, dass **lebenswichtige Ressourcen „Gemeingüter“** sind, die zum gemeinsamen Wohl gepflegt und genutzt werden müssen), gut geeignet ist, um schwerwiegende Interessenskonflikte konsensorientiert zu erörtern.

Es ist wichtig zu verstehen, dass „Ressourcenethik“ meist dann ins Spiel kommt, wenn eine bislang ausreichende vorhandene Ressource knapp wird und die traditionellen Nutzungs- und Verteilungsregeln neu ausgehandelt werden müssen. Ein klassisches Beispiel ist das „Gemeingut Wasser“, für das die Gesellschaft keine unbeschränkten Eigentums-, dafür aber spezifische Nutzungsrechte vergibt. Im 19. und 20. Jahrhundert entstanden zunächst kommunale Wasserwerke und dann Kläranlagen als gemeinwohldienliche Institutionen. Sie werden begleitet von einem staatlichen Regelwerk, welches einen Ordnungsrahmen (mit entsprechenden Ober- und Untergrenzen, beispielsweise für Wassermengen und -qualität) setzt. Innerhalb dieses staatlich vorgegebenen Rahmens kommt es seitdem zu regional unterschiedlichen Preisbildungen – wobei genaugenommen nicht das Gemeingut Wasser

käuflich erworben wird, sondern anhand der dabei genutzten Wassermenge eine Dienstleistung abgerechnet wird. Die Institution Kläranlage, die sie betreffenden Regelwerke und Preismechanismen sind historisch bedingt fast ausschließlich auf den Erhalt des Gemeinguts Wasser ausgerichtet – während die „Kläranlage der Zukunft“ auf deutlich mehr Gemeingüter ausgerichtet sein wird.

Um mit den vielen damit einhergehenden komplexen Interessenskonflikten zurechtzukommen zu können, empfiehlt sich, ausgehend von der Erfahrungen in AP 6, das folgende **gemeinwohlorientierte, multiperspektivische Diskussionsmuster** (vgl. **Abbildung 66**): Nutzungskonflikte rund um Gemeingüter können in modernen Gesellschaften dann konsensorientiert gelöst werden, wenn sie gemeinwohlorientiert und unter Beachtung von vier verschiedenen (aber eng miteinander verflochtenen) Perspektiven möglichst transparent diskutiert werden. Im Gespräch mit verschiedenen Interessensgruppen empfiehlt es sich, zunächst anhand des Gemeinguts „Wasser“ die Bedeutung dieser vier Perspektiven zu erläutern und dann in derselben Betrachtungsweise weitere Gemeingüter (und die damit verbundenen Interessensgruppen und Regelwerke) mit in den Blick zu nehmen – eine Mehrdimensionalität, die hier in der Grafik durch die hintereinander gelagerten Kästchen angedeutet wird.

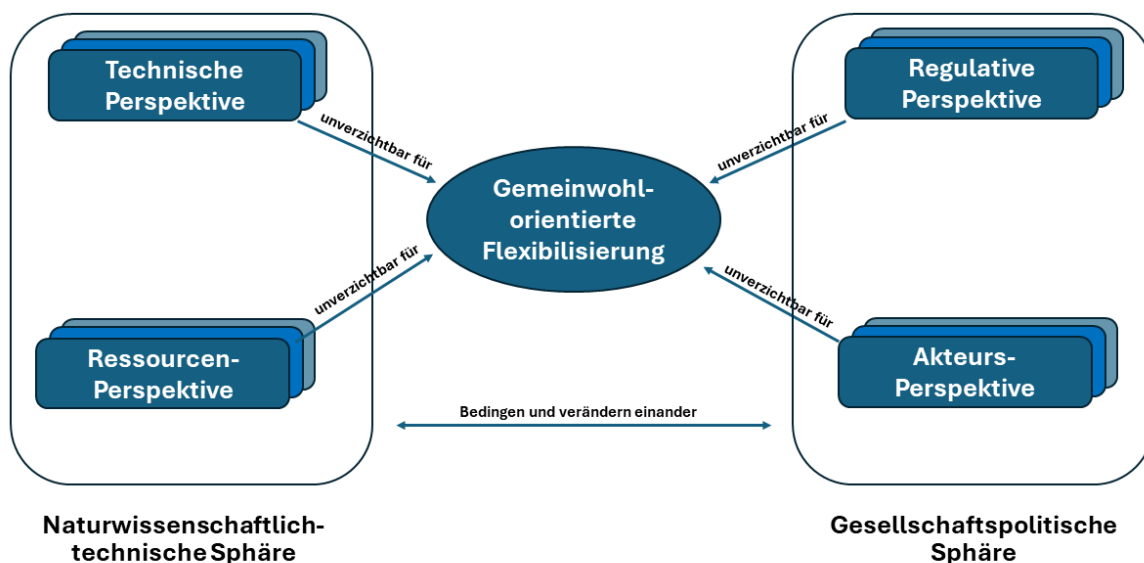


Abbildung 66: Gemeinwohlorientierte, multiperspektivische Diskussionsmuster zur lösungsorientierten Einbindung möglichst vieler Stakeholderinteressen

Gemeinwohlorientierte Diskussionen werden also ermöglicht durch die Beachtung der folgenden vier Perspektiven:

(1). Die Akteurs-Perspektive. Diese umfasst insbesondere die Fragen: Wer sind die betroffenen Gruppen, welche spezifischen Interessen haben sie, wie sind diese begründet? Gemeinwohlorientierte Lösungen zeichnen sich dadurch aus, dass möglichst alle betroffenen Akteure frühzeitig in die Diskurse eingebunden werden.

(2.) Diese Akteure besitzen entscheidende Ressourcen – allein oder gemeinsam, meist allerdings in ungleicher Verteilung. Hier ist vor allem zu fragen: welche dieser Ressourcen werden wozu (und vom wem) benötigt? Ist diese Verteilung gemeinwohldienlich oder wären andere Verteilungsmuster wünschenswert?

(3.) Dies berührt die Regulative Perspektive: Diese bestimmt – ausgehend von den Wünschen derjenigen Akteure, die die Regeln setzen – wie Ressourcen aktuell und künftig verteilt werden. Es ist davon auszugehen, dass der gleichmäßige (und transparente) Einfluss *aller* Akteursgruppen am besten dazu beiträgt, gemeinwohldienliche Regeln zu implementieren.

(4.) Die Regulierung orientiert sich notwendigerweise immer auch an der technischen Perspektive: Was ist technisch aktuell machbar? Und was ist (mit entsprechendem Ressourceneinsatz) künftig möglich? Oft ist der materielle und zeitliche Handlungs- und Planungshorizont der betroffenen Akteure entscheidend dafür, welche technische Lösung als „erstrebenswert“ oder „ideal“ angesehen wird.

All diese Perspektiven müssen beachtet werden und sollten – allein schon, um die damit verbundenen Diskussionen zu vereinfachen – auf das Ziel einer Steigerung des Gemeinwohls ausgerichtet werden. Denn gemeinwohlorientierte Diskussionen gewinnen nicht an Komplexität, indem sie derart viele Perspektiven einnehmen, sondern ermöglichen konsensorientierte Lösungen, indem sie die vorhandene Komplexität wahrnehmen und auf ein gemeinsames Ziel hin ordnen.

Bei der Flexibilisierung von Kläranlagen kommt nun eine weitere Herausforderung hinzu – und sie erklärt, warum ethische Diskussionen aktuell soviel komplexer sind als früher: *Bislang* war der regulative Rahmen von Kläranlagen (und vieler anderer Institutionen) auf den gemeinwohlorientierten Umgang mit einem *einzelnen* (oder nur wenigen) Gemeingütern ausgelegt – doch im 21. Jahrhundert wird zunehmend klar, dass *wesentlich mehr Güter* als Gemeingüter begriffen und geschützt werden müssen: Dies betrifft nicht nur den Wasserkreislauf, sondern auch die Ressourcenkreisläufe von Kohlenstoff und Phosphor und den fruchtbaren Boden, der mit allen dreien untrennbar verbunden ist – all diese sind gleichermaßen als „Gemeingüter“ zu verstehen und zu schützen. In der obenstehenden Grafik sind mehrere hintereinanderliegende Kästchen skizziert, um anzudeuten: Die Ressourcenperspektive umfasst viel mehr Ebenen, als dies bislang der Fall war: die lebensnotwendigen Stoffkreisläufe (insb. von Wasser, Kohlenstoff und Phosphor), ebenso wie die damit vorhandenen Energieströme (in Form von Biogas, Elektrizität, Wärme). Dies führt dazu, dass bei ethischen Reflexionen viel mehr Regelwerke als früher mitzubedenken sind: Umwelt- und Abfallrecht, Energierecht, Europarecht, globale Handelsverträge, etc... – wobei sich auch der Kreis der betroffenen Akteure und Technologien erweitert.

Eine derartige gemeinwohlorientierte und multiperspektivische Betrachtungsweise kann als **Gesprächsleitfaden für Akteurs-Dialoge** dienen, in denen etablierte fachspezifische Bewertungsmuster wie „Ökobilanzen“ oder „multikriterielle Bewertungen“ (vgl. ESITI, 2017, S.

42ff) genauso ihren Platz finden wie die Frage „Welche staatlichen Regulierungen und welche technischen Innovationen wären wünschenswert, um zu einer gemeinwohleffizienteren Nutzung der vorhandenen Ressourcen beitragen?“ – Fragen, die im Rahmen von AP 6 aufgeworfen wurden, aber weit über den Horizont dieses Forschungsprojektes hinausweisen.

1.5.2 Handlungsempfehlungen aus den Stakeholder- und Fachdialogen: Aufgaben für die Projekt- und Wissenschaftskommunikation

Die vorangegangene umweltethische Einordnung sollte dazu beitragen, einen angemessenen Dialograhmen zu schaffen, in dem möglichst alle betroffenen Stakeholder-Gruppen konsens- und lösungsorientiert über konkrete Fragen der Flexibilisierung diskutieren können. Im Rahmen von AP 6 wurden die gesellschaftliche Akzeptanz einer energetischen Nutzung von Rest- und Abfallstoffen in den folgenden Formaten umwelt- und sozialetisch erörtert:

(1.) Projektspezifische Stakeholder-Dialoge und Expertengespräche:

Als erster Schritt wurde eine interne Standortbestimmung mithilfe von fragebogengestützten Einzelinterviews mit den Projektpartnern und ausgewählten assoziierten Partnern vorgenommen. Eine begleitende Literaturrecherche bekräftigte den hierbei gewonnenen Eindruck, dass sich Kommunen und Kläranlagenbetreiber regional unterschiedlichen, aber tendenziell ansteigenden gesellschaftlichen Erwartungen ausgesetzt sehen, möglichst kostengünstig einen wachsenden Beitrag zu mehr Klimaschutz, einer gelingenden Energiewende und mehr Ressourceneffizienz zu leisten. Ein gesamtgesellschaftlicher oder auch nur interdisziplinärer Konsens über anzulegende Wert- und Priorisierungsmaßstäbe war dabei nicht zu erkennen. Als Reaktion darauf wurde der Fokus von AP 6 zunächst auf die Wissenschaftskommunikation (siehe Punkt 3) gelegt, um eine höhere Sichtbarkeit in der interessierten (Fach-)Öffentlichkeit und damit weitere Gesprächspartner zu gewinnen. Die dabei gewonnenen Zwischenergebnisse wurden am 12. Januar 2022 im Projektworkshop „Flexibilisierung von Biogas/Faulgasanlagen – Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden“ vertieft und in der mit der Münchner Domberg-Akademie am 22. April 2022 durchgeführten Abendveranstaltung „Klärschlamm – Grüne Energie aus dem Faulturm“ einem erweiterten Publikum vorgestellt. Am 10. November 2022 folgte der halbtägige Online-Workshop „Wieviel Zukunft steckt im Abfluss? Umweltethische Anfragen an die `Kläranlage der Zukunft`“ mit Impulsreferaten zu den Themengebieten „Kläranlagen und die Landwirtschaft“, „Ein Beitrag zur Energiewende? Nachhaltigkeit auf dem Energie- und Strommarkt“ sowie „Öffentliche und politische Meinungsbildung zu umweltethischen Fragen“. Mit diesem Workshop wurde die Identifikation der maßgeblichen Stakeholder-Gruppen abgeschlossen und die neue Leitfrage eröffnet: „Was muss, bezogen auf einzelne Stakeholder-Gruppen passieren, damit diese mit der angestrebten Flexibilisierung und breiteren Nutzung organischer Rest- und Abfallstoffe einverstanden sind?“. Die dabei gewonnenen Einsichten wurden im Folgenden verstärkt in die zwei weiteren Diskussionsformate eingebracht:

(2.) Integration in weitere Lehr- und Forschungsprojekte

der Hochschule für Philosophie:

Die Projektverantwortlichen für AP 6, Prof. Dr. Johannes Wallacher und Dr. Stefan Einsiedel waren auch hauptverantwortlich für die am 6. Dezember 2022 in Berlin stattgefundenen Expertenanhörung „Gerechte Ressourcenverteilung im Hinblick auf Ernährungssicherheit angesichts des Klimawandels“. Dies war der Startpunkt für die Arbeit am Sachverständigen Gutachten „Ernährungssicherheit, Klimaschutz und Biodiversität: Ethische Perspektiven für die globale Landnutzung“ (Sachverständigen Gruppe Weltwirtschaft und Sozialethik 2024), das am 11. September 2024 veröffentlicht wurde und zentrale Anliegen und Einsichten aus FLXsynErgy in den weiteren Kontext einer globalen Landnutzungswende stellte. Durch die enge thematische Verzahnung wurde deutlich, dass eine flexiblere Ressourcennutzung in Kläranlagen einen signifikanten Beitrag zum Gelingen der „sozial-ökologischen Transformation“ leisten kann und dieses auf breite gesellschaftliche Zustimmung stoßende Leitbild konsequenter kommuniziert werden sollte; auch die Forderung, behördliche Zuständigkeiten für unterschiedliche Ressourcen flexibler und nutzerfreundlicher aufeinander abzustimmen (Sachverständigen Gruppe Weltwirtschaft und Sozialethik 2024, S. 54) wurde durch die thematische Verzahnung der beiden Forschungsprojekte in eine breitere Öffentlichkeit gebracht.

Da sich bei den anfänglichen Literaturrecherchen einige „blinde Flecken“ der Wirtschafts- und Umweltethik in Bezug auf die Bedeutung von Kläranlagen zeigten (die zwischen 1999 und 2009 vereinzelt publizierte sozialetischen Reflexionen über Biogasanlagen waren für FLXsynErgy wenig relevant), wurden die Zwischenergebnisse aus FLXsynErgy in die folgenden Lehrveranstaltungen integriert und intensiv mit Studierenden diskutiert: Vorlesungsreihe „Ethik des Ressourcenmanagements“ (Prof. Wallacher, Sommersemester 2023), Seminar „How socio-ecological transformation can succeed“ (Dr. Einsiedel, am schwedischen Newman-Institut in Uppsala, Januar bis März 2023), Seminar „Grundtexte der Umwelt- und Ressourcenethik im Licht aktueller Krisen“ (Dr. Einsiedel, Wintersemester 2023/24), „Multilogues for the socio-ecological transformation“ (Dr. Einsiedel im Oktober 2023 gemeinsam mit der slowakischen Trnava-Universität, dem Newman-Institut in Uppsala und der Leuphana-Universität Lüneburg) sowie „Brennpunkte der Nachhaltigkeit“ (Prof. Wallacher, Sommersemester 2024, inkl. Gastvortrag von Prof. Schaum).

Das am 25. Januar 2024 mit einem Vortrag von Dr. Einsiedel gestartete europäische Netzwerk „Food Systems“, das aus dem vom Jesuiten-Orden getragenen Netzwerk HEST („Higher Education for Social Transformation“) hervorgegangen ist, könnte künftig auch dazu beitragen, Anregungen des FLXSynErgy-Projektes verstärkt in die politische Kommunikation einfließen zu lassen. Bisher ist aus diesem Netzwerk allerdings erst die eher populärwissenschaftliche Publikation „Wasting Food“ (CJ Booklets Nr. 184, 2022) hervorgegangen. Dieses lässt sich auch dem dritten Diskussionsformat zuordnen:

(3.) Projektbegleitende Wissenschaftskommunikation

Zu Beginn der Arbeit an AP 6 standen die Projektverantwortlichen vor der Herausforderung, genug „Reichweite“ zu schaffen – dies sollte einerseits dazu dienen, engagierte Akteure im deutschsprachigen Raum auf das aktuelle Forschungsprojekt aufmerksam zu machen und weitere Gesprächspartner mit umweltethischem Interesse zu finden. Gleichzeitig sollte eine geeignete Plattform entstehen, um nach Projektende die zentralen Einsichten und Empfehlungen an eine größere (Fach-)Öffentlichkeit zu tragen. Nach dem ersten Erfolg des Blogartikels *„Philosophie und Klärschlamm“* (Dr. Thomas Steinforth am 18. Mai 2021), der im Magazin *„Kontrapunkte“* monatlich rund 3.000 Lesern erreichte, folgten die Beiträge *„Verwerten statt verschwenden: Lebensmittel als Energiequelle?“* (Dr. Einsiedel im Blog *„Sinn und Gesellschaft“* mit ähnlich großer Reichweite am 27.09.2021) und *„Fäulnis“* (abermals Dr. Steinforth im Blog *„Kontrapunkte“* am 8.10.2021) sowie *„Ethische Anfragen an den Topos einer sozial-ökologischen Transformation“* (Dr. Steinforth in *Ethikjournal* 1/2021).

Ermutigt durch die positiven Rückmeldungen von Lesern und Fachkollegen (die allerdings den Eindruck bestätigten, dass die energetische Verwertung von Rest- und Abfallstoffen in Kläranlagen kaum auf ethische Bedenken, allerdings auch nicht auf aktive Zustimmung der interessierten Öffentlichkeit stößt), kam es zu einer Intensivierung der Wissenschaftskommunikation: Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt wurde 2021 die *„Digitale Dialogplattform zur sozial-ökologischen Transformation“* (DigiLog) etabliert. Unter der Adresse www.digilog.org verbreitete DigLog (neben vier weiteren Projekten) bis Juni 2024 auch niederschwellige Informations- und Diskussionsangebote über die energetische Verwendung von Rest- und Abfallstoffen in Kläranlagen. Anfang 2024 folgte ein Re-Launch der Seite – dabei wurden zwar die bisherigen User-Kommentare gelöscht, aber zugleich der Grundstein für die langfristige Weiterführung der Plattform gelegt. Die Projektseite <https://www.digilog-transformation.com/flxsynergy> soll auch nach Abschluss der Projektlaufzeit gepflegt und ausgebaut werden.

Aus diesen Stakeholder-Diskussionen und den Erfahrungen der projektbezogenen Wissenschaftskommunikation ergeben sich auf dem Projekt FLXsynErgy eine Reihe von weiterführenden umweltethischen Fragen und Einsichten. Es ist zu empfehlen, in öffentlichen Diskussionen immer wieder auf die folgenden, hier thesenartig zusammengefassten „zentralen umweltethischen Einsichten“ einzugehen:

Zentrale umweltethische Einsichten

(1). Angesichts der Herausforderungen des Klimawandels und weltweit zunehmender Ressourcenknappheit müssen die elementaren Kreisläufe von Wasser, Kohlenstoff (insb. in Form von CO₂) und Phosphor, aber auch fruchtbare Böden verstärkt als „Gemeingüter“ begriffen werden: Sie müssen so genutzt und gepflegt werden, dass sie dauerhaft dem Gemeinwohl aller Menschen (und eng damit verbunden dem Erhalt der Biodiversität) dienen. Der „Institution Kläranlage“ kommt dabei eine Schlüsselstellung zu, da sie ist wie keine

zweite in Kreisläufe und Wechselwirkungen dieser Gemeingüter eingebunden ist. Kläranlagen müssen mehr als bisher in die Lage versetzt werden, dem Erhalt all dieser Gemeingüter gleichermaßen zu dienen.

(2.) Aus umweltethischer Sicht besteht das besondere Potential (und die damit einhergehende Verpflichtung, dieses zu entfalten) einer Flexibilisierung von Kläranlagen nicht so sehr darin, die effiziente Nutzung einer einzelnen dieser Ressourcen zu optimieren, sondern insgesamt die „Gemeinwohl-Effizienz“ zu verbessern. Dabei geht es darum, die gesamte Energie- und Stoffbilanz aller betroffenen Gemeingüter im Blick zu behalten und immer wieder neu an die jeweiligen örtlichen und zeitlichen Gegebenheiten und Anforderungen anzupassen.

(3.) Um das Ziel einer gemeinwohlorientierten Flexibilisierung zu erreichen, muss die Ordnungspolitik stärker als bisher sektorenübergreifende, kohärente Nachhaltigkeitsstrategien formulieren. Dies bedeutet nicht notwendigerweise die Einführung gleicher Preise, Grenzwerte und Anreizsysteme für unterschiedliche Systeme (wie beispielsweise kommunale Kläranlagen und privatwirtschaftliche Biogasanlagen), aber die harmonisierte Ausrichtung unterschiedlicher Regularien auf die gleichen Ziele. Ein vielversprechender Zwischenschritt in kurz- und mittelfristiger Perspektive besteht darin, die Anreizsysteme darauf auszurichten, dass Kläranlagen ihren Eigenenergieverbrauch selbst decken und Überschüsse (in Form von Wärme, Biogas, insbesondere aber elektrischer Energie) so ans Netz abgeben können, dass sie als „Puffer“ und „Stabilisatoren“ wirken können – ein Ziel, das auf hohe gesamtgesellschaftliche Akzeptanz stößt.

(4.) Dafür empfiehlt es sich, bei den stets notwendigen Interessens- und Güterabwägungen das Leitbild einer „gemeinwohlorientierten Flexibilisierung“ ins Zentrum der gemeinsamen Überlegungen zu stellen und die dorthin führenden Wege aus möglichst vielen unterschiedlichen Perspektiven zu betrachten. Die im Projektverlauf kontaktierten Stakeholdergruppen äußerten zwar ein breites Spektrum unterschiedlicher Erwartungen, doch bestand große Einigkeit darüber, was diese Zusammenarbeit charakterisieren sollte: mehr Transparenz, eine vorausschauende Kommunikation und aktive Einbindung möglichst aller Akteure und als Resultat mehr Planungssicherheit und eine verlässlichere Preispolitik für die involvierten Ressourcen. Abschließend sollen hier beispielhaft noch einige häufig artikuliert Fragen und Erwartungen verschiedener Akteursgruppen genannt werden, die (nicht nur aus umweltethischer Perspektive) weiterführende Beachtung verdienen:

- Erwartungen an einzelne Kommunen und kommunale Verbände: viele Forderungen fallen unter die Kategorie „verbesserte Kommunikations- und Überzeugungsarbeit“. Dazu gehört die vermehrte Einstellung und Schulung entsprechenden Fachpersonals für die Flexibilisierung, die Stärkung entsprechender Fachverbände (als kompetente Ansprechpartner und Multiplikatoren, für besseren, proaktiven Informationsfluss über konkrete technische und administrative Verbesserungsmöglichkeiten), sowie die Förderung und Kommunikation einer ganzheitlichen Betrachtungsweise.

- - Erwartungen an Legislative und Exekutive: hier dominieren Forderungen, mit mehr Entschlossenheit und Klarheit für eine gemeinwohlorientierte Ordnungspolitik zu sorgen. Häufig genannt wurde der Wunsch nach einer klaren Priorisierung der Flächennutzung, nach verlässlicher und transparenter Preissetzung (insbesondere in der Energiepolitik; hier wurden unisono mehr dezentrale Lösungen für Kleinerzeuger und deutlich mehr Transparenz über Nutzen und Gewinne eingefordert); Landwirte forderten insbesondere bessere Prämien für ökosystemare Dienstleistungen und die Förderung langfristiger regionaler Partnerschaften.
- - Erwartungen an die Zivilgesellschaft: hier wurde der oft beschworene „gesamtgesellschaftliche Kulturwandel“ in zweierlei Richtung eingefordert: als Treiber der Politik, der diese auf konkrete Nachhaltigkeitsziele festlegt und in Haftung nimmt, aber auch die Bereitschaft der Bürger, unvermeidliche Einschränkungen zu akzeptieren und sich langfristig an Projekten aktiv zu beteiligen.
- - Erwartungen an die Fachvertreter der Umwelt- und Wirtschaftsethik: Praxisnahe Reflexion und breitgestreute Kommunikation über Grundsatzfragen der Nachhaltigkeit im Kontext der Energiewende, beispielsweise „Wer bestimmt über die Verwendung und Bepreisung von Gemeingütern, wer setzt Prioritäten und Maßstäbe bei Interessenabwägungen? Welche Rolle spielt dabei Wissenschaft gegenüber Politik und Öffentlichkeit, wie verhält sie sich gegenüber populistischer Vereinnahmung und Verfälschung – ist sie neutrale Informationsquelle oder Schiedsrichter, aktive Anwältin oder gar Aktivistin? Wie können neue gesamtgesellschaftliche Allianzen gefördert und geschlossen werden, werden die oft geforderten „Mehrgewinnstrategien“ für mehr Nachhaltigkeit ihrem Anspruch gerecht, wie kann besser gegen die Gefahr oder den Vorwurf von „Greenwashing“ vorgegangen werden? Gerade diese letztgenannten Fragen zeigen, dass AP 6 im Bereich der Umwelt- und Wirtschaftsethik viele wertvolle Impulse gesetzt hat, die noch lange nachwirken werden und von den beteiligten Personen und Netzwerken noch lange weiterverfolgt werden.

1.6 AP K - Projektkommunikation und -koordination

Als Öffentlichkeitsarbeit wurde bereits zum Projektstart ein Projektlogo und ein Projektposter für FLXsynErgy designt sowie eine Pressemitteilung am 17.11.2020 veröffentlicht.

Das oberste Ziel von FLXsynErgy war die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen, die die Chancen, Risiken, Umsetzungsempfehlungen und Bemessungshinweise umfassen. Die schrittweise Erarbeitung der Handlungsempfehlungen umfasst einerseits die Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete einschließlich dem intensiven Austausch zwischen den Projektpartnern, insbesondere auch den assoziierten Partnern, in (Teil)Projektbesprechungen und Workshops sowie andererseits die Diskussion bzw. Austausch mit der Fachwelt auf nationalen und internationalen Veranstaltungen, Konferenzen und in Form von Veröffentlichungen. Dazu zählt insbesondere auch der Austausch im Rahmen des Begleitvorhabens „Energetische Biomassenutzung“, um den Austausch zwischen den beiden Branchen der Kläranlage und Biogasanlagen zu intensivieren. Die einzelnen Veröffentlichungen sind im Kapitel 5 separat aufgeführt und die vom Projektteam organisierten bzw. mitgestalteten Veranstaltungen sind im Folgenden aufgelistet:

- Online-Workshop zum vertieften Austausch mit den assoziierten Partnern zu den Themen Vorstellung des Projektkonsortiums, Zielsetzung des Projekts und geplantes Vorgehen am 08.12.2021. Die 17 Teilnehmerinnen und Teilnehmer hatten die Möglichkeit mittels interaktivem Online-Whiteboard die Erwartungen, spezifischen Wünsche und Interessen zu teilen.
- Online-Workshop „Flexibilisierung von Biogas/Faulgasanlagen – Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden“ fand am 12.01.2022 mit 28 Expertinnen und Experten statt. Der Schwerpunkt lag auf den Themen Chancen, Hemmnissen und Wünschen für eine zukünftige Flexibilisierung auf Faulungs- und Biogasanlagen.
- Online-Workshop zur Überarbeitung und Erweiterung der Messmethodensammlung mit Unterstützung durch das Begleitvorhaben am 05.07.2023
- Online-Veranstaltung im Rahmen der Veranstaltungsreihe rAusblick zum Thema „rAusblick: Klärschlamm – grüne Energie aus dem Faulturm?“ veranstaltet von der Domberg Akademie am 22.03.2022.
- Online-Workshops zur „Kläranlage der Zukunft“ vom 10. November 2022 durchgeführt durch die Hochschule für Philosophie
- Vom Trinkwasser zum Klärschlamm – Vom Notfall zur Energiewende. 18 -19. Oktober 2023 in Abstimmung mit DVGW Landesgruppe Bayern, DWA Landesverband Bayern und dem Umweltcluster. Vortragsveranstaltung mit Ausstellung an der Universität der Bundeswehr München, Präsentation von Ergebnissen von FLXsynErgy.

Für den Austausch und die Diskussion mit weiteren Interessensgruppen stehen ausgewählte Beiträge für umwelt- und sozialetische Fragen über die Weiterentwicklung von Kläranlagen zur gezielten Erzeugung von Gas und Strom aus biogenen Rest- und Abfallstoffen auf der Digilog-Plattform (www.digilog-transformation.com/flxsynergy) zur Verfügung.

Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeiten in FLXsynErgy werden zu Handlungsempfehlungen für die Umsetzung in der Praxis zusammengefasst. Die Handlungsempfehlungen werden in einem separaten Dokument veröffentlicht und ergänzen den Schlussbericht. ...

2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Energiewende ist mit großen monetären Aufwendungen verbunden. Um die Kosten für erforderliche Speichersysteme und der Integration erneuerbarer Energiequellen zu reduzieren müssen jegliche Potentiale zur Speicherung bzw. zur bedarfsgerechten Bereitstellung von Energie erschlossen und Verbraucherverhalten verändert werden. Dies umfasst gleichfalls Kläranlagen, welche als oftmals größter kommunaler Energieverbraucher auf kommunaler Ebene eine bedeutende Rolle im regionalen Energiesystem inne haben. Die Potentiale von Kläranlagen zu einem netzdienlichen Verhalten konnte bereits in den „Vorgängerprojekten“ bspw. „Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch (ESiTI)“ und „Abwasserreinigungsanlagen als Regelbausten in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung (Arrivee)“ im Rahmen der ERWAS Förderinitiative (gefördert durch das BMBF) aufgezeigt werden.

Die Faulung einschließlich der Substrat- und Gasspeicher sowie den Blockheizkraftwerken ist der zentrale Baustein um auf Kläranlagen ein Lastmanagement umzusetzen. Im Rahmen von FLXsynErgy ist es gelungen die Möglichkeiten zur Flexibilisierung der Faulung aufzuzeigen und diese Erkenntnisse den Akteuren in Form eines Impulspapieres/Handlungsempfehlung zur Verfügung zu stellen. Diese Erkenntnisse tragen zu der Umsetzung eines Lastmanagements und einem dadurch möglichen netzdienlichen Betrieb bei. Darüber hinaus konnte die Auswirkung einer Regelenergievermarktung auf den Anlagenprozess dargestellt werden, so dass Risiken besser einzuordnen sind und die Angst einer Teilnahme eingedämmt wird. Die Regelenergie stellt ein wesentliches Werkzeug zur Stabilisierung der Stromnetze dar. FLXsynErgy fördert in diesem Zusammenhang die Integration der Kläranlagen in das Stabilitätssystem der öffentlichen Netze. Anhand der Auswertung von Lastgängen realer Kläranlagen konnten Rückschlüsse zur Erhöhung der Eigenstromnutzung gezogen werden. Zum einen werden hierdurch der Strombezug reduziert, wodurch die Netze entlastet werden zum anderen können die Erkenntnisse zukünftig auch zur Verfolgung des Konzeptes des Inselbetriebes genutzt werden.

3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Generell konnte das Projekt Bemessungsgrößen zum bedarfsgerechten Betrieb von Faulungen aufzeigen. Eine Übertragung entsprechender Maßnahmen ist somit für Kläranlagen mit Faulungen unmittelbar umsetzbar. Hierzu wurden die Erkenntnisse aus dem Projekt bereits während der Laufzeit in einschlägigen Fachkonferenzen vorgestellt und diskutiert z. B. DWA-Energietag. Dies wird auch im Nachgang des Projektes fortgeführt. Eine Übertragung der Ergebnisse mit der Intention ein aktives Lastmanagement in die Regelungstechnik großtechnischer Anlagen einzubinden wird im Rahmen der Projektidee „IEFlex“ welches im Rahmen des 8. Energieforschungsprogrammes eingereicht wurde verfolgt.

Die Lehrtätigkeit der Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr München befasst sich schwerpunktmäßig mit der Trinkwassergewinnung sowie Abwasserbehandlung. Neben der Vergabe von vertiefenden Studienarbeiten konnten auch einige Erkenntnisse aus dem Projekt in die Lehre integriert werden. Auch die Hochschule für Philosophie hat Auszüge aus FLXsynErgy in die Lehrveranstaltung „Ethik des Ressourcenmanagements integrieren können“.

Das Ingenieurbüro Steinle kann die Erkenntnisse nutzen um auf Kläranlagen, welche einen wesentlichen Anteil ihres Kundenkreises darstellen, Beratungstätigkeiten im Bereich Marktpartizipation wahrzunehmen. Auch neue Erkenntnisse zum Energiemanagement unter Einbindung von Substratspeichern konnte sich das Büro aneignen.

4 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im Rahmen der Literaturrecherche konnten keine weiteren Projekte identifiziert werden, welche sich mit dem Thema der Nutzung von Reststoffen zur bedarfsgerechten Bereitstellung von Energie im Sinne eines netzdienlichen Betriebes befassen.

5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Inhalte, Erkenntnisse und Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden in diversen Veranstaltungen und Publikationen während der Projektlaufzeit veröffentlicht bzw. diskutiert.

Internationale Publikationen

- Steiniger, B.; Hubert, C.; Schaum, C. (2023): Digesters as Heat Storage: Effects of the Digester Temperature on the Process Stability, Sludge Liquor Quality and the Dewaterability. *Water Environment Research*. Vol. 95.. No. 9.
- Steiniger, B., Hubert, C., Schaum, C. (2021): Digesters as Heat Storage – Energetic Assessment of Flexible Variation of Digester Temperature. *Chemical Engineering & Technology*. Vol. 45, Nr. 1. 144-151.

Nationale Publikationen

- Steiniger, B., Hubert, C., Spallek, M., Michel, M., Stanzel, J., Schaum, C. (2022): Die Faulung als Wärmespeicher: Ganzheitliche Wärmenutzung durch saisonale Anpassung der Faulraumtemperatur. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*. Vol. 69, Nr. 12
- Steiniger, B., Blattenberger, J., Hubert, C., Kretzschmar, J., Einsiedel, S., Heinrich, M., Athanasiadis, K., Schaum, C. (2022): Flexibilisierung von Faulungs- und Biogasanlagen – Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden. *KA Korrespondenz Abwasser, Abfall*. Vol. 69, Nr. 10

- Steinforth, T. (2021): Philosophie und Klärschlamm. Magazin „Kontrapunkte“. Blogbeitrag vom 18.05.2021. Zentrum für Globale Fragen. <https://kontrapunkte.hypothesises.org/1954>.
- Steinforth, T. (2021): Verwerten statt verschwenden: Lebensmittel als Energiequelle? Magazin „Sinn und Gesellschaft“. Blogbeitrag vom 27.09.2021. Bildungszentrum Ludwigshafen e. V. <https://sinnundgesellschaft.de/verwerten-statt-verschwenden>.
- Steinforth, T. (2021): Die Fäulnis, der Tod und das Leben. Magazin „Kontrapunkte“. Blogbeitrag vom 08.10.2021. Zentrum für Globale Fragen. <https://kontrapunkte.hypothesises.org/2481>.
- Steinforth, T. (2021): Ethische Anfragen an den Topos einer „sozial-ökologischen Transformation“. EthikJournal 7. Jg. Ausgabe 1. „Sozialökologische Transformation – Diskursfelder und Themen für die und in der Sozialen Arbeit“. https://www.ethikjournal.de/fileadmin/user_upload/ethikjournal/Texte_Ausgabe_2021_1/Steinforth_Ethikjournal_1.2021.pdf

Internationale Veranstaltungen

- Hubert, Christian; Steiniger, Bettina; Schaum, Christian (2023): Demand-driven gas production using co-substrates from the dairy industry. Residuals and Biosolids Conference 2023. 16 – 19.05.2023, Charlotte, USA, Full Conference Proceedings of the Water Environment Federation.
- Hubert, C., Steiniger, B., Schaum, C. (2022): Biosolids Treatment as Source for a Demand-Driven Energy Generation. 10.-13.04.2022, Online. Water and Resource Recovery Conference 2022 (WWRR 2022). International Water Association (IWA). Präsentation.
- Hubert, Christian; Steiniger, Bettina; Schaum, Christian (2022): Demand-driven biogas production and the question of electricity utilization. IWA World Water Congress & Exhibition 2022, 11 – 15.09.2022, Kopenhagen.
- Hubert, C., Joel, E., Steiniger, B., Schaum, C. (2022): Obstacles in Co-Digestion: Grease Trap Wastes (GTW). 17.-22.06.2022 in Ann Arbor, USA. 17th World Conference on Anaerobic Digestion (AD17 Biogas + Beyond). International Water Association (IWA). Poster.
- Steiniger, B., Hubert, C., Schaum, C. (2022): Breaking Down Old Patterns – Flexibility of the Digester Temperature at Municipal Water Resource Recovery Facilities. 17.-22.06.2022 in Ann Arbor, USA. 17th World Conference on Anaerobic Digestion (AD17 Biogas + Beyond). International Water Association (IWA). Präsentation.

- Steiniger, B., Hubert, C., Schaum, C. (2022): Effects of Seasonal Variation of the Digester Temperature. International EWA Symposium. 01.-02.06.2022 in München. European Water Association (EWA). Präsentation.

Nationale Veranstaltungen

- Schaum, C.; Hubert, C. (2024): Flexibilisierung von Kläranlagen zur Unterstützung der Energiewende. Brennpunkte philosophisch-ethischer Debatten zur Nachhaltigkeit, 20.07.2024, München
- Schaum, C.; Hubert, C.; Pankow, N.; Ruf, A.; Krause, S. (2024): Flexibilitätsoptionen der Klärschlammbehandlung. Energiemanagement in den Zeiten der Energiewende. Neues aus der Umwelttechnik und Infrastrukturplanung. 05.02.2024. Darmstadt
- Hubert, C., Schaum, C., Steiniger, B., Kretzschmar, J., Einsiedel, S., Henker, J., Athanadiadis, K., Heinrich, M. (2023): Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger, Statuskonferenz Bioenergie 2023 der Begleitforschung des BMWK-Forschungsnetzwerks Bioenergie. 20./22.09.2023. Leipzig.
- Hubert, C.; Schaum, C. (2023): Von der flexiblen Klärschlammbehandlung zur Regelenergie. DWA EnergieTag. 06.12.2023, Fulda.
- Schaum, C.; Hubert, C.; Steiniger, B. (2023): Die Klärschlammbehandlung als Energiebaustein der Zukunft? Umwelttag im Öschberghof. 16.05.2023. Öschberghof.
- Hubert, C.; Steiniger, B.; Schaum, C. (2023): FLXsynErgy - Wie flexibel kann die Faulung sein? Vom Trinkwasser zum Klärschlamm - Vom Notfall zur Energiewende. Beiträge zur Erhöhung der Resilienz in der Siedlungswasserwirtschaft. Vortragsveranstaltung mit Fachausstellung an der Universität der Bundeswehr München, 18.-19.10.2023. Neubiberg
- Kretzschmar, J, Winkler, M., Mauky, E., Weinrich, S. (2023) FLXsynErgy - Biogas vs. Klärgas: Können wir voneinander lernen? Vom Trinkwasser zum Klärschlamm - Vom Notfall zur Energiewende. Beiträge zur Erhöhung der Resilienz in der Siedlungswasserwirtschaft. Vortragsveranstaltung mit Fachausstellung an der Universität der Bundeswehr München, 18.-19.10.2023. Neubiberg
- M. Winkler, S. Weinrich (2023) Modellbasierte Ermittlung des biochemischen Methanpotenzials und der Abbaukinetik in Batch- und kontinuierlich betriebenen Biogasreaktoren in unterschiedlichen Maßstäben. 29. SIMBA-Anwendertreffen, Blankenburg/Harz, 09.-10.05.2023
- Einsiedel, S., Schaum, C., Koch, M., Rudoph, L. (2022): Wieviel Zukunft steckt im Abfluss? Umweltethische Diskussionen zur „Kläranlage der Zukunft“. Theorie-Praxis-Gespräch zu den Themen Lebensmittelreste, Kläranlagen als Kraftwerke, Faire

Preise für Strom, Abfall und Gemeingüter, Verantwortung für Umwelt und Landwirtschaft. 10.11.2022. Online-Veranstaltung. Präsentationen.

- Schaum, C. und Einsiedel, S. (2022): Mit unserem Abwasser Zukunft gestalten – Ein Philosoph und Bauingenieur im Dialog. rAusblick: Klärschlamm – grüne Energie aus dem Faulturm? 22.03.2022. Domberg-Akademie und Zentrum für Globale Fragen der Hochschule für Philosophie München. Online-Veranstaltung. Präsentation.
- Steiniger, B., Hubert, C., Schaum, C. (2021): Wärmespeicher auf Kläranlagen: Was kann ein Faulbehälter leisten? 12. DWA-KlärschlammTage (09.06.-18.06.21 als Online-Veranstaltung). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA). Präsentation.
- Schaum, C., Blattenberger, J., Hubert, C., Steiniger, B., Shehata, O., Kretzschmar, J., Steinforth, T., Einsiedel, S., Athanasiadis, K., Egeler, M., Heinrich, M., Dornburg, A. (2021): Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe - Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger. 10. Statuskonferenz der Begleitforschung des BMWK-Forschungsnetzwerks Bioenergie. 28./29.11.2021. In: Tens, V. und Thrän, D. (Ed.). Reader 10. Statuskonferenz. Bioenergie – Eine Partnerin für alle Fälle. Energetische Biomassenutzung. S. 32-33. Leipzig.
- Hubert, C., Steiniger, B., Schaum, C. (2021): Einfluss der flexibilisierten Faulgaserzeugung auf die Klärschlammbehandlung. 10. Statuskonferenz der Begleitforschung des BMWK-Forschungsnetzwerks Bioenergie. 28./29.11.2021. In: Tens, V. und Thrän, D. (Ed.). Reader 10. Statuskonferenz. Bioenergie – Eine Partnerin für alle Fälle. Energetische Biomassenutzung. S. 28-29. Leipzig.

Dissertationen (in Vorbereitung)

Ein Teil der Ergebnisse von FLXsynErgy fließt ein in die Dissertationen:

Bettina Steiniger (2024/25):

Die Faulung als saisonaler Wärmespeicher - Untersuchungen zur Variation der Faulraumtemperatur innerhalb meso- und thermophiler Temperaturen

Christian Hubert (2024/25):

Eine bedarfsgerechte Faulgaserzeugung auf Kläranlagen im Kontext der Energiewende

Handlungsempfehlungen/Impulspapier

Die abgeleiteten Handlungsempfehlungen von FLXsynErgy sollen in einem „Impulspapier“ veröffentlicht werden (geplante Veröffentlichung November 2024).

6 Literaturverzeichnis

- Balasundaram G., Banu R., Varjani S., Kazmi A. A. und Tyagi V. K. (2022). Recalcitrant compounds formation, their toxicity, and mitigation: Key issues in biomass pre-treatment and anaerobic digestion. *Chemosphere* 291.
- Batstone, D. J., J. Keller, I. Angelidaki, S. V. Kalyuzhnyi, S. G. Pavlostathis, A. Rozzi, W. T.M. Sanders, Ha Siegrist, und V. A. Vavilin. (2002). „Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1): IWA task group for mathematical modelling of anaerobic digestion processes“. London: IWA Publishing.
- Batstone, D. J., S. Tait, und D. Starrenburg. (2009). „Estimation of hydrolysis parameters in full-scale anaerobic digesters“. *Biotechnology and bioengineering* 102 (5): 1513–20. <https://doi.org/10.1002/bit.22163>.
- Bischofsberger W., Dichtl N., Rosenwinkel K., Seyfried C. und Böhnke B. (2005). *Anaerobtechnik, 2., vollständig überarbeitete Auflage*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- BMWi (2021). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).
- Bonk, F., Popp D., Weinrich, S., Sträuber, H., Kleinsteuber, S., Harms, H., Centler, F., (2018) Intermittent fasting for microbes: how discontinuous feeding increases functional stability in anaerobic digestion. *Biotechnology for Biofuels* 11, 274. <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1279-5> .
- Bouskova A., Persson E., Jansen J. L. C. und Dohanyos M. (2006). The effect of operational temperature on dewatering characteristics of digested sludge. *Journal of Residuals Science & Technology* 3(1).
- Bundesregierung (2016). *Klimaschutzplan 2050*, Berlin.
- Chen Y., Cheng J. J. und Creamer K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology* 99(10), 4044-64.
- Daniel-Gromke J., Kornatz P., Dotzauer M., Stur M., Denysenko V., Stelzer M., Hahn H., Krautkremer B., von Bredow H. und Antonow K. (2019). *Leitfaden Flexibilisierung der Strombereitstellung von Biogasanlagen (LF Flex)*. Abschlussberichte. https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Studien/20191108_LeitfadenFlex_Abschlussbericht.pdf
- Daniel-Gromke J. R., N.; Denysenko, V.; Barchmann, T.; Oehmichen, K.; Beil, M.; Beyrich, W.; Krautkremer, B.; Trommler, M.; Reinholz, T.; Vollprecht, J.; Bühr, C. (2020). *Optionen für Biogas-Bestandsanlagen bis 2030 aus ökonomischer und energiewirtschaftlicher Sicht*. Abschlussbericht. UBA-Texte 24/2020. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau
- de la Rubia M. A., Romero L. I., Sales D. und Perez M. (2005). Temperature conversion (mesophilic to thermophilic) of municipal sludge digestion. *AIChE Journal* 51(9), 2581-6.

- de Lemos Chernicharo C. (2007). *Anaerobic Reactors*. IWA Publishing, London.
<https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402116.pdf>
- DESTATIS (2020a). Pressemitteilung Nr. 310 vom 14. August 2020 - 1515 Gigawattstunden Strom aus Klärgas im Jahr 2019 erzeugt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/08/PD20_310_433.html (letzter Zugriff: 23.02.2022).
- DESTATIS (2020b). Wasser-wirtschaft: Klärschlamm-entsorgung aus der öffentlichen Abwasser-behandlung 2020. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Tabellen/liste-klaerschlammverwertungsart.html> (letzter Zugriff: 23.02.2022).
- DESTATIS (2022). Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas: Deutschland Jahre. Statistisches Bundesamt (Destatis). Letzter Zugriff: 01.09.2022.
- De Vrieze, J., Verstraete, W. & Boon, N. (2013) Repeated pulse feeding induces functional stability in anaerobic digestion. *Microbial Biotechnology* 6, 414–424.
<https://ami-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1751-7915.12025>.
- Donoso-Bravo A., Retamal C., Carballa M., Ruiz-Filippi G. und Chamy R. (2009). Influence of temperature on the hydrolysis, acidogenesis and methanogenesis in mesophilic anaerobic digestion: parameter identification and modeling application. *Water Science and Technology* 60(1), 9-17.
- DWA (2009). Merkblatt DWA-M 380 - Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.. Hennef.
- DWA (2013). DWA-Positionen. Positionen zur Energie- und Wasserwirtschaft. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).
- DWA (2014). Merkblatt DWA-M 368 - Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.. Hennef.
- DWA (2015). Arbeitsblatt DWA-A 216 - Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, Hennef.
- DWA (2019a). 32. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen. Klärschlammfall. Daten von 2019. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2019b). Merkblatt DWA-M 383 - Kennwerte der Klärschlammmentwässerung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.. Hennef.
- DWA (2020a). 33. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen. Entwicklung des Stromverbrauchs. Daten von 2020. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

- DWA (2020b). Merkblatt DWA-M 380 - Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.. Hennef.
- EEG (2012). EEG - Erneuerbare-Energien-Gesetz - 2012. Drittes Gesetz zur Neuregelung energiewirtschaftlicher Vorschriften. Vom Dezember 2012.
- Elsner, Peter et al. (Hrsg.): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Technologien – Szenarien – Systemzusammenhänge (Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2015.
- ESiTI (2017). Kläranlagen im Spannungsfeld der Energiewirtschaft, ERWAS-Verbundprojekt ESiTI – Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und –verbrauch.
- Ezieke, A. H., Serrano, A., Peces, M., Clarke, W. & Villa-Gomez, D. (2024) Effect of feeding frequency on the anaerobic digestion of berry fruit waste. Waste Management 178, 66–75.. .
- FNR (2016). Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- FNR (2018). Flexibilisierung von Biogasanlagen. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- FNR (2021). Biogas-Messprogramm III. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- Gaida, Daniel. (2014). „Dynamic Real-Time Substrate Feed Optimization of Anaerobic Co-Digestion Plants“. Dissertation, Universiteit Leiden.
- Hahn H., Krautkremer B., Hartmann K. und Wachendorf M. (2014). Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 29, 383-93.
- Hubert C., Steiniger B. und Schaum C. (2020). Residues from the dairy industry as co-substrate for the flexibilization of digester operation. Water Environment Research 92(4), 534-40.
- Hubert C., Steiniger B., Schaum C., Michel M. und Spallek M. (2019). Variation of the digester temperature in the annual cycle – using the digester as heat storage. Water Practice and Technology 14(2), 471-81.
- Hubert C. (2024/25), Bedarfsgerechte Faulgaserzeugung auf Kläranlagen im Kontext der Energiewende, Dissertation (in Vorbereitung), Neubiberg
- Kopp J. (2001). Wasseranteile in Klärschlamm suspensionen - Messmethode und Praxisrelevanz. Dissertation. Technische Universität Braunschweig. Institut für Siedlungswasserwirtschaft. Heft 66.

- Loidl M. (2020). Temperaturerhöhung im Faulturm - Auswirkungen auf Schlammensorgung und Faulgas. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall - Betriebs-Info 02/20, 2957-60.
- Mauky E., Weinrich S., Jacobi H.-F., Nägele H.-J., Liebetrau J. und Nelles M. (2017). Demand-driven biogas production by flexible feeding in full-scale – Process stability and flexibility potentials. *Anaerobe* 46, 86-95.
- Mauky E., Weinrich S., Nägele H.-J., Jacobi H. F., Liebetrau J. und Nelles M. (2016). Model Predictive Control for Demand-Driven Biogas Production in Full Scale. *Chemical Engineering & Technology* 39(4), 652-64.
- Mauky, E., S. Weinrich, H.-F. Jacobi, H.-J. Nägele, J. Liebetrau and M. Nelles (2017). "Demand-driven biogas production by flexible feeding in full-scale – Process stability and flexibility potentials." *Anaerobe* 46: 86-95.
- Michel, M. (2023) FLXsynERGY – Wie flexibel können Kläranlagen sein? Vortragveranstaltung Resilienz als Baustein für eine zukunftsfähige Abwasserwirtschaft. Vom Trinkwasser zum Klärschlamm - Vom Notfall zur Energiewende 2023, 18/19.10.2023, Neubiberg.
- Mulat, Daniel Girma, H. Fabian Jacobi, Anders Feilberg, Anders Peter S. Adamsen, Hans-Hermann Richnow, und Marcell Nikolausz. 2016. „Changing Feeding Regimes To Demonstrate Flexible Biogas Production: Effects on Process Performance, Microbial Community Structure, and Methanogenesis Pathways“. Herausgegeben von R. M. Kelly. *Applied and Environmental Microbiology* 82 (2): 438–49. <https://doi.org/10.1128/AEM.02320-15>.
- MULNV (2018). Energie in Abwasseranlagen: Handbuch NRW, Düsseldorf.
- Next Kraftwerke GmbH (2022): Was sind Dispatch, Redispatch & Redispatch 2.0? <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/dispatch-redispatch> (letzter Zugriff: 28.02.2022).
- Rasit, Nazaitulshila, Wan Azlina Wan Ab Karim Ghani, Mohammad Hakim Che Harun, Sofiah Hamzah, Roslinda Seswoya, und Md Nurul Islam Siddique. 2024. „Feeding Frequency Efficacy on Biogas Yield of Oily Substrate Anaerobic Digestion in Continuous Stir Tank Reactor“. *Water Science & Technology* 89 (10): 2796–2811. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.153>.
- Reder, M., Gösele, A., Köhler, L. und Wallacher, J. (2019). Umweltethik. Eine Einführung in globaler Perspektive, Kohlhammer, Stuttgart
- Regelleistung.net (2023): Daten <https://www.regelleistung.net/de-de/> (letzter Zugriff: 27.09.2023).

- Rensberg, N.; Denysenko, V.; Daniel-Gromke, J. (2023). Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland: Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan. (DBFZ-Report, 50). Leipzig: DBFZ. VII, 9-122 S. ISBN: 978-3-949807-02-2.
DOI: 10.48480/zptb-yy32
- Rossol K., K. S. und Meyer H. (2005). Schlammfäulung bei erhöhten. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 52(10), 1120–5.
- Sachverständigengruppe Weltwirtschaft und Sozialethik (2024): Ernährungssicherheit, Klimaschutz und Biodiversität: Ethische Perspektiven für die globale Landnutzung. Studien der Sachverständigengruppe „Weltwirtschaft und Sozialethik“ Bd. 23, Bonn
- Schaum C., Dornburg A., Brockmann M., Frehmann T., Garleff L., Gierke M., Gack P., Heinrich M., Höhle A., Hubert C., John W., Kraus S., Lutze R., Mergelmeyer M., Meß R., Rommeiß N., Salomon D., Schäfer M. und Steiniger B. (2019). (Energetische) Flexibilitäten auf Kläranlagen – Hintergrund und Voraussetzungen für eine sinnvolle Nutzung. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-7.5 „Lastmanagement und Interaktion mit Energienetzen“. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall Vol. 66. Nr. 10.
- Schumacher B., Wedwitschka H., Hofmann J., Denysenko V., Lorenz H. und Liebetrau J. (2014). Disintegration in the biogas sector – Technologies and effects. Bioresource Technology 168, 2-6.
- Statista (2022). Anzahl der Biogasanlagen in Deutschland in den Jahren 1992 bis 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167671/umfrage/anzahl-der-biogasanlagen-in-deutschland-seit-1992/> (letzter Zugriff: 23.02.2022).
- Steiniger B., Hubert C. und Schaum C. (2021). Digesters as Heat Storage - Energetic Assessment of Flexible Variation of Digester Temperature. Chemical Engineering and Technology 45(00), 1-9.
- Steiniger, B.; Blattenberger, J.; Hubert, C.; Kretzschmar, J.; Einsiedel, S.; Heinrich, M.; Athanasiadis, K.; Schaum, C.. (2022) Flexibilisierung von Faulungs- und Biogasanlagen - Identifikation von Gemeinsamkeiten und Unterschieden. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall. Vol. 69. Nr. 10. S. 873-882.
- Steiniger, B., C. Hubert, M. Spallek, M. Michel, J. Stanzel, und C. Schaum. (2022b). „Die Fäulung als Wärmespeicher“. KA Korrespondenz Abwasser, Abfall Vol. 69, Nr. 12: 1028–36.
- Svensson, K., Paruch, L., Gaby, J. C. & Linjordet, R. (2018) Feeding frequency influences process performance and microbial community composition in anaerobic digesters treating steam exploded food waste. Bioresource Technology 269, 276–284.

- Temper U. (1983). Methangärung von Klärschlamm und anderen komplexen Substraten bei mesophilen und thermophilen Temperaturen. Dissertation der Fakultät für Biologie der Ludwig-Maximilians-Universität München.
- UBA (2018), Obermaier, Nathan, Purr, Katja, Werlein, Max, Bannick, Gerhard, Klimaschutz und Abwasserbehandlung – Sinnvolle Beiträge zur Energiewende, Umweltbundesamt, Position, 12, Dezember 2018, Dessau-Roßlau
- VDI (2016). VDI 4630: Vergärung organischer Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche; Verein Deutscher Ingenieure (VDI). VDI Handbuch Energietechnik. Beuth Verlag GmbH. Berlin.
- WEF (2018). Design of Water Resource Recovery Facilities. New York, Chicago, San Francisco, Athens, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, Singapore, Sydney, Toronto: McGraw-Hill Education.
- Weinrich S. und Nelles M. (2015). Critical comparison of different model structures for the applied simulation of the anaerobic digestion of agricultural energy crops. *Biore-source technology* 178, 306-12.
- Weinrich, S., und M. Nelles. (2021). „Systematic Simplification of the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) – Model Development and Stoichiometric Analysis“. *Biore-source Technology* 333 (August):125124.
- Weißbach, F.. 2009. „Evaluation of the renewable primary products for biogas production. Part I: Gas production potential of the fermentable nutrients“. *Pflanzenbauwissenschaften* 13 (2): 72–85.
- Zhang Q., De Clippeleir H., Su C., Al-Omari A., Wett B., Vlaeminck S. E. und Murthy S. (2016). Deammonification for digester supernatant pretreated with thermal hydrolysis: overcoming inhibition through process optimization. *Applied Microbiology and Biotechnology* 100(12), 5595-606.
- Zeig C. (2013). Stoffströme der Co-Vergärung in der Abwasserwirtschaft. Dissertation. Verein zur Förderung des Instituts IWAR der TU Darmstadt e.V. Schriftenreihe 226.
- Ziels, R. M., Sousa, D. Z., Stensel, H. D. & Beck, D. A. C. (2017) DNA-SIP based genome-centric metagenomics identifies key long-chain fatty acid-degrading populations in anaerobic digesters with different feeding frequencies. *The ISME Journal* 12, 112–123.

7 Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger (FLXsynErgy)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Hubert, Christian Steiniger, Bettina Schaum, Christian Kretzschmar, Jörg Winkler, Manuel Mauky, Eric Athanasiadis, Konstantinos Henker, Jens Einsiedel, Stefan Wallacher, Johannes Heinrich, Markus Zimmer, Lorenz Schwarz, Lemar Berger, Lea Mergelmeyer, Martin	5. Abschlussdatum des Vorhabens März 2024
	6. Veröffentlichungsdatum September 2024
	7. Form der Publikation Abschlussbericht

<p>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</p> <p>Universität der Bundeswehr München (UniBwM) Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg</p> <p>DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH Fachbereich Biochemische Konversion Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig</p> <p>Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Ziegelstraße 2, 83629 Weyarn</p> <p>Hochschule für Philosophie - Zentrum für Globale Fragen Kaulbachstraße 31/33, 80539 München</p> <p>Wolter Hoppenberg - Rechtsanwälte Partnerschaft mbB Münsterstraße 1-3, 59065 Hamm</p> <p>im Unterauftrag der UniBwM john becker ingenieure GmbH & Co. KG Zur alten Wörpe 6, 28865 Lilienthal</p>	<p>9. Ber. Nr. Durchführende Institution</p> <p>-</p>
	<p>10. Förderkennzeichen</p> <p>03EI5420 A-F</p>
	<p>11. Seitenzahl</p> <p>149</p>
<p>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</p> <p>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 53107 Bonn</p>	<p>13. Literaturangaben</p> <p>siehe Literaturverzeichnis</p>
	<p>14. Tabellen</p> <p>18</p>
	<p>15. Abbildungen</p> <p>66</p>
<p>16. Zusätzliche Angaben</p> <p>-</p>	
<p>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</p> <p>-</p>	

18. Kurzfassung

Das Projekt „Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger (FLXsynErgy)“ hatte das Ziel, Hinweise für eine weitestgehend energetische Nutzung biogener Reststoffe bereitzustellen. Dabei wurde neben der Verstromung des anfallenden Faulgases auch eine effiziente Nutzung der anfallenden Wärmeenergie untersucht. Die betrachteten Konzepte stellen dabei eine bedarfsgerechte Substratzugabe und Faulgas-erzeugung dar, sowie die Nutzung der Faulung als Wärmespeicher. Darüber hinaus wurde untersucht, wie die Eigenstromnutzung erhöht werden kann, welche Auswirkungen eine Partizipation am Regelenergiemarkt auf den Gasspeicher und die erforderlichen Gasmen-gen hat und welches Potential für Kläranlagen bezüglich einer Teilnahme am Day-Ahead-Markt besteht. Umrahmt wurde das Projekt von einer sozio-ökologischen Untersuchung. In dieser Untersuchung wurden Hemmnisse einer technologischen Umsetzung in der Praxis bewertet. Neben den wissenschaftlichen Fragestellungen, wurde auch im Rahmen von Workshops Unterschiede und Gemeinsamkeiten von Biogasanlagen und Faulungs-anlagen diskutiert.

19. Schlagwörter

Kläranlage, Flexibilität, Energie, Faulung, Biogas

20. Verlag

-

21. Preis

-

8 Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title Flexible and fully energetic use of biogenic residuals and waste materials: Anaerobic digestion plants in wastewater treatment and agricultural biogas production as energy consumers, storage facilities and producers (FLXsynErgy)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Hubert, Christian Steiniger, Bettina Schaum, Christian Kretzschmar, Jörg Winkler, Manuel Mauky, Eric Athanasiadis, Konstantinos Henker, Jens Einsiedel, Stefan Wallacher, Johannes Heinrich, Markus Zimmer, Lorenz Schwarz, Lemar Berger, Lea Mergelmeyer, Martin	5. end of project March 2024
	6. publication date September 2024
	7. form of publication Final Report

<p>8. performing organization(s) (name, address)</p> <p>Universität der Bundeswehr München (UniBwM) Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85579 Neubiberg</p> <p>DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gGmbH Biochemical Conversion Department Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig</p> <p>Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH Ziegelstraße 2, 83629 Weyarn</p> <p>Hochschule für Philosophie - Zentrum für Globale Fragen Kaulbachstraße 31/33, 80539 München</p> <p>Wolter Hoppenberg - Rechtsanwälte Partnerschaft mbB Münsterstraße 1-3, 59065 Hamm</p> <p>subcontracted by the UniBwM john becker ingenieure GmbH & Co. KG Zur alten Wörpe 6, 28865 Lilienthal</p>	<p>9. originator's report no.</p> <p>-</p>
	<p>10. reference no.</p> <p>03E15420 A-F</p>
	<p>11. no. of pages</p> <p>149</p>
<p>12. sponsoring agency (name, address)</p> <p>Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action 53170 Bonn Germany</p>	<p>13. no. of references</p> <p>See final report</p>
	<p>14. no. of tables</p> <p>18</p>
	<p>15. no. of figures</p> <p>66</p>
<p>16. supplementary notes</p> <p>-</p>	
<p>17. presented at (title, place, date)</p> <p>-</p>	

18. abstract	
<p>The project “Flexible and fully energetic use of biogenic residuals and waste materials: Anaerobic digestion plants in wastewater treatment and agricultural biogas production as energy consumers, storage facilities and producers (FLXsynErgy)” aimed to provide information on the holistic use of energy from biogenic residues. In addition to the conversion of biogas into electricity, the efficient use of the thermal energy was also investigated. In this context a demand-driven substrate feed and biogas production, as well as the potential to operate the digester as a heat storage were examined. Furthermore, it was investigated how the electricity self-sufficiency can be increased, the impact participating on balancing energy market on the gas storage and gas quantities and the potential for wastewater treatment plants participating in the day-ahead market. The project was framed by a socio-ecological study. In this study, obstacles to technological implementation in practice were evaluated. In addition to the scientific questions, differences and similarities between biogas plants and digestion plants were also discussed in workshops.</p>	
19. keywords	
wastewater treatment plant, flexibility, energy, digestion, biogas	
20. publisher	21. price
-	-

www.unibw.de/wasserwesen

ISBN 978-3-98997-004-5