



FH MÜNSTER  
University of Applied Sciences

**NAARMANN**

# Abschlussbericht

## EnerMolk

Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Steigerung der  
betrieblichen Energieeffizienz in Molkereibetrieben  
mittels Anaerobtechnik

Projektlaufzeit: 16.12.2019 – 15.12.2021

Aktenzeichen: AZ 35227/01-23

Autoren:

Dr.-Ing. Elmar Brüggling

Tobias Weide, M.Sc.

Thomas Holtrup, M.Sc.

FH Münster – University of Applied Sciences  
Fachbereich Energie-Gebäude-Umwelt  
Institutsverbund Ressourcen, Energie und Infrastruktur  
Stegerwaldstraße 39  
48565 Steinfurt

Tel : +49 (0) 2551 9-62420

Fax : +49 (0) 2551 9-62717

Mob: +49 (0) 179 5495 481

Mail: [bruegging@fh-muenster.de](mailto:bruegging@fh-muenster.de)

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)



06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>35227</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>125.000 €</b>
<b>Antragstitel</b>		<b>Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur Steigerung der betrieblichen Energieeffizienz in Molkereibetrieben mittels Anaerobtechnik</b>			
<b>Stichworte</b>		Energierückgewinnung, Kläranlage, Abwasserreinigung, Klärschlamm, Indirekteinleiter, Wärmeversorgung, Nachhaltige Energieversorgung, Thermische Energie			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
<b>24 Monate</b>	<b>16.12.2019</b>	<b>15.12.2021</b>	<b>1</b>		
<b>Bewilligungsempfänger</b>	FH Münster			Tel	02551 9-62420
	Fachbereich Energie-Gebäude-Umwelt			Fax	02551 9-62717
	Stegerwaldstraße 39			Projektleitung	
	48565 Steinfurt			Dr.-Ing. Elmar Brüggling	
<b>Bewilligungsempfänger</b>	FH Münster			Bearbeiter	
	Fachbereich Energie-Gebäude-Umwelt			Tobias Weide, M.Sc.	
	Stegerwaldstraße 39			Thomas Holtrup, M.Sc.	
48565 Steinfurt					
<b>Kooperationspartner</b>	Privatmolkerei Naarmann Matthias Kemper Wettringer Straße 58 48482 Neuenkirchen				
<b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b>					
<p>Deutschland zählt mit der Produktion von jährlich etwa 28 Millionen Tonnen Rohmilch zu den größten Milcherzeugern weltweit. Rationalisierung und Unternehmenszusammenschlüsse führten dazu, dass weniger, dafür größere, produktionsstärkere Molkereien entstanden, wodurch auch die produzierten Abwassermengen anstiegen. Aufgrund hoher organischer Frachten und leichtabbaubarer Substanzen wie Zucker, Proteine oder organischer Säuren eignen sich Molkereiabwässer besonders für die anaerobe Vergärung zu Biomethan und damit zur energetischen Nutzung. Diese Abwässer werden allerdings nur selten verwertet und in über 90 % der Molkereien kostenintensiv entsorgt. Verfahren zur anaeroben Vorbehandlung der Abwässer ermöglichen den Molkereien Energie in Form von Methan zu gewinnen und dem Unternehmen zurückzuführen. Dadurch lassen sich betriebsintern CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren und Energiekosten einsparen.</p> <p>Ziel des Projekts ist, am Beispiel der Privatmolkerei Naarmann, ein Abwasserbehandlungskonzept zu entwickeln und zu optimieren, in dem sowohl die Abwasserreinigungsleistung sowie die energetischen Nutzungsmöglichkeiten dargestellt werden. Mit diesem Konzept werden schließlich Scale-Up und Implementierungsdaten ermittelt, die ebenfalls auf andere Molkereien übertragen werden können.</p>					
<b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b>					
<p>Im Projekt wurde zur Behandlung und zur energetischen Nutzung von Molkereiabwässern ein Verfahrenskonzept entwickelt und dieses am Beispiel des Standorts der Privatmolkerei Naarmann ökonomisch und ökologisch bewertet. Dazu wurden zunächst die Energie- und Stoffströme der Molkerei erfasst sowie die Abwasserströme vor Ort betrachtet und beprobt. Anhand der Bilanzen und Analyseergebnisse wurden die Abwasserströme bewertet und die geeignete Reaktortechnik für das Verfahrenskonzept ausgewählt. Anschließend wurde auf Basis dieser Erkenntnisse eine halbtechnische Versuchsanlage geplant, gebaut und mit dem Molkereiabwasser betrieben. Mit der Technikumsanlage wurde ein Versuchsprogramm durchgeführt, das schließlich Aussagen über die Abbaubarkeit des Abwassers und die energetischen Potentiale liefert sowie Scale-Up Daten für die Implementierung in der Großtechnik bereitstellt. Dazu wurde der Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den Methanertrag und die Methanbildungsrate sowie die Abbaugrade des Chemischen Sauerstoffbedarfs (CSB) ermittelt. Diese Verfahrensdaten dienen abschließend dazu die Integration des Verfahrenskonzepts am Standort der Privatmolkerei Naarmann ökologisch und ökonomisch zu bewerten. Dazu wurden CO<sub>2</sub>-Bilanzen erstellt, Betriebs- und Investitionskosten ermittelt sowie Einsparungsmöglichkeiten beim Einkauf von Erdgas und der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Steuern dargestellt.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☒ An der Bornau 2 ☒ 49090 Osnabrück ☒ Tel 0541/9633-0 ☒ Fax 0541/9633-190 ☒ <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a>					

## Ergebnisse und Diskussion

Die im Projekt erzielten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Energie- und Abwasserströme der Privatmolkerei Naarmann wurden erfasst und bewertet
2. Analyse und Bewertung der Energieströme
  - 0,34 kWh<sub>Erdgas</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub> & 0,01 kWh<sub>Strom</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub>
  - CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Molkerei: 13.720 t CO<sub>2</sub>/a bzw. 0,09 kg CO<sub>2</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub>
  - 88 % des Strombedarfes & 26 % des Wärmebedarfes durch KWKK-Prozess abgedeckt
3. Analyse und Bewertung der anaeroben Abbaubarkeit der Abwasserströme:
  - Das Molkereiabwasser lässt sich effizient, anaerob abbauen
  - Der anaerobe Abbau weist keine Hemmungen durch Störstoffe u. Inhaltsstoffe im Abwasser auf
  - Zugabe von Nährstoffen für den Betrieb der anaeroben Reaktoren nicht notwendig
4. Es wurde eine halbtechnische Versuchsanlage zur Erfassung von Scale-Up Daten betrieben
5. Ergebnisse aus den praktischen Untersuchungen an der halbtechnischen Versuchsanlage und des Molkereiabwassers:
  - Reaktorspezifische Methanbildungsrate von bis zu 1,5 Nm<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d)
  - Es wurden CSB-Abbaugrade von über 70 % (anaerob) und mit zusätzlicher aerober Behandlung sind CSB-Abbaugrade von über 90 % erreicht
  - CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential von bis zu 5 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abwasser</sub>
6. Ergebnisse der technischen und ökonomischen Bewertung des anaeroben Reaktorkonzeptes:
  - Jährliche Erdgaseinsparungen von 5 – 6 % durch Biomethanrückführung
  - Jährliche Kosteneinsparungen von über 90.000 €/a
  - Treibhausgaseinsparungen von bis zu 1.000 t CO<sub>2</sub>e/a
7. Empfehlung des entwickelten Konzeptes aus Misch- und Ausgleichsbecken, Druckentspannungsflotationsanlage und EGSB-Reaktor für die anaerobe Abwasserbehandlung bei der Privatmolkerei Naarmann

## Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt „EnerMolk“ wurde bei folgenden Veranstaltungen und Medien präsentiert:

- Präsentation des Projekts bei der PIUS-Länderkonferenz vom 03. bis 04.03.2021 (Online)
- „Die Energie aus dem Abwasser gewinnen“, FH Münster Pressemitteilung vom 11.05.2020 (Zugriff: <https://www.fh-muenster.de/egu/news/pressearchiv.php?pmid=8245>)
- „Naarmann: Energie aus Abwasser gewinnen“, Münsterländische Volkszeitung vom 15.05.2020
- „Das Beste aus Resten“, Westfälische Zeitung vom 25.05.2020
- „Die Energie aus dem Abwasser gewinnen“, Wirtschaft Münsterland Magazin 03/2020, S. 43
- „Molkereiabwasser-Behandlung für ein nachhaltiges Energiekonzept“, Wasserwirtschaft Wassertechnik (wwt) Fachmagazin 09/2020, S. 14
- Veranstaltung, 11.# energie.frühstück – Energieerzeugung durch Abwasserbehandlung, Erneuerbare Energie Accelerator by storch.energy, 04.04.2022
- Veranstaltung, Technologie Hessen: Bio. Innovationen. Stärken „Wasser und Boden – Stoffströme nutzen, Ressourcen schonen“, 07.04.2022

## Fazit

Im Rahmen des Projekts konnten die energetischen Nutzungsmöglichkeiten von Molkereiabwässern am Beispiel der Fa. Naarmann dargestellt und erfasst werden. Die durch die anaerobe Abwasserbehandlung gewonnene Energie kann in Form von Biomethan der Molkerei zurückgeführt werden. Hierdurch werden Treibhausgasemissionen in Form von CO<sub>2</sub> verringert und das Abwasser- und Energiekonzept der Molkerei verbessert. Gleichzeitig werden die organischen Frachten im Abwasser reduziert und dadurch kommunale Kläranlagen lokal entlastet. Darüber hinaus lässt sich das am Beispiel der Fa. Naarmann entwickelte Abwasserkonzept auf andere Molkereien übertragen und anwenden.

## INHALTSVERZEICHNIS

PROJEKTKENNBLATT .....	III
ZUSAMMENFASSUNG .....	VII
ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	IX
TABELLENVERZEICHNIS .....	XI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	XII
<b>1 EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2 DEUTSCHE MILCHWIRTSCHAFT .....</b>	<b>2</b>
<b>3 VORGEHENSWEISE .....</b>	<b>4</b>
<b>4 PROJEKTERGEBNISSE.....</b>	<b>10</b>
4.1 Erfassung und Bewertung der Energie- und Stoffströme .....	10
4.1.1 Privatmolkerei Naarmann .....	10
4.1.2 Energie- und Stoffströme .....	12
4.1.3 Abwassersituation Privatmolkerei Naarmann .....	15
4.1.4 Abwasseranalytik .....	18
4.1.5 Bestimmung der anaeroben Abbaubarkeit .....	20
4.1.6 Zusammenfassung Arbeitspaket 1 .....	23
4.2 Planung, Beschaffung und Inbetriebnahme der Technikumsanlage .....	24
4.2.1 Reaktorauswahl für die halbtechnische Versuchsanlage .....	24
4.2.2 Verfahrenskonzepte .....	25
4.2.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 2 .....	29
4.3 Versuche zur Optimierung der anaeroben Abwasserbehandlung .....	30
4.3.1 Verfahrenskonzept 1 .....	30
4.3.2 Verfahrenskonzept 2 .....	34
4.3.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 3 .....	38
4.4 Bewertung des Verfahrenskonzeptes und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	38
4.4.1 Technische Bewertung der Verfahrenskonzepte.....	38
4.4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	42
4.4.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 4 .....	46
4.5 Zusammenfassung der Projektergebnisse .....	48

<b>5</b>	<b>ÖFFENTLICHKEITSARBEIT .....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>FAZIT UND EMPFEHLUNG .....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>54</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projektes wurde eine halbtechnische Versuchsanlage für die anaerobe und aerobe Molkereiabwasserbehandlung geplant, gebaut und betrieben. Für die Auswahl der Reaktorkonzepte wurden zunächst Abwasser- und Energieströme der Privatmolkerei Naarmann erfasst sowie Teilströme beprobt und analysiert. Hierbei wurde festgestellt, dass das Molkereiabwasser für den anaeroben Abbau geeignet ist und eine Abwasserspeicherung in einem Misch- und Ausgleichsbecken durch Ausgleich von Frachtspitzen und des pH-Wertes einen positiven Effekt auf die anaerobe Abwasserbehandlung hat.

Nach Planung und Inbetriebnahme der modular konzeptionierten Versuchsanlage wurden zwei Verfahrenskonzepte, bestehend aus jeweils einem anaeroben (anaerobes Belebungsverfahren und EGSB-Reaktor) und aeroben Reaktorkonzept, untersucht und im Anschluss der Betrieb der Versuchsanlage optimiert. Hierfür wurde während des Betriebs der Methanertrag, die Methanproduktionsrate und Reinigungsleistung als Beurteilungsgrundlage bestimmt. Die anaerobe Abbauleistung zeigte in beiden anaeroben Reaktoren ein Optimum bei einer Verweilzeit von rund 37 h. Hierbei wurde im ersten Konzept durch die anaerobe Behandlung eine Schmutzfrachtreduzierung von bis zu 86 % festgestellt, im zweiten Konzept eine Reduzierung von bis zu 84 %. In beiden Verfahrenskonzepten wurde über die Gesamtversuchslaufzeit die Schmutzfracht durch die anaerobe und aerobe Behandlung um mehr als 90 % reduziert. Die maximale Reaktoreffizienz in Bezug auf die Gasbildung lag bei den Reaktoren bei einer Verweilzeit von 23 h bzw. 25 h. Hierbei wurde ein CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential von rund 4 kg CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> im anaeroben Belebungsverfahren und rund 5 kg CO<sub>2e</sub>/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> im EGSB-Reaktor bei thermischer Nutzung des Biomethans ermittelt. Die technische Bewertung der anaeroben Reaktorkonzepte ergab die Empfehlung einer Vor- bzw. Nachbehandlung des Molkereiabwassers mittels Flotationsanlage. Aus der darauffolgenden ökonomischen Bewertung resultierte bei den geeignetsten Betriebspunkten von 37 h in Konzept 1 und 33 h Konzept 2 eine Kosteneinsparung von rund 87.000 €/a im anaeroben Belebungsverfahren und rund 99.400 €/a im EGSB-Reaktor. Durch Erdgassubstitution in der Privatmolkerei Naarmann besteht somit die Möglichkeit durch die anaerobe Abwasserbehandlung rund 6 % an Erdgas einzusparen. Hierbei könnte die Fa. Naarmann durch die anaerobe Behandlung im anaeroben Belebungsverfahren rund 900.000 kg CO<sub>2e</sub>/a und im EGSB-Reaktor rund 1.000.000 kg CO<sub>2e</sub>/a an Treibhausgasen reduziert werden.

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen und den Unternehmensdaten der Privatmolkerei Naarmann konnten zwei Konzepte zur Steigerung der betrieblichen Energieeffizienz entwickelt werden. Durch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnte ermittelt werden, dass das Konzept, bestehend aus Misch- und Ausgleichsbecken, Druckentspannungsflotationsanlage und EGSB-Reaktor, für die Privatmolkerei Naarmann wirtschaftlicher und somit zu empfehlen ist. Das für die Molkerei Naarmann entwickelte Konzept zur anaeroben Abwasserbehandlung lässt sich auch auf andere Molkereien übertragen.

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Anzahl der milchverarbeitenden Betriebe in Deutschland (Milchindustrie- Verband e.V. 2020) .....	2
Abbildung 2-2:	Molkereistruktur in Deutschland (bearbeitet) (ZMB GmbH 2021) .....	3
Abbildung 3-1:	Versuchsschema des verwendeten Batch-Tests zur Ermittlung der Gaserträgen an der FH Münster, Fachbereich EGU (FHM 2019) .....	6
Abbildung 3-2:	Gliederung der anaeroben Reaktorkonzepte (Rosenwinkel et al. 2015) .....	7
Abbildung 4-1:	Privatmolkerei Naarmann (Luftbild) .....	10
Abbildung 4-2:	Schema einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung-Anlage (ASUE 2019) .....	12
Abbildung 4-3:	Schematische Darstellung der Energie- und Stoffströme der Privatmolkerei Naarmann von 2020 (Kemper 2021) .....	13
Abbildung 4-4:	Schematische Darstellung der Energieströme der Privatmolkerei Naarmann aus dem Jahr 2020 (Kemper 2021) .....	14
Abbildung 4-5:	Visualisierung der Abwasserströme der Privatmolkerei Naarmann (Kemper 2021) .....	17
Abbildung 4-6:	Biogas- und Methanbildungskurve der Molkereiabwasserprobe ,Abwasserstrom nach MAB‘ .....	22
Abbildung 4-7:	R&I Fließbild des ersten Verfahrenskonzeptes .....	26
Abbildung 4-8:	R&I Fließbild des zweiten Verfahrenskonzeptes .....	27
Abbildung 4-9:	Vorder- und Rückseite der halbtechnischen Versuchsanlage .....	28
Abbildung 4-10:	Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den FM-spezifischen sowie CSB-spezifischen Methanertrag und die Methanproduktionsrate (Verfahrenskonzept 1) .....	31
Abbildung 4-11:	Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den CSB-Abbaugrad in der anaeroben sowie aeroben Anlagenstufe und im Gesamtsystem (Verfahrenskonzept 1) .....	32
Abbildung 4-12:	CSB-Konzentration des Zulaufs über die Gesamtversuchslaufzeit des Verfahrenskonzeptes 1 inklusive des berechneten Mittelwertes .....	33
Abbildung 4-13:	Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den FM-spezifischen sowie CSB-spezifischen Methanertrag und die Methanproduktionsrate (Verfahrenskonzept 2) .....	35

Abbildung 4-14: Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den CSB-Abbaugrad in der anaeroben sowie aeroben Anlagenstufe und im Gesamtsystem (Verfahrenskonzept 2).....36

Abbildung 4-15: Sedimentationsversuch zur Ermittlung der Schwimmschlammschicht in der kontinuierlichen Versuchsphase von Verfahrenskonzept 1.....40

Abbildung 4-16: Probe vom Ablauf des EGSB-Reaktors während des Betriebes von Betriebspunkt 5 in Verfahrenskonzept 2 (HRT  $\sim$  21 h).....41

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3-1:	Untersuchte Parameter für die Abwasseranalytik der Molkereiabwässer .....	5
Tabelle 4-1:	Anlagen zur Energiebereitstellung der Privatmolkerei Naarmann (molkerei industrie 2021; 2G Energietechnik 2022) .....	15
Tabelle 4-2:	Ergebnisse von ausgewählten Parametern aus der Abwasseranalytik der Molkereiabwasserproben und Grenzwerte der anaeroben Molkereiabwasserbehandlung .....	19
Tabelle 4-3:	Ermittelte Biogas- sowie Methanerträge inkl. Standardabweichungen der Molkereiabwasserproben 1, 2 und 3 der Privatmolkerei Naarmann .....	21
Tabelle 4-4:	Ermittelte Biogas- sowie Methanerträge inkl. Standardabweichungen der Molkereiabwasserproben vor und nach MAB der Privatmolkerei Naarmann .....	21
Tabelle 4-5:	Bewertung der anaeroben Reaktoren (Rosenwinkel et al. 2015) .....	24
Tabelle 4-6:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des anaeroben Belebungsverfahrens – Teil 1 (Verfahrenskonzept 1) .....	43
Tabelle 4-7:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des anaeroben Belebungsverfahrens – Teil 2 (Verfahrenskonzept 1) .....	44
Tabelle 4-8:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des EGSB-Reaktors – Teil 1 (Verfahrenskonzept 2) .....	45
Tabelle 4-9:	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des EGSB-Reaktors – Teil 2 (Verfahrenskonzept 2) .....	45

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

°C	Grad Celsius
Abw.	Abwasserstrom
Ammoniak-AKM	Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschine
BHKW	Blockheizkraftwerk
BMF	Bundesministerium für Finanzen
BSB <sub>5</sub>	Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen
c	Konzentration
CH <sub>4</sub>	Methan
CIP	Cleaning in Place
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CO <sub>2</sub> e	CO <sub>2</sub> -Äquivalente
COP	Coefficient of Performance
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
CSTR	Continuous Stirred-Tank Reactor
ct	Cent
d	Tag
DIN	Deutsches Institut für Normung (Deutsche Norm)
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed
EN	Europäische Norm
FM	Frischmasse
FOS	Flüchtige organische Säuren
Gew.-%	Gewichtsprozent
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
H-Produkte	Ultrahocherhitzte Produkte
IBC	Intermediate Bulk Container
ISO	Internationale Organisation für Normung (Internationaler Standard)
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKK	Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung
l	Liter

$l_N$	Normliter
$m^2$	Quadratmeter
$m^3$	Kubikmeter
MAB	Misch- und Ausgleichsbecken
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
mg	Milligramm
MPR	Methanproduktionsrate
$NH_4^+$	Ammonium
$NH_4-N$	Ammonium-Stickstoff
$Nm^3$	Normkubikmeter
$O_2$	Sauerstoff
oTR	organischer Trockenrückstand
R	Reaktor
SIP	Sterilization in Place
t	Tonne
TAC	Gesamtes anorganisches Carbonat
THG	Treibhausgas
TKN	Gesamter Kjeldahlstickstoff (Total Kjeldahl Nitrogen)
TR	Trockenrückstand
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vol.-%	Volumenprozent
$\eta_{el}$	Wirkungsgrad elektrisch
$\eta_{th}$	Wirkungsgrad thermisch

## 1 EINLEITUNG

Im Zuge der Energiewende in Deutschland wird im verfassten Klimaschutzplan eine Reduktion der Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen bis zum Jahr 2030 um mindestens 55 % und bis zum Jahr 2050 um 95 % im Vergleich zum Jahr 1990 angestrebt. Zur Erreichung der Ziele ist u.a. eine nachhaltige Energiewirtschaft mit der integrierten Nutzung von thermischer und stofflicher Energie in Unternehmen ein wichtiger Bestandteil. Insbesondere durch die CO<sub>2</sub>-Bepreisung werden deutsche Industrieunternehmen angetrieben, ihre betrieblichen Energiekonzepte umzustellen und zu optimieren. (BMU 2016; Bundesregierung 2021a, 2021b) Vor allem energieintensive Branchen, wie die milchverarbeitende Industriebranche, stellt dies vor große Herausforderungen. Produktionsstarke Unternehmen der milchverarbeitenden Industrie, die sich durch Rationalisierungen und Unternehmenszusammenschlüsse gebildet haben, stehen vor der Aufgabe, steigende Abwassermengen und –belastungen ressourcenschonend zu behandeln. (Milchindustrie-Verband e.V. 2020) Zur Reduzierung der steigenden Abwasserfrachten werden nur selten anaerobe Vorbehandlungsverfahren aus der industriellen Abwassertechnik eingesetzt. Dabei bietet diese Technologie die Möglichkeiten, organische Frachten effizient und ressourcenschonend zu reduzieren, CO<sub>2</sub>-neutrales Biomethan als Energieträger zu erzeugen und die Abwasserentsorgungskosten zu senken. Vor allem Abwasser aus der milchverarbeitenden Industrie, im Folgenden als Molkereiabwasser bezeichnet, ist für die anaerobe Abwasserbehandlung gut geeignet, da das Abwasser leicht abbaubare Substanzen, wie Zucker, Proteine und organische Säuren, enthält. Diese Abwässer werden allerdings nur selten verwertet und in über 90 % der Molkereien kostenintensiv entsorgt. (DWA 2011)

Deshalb ist es das Ziel des Projekts „EnerMolk“, am Beispiel der Privatmolkerei Naarmann, ein Abwasserbehandlungskonzept zu entwickeln und zu optimieren, in dem sowohl die Abwasserreinigungsleistung sowie die energetischen Nutzungsmöglichkeiten dargestellt werden. Mit diesem Konzept werden schließlich Scale-Up und Implementierungsdaten ermittelt, die ebenfalls auf andere Molkereien übertragen werden können. Abschließend wird am Beispiel der Molkerei Naarmann eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, bei Implementierung des untersuchten Abwasserbehandlungskonzepts, durchgeführt.

## 2 DEUTSCHE MILCHWIRTSCHAFT

Die deutsche Milchwirtschaft war in den vergangenen Jahren durch einen großen Strukturwandel geprägt. Milcherzeugende Betriebe verzeichnen im Milchkuhbestand ein kontinuierliches Wachstum, während sich die Zahl der Betriebe in Deutschland verringert. Zusätzlich konnte die Milchleistung der Kühe durch eine verbesserte Tierhaltung und Zuchtausrichtungen erhöhte werden, wodurch die Rohmilchmenge in Deutschland angestiegen ist. Diese Entwicklung ist in der deutschen Molkereiwirtschaft ebenfalls zu erkennen. Auch hier verringerte sich die Anzahl an milchverarbeitenden Betrieben kontinuierlich, während die Größe der noch bestehenden Betriebe durch Zusammenschlüsse stieg. Wie in Abbildung 2-1 zu sehen, waren es im Jahre 1950 noch 3.401 milchverarbeitende Betriebe in Deutschland, wohingegen es im Jahr 2020 noch 158 Betriebe in Deutschland gab. (Milchindustrie-Verband e.V. 2021)

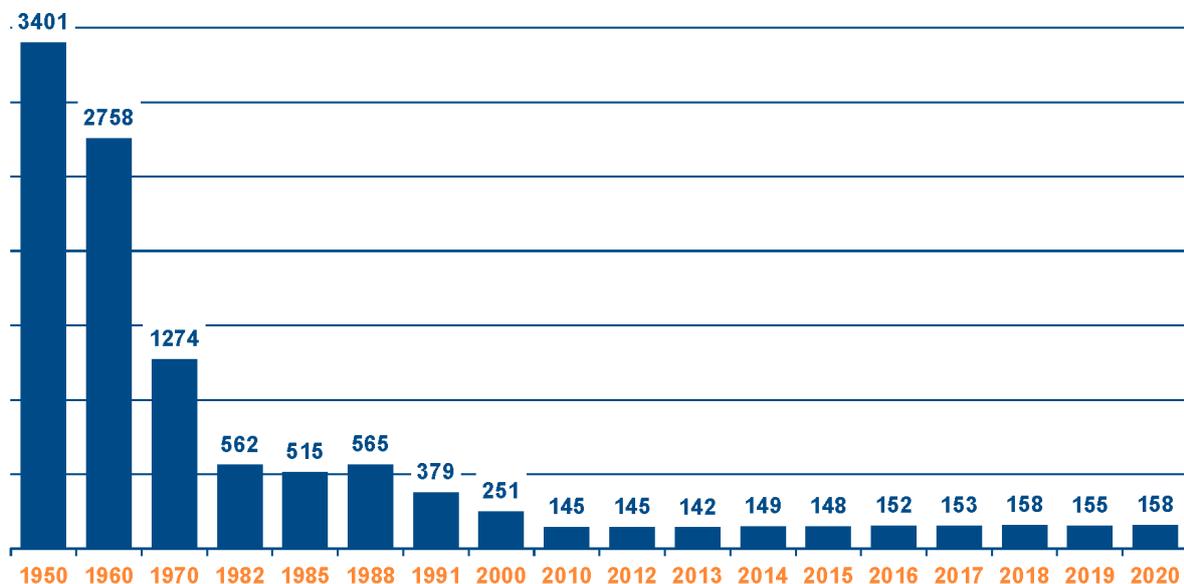


Abbildung 2-1: Anzahl der milchverarbeitenden Betriebe in Deutschland (Milchindustrie-Verband e.V. 2021)

Als Hauptgrund des strukturellen Wandels wird die Frage der betriebswirtschaftlichen Effizienz, ein verbessertes Marketing und Investitionen in Innovationen in einem globalisierten und wettbewerbsorientierten Markt genannt. Der Prozess des Wandels gilt in der Molkereiwirtschaft in Deutschland noch nicht als abgeschlossen, so dass die Betriebe wachsen und effizienter werden, wohingegen kleinere Betriebe sich größeren Betrieben anschließen werden (Milchindustrie-Verband e.V. 2020). Wie in Abbildung 2-2 zu sehen ist, wurden in milchverarbeitenden Betrieben in Deutschland im Jahr 2018 insgesamt 31.717 Mio. Tonnen (t) Rohmilch verarbeitet, ein Anstieg von mehr als 5.000 Mio. t<sub>Rohmilch</sub> seit 1994.

Durchschnittlich wurden somit 199 Mio. Kilogramm (kg) Rohmilch pro Jahr (a) je Unternehmen angeliefert. Die Privatmolkerei Naarmann GmbH, Projektpartner im Projekt „EnerMolk“, lag mit einer jährlichen Rohmilchanlieferung von rund 160 Mio. kg<sub>Rohmilch</sub>/a knapp unter dem Durchschnitt. Mit der Menge an verarbeiteter Rohmilch ist die Fa. Naarmann zu den Unternehmen mit einer Menge von 100.000 bis unter 300.000 t<sub>Rohmilch</sub> einzuordnen und liegt von der Größenordnung in der Mitte von den 158 Betrieben. Des Weiteren kann die Fa. Naarmann in zwei Kategorien eingeordnet werden, der Produktion von Frischmilcherzeugnissen, darunter auch Kondensmilch, und der Produktion von Trockenmilchpulver. (ZMB GmbH 2021)

	1994	1997	2003	2009	2018
<b>Milchverarbeitende Unternehmen</b>	314	269	230	194	159
- davon mit eigener Milchanlieferung	284	256	201	148	115
Milchanlieferung (Mio. t)	26.047	27.171	27.563	28.613	31.717
Durchschnittliche Milchanlieferung je Unternehmen (Mio. kg)	83	101	120	147	199
Betriebe	414	356	318	225	.
<b>Unternehmen mit Milchverarbeitung nach Größenklassen</b>					
von ..... bis ..... (1.000 t)					
0 bis unter 50	164	121	111	101	66
50 bis unter 100	58	60	37	22	17
100 bis unter 300	69	60	53	39	51
über 300	23	28	29	30	25
über 400	.	14	16	13	9
über 1.000	.	.	.	4	7
<b>Unternehmen nach der Produktionsrichtung</b>					
Frischmilcherzeugnisse	245	220	173	133	94
darunter Konsummilch	227	203	148	111	64
Kondensmilch	17	16	14	12	.
Trockenmilchpulver	51	48	.	41	38
Milchzucker	.	.	7	8	.
Butter	177	157	109	83	69
Käse insgesamt	248	217	150	167	106
Hartkäse	48	48	40	43	.
Schnittkäse	90	84	66	75	.
Weichkäse	60	48	.	42	.
Pasta Filata	.	.	19	25	.
Sauermilch- und Kochkäse	37	30	22	23	.
Friskäse	125	112	62	67	.
Schmelzkäse	22	23	19	15	.
Kasein/Milcheiweißerzeugnisse	5	3	4	5	.

Abbildung 2-2: Molkereiestruktur in Deutschland (bearbeitet) (ZMB GmbH 2021)

### 3 VORGEHENSWEISE

#### **Erfassung und Bewertung der Energie- und Stoffströme (Arbeitspaket 1)**

Mit dem Abschluss des ersten Arbeitspaketes wurde das Ziel verfolgt, erfasste Energie- und Stoffströme der Fa. Naarmann zu bewerten und die Abwasserteilströme zu analysieren. Hierfür wurde zunächst die Produktionsstätte der Fa. Naarmann besichtigt und in Kooperation mit der Fa. Naarmann die Produktionsschritte, Energie- sowie Abwassersituation aufgenommen. Die Aufnahme ermöglichte die schematische Darstellung der Energie- und Stoffströme sowie die der Abwassersituation. Für die Bewertung von Abwasserteilströme konnte durch die schematischen Darstellung der Abwassersituation der Fa. Naarmann Abwasserteilströme mit hohen organischen Beladungen identifiziert und beprobt werden. Die nachfolgende Analyse der Abwasserproben umfasste ein detailliertes Abwasserscreening und die Bestimmung der anaeroben Abbaumöglichkeiten sowie des Biomethanpotentials nach „Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4630 - Vergärung organischer Stoffe“ (VDI 2016). Das Abwasserscreening beinhaltete die Untersuchungen der in Tabelle 3-1 aufgeführten Parameter. Sie stellt neben den ermittelten Parametern die verwendeten Methoden und genutzten Verfahrensgrundlagen dar. Bei der Untersuchung der Spurenelemente wurden folgende Elemente analysiert: Calcium, Cobalt, Eisen, Kalium, Kupfer, Magnesium, Mangan, Molybdän, Natrium, Nickel, Schwefel, Selen und Zink. Zur Beurteilung der anaeroben Abbaubarkeit der Molkereiabwasserproben wurde das Biogaspotential durch Batch-Tests nach VDI 4630 bestimmt. In Abbildung 3-1 ist der Batch-Test schematisch dargestellt. Die Batch-Tests wurden im 1 Liter (l) Maßstab durchgeführt. Zusätzlich zu den Abwasserproben wurde Impfmateriale als Referenzprobe untersucht. Als Impfmateriale wurde Faulschlamm aus einer nahegelegenen Kläranlage genutzt. Die Abwasserproben wurden über den Versuchszeitraum mittels Ölbad und Thermostat auf 40 Grad Celsius (°C) erhitzt. Der Versuchszeitraum war abhängig vom Verlauf der Vergärung, wobei eine Mindestlaufzeit von 25 Tagen vorgegeben wurde. Die Versuche galten als abgeschlossen, wenn an drei aufeinanderfolgenden Tagen weniger als 0,5 % des, bis dahin insgesamt entstandenen, Gases erzeugt wurde. Das entstandene Biogas wurde quantitativ (Biogas Volumen) und qualitativ (Methan (CH<sub>4</sub>), CO<sub>2</sub>, Sauerstoff (O<sub>2</sub>) und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S)) bestimmt.

Tabelle 3-1: Untersuchte Parameter für die Abwasseranalytik der Molkereiabwässer

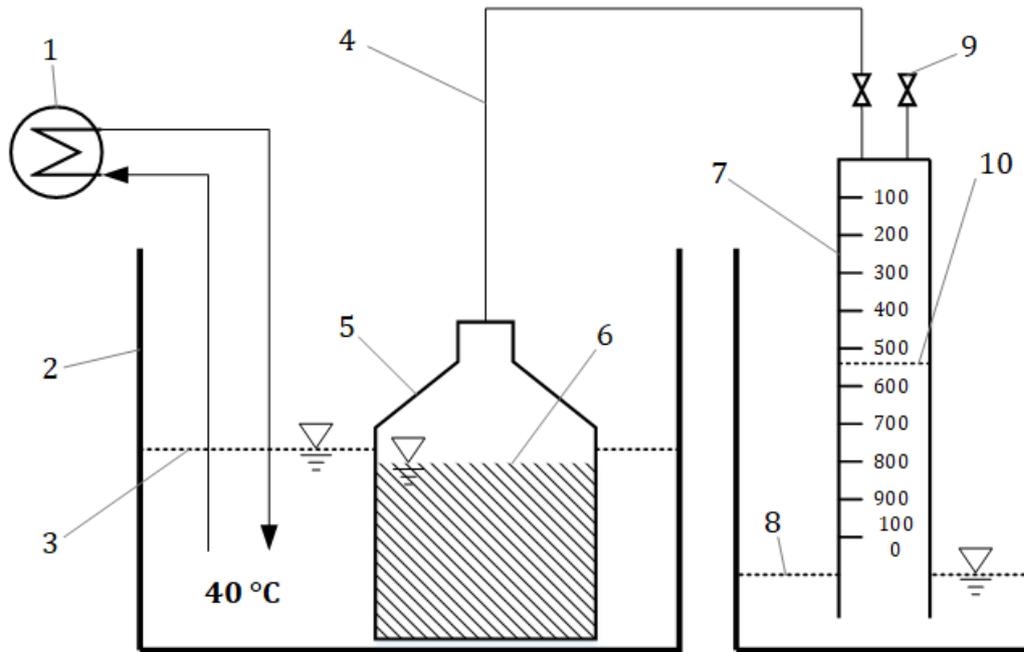
<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Methode</i>	<i>Verfahrensgrundlage</i>
<i>Trockenrückstand (TR)</i>	Gew.-%	Differenzwiegung	DIN EN 15934 2012-11
<i>Organischer Trockenrückstand (oTR)</i>	Gew.-%	Differenzwiegung	DIN EN 15935 2012-11
<i>pH-Wert</i>	-	Elektrode	DIN 38404-5
<i>Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)</i>	mg/l	Photometrisch (LCK 014)	DIN ISO 15705
<i>Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen (BSB<sub>5</sub>)</i>	mg/l	Photometrisch (LCK 555)	EN 1899-1
<i>Ammonium-Stickstoff (NH<sub>4</sub>-N)</i>	mg/l	Photometrisch (LCK 303)	DIN 38406-5
<i>Phosphor</i>	mg/l	Photometrisch nach Aufschluss (LCK 349)	DIN 38405 D11-4
<i>Organische Säuren</i>	mg/l	Ionenchromatographie (IC)	Hausmethode (FH Münster)
<i>Kjeldahl-Stickstoff (TKN)</i>	mg/l	Rücktitration	DIN EN 25663
<i>Spurenelemente</i>	mg/l	Induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektroskopie (ICP-OES)	DIN EN ISO 11885 / DIN EN ISO 17294-2

Legende:

Gew.-%: Gewichtsprozent                      mg/l: Milligramm pro Liter                      LCK: Küvettestest der Fa. Hach

DIN: Deutsches Institut für Normung (Deutsche Norm)                      EN: Europäische Normen                      ISO: Internationale Organisation für Normung (Internationaler Standard)

Auf Grundlage der quantitativen und qualitativen Gasmessungen wurden die Frischmasse (FM)- und Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)-spezifischen Biogas- und Methanerträge ermittelt. (VDI 2016)



Legende:

- |  |                              |                          |
|--|------------------------------|--------------------------|
| 1: Thermostat  | 2: Ölbad                     | 3: Silikonöl             |
| 4: Schlauchverbindungen                                  | 5: Batch-Fermenter (V = 1 l) | 6: Fermentationssubstrat |
| 7: Eudiometer (V = 1 l)                                  | 8: Sperrflüssigkeit          | 9: Ventil zur Gasabnahme |
| 10: Flüssigkeitsstand der Sperrflüssigkeit im Eudiometer |                              |                          |

Abbildung 3-1: Versuchsschema des verwendeten Batch-Tests zur Ermittlung der Gaserträgen an der FH Münster, Fachbereich EGU (FHM 2019)

### Planung, Bewertung und Inbetriebnahme der Technikumsanlage (Arbeitspaket 2)

Als Meilenstein des zweiten Arbeitspaketes wurde die Planung, der Bau und die Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage zur anaeroben Molkereiabwasserbehandlung definiert. Für die Planung der halbtechnischen Versuchsanlage wurden die in Abbildung 3-2 dargestellten anaeroben Reaktorkonzepte berücksichtigt. Die Versuchsanlage wurde modular konzipiert und sollte aus zwei anaeroben sowie einer aeroben Verfahrensstufe bestehen. Hierdurch bestand die Möglichkeit zwei unterschiedliche anaerobe Verfahrenskonzepte für die Abwasserbehandlung zu testen und zu bewerten und falls erforderlich durch eine zweistufige anaerobe Abwasserbehandlung, stark belastete Abwasserströme zu behandeln. Weiterhin wurde festgelegt, dass ausschließlich Reaktoren mit Biomassenanreicherung genutzt wurden, die sich in der industriellen Abwasserreinigung bereits großtechnisch bewährt haben.

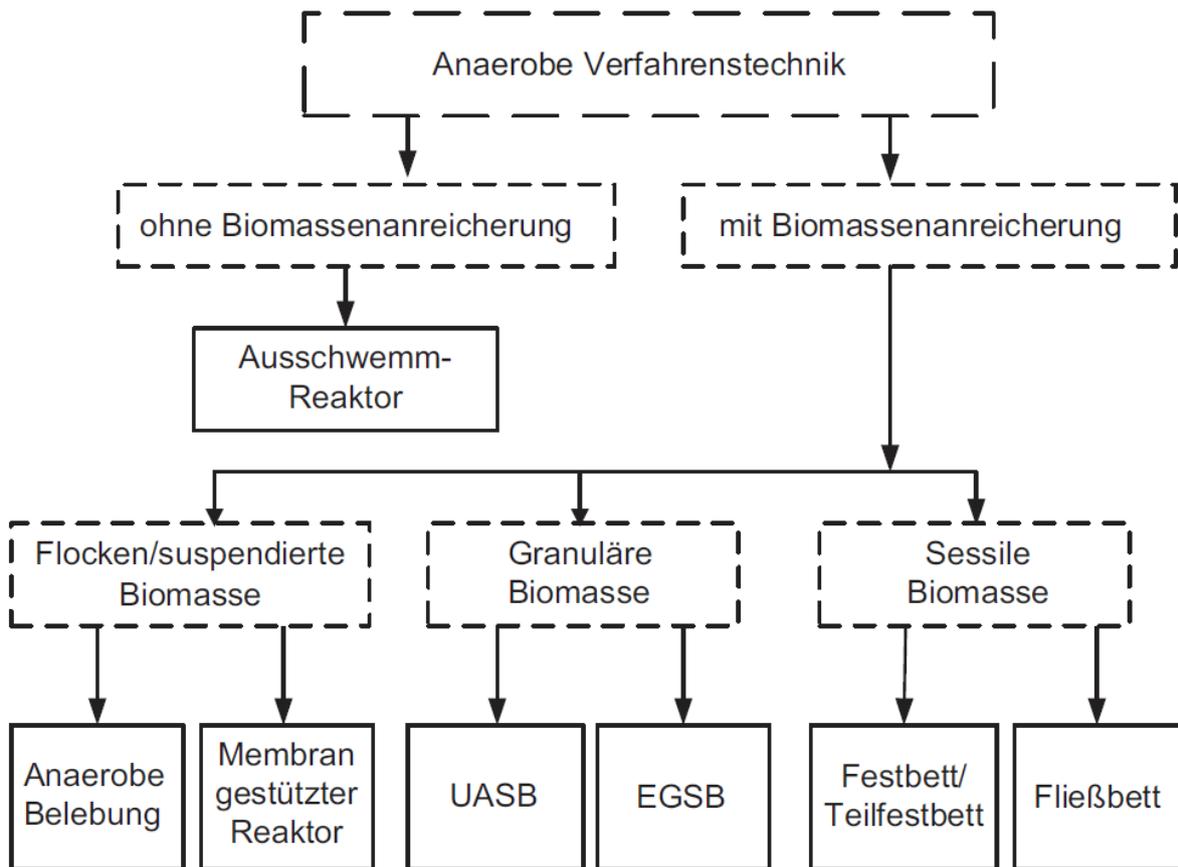


Abbildung 3-2: Gliederung der anaeroben Reaktorkonzepte (Rosenwinkel et al. 2015)

Die anaeroben Reaktorkonzepte wurden hinsichtlich der folgenden Kriterien bewertet:

- Anlagentyp nach organischer Belastung
- Investitions- & Betriebskosten
- Platzbedarf
- Empfindlichkeit
- Einsatz in der milchverarbeitenden Industrie

Auf dieser Grundlage wurden zwei anaerobe Reaktorkonzepte ausgewählt und der Bau der Versuchsanlage im Technikum des Labors für Abwasser- und Umwelttechnik an der FH Münster in Steinfurt koordiniert. Die abschließende Inbetriebnahme umfasste die Gasdichtigkeitsprüfung der Reaktoren sowie Verrohrungen, Animpfung der Reaktoren und Fütterung der Versuchsanlage.

### **Versuche zur Optimierung der anaeroben Abwasserbehandlung (Arbeitspaket 3)**

Nach Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage wurde in Arbeitspaket 3 der Betrieb der Versuchsanlage hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Einsparungspotentials sowie des CSB-Abbaus optimiert.

Hierfür wurden praxisnahe Untersuchungen zur kontinuierlichen anaeroben und aeroben Molkereiabwasserbehandlung durchgeführt. Für die kontinuierlichen Versuche der für die anaerobe Abwasserbehandlung geeignetste Molkereiabwasserstrom genutzt. Die Untersuchungen umfassten zwei kontinuierliche Versuchsphasen, bei denen jeweils fünf Betriebspunkte (Verweilzeiten) untersucht wurden. Während der Versuchsphasen wurden die folgenden Parameter analysiert:

- Trockenrückstand (TR) & organischer Trockenrückstand (oTR)
- pH-Wert
- CSB & BSB<sub>5</sub> (Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen)
- Verhältnis von Flüchtigen organischen Säuren zum gesamten anorganischen Carbonat (FOS/TAC)
- Reaktortemperatur
- Gasqualität (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> & H<sub>2</sub>S) & -quantität (Biogas Volumen)

Für die Analysen wurden abhängig vom zu messenden Parameter Proben des Reaktorinhaltes, des Zulauf- sowie des Ablaufstromes der Reaktoren innerhalb des Verfahrenskonzeptes entnommen und analysiert.

Die Versuchslaufzeiten der einzelnen Betriebspunkte orientierten sich an die Anzahl der aufgenommenen Messwerte. Je Betriebspunkt wurden mindestens zehn Messwerte des CSB, BSB<sub>5</sub> und FOS/TAC aufgenommen. Die Analysen der dargestellten Parameter ermöglichten die Beurteilung der zwei konzeptionierten Versuchskonzepte hinsichtlich der Methanproduktion und Reinigungsleistung durch Ermittlung der Betriebsparameter der Methanproduktionsrate (MPR), des Methanertrags und des CSB- sowie BSB<sub>5</sub>-Abbaugrades.

#### **Bewertung des Verfahrenskonzeptes und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Arbeitspaket 4)**

Mit der Bearbeitung des vierten Arbeitspaketes wurde das Ziel verfolgt, die Verfahrenskonzepte technisch und ökonomisch zu bewerten sowie die Verfahrensdaten für ein großtechnisches Scale-Up zu ermitteln. Hierzu wurden die in Arbeitspaket 3 untersuchten Verfahrenskonzepte und Betriebspunkte hinsichtlich der Reaktoreffizienz, Betriebsstabilität bewertet und auf ihre Wirtschaftlichkeit geprüft. Die Bewertung der Reaktoreffizienz beinhaltete die Beurteilung der Methanproduktion und Reinigungsleistung, für die die Betriebsparameter des Methanertrags, der MPR und des CSB-Abbaugrades herangezogen wurden.

Die Bewertung der Betriebsstabilität basierte auf Beobachtungen des Anlagenbetriebes während des Betriebes der Verfahrenskonzepte. Unregelmäßigkeiten, die während des Betriebs beobachtet werden konnten, wurden dokumentiert. Anschließend folgte die Prüfung und Bewertung der Ursache(n). Die Prüfung der Wirtschaftlichkeit der Verfahrenskonzepte erfolgte durch Berechnung der Kosten-, Erdgas- und Treibhausgas (THG)-Einsparungen, die durch die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung mit dem jeweiligen Verfahrenskonzept generiert werden könnte. Die Berechnungen umfassten die jährlichen Einsparungen sowie Einsparungen je Kubikmeter Abwasser, die bei der Fa. Naarmann anfallen. Weiterhin wurde die Grundfläche, die für das jeweilige Verfahrenskonzept im großtechnischen Maßstab benötigt werden würde, berechnet. Für die Berechnungen wurden bereitgestellte Unternehmensdaten der Fa. Naarmann genutzt. Nach Prüfung der Wirtschaftlichkeit wurde zum einen eines der beiden Verfahrenskonzepte für die Implementierung des Konzeptes bei der Fa. Naarmann ausgewählt. Zum anderen wurde die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Molkereien dargestellt. Die daraus resultierenden Daten dienen als Grundlage für ein großtechnisches Scale-Up der Anlage.

## 4 PROJEKTERGEBNISSE

### 4.1 Erfassung und Bewertung der Energie- und Stoffströme

#### 4.1.1 Privatmolkerei Naarmann

Die Fa. Naarmann ist ein in Neuenkirchen (Kreis Steinfurt) ansässiges mittelständiges Unternehmen, in der rund 180 Mio. kg<sub>Rohstoff</sub>/a mit 190 Mitarbeitern verarbeitet und ein Jahresumsatz von 120 Mio. €/a generiert werden. Wie in der Luftbildaufnahme in Abbildung 4-1 zu erkennen, ist die Fa. Naarmann in einem Hauptproduktionsgelände und dem Hauptproduktionsgelände gegenüberliegendem Nebengelände aufgeteilt.

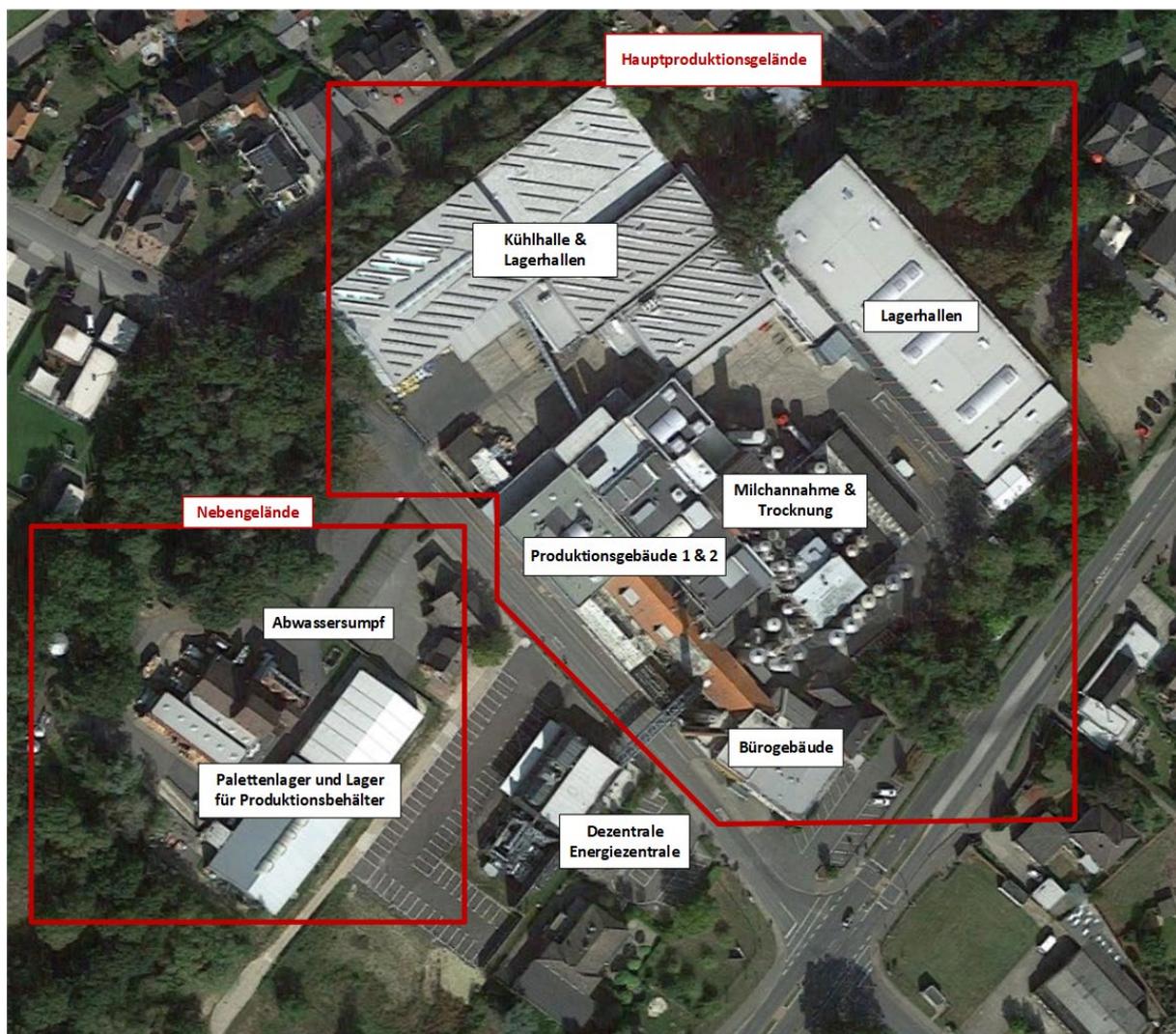


Abbildung 4-1: Privatmolkerei Naarmann (Luftbild)

Auf dem Nebengelände werden Intermediate Bulk Container (IBC), Paletten und nicht genutzte Produktionsteile gelagert. Des Weiteren werden auf dem Nebengelände die Abwasserteilströme aus der Produktion in einem Abwassersumpf zusammengeführt und anschließend zur nahegelegenen, kommunalen Kläranlage gepumpt. Das Hauptproduktionsgelände umfasst die beiden Produktionsgebäude, Bürogebäude, Hallen zur Lagerung sowie Kühlung und die Milchannahme inklusive des Trocknungsgebäudes. Zusätzlich zu den beiden Geländen liegt neben dem Nebengelände die dezentrale Energiezentrale, die auf dem Parkplatz der Fa. Naarmann errichtet wurde.

In der Produktion finden die im folgenden dargestellten Produktionsschritte statt (Kemper 2021):

- Milchannahme & Rohmilchbearbeitung
- Produktion Sauermilchprodukte
- Produktion ultrahocherhitzte Produkte (H-Produkte)
- Produktion Milchkonzentrate
- Produktion Milchpulver
- Produktlagerung

Die Produktionsschritte sowie die ortsgebundene Reinigung und die Energiebereitstellung durch eine KWKK (Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung)-Anlage werden im Folgenden näher erläutert.

Die ortsgebundene Reinigung besteht aus einer Kombination aus CIP (Cleaning in Place)- und SIP (Sterilization in Place)-Reinigung. Eine Besonderheit stellt die der CIP-Reinigung nachfolgenden SIP-Reinigung dar, bei der die Produktionsanlagen nach Reinigung mittels Dampf sterilisiert werden. Für die Reinigung stehen der Molkerei insgesamt drei CIP-Anlagen zur Verfügung. Im Folgenden ist der Ablauf für die ortsgebundene Reinigung aufgeführt:

- 1) Spülen mit Retourwasser
- 2) Reinigung mit Natronlauge
- 3) Zwischenspülung mit Retourwasser
- 4) Spülen mit saurer Reinigungslösung
- 5) Klarspülung mit Frischwasser
- 6) Dampfsterilisation

Als Retourwasser wird Wasser bezeichnet, dass nach dem Reinigungsschritt 5 aufgefangen wird. (Kemper 2021)

Die Energiebereitstellung durch eine KWKK-Anlage ist eine für Molkereien moderne Methode Energie in Form von Strom, Wärme sowie Kälte bereitzustellen. (ASUE 2019) Bei KWKK-Anlagen werden KWK (Kraft-Wärme-Kopplung)–Anlagen mit Absorptionskältemaschinen kombiniert. Hierdurch kann Abwärme und Strom aus der KWK-Anlage zur Kälteerzeugung in der Absorptionskältemaschine genutzt werden. Im Falle der Fa. Naarmann werden Blockheizkraftwerke (BHKW) als KWK-Anlagen und für die Kälteerzeugung Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschinen (Ammoniak-AKM) eingesetzt. Die KWKK-Anlage wurde 2019 aufgestellt und in Betrieb genommen. Hierfür wurde neben dem Produktionsgelände eine Energiezentrale errichtet. In Abbildung 4-2 ist ein Schema einer KWKK-Anlage dargestellt. (molke-rei industrie 2021)

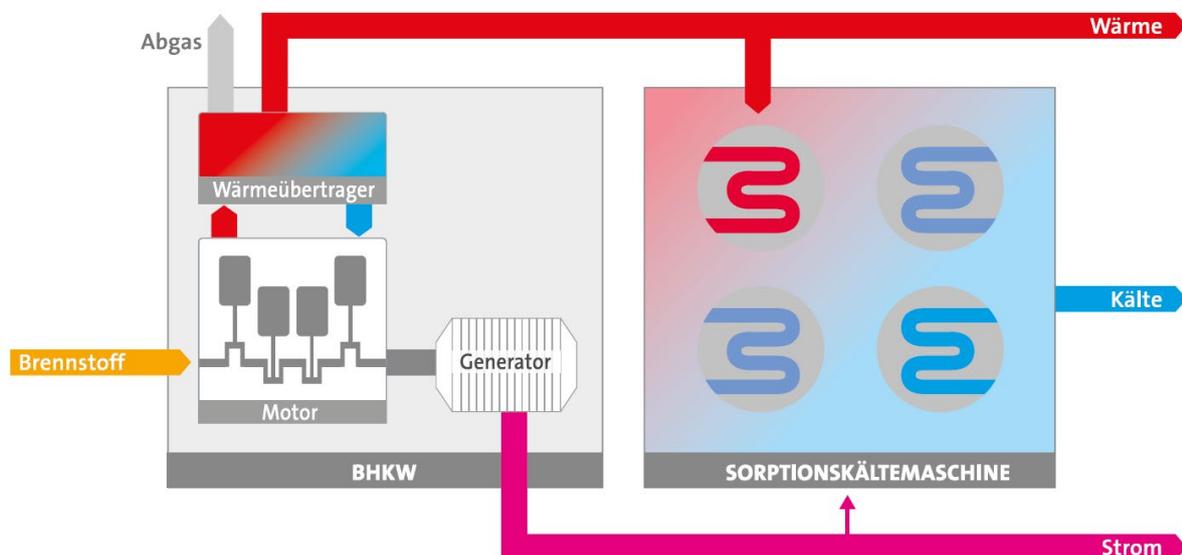


Abbildung 4-2: Schema einer Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung-Anlage (ASUE 2019)

#### 4.1.2 Energie- und Stoffströme

Die schematische Darstellung der Energie- und Stoffströme der Privatmolkerei Naarmann aus dem Jahr 2020 ist in Abbildung 4-3 abgebildet. Die Darstellung beinhaltet den Rohstoff-, Energie-, Reinigungsmittel-, Stadtwasser- und Frischwasserstrom als eingehende Ströme und den Produkt-, Abwasser- und Abgasstrom als ausgehende Ströme. (Kemper 2021)

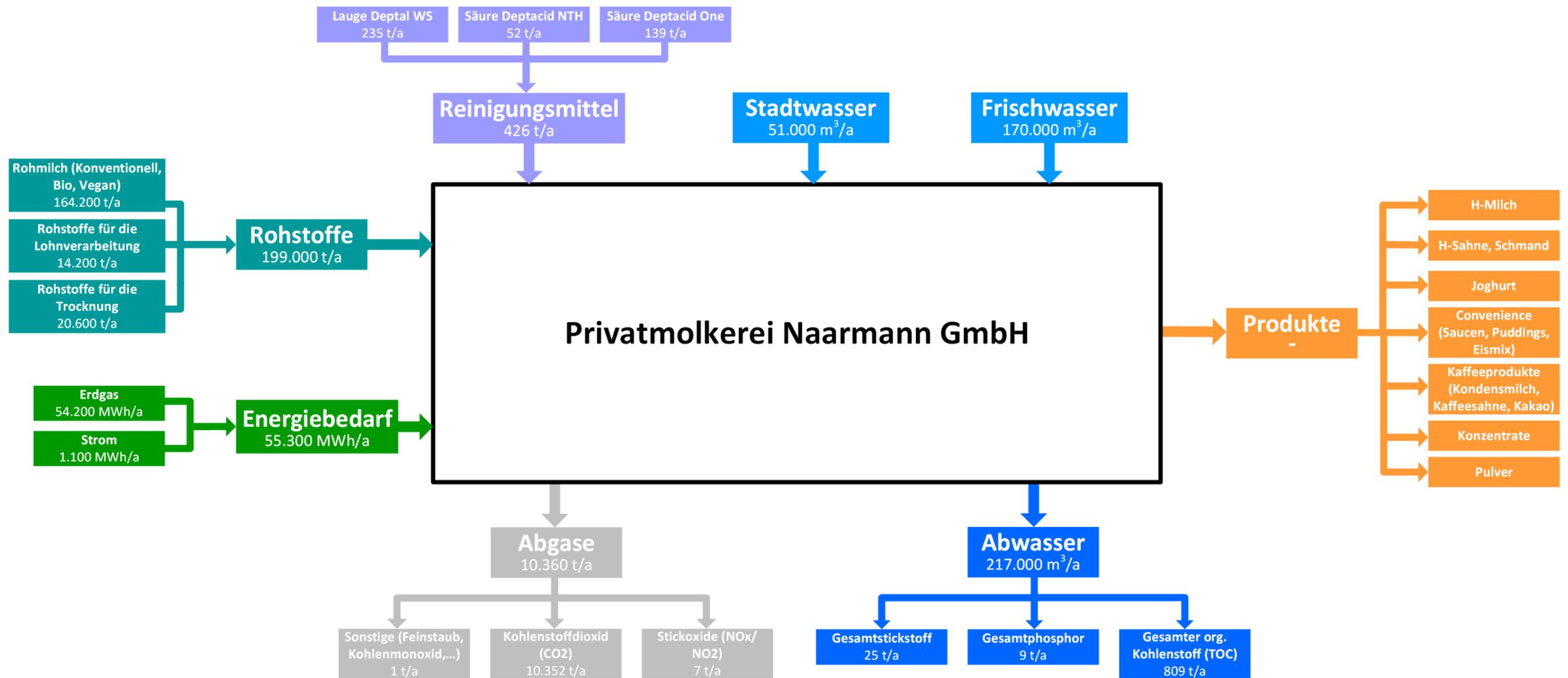


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Energie- und Stoffströme der Privatmolkerei Naarmann von 2020 (Kemper 2021)

Eine detailliertere Betrachtung der einzelnen Energieströme aus dem Jahr 2020 ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Zu bemerken ist, dass die Energieströme der AKM nicht in der Darstellung enthalten sind, da hierfür keine Daten vorlagen. (Kemper 2021)

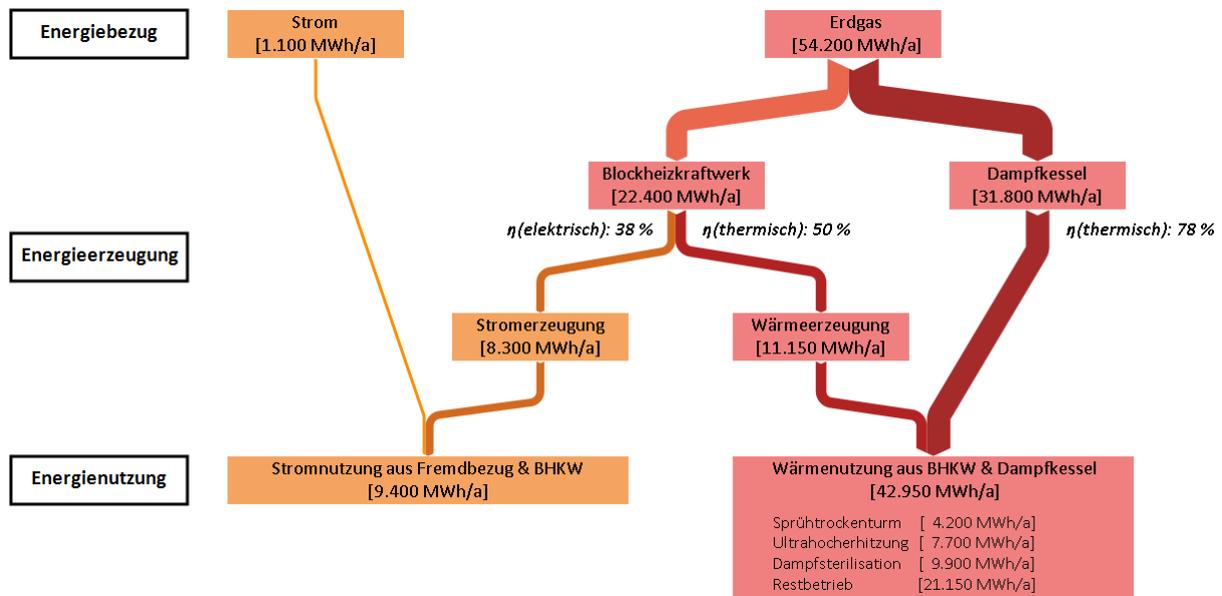


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung der Energieströme der Privatmolkerei Naarmann aus dem Jahr 2020 (Kemper 2021)

Aus diesen Daten konnten Kennzahlen für den Energiebezug je kg Rohmilch für das Jahr 2020 berechnet werden und betragen  $0,34 \text{ kWh}_{\text{Erdgas}}/\text{kg}_{\text{Rohmilch}}$  sowie  $0,01 \text{ kWh}_{\text{Strom}}/\text{kg}_{\text{Rohmilch}}$ . Der durchschnittliche Energiebezug von Molkereien in Deutschland beträgt  $0,17 \text{ kWh}_{\text{Erdgas}}/\text{kg}_{\text{Rohmilch}}$  und  $0,08 \text{ kWh}_{\text{Strom}}/\text{kg}_{\text{Rohmilch}}$ . Verglichen zu den durchschnittlichen Energiebezügen von Molkereien in Deutschland liegt der Erdgasbezug der Fa. Naarmann über dem durchschnittlichen Erdgasbezug und der Strombezug unter dem durchschnittlichen Strombezug. (Müller-Lindenlauf et al. 2014) Auf Basis der ermittelten Energieströme der Fa. Naarmann wurde für das Jahr 2020 ein  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck von  $13.720.000 \text{ kg CO}_2\text{-Äquivalente (CO}_2\text{e)/a}$  und somit  $0,09 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg}_{\text{Rohmilch}}$  berechnet.

Für die Berechnung des  $\text{CO}_2$ -Fußabdruckes wurden die  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktoren für Erdgas und dem deutschen Strommix mit dem jeweiligen Energiebezug von der Fa. Naarmann multipliziert. Die folgenden  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktoren wurden genutzt (Memmler et al. 2021):

- Erdgas:  $0,245 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kWh}_{\text{Erdgas}}$
- Strommix:  $0,402 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kWh}_{\text{Strommix}}$

Des Weiteren wurden die Anlagen sowie die bekannten Anlagendaten für die Energiebereitstellung in Tabelle 4-1 dargestellt. Die BHKWs der Fa. Naarmann haben eine installierte, elektrische Leistung von 1.310 kW<sub>el</sub> und eine thermische Leistung von 1.459 kW<sub>th</sub>. Die Fa. Naarmann deckt damit insgesamt 88 % des Strombedarfs und 26 % des Wärmebedarfs ab.

Die genutzte Ammoniak-AKM arbeitet mit einem COP („Coefficient of Performance“) von 0,5 für die Umwandlung von Wärme in Kälte und mit einem COP von rund 3,3 bei der Umwandlung von Strom in Kälte. Der COP in Bezug auf AKM gibt das Verhältnis von zugeführter Energieleistung, wie Wärme- und Stromleistung, zur erhaltenen Kälteleistung an. Weiterhin beträgt die Ladeleistung der AKM bei 180 kW und die Entladeleistung 500 kW. Hinter dem Ammoniak-AKM sind zur Eiswasserspeicherung zwei Tanks mit einer Speicherleistung von 1.200 kW installiert. (molkerei industrie 2021)

Tabelle 4-1: Anlagen zur Energiebereitstellung der Privatmolkerei Naarmann (molkerei industrie 2021; 2G Energietechnik 2022)

<i>Anlage</i>	<i>Hersteller</i>	<i>Baujahr</i>	<i>Leistung</i>	<i>Wirkungsgrad</i>
<i>Blockheizkraftwerk patruus 400</i>	2G Energietechnik	2014	400 kW <sub>el</sub> 500 kW <sub>th</sub>	$\eta_{el} = 37,1 \%$ $\eta_{th} = 50,3 \%$ $\eta_{el+th} = 87,4 \%$
<i>Blockheizkraftwerk avus 500plus</i>	2G Energietechnik	2019	550 kW <sub>el</sub> 578 kW <sub>th</sub>	$\eta_{el} = 42,6 \%$ $\eta_{th} = 44,7 \%$ $\eta_{el+th} = 87,3 \%$
<i>Blockheizkraftwerk agentor 408</i>	2G Energietechnik	2019	360 kW <sub>el</sub> 381 kW <sub>th</sub>	$\eta_{el} = 42,5 \%$ $\eta_{th} = 45,0 \%$ $\eta_{el+th} = 87,5 \%$
<i>Ammoniak-Absorptionskältemaschine</i>	AKM Industrieanlagen GmbH	2019	340 kW <sub>th(Kälte)</sub> 668 kW <sub>th(Wärme)</sub>	Nicht bekannt

Legende:

kW<sub>el</sub>: Kilowatt elektrisch

kW<sub>th</sub>: Kilowatt thermisch

$\eta_{el}$ : Wirkungsgrad elektrisch

$\eta_{th}$ : Wirkungsgrad thermisch

#### 4.1.3 Abwassersituation Privatmolkerei Naarmann

Die Abwasserströme in der Fa. Naarmann konnten in fünf Abwasserteilströme unterteilt werden. Aufgrund der historischen Entwicklung der Molkerei, ist die Erfassung von Abwasserteilströmen von einzelnen Produktionsabschnitten nicht möglich. Im Folgenden werden die fünf Abwasserteilströme der Fa. Naarmann detaillierter erläutert.

### **Abwasserstrom 1**

Abwasserstrom 1 setzt sich hauptsächlich aus Abwasser zusammen, das durch die Bodenabläufe in Produktionsgebäude 1 anfällt. Weiterhin werden in diesem Abwasserstrom Produkte aus den Kühl- und Lagerhallen vereinigt, die durch defekte Verpackungen in die Bodenabläufe der Hallen gespült werden. Aufgrund der Abwasseranfallorte ist zu erwarten, dass der Abwasserstrom 1 ein organisch stark belasteter Teilstrom mit einem höheren Anteil an leicht abbaubaren, organischen Substanzen ist.

### **Abwasserstrom 2**

Im Abwasserstrom 2 werden Abwässer zusammengeführt, die bei der Milchannahme auf dem Hof sowie im Gebäude der Milchannahme und im Trocknungsgebäude anfallen. Hierbei sind vor allem Waschwässer aus der Fahrzeugreinigung auf dem Hof sowie in dem Gebäude der Milchannahme der Fa. Naarmann zu nennen. Der Abwasserstrom 2 ist erwartungsgemäß ein stark belasteter Teilstrom, der einen hohen Anteil an leicht abbaubaren, organischen Substanzen beinhaltet.

### **Abwasserstrom 3**

Abwässer aus den beiden Produktionsgebäuden bilden den Abwasserstrom 3, in dem eine Vielzahl an Teilströmen vereinigt werden, u.a. Produktionsreste sowie Spül- und Reinigungswässer. Zu erwarten ist, dass der Abwasserstrom 3 ein stark belasteter, organischer Abwasserteilstrom mit einem hohen Anteil an leicht abbaubaren, organischen Substanzen. Aufgrund der Spül- und Reinigungswässer ist in diesem Abwasser ein schwankender pH-Wert zu erwarten.

### **Abwasserstrom 4**

Abwasserstrom 4 beinhaltet Abwässer, die auf dem Nebengelände hauptsächlich durch Niederschlagswasser anfallen. Somit ist zu vermuten, dass Abwasserstrom 4 für die anaerobe Vergärung nicht geeignet ist, da der Abwasserteilstrom eine sehr niedrige organische Belastung aufweisen wird.

### **Abwasserstrom 5**

Durch den Abwasserstrom 5 wird getrübbtes Teichwasser, welches in der Produktion als Kühlwasser genutzt wird, in den Abwassersumpf geleitet. Mittels Trübungsmessung wird das aus der Produktion zurück geleitete Teichwasser ab einem definierten Messwert in den Abwassersumpf umgeleitet.

Wie auch schon bei Abwasserstrom 4, ist bei Abwasserstrom 5 nur eine sehr geringe organische Belastung zu erwarten. Jeder der erfassten Abwasserteilströme wird in einem gemeinsamen Abwassersumpf gesammelt. Das im Abwassersumpf vereinigte Abwasser wird auf dem Nebengelände in Tanks zwischengespeichert und anschließend mittels Pumpen in dem Misch- und Ausgleichsbecken (MAB) der nahegelegenen Kläranlage befördert. Insgesamt wird im Abwassersumpf eine Abwassermenge von 600 Kubikmeter (m<sup>3</sup>) pro Tag (d) durch fünf Abwasserströme zusammengeführt. In der kommunalen Kläranlage wird das Molkeabwasser nach Speicherung und Neutralisation im MAB, im Faulturm anaerob behandelt. Für die im Projekt durchgeführte Abwasseranalytik wurden Abwasserstrom 1, 2 und 3, der vereinigte Abwasserstrom im Abwassersumpf (nachfolgend als ‚Abwasserstrom vor MAB‘ bezeichnet) und der Abwasserstrom, der vom MAB zum Faulturm strömt, beprobt. Der zum Faulturm fließende Abwasserstrom wird folgend als ‚Abwasserstrom nach MAB‘ bezeichnet. Die Abwasserströme 4 und 5 wurden nicht beprobt, da, wie zuvor erwähnt, von keiner starken und für die anaerobe Vergärung geeigneten Belastung der Ströme auszugehen ist. In Abbildung 4-5 ist die Aufteilung der Abwasserströme schematisch dargestellt. (Kemper 2021)

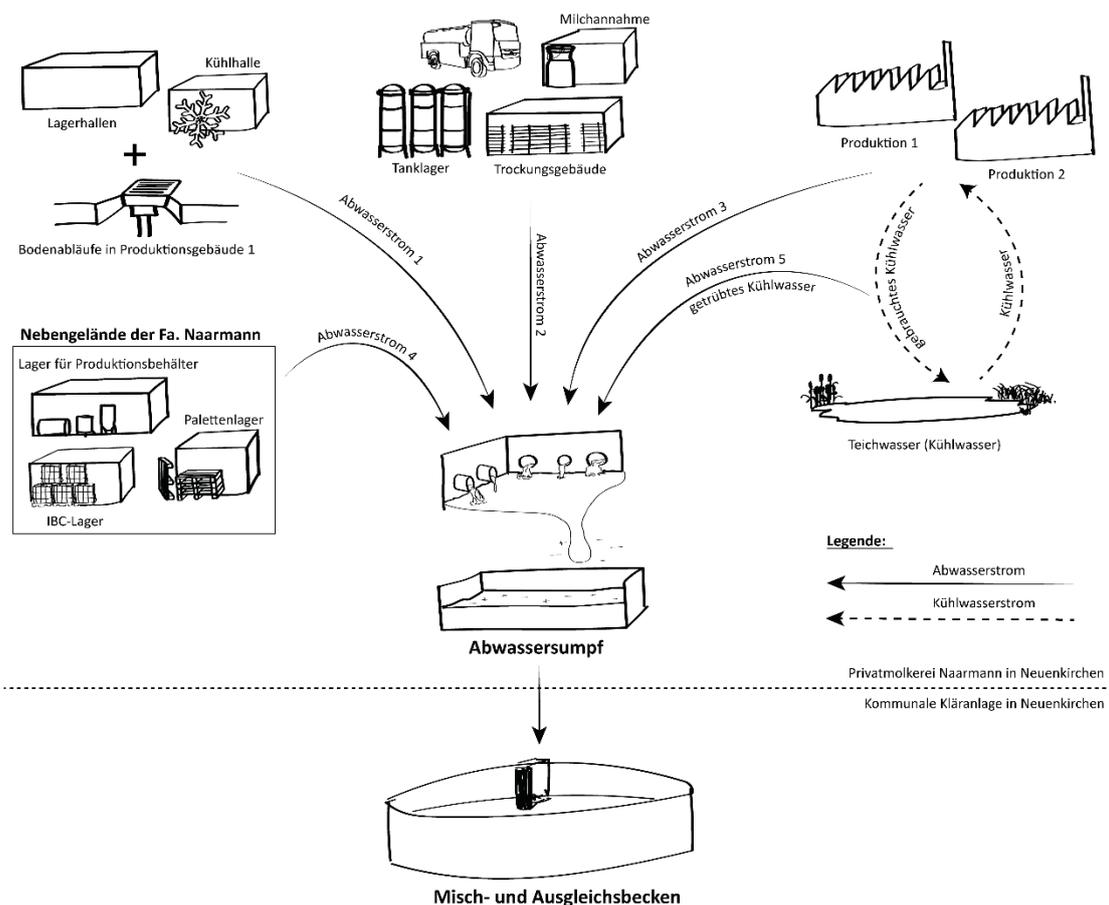


Abbildung 4-5: Visualisierung der Abwasserströme der Privatmolkerei Naarmann (Kemper 2021)

#### 4.1.4 Abwasseranalytik

Eine detaillierte Auflistung der Analyse-Ergebnisse ist in Anhang 1 dargestellt. Die für die Molkereiabwasserbehandlung relevantesten Parameter sind in der nachfolgenden Tabelle 4-2 aufgelistet. Zusätzlich sind in der Tabelle Grenzwerte und Praxisempfehlungen für die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung angegeben.

Die CSB-Konzentrationen aller untersuchter Abwasserproben betragen über 2.500 Milligramm (mg)/l. Laut Rosenwinkel et al. (2020) ist eine anaerobe Behandlung von Abwässern aus der Milchverarbeitung ab einer CSB-Konzentration > 2.000 mg/l sinnvoll (Rosenwinkel et al. 2020). Demnach sind die untersuchten Ströme hinsichtlich ihrer organischen Belastung, anaerob und somit energetisch verwertbar. Darüber hinaus befinden sich die CSB-Konzentrationen in einem Bereich, in dem eine einstufige, anaerobe Abwasserbehandlung ausreicht. Zweistufige anaerobe Behandlungskonzepte werden zur Reinigung von deutlich stärker belasteten Abwässern genutzt. Weiterhin wurde, wie in Tabelle 4-2 dargestellt, keine Überschreitung der Grenzwerte anderer untersuchter Parameter festgestellt werden. Deshalb ist keine Beeinträchtigung der anaeroben Behandlung zu erwarten. Aufgrund der Unterschreitung der Ammonium-Stickstoff (NH<sub>4</sub>-N)-Konzentration von 70 mg/l ist eine vorgeschaltete Vorbehandlung zur Magnesiumammoniumphosphat (MAP)-Abscheidung nicht notwendig. Dies kann allerdings bei anderen Molkereien erforderlich sein, sofern diese Konzentration überschritten wird.

Durch die Abwasseranalytik fiel auf, dass die Abwasserprobe ‚Abwasserstrom nach MAB‘ weiße Ausfällungen enthielt. Diese konnten ebenfalls an der Kläranlage in Neuenkirchen am Boden des MAB beobachtet werden. Die Ausfällungen wurden mittels Labortests, unter anderem durch Elementaranalyse, als Calciumphosphat identifiziert. Kezia et al. (2017) bestätigten die Fällung von Calciumphosphat in Molkereiabwasser. Aufgrund der niedrigen Löslichkeit von Calciumphosphat gegenüber anderen möglichen Fällungsprodukten in Molkereiabwasser ist Calciumphosphat das wesentliche Fällungsprodukt. Als Phosphorquelle dient das im Molkereiabwasser enthaltene Casein, das das Calcium bindet. (Kezia et al. 2017)

Tabelle 4-2: Ergebnisse von ausgewählten Parametern aus der Abwasseranalytik der Molkereiabwasserproben und Grenzwerte der anaeroben Molkereiabwasserbehandlung

<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Abw. 1</i>	<i>Abw. 2</i>	<i>Abw. 3</i>	<i>Abw. vor MAB</i>	<i>Abw. nach MAB</i>	<i>Praxisempfehlung<sup>1</sup></i>
<i>TR</i>	Gew.-%	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	< 0,5
<i>oTR</i>	Gew.-%	69,5	86,9	77,0	72,6	65,0	-
<i>pH-Wert</i>	-	6,4	6,8	10,8	10,9	6,8	6,5 – 7,5
<i>CSB</i>	mg/l	3.511	3.506	3.529	2.504	2.711	> 2.000
<i>BSB<sub>5</sub></i>	mg/l	1.270	1.640	1.980	1.550	1.350	-
<i>NH<sub>4</sub>-N</i>	mg/l	0,4	1,1	1,2	1,4	68,5	Hemmung: > 2.700 / MAP-Fällung: > 70
<i>Phosphor</i>	mg/l	41,0	26,0	43,0	31,0	39,0	-
<i>TKN</i>	mg/l	87,0	69,0	260,0	130,0	120,0	-
<i>Calcium</i>	mg/l	50,0	91,0	103,0	81,0	83,0	< 100
<i>Magnesium</i>	mg/l	6,0	12,0	9,0	9,0	9,0	-
<i>Schwefel</i>	mg/l	20,0	31,0	38,0	30,0	10,0	< 100

<sup>1</sup> Praxisempfehlung: Grenzwerte für die anaerobe Behandlung von Molkereiabwasser (Rosenwinkel et al. 2015)

Legende:

- |                     |                             |                    |   |
|---------------------|-----------------------------|--------------------|---|
| Abw.:               | Abwasserstrom               | MAB:               | Misch- und Ausgleichsbecken                 |
| Gew.-%:             | Gewichtsprozent             | mg/l:              | Milligramm pro Liter                        |
| TR:                 | Trockenrückstand            | oTR:               | Organischer Trockenrückstand                |
| NH <sub>4</sub> -N: | Ammonium-Stickstoff         | CSB:               | Chemischer Sauerstoffbedarf                 |
| TKN:                | Gesamter Kjeldahlstickstoff | BSB <sub>5</sub> : | Biochemischer Sauerstoffbedarf nach 5 Tagen |
| MAP:                | Magnesiumammoniumphosphat   |                    |   |

Wie in Tabelle 4-2 zu erkennen, unterscheiden sich die Analysenergebnisse der ‚Abwasserströme 1, 2 und 3‘. Dies ist auf unterschiedliche Anfallstellen sowie des verarbeiteten Rohstoffes, Produkte und anfallenden Reststoffe zurückzuführen. Durch den Einsatz von Lauge in der ortsgebundenen Reinigung zum Zeitpunkt der Probenahme liegt der pH-Wert der Probe ‚Abwasserstrom 3‘ bei pH 10,8 und somit im basischen pH-Wertbereich. Insbesondere durch die Produkt- und Reststoffkonzentrationen im Abwasser sowie deren Zusammensetzung unterscheiden sich die Analyse-Ergebnisse der Abwässer, wie deutlich an der Kjeldahlstickstoff (TKN)-Konzentration zu erkennen ist.

Laut Svardal (2015) steht ein hoher TKN-Wert in Abwässern der Lebensmittelbranche im Zusammenhang mit einem hohen Proteingehalt. Die TKN-Konzentration spiegelt den organisch gebunden Stickstoff wieder, der mittels der Einwirkung von Schwefelsäure in  $\text{NH}_4\text{-N}$  überführt werden konnte. Somit kann die TKN-Konzentration als Anhaltspunkt für die Produktkonzentration im Molkereiabwasserstrom dienen. (Rosenwinkel et al. 2015) Die Ergebnisse der Abwasseranalytik in Tabelle 4-2 stellen zwei weitere Auffälligkeiten dar. Die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration der Probe ‚Abwasserstrom nach MAB‘ ist um den Faktor 67 größer und die Schwefelkonzentration um den Faktor 3 geringer verglichen mit den anderen Abwasserproben. Eine hohe  $\text{NH}_4\text{-N}$ - und Schwefelkonzentration kann zu Toxizitätsproblemen bei der anaeroben Abwasserbehandlung führen. Grund für die hohe  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration und die niedrige Schwefelkonzentration kann die Abwasserspeicherung im MAB in der kommunalen Kläranlage sein. Während der Speicherung finden Abbauprozesse statt, bei denen unter anderem die im Molkereiabwasser vorhandenen Proteine abgebaut werden. Die in der Milch vorhandenen Proteine enthalten schwefel- und stickstoffhaltige Aminosäuren. Beim Proteinabbau entstehen unter anderem Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) und  $\text{H}_2\text{S}$  als Abbauprodukte. (Rosenwinkel et al. 2015)

#### **4.1.5 Bestimmung der anaeroben Abbaubarkeit**

Bei der Bestimmung der anaeroben Abbaubarkeit wurden die Biogas- und Methanerträge auf Basis der Messwerte, die innerhalb des Versuchszeitraumes bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums in den jeweiligen Batch-Tests ermittelt wurden, berechnet. Die Versuchszeiträume betragen zwischen 26 und 34 Tage. Die durch die durchgeführten Batch-Tests ermittelten spezifischen Biogas- und Methanerträge sowie die Methangehalte der Molkereiabwasserproben sind in Tabelle 4-3 und Tabelle 4-4 dargestellt. Die Formeln, die zur Berechnung der jeweiligen Werte verwendet wurden, sind in Anhang 2 aufgelistet.

Tabelle 4-3: Ermittelte Biogas- sowie Methanerträge inkl. Standardabweichungen der Molkereiabwasserproben 1, 2 und 3 der Privatmolkerei Naarmann

<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Abw. 1</i>	<i>Abw. 2</i>	<i>Abw. 3</i>
<i>FM-spez. Biogasertrag</i>	$l_N/kg_{FM}$	$1,9 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,6$	$1,6 \pm 0,2$
<i>CSB-spez. Biogasertrag</i>	$l_N/kg_{CSB}$	$550 \pm 26$	$553 \pm 169$	$454 \pm 45$
<i>Methangehalt</i>	Vol.-%	$45 \pm 3$	$54 \pm 3$	$57 \pm 0$
<i>FM-spez. Methanertrag</i>	$l_N/kg_{FM}$	$0,9 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,4$	$0,9 \pm 0,1$
<i>CSB-spez. Methanertrag</i>	$l_N/kg_{CSB}$	$246 \pm 22$	$296 \pm 102$	$254 \pm 24$

Legende:

Abw.: Abwasserstrom  
 $l_N/kg_{FM}$ : Normliter pro Kilogramm FM  
 $l_N/kg_{CSB}$ : Normliter pro Kilogramm CSB  
 CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf  
 MAB: Misch- und Ausgleichsbecken  
 Vol.-%: Volumenprozent  
 FM: Frischmasse

Tabelle 4-4: Ermittelte Biogas- sowie Methanerträge inkl. Standardabweichungen der Molkereiabwasserproben vor und nach MAB der Privatmolkerei Naarmann

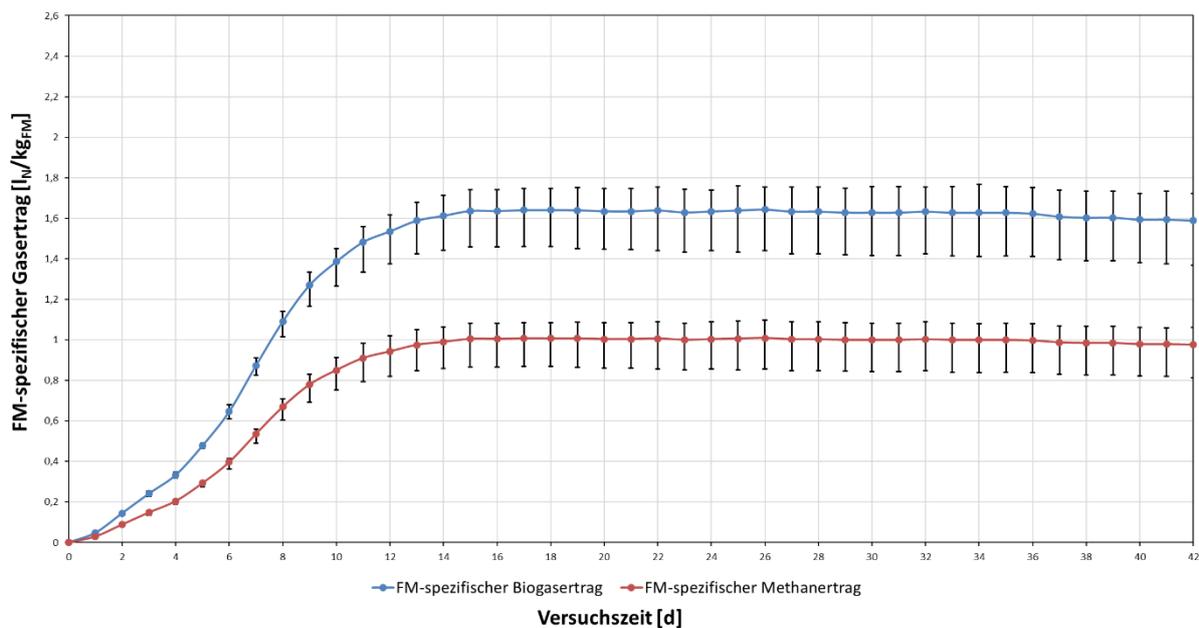
<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Abw. vor MAB</i>	<i>Abw. nach MAB</i>
<i>FM-spez. Biogasertrag</i>	$l_N/kg_{FM}$	$1,3 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,2$
<i>CSB-spez. Biogasertrag</i>	$l_N/kg_{CSB}$	$499 \pm 36$	$600 \pm 82$
<i>Methangehalt</i>	Vol.-%	$52 \pm 1$	$62 \pm 2$
<i>FM-spez. Methanertrag</i>	$l_N/kg_{FM}$	$0,7 \pm 0,0$	$1,0 \pm 0,2$
<i>CSB-spez. Methanertrag</i>	$l_N/kg_{CSB}$	$260 \pm 14$	$370 \pm 60$

Legende:

Abw.: Abwasserstrom  
 $l_N/kg_{FM}$ : Normliter pro Kilogramm FM  
 $l_N/kg_{CSB}$ : Normliter pro Kilogramm CSB  
 CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf  
 MAB: Misch- und Ausgleichsbecken  
 Vol.-%: Volumenprozent  
 FM: Frischmasse

Die Ergebnisse der Batch-Tests stellen FM- und CSB-spezifische Biogas- und Methanerträge dar, die auf einem vergleichbaren Niveau liegen. In der Literatur wurde bei der Vergärung von Molkereiabwasser ein Methanertrag von rund 1,0 Normliter ( $l_N$ ) pro Kilogramm FM ( $kg_{FM}$ ) bzw. 245  $l_N/kg_{CSB}$  und ein Methangehalt von 60 Volumenprozent (Vol.-%) festgestellt. Die ermittelten Methanerträge aus den Batch-Tests stellen vergleichbare Gaserträge zu denen aus der Literatur dar. (Rosenwinkel et al. 2020)

Neben den spezifischen Gaserträgen wurden Gasbildungskurven ermittelt, um den Verlauf des anaeroben Abbaus sowie mögliche Hemmungen und Verzögerungen zu identifizieren. Da der Kurvenverlauf für alle untersuchten Proben ähnlich verlief, ist als Beispiel in Abbildung 4-6 der ‚Abwasserstrom nach MAB‘ abgebildet. Die Kurvenverläufe der anderen Molkereiabwasserproben sind im Anhang 3 dargestellt. Auf der Abszissenachse der Abbildungen ist die Versuchszeit in Tagen (d) aufgetragen, auf der Ordinatenachse der FM-spezifische Gasertrag in  $l_N/kg_{FM}$ . Die Gasbildungskurven zeigen einen gleichmäßigen Abbau der Probe und es ist keine Hemmung des anaeroben Abbaus zu erkennen. Es konnte lediglich eine leichte Verzögerung bei Versuchsstart festgestellt werden. Somit weisen auch die Biogastests auf eine hohe Abbaubarkeit des Abwassers hin. (Rosenwinkel et al. 2015)



Legende:

FM: Frischmasse       $l_N/kg_{FM}$ : Normliter pro Kilogramm FM      d: Tage

Abbildung 4-6: Biogas- und Methanbildungskurve der Molkereiabwasserprobe ‚Abwasserstrom nach MAB‘

#### 4.1.6 Zusammenfassung Arbeitspaket 1

Im Folgenden sind die Ergebnisse von Arbeitspaket 1 „Erfassung und Bewertung der Energie- und Stoffströme“ stichpunktartig zusammengefasst:

- CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Privatmolkerei Naarmann: 13.720.000 kg CO<sub>2</sub>e/a & 0,09 kg CO<sub>2</sub>e/kg<sub>Rohmilch</sub>
- Verwendetes ortsgebundenes Reinigungskonzept: Kombination aus CIP & SIP
- Energiekennwerte der Fa. Naarmann: 0,34 kWh<sub>Erdgas</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub> & 0,01 kWh<sub>Strom</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub>
- Dezentrale Energiezentrale bestehend aus einem erdgasbetriebenen KWKK-Prozess, restlicher Wärmebezug durch klassische Wärmeerzeugung im Dampfkessel & restlicher Strombezug durch Stromfremdbezug
- KWKK-Prozess: 88 % des Strombedarfs + 26 % des Wärmebedarfs  
Klassische Wärmeerzeugung im Dampfkessel: 74 % des Wärmebedarfs  
Fremdbezug von Strom: 12 % des Strombedarfs
- Gute anaerobe Abbaubarkeit des Molkereiabwassers mit einem FM-spezifischen Methanertrag von 1,0 l<sub>N</sub>/kg<sub>FM</sub> und einem Methangehalt von rund 62 Vol.-%
- Es konnten bei den untersuchten Abwasserströmen keine Hemmungen des anaeroben Abbaus festgestellt werden
- 1-stufige anaerobe Behandlung für die Molkereiabwasserbehandlung ausreichend

## 4.2 Planung, Beschaffung und Inbetriebnahme der Technikumsanlage

### 4.2.1 Reaktorauswahl für die halbtechnische Versuchsanlage

Die Bewertung der zur Auswahl stehenden anaeroben Reaktoren wurde auf Grundlage einer Literaturrecherche und aufgrund eigener Erfahrungen durchgeführt. Die Bewertung erfolgte tabellarisch und ist in Tabelle 4-5 aufgeführt.

Tabelle 4-5: Bewertung der anaeroben Reaktoren (Rosenwinkel et al. 2015)

<i>Kriterium</i>	<i>Anaerobes Belebungs- verfahren</i>	<i>UASB- Reaktor</i>	<i>EGSB- Reaktor</i>	<i>Festbett- reaktor</i>	<i>Fließbett- reaktor</i>
<i>Anlageneinteilung nach org. Belas- tung</i>	Mittellast Technologie	Hochlast Technologie	Höchstlast Technologie	Hochlast Technologie	Höchstlast Technologie
<i>Investitions- &amp; Betriebskosten</i>	+	+/-	-	-	-
<i>Platzbedarf</i>	-	+	+	+	+
<i>Empfindlichkeit</i>	+	+/-	+/-	+/-	-
<i>Einsatz in der milchverarbeiten- den Industrie</i>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

Legende:

UASB: Upflow-Anaerobic-Sludge-Blanket

EGSB: Expanded Granular Sludge Bed

Org.: Organisch

+: Niedrig

+/-: Mittel

-: Hoch

Membran gestützte Reaktoren wurden für die Bewertung nicht weiter berücksichtigt, da die Reaktoren bei extremen Bedingungen, wie z.B. hohen Temperaturen oder Salzgehalten, eingesetzt werden. (Rosenwinkel et al. 2015) Auf Grundlage der Bewertung wurde für die kontinuierliche anaerobe Molkereiabwasserbehandlung das anaerobe Belebungsverfahren und der EGSB (Expanded Granular Sludge Bed)-Reaktor ausgewählt. Die Gründe für die Auswahl lauten wie folgt:

- Anaerobes Belebungsverfahren
  - ✓ Behandlung von calciumhaltigen Abwässern (z.B. Molkereiabwasser)
  - ✓ Unempfindlich gegenüber hohen Feststoffgehalten
  - ✓ Einfache Bauart

- EGSB-Reaktor
  - ✓ Behandlung von (hoch)belasteten Abwässern
  - ✓ Geringer Platzbedarf
  - ✓ Etablierte Verwendung in der Industrie

Für die aerobe Anlagenstufe wurde eine Kombination aus einem belüfteten Reaktor und Sedimentationsbecken, im Folgenden als aerobes Belebungsverfahren genannt, gewählt. Das aerobe Belebungsverfahren stellt eine in Kläranlagen typische Kombination aus Belebungs- und Nachklärbecken dar.

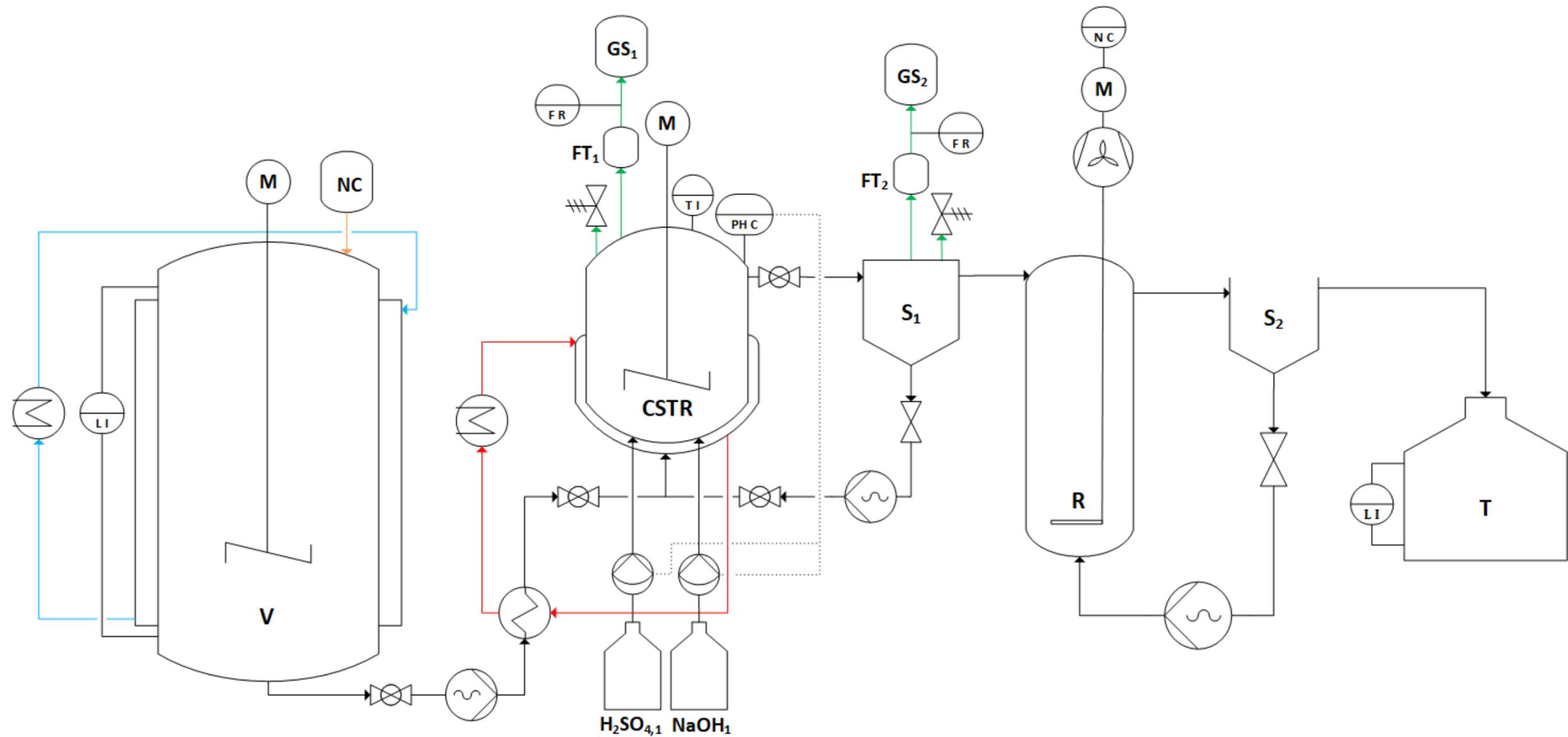
#### 4.2.2 Verfahrenskonzepte

Durch die Anzahl der Anlagenstufen in der halbtechnischen Versuchsanlage konnten zwei Verfahrenskonzepte für die in Arbeitspaket 3 anstehenden kontinuierlichen Versuche zur anaeroben Molkereiabwasserbehandlung erstellt werden. Die konzeptionierten Verfahrenskonzepte sind in Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 als R&I-Fließbild abgebildet. Im ersten Verfahrenskonzept wurde das Abwasser zunächst mit dem anaeroben Belebungsverfahren und anschließend mit dem aeroben Belebungsverfahren behandelt. Im zweiten Verfahrenskonzept wurde eine Kombination aus EGSB-Reaktor und aeroben Belebungsverfahren für die Behandlung des Molkereiabwassers verwendet.

Das anaerobe Belebungsverfahren in Verfahrenskonzept 1 besteht aus einem beheizbaren Rührkesselreaktor (CSTR, Continuous Stirred-Tank Reactor) und einem Sedimentationsbecken, der als Dortmundbrunnen konzeptioniert wurde. (Hinken et al. 2015) Das Reaktorkonzept fasste ein Gesamtvolumen von 52,5 l. Die erste Stufe wurde bei einer Temperatur von 38 °C und einem pH-Wertbereich von pH 7 bis pH 8 betrieben. Zusätzlich wurde das Abwasser vor Eintritt in die erste Stufe mittels Wärmetauscher auf 38 °C erwärmt. Der pH-Wert wurde durch ein Mess- und Regulierungssystem im pH-Bereich von pH 7 bis 8 gehalten. Die eingesetzten Chemikalien für die pH-Regulation waren Schwefelsäure (Konzentration (c) = 0,5 mol/l) und Natronlauge (c = 1,0 mol/l). Der im Sedimentationsbecken sedimentierte Schlamm (Überschussschlamm) wurde mittels Exzentrerschneckenpumpe mit einem Rücklaufverhältnis<sup>1</sup> von 1 bis 6 dem CSTR zurückgeführt. Das behandelte Abwasser gelangte über einen Überlauf im Sedimentationsbecken zur nächsten Anlagenstufe.

---

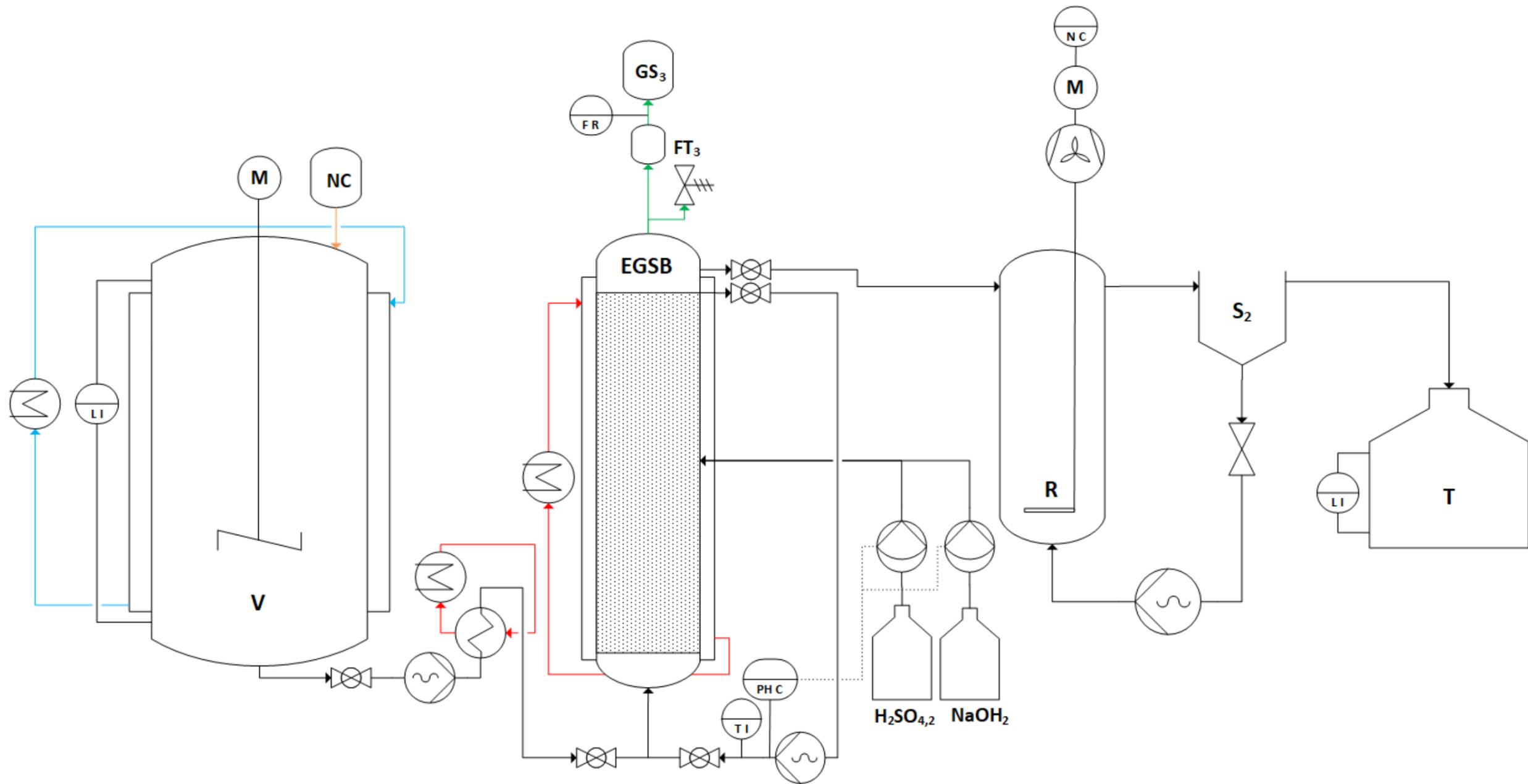
<sup>1</sup> Rücklaufverhältnis: Definition des Verhältnisses des Rezirkulationsstroms zum Zulaufstrom der jeweiligen Stufe (Wetter 2021)



V:	Vorlagebehälter	FT <sub>1</sub> :	Schaumfalle (1)
NC:	Stickstoffbehälter	FT <sub>2</sub> :	Schaumfalle (2)
CSTR:	Rührkesselreaktor (anaerob)	GS <sub>1</sub> :	Gasspeicher (1)
S <sub>1</sub> :	Sedimentationsbecken (anaerob)	GS <sub>2</sub> :	Gasspeicher (2)
S <sub>2</sub> :	Sedimentationsbecken (aerob)	— (blue):	Kühlwasserstrom (4 °C)
R:	Aerober Reaktor	— (red):	Warmwasserstrom (38 °C)
T:	Ablaufbehälter	— (green):	Biogasstrom
H <sub>2</sub> SO <sub>4,1</sub> :	Schwefelsäure (CSTR)	— (orange):	Stickstoffstrom
NaOH <sub>1</sub> :	Natronlauge (CSTR)	— (black):	Stoffstrom

Projekt:	EnerMolk	  FB Energie · Gebäude · Umwelt Energy · Building Services · Environmental Engineering
Erstellt durch:	Thomas Holtrup	
Erstellt am:	08.09.2021	
Letzte Änderung:	08.09.2021	<b>Verfahrensfließbild</b> <b>Verfahrenskonzept 1</b>

Abbildung 4-7: R&I Fließbild des ersten Verfahrenskonzeptes



V:	Vorlagebehälter	GS <sub>3</sub> :	Gasspeicher
NC:	Stickstoffbehälter		
EGSB:	EGSB Reaktor		
S <sub>2</sub> :	Sedimentationsbecken (aerob)		
FT <sub>3</sub> :	Schaumfalle	—	Kühlwasserstrom (4 °C)
R:	Aerober Reaktor	—	Warmwasserstrom (38 °C)
T:	Ablaufbehälter	—	Biogasstrom
H <sub>2</sub> SO <sub>4,2</sub> :	Schwefelsäure (EGSB)	—	Stickstoffstrom
NaOH <sub>2</sub> :	Natronlauge (EGSB)	—	Stoffstrom

Projekt:	EnerMolk	  FB Energie · Gebäude · Umwelt Energy · Building Services · Environmental Engineering
Erstellt durch:	Thomas Holtrup	
Erstellt am:	08.09.2021	
Letzte Änderung:	08.09.2021	
<b>Verfahrensfließbild</b>		<b>Verfahrenskonzept 2</b>

Abbildung 4-8: R&I Fließbild des zweiten Verfahrenskonzeptes

Der EGSB-Reaktor, der in Verfahrenskonzept 2 genutzt wurde, bestand aus einem beheizbaren Hochlastreaktor inkl. Rezirkulation. Durch die Rezirkulation entstand im Reaktor eine Wirbelbettschicht aus granuliertem Schlamm. (Hinken et al. 2015) Das Rücklaufverhältnis<sup>1</sup> betrug 11 bis 92. Der Rezirkulationsstrom wurde durch eine Exzentrerschneckenpumpe erzeugt. Am Reaktorkopf wurde eine Abscheidevorrichtung montiert, wodurch der granuliert Schlamm im Reaktorsystem gehalten wurde und das behandelte Abwasser in die nächste Anlagenstufe ablaufen konnte. Die zweite Stufe fasste ein Volumen von 61 l und wurde ebenfalls bei einer Temperatur von 38 °C und einem pH-Wertbereich von pH 7-8 betrieben. Das aerobe Belebungsverfahren fasste ein Gesamtvolumen von 60,5 l. Der belüftete Reaktor war ein nach oben hin geöffneter Reaktor und wurde durch ein am Boden montiertes Belüftungssystem mit Umgebungsluft belüftet, sodass der Sauerstoffgehalt zwischen 1 und 2 mg/l betrug. Der Rücklaufschlamm aus dem Sedimentationsbecken wurde mittels Exzentrerschneckenpumpe mit einem Rücklaufverhältnis<sup>1</sup> von 1 bis 6 dem aeroben Reaktor zurückgeführt. Der Überlauf des Sedimentationsbeckens lief in einen 120 l Kanister, in dem das behandelte Abwasser gesammelt wurde. Die halbtechnische Versuchsanlage ist in Abbildung 4-9 abgebildet. Vor Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage wurden die Reaktoren angeimpft und eingefahren.



Abbildung 4-9: Vorder- und Rückseite der halbtechnischen Versuchsanlage

Das anaerobe Belevungsverfahren wurde mit Faulschlamm (TR: 2,7 Gewichtsprozent (Gew.-%); oTR: 67,5 Gew.-%) aus dem Faulturm der kommunalen Kläranlage in Neuenkirchen angeimpft, der EGSB-Reaktor mit granuliertem Schlamm (TR: 5,1 Gew.-%; oTR: 81,5 Gew.-%) aus einer Abwasserreinigungsanlage der Papier- und Wellpappenbranche. Schließlich das aerobe Belevungsverfahren mit Belebtschlamm (TR: 0,6 Gew.-%; oTR: 74,4 Gew.-%) aus dem Nachklärbecken der kommunalen Kläranlage in Neuenkirchen. Die Reaktoren wurden vor Betrieb der jeweiligen Verfahrenskonzepte für mehr als 20 Tage eingefahren.

#### **4.2.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 2**

Die Ergebnisse von Arbeitspaket 2 „Planung, Bewertung und Inbetriebnahme der Technikumsanlage“ stichpunktartig zusammengefasst:

- Auswahl des anaeroben Belevungsverfahrens & EGSB-Reaktors als anaerobe Anlagenstufen für die halbtechnische Versuchsanlage
- Kombination aus belüftetem Reaktor und Sedimentationsbecken als aerobe Anlagenstufe
- Erstellung zweier Verfahrenskonzepte für die anaerobe & aerobe Molkereiabwasserbehandlung
- Bau und Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage

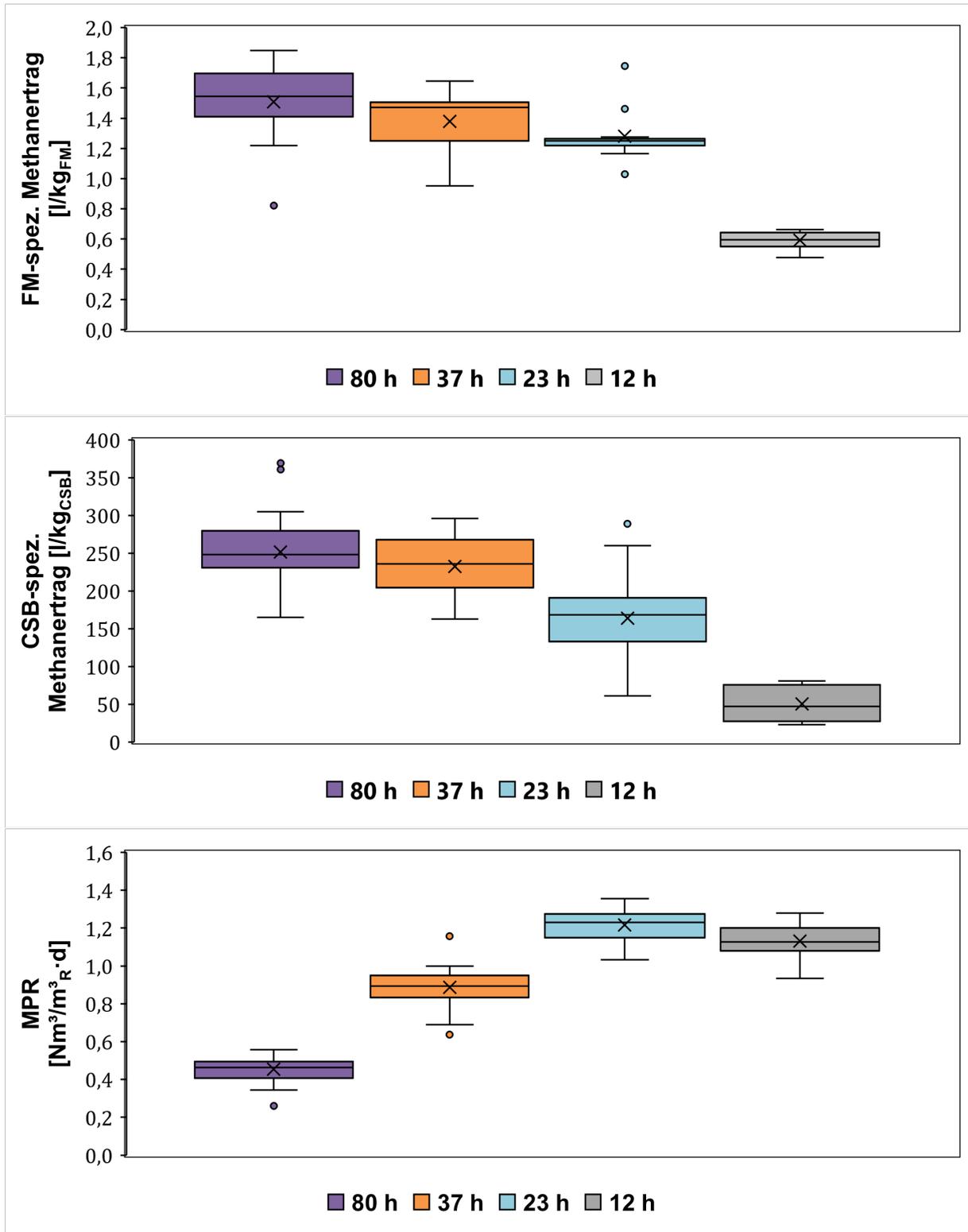
### 4.3 Versuche zur Optimierung der anaeroben Abwasserbehandlung

Für die kontinuierlichen Versuche an der halbtechnischen Anlage wurde das Molkereiabwasser aus dem MAB der kommunalen Kläranlage verwendet. Durch die Abwasserspeicherung im MAB wurden Frachtenspitzen und pH-Wert-Schwankungen in den Abwasserteilströmen ausgeglichen, weshalb dieser Abwasserstrom besonders für die kontinuierliche, anaerobe Behandlung geeignet ist. Anhand der ermittelten Versuchsergebnisse wurde das Verfahren hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Einsparungspotentials sowie des CSB-Abbaus bewertet. Die Ergebnisse der Optimierungsversuche der beiden Verfahrenskonzepte sind im Folgenden dargestellt. Die Formeln, die zur Berechnung der Betriebsparameter verwendet wurden, sind in Anhang 4 aufgelistet.

#### 4.3.1 Verfahrenskonzept 1

Die Gesamtlaufzeit der kontinuierlichen Versuchsphase in Verfahrenskonzept 1 betrug 93 Tage. Es wurden 4 Betriebspunkte bei den hydraulischen Verweilzeiten (HRT) 80, 37, 23 und 12 h untersucht. Die Ergebnisse der kontinuierlichen Versuchsphase sind in Abbildung 4-10 und Abbildung 4-11 als Box-Plots abgebildet. In Abbildung 4-10 sind die Methanerträge und die reaktorspezifischen Methanbildungsraten, des anaeroben Belebungsverfahrens dargestellt. Die ersten beiden Diagramme zeigen den Einfluss der HRT auf den FM-spezifischen und CSB-spezifischen Methanertrag. Das unterste Diagramm zeigt den Einfluss der HRT auf die MPR. Auf der Abszissenachse ist die HRT aufgetragen, auf der Ordinatenachse der FM-spezifische Methanertrag in  $l_N/kg_{FM}$ , der CSB-spezifische Methanertrag in  $l_N/kg_{CSB}$  und die MPR in Normkubikmeter ( $Nm^3$ )/( $m^3_{Reaktor(R)} \cdot d$ ).

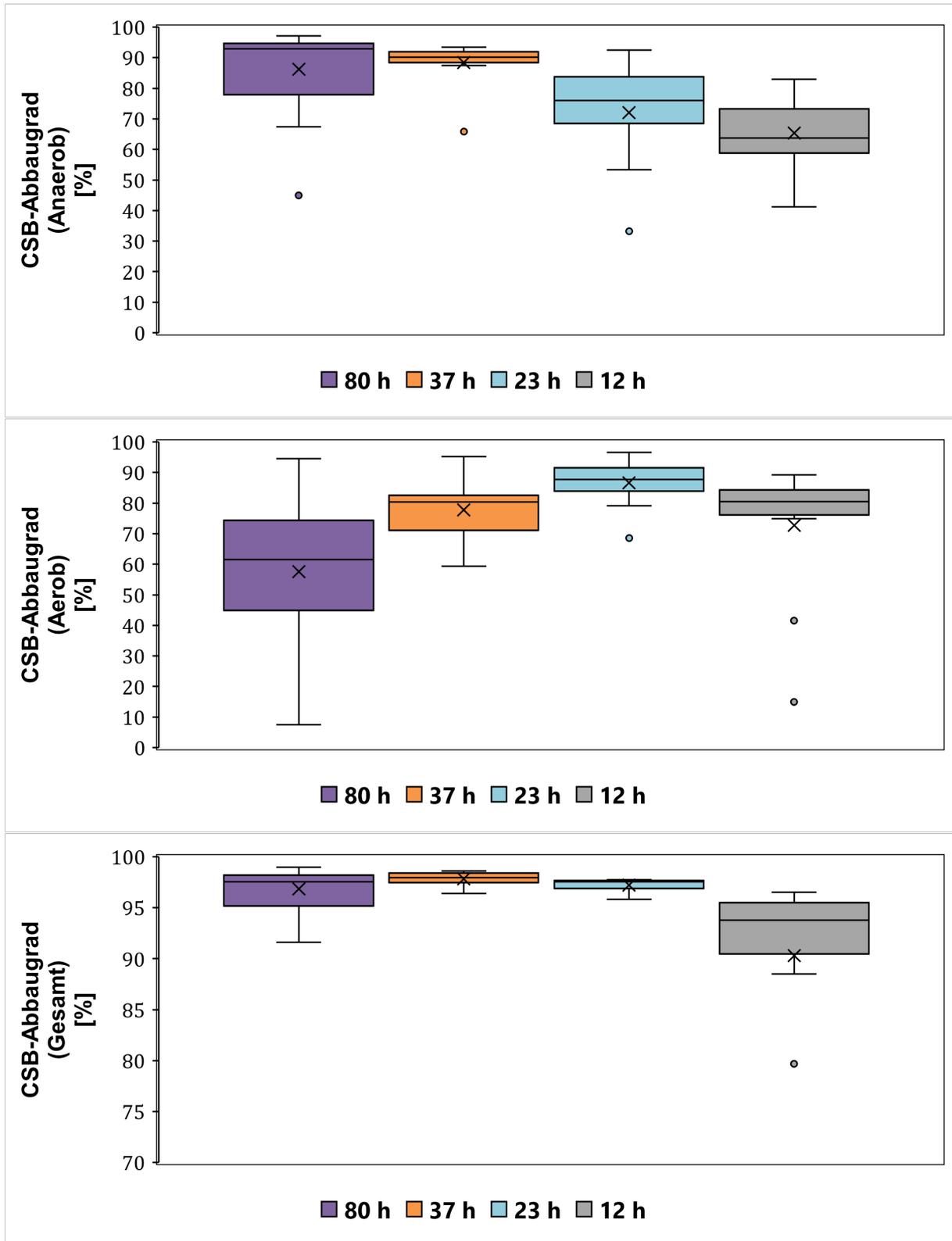
Die Untersuchungen zeigten, dass durch Verringerung der HRT der FM- und CSB-spezifischen Methanertrags sank und die MPR stieg. Die HRT hatte somit einen erwartungsgemäßen Einfluss auf den Methanertrag und der MPR. Aufgrund der kürzer gewordenen Aufenthaltszeit des Abwassers im Reaktor reduzierte sich der Gasertrag, dagegen stieg die reaktorspezifische Methanproduktionsrate aufgrund des größer gewordenem Abwasservolumens im Zulauf. Weiterhin wurde ab einer HRT von  $HRT < 23$  h eine Stagnation der MPR festgestellt. Die maximale MPR im anaeroben Belebungsverfahren betrug  $1,2 Nm^3/(m^3_R \cdot d)$ .



Legende:

$l_N/kg_{FM}$ :	Normliter pro Kilogramm FM	FM:	Frischmasse
CSB:	Chemischer Sauerstoffbedarf	h:	Stunde
MPR:	Methanproduktionsrate	spez.:	Spezifischer
$Nm^3/(m^3_R \cdot d)$ :	Normkubikmeter CH <sub>4</sub> pro Kubikmeter Reaktor und Tag		

Abbildung 4-10: Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den FM-spezifischen sowie CSB-spezifischen Methanertrag und die Methanproduktionsrate (Verfahrenskonzept 1)



Legende:

%: CSB-Abbaugrad

CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf

Abbildung 4-11: Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den CSB-Abbaugrad in der anaeroben sowie aeroben Anlagenstufe und im Gesamtsystem (Verfahrenskonzept 1)



Anschließende CSB-Messungen ergaben für das Sediment eine CSB-Konzentration von 36.300 mg/l und für den Überstand eine CSB-Konzentration von 2.266 mg/l. Aufgrund des Sedimentationsverhalten des Abwassers wurde im Zulauf eine schwankende CSB-Konzentration von 1.167 mg/l bis 11.923 mg/l gemessen. Aus diesem Grund wurde eine gemittelte CSB-Konzentration aus allen ermittelten CSB-Konzentrationen genutzt, die bei 5.921 mg/l lag. In der folgenden Abbildung sind die ermittelten CSB-Konzentration während der Gesamtversuchslaufzeit von Konzept 1 inklusive des Mittelwertes der CSB-Konzentration dargestellt.

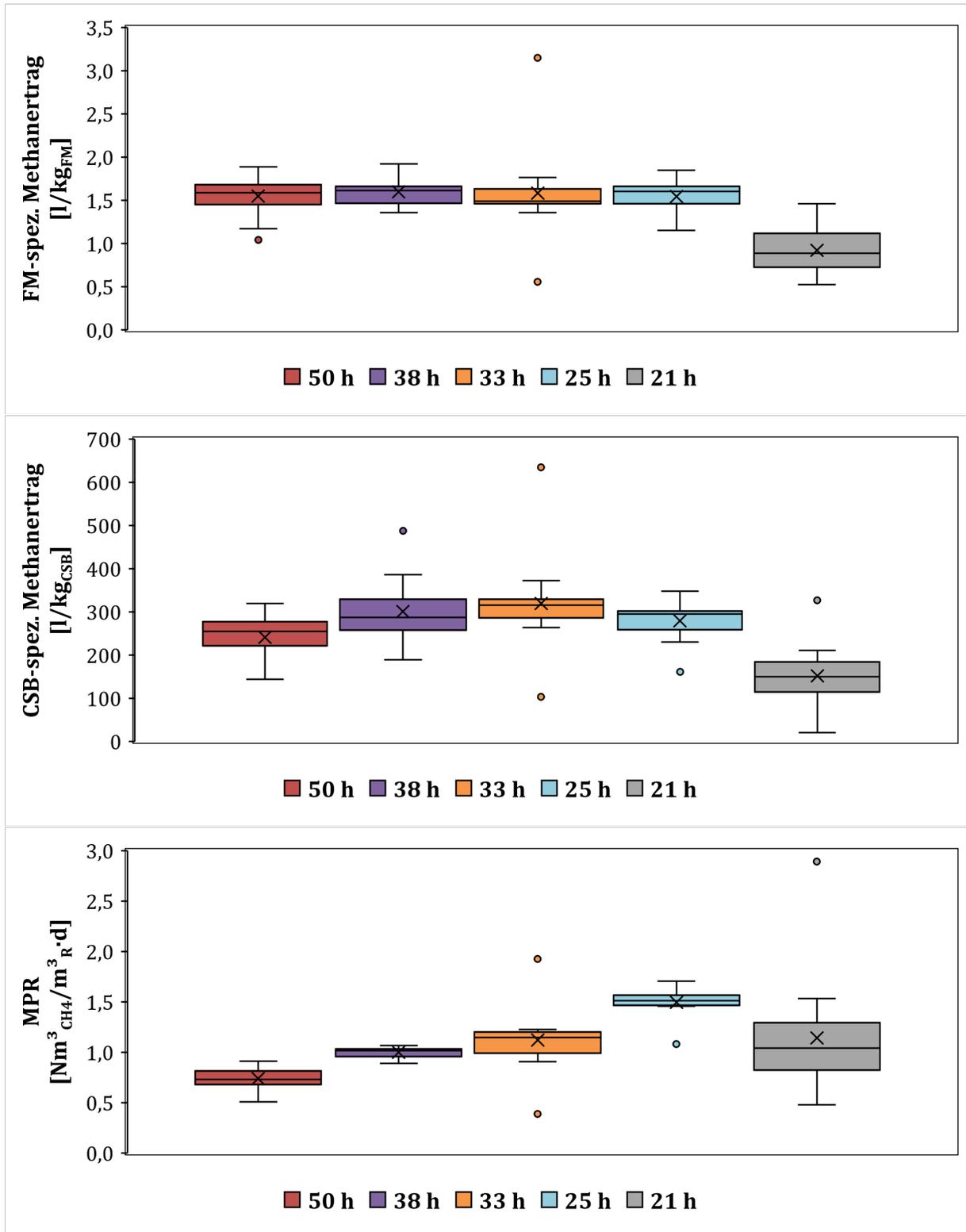
Aus den Ergebnissen der ersten kontinuierlichen Versuchsphase resultiert, dass bei einer HRT von rund 23 h die größtmögliche Reaktoreffizienz in Bezug auf die Methanproduktion vorliegt. Bei energetischer Nutzung des Biomethans liegt bei einer HRT von 23 h das CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential bei 3,4 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d) bzw. 3,8 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abwasser (Abw.)</sub>. Weiterhin resultiert aus den Ergebnissen, dass bei einer HRT von 37 h die größtmögliche Reinigungsleistung von 88 % vorliegt. Bei einer HRT von 37 h liegt das CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential bei 2,6 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d) bzw. 4,1 g CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>. Das CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential wurde durch Multiplikation der MPR mit dem Heizwert von Methan und dem spezifischen Vermeidungsfaktor von Klärgas berechnet. Die Werte für den Heizwert und dem spez. Vermeidungsfaktor sind im Folgenden dargestellt (Memmler et al. 2021):

- Heizwert von Methan: 9,97 kWh/m<sup>3</sup><sub>CH<sub>4</sub></sub>
- Spezifischer Vermeidungsfaktor von Klärgas: 297,1 g CO<sub>2</sub>e/kWh<sub>th</sub>

#### 4.3.2 Verfahrenskonzept 2

Die Gesamtlaufzeit der kontinuierlichen Versuchsphase in Verfahrenskonzept 2 betrug 75 Tage. Es wurden 5 Betriebspunkte bei den HRT 50, 38, 33, 25 und 21 h untersucht.

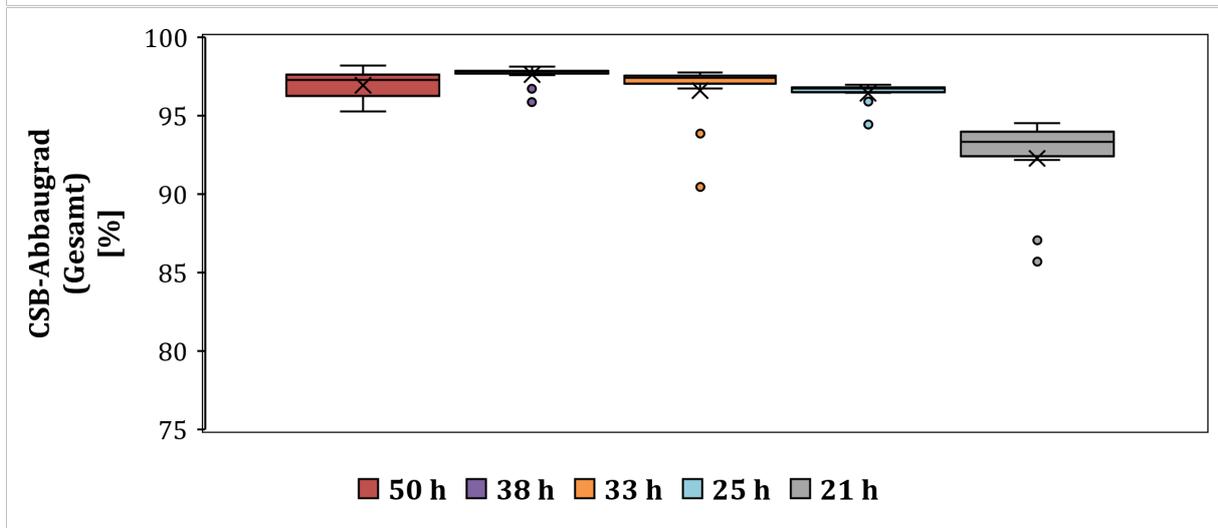
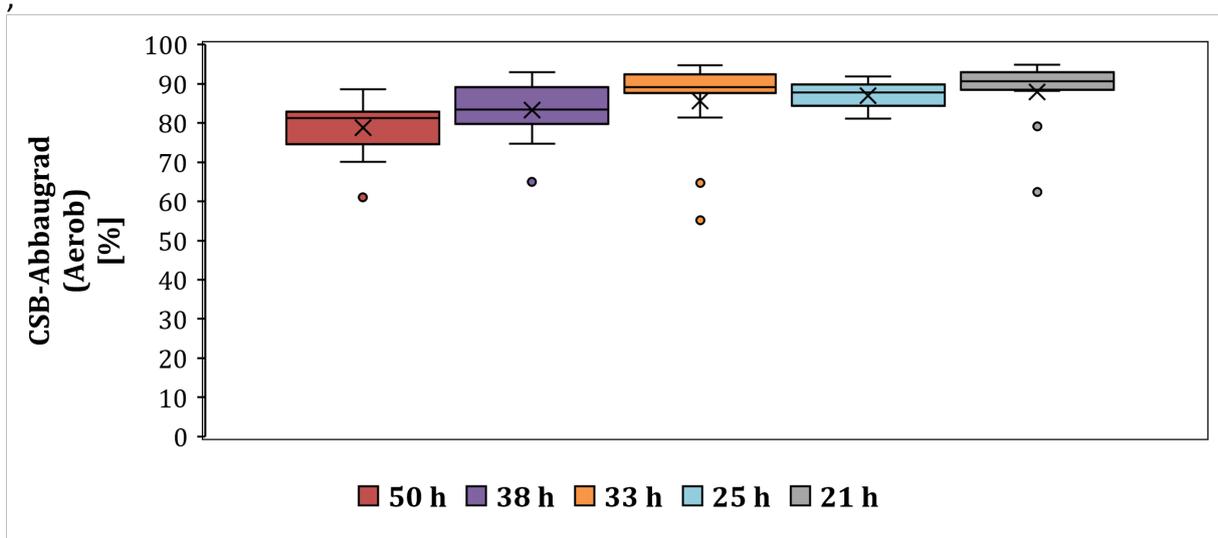
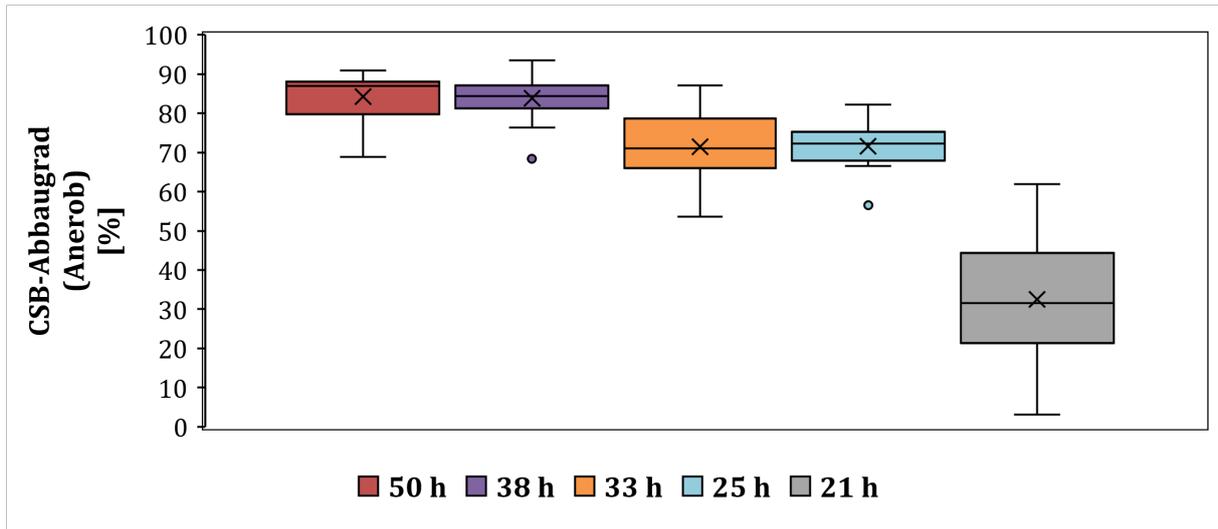
Die Ergebnisse der Untersuchungen der zweiten Versuchsphase sind in Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 als Box-Plots abgebildet. Der Methanertrag und die reaktorspezifische Methanbildungsrate des EGSB-Reaktors in Verfahrenskonzept 2 sind in Abbildung 4-13 dargestellt. Hierbei stellen die ersten beiden Diagramme den Einfluss der HRT auf den FM-spezifischen sowie CSB-spezifischen Methanertrag dar. Das dritte Diagramm bildet den Einfluss der HRT auf die MPR ab. Auf der Abszissenachse ist die HRT aufgetragen, auf der Ordinatenachse der FM-spezifische Methanertrag in I<sub>N</sub>/kg<sub>FM</sub>, der CSB-spezifische Methanertrag in I<sub>N</sub>/kg<sub>CSB</sub> und die MPR in Nm<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d).



Legende:

- |                          |  |        |              |
|--------------------------|--|--------|--------------|
| $l_N/kg_{FM}$ :          | Normliter pro Kilogramm FM                           | FM:    | Frischmasse  |
| CSB:                     | Chemischer Sauerstoffbedarf                          | h:     | Stunde       |
| MPR:                     | Methanproduktionsrate                                | spez.: | Spezifischer |
| $Nm^3/(m^3_R \cdot d)$ : | Normkubikmeter $CH_4$ pro Kubikmeter Reaktor und Tag |        |              |

Abbildung 4-13: Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den FM-spezifischen sowie CSB-spezifischen Methanertrag und die Methanproduktionsrate (Verfahrenskonzept 2)



Legende:

%: CSB-Abbaugrad

CSB: Chemischer Sauerstoffbedarf

Abbildung 4-14: Einfluss der hydraulischen Verweilzeit auf den CSB-Abbaugrad in der anaeroben sowie aeroben Anlagenstufe und im Gesamtsystem (Verfahrenskonzept 2)

Wie in den Box-Plots zu erkennen ist, betrug der FM-spez. Methanertrag im Mittelwert  $1,6 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{FM}}$  und der CSB-spezifische Methanertrag im Mittelwert zwischen  $240 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{CSB}}$  und  $320 \text{ l}_N/\text{kg}_{\text{CSB}}$ . Eine Verringerung der HRT hatte keinen Einfluss auf den Methanertrag bis zu einer HRT von 25 h. Die MPR stieg mit Verringerung der HRT an. Bei einer HRT von 25 h wurde eine maximale Rate von  $1,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3_{\text{R}}\cdot\text{d})$  erreicht. Eine weitere Reduzierung der HRT auf 21 h führte zu einer Verringerung der MPR und Gaserträge, was für eine Überlastung des anaeroben Systems spricht.

Die HRT abhängige Reinigungsleistung ist in Abbildung 4-14 dargestellt. Die drei Box-Plot Diagramme zeigen den Einfluss der HRT auf den CSB-Abbaugrad der anaeroben sowie aeroben Reaktorstufen und dem des gesamten Verfahrenskonzeptes. Für die Berechnung der Reinigungsleistungen des EGSB-Reaktors in Abbildung 4-14 wurden die gemittelten CSB-Werte der homogenisierten IBCs genutzt, die in einem Bereich von  $4.970 \text{ mg/l}$  bis  $6.247 \text{ mg/l}$  lagen. Die Untersuchungen der Reinigungsleistungen hinsichtlich des CSB im EGSB-Reaktor ergab eine Reduzierung des CSB-Abbaugrades von 84 % auf 72 % bei Herabsenkung der HRT auf bis zu 25 h. Die maximale Reinigungsleistung von 84 % wurde bei einer HRT von 38 h festgestellt. Bei weiterer Reduzierung der HRT auf bis zu 21 h fiel der CSB-Abbaugrad auf 33 % ab. Wie auch in Verfahrenskonzept 1 hatte die HRT einen zu erwartenden Einfluss auf den CSB-Abbaugrad. Im gesamten Verfahrenskonzept 2 wurde während der kontinuierlichen Versuchsphase ein CSB-Abbau von über 92 % ermittelt, wobei der CSB-Abbau im gesamten System bis zu einer HRT von 25 h über 96 % lag.

Aus den Ergebnissen der ersten kontinuierlichen Versuchsphase resultiert, dass bei einer HRT von rund 25 h die größtmögliche Reaktoreffizienz in Bezug auf die Methanproduktion vorliegt. Bei energetischer Nutzung des Biomethans liegt bei einer HRT von 25 h das  $\text{CO}_2$ -Einsparungspotential bei  $4,4 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^3_{\text{Reaktor}}\cdot\text{d})$  bzw.  $4,6 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3_{\text{Abw.}}$ . Weiterhin resultiert aus den Ergebnissen, dass bei einer HRT von 38 h die größtmögliche Reinigungsleistung von 84 % vorliegt. Bei einer HRT von 38 h liegt das  $\text{CO}_2$ -Einsparungspotential bei  $3,0 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^3_{\text{Reaktor}}\cdot\text{d})$  bzw.  $4,7 \text{ g CO}_2\text{e}/\text{m}^3_{\text{Abw.}}$ . Die Berechnung des  $\text{CO}_2$ -Einsparungspotential ist mit der aus Verfahrenskonzept 1 identisch.

### 4.3.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 3

Die Ergebnisse von Arbeitspaket 3 „Versuche zur Optimierung der anaeroben Abwasserbehandlung“ stichpunktartig zusammengefasst:

- Verfahrenskonzept 1 (Anaerobes Belebungsverfahren & Aerobes Belebungsverfahren)
  - ✓ Maximale MPR von  $1,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3_{\text{Reaktor}} \cdot \text{d})$  bei HRT von 23 h
  - ✓ Abnahme des CSB-Abbaus von 86 % (HRT = 80 h) bis 65 % (HRT = 12 h)
  - ✓ CSB-Abbau von > 90 % im gesamten Verfahrenskonzept
  - ✓ Maximale Reaktoreffizienz bei einer HRT von 23 h
    - ↳  $\text{CO}_2$ -Einsparungspotential:  $3,4 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^3_{\text{R}} \cdot \text{d})$  bzw.  $3,8 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3_{\text{Abw.}}$
  - ✓ Maximale Reinigungsleistung (CSB) bei einer HRT von 37 h
    - ↳  $\text{CO}_2$ -Einsparungspotential:  $2,6 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^3_{\text{R}} \cdot \text{d})$  bzw.  $4,1 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3_{\text{Abw.}}$
- Verfahrenskonzept 2 (EGSB-Reaktor & Aerobes Belebungsverfahren)
  - ✓ Maximale MPR von  $1,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3_{\text{Reaktor}} \cdot \text{d})$  bei HRT von 25 h
  - ✓ Abnahme des CSB-Abbaus von 84 % (HRT = 50 h) bis 33 % (HRT = 21 h)
  - ✓ CSB-Abbau von > 92 % im gesamten Verfahrenskonzept
  - ✓ Maximale Reaktoreffizienz bei einer HRT von 25 h
    - ↳  $\text{CO}_2$ -Einsparungspotential:  $4,4 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^3_{\text{R}} \cdot \text{d})$  bzw.  $4,6 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3_{\text{Abw.}}$
  - ✓ Maximale Reinigungsleistung (CSB) bei einer HRT von 38 h
    - ↳  $\text{CO}_2$ -Einsparungspotential:  $3,0 \text{ kg CO}_2\text{e}/(\text{m}^3_{\text{R}} \cdot \text{d})$  bzw.  $4,7 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{m}^3_{\text{Abw.}}$

## 4.4 Bewertung des Verfahrenskonzeptes und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

### 4.4.1 Technische Bewertung der Verfahrenskonzepte

Im folgenden Abschnitt werden die anaeroben Reaktorsysteme aus Verfahrenskonzept 1 und 2 hinsichtlich der Reaktoreffizienz und Betriebsstabilität bewertet.

#### Reaktoreffizienz

Nach van Haandel et al. (2006) lässt sich die Reaktoreffizienz am einfachsten durch Reinigungsleistung in Abhängigkeit von der HRT ausdrücken. (van Haandel et al. 2006) Ein weiteres Kriterium zur Bewertung der Reaktoreffizienz ist die reaktorspezifische Methanbildungsrate des anaeroben Reaktorsystems in Form der MPR. Die MPR ist ein Parameter, der für ein anaerobes Reaktorsystem bei einer entsprechenden  $B_R$  bzw. HRT spezifisch ist. (VDI 2016)

Die Untersuchungsergebnisse zeigten, dass die beiden anaeroben Reaktorsysteme bis zu einer HRT von rund 24 h eine ähnlich hohe Reinigungsleistung hinsichtlich des CSB von > 70 % aufwiesen. Eine weitere Reduzierung der HRT führte zu deutlichen Unterschieden. Beim anaeroben Belebungsverfahren wurde bei einer HRT von 12 h eine Reinigungsleistung von rund 65 % erreicht. Beim EGSB-Reaktor und einer HRT von 21 h verringerte sich die Reinigungsleistung allerdings auf 33 %. Daraus lässt sich schließen, dass das anaerobe Belebungsverfahren im Vergleich zu dem EGSB-Reaktor bei niedrigen HRT das effizientere System ist. Der EGSB-Reaktor wiederum erreichte höhere MPR [ $1,5 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3_{\text{R}} \cdot \text{d})$ ] als das anaerobe Belebungsverfahren [ $1,2 \text{ Nm}^3/(\text{m}^3_{\text{R}} \cdot \text{d})$ ]. Bitton (2011) beschrieb, dass in EGSB-Reaktoren ein verbesserter Kontakt zwischen abzubauenem Substrat und Mikroorganismen vorliegt. Weiterhin wird laut Bitton (2011) im EGSB-Reaktor durch die Pelletstruktur eine erhöhte Biomassekonzentration erreicht, die mit einem geringen Reaktorvolumen verbunden ist. Aus den Ergebnissen lässt sich somit folgern, dass der EGSB-Reaktor gegenüber dem anaeroben Belebungsverfahren das Verfahren mit der höheren Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Methanproduktion ist.

### **Betriebsstabilität**

Neben der Reaktoreffizienz ist die Betriebsstabilität ein weiteres Kriterium für die technische Bewertung anaerober Reaktorsysteme. (DWA 2012) Bei der Bewertung der Betriebsstabilität wurde der Anlagenbetrieb betrachtet. Unregelmäßigkeiten, die einen reibungslosen Betrieb erschweren oder hindern können, wurden dokumentiert und bewertet.

#### **1. Verfahrenskonzept 1**

Aus der kontinuierlichen Versuchsphase des Verfahrenskonzeptes 1 konnte eine Schwimmschlamm-Bildung im Sedimentationsbecken beobachtet werden. Lemmer (1996) definierte Schwimmschlamm als ein Konstrukt aus schlammumhüllten Gasblasen und hydrophoben Abwasserinhaltsstoffen, wie zum Beispiel Fett. Nach Lemmer et al. (1996) entstehen schlammumhüllte Gasblasen durch die Adsorption von Gasblasen an Fraktionen aus Belebtschlammflocken, deren Entstehen durch fadenförmige Bakterien begünstigt werden. Die Anheftung von hydrophoben Abwasserinhaltsstoffen führt zur Fraktionierung sowie Stabilisierung der schlammumhüllten Gasblasen, sodass sich Schwimmschlamm ausbildet. (Lemmer et al. 1996) Mittels eines Sedimentationsversuches in einem 1 l Becherglas wurde die Entwicklung von Schwimmschlamm nach nur kurzer Zeit beobachtet. In diesem Versuch wurde Substrat aus dem CSTR während der kontinuierlichen Versuchsphase entnommen. In Abbildung 4-15 ist das Ergebnis des Versuches abgebildet.

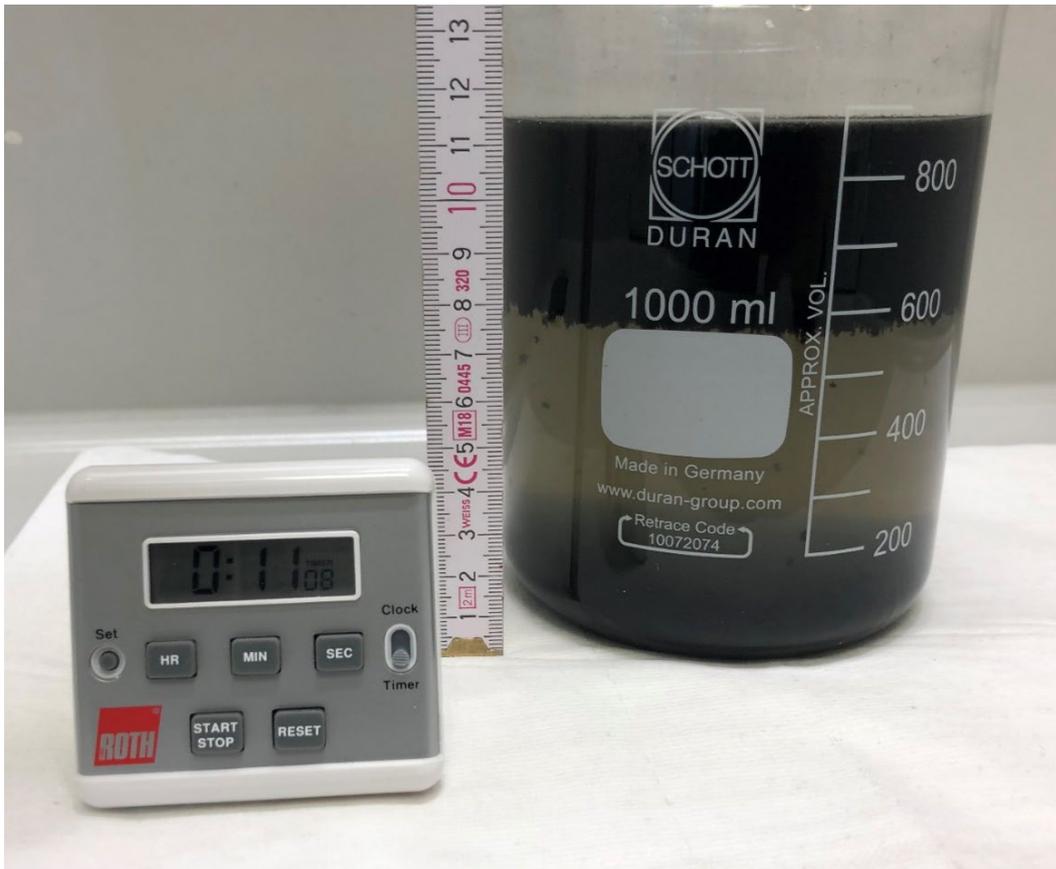


Abbildung 4-15: Sedimentationsversuch zur Ermittlung der Schwimmschlamm-  
schicht in der kontinuierlichen Versuchsphase von  
Verfahrenskonzept 1

Hierbei ist zu erkennen, dass die Schwimmschlammsschicht rund 40 % des Gesamtvolumens ausmachte. Lemmer (1996) erläuterte, dass die Bildung von Schwimmschlamm in anaeroben Abwasserreinigungsanlagen eine schlechte Entgasung der anaeroben Schlämme zur Folge hat, sodass ein reduzierter Methanertrag die Konsequenz ist. Weiterhin muss aufgrund der Schwimmschlamm-Bildung die maximale Füllhöhe des Behälters reduziert werden. In der kontinuierlichen Versuchsphase konnte durch Reduzierung der HRT ein Anstieg der Schwimmschlammmenge beobachtet werden. Nach Lemmer (1996) fördert eine Substratanreicherung die Adsorption von Organismen, die nicht mehr genug Nahrung vorfinden. Für die Entfernung der Schwimmschlämme könnte der anaeroben Abwasserreinigung eine Flotationsanlage nachgeschaltet werden. (Lemmer et al. 1996)

## 2. Verfahrenskonzept 2

In der kontinuierlichen Versuchsphase von Verfahrenskonzept 2 konnte in Betriebspunkt 5 das Auswaschen von Pellets beobachtet werden. Die Aufnahme der Probe ist in Abbildung 4-16 zu sehen.



Abbildung 4-16: Probe vom Ablauf des EGSB-Reaktors während des Betriebes von Betriebspunkt 5 in Verfahrenskonzept 2 (HRT  $\sim$  21 h)

Das Auswaschen der Pellets kann unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen könnte die Auswaschung bauliche Gründe gehabt haben. Die Effizienz der Abscheidevorrichtung im Reaktorkopf des EGSB-Reaktors könnte nicht hoch genug gewesen sein, sodass bei sehr geringen HRT die Rückhaltung der Pellets nicht gut genug funktioniert hat. Hierbei wäre der Betriebspunkt mit rund 21 h gleichbedeutend mit dem Grenzpunkt an dem der im Technikum betriebene Reaktor nicht mehr betrieben werden kann. Zum anderen könnte die Auswaschung auf die Eigenschaft des Abwassers zurückgeführt werden. Nach Basitere et al. (2016), die in ihrer Studie das Auswaschen von Pellets während der anaeroben Behandlung von Geflügelschlachthausabwasser bei geringer HRT im EGSB-Reaktor beobachteten, wurde die Zuführung von Schwebstoffen sowie Fetten, Ölen und Schmierstoffen durchs Abwasser als Ursache aufgeführt. Die Auswaschung von Pellets führt zu einer Verringerung der Biomasse im Reaktor und somit zu einer Reduzierung der Reaktoreffizienz.

Zur Reduzierung der Fette, Öle und Schmierstoffe sowie Schwebstoffe im Abwasser wurde von Basitere et al. (2016) ein Vorbehandlungssystem in Form einer Druckentspannungsflotationsanlage empfohlen, so dass die Auswaschung von Pellets verhindert und die Methanbildungsrate des EGSB-Reaktors bei niedrigen HRT verbessert wird. (Basitere et al. 2016)

#### 4.4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung umfasste die Berechnung der jährlichen Gesamtkosten-, Erdgas- und THG-Einsparung sowie die Kosteneinsparung nach 20 Jahren, die durch die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung in den zwei untersuchten anaeroben Reaktorkonzepten generiert werden könnten. Die Kosten- sowie THG-Einsparungen wurden hierfür als Jahreswert und spezifisch je m<sup>3</sup> Abwasser ermittelt, die Erdgaseinsparungen als prozentualer Wert. Des Weiteren wurde die Grundstücksfläche berechnet, die für die anaeroben Reaktoren im großtechnischen Maßstab benötigt werden würde. Die Formeln für die Berechnungen der Kosten-, Erdgas-, THG-Einsparungen und Grundstücksfläche der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sind in Anhang 5 abgebildet.

Für die Berechnungen wurden die Untersuchungsergebnisse aus Arbeitspaket 3 und die im Folgenden dargestellten Unternehmensdaten der Fa. Naarmann aus dem Jahr 2020 genutzt:

➤ Abwassermenge	→ 217.000 m <sup>3</sup> /a
➤ Erdgasbedarf	→ 5.440.000 m <sup>3</sup> /a
➤ Erdgaspreis	→ 1,5 Cent (ct) pro Kilowattstunde (kWh)
➤ Erdgassteuer	→ 0,6 ct/kWh
➤ Netznutzung - Arbeitspreis (Erdgas)	→ 0,1 ct/kWh
➤ Netznutzung - Leistungspreis (Erdgas)	→ 10,4 ct/kWh
➤ Jahreshöchstleistung	→ 4.845 Kilowatt (kW)

Neben den Untersuchungsergebnissen und Unternehmensdaten wurden für die Berechnungen die im Folgenden dargestellten Annahmen verwendet:

➤ Biomethannutzung	→ 100 % zur Dampferzeugung in den Dampfkesseln
➤ Nutzung eines Mittelwertes für die CO <sub>2</sub> -Steuer	→ 0,7 ct/kWh
➤ CO <sub>2</sub> -Steuer ab dem Jahr 2026	→ 1,0 ct/kWh
➤ Spezifischer Vermeidungsfaktor für die Wärmeerzeugung aus Klärgas	→ 300 g CO <sub>2</sub> e/kWh

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung war es zunächst notwendig auf Basis der Untersuchungsergebnisse aus Arbeitspaket 3 für die jeweiligen HRT die jährliche Erdgasmenge zu berechnen, die durch den betrachteten anaeroben Reaktor im großtechnischen Maßstab erzeugt werden könnte.

Darauf aufbauend wurden die Kosten-, Erdgas- und THG-Einsparungen berechnet. Die Ermittlung der Gesamtkosteneinsparungen orientierte sich an der vom Bundesministerium für Finanzen (BMF) vorgeschriebenen, betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer für Wasseraufbereitungs- und –reinigungsanlagen. Innerhalb der betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer werden die Anlagen in der Regel in der Industrie abgeschrieben (BMF 1995). Für die Berechnung der für den anaeroben Reaktor benötigten Grundstücksfläche in Quadratmeter ( $m^2$ ) wurde im ersten Schritt das notwendige Anlagenvolumen für den anaeroben Reaktor in  $m^3$  ermittelt. Zur Vereinfachung der Berechnung der Grundstücksfläche wurde die Annahmen einer zylindrischen Reaktorform und einer quadratischen Grundstücksfläche angenommen.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des anaeroben Belebungsverfahrens sind in Tabelle 4-6 und Tabelle 4-7 dargestellt. Die Einsparungen wurden für die in Arbeitspaket 3 im anaeroben Belebungsverfahren untersuchten Betriebspunkte berechnet. Durch die anaerobe Behandlung des Molkereiabwassers der Fa. Naarmann im anaeroben Belebungsverfahren könnte die Fa. Naarmann eine jährliche Kosteneinsparung von rund 37.300 – 93.200 €/a bzw. 0,17 – 0,43 €/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> generieren. Die dafür benötigte Fläche liegt bei 37 – 109 m<sup>2</sup>. Des Weiteren könnte die Fa. Naarmann durch die Rückführung des aus der Behandlung entstandene Biomethans rund 2 – 6 % des jährlichen Erdgases einsparen. Hierbei würde die jährliche THG-Einsparung der Fa. Naarmann bei rund 390.000 – 970.000 kg CO<sub>2</sub>e/a bzw. 1,8 – 4,5 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> betragen. Der für die Fa. Naarmann zu empfehlende Betriebspunkt für die Auslegung und den Betrieb des anaeroben Belebungsverfahrens ist Betriebspunkt 2 mit einer HRT von 37 h. Aufgrund der geringen Flächenverfügbarkeit der Fa. Naarmann für die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung ist die für das anaerobe Belebungsverfahren berechnete Grundstücksfläche ein relevanter Faktor für die Auswahl des geeignetsten Betriebspunktes. Der Faktor des Starkverschmutzerzuschlages muss im Falle der Fa. Naarmann nicht weiter berücksichtigt werden, da die Fa. Naarmann keinen Starkverschmutzerzuschlag zahlt. Die ausgegebene Empfehlung von Betriebspunkt 2 für das anaerobe Belebungsverfahren wurde aufgrund der hohen Kosten-, Erdgas- und THG-Einsparungen in Relation zu einem geringen Platzbedarf von 55 m<sup>2</sup> gewählt.

Tabelle 4-6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des anaeroben Belebungsverfahrens – Teil 1 (Verfahrenskonzept 1)

Betriebspunkt (HRT)	Jährliche Kosteneinsparung <sup>1</sup>		Kosteneinsparungen nach 20 Jahren	
	[-]	[€/a]	[€/m <sup>3</sup> <sub>Abw.</sub> ]	[€]
1 (80 h)		93.200	0,43	2.010.000
2 (37 h)		87.000	0,40	1.880.000
3 (23 h)		80.800	0,37	1.740.000
4 (12 h)		37.300	0,17	805.100

<sup>1</sup> Mittelwertannahme der CO<sub>2</sub>-Steuer von 2021 bis 2025

Legende:

HRT: Hydraulische Verweilzeit                      h: Stunden                      €: Euro  
 m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>: Kubikmeter Abwasser

Tabelle 4-7: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des anaeroben Belebungsverfahrens – Teil 2 (Verfahrenskonzept 1)

Betriebspunkt (HRT)	Jährliche Erdgaseinsparung	Jährliche THG-Einsparung <sup>1</sup>		Grundstücks- fläche
	[%]	[kg CO <sub>2</sub> e/a]	[kg CO <sub>2</sub> e/m <sup>3</sup> <sub>Abw.</sub> ]	[m <sup>2</sup> ]
1 (80 h)	6,0	970.000	4,5	109
2 (37 h)	5,6	900.000	4,1	55
3 (23 h)	5,2	840.000	3,9	55
4 (12 h)	2,4	390.000	1,8	37

<sup>1</sup> Annahme der 100 %igen Biomethannutzung in den Dampfkesseln zur Dampferzeugung

Legende:

HRT: Hydraulische Verweilzeit                      THG: Treibhausgas                      h: Stunden  
 %: Prozent                      kg CO<sub>2</sub>e: Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente                      a: Jahr  
 m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>: Kubikmeter Abwasser                      m<sup>2</sup>: Quadratmeter

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des EGSB-Reaktors sind in Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 dargestellt. Die Einsparungen wurden für die in Arbeitspaket 3 im EGSB-Reaktor untersuchten Betriebspunkte berechnet. Aufgrund ähnlicher ermittelter Methanerträge und MPR für die Betriebspunkt 1, 2 sowie 3 in Arbeitspaket 3 sind die berechneten Einsparungen und Grundstücksflächen identisch. Die jährlichen Kosteneinsparungen für die Fa. Naarmann würden bei der anaeroben Behandlung des Molkereiabwassers der Fa. Naarmann im EGSB-Reaktor bei rund 56.000 – 99.400 €/a bzw. 0,26 – 0,46 €/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> liegen.

Hierbei würde eine Grundstücksfläche von 19 – 33 m<sup>2</sup> für den EGSB-Reaktor benötigt werden. Durch Substitution des Erdgases mit dem aus der anaeroben Behandlung entstehenden Biomethan könnte die Fa. Naarmann ihren jährlichen Erdgasbedarf um rund 4 – 6 % reduzieren. Hieraus resultiert eine THG-Einsparung von rund 580.000 – 1.000.000 kg CO<sub>2</sub>e/a bzw. 2,7 – 4,8 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>.

Tabelle 4-8: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des EGSB-Reaktors – Teil 1  
(Verfahrenskonzept 2)

<i>Betriebspunkt (HRT)</i>	<i>Jährliche Kosteneinsparung<sup>1</sup></i>		<i>Kosteneinsparungen nach 20 Jahren</i>
	<i>[-]</i>	<i>€/a</i>	<i>€/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub></i>
<i>1 (50 h)</i>	99.400	0,46	2.150.000
<i>2 (38 h)</i>	99.400	0,46	2.150.000
<i>3 (33 h)</i>	99.400	0,46	2.150.000
<i>4 (25 h)</i>	94.100	0,43	2.030.000
<i>5 (21 h)</i>	56.000	0,26	1.210.000

<sup>1</sup> Mittelwertannahme der CO<sub>2</sub>-Steuer von 2021 bis 2025

Legende:

HRT: Hydraulische Verweilzeit                      h: Stunden                      €: Euro  
m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>: Kubikmeter Abwasser

Tabelle 4-9: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des EGSB-Reaktors – Teil 2  
(Verfahrenskonzept 2)

<i>Betriebspunkt (HRT)</i>	<i>Jährliche Erdgaseinsparung</i>	<i>Jährliche THG-Einsparung<sup>1</sup></i>		<i>Grundstücks- fläche</i>
	<i>[%]</i>	<i>[kg CO<sub>2</sub>e/a]</i>	<i>[kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>]</i>	<i>[m<sup>2</sup>]</i>
<i>1 (50 h)</i>	6,4	1.000.000	4,8	33
<i>2 (38 h)</i>	6,4	1.000.000	4,8	26
<i>3 (33 h)</i>	6,4	1.000.000	4,8	25
<i>4 (25 h)</i>	6,0	980.000	4,5	19
<i>5 (21 h)</i>	3,6	580.000	2,7	17

<sup>1</sup> Annahme der 100 %igen Biomethannutzung in den Dampfkesseln zur Dampferzeugung

Legende:

HRT: Hydraulische Verweilzeit                      THG: Treibhausgas                      h: Stunden  
%: Prozent                      kg CO<sub>2</sub>e: Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalente                      a: Jahr  
m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>: Kubikmeter Abwasser                      m<sup>2</sup>: Quadratmeter

Aus Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 geht hervor, dass Betriebspunkt 3 für die Auslegung und Betrieb des EGSB-Reaktors für die anaerobe Behandlung des Molkereiabwassers der Fa. Naarmann zu empfehlen ist. Wie schon für das anaerobe Belebungsverfahren wurde Betriebspunkt 3 für den EGSB-Reaktor aufgrund des geringen Platzbedarfs von 25 m<sup>2</sup> im Verhältnis zu hohen Kosten-, Erdgas- und THG-Einsparungen gewählt.

Durch die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnte dargestellt werden, dass im Vergleich zum anaeroben Belebungsverfahren der EGSB-Reaktor für die anaerobe Behandlung des Molkereiabwassers der Fa. Naarmann das wirtschaftlichere Reaktorsystem ist. Begründen lässt sich der Entschluss mit höheren Kosten-, Erdgas-, THG-Einsparungen bei einer geringeren benötigten Grundstücksfläche bei den jeweiligen empfohlenen Betriebspunkten sowie bei ähnlichen Betriebspunkten der beiden anaeroben Reaktorsysteme. Der rohstoffspezifische Energiebedarf würde sich bei der anaeroben Molkereiabwasserbehandlung im EGSB-Reaktor bei einer HRT von 33 h von rund 0,34 kWh<sub>Erdgas</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub> auf rund 0,32 kWh<sub>Erdgas</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub> verringern. Das hätte zur Folge, dass der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Fa. Naarmann durch den vermiedenen THG-Ausstoß auf rund 12.870.000 kg CO<sub>2</sub>e/a bzw. 0,08 kg CO<sub>2</sub>e/kg<sub>Rohmilch</sub> reduziert werden würde.

#### 4.4.3 Zusammenfassung Arbeitspaket 4

Die Ergebnisse aus Arbeitspaket 4 „Bewertung des Verfahrenskonzepts und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung“ stichpunktartig zusammengefasst:

- Anaerobes Belebungsverfahren
  - ✓ Beobachtung von Schwimmschlammschichten durch Aggregation von schlammumhüllten Gasblasen und Abwasserinhaltsstoffen
  - ✓ Betriebspunkt 3 mit einer HRT von 37 h zu empfehlen
  - ✓ Jährliche Kosteneinsparung von 87.000 €/a bzw. 0,40 €/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch Erdgassubstitution
  - ✓ Jährliche Erdgaseinsparungen von rd. 6 %
  - ✓ THG-Einsparungen von 900.000 kg CO<sub>2</sub>e/a bzw. 4,1 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch anaerobe Molkereiabwasserbehandlung
- EGSB-Reaktor
  - ✓ Beobachtung von Pelletauswaschung unterhalb einer HRT von 25 h
  - ✓ Betriebspunkt 3 mit einer HRT von 33 h zu empfehlen
  - ✓ Jährliche Kosteneinsparung von 99.400 €/a bzw. 0,46 €/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch Erdgassubstitution

- ✓ Jährliche Erdgaseinsparungen von rd. 6 %
- ✓ THG-Einsparungen von 1.000.000 kg CO<sub>2</sub>e/a bzw. 4,58 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch anaerobe Molkereiabwasserbehandlung
- EGSB-Reaktor für die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung bei der Fa. Naarmann zu empfehlen
  - ✓ Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes der Fa. Naarmann von rd. 13.720.000 kg CO<sub>2</sub>e/a auf rd. 12.870.000 kg CO<sub>2</sub>e/a

## 4.5 Zusammenfassung der Projektergebnisse

Im Folgenden sind die wesentlichen Projektergebnisse der einzelnen Arbeitspakete zusammenfassend aufgelistet:

### 1. Arbeitspaket 1 „Erfassung und Bewertung der Energie und Stoffströme“

- CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Privatmolkerei Naarmann: 13.720.000 kg CO<sub>2</sub>e/a & 0,09 kg CO<sub>2</sub>e/kg<sub>Rohmilch</sub>
- Verwendetes ortsgebundenes Reinigungskonzept: Kombination aus CIP & SIP
- Energiekennwerte der Fa. Naarmann: 0,34 kWh<sub>Erdgas</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub> & 0,01 kWh<sub>Strom</sub>/kg<sub>Rohmilch</sub>
- Dezentrale Energiezentrale bestehend aus einem erdgasbetriebenen KWKK-Prozess, restlicher Wärmebezug durch klassische Wärmeerzeugung im Dampfkessel & restlicher Strombezug durch Stromfremdbezug
- KWKK-Prozess: 88 % des Strombedarfs + 26 % des Wärmebedarfs  
Klassische Wärmeerzeugung im Dampfkessel: 74 % des Wärmebedarfs  
Fremdbezug von Strom: 12 % des Strombedarfs
- Gute anaerobe Abbaubarkeit des Molkereiabwassers mit einem FM-spezifischen Methanertrag von 1,0 l<sub>N</sub>/kg<sub>FM</sub> und einem Methangehalt von rund 62 Vol.-%
- Es konnten bei den untersuchten Abwasserströmen keine Hemmungen des anaeroben Abbaus festgestellt werden
- 1-stufige anaerobe Behandlung für die Molkereiabwasserbehandlung ausreichend

### 2. Arbeitspaket 2 „Planung, Beschaffung und Inbetriebnahme der Technikumsanlage“

- Auswahl des anaeroben Belebungsverfahrens & EGSB-Reaktors als anaerobe Anlagenstufen für die halbtechnische Versuchsanlage
- Kombination aus belüfteter Reaktor und Sedimentationsbecken als aerobe Anlagenstufe
- Erstellung zweier Verfahrenskonzepte für die anaerobe & aerobe Molkereiabwasserbehandlung
- Bau und Inbetriebnahme der halbtechnischen Versuchsanlage

### 3. Arbeitspaket 3 „Versuche zur Optimierung der anaeroben Abwasserbehandlung“

- Verfahrenskonzept 1 (Anaerobes Belebungsverfahren & Aerobes Belebungsverfahren)
  - ✓ Maximale MPR von 1,2 Nm<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup><sub>Reaktor</sub>·d) bei HRT von 23 h

- ✓ Abnahme des CSB-Abbaus von 86 % (HRT = 80 h) bis 65 % (HRT = 12 h)
- ✓ CSB-Abbau von > 90 % im gesamten Verfahrenskonzept
- ✓ Maximale Reaktoreffizienz bei einer HRT von 23 h
  - ↳ CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential: 3,4 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d) bzw. 3,8 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>
- ✓ Maximale Reinigungsleistung (CSB) bei einer HRT von 37 h
  - ↳ CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential: 2,6 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d) bzw. 4,1 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>
- Verfahrenskonzept 2 (EGSB-Reaktor & Aerobes Belebungsverfahren)
  - ✓ Maximale MPR von 1,5 Nm<sup>3</sup>/(m<sup>3</sup><sub>Reaktor</sub>·d) bei HRT von 25 h
  - ✓ Abnahme des CSB-Abbaus von 84 % (HRT = 50 h) bis 33 % (HRT = 21 h)
  - ✓ CSB-Abbau von > 92 % im gesamten Verfahrenskonzept
  - ✓ Maximale Reaktoreffizienz bei einer HRT von 25 h
    - ↳ CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential: 4,4 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d) bzw. 4,6 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>
  - ✓ Maximale Reinigungsleistung (CSB) bei einer HRT von 38 h
    - ↳ CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential: 3,0 kg CO<sub>2</sub>e/(m<sup>3</sup><sub>R</sub>·d) bzw. 4,7 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub>

#### 4. Arbeitspaket 4 „Bewertung des Verfahrenskonzeptes und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung“

- Anaerobes Belebungsverfahren
  - ✓ Beobachtung von Schwimmschlammschichten durch Aggregation von schlammumhüllten Gasblasen und Abwasserinhaltsstoffen
  - ✓ Betriebspunkt 3 mit einer HRT von 37 h zu empfehlen
  - ✓ Jährliche Kosteneinsparung von 87.000 €/a bzw. 0,40 €/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch Erdgassubstitution
  - ✓ Jährliche Erdgaseinsparungen von rd. 6 %
  - ✓ THG-Einsparungen von 900.000 kg CO<sub>2</sub>e/a bzw. 4,1 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch anaerobe Molkereiabwasserbehandlung
- EGSB-Reaktor
  - ✓ Beobachtung von Pelletauswaschung unterhalb einer HRT von 25 h
  - ✓ Betriebspunkt 3 mit einer HRT von 33 h zu empfehlen
  - ✓ Jährliche Kosteneinsparung von 99.400 €/a bzw. 0,46 €/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch Erdgassubstitution
  - ✓ Jährliche Erdgaseinsparungen von rd. 6 %

- ✓ THG-Einsparungen von 1.000.000 kg CO<sub>2</sub>e/a bzw. 4,58 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> durch anaerobe Molkereiabwasserbehandlung
- EGSB-Reaktor für die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung bei der Fa. Naarmann zu empfehlen
  - ✓ Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes der Fa. Naarmann von rd. 13.720.000 kg CO<sub>2</sub>e/a auf rd. 12.870.000 kg CO<sub>2</sub>e/a

## 5 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT

Das Projekt „EnerMolk“ wurde wie nachfolgend dargestellt, präsentiert:

- Präsentation des Projektes bei der PIUS-Länderkonferenz vom 03. Bis 04.03.2021 (Online)
- „Die Energie aus dem Abwasser gewinnen“, FH Münster Pressemitteilung vom 11.05.2020 (Zugriff: <https://www.fh-muenster.de/egu/news/pressearchiv.php?pmid=8245>)
- „Naarmann: Energie aus dem Abwasser gewinnen“, Münsterländische Volkszeitung vom 15.05.2020
- „Das Beste aus Resten“, Westfälische Zeitung vom 25.05.2020
- „Die Energie aus dem Abwasser gewinnen“, WirtschaftMünsterland Magazin 03/2020, S. 43
- „Molkereiabwasser-Behandlung für ein nachhaltigeres Energiekonzept“, Wasserwirtschaft Wassertechnik (wwt) Fachmagazin 09/2020, S.14
- Veranstaltung, 11.# energie.frühstück – Energieerzeugung durch Abwasserbehandlung, Erneuerbare Energie Accelerator by storch.energy, 04.04.2022
- Veranstaltung, Technologie Hessen: Bio. Innovationen. Stärken „Wasser und Boden – Stoffströme nutzen, Ressourcen schonen“, 07.04.2022

## 6 FAZIT UND EMPFEHLUNG

Im Rahmen des Projektes konnten für die Fa. Naarmann zwei Verfahren zur Steigerung der betrieblichen Energieeffizienz erarbeitet werden. Für das Gesamtkonzept der Energieoptimierung wurden zunächst die Energie- und Stoffströme sowie die Abwassersituation der Fa. Naarmann, soweit die Daten verfügbar waren, systematisch aufgenommen. Anschließend wurden die Abwasserteilströme beprobt und analysiert. Die Analyse umfasste ein Abwasserscreening sowie eine energetische Betrachtung der einzelnen Teilströme, wodurch die Datengrundlage für weitere Untersuchungen im Projekt geschaffen wurde. Im Ergebnis zeigte sich eine insgesamt gute Abbaubarkeit der untersuchten Abwasserströme. Darauffolgend wurde eine halotechnische Versuchsanlage geplant, gebaut und in Betrieb genommen. Durch die modulare Konzeptionierung der Anlage konnten zwei Verfahrenskonzepte mit unterschiedlichen, anaeroben Reaktorkonzepten getestet werden. Die zwei kontinuierlichen Versuchsphasen zur Untersuchung der anaeroben und aeroben Molkereiabwasserbehandlung wurden erfolgreich durchgeführt. Hierbei wurde im ersten Verfahrenskonzept (Anaerobes Belebungsverfahren) durch die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung eine Reduzierung der Schmutzfracht von bis zu 86 % erreicht, im zweiten Konzept (EGSB-Reaktor) von bis zu 84 %. Für beide Konzepte war bei einer HRT von 23 h bzw. 25 h die Reaktoreffizienz in Bezug auf die Methanproduktion am höchsten. Das ermittelte CO<sub>2</sub>-Einsparungspotential durch eine mögliche Rückführung des entstehenden Methans in den Prozess der Molkerei und eine damit verbundene Substitution des Erdgases, liegt in den reaktoreffizientesten Betriebspunkten bei 3,8 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> im ersten Konzept und bei 4,6 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup><sub>Abw.</sub> im zweiten Konzept. Nach den kontinuierlichen Versuchsphasen wurden die Konzepte wirtschaftlich bewertet. Im ersten Konzept können im geeignetsten Betriebspunkt (37 h) durch die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung bei der Fa. Naarmann jährlich rund 87.000 €/a eingespart werden. Des Weiteren könnten durch Rückführung des so erzeugten Biomethans rd. 6 % des Erdgases substituiert und somit insgesamt 900.000 kg CO<sub>2</sub>e/a an THG-Emissionen eingespart werden. Im zweiten Konzept könnten bei dem zu empfehlenden Betriebspunkt (33 h) jährlich 99.400 €/a bei einer Erdgassubstitution von rd. 6 % eingespart werden. Insgesamt können im zweiten Konzept 1.000.000 kg CO<sub>2</sub>e/a an THG eingespart werden. Aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung resultierte, dass die Verwendung eines EGSB-Reaktors für die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung geeigneter ist.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck würde sich durch Verwendung des EGSB-Reaktors für die anaerobe Molkereiabwasserbehandlung bei entsprechender HRT für die Fa. Naarmann auf 13.720.000 kg CO<sub>2</sub>e/a reduzieren. Des Weiteren wurde bei der technischen Bewertung der Konzepte festgestellt, dass beim EGSB-Reaktor die Nutzung einer Vorbehandlung in Form einer Druckentspannungsflotationsanlage zur Reduzierung von Fetten, Ölen sowie Schwebstoffen empfohlen wird. Zusätzlich zur Flotationsanlage wird zum Ausgleich von Frachtspitzen und pH-Wert-Schwankungen der Einsatz eines Misch- und Ausgleichsbeckens zur Abwasserspeicherung empfohlen.

Durch das Projekt wurde für die Fa. Naarmann ein Molkereiabwasserbehandlungskonzept aus Misch- und Ausgleichsbecken, Druckentspannungsflotationsanlage sowie EGSB-Reaktor entwickelt, wodurch die betriebliche Energieeffizienz der Privatmolkerei gesteigert und die Treibhausgasemissionen der Molkerei reduziert werden könnten. Das entwickelte Konzept ist ebenfalls auf andere Molkereien übertragbar. Hierbei sollte allerdings, je nach Betriebsweise und Abwassersituation der Molkereien, bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Zahlung eines Starkverschmutzerzuschlages berücksichtigt werden. In Abhängigkeit von der Höhe des Zuschlages besteht die Möglichkeit, dass ein Konzept, bestehend aus einem MAB, eines anaeroben Belebungsverfahrens und einer Flotationsanlage, für andere Molkereien geeigneter ist, als das für die Fa. Naarmann empfohlene Konzept.

## 7 LITERATURVERZEICHNIS

### 2G Energietechnik 2022

2G Energietechnik (2022), „Erdgas BHKW“, verfügbar unter <https://www.2g.com/de/erdgas-bhkw/> (Zugriff am 8. Februar 2022).

### ASUE 2019

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (2019), *KWKK - Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung: Kraft, Wärme und Kälte aus einer Anlage*, wvgw Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn. PDF, verfügbar unter [https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gaswaermepumpe\\_kaelte/2019/broschueren/ASUE\\_Kraft-Waerme-Kaelte-Kopplung\\_2019-03\\_online.pdf](https://asue.de/sites/default/files/asue/themen/gaswaermepumpe_kaelte/2019/broschueren/ASUE_Kraft-Waerme-Kaelte-Kopplung_2019-03_online.pdf) (Zugriff am 8. Februar 2022).

### Basitere et al. 2016

Basitere, M., Williams, Y., Sheldon, M. S., Ntwampe, S. K. O., Jager, D. de und Dlangamandla, C. (2016), „Performance of an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor coupled with anoxic and aerobic bioreactors for treating poultry slaughterhouse wastewater“, *Water Practice and Technology*, 11. Jg., Nr. 1, S. 86–92.

### BMF 1995

Bundesministerium der Finanzen (1995), „AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Energie- und Wasserversorgung"“, verfügbar unter [https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere\\_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle\\_Energie-und-Wasserversorgung.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Energie-und-Wasserversorgung.html) (Zugriff am 29. Oktober 2021).

### BMU 2016

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2016), *Klimaschutzplan 2050 - Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*, 2. Aufl., Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Erfurt, verfügbar unter [www.bmu.de/publikationen](http://www.bmu.de/publikationen) (Zugriff am 8. Februar 2022).

### Bundesregierung 2021b

Bundesregierung (2021b), „CO<sub>2</sub>-Bepreisung für weniger Emissionen“, verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/weniger-co2-emissionen-1790134> (Zugriff am 28. Mai 2021).

### **Bundesregierung 2021a**

Bundesregierung (2021a), „Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045“, verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672> (Zugriff am 27. Mai 2021).

### **DWA 2011**

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011), *Abwasser aus der Milchverarbeitung, DWA-Regelwerk, M 708*. 978-3-941897-95-3, Hennef(Sieg). DWA (Zugriff am 30. Mai 2021).

### **DWA 2012**

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2012), „Auswahl und Bewertung von Systemen und Reaktoren zur anaeroben Industrieabwasserbehandlung. Achter Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe IG-5.1 „Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern“, Nr. 59.

### **FHM 2019**

FH Münster - Labor für Abwassertechnik (2019), *Eudiometer Workshop: Bestimmung von Biogas- und Restgaspotentialen*, Steinfurt. PDF. FH Münster: Z:\02 Labor\1 Labor\5 Eudiometer-Versuche (zugriffsbeschränkt) (Zugriff am 17. August 2021).

### **Hinken et al. 2015**

Hinken, L., Austermann-Haun, U., Meyer Hartmunt und Urban, I. (2015), „Anaerobe Abwasserbehandlung zur Kohlenstoffelimination“, in Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F. und Weiland, P. (Hg.), *Anaerobtechnik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 283–357 (Zugriff am 23. November 2021).

### **Kemper 2021**

Matthias Kemper (2021), *Unternehmensdaten Privatmolkerei Naarmann*, E-Mail und Telefon (Zugriff am 12. Oktober 2021).

### **Kezia et al. 2017**

Kezia, K., Lee, J., Zisu, B., Chen, G. Q., Gras, S. L. und Kentish, S. E. (2017), „Solubility of Calcium Phosphate in Concentrated Dairy Effluent Brines“, *Journal of agricultural and food chemistry*, 65. Jg., Nr. 20, S. 4027–4034.

### **Lemmer et al. 1996**

Lemmer, H., Griebe, T. und Flemming, H.-C. (1996), *Ökologie der Abwasserorganismen*. 978-3-642-64838-0, Springer Berlin Heidelberg (Zugriff am 18. Oktober 2021).

### **Memmler et al. 2021**

Memmler, M., Merkel, K., Pabst, J., Rother, S., Schneider, S. und Dreher, M. (2021), *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger: Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2020*, Dessau-Roßlau. PDF, verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2020#:~:text=Im%20Ergebnis%20weist%20die%20Netto,den%20Stromsektor%20entfiele n%20179%20Mio.> (Zugriff am 30. November 2021).

### **Milchindustrie-Verband e.V. 2020**

Milchindustrie-Verband e.V. (2020), „Fakten Milch - September 2020. Informationsbroschüre des Milchindustrie-Verbandes e.V.“, Milch und mehr - die deutsche Milchwirtschaft auf einen Blick.

### **Milchindustrie-Verband e.V. 2021**

Milchindustrie-Verband e.V. (2021), „Die Molkerei im Wandel - Der Trend zu größeren Molkereien 1950-2020“.

### **molkerei industrie 2021**

molkerei industrie (2021), „Umfassendes KWKK-Konzept - Neue Energiezentrale dere Privatmolkerei Naarmann“.

### **Müller-Lindenlauf et al. 2014**

Müller-Lindenlauf, M., Cornelius, C., Gärtner, S., Reinhardt, G., Rettenmaier, N. und Schmidt, T. (2014), „Umweltbilanz von Milch und Milcherzeugnissen. Status quo und Ableitung von Optimierungspotenzialen“.

### **Pererva et al. 2020**

Pererva, Y., Miller, C. D. und Sims, R. C. (2020), „Approaches in Design of Laboratory-Scale UASB Reactors“, *Processes*, 8. Jg., Nr. 6, S. 734.

### **Rosenwinkel, et al. 2015**

Rosenwinkel, K.-H., Kroiss, H., Dichtl, N., Seyfried, C.-F. und Weiland, P. (Hg.) (2015), *Anaerobtechnik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

### **Rosenwinkel et al. 2020**

Rosenwinkel, K.-H., Austermann-Haun, U., Köster, S. und Beier, M. (2020), *Taschenbuch der Industrieabwasserreinigung: Ein Taschenbuch für die Praxis*. 978-3-8356-7399-1, Vulkan Verlag, Essen (Zugriff am 30. Mai 2021).

**van Haandel et al. 2006**

van Haandel, A., Kato, M. T., Cavalcanti, P. F. F. und Florencio, L. (2006), „Anaerobic Reactor Design Concepts for the Treatment of Domestic Wastewater“, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 5. Jg., Nr. 1, S. 21–38.

**VDI 2016**

Verein deutscher Ingenieure e.V. (2016), *VDI 4630 - Vergärung organischer Stoffe: Substratcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche, ICS 13.030.30, 27.190*, Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf (Zugriff am 18. August 2021).

**Wetter 2021**

Wetter, C. (2021), „Vorlesungsskript - Abwassertechnik“, Energie, Gebäude und Umwelt, FH Münster, 2021. Verfügbar unter: Z:\07 Persönliche Ordner\Holtrup, Thomas\#Eingangskorb\#Abwassertechnik\2016 Skript Vorlesung (zugriffsbeschränkt) (Zugriff am 15. März 2021).

**ZMB GmbH 2021**

Zentrale Milchmarkt Berichterstattung GmbH (2021), „Beilage zum Geschäftsjahr 2020/2021. Zahlen - Daten - Fakten“, verfügbar unter [https://milchindustrie.de/wp-content/uploads/2021/09/ZahlenDatenFakten\\_2021.pdf](https://milchindustrie.de/wp-content/uploads/2021/09/ZahlenDatenFakten_2021.pdf) (Zugriff am 12. Februar 2022).

# ANHANG

## **VERZEICHNIS DER ANHÄNGE**

- ANHANG 1:** Versuchsergebnisse der Abwasseranalytik der Molkereiabwasserproben
- ANHANG 2:** Formeln zur Berechnung der Methanerträge für die Ermittlung der anaeroben Abbaubarkeit
- ANHANG 3:** Biogas- und Methanbildungskurve der weiteren Molkereiabwasserproben
- ANHANG 4:** Formeln zur Berechnung der Betriebsparameter für die kontinuierlichen Versuchsphase
- ANHANG 5:** Verwendete Formeln für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

## ANHANG 1: Versuchsergebnisse der Abwasseranalytik der Molkereiabwasserproben

<i>Analytikparameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Abwasserstrom 1</i>	<i>Abwasserstrom 2</i>	<i>Abwasserstrom 3</i>	<i>Abwasserstrom vor MAB</i>	<i>Abwasserstrom nach MAB</i>
<i>Trockenrückstand</i>	<i>Gew.-%</i>	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2
<i>org. Trockenrückstand</i>	<i>Gew.-%</i>	69,5	86,9	77,0	72,6	65,0
<i>pH-Wert</i>	-	6,4	6,8	10,8	10,9	6,8
<i>CSB</i>	<i>mg/l</i>	3.511	3.506	3.529	2.504	2.711
<i>BSB<sub>5</sub></i>	<i>mg/l</i>	1.270	1.640	1.980	1.550	1.350
<i>Ammonium-Stickstoff</i>	<i>mg/l</i>	0,4	1,1	1,2	1,4	68,50
<i>Phosphor</i>	<i>mg/l</i>	48,8	26,6	46,5	30,2	36,2
<i>Essigsäure</i>	<i>mg/l</i>	< 30	77	< 30	< 30	100
<i>Propionsäure</i>	<i>mg/l</i>	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
<i>n-Buttersäure</i>	<i>mg/l</i>	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
<i>Valeriansäure</i>	<i>mg/l</i>	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
<i>Capronsäure</i>	<i>mg/l</i>	< 30	< 30	< 30	< 30	< 30
<i>TKN</i>	<i>mg/l</i>	87	69	260	130	120
<i>Calcium</i>	<i>mg/l</i>	50	91	103	81	83

## Anhang

---

<i>Analytikparameter</i>	Einheit	Abwasserstrom 1	Abwasserstrom 2	Abwasserstrom 3	Abwasserstrom vor MAB	Abwasserstrom nach MAB
<b>Cobalt</b>	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
<b>Eisen</b>	mg/l	0,1	1,1	0,1	0,3	0,3
<b>Kalium</b>	mg/l	14	82	43	48	37
<b>Kupfer</b>	mg/l	0,03	0,03	< 0,01	0,01	0,01
<b>Magnesium</b>	mg/l	6	12	9	9	9
<b>Mangan</b>	mg/l	0,02	0,06	0,02	0,03	0,02
<b>Molybdän</b>	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
<b>Natrium</b>	mg/l	632	58	211	228	287
<b>Nickel</b>	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
<b>Schwefel</b>	mg/l	20	31	38	30	10
<b>Selen</b>	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
<b>Zink</b>	mg/l	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2

---

**ANHANG 2:** Formeln zur Berechnung der Methanerträge für die Ermittlung der anaeroben Abbaubarkeit

Formel 1: Berechnung des FM-spezifischen Biogasertrags (VDI 2016)

$$Y_{BG, FM} = \frac{V_{BG}}{FM}$$

Mit:

$Y_{BG, FM}$ :	FM-spezifischer Biogasertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>FM</sub> ]
$V_{BG}$ :	Biogasmenge	[l <sub>N</sub> ]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

Formel 2: Berechnung des FM-spezifischen Methanertrags (VDI 2016)

$$Y_{CH_4, FM} = \frac{V_{BG} \cdot C_{CH_4}}{FM}$$

Mit:

$Y_{CH_4, FM}$ :	FM-spezifischer Methanertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>FM</sub> ]
$V_{BG}$ :	Biogasmenge	[l <sub>N</sub> ]
$C_{CH_4}$ :	Methanvolumenanteil	[Vol.-%]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

Formel 3: Berechnung des CSB-spezifischen Biogasertrags (VDI 2016)

$$Y_{BG, CSB} = \frac{V_{BG} \cdot \rho}{CSB \cdot FM}$$

Mit:

$Y_{BG, CSB}$ :	CSB-spezifischer Biogasertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>CSB</sub> ]
$V_{BG}$ :	Biogasmenge	[l <sub>N</sub> ]
$\rho$ :	Dichte der Probe	[kg/l]
CSB:	Chemischer Sauerstoffbedarf	[kg <sub>CSB</sub> /l]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

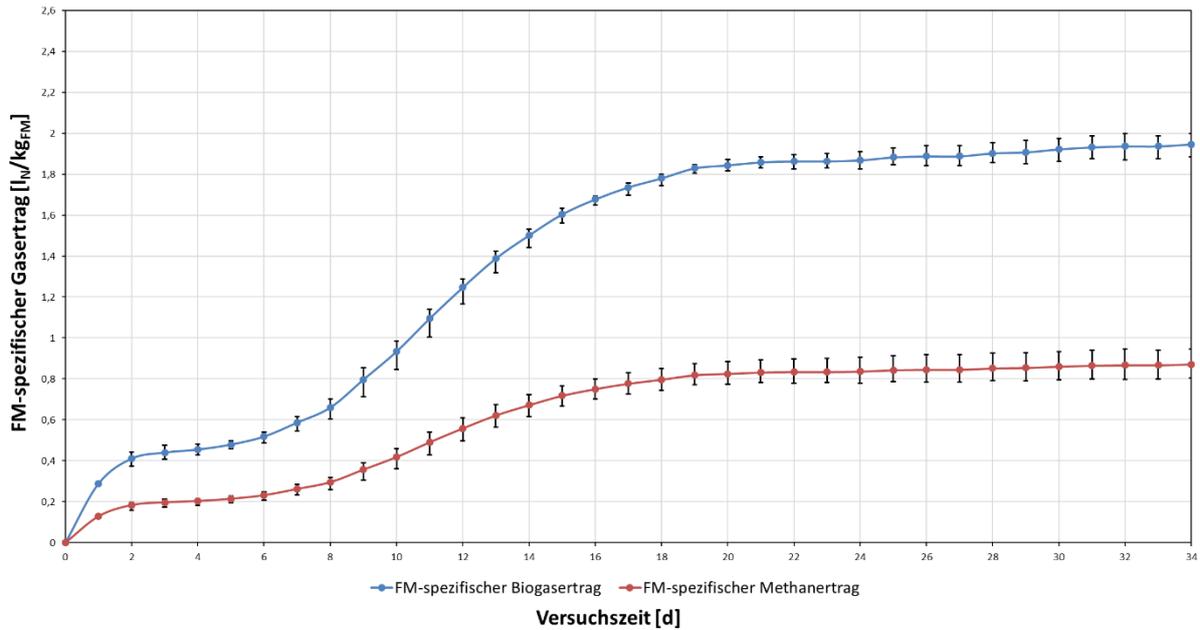
Formel 4: Berechnung des CSB-spezifischen Methanertrags (VDI 2016)

$$Y_{CH_4, CSB} = \frac{V_{BG} \cdot \rho \cdot C_{CH_4}}{CSB \cdot FM}$$

Mit:

$Y_{CH_4, CSB}$ :	CSB-spezifischer Methanertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>CSB</sub> ]
$V_{BG}$ :	Biogasmenge	[l <sub>N</sub> ]
$\rho$ :	Dichte der Probe	[kg/l]
$C_{CH_4}$ :	Methanvolumenanteil	[Vol.-%]
CSB:	Chemischer Sauerstoffbedarf	[kg <sub>CSB</sub> /l]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

**ANHANG 3: Biogas- und Methanbildungskurve der weiteren Molkereiabwasserproben**



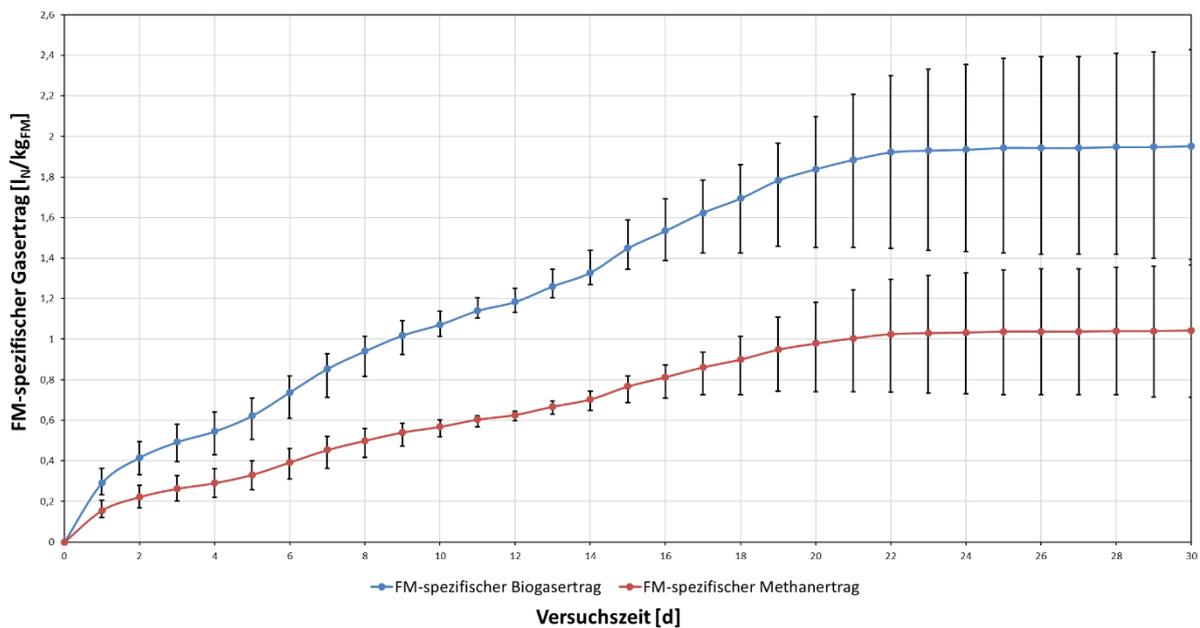
Legende:

FM: Frischmasse

$l_N/kg_{FM}$ : Normliter pro Kilogramm FM

d: Tage

Abbildung 1: Biogas- und Methanbildungskurve der Molkereiabwasserprobe ‚Abwasserstrom 1‘



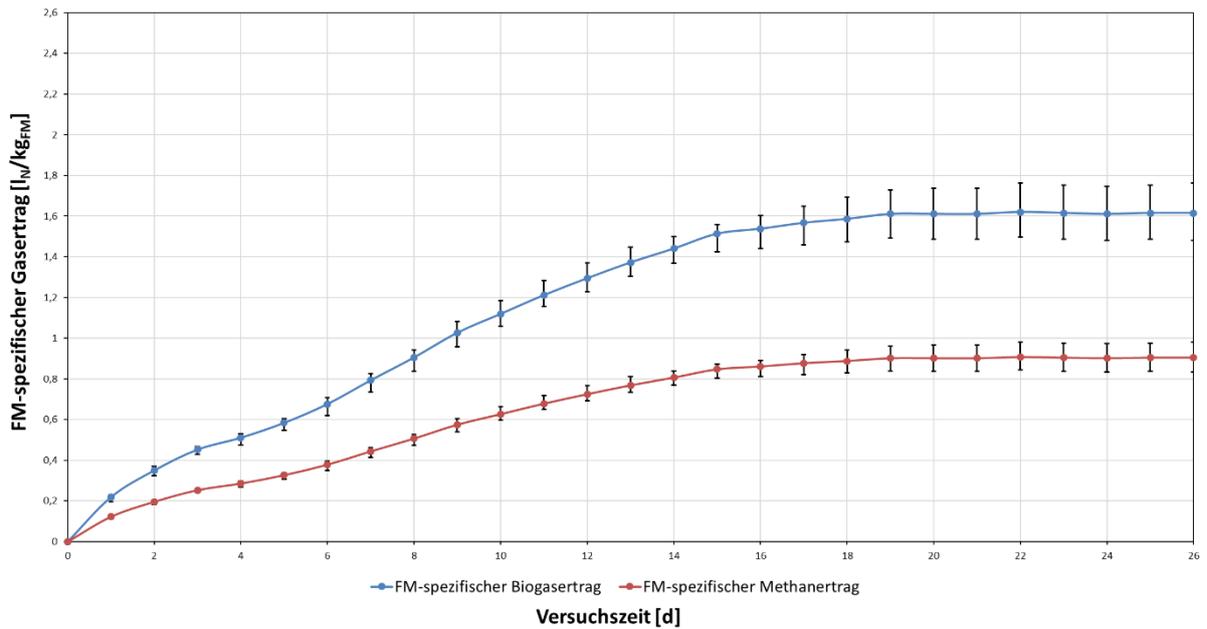
Legende:

FM: Frischmasse

$l_N/kg_{FM}$ : Normliter pro Kilogramm FM

d: Tage

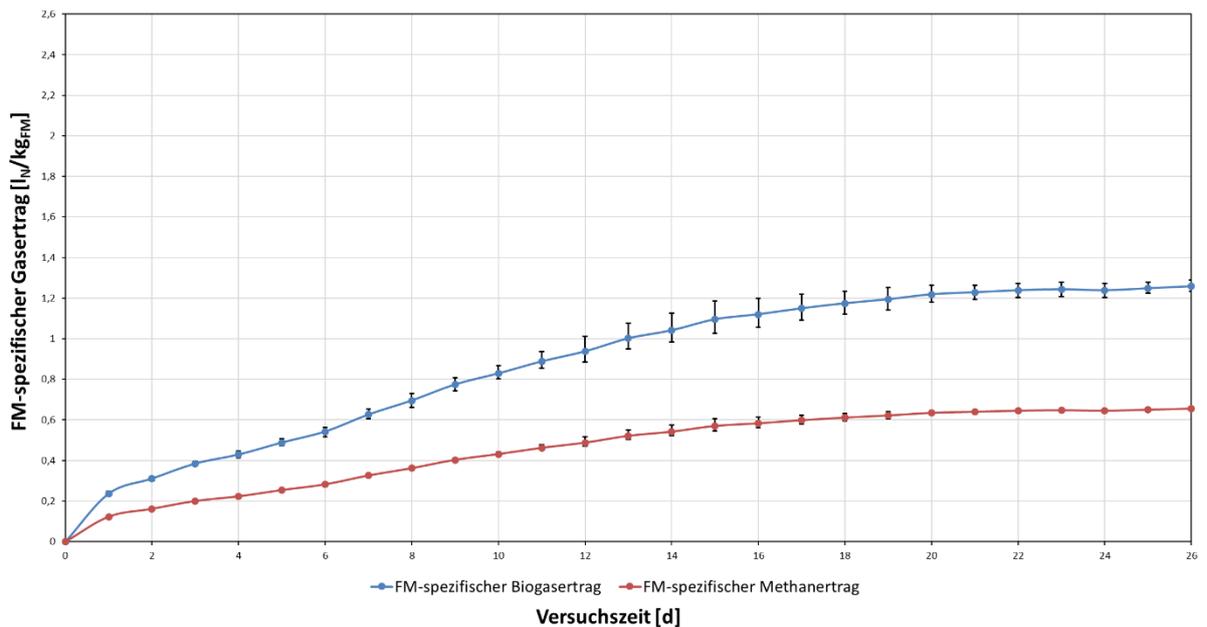
Abbildung 2: Biogas- und Methanbildungskurve der Molkereiabwasserprobe ‚Abwasserstrom 2‘



Legende:

FM: Frischmasse      l<sub>N</sub>/kg<sub>FM</sub>: Normliter pro Kilogramm FM      d: Tage

Abbildung 3: Biogas- und Methanbildungskurve der Molkereiabwasserprobe ‚Abwasserstrom 3‘



Legende:

FM: Frischmasse      l<sub>N</sub>/kg<sub>FM</sub>: Normliter pro Kilogramm FM      d: Tage

Abbildung 4: Biogas- und Methanbildungskurve der Molkereiabwasserprobe ‚Abwasserstrom vor Misch- und Ausgleichsbecken‘

**ANHANG 4:** Formeln zur Berechnung der Betriebsparameter für die kontinuierlichen Versuchsphase

Formel 1: Berechnung des FM-spezifischen Biogasertrags (VDI 2016)

$$Y_{BG, FM} = \frac{\dot{V}_{BG}}{FM}$$

Mit:

$Y_{BG, FM}$ :	FM-spezifischer Biogasertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>FM</sub> ]
$\dot{V}_{BG}$ :	Biogasrate	[l <sub>N</sub> /d]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

Formel 2: Berechnung des FM-spezifischen Methanertrags (VDI 2016)

$$Y_{CH_4, FM} = \frac{\dot{V}_{BG} \cdot C_{CH_4}}{FM}$$

Mit:

$Y_{CH_4, FM}$ :	FM-spezifischer Methanertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>FM</sub> ]
$\dot{V}_{BG}$ :	Biogasrate	[l <sub>N</sub> /d]
$C_{CH_4}$ :	Methanvolumenanteil	[Vol.-%]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

Formel 3: Berechnung des CSB-spezifischen Biogasertrags (VDI 2016)

$$Y_{BG, CSB} = \frac{\dot{V}_{BG} \cdot \rho}{CSB \cdot FM}$$

Mit:

$Y_{BG, CSB}$ :	CSB-spezifischer Biogasertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>CSB</sub> ]
$\dot{V}_{BG}$ :	Biogasrate	[l <sub>N</sub> /d]
$\rho$ :	Dichte der Probe	[kg/l]
CSB:	Chemischer Sauerstoffbedarf	[kg <sub>CSB</sub> /l]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

Formel 4: Berechnung des CSB-spezifischen Methanertrags (VDI 2016)

$$Y_{CH_4, CSB} = \frac{\dot{V}_{BG} \cdot \rho \cdot C_{CH_4}}{CSB \cdot FM}$$

Mit:

$Y_{CH_4, CSB}$ :	CSB-spezifischer Methanertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>CSB</sub> ]
$\dot{V}_{BG}$ :	Biogasrate	[l <sub>N</sub> /d]
$\rho$ :	Dichte der Probe	[kg/l]
$C_{CH_4}$ :	Methanvolumenanteil	[Vol.-%]
CSB:	Chemischer Sauerstoffbedarf	[kg <sub>CSB</sub> /l]
FM:	Frischmasse (eingewogen)	[kg <sub>FM</sub> ]

Formel 5: Berechnung der Methanproduktionsrate (VDI 2016)

$$MPR = \frac{\dot{V}_{BG} \cdot C_{CH_4}}{V_R}$$

Mit:

MPR:	Methanproduktionsrate	[Nm <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /(m <sup>3</sup> <sub>R</sub> ·d)]
$\dot{V}_{BG}$ :	Biogasrate	[l <sub>N</sub> /d]
C <sub>CH<sub>4</sub></sub> :	Methanvolumenanteil	[Vol.-%]
V <sub>R</sub> :	Reaktorvolumen	[l]

Formel 6: Berechnung des CSB-Abbaugrades (Rosenwinkel et al. 2015)

$$\eta_{CSB} = \frac{CSB_{Zu} - CSB_{Ab}}{CSB_{Zu}} \cdot f$$

Mit:

$\eta_{CSB}$ :	CSB-Abbaugrad	[%]
CSB <sub>Zu</sub> :	CSB im Zulauf	[mg/l]
CSB <sub>Ab</sub> :	CSB im Ablauf	[mg/l]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 100 %)	[%]

Formel 7: Berechnung des BSB<sub>5</sub>-Abbaugrades (Rosenwinkel et al. 2015)

$$\eta_{BSB_5} = \frac{BSB_{5,ein} - BSB_{5,aus}}{BSB_{5,ein}} \cdot f$$

Mit:

$\eta_{BSB_5}$ :	BSB <sub>5</sub> -Abbaugrad	[%]
BSB <sub>5,Zu</sub> :	BSB <sub>5</sub> im Zulauf	[mg/l]
BSB <sub>5,Ab</sub> :	BSB <sub>5</sub> im Ablauf	[mg/l]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 100 %)	[%]

Formel 8: Berechnung der hydraulischen Verweilzeit (Pererva et al. 2020)

$$HRT = \frac{V_R}{\dot{V}_{Zu}} \cdot f$$

Mit:

HRT:	Hydraulische Verweilzeit	[h]
V <sub>R</sub> :	Reaktorvolumen	[l]
$\dot{V}_{Zu}$ :	Zulaufstrom	[l/d]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 24 h/d)	[h/d]

**ANHANG 5: Verwendete Formeln für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung**

Formel 1: Berechnung der jährlichen Gesamtkosteneinsparung

$$\text{Jährl. GKE} = \text{KE EP} + \text{KE ES} + \text{KE NN} + \overline{\text{KE CO}_2}$$

Mit:

Jährl. GKE:	Jährliche Gesamtkosteneinsparungen	[€/a]
KE EP:	Jährliche Erdgaspreiseinsparung	[€/a]
KE ES:	Jährliche Erdgassteuereinsparung	[€/a]
KE NN:	Jährliche Netznutzungseinsparung	[€/a]
$\overline{\text{KE CO}_2}$ :	Mittelwert der jährlichen CO <sub>2</sub> -Steuereinsparungen von 2021 bis 2025	[€/a]

Formel 2: Berechnung der jährlichen Erdgasmenge

$$\text{Jährl. EM}_{\text{anaerob}} = \frac{Y_{\text{CH}_4, \text{FM}} \cdot \rho \cdot \dot{V}_{\text{Abw}}}{f}$$

Mit:

Jährl. EM <sub>anaerob</sub> :	Jährliche Erdgasmenge durch anaerobe Behandlung	[MWh/a]
Y <sub>CH<sub>4</sub>, FM</sub> :	Frischmasse spezifischer Methanertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>FM</sub> ]
$\dot{V}_{\text{Abw}}$ :	Jährliche Abwassermenge	[m <sup>3</sup> /a]
ρ:	Dichte des Abwassers	[kg/l]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 10 kWh/MWh)	[kWh/MWh]

Formel 3: Berechnung der jährlichen Erdgaspreiseinsparungen

$$\text{KE EP} = \text{Jährl. EM}_{\text{anaerob}} \cdot \text{EP} \cdot f$$

Mit:

KE EP:	Jährliche Erdgaspreiseinsparung	[€/a]
Jährl. EM <sub>anaerob</sub> :	Jährliche Erdgasmenge durch anaerobe Behandlung	[MWh/a]
EP:	Erdgaspreis der Privatmolkerei Naarmann	[ct/kWh]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 10 (€·kWh)/(ct·MWh))	[(€·kWh)/(ct·MWh)]

Formel 4: Berechnung der jährlichen Erdgassteuereinsparungen

$$\text{KE ES} = \left( 1 - \frac{\text{CH}_4 \text{ Nutzung}}{100 \%} \right) \cdot \text{Jährl. EM}_{\text{anaerob}} \cdot \text{ES} \cdot f$$

Mit:

KE ES:	Jährliche Erdgassteuereinsparung	[€/a]
CH <sub>4</sub> Nutzung:	Nutzung des Biomethans in BHKW	[%]
Jährl. EM <sub>anaerob</sub> :	Jährliche Erdgasmenge durch anaerobe Behandlung	[MWh/a]
ES:	Erdgassteuer der Privatmolkerei Naarmann	[ct/kWh]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 10 (€·kWh)/(ct·MWh))	[(€·kWh)/(ct·MWh)]

Formel 5: Berechnung der jährlichen Netznutzungseinsparungen

$$KE\ NN = \text{Jährl. } EM_{\text{anaerob}} \cdot AP \cdot f + \left( \frac{\text{Jährl. } EM / 12}{JHL} \right) \cdot LP \cdot f$$

Mit:

KE NN:	Jährliche Netznutzungseinsparungen	[€/a]
Jährl. EM <sub>anaerob</sub> :	Jährliche Erdgasmenge durch anaerobe Behandlung	[MWh/a]
AP:	Arbeitspreis der Privatmolkerei Naarmann	[ct/kWh]
JHL:	Jahreshöchstleistung der Privatmolkerei Naarmann	[kW]
LP:	Leistungspreis der Privatmolkerei Naarmann	[ct/kWh]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 10 (€·kWh)/(ct·MWh))	[(€·kWh)/(ct·MWh)]

Formel 6: Berechnung der jährlichen CO<sub>2</sub>-Steuereinsparungen

$$\overline{KE\ CO_2} = \text{Jährl. } EM_{\text{anaerob}} \cdot \overline{CO_2\ Steuer} \cdot f$$

Mit:

$\overline{KE\ CO_2}$ :	Mittelwert der jährlichen CO <sub>2</sub> -Steuereinsparungen von 2021 bis 2025	[€/a]
Jährl. EM <sub>anaerob</sub> :	Jährliche Erdgasmenge durch anaerobe Behandlung	[MWh/a]
$\overline{CO_2\ Steuer}$ :	Mittelwert der CO <sub>2</sub> -Bepreisung von 2021 bis 2025	[ct/kWh]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 10 (€·kWh)/(ct·MWh))	[(€·kWh)/(ct·MWh)]

Formel 7: Berechnung der Kosteneinsparungen nach 20 Jahren

$$\text{Einspar. } 20J. = \text{Jährl. } KE \cdot a$$

Mit:

Einspar. 20J.:	Gesamtkosteneinsparungen nach 20 Jahren	[€]
Jährl. KE:	Jährliche Gesamtkosteneinsparungen	[€/a]
a	Jahre	[a]

Formel 8: Berechnung der jährlichen Erdgaseinsparung

$$\text{Einspar. Erdgas} = \frac{\text{Jährl. } EM_{\text{anaerob}}}{\text{Jährl. } EM_{\text{Naarmann}}} \cdot f$$

Mit:

Einspar. Erdgas:	Jährliche Einsparung der Erdgasmenge	[%]
Jährl. EM <sub>anaerob</sub> :	Jährliche Erdgasmenge durch anaerobe Behandlung	[MWh/a]
Jährl. EM <sub>Naarmann</sub> :	Erdgasmenge, die 2020 von Fa. Naarmann verbraucht wurde	[MWh/a]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 100 %)	[%]

Formel 9: Berechnung der jährlichen THG-Einsparungen (Thermische Nutzung des Biomethans im Dampfkessel)

$$\text{Einspar. THG} = \text{Jährl. EM}_{\text{anaerob}} \cdot \text{spez. VerFa} \cdot f$$

Mit:

Einspar. THG:	Jährliche Einsparung der Erdgasmenge	[kg CO <sub>2</sub> e/a]
Jährl. EM <sub>anaerob</sub> :	Jährliche Erdgasmenge durch anaerobe Behandlung	[MWh/a]
Spez. VerFa:	Spezifischer Vermeidungsfaktor bei thermischer Nutzung von Klärgas	[g CO <sub>2</sub> e/kWh]
f:	Umrechnungsfaktor	[(kWh·kg CO <sub>2</sub> e)/(MWh·g CO <sub>2</sub> e)]

Formel 10: Berechnung des Anlagenvolumens des anaeroben Reaktorsystems

$$AV = \frac{Y_{\text{CH}_4, \text{FM}} \cdot \dot{V}_{\text{Abw}} \cdot \rho}{\text{MPR} \cdot f}$$

Mit:

AV:	Anlagenvolumen des anaeroben Reaktorkonzepts	[m <sup>3</sup> ]
Y <sub>CH<sub>4</sub>, FM</sub> :	Frischmasse spezifischer Methanertrag	[l <sub>N</sub> /kg <sub>FM</sub> ]
$\dot{V}_{\text{Abw}}$ :	Jährliche Abwassermenge	[m <sup>3</sup> /a]
ρ:	Dichte des Abwassers	[kg/l]
MPR:	Methanproduktionsrate	[Nm <sup>3</sup> <sub>CH<sub>4</sub></sub> /(m <sup>3</sup> <sub>R</sub> ·d)]
f:	Umrechnungsfaktor (f = 365 d/a)	[d/a]

Formel 11: Berechnung der Grundstücksfläche des anaeroben Reaktorsystems

$$GF = \left( \sqrt[3]{\frac{AV \cdot 4}{\pi \cdot (H/D)}} \right)^2$$

Mit:

GF:	Benötigte Grundstücksfläche des Reaktorkonzepts	[m <sup>2</sup> ]
AV:	Anlagenvolumen des anaeroben Reaktorkonzepts	[m <sup>3</sup> ]
H:	Reaktorhöhe	[m]
D:	Reaktordurchmesser	[m]