

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Kombiverfahren zur Gülleaufbereitung - GülleKOM

Zuwendungsempfänger:



Teilvorhaben 1: Verfahrensentwicklung im Labormaßstab



Teilvorhaben 2: Versuchsplanung und Verfahrensbewertung



Teilvorhaben 3: Anlagenauslegung und Rührkonzept

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2220WD004A

Teilvorhaben 2: 2220WD004B

Teilvorhaben 3: 2220WD004C

Laufzeit: **01.11.2021 bis 31.10.2024**

Datum der Veröffentlichung:

21.07.2025

Autoren:

Franziska Schäfer, Jürgen Pröter (DBFZ)

Reik Ellmann (EE)

**Alfons Himmelstoss, Benjamin Rocktäschel,
Reinhard Pätz (AEV)**

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Projektträger:	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Dipl.-Ing. agr. Detlef Riesel OT Gülzow Hofplatz 1 18276 Gülzow-Prüzen
Ansprechpartner DBFZ:	DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH Torgauer Straße 116 04347 Leipzig Dr. rer. nat. Franziska Schäfer Tel.: +49 (0)341 2434-443 Fax: +49 (0)341 2434-133 E-Mail: franziska.schaefer@dbfz.de
Ansprechpartner AEV:	AEV Energy GmbH Hohendölzschener Str. 1a, 01187 Dresden Dipl.-Ing. Alfons Himmelstoß Tel.: +49 (0) 351 467 1301 Fax: +49 (0) 351 / 467 1337 E-Mail: a.himmelstoss@aev-energy.de
Ansprechpartner EE:	Ellmann EE Engineering GmbH Am Dietzenhügel 15, 06636 Laucha Dipl.-Ing. Reik Ellmann Tel.: +49 (0) 34462 60722 Fax: +49 (0) 34462 60726 E-Mail: reik@ellmann-gmbh.de
Gesamtseitenzahl:	86

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
Kurzbericht	10
1.1 Aufgabenstellung.....	11
1.1.1 Verfahren zur Stickstoffreduzierung in Gülle	12
1.1.2 Verfahren zur Vergärung von Gülle.....	13
1.1.3 Verfahren zur Biomassegewinnung aus Gülle.....	13
1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	17
1.3 Resümee der wesentlichen Ergebnisse	19
1.3.1 Arbeitspakete und Meilensteine.....	19
1.3.2 Zusammenfassung	21
2 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse.....	21
2.1 AP 2: Literaturrecherche zu Verfahren der Stickstoffreduzierung in Gülle und Applikationsforschung zur Nutzung der gewonnenen Biomasse	22
2.2 AP 3: Umsetzung der kombinierten Güllebehandlung und Proteingewinnung im Labormaßstab.....	22
2.2.1 Laborkläranlage (vorgeschaltete Denitrifikation, Kaskade)	23
2.2.2 Batchversuche	29
2.2.3 Hefekultivierung	30
2.2.4 Simultane Nitrifikation und Denitrifikation im Labormaßstab.....	37
2.3 AP 4: Entwicklung eines modularen Konzeptes zur optimalen Kombination von aerober und anaerober Güllebehandlung.....	39
2.3.1 Vorgehensweise bei der Bilanzierung der anaeroben Vergärung.....	39
2.3.2 Massenbilanz für Stickstoffentfernung nach dem Prinzip der Nitrifikation/ Denitrifikation.....	40
2.3.3 Modulares Konzept zur kombinierten aeroben und anaeroben Güllebehandlung.....	41
2.4 AP 5: Umsetzung der kombinierten Güllebehandlung und Proteingewinnung im Pilotmaßstab.....	44
2.5 AP 6: Konzeption einer großtechnischen Anlage zur kombinierten Gülleaufbereitung	49
2.5.1 Konzeption der kombinierten Güllebehandlung (500 kW Biogasanlage) im GülleKOM Verfahren	50
2.5.2 Separation von Gülle und Gärrest im GülleKOM Verfahren.....	53
2.5.3 Wärmenutzungskonzept.....	54
2.6 AP 7: Bewertung und Optimierung ökonomischer und ökologischer Aspekte	55
2.6.1 Wirtschaftlichkeit der kombinierten Güllebehandlung (500 kW Biogasanlage) im GülleKOM Verfahren	55
2.6.2 Ökologische Bewertung des gesamten Verfahrens bezogen auf die großtechnische Anlage...59	
3 Verwertung.....	60
3.1 Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen	60
3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	60
3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	61

Inhaltsverzeichnis

3.4	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	61
4	Erkenntnisse von Dritten.....	62
5	Veröffentlichungen	62
6	Anhang	63
6.1	Teilvorhaben 1: Verfahrensentwicklung im Labormaßstab	63
6.1.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 1	63
6.1.2	Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens 1.....	63
6.1.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 1	64
6.2	Teilvorhaben 2: Versuchsplanung und Verfahrensbewertung	66
6.2.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 2	66
6.2.2	Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens 2.....	66
6.2.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 2	67
6.3	Teilvorhaben 3: Anlagenauslegung und Rührkonzept	67
6.3.1	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 3	67
6.3.2	Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens 3.....	68
6.3.3	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 3	68
6.4	Vorgaben zur Erstellung einer Massen- und Stickstoffbilanz zur Teilstrombehandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren	70
6.5	Kostenkalkulation kombinierte Güllebehandlung mit EEG	71
6.6	Kostenkalkulation kombinierte Güllebehandlung ohne EEG.....	77
6.7	Wirtschaftlichkeit der kombinierten Güllebehandlung mit und ohne EEG.....	83
7	Literatur- und Referenzverzeichnis	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensschema der GülleKOM Pilotanlage zur aeroben und anaeroben Teilstrombehandlung von Schweinegülle; TN, Gesamtstickstoff; TS, Trockensubstanz; oTS, organische Trockensubstanz; V_R , Reaktorvolumen; J. Pröter (DBFZ).....	11
Abbildung 2: Strukturplan zum Verbundvorhaben GülleKOM	18
Abbildung 3: A) Laborkläranlage am DBFZ, B) Schematischer Aufbau der Laborkläranlage (Toni Schurzmann, DBFZ) (1) Substratvorlage, (2) Denitrifikation, (3) Nitrifikation, (4) Nachklärung (beinhaltet Klarlauf im Überstand und Überschussschlamm im Bodensatz), (5) Sammelbehälter Klarlauf, (6 bis 8) Schlauchpumpen, (9) Belüftungspumpe, (10) Durchflussmesser	23
Abbildung 4: Ammoniumstickstoff-Gehalt ($\text{NH}_4\text{-N}$) in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III	25
Abbildung 5: Nitratstickstoff-Gehalt ($\text{NO}_3\text{-N}$) in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III	25
Abbildung 6: Gesamtstickstoff- (TN) und Ammoniumstickstoff-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage unter Verwendung von A) Substratcharge I (Versuchstag 118) und B) Substratcharge II (Versuchstag 230). Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm.	26
Abbildung 7: pH-Wert in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III; NaHCO_3 , Natriumhydrogencarbonat	27
Abbildung 8: TS-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III	28
Abbildung 9: oTS-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III	28
Abbildung 10: CSB-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III	29
Abbildung 11: Spezifischer Methanertrag der Schweinegülle und der Stoffströme aus der Schweinegülle-Behandlung (SG, Schweinegülle Charge I und III) mittels Laborkläranlage.....	30
Abbildung 12: FOS-Gehalt in den Versuchsansätzen V1, V2, V6 und V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.).....	33
Abbildung 13: Ammoniumstickstoff-Gehalt in den Versuchsansätzen V1, V2, V6 und V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.).....	33

Abbildung 14: Acetat-Gehalt in den Versuchsansätzen V1, V2, V6 und V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.)	34
Abbildung 15: TKN- und Protein-Gehalt in Versuchsansatz V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.)	34
Abbildung 16: Acetat-Gehalt in Experiment I bis IV sowie im Substrat (Die eingestellten Prozessparameter sind Tabelle 7 zu entnehmen.)	35
Abbildung 17: Ammoniumstickstoff-Gehalt in Experiment I bis IV sowie im Substrat (Die eingestellten Prozessparameter sind Tabelle 7 zu entnehmen.)	36
Abbildung 18: TKN- und Protein-Gehalt in Experiment I bis IV sowie im Substrat (Die eingestellten Prozessparameter sind Tabelle 7 zu entnehmen.)	36
Abbildung 19: Schematischer Aufbau der Laboranlage für die simultane Nitrifikation / Denitrifikation	37
Abbildung 20: Ammoniumwerte für Zu- und Ablauf der Anlage sowie Nitratwerte im Ablauf	38
Abbildung 21: Sauerstoff und Redoxpotential der Anlage	39
Abbildung 22: Methanertrag der Stoffströme aus der Schweinegülle-Behandlung mittels Laborkläranlage bezogen auf das Ausgangssubstrat (bezogen auf Ergebnisse aus 2.2.2).	42
Abbildung 23: Konzept zur Teilstrombehandlung von Schweinegülle an der GülleKOM Pilotanlage; TN, Gesamtstickstoff; TS, Trockensubstanz; oTS, organische Trockensubstanz; V _R , Reaktorvolumen; J. Pröter (DBFZ)	42
Abbildung 24: Stickstoffverteilung der Stoffströme bei der kombinierten Behandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren (Pilotmaßstab)	43
Abbildung 25: oTS-Verteilung der Stoffströme bei der kombinierten Behandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren (Pilotmaßstab)	44
Abbildung 26: GülleKOM Pilotanlage zur anaeroben und aeroben Behandlung von Schweinegülle	45
Abbildung 27: Spezifische Methanproduktion (SMP), FOS-Gehalt, Ammoniumstickstoff-Gehalt und Raumbelastung (BR) im Biogasreaktor der GülleKOM Pilotanlage. ÜSS, Überschussschlamm; 100 % SG, Einsatz von Rohgülle als Substrat	47
Abbildung 28: Spezifischer Methanertrag der Schweinegülle (SG, ermittelt via Batch-Ansatz nach VDI 4630, SG Charge III, Berechnung auf Verweilzeit im konti. Versuch bezogen → 29 d Verweilzeit), bei kontinuierlicher Vergärung von 100 % Rohgülle (SG Charge VII, Versuchstag 220 - 245) und bei der Teilstrom-Vergärung (SG Charge VII, Versuchstag 199 - 219) im GülleKOM Verfahren	47
Abbildung 29: NH ₄ -N-Gehalt in den einzelnen Stufen der aeroben Behandlung der GülleKOM Pilotanlage. Deni, Denitrifikation; Nitri, Nitrifikation; Deni Substrat, Zulauf in Denitrifikation; 80 rpm, Verdopplung der Durchmischungsintensität auf 80 rpm; 5 LPM, Steigerung der Belüftungsintensität von 3 auf 5 Liter pro Minute	49
Abbildung 30: Schema 500 kW Anlage GülleKOM zur kombinierten aeroben und anaeroben Teilstrombehandlung von Schweinegülle; TN, Gesamtstickstoff; TS, Trockensubstanz; V _R , Reaktorvolumen; J. Pröter (DBFZ)	50
Abbildung 31: Verfahrensschema einer Anlagenkombination aus Anaerob Anlage und Simultaner Nitrifikation / Denitrifikation	51
Abbildung 32: Layout für den Bau einer Anlagenkombination aus Anaerob Anlage und Simultaner Nitrifikation / Denitrifikation	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Verfahren und Anlagendaten zur aeroben Güllebehandlung	14
Tabelle 2: Übersicht Verfahren zur Biomassegewinnung aus Gülle	16
Tabelle 3: Arbeitspakete im Verbundvorhaben GülleKOM	19
Tabelle 4: Meilensteine im Verbundvorhaben GülleKOM.....	20
Tabelle 5: Zusammensetzung der verwendeten Substratchargen	24
Tabelle 6: Versuchsaufbau und Konsortienkombinationen für die Hefekultivierung auf unterschiedlichen Substraten.....	31
Tabelle 7: Prozessparameter für die kontinuierliche Fermentation von <i>M. pulcherrima</i> Me-0118 (DSM 70879) auf gesiebter Schweinegülle.....	35
Tabelle 8: Analyseergebnisse des DBFZ zum Input (nach Verdünnung 1:1) in die Laboranlage	38
Tabelle 9: Analysenergebnisse der eingesetzten Schweinegülle-Chargen (MP, Methanpotenzial ermittelt via Batch-Ansatz nach VDI 4630; SG, Schweinegülle; fest, Feststoff Schweinegülle nach Separation)	45
Tabelle 10: Analysenplan für den Betrieb der GülleKOM Pilotanlage	46
Tabelle 11: Zusammenstellung wichtiger Dimensionen und Parameter für eine Anlagenkombination aus Anaerob Anlage und Simultaner Nitrifikation / Denitrifikation	53
Tabelle 12: Baukosten für die 500 kW Anlage zur kombinierten Güllebehandlung	56
Tabelle 13: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die 500 kW Anlage zur kombinierten Güllebehandlung.....	57

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AEV	AEV Energy GmbH
AMPTS	Automatic Methane Potential Test System
AP	Arbeitspaket
BGA	Biogasanlage
BHKW	Blockheizkraftwerk
BSB	biochemischer Sauerstoffbedarf
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlendioxid
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
Deni	Denitrifikation
EE	Ellmann EE Engineering GmbH
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Exp.	Experiment
FKZ	Förderkennzeichen
FMA	Futtermittelanalytik
FOS	flüchtige organische Säure
FOS/TAC	Pufferkapazität
GC	Gaschromatographie
H ₂ O	Wasser
HRT	hydraulic retention time, Verweilzeit
LB	Luria-Bertani
M	Meilenstein
Mio.	Millionen
MP	Methanpotenzial
N	Stickstoff

Abkürzung	Erklärung
N ₂	molekularer Stickstoff
N ₂ O	Lachgas
Nawaro	nachwachsende Rohstoffe
NfE	stickstofffreie Extraktstoffe
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
Nitri	Nitrifikation
NO ₂ -N	Nitritstickstoff
NO ₃ -N	Nitratstickstoff
O ₂	Sauerstoff
OLR	organic loading rate, Raumbelastung
oTS	organische Trockensubstanz
SBR	Sequencing Batch Reactor
SG	Schweinegülle
SMP	spezifische Methanproduktion
spez.	spezifisch
SRT	Schlamm-Verweilzeit
THG	Treibhausgas
TKN	Kjeldahl Stickstoff
TN	Gesamtstickstoff
TS	Trockensubstanz
ÜSS	Überschussschlamm
USB	Upflow Slit Bed
V _R	Reaktorvolumen
YPD	yeast extract peptone dextrose
z. B.	Zum Beispiel

Kurzbericht

Im Vorhaben wurde die optimale Kombination der Verfahren zur aeroben Gülleaufbereitung und anaeroben Güllevergärung im Labormaßstab untersucht. Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die biologisch oxidative Stickstoffreduzierung in der Flüssigphase verschiedener Güllen bei einem gleichzeitig großen Biomassezuwachs. Ziel war es durch eine ergänzende energetische Nutzung der Gülle, Verfahren zur reinen aeroben Güllebehandlung wirtschaftlich zu verbessern und durch integrierte Proteingewinnung aus Gülle ein Stickstoffrecycling in der Aerobstufe zu ermöglichen. Auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden Stickstoff- und Massenbilanzen erstellt. Diese Daten dienten der Diskussion verschiedener Varianten der Einbindung der Anaerobstufe (vor oder nach Stickstoffreduzierung). Dabei stand sowohl die Energiebilanz der Kombinationslösung beider Systeme (anaerob und aerob) im Vordergrund, als auch die Nährstoffkonzentrationen im Verhältnis zum verfügbaren Kohlenstoff. Ziel war die Bewertung beider Konzepte hinsichtlich der Biogasgewinnung, Stickstoffreduzierung und Biomassegewinnung. Das optimierte Konzept zur kombinierten Gülleaufbereitung wurde mit Hilfe von Massen- und Stickstoffbilanzen auf Basis von Versuchen im Labormaßstab ermittelt und im Pilotmaßstab umgesetzt. Die optimale Kombination der aeroben und anaeroben Güllebehandlung basiert auf einer Teilstrombehandlung. Das finale Konzept für die Umsetzung im Pilotmaßstab ist das wichtigste Ergebnis des GülleKOM Projekts (Abbildung 1). Beim Betrieb des GülleKOM Verfahrens im Pilotmaßstab wurde gezeigt, dass die optimierte Kombination anaerober und aerober Güllebehandlung eine Vergärung mit maximal 10 % Verlust an Biogaspotenzial und gleichzeitig eine biologische Stickstoffentfernung ermöglicht. Es wurden 69 % des Stickstoffs aus der Schweinegülle bei der kombinierten Behandlung an der Pilotanlage in molekularen Stickstoff umgesetzt. Somit wurde der Gesamtstickstoff-Gehalt (TKN + Nitritstickstoff + Nitratstickstoff) durch die Behandlung wesentlich reduziert. Grundsätzlich war es ein Projektziel die Produktion von molekularem Stickstoff durch Fixierung des löslichen Ammoniumstickstoffes in abtrennbarer Biomasse (entspricht dem Klärschlamm einer Kläranlage) zu minimieren. Im Gegensatz zum klassischen Kläranlagenprinzip bestand hier die Maßgabe, den Anfall an Klärschlamm zu maximieren. Bei der Umsetzung des Verfahrens im Pilotmaßstab konnten nur 5,2 %, der in der Gülle enthaltenen organischen Substanz im Belebtschlamm fixiert werden. Bei der im Rahmen des Projektes durchgeführten Variante des Verfahrens, wurde der Belebtschlamm der Fermentation zugeführt, hat aber nur zu einem geringen Anteil zum Biogasertrag beigetragen. Gegenstand weiterer Forschung sollte sein, den Belebtschlammanteil zu erhöhen. Neben einer Anpassung der Betriebsparameter der aeroben Behandlung ist dafür auch eine andere Abscheide-Technik erforderlich. Unter Führung der beteiligten Anlagenplaner wurde das Konzept zur Einbindung der Aerobstufe in eine großtechnische Anlage entwickelt. Abschließend erfolgte eine ökologische und ökonomische Bewertung des Gesamtverfahrens und die Definition zusätzlicher Optimierungsschritte (Wärmenutzungskonzept). Bezogen auf einen EEG konformen Betrieb kann ein Gewinn von 5,56 €/m³ Gülle bei der Teilstrombehandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren erwirtschaftet werden.

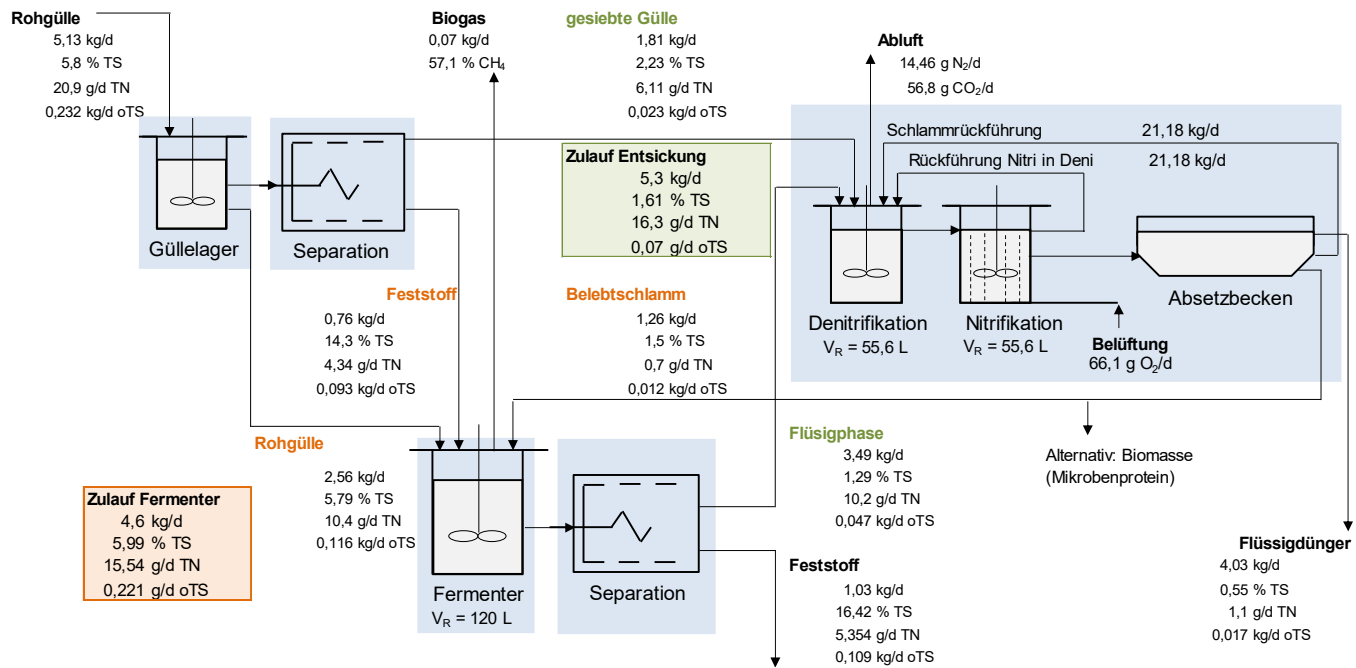


Abbildung 1: Verfahrensschema der GülleKOM Pilotanlage zur aeroben und anaeroben Teilstrombehandlung von Schweinegülle; TN, Gesamtstickstoff; TS, Trockensubstanz; oTS, organische Trockensubstanz; V_R, Reaktorvolumen; J. Pröter (DBFZ)

1.1 Aufgabenstellung

Überdüngung der Felder mit unbehandelten tierischen Exkrementen (Rindergülle, Schweinegülle) und stickstoffreichen Gärresten aus Biogasanlagen tragen maßgebend zu einem Stickstoffüberschuss aus der Landwirtschaft bei. In den Jahren 2015 bis 2017 wurde ein durchschnittlicher Stickstoffüberschuss von 77 kg N pro ha Landfläche für Deutschland ermittelt [9]. Ein Übermaß an Stickstoff kann gravierende Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit haben (Nitrat- Nitrit-Belastung des Grundwassers, Eutrophierung von Oberflächengewässern und empfindlicher Ökosysteme, Auswirkung auf Luftreinheit durch Ammoniak-Emission und das Treibhausgas N₂O) [26]. Diese Entwicklung wird durch eine Verschärfung des Grenzwertes im Rahmen der EU-Grundwasserrichtlinie 2006/118/EG für Nitrat im Trinkwasser von 50 mg L⁻¹ Wasser deutlich verstärkt. Zudem kommen weitere Einschränkungen in den sogenannten „Roten Gebieten“ nach der Düngeverordnung hinzu, die gerade in Regionen mit einer hohen Tierbestandsdichte auftreten. Ohne einen Stickstoffentzug aus den Wirtschaftsdüngern gibt es nur die Möglichkeit eines Nährstoff- oder Gülletransportes aus der Region oder einer massiven Reduzierung des Tierbestandes in den Überschussregionen. Ziel des Vorhabens ist es einen Beitrag zur Lösung dieser Entwicklung zu leisten. Um den Stickstoff-Gehalt zu senken, ist Gülleentstickung auf Basis von biologischen Verfahren (Nitrifikation/ Denitrifikation) das weltweit meistgenutzte Verfahren. Dieses Verfahren, das hauptsächlich von der belgischen Firma Bio Armor realisiert wird findet allerdings in Deutschland kaum Anwendung. Nachteile dieses Verfahrens sind relativ hohe Kosten und dass der Hauptteil des Stickstoffs in elementaren Stickstoff umgewandelt wird und damit für eine Weiternutzung als Dünger in stickstoffarmen Regionen verloren geht. Zudem wird das Verfahren von Bio Armor derzeit fast ausschließlich für unvergorenes Material eingesetzt. Eine energetische Nutzung von Gülle findet nicht statt.

Im Rahmen dieses Vorhabens sollte ein optimiertes aerobes Verfahren zur GÜlleaufbereitung mit einer anaeroben GÜllevergärung kombiniert, und damit eine energetische Nutzung und Kostenreduzierung ermöglicht werden. Die oben genannte Optimierung hatte zudem das Ziel, möglichst viel der in der GÜlle gelösten Stickstoffverbindungen in Biomasse umzuwandeln und diese als Rohstoff für verschiedene Anwendungsfelder aus der GÜlle auszuschleusen. Dabei sollte ein modularer Ansatz verfolgt werden, der verschiedene verfahrenstechnische Operationen sowie Nutzung- und Verbringungsmöglichkeiten von Nährstoffen in Abhängigkeit der Standortbedingungen und wirtschaftlichen Rahmendaten ermöglicht. Eine Herausforderung des Projektes war es, für diese Vorgehensweise die notwendige Datenbasis zu schaffen.

Der dargestellte Verfahrensansatz eines Kombinationsverfahrens hat mehrere Vorteile gegenüber den Einzelverfahren:

- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit
- Nachnutzungskonzept für bestehende Biogasanlagen
- Erhöhung der Transportwürdigkeit und Wertschöpfung

1.1.1 Verfahren zur Stickstoffreduzierung in GÜlle

Zur Reduzierung des Stickstoffgehaltes in GÜllen, Gärresten und Abwässern gibt es eine Vielzahl von physikalischen (u. a. Strippen, Umkehrosmose), chemischen (u. a. Fällung) und biologischen Verfahren [7]. Auf die erstgenannten Verfahrensprinzipien soll hier nicht näher eingegangen werden. Biologische Verfahren wie Nitrifikation/ Denitrifikation oder Anammox zur Stickstoffreduzierung sind in der Abwasserbehandlung Stand der Technik [12]. Verfahrensansätze zur aeroben Behandlung von GÜlle oder stark stickstoffhaltigen Abwässern sind seit längerem bekannt [31], [19], [14], [10]. Bei den Verfahren wird zum Teil noch eine externe Kohlenstoffquelle benötigt. Zur Auslegung und Verfahrensführung von Anlagen zur Nitrifikation/Denitrifikation gibt es Vorgaben aus der Abwassertechnik, die nicht zwangsläufig auf GÜllen und Gärreste zu beziehen sind [1]. Die Verwendung von GÜlle entspricht einer neuen Anwendung, bzw. gibt es eine Anschlussmöglichkeit aus dem Projekt Nred (FKZ: 22042118). Relativ neu ist der großtechnische Einsatz aerober Verfahren zur Entstickung von Gärresten und GÜllen. Durch die Firma Bio Armor sind 60 - 70 Anlagen zur Entstickung von GÜlle (sowohl Schweine- als auch RindergÜlle) mit einer Kapazität von 7.500 bis zu 90.000 m³/Jahr vorrangig in Belgien und den Niederlanden gebaut worden [3]. Das Verfahren hat sich in der Praxis bewährt. Erste Anlagen gingen vor 15 Jahren in Betrieb. RohgÜlle wird dabei einer Fest/Flüssig-Trennung unterzogen. Der Feststoff wird als fester Dünger verwertet. Die Aufbereitung der Flüssigphase erfolgt nach dem Prinzip der Nitrifikation/ Denitrifikation. Nach Angaben des Unternehmens wird eine Stickstoffreduzierung von 90 % und eine Phosphatreduzierung von 75 % erreicht. Die Phosphatreduzierung erfolgt allein durch die Separation im Vorfeld. Es gibt keine Geruchsbelästigung, Lachgasemissionen konnten nicht nachgewiesen werden. Die GÜlleaufbereitungsanlagen von Bio Armor sind nicht mit Biogasanlagen gekoppelt. In der Folge werden nicht nur die Möglichkeiten der Energiegewinnung außer Acht gelassen, sondern auch ein erhöhter Aufwand bei der Abwasserreinigung in Kauf genommen.

Das Patent DE 10 2013 018 833 A1 beschreibt ein Verfahren zur Aufbereitung eines aus einem Biogasreaktor stammenden Reststoffes mittels Deammonifikation [6]. Der Erfinder, Reik Ellmann, war am vorgestellten Projekt beteiligt. Eine technische Umsetzung des Verfahrens durch die Ellmann Engineering GmbH ist bereits erfolgt, wobei einige Schwachstellen (vor allem die langen Anfahrzeiten

> 1 Jahr) erkennbar wurden. Deammonifikation ist auf Grund der langen Anfahrzeiten des Prozesses nur schwer in der Praxis realisierbar. Für die Deammonifikation ist eine solche Richtlinie zur Anlagenauslegung noch nicht vorhanden. Auch hier gibt es aber bereits Anwendungen für Abwasserbehandlungen im Industriemaßstab [34]. Weiterhin wurden Anwendungen für Deammonifikation im SBR-Verfahren (Sequencing-Batch-Reactor) für Abwasser beschrieben [18].

Eine weitere Möglichkeit den Stickstoffgehalt von Gülle zu reduzieren stellt im ersten Schritt die Umsetzung des gelösten Ammoniumstickstoffes in feste Biomasse dar, die in einem zweiten Schritt aus der fermentierten Gülle abgetrennt wird. Hauptziel dieser Verfahren war die Gewinnung von Futtermitteln [33], [13], [23]. Aktuell wurde in China ein Verfahren zur Nährstoffrückgewinnung aus Gärresten von Biogasreaktoren in Form von bakterieller Biomasse mittels Airlift Reaktoren untersucht [24]. Dieser bisher nur im Labormaßstab praktizierte Verfahrensansatz arbeitet mit einem großen Luftüberschuss. Vorteil dabei ist, dass ein Teil des Ammoniumstickstoffes als Ammoniak ausgestrippt wird. Die notwendigen Luftmengen scheinen aber großtechnisch wirtschaftlich nicht realisierbar. Die gezielte Gewinnung von Biomasse wird in der Abwassertechnik nicht praktiziert, weil es die Produktion von Klärschlamm bedeuten würde.

1.1.2 Verfahren zur Vergärung von Gülle

Verfahren zur Vergärung von Gülle sind Stand der Technik. Sie sollen in diesem Projekt auch nicht weiter erforscht bzw. weiterentwickelt werden. Ziel ist es aber, aus den bekannten und in der Praxis etablierten Verfahren, die auszuwählen, die für nach der Entstickung der Gülle anfallenden Stoffströme am geeignetsten sind. Dabei sind Verfahren interessant bei denen die Gülle einer fest/flüssig Trennung unterzogen wurde. Die Nutzung von separierter Rindergülle als alternatives Gärsubstrat wurde z. B. in einem Verbundvorhaben (FNR, FKZ: 22400512) untersucht. Da hierbei der Trockensubstanz von 5 – 9 % nur auf 20 – 25 % erhöht wird, erhöht sich die Transportwürdigkeit und damit die Wirtschaftlichkeit nur geringfügig. Ein ähnliches Verfahren wurde von Heppe, Pätz entwickelt und patentiert [10].

1.1.3 Verfahren zur Biomassegewinnung aus Gülle

Bezüglich der Verfahren und Anlagen zur aeroben Güllebehandlung erfolgte eine umfassende Literatur- und Patentrecherche. Die ermittelten Daten unterstützten die Versuchsplanung zur aeroben Güllebehandlung im Labormaßstab (definierte Prozessparameter) und die Konzeptentwicklung für die kombinierte Güllebehandlung. Schwerpunkt der Recherche waren aerobe Verfahren der biologischen Stickstoffreduzierung und Verfahren der Biomassegewinnung aus Gülle. Dabei wurden auch Verfahren betrachtet, die sich mit der Gewinnung von Futtermitteln aus Gülle beschäftigten und aus verschiedenen Gründen nicht weitergeführt wurden. Hierfür erfolgte insbesondere die Prüfung von Patenten und Berichten, die im Rahmen von Forschungsprojekten der Akademie der Wissenschaften (der DDR) erstellt wurden und durch die Zusammenarbeit mit dem am aktuellen Forschungsprojekt GülleKOM beteiligten Prof. Dr. Reinhardt Pätz zur Verfügung gestellt wurden. Eine Zusammenfassung der ermittelten Daten ist den Tabelle 1 und Tabelle 2 entnehmen.

Tabelle 1: Übersicht Verfahren und Anlagendaten zur aeroben Güllebehandlung

Titel	Inhalt	Quelle
Verfahren zur mechanisch-mikrobiologischen Behandlung von Schweinegülle	• Kombination bekannter Methoden der Gülle- und Abwasseraufbereitung (Nitrifikation/ Denitrifikation) mittels Fest-Flüssig-Trennung resultiert in einem schüttfähigem Feststoff, einer stark BSB₅- (99 %) und N-geminderten (75 %) Flüssigphase und eines in der Menge reduzierten, aerob stabilisierten Überschussschlammes • Nitrit/ Nitrat- abhängige Steuerung der Belüftung • Geruchsminderung, Feststoff- und Nährstoffminderung	[31]
Verfahren und Anlage zur Einstellung des Nährstoffgehaltes von Flüssigmist	• Flüssigmist-Behandlung mittels zweistufigem Verfahren • 1. Stufe aerob (Nitrifikation), 2. Stufe anaerob (Denitrifikation) • Differenzierung zur Einstellung des Nährstoffgehalts: a) zur Aufrechterhaltung der Nährstoffe (Vermeidung Nitrifikation /Denitrifikation): aerob-thermophil (>50° C) + anaerob-mesophil b) zur Reduzierung des Nährstoffgehalts (um mind. 50 %): aerob-mesophil + anaerob-thermophil • In der 2. Stufe entsteht Faulgas (CH₄), die Ausbeute ist abhängig vom Organik-Abbau in der ersten Stufe	[21]
Verfahren und Vorrichtung zur biologischen Verarbeitung von organisch belasteten, stark stickstoffhaltigen, wässrigen Flüssigkeiten	• Mikrobiologische Behandlung von Flüssigkeiten mit hohem Organik- und Stickstoff-Anteil (insbesondere Gülle) • Mehrere kaskadenartig angelegte Biofilter: anoxischer Festkörper (Bewuchsfläche für Denitrifikanten, Abscheidung elementarer Stickstoff), oxische Biomassefilterkörper (Ansiedlung Nitrifikanten, Filter für suspendierte Teilchen)	[30]
Verfahren zur biologischen Nitrifikation von Abwässern	• Stickstoffeliminierung aus landwirtschaftliche, kommunalen oder industriellen Abwässern • Optimierung physiologischer Bedingungen für die Nitrifikation (Temp., O₂- und CO₂-Versorgung) um Nitrifikationsgeschwindigkeit zu erhöhen und Beckenvolumina zu minimieren • Belüftung der Nitrifikation mit Gasgemisch Luft + CO₂ (Anteil 1,5 – 10 %)	[25]
Verfahren zur Behandlung eines flüssigen stickstoffreichen Abfallprodukts, nach diesem Verfahren hergestellte Düngemittellösung sowie seine Herstellung	• Behandlung von Gülle mittels Nitrifikation (mind. 1 Teilreaktion) • Ziel = Nitrat-reiches und Ammoniumstickstoff-armes Abwasser (< 150 mg/L) • Teilstrom wird Denitrifikation zugeführt und später wieder rezirkuliert, Zielkonzentration Nitrat = 1500 mg L⁻¹ • Produkt ist ein definierter Flüssigdünger	[19]

Titel	• Inhalt	Quelle
Method and installation for processing manure, fermented manure and Kjeldahl-N containing waste water	• Behandlung von Flüssigmist oder flüssigem Gärrest aus Biogasreaktoren mittels Nitrifikation und Denitrifikation (Kaskade) • Nitrifikation in belüftetem Behälter, pH-Regulation (6 – 8,5) • Denitrifikation in USB (upflow slib bed) Reaktor unter Zugabe einer Kohlenstoff-Quelle (Methanol)	[14]
Verfahren zur Behandlung von Rohgülle der Firma Bio Armor Belgium	• Separation von Rohgülle (Schweinegülle, Rindergülle) → Feststoff 30 % TS, 75 % P, Flüssigphase 3 % TS, 75 % N • Behandlung der Flüssigphase mittels Nitrifikation/ Denitrifikation in einem Behälter (30 d Verweilzeit, 17 min/h Belüftung) • Parameter zur Prozesskontrolle: Redox-Potenzial, Ammoniumstickstoff, Nitrat • N-Reduzierung von bis zu 90 % • Ohne Beheizung	[3]
Verfahren zur Aufbereitung eines aus einem Fermenterreaktor stammenden Reststoffes	• Gärrestbehandlung zur Nutzung als Anmischsubstrat für feste Substrate • Weiterbehandlung des Dünnsafts nach Separation mittels Anammox-Verfahren • Temperaturbereich zwischen 35 – 45 °C • Intermittierende Belüftungsphase um Teilreaktion der Nitrifikation zu ermöglichen • Diskontinuierlicher Betrieb: Verweilzeit von 24 h bis 6 d, Entnahme von max. 40 – 80 %	[6]
Praxisanlage zur Stickstoffreduzierung in Gärresten mittels Anammox-Verfahren	• Gärrest-Behandlung mittels 2-stufiger Deammonifikation • Vorgesaltete Separation, Weiterbehandlung der Flüssigphase • Sedimentationsbecken mit Belebungsbecken (Innenring), Belüftung, Teilreaktion Nitrifikation • Anammox-Becken, geringe Belüftung, Bogensieb zum Biomasserückhalt • Verweilzeit 8 – 16 d, 30 °C	[2]
Two Decades of Experience with the Granular Sludge-Based ANAMMOX® Process Treating Municipal and Industrial Effluents	• Schlamm/ Granula basierter Anammox-Prozess im technischen Maßstab zur Behandlung von Abwässern und Abfällen aus Landwirtschaft (Gülle, Gärrest) und Industrie • Teilreaktion der Nitrifikation in Kombination mit Anammox-Prozess ermöglicht es zusätzliche Kohlenstoff-Quelle (für Denitrifikation) einzusparen • Geringe Wachstumsrate der Anammox-Bakterien erfordert Biomasserückhalt in Granula (in einem internen Biomasseseparator, Sedimentation der Granula)	[5]

Tabelle 2: Übersicht Verfahren zur Biomassegewinnung aus Gülle

Titel	Inhalt	Quelle
Management of swine manure for the recovery of protein and biogas	• Vergärung von Schweinegülle zur Gewinnung von Biogas im Biogasreaktor (14 m³) • Daran anschließend wird die Flüssigphase der Gärreste zur Kultivierung von Algen (<i>Chlorella vulgaris</i>) in Algen-Becken (insgesamt 6.000 L) genutzt • Gewonnene Algen-Biomasse (Zentrifugation + Gefriertrocknung) dient zur Gewinnung von Protein als Tiernahrung • Höchste Algen-Konzentration (0,7 g L⁻¹) wurde bei einer Verweilzeit von 6 d und 35 °C erreicht • 21 – 47 % des Ammoniumstickstoffs wurden in Biomasse umgewandelt • Rückgewinnung von Nährstoffen durch Bakterien bei kontinuierlicher Kultivierung: Ertrag von 0,38 g Zellen pro g CSB Fazit: • Für Algenwachstum ist starke Verdünnung des Mediums erforderlich (große Wassermenge), hohe Kosten für Ernte und Verarbeitung • Als Alternative werden Hefen vorgeschlagen	[4]
Verfahren zur Gewinnung von Biomasse	• Gewinnung von Biomasse durch Kultivierung von Hefen oder Hefen und Bakterien auf der Basis niedermolekularer Kohlenhydrate, Fettsäuren, Alkohole und Aldehyde als Einzelsubstrat oder in Kombination • Mikrobiologische Eiweißgewinnung • Ziel = stabile Prozessführung unter unsterilen Bedingungen und Einsatz verschiedener Kohlenstoff-Quellen (Essigsäure-enthaltende Substrate, Gülle, Silagesickersaft), ohne Einsatz von Wuchsstoffen • Hefestämme: <i>Pichia membranaefaciens</i> H196, <i>Metschnikowia spec.</i> H197, einzeln oder in Mischkultur mit Bakterien • Optimales Wachstum bei 32 °C – 38 °C und pH 4,4 – 5,5 • Kohlehydrat-bevorzugende Hefen (<i>Candida</i> Arten) waren für diese Substrate nicht so gut geeignet (starker Inhibierungseffekt bei höheren Essigsäurekonz.) bzw. benötigten zusätzliche Wuchsstoffe	[33]
Process for recovering feed-grade protein from animal manure	• Rückgewinnung von Protein aus tierischen Exkrementen (Rind, Schwein, Geflügel) zur Verwendung als Tiernahrung • Einsatz von Flüssig- und Festmist als Substrat im Biogasreaktor → energetische Nutzung • Anschließend Fest-Flüssig-Trennung (Schneckenpresse/ Bandpresse) zur Wasserrückgewinnung (Anmischen von festem Substrat) bzw. TS-Erhöhung im Gärrest auf 65 – 75 % • Trocknung + Sterilisation → TS-Gehalt von 88 %	[13]

Titel	Inhalt	Quelle
Process for the aerobic conversion of poultry manure into high-protein feedstuff	• Zweistufiges, aerobes Verfahren zur Gewinnung von Mikrobenprotein aus Geflügelmist zur Verwendung als hochwertiges Protein-Futter für Tiere • Dominante Spezies in 2. Verfahrensstufe = <i>Pseudomonas fluorescens</i> (Lysin-reiches AS Profil, hochwertige Proteine) • pH-Regulation in beiden Stufen erforderlich (pH 6,5 = optimal) • Temperierung erforderlich (1. Stufe 25 °C, 2. Stufe 30 °C) • Belüftung mittels Kompressor • In 2. Stufe Zugabe von Dextrose Hydrat als Kohlenstoff-Quelle erforderlich • Zusatz großer Wassermengen zum Anmischen des festen Geflügelmists (Ziel = TS von 10 %) in 1. Stufe • Produktgewinnung mittels Zentrifugation → verschiedene Sedimentationsschichten durch FMA (Analyse Protein-, Rohasche- und Fett-Gehalt) protein-reiche Schichten ermittelt • Wachstumskurven: NH₄-N bzw. Säure-Verbrauch	[23]
Hybrid technology for nutrients recovery as microbial biomass and ammonium sulfate from un-diluted biogas liquid digestate using a modified airlift reactor	• Nährstoffrückgewinnung aus Gärresten der Geflügelmist-Vergärung in Form von Biomasse durch aerobe Kultivierung von Mikroorganismen in modifiziertem Airlift Reaktor • Gleichzeitige Strippung von Ammoniak ohne Einsatz von alkalischen Lösungen • Verweilzeit von 3 d, Einsatz von Saccharose als zusätzliche Kohlenstoff-Quelle, Belüftungsrate von 2 vvm (Volumen Luft/ Volumen Gärrest pro min) • Bis zu 59 % an Rohprotein in gewonnener Biomasse • Rückgewinnung von 59 % PO₄³⁻ und 11 % Gesamtstickstoff in Form von Biomasse • Option organische Säuren aus dem Biogasprozess als Ersatz für zusätzliche Kohlenstoff-Quelle zu verwenden	[24]

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Entwicklung eines Gülleaufbereitungs-Verfahrens, das aerobe Techniken zur Stickstoffreduzierung mit energetischer Nutzung in anaeroben Verfahren (Biogasreaktoren) und der Gewinnung von Biomasse (Proteine) kombiniert sollten folgende Projektziele erreicht werden:

- Entwicklung eines modularen Modellansatzes zur Gülleaufbereitung und Schaffung der dafür notwendigen Datenbasis
- Senkung des Ammoniumstickstoffgehaltes der Gülle (aerobe Technologie)
- Nutzung des energetischen Inhalts der Gülle durch Produktion von Biogas (anaerobe Technologie)
- Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Gülleaufbereitung
- Reduzierung der Produktion von elementarem Stickstoff durch Fixierung des löslichen Ammoniumstickstoffes in abtrennbarer Biomasse
- Gewinnung eines transportwürdigen Düngers (Phosphor- und Stickstoffdünger)

- Gewinnung von Protein als Bioökonomierohstoff (u. a. für Klebstoffe, hochelastische Faserstoffe, Schmierstoff-Additive, aufgereinigte Aminosäuren)
- Gewinnung von Protein als Bioökonomierohstoff (u. a. für Klebstoffe, hochelastische Faserstoffe, Schmierstoff-Additive, aufgereinigte Aminosäuren)

Ausgehend von den dargestellten Aufgaben und Zielen untergliedert sich die Studie in folgende Arbeitspakete (Abbildung 2):

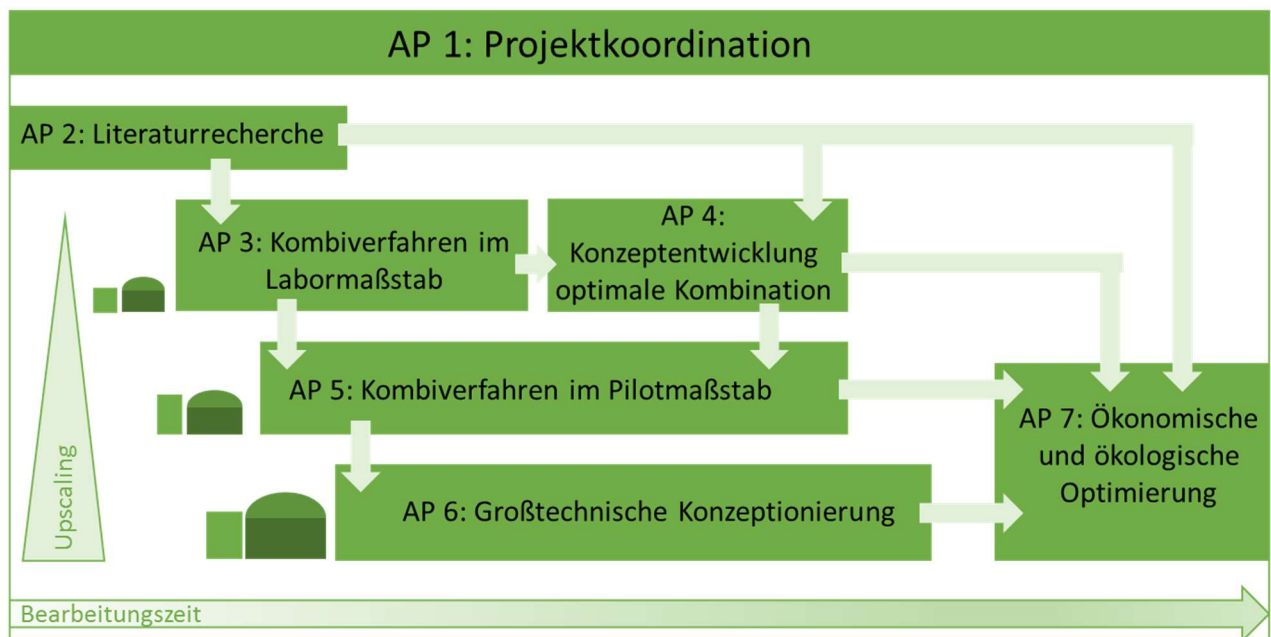


Abbildung 2: Strukturplan zum Verbundvorhaben GülleKOM

Die Projektkoordination (AP 1) wurde im Wesentlichen durch das DBFZ realisiert. Die gezielte Umwandlung von Ammoniumstickstoff in bakterielle Biomasse zum Zweck der Stickstoffreduzierung und Wertstoffgewinnung ist zwar nicht ganz neu, aber viele Forschungsarbeiten liegen Jahre zurück. Es war deshalb sinnvoll, noch einmal eine umfassende Literatur- und Patentrecherche durchzuführen (AP 2, DBFZ). In diese Arbeiten wurde auch über AEV Prof. Dr. Reinhard Pätz, ehemals Hochschule Anhalt, der an den Arbeiten an der Akademie der Wissenschaften beteiligt war, eingebunden. AP 3 umfasste die Laborversuche am DBFZ und bei EE, die in Absprache mit dem Projektpartner AEV durchgeführt wurden. Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die biologisch oxidative Stickstoffreduzierung in der Flüssigphase verschiedener Gülle bei einem gleichzeitig großen Biomassezuwachs. Dabei sollte nach Möglichkeit auf eine zusätzliche externe leichtverfügbare Kohlenstoffquelle verzichtet werden. Für die Erhebung von Daten für das federführend von AEV bearbeitete AP 4 „Entwicklung eines modularen Konzeptes zur optimalen Kombination von aerober und anaerober Güllebehandlung“ (u. a. Biogaspotential der Gülle nach der aeroben Behandlung) war es notwendig Versuchsreihen zu Konzept II (aerob vor anaerob) in AP 3 durchzuführen und umfangreiche Analysen von Gülle und Fermentationsprodukten zu realisieren. Die Umsetzung des in AP 4 (DBFZ, AEV, EE) ermittelten optimalen Konzeptes unter Berücksichtigung der Bedingungen eines konkreten Standortes in einem Pilotmaßstab erfolgt in AP 5. Im AP 6 (AEV, EE, DBFZ) wird unter Führung der beiden Anlagenplaner das Konzept einer großtechnischen Anlage bis zu den für eine Genehmigung erforderlichen Daten entwickelt bzw. erhoben.

Die Bewertung ökologischer und ökonomischer Aspekte des Gesamtverfahrens und die Definition zusätzlicher Optimierungsschritte erfolgte in AP 7 (AEV, EE).

1.3 Resümee der wesentlichen Ergebnisse

Den folgenden Kapiteln ist eine tabellarische Übersicht zur Zielerreichung in den bearbeiteten Arbeitspaketen und Meilensteinen (1.3.1) sowie eine kurze Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse des Vorhabens (1.3.2) zu entnehmen.

1.3.1 Arbeitspakete und Meilensteine

Die Übersicht zur Zielerreichung der Arbeitspakete und Meilensteine ist Tabelle 3 und Tabelle 4 zu entnehmen.

Tabelle 3: Arbeitspakete im Verbundvorhaben GülleKOM

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Projektkoordination	11/2021 bis 10/2024	- Kick-off Projekttreffen - Jährlich 3 Projekttreffen - Regelmäßige Telefonkonferenzen zur Versuchsplanung und Auswertung - Abschlussprojekttreffen zur Vorbereitung des Endberichts - Teilnahme an Fachmessen (AEV) und Tagungen (DBFZ)
AP 2 Recherche	11/2021 bis 02/2022	- Literaturrecherche zu Verfahren der Stickstoffreduzierung in Gülle und Applikationsforschung zur Nutzung der gewonnenen Biomasse ist erfolgt
AP 3 Umsetzung der kombinierten Güllebehandlung und Proteingewinnung im Labormaßstab	01/2022 bis 01/2023	- Betrieb einer Laborkläranlage zur aeroben Güllebehandlung von März 22 bis März 23 und eines Laborreaktors zur Hefekultivierung auf Gülle - Weitere Versuche zur Hefekultivierung in Schüttelkolben
AP 4 Entwicklung eines modularen Konzeptes zur optimalen Kombination von aerober und anaerober Güllebehandlung	05/2022 bis 04/2023	- Massen- und Stickstoffbilanzen auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden erstellt. - Konzept zur Teilstrombehandlung wurde entwickelt.
AP 5 Umsetzung der kombinierten Güllebehandlung und Proteingewinnung im Pilotmaßstab	11/2022 bis 01/2024	- Betrieb einer Pilotanlage zur aeroben und anaeroben Güllebehandlung von Oktober 23 bis Juni 24. - Bewertung von Gasertrag und Prozessstabilität der Biogasreaktoren. - Bewertung der Prozessparameter und der Stickstoffreduzierung bei der aeroben Behandlung.

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 6 Konzeption einer großtechnischen Anlage zur kombinierten GÜlleaufbereitung	04/2023 bis 09/2024	- Massen- und Stickstoffbilanzen für die Pilotanlage und eine 500 kW Anlage wurden erstellt. - Konzeption der 500 kW Biogasanlage erfolgte durch AEV. - Konzeption der aeroben Behandlung (Gärrest und GÜlle) erfolgte durch EE:.
AP 7 Bewertung und Optimierung ökonomischer und ökologischer Aspekte	05/2024 bis 10/2024	- Die Wirtschaftlichkeit der anaeroben GÜllebehandlung (500 kW Biogasanlage) im GÜlleKOM Verfahren wurde von AEV betrachtet. - Die Wirtschaftlichkeit von Nitrifikation/Denitrifikation zur aeroben Gärrest- und GÜllebehandlung wurde von EE betrachtet. - Eine ökologische Bewertung des gesamten Verfahrens erfolgte bezogen auf die großtechnische Anlage.

Tabelle 4: Meilensteine im Verbundvorhaben GÜlleKOM

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1.1 Kick-off Projekttreffen	11/2021	Ist erfolgt.
M 2.1 Übersicht Verfahren und Anlagendaten zur aeroben GÜllebehandlung	12/2021	Ist erfolgt.
M 2.2 Übersicht der Methoden zur Biomassegewinnung aus GÜlle und zu Anwendungsmöglichkeiten	02/2022	Ist erfolgt.
M 3.1 Ermittlung und Optimierung der Prozessparameter im Labormaßstab zur Umwandlung in elementaren Stickstoff	01/2023	Ist erfolgt.
M 3.2 Ermittlung und Optimierung der Prozessparameter im Labormaßstab zur Stickstofffixierung in Biomasse	01/2023	Ist erfolgt.
M 4.1 Konzept zur optimalen Kombination von aerober und anaerober GÜllebehandlung	01/2023	Ist erfolgt.
M 4.2 Wärmenutzungskonzept für die Überschusswärme aus der Stickstoffreduzierung	04/2023	Ist erfolgt.
M 5.1 Anwendung des Kombiverfahrens zur GÜllebehandlung im Pilotmaßstab	01/2024	Ist erfolgt.
M 5.2 Bewertung und Optimierung der Proteingewinnung	01/2024	Ist erfolgt.
M 6.1 Konzepterstellung für Praxisanlage und periphere Anlagenkomponenten	09/2024	Ist erfolgt.
M 7.1 Ökonomische und ökologische Bewertung des Gesamtverfahrens	10/2024	Ist erfolgt.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 7.2 Definition zusätzlicher Optimierungsschritte (Abwärmenutzung, Biomassegewinnung)	10/2024	Ist erfolgt.

1.3.2 Zusammenfassung

Im Vorhaben wurde die optimale Kombination der Verfahren zur aeroben Gülleaufbereitung und anaeroben Güllevergärung zunächst im Labormaßstab untersucht. Schwerpunkt dieser Untersuchungen war die biologisch oxidative Stickstoffreduzierung in der Flüssigphase verschiedener Güllen bei einem gleichzeitig großen Biomassezuwachs. Das optimierte Konzept zur kombinierten Gülleaufbereitung wurde im Pilotmaßstab umgesetzt. Beim Betrieb des GülleKOM Verfahrens im Pilotmaßstab wurde gezeigt, dass die optimierte Kombination anaerober und aerober Güllebehandlung eine Vergärung mit maximal 10 % Verlust an Biogaspotenzial und gleichzeitig eine biologische Stickstoffentfernung ermöglicht. Es wurden 69 % des Stickstoffs aus der Schweinegülle bei der kombinierten Behandlung an der Pilotanlage in molekularen Stickstoff umgesetzt. Somit wurde der Gesamtstickstoff-Gehalt (TKN + Nitritstickstoff + Nitratstickstoff) durch die Behandlung wesentlich reduziert. Grundsätzlich war es ein Projektziel die Produktion von molekularem Stickstoff durch Fixierung des löslichen Ammoniumstickstoffes in abtrennbarer Biomasse (entspricht dem Klärschlamm einer Kläranlage) zu minimieren. Im Gegensatz zum klassischen Kläranlagenprinzip bestand hier die Maßgabe, den Anfall an Klärschlamm zu maximieren. Bei der Umsetzung des Verfahrens im Pilotmaßstab konnten nur 5,2 %, der in der Gülle enthaltenen organischen Substanz im Belebtschlamm fixiert werden. Bei der im Rahmen des Projektes durchgeführten Variante des Verfahrens, wurde der Belebtschlamm der Fermentation zugeführt, hat aber nur zu einem geringen Anteil zum Biogasertrag beigetragen. Gegenstand weiterer Forschung sollte sein, den Belebtschlammanteil zu erhöhen. Neben einer Anpassung der Betriebsparameter der aeroben Behandlung ist dafür auch eine andere Abscheide-Technik erforderlich.

Unter Führung der beteiligten Anlagenplaner wurde das Konzept zur Einbindung der Aerobstufe in eine großtechnische Anlage entwickelt. Abschließend erfolgte eine ökologische und ökonomische Bewertung des Gesamtverfahrens und die Definition zusätzlicher Optimierungsschritte (Wärmenutzungskonzept). Insgesamt betrachtet kann durch die Ergänzung der anaeroben Vergärung als Verfahrensstufe zur aeroben Güllebehandlung die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur aeroben Gülleaufbereitung verbessert werden. Bezogen auf einen EEG konformen Betrieb kann ein Gewinn von 5,56 €/m³ Gülle bei der Teilstrombehandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren erwirtschaftet werden.

2 Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

Dem folgenden Kapitel ist eine ausführliche Beschreibung der im Verbundvorhaben erzielten Ergebnisse in den einzelnen Arbeitspaketen zu entnehmen.

2.1 AP 2: Literaturrecherche zu Verfahren der Stickstoffreduzierung in Gülle und Applikationsforschung zur Nutzung der gewonnenen Biomasse

Bezüglich der Verfahren und Anlagen zur aeroben Güllebehandlung erfolgte eine umfassende Literatur- und Patentrecherche. Die ermittelten Daten unterstützen die Versuchsplanung von AP 3 (definierte Prozessparameter) und die Konzeptentwicklung in AP 4. Schwerpunkt der Recherche waren aerobe Verfahren der biologischen Stickstoffreduzierung und Verfahren der Biomassegewinnung aus Gülle. Dabei wurden auch Verfahren betrachtet, die sich mit der Gewinnung von Futtermitteln aus Gülle beschäftigten und aus verschiedenen Gründen nicht weitergeführt wurden. Hierfür erfolgte insbesondere die Prüfung von Patenten und Berichten, die im Rahmen von Forschungsprojekten der Akademie der Wissenschaften (der DDR) erstellt wurden und durch die Zusammenarbeit mit dem am aktuellen Forschungsprojekt GülleKOM beteiligten Prof. Dr. Reinhardt Pätz zur Verfügung gestellt wurden. Eine Zusammenfassung der ermittelten Daten ist Kapitel 1.1.3 zu entnehmen.

Möglichkeiten zur Nutzung der gewonnenen Biomasse sind auf Grund rechtlicher Rahmenbedingungen, die auf Abfallprodukten basierende Tiernahrung ausschließen, eher bei technischen Anwendungen zu finden. Hier ist die Eignung des Mikrobenproteins für Anwendungen, die für pflanzliche Proteine beschrieben wurden, wie:

- Proteinkleber
- Bindemittel in Farben und Lacken
- Schmierstoffadditive
- Faserstoffe
- Baumaterialien

zu prüfen [11], [29]. Ein Vorteil bei der Nutzung alternativer Proteinquellen entsteht durch den Ersatz erdölbasierter Rohstoffe.

2.2 AP 3: Umsetzung der kombinierten Güllebehandlung und Proteingewinnung im Labormaßstab

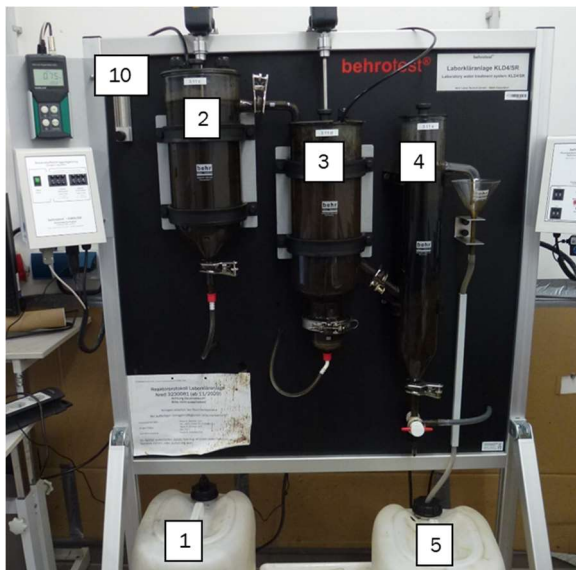
Im Labormaßstab wurden Versuche zur aeroben Stickstoffreduzierung (mittels Nitrifikation/Denitrifikation) und zur Gewinnung von Hefe und bakterieller Biomasse aus Gülle unter Nutzung von Ammoniumstickstoff durchgeführt. Die Versuchsanordnung - aerob vor anaerob - wurde mit Schweinegülle als Substrat untersucht. Am DBFZ wurde die Kaskadenschaltung mittels vorhandener Laborkläranlage bzw. Laborreaktor betrachtet. Bei Ellmann Engineering GmbH (EE) fanden die Versuche mittels simultaner Betriebsführung (SBR-Reaktor) in Kombination mit einem Biogasreaktor statt (2.2.4). In beiden Betriebsführungen (Kaskade und simultan) wurden die Arten der Stickstoffreduzierung: Umwandlung in elementaren Stickstoff und Stickstofffixierung in Biomasse untersucht. Jeweils war der aeroben Behandlung eine Fest-Flüssig-Trennung der Gülle zur Weiterbehandlung der Klarläufe vorangestellt. Neben Analysen der Substrat-Chargen und Überwachung der Prozessparameter wurden Batchversuche durchgeführt, um das Biogaspotenzial aus dem Ablauf der aeroben Behandlung und der abgetrennten Feststoffphase der Gülle zu ermitteln. Ziel des Arbeitspakets war die Ermittlung von

Basisparametern für die Prozessführung der Aerobstufe, wie notwendige Sauerstoffeintragsleistung, das Verhältnis zwischen Nitrifikations- und Denitrifikationsphasen sowie des optimalen Schlammgehaltes.

2.2.1 Laborkläranlage (vorgeschaltete Denitrifikation, Kaskade)

Die aerobe Behandlung der Schweinegülle erfolgte mittels Laborkläranlage, die mit vorgeschalteter Denitrifikation und einem gesamten Arbeitsvolumen von 10 L betrieben wurde (Abbildung 3). Die hydraulische Verweilzeit (HRT) betrug 25 d, die Schlamm-Verweilzeit (SRT) betrug durchschnittlich 30 d. Der durch Belüftung eingestellte Sauerstoff-Gehalt in der Nitrifikation lag bei 0,9 – 1 mg L⁻¹. Als Substrat kam Schweinegülle (Flüssigphase nach Separation) eines Schweinemastbetriebs aus der Region zum Einsatz. Die Separation im Vorfeld der Behandlung erfolgte mittels Siebung (Maschenweite 2 mm). Im Versuchszeitraum wurden 3 Substratchargen verwendet, deren Zusammensetzung (pH-Wert, Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS), Ammoniumstickstoff (NH₄-N), flüchtige organische Säuren (FOS), Futtermittelanalyse nach Weender) Tabelle 5 zu entnehmen ist. Die Versuche wurden im Anschluss an das Vorgängerprojekt Nred (FKZ: 22042118) durchgeführt. Die in den Prozessstufen etablierte Mikrobiologie (Gärrestbehandlung) diente als Inokulum.

A)



B)

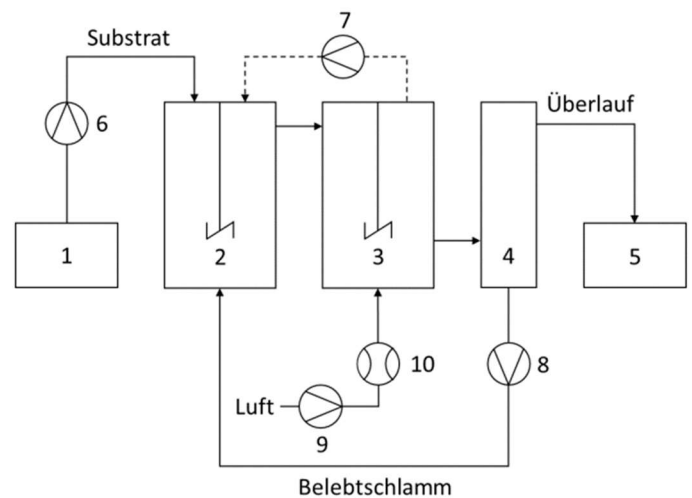


Abbildung 3: A) Laborkläranlage am DBFZ, B) Schematischer Aufbau der Laborkläranlage (Toni Schurzmann, DBFZ) (1) Substratvorlage, (2) Denitrifikation, (3) Nitrifikation, (4) Nachklärung (beinhaltet Klarlauf im Überstand und Überschussschlamm im Bodensatz), (5) Sammelbehälter Klarlauf, (6 bis 8) Schlauchpumpen, (9) Belüftungspumpe, (10) Durchflussmesser

Tabelle 5: Zusammensetzung der verwendeten Substratchargen

Substratcharge	pH-Wert [-]	TS [%]	oTS [%TS]	FOS [g L ⁻¹]	NH ₄ -N [g L ⁻¹]	TKN [g kg TS ⁻¹]	Rohprotein [g kg TS ⁻¹]	Rohasche [g kg TS ⁻¹]	Rohfett [g kg TS ⁻¹]	Rohfaser [g kg TS ⁻¹]	NfE [g kg TS ⁻¹]
I unsepariert	7,77	8,0	71,7	4,8	3,1	67,2	192,9	283,0	47,0	265,2	211,9
I Flüssigphase	7,47	4,7	65,9	5,9	3,2	-	-	341,3	57,7	101,1	-
I Festphase	-	18,9	78,4	-	2,5	29,4	117,2	216,2	54,3	298,6	313,8
II unsepariert	7,71	3,1	67,1	1,9	2,1	88,1	152,9	329,4	38,8	173,6	305,3
II Flüssigphase	7,74	1,4	47,8	1,2	2,0	175,6	253,4	522,1	99,6	28,3	96,7
II Festphase	-	17,4	72,8	-	1,6	24,5	104,0	272,1	14,6	392,5	216,7
III unsepariert	7,26	10,1	77,3	7,5	1,9	48,9	200,8	210,0	61,9	-	-
III Flüssigphase	7,59	5,9	69,4	7,1	1,9	73,2	273,3	288,7	105,4	142,6	190,0
III Festphase	-	14,8	80,7	-	1,4	32,2	152,1	168,9	84,8	294,8	299,4

Rohfaser enthält Lignin, Cellulose und teilweise Hemicellulose

NfE Stickstofffreie Extraktstoffe: enthält Zucker, Stärke, lösliche Reste

Die FMA nach Weender und van Soest erfolgte laut Beschreibung in der Messmethodensammlung Biogas [20]. Die Bestimmung des Ammoniumstickstoff-Gehalts in Feststoffen erfolgte im Eluat. Die Herstellung der Eluate, die TS-, oTS- und TKN-Bestimmung erfolgte nach [20].

Zur Prozessüberwachung wurden regelmäßig folgende Parameter analysiert: pH-Wert, TS, oTS, FOS, chemischer Sauerstoffbedarf (CSB), NH₄-N, Nitritstickstoff, Nitratstickstoff, Kjeldahl-Stickstoff (TKN). Der Gesamtstickstoff (TN) entspricht der Summe aus TKN, Nitritstickstoff und Nitratstickstoff.

Abbildung 4 bis Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Stickstoff-Parameter über den Versuchsverlauf zu entnehmen. Unabhängig von der eingesetzten Substratcharge wurde eine Reduzierung des Ammoniumstickstoff-Gehalts von bis zu 99 % erreicht (Abbildung 4). In Abbildung 6 sind Ammoniumstickstoff- und Gesamtstickstoff-Gehalt im Substrat und den einzelnen Prozessstufen von Versuchsphase I (Versuchstag 118) und II (Versuchstag 230) gegenübergestellt. Der Gesamtstickstoff-Gehalt wurde in Versuchsphase I im Klarlauf im Vergleich zum Ausgangssubstrat bis zu 83 % reduziert. Es wird ersichtlich, dass bei ungenügender Substratqualität (Versuchsphase II, weniger leicht verfügbare Kohlenstoffverbindungen) der Gesamtstickstoff-Gehalt nicht deutlich reduziert wird. Das ist vor allem durch eine eingeschränkte Funktion der Denitrifikation zu begründen, für die eine leicht verfügbare Kohlenstoffquelle notwendig ist. Ist die Denitrifikation gestört, bleibt Stickstoff hauptsächlich in Form von Nitrat liegen. Das ist auch in Abbildung 5 ersichtlich. Nach Wechsel auf Substratcharge III mit einem deutlich höheren Gehalt an FOS (Tabelle 5), wurde der Nitratstickstoff-Gehalt relativ schnell reduziert.

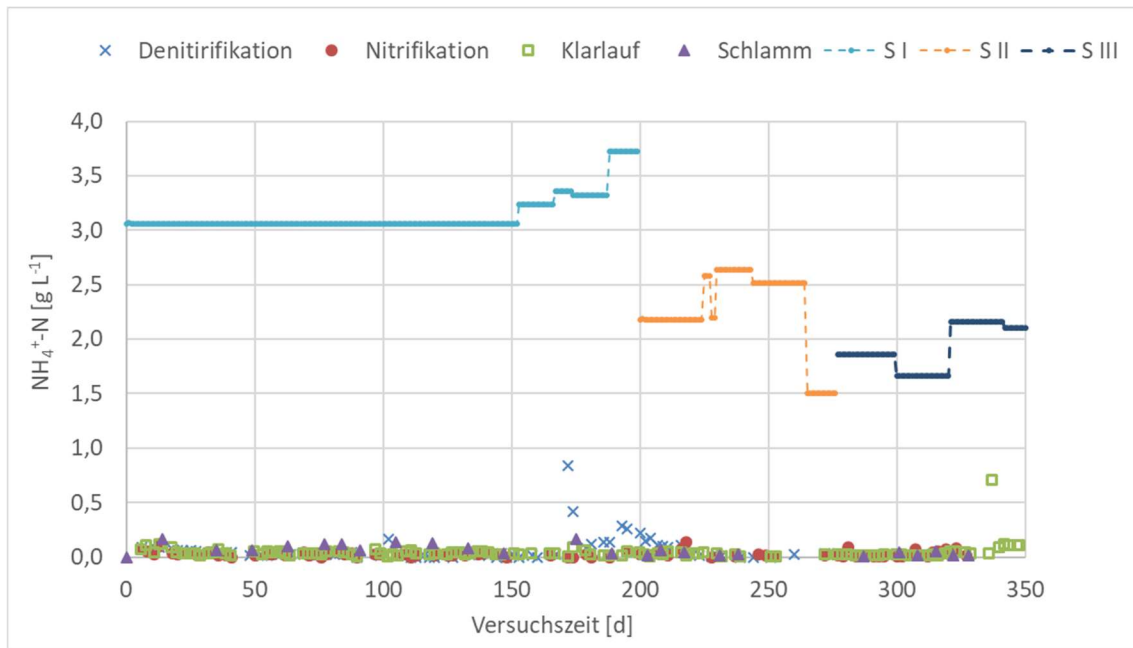


Abbildung 4: Ammoniumstickstoff-Gehalt (NH_4^+-N) in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III

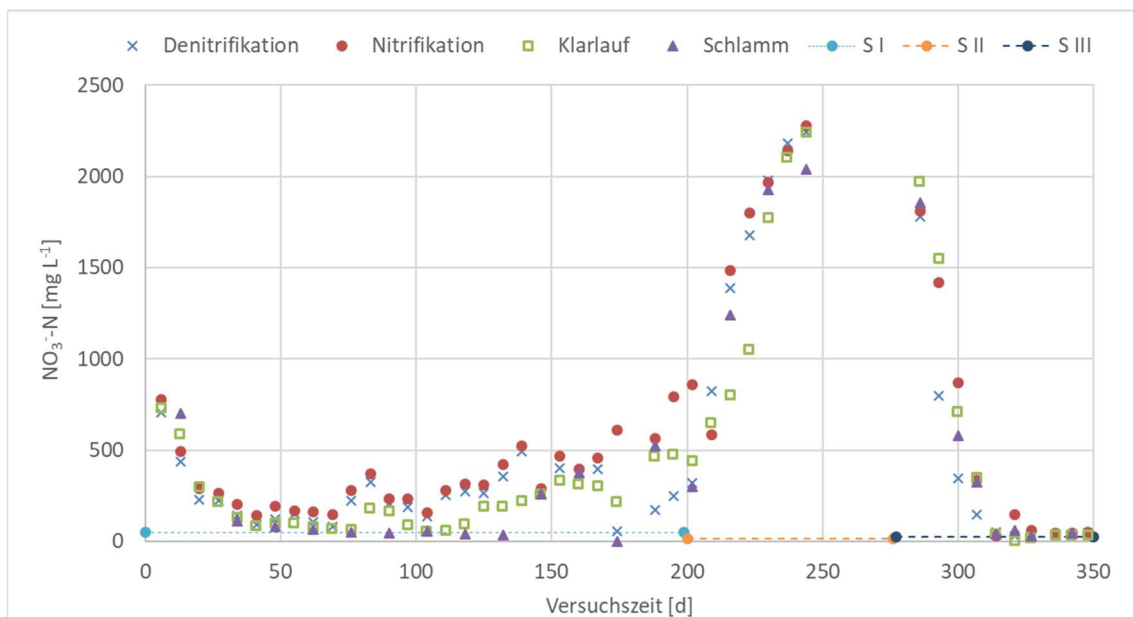


Abbildung 5: Nitratstickstoff-Gehalt (NO_3^--N) in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III

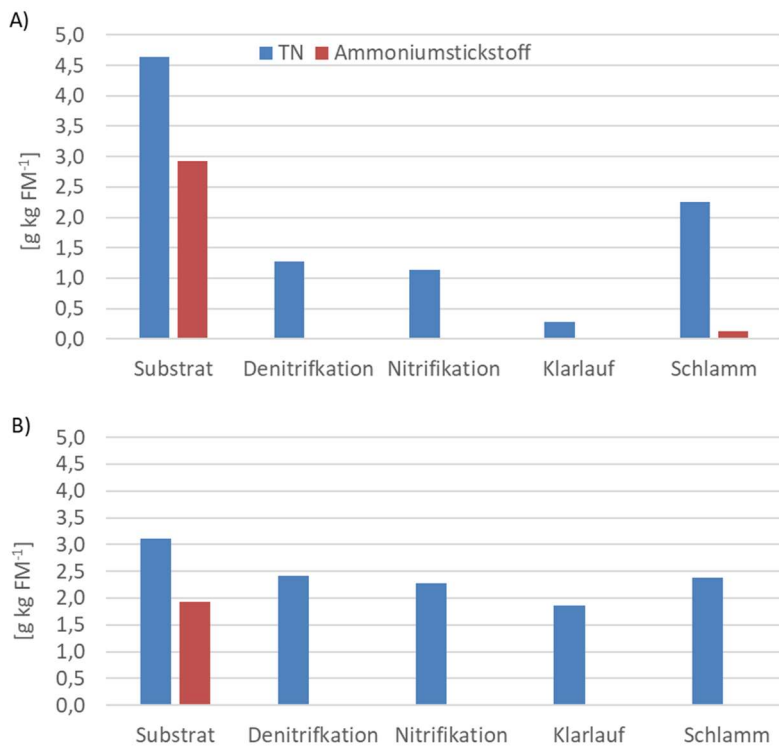


Abbildung 6: Gesamtstickstoff- (TN) und Ammoniumstickstoff-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage unter Verwendung von A) Substratcharge I (Versuchstag 118) und B) Substratcharge II (Versuchstag 230). Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm.

Bei Betrachtung des pH-Wertes wird ebenfalls eine Störung der Denitrifikation deutlich (Abbildung 7). In Versuchsphase II (S II) ist der pH-Wert in allen Prozessstufen vergleichsweise niedrig. Vor allem in der Nitrifikation ist der pH-Wert teilweise bis auf 6 gefallen. Das pH-Optimum für die Nitrifikation befindet sich in einem Bereich von 7,6 bis 9,4 [8]. Daher wurde bei Unterschreitung eines pH-Wertes von pH 6,5 Natriumhydrogencarbonat als Puffer zudosiert, um den pH-Wert anzuheben. Ursächlich für die niedrigen pH-Werte ist in diesem Versuchszeitraum eine Störung der Denitrifikation, die durch den bereits erwähnten Wechsel auf eine Substratcharge minderer Qualität zurückzuführen ist. Zudem fand zu diesem Zeitpunkt auch ein jahreszeitlich bedingter Rückgang der Außentemperatur statt. Da die Anlage nicht beheizt war, hat sich der Rückgang der Außentemperatur hemmend auf die Denitrifikation ausgewirkt ([8]; Temperaturabhängigkeit Denitrifikation). Bei der Umsetzung von Ammonium zu Nitrat in der Nitrifikation wird Säure (H^+) freigesetzt, was den pH-Wert absenkt. Bei der Denitrifikation wird das durch die Produktion von Basen (OH^-) neutralisiert. Dadurch lassen sich die relativ niedrigen pH-Werte durch eine Hemmung der Denitrifikation erklären. Als Maßnahmen zur Stabilisierung der Denitrifikation wurde die Raumtemperatur und damit die Anlagentemperatur auf 22°C angehoben. Zudem wurde Essigsäure als leicht verfügbare Kohlenstoffquelle zur Denitrifikation zugegeben. Beide Maßnahmen konnten den Prozess allerdings nicht dauerhaft stabilisieren. Eine pH-Wert Stabilisierung in einem Bereich $> \text{pH } 8$ hat sich erst mit einem erneuten Substratwechsel (S III) eingestellt.

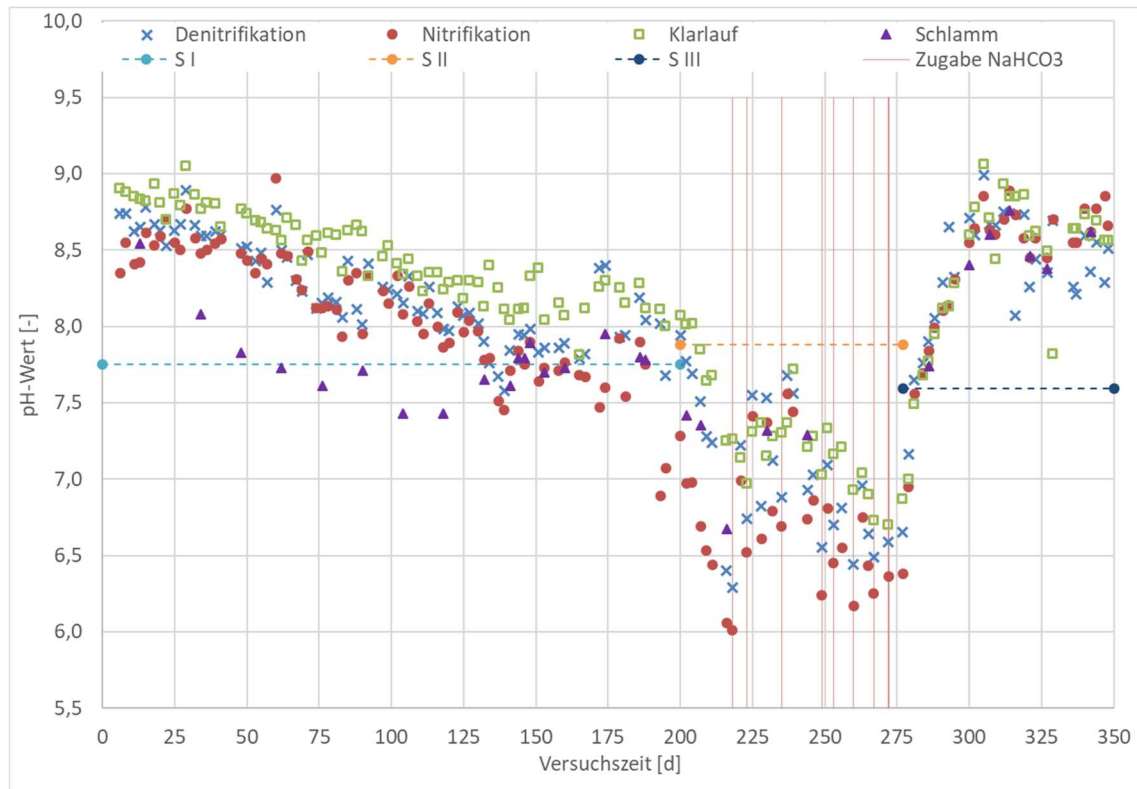


Abbildung 7: pH-Wert in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III; NaHCO_3 , Natriumhydrogencarbonat

Abbildung 8 zeigt, dass der TS-Gehalt in den Prozessstufen während Versuchsphase I (bis Versuchstag 200) Denitrifikation (2,5 – 3,5 %), Nitrifikation (2,5 – 3,5 %) und im Klarlauf (1,5 – 2 %) im Vergleich zum Substrat verringert wurde. Der Überschussschlamm, der sich in der Nachklärung absetzt, hatte einen vergleichsweise höheren TS-Gehalt von 5 – 7 %. Während der Verwendung von Substratcharge II (ab Versuchstag 201) war bedingt durch den gehemmten biologischen Klärprozess auch der TS-Abbau verschlechtert, was zu höheren TS-Gehalten in den Prozessstufen führte. Technische Störungen (Verstopfungen in Schlammrückführung und interner Zirkulation zwischen Nitrifikation und Denitrifikation, Übersäumen Nitrifikation) bewirkten zusätzliche Schwankungen im TS-Gehalt in den Versuchsphasen II und III (ab Versuchstag 201). Der oTS-Gehalt im Substrat und den Prozessstufen ist Abbildung 9 zu entnehmen. Im Vergleich zum Substrat wurde der oTS-Gehalt in den Prozessstufen abgereichert. Im Klarlauf war der oTS-Gehalt am geringsten (durchschnittlich 20 %TS), im Überschussschlamm am höchsten (55 – 60 %TS). Der CSB-Gehalt wurde im Vergleich zum Substrat in allen Prozessstufen deutlich reduziert (Abbildung 10). Das bedeutet, dass die Organik, die über das Substrat eingetragen wurde, im Klärprozess abgebaut wurde. Während Versuchsphase III (ab Versuchstag 275) war der Organik-Abbau auf Grund der oben genannten technischen Störungen leicht gehemmt bzw. die Probenahme auf Grund aufgetretener Schwimmschichten nicht repräsentativ.

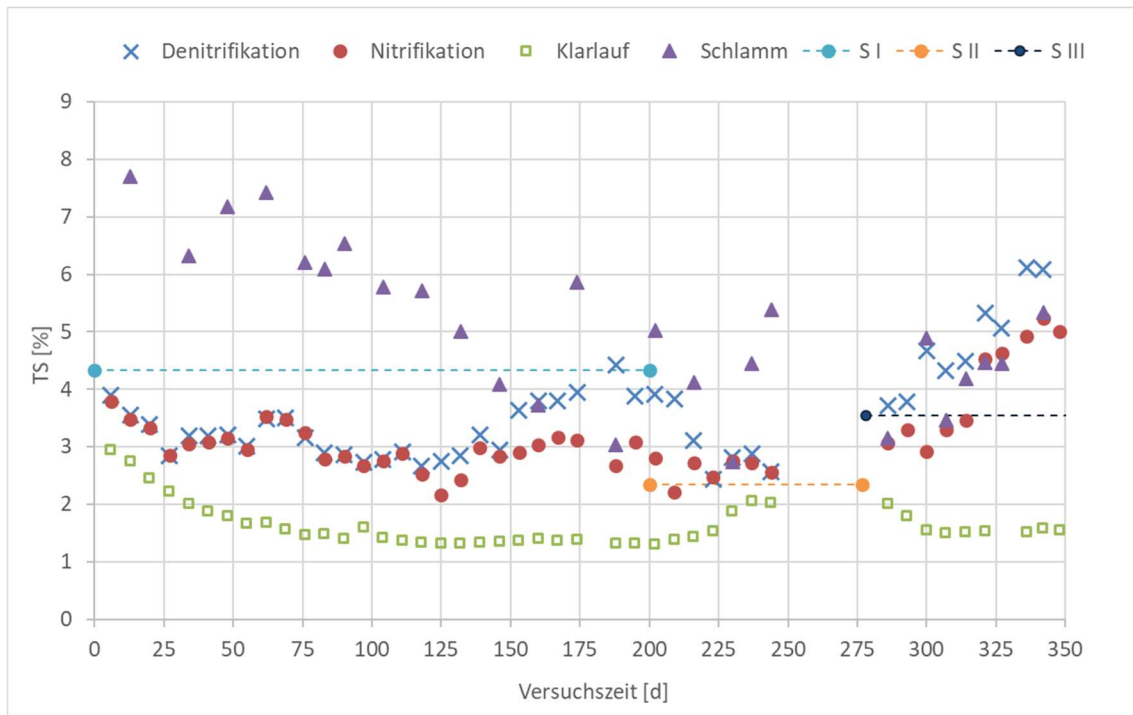


Abbildung 8: TS-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III

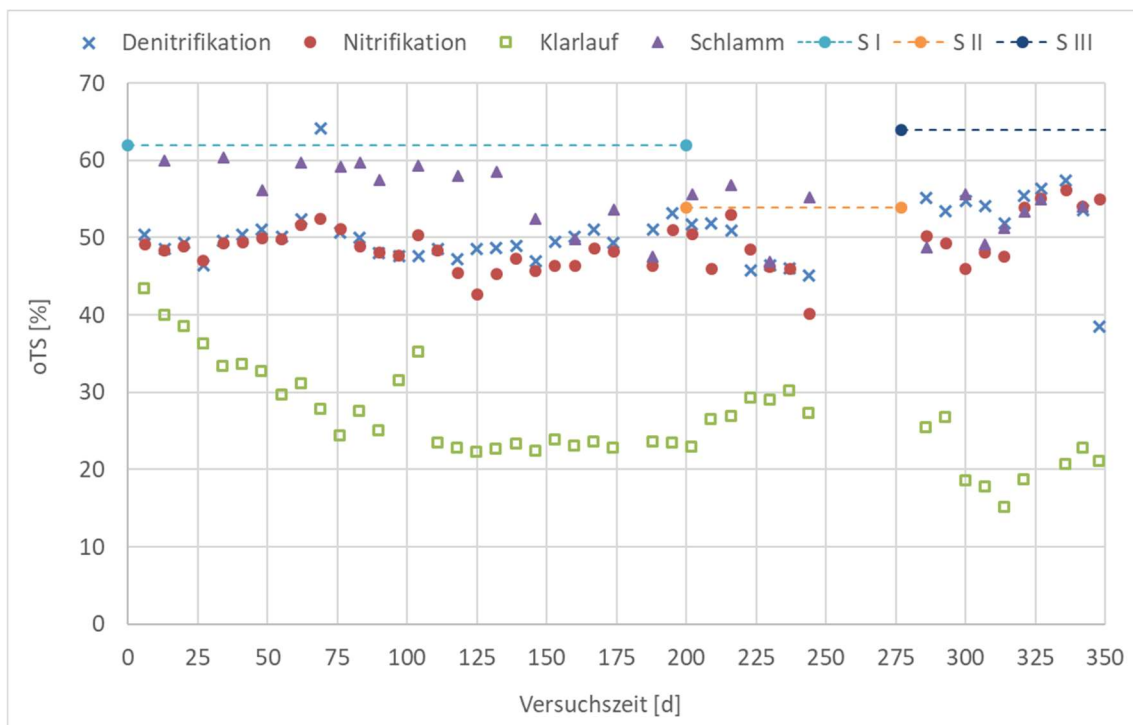


Abbildung 9: oTS-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III

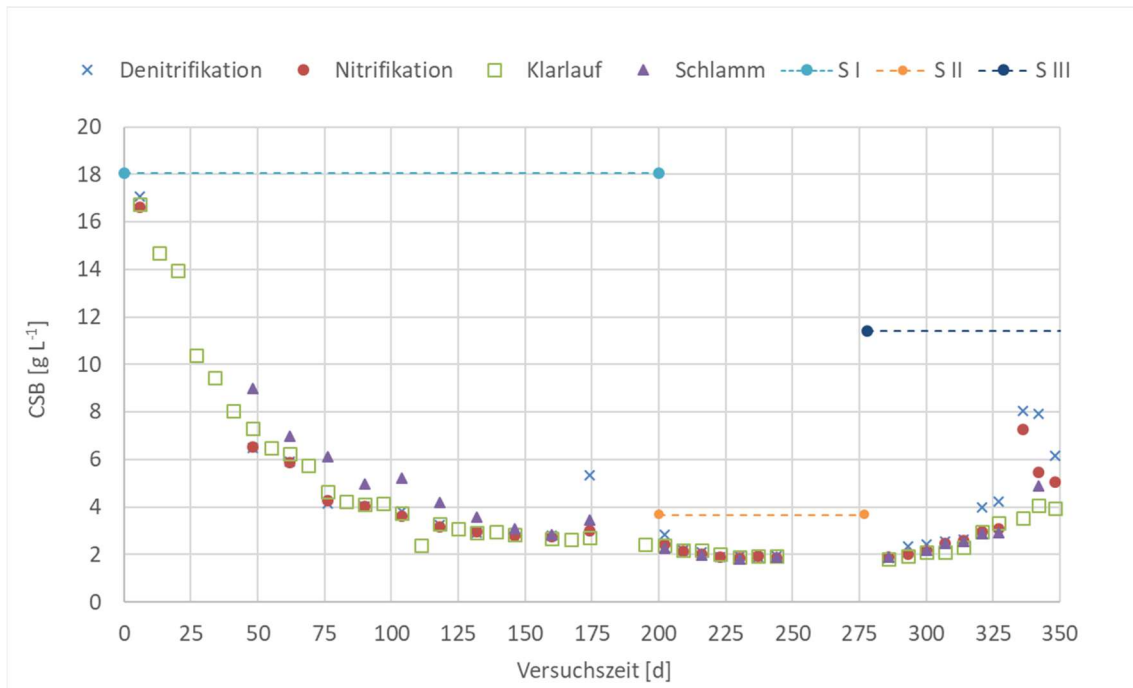


Abbildung 10: CSB-Gehalt in den einzelnen Prozessstufen während der Güllebehandlung an der Laborkläranlage. Der Inhalt der Nachklärung unterteilt sich in Klarlauf und Schlamm. S, Substratcharge I – III

Während der Behandlung von Schweinegülle durch die Laborkläranlage wurde der Ammoniumstickstoff-Gehalt bis zu 99 %, der Gesamtstickstoff-Gehalt bis zu 83 % reduziert. Eine Hemmung der Denitrifikation kann dazu führen, dass Stickstoff in Form von Nitrat liegen bleibt. Für einen späteren Einsatz von Klarlauf oder Überschussschlamm im Biogasprozess ist das nicht nachteilig. Im Biogasprozess wird unter anaeroben Bedingungen Nitrat und Nitrit sofort wieder zu Ammonium reduziert, so dass die eigentliche Ammoniumstickstoff-Entfernung niedriger ausfällt. Laut Sheng et al. wirkt sich Nitrat bis zu einer Konzentration von $1,5 \text{ g L}^{-1}$ sogar positiv auf den Biogasprozess aus [22]. Ob es sinnvoll ist die aerobe der anaeroben Behandlung voranzustellen, sollte durch die Untersuchung des Methanpotenzials der einzelnen Stoffströme ermittelt werden (2.2.2).

2.2.2 Batchversuche

Um die wirtschaftlich sinnvollste Anordnung der Prozesskomponenten aerobe und anaerobe Schweinegülle-Behandlung zu ermitteln, werden die Methanpotenziale der einzelnen Stoffströme (Substrat unsepariert, separierter Feststoff, Klarlauf und Überschussschlamm) in Batch-Versuchen bestimmt. Dazu erfolgen Versuchsansätze im AMPTS (Automatic Methane Potential Test System) unter Verwendung der VDI 4630 (2016) [27]. Die ermittelten Methanpotenziale aus Versuchsphase I (Verwendung von Substratcharge I und III) sind Abbildung 11 zu entnehmen. Der spezifische Methanertrag in abgetrenntem Feststoff und Überschussschlamm ist niedriger im Vergleich zum Ausgangssubstrat. Für den Klarlauf ist kein Methanertrag messbar. Die Ergebnisse aus dem Betrieb der Laborkläranlage und den Batch-Versuchen dienen als Grundlage für eine Stickstoff- und Massenbilanz, die in Kapitel 2.3 erläutert wird.

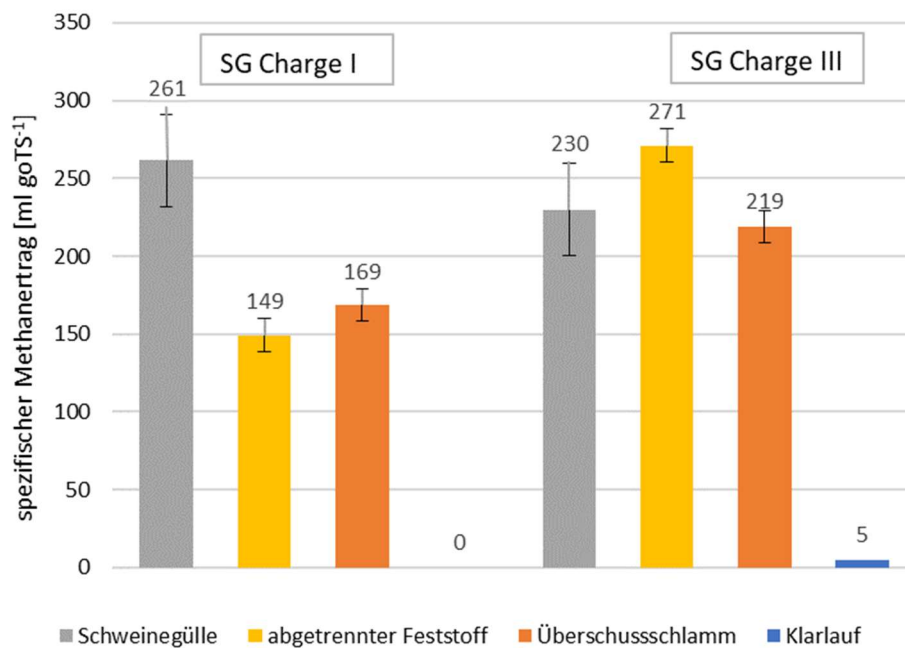


Abbildung 11: Spezifischer Methanertrag der Schweinegülle und der Stoffströme aus der Schweinegülle-Behandlung (SG, Schweinegülle Charge I und III) mittels Laborkläranlage.

2.2.3 Hefekultivierung

Im Rahmen von AP 3 wurde neben der aeroben Stickstoffreduzierung (mittels Nitrifikation/Denitrifikation) im Labormaßstab auch die Gewinnung von Hefe und bakterieller Biomasse aus Gülle untersucht. Die Auswahl der Hefen und Kultivierungstechniken erfolgte basierend auf Rechercheergebnissen aus AP 2 [33]. Zunächst erfolgten Wachstumsversuche der Hefestämme *Metschnikowia pulcherrima* Me-0118 (DSM 70879), *Pichia membranifaciens* Y1 (DSM 21959), *Cyberlindnera jadinii* (DSM 2361), *Pichia jadinii* Ca-3308 (DSM 70163) und dem Bakterium *Bacillus subtilis* F (DSM 7) in Schüttelkolben (Batch, Doppelbestimmung), um die optimalen Wachstumsbedingungen und Konsortien-Zusammensetzungen, bei denen die höchste Proteinausbeute erzielt wird, zu ermitteln. Als Vorkultur wurden die Hefestämme auf YPD-Medium (yeast extract peptone dextrose) und das Bakterium auf LB-Medium (Luria-Bertani-Medium) angezogen. Die zu betrachtenden Prozessparameter waren: pH-Wert, Trockensubstanz (TS), Ammoniumstickstoff-Gehalt ($\text{NH}_4\text{-N}$), Gehalt flüchtiger organischer Säuren (FOS), Acetat-Gehalt, Kjeldahl-Stickstoff (TKN). Die Bestimmung dieser Parameter erfolgte wie in Liebetrau et al. (2015) beschrieben [20]. Zur Beurteilung des Wachstums wurden die Parameter FOS-Gehalt und Acetat, für die Bewertung des Proteinaufbaus der $\text{NH}_4\text{-N}$ Umsatz betrachtet. Tabelle 6 sind der Versuchsaufbau und die getesteten Konsortienkombinationen zu entnehmen.

Tabelle 6: Versuchsaufbau und Konsortienkombinationen für die Hefekultivierung auf unterschiedlichen Substraten

Exp.	Ansatz	Substrat	Stammbezeichnung				
			Me-0118	Y1	DSM 2361	Ca-3308	F
V1	S1	Schweinegülle	Kontrollansatz				
	S2	gesiebt	x				
	S3	pH 6,5		x			
	S4				x		
	S5					x	
	S6						x
V2	S1	Schweinegülle	Kontrollansatz				
	S2	autoklaviert	x				
	S3	pH 6,5		x			
	S4						x
	S5		x				x
	S6			x			x
V6	S1	Schweinegülle	Kontrollansatz				
	S2	gesiebt	x				
	S3	autoklaviert		x			
	S4	pH > 9			x		
	S5					x	
	S6						x
V7	S1	Basalmedium ¹	Kontrollansatz				
	S2	mit Glucose	x				
	S3				x		
	S4					x	
	S5						x

¹ Basalmedium: Vorschrift für 1 L Wasser, pH-Wert 4,8 - 5

Makroelemente	g L ⁻¹	Spurenelemente	g L ⁻¹
Na ₂ HPO ₄	0,645	Fe(III)Cl ₃ * 6H ₂ O	2,42E-03
KH ₂ PO ₄	6,425	Mn(II)Cl ₂ * 4H ₂ O	5,40E-04
MgSO ₄ * 7H ₂ O	1,09	ZnCl ₂	2,10E-04
Ca(NO ₃) ₂ * 4H ₂ O	0	(NH ₄) ₂ MoO ₄	4,85E-06
Glucose	25	Co(II)Cl ₂ * 6H ₂ O	3,65E-06
Hefeextrakt	1		
Acetat	1		
Harnstoff	2,06		

Aus Abbildung 12 geht hervor, dass bei der Verwendung von unsteriler Schweinegülle (siehe V1) auch Mikroorganismen wachsen, die bereits im Ausgangssubstrat vorhanden sind. Hier fand auch im Kontrollansatz Zugabe eines Hefestamms (V1, S1) ein mit den übrigen Ansätzen vergleichbarer FOS-Abbau (von 2,8 auf 0,44 g L⁻¹) statt. Beim Ansatz mit *M. pulcherrima* (V1, S2) war der FOS-Abbau (von 2,8 auf 0,40 g L⁻¹) und auch der NH₄-N-Umsatz (von 1,5 auf 0,7 g L⁻¹) etwas höher als bei der Kontrolle ohne Hefezusatz (Abbildung 13). Im Versuchsansatz V1 wurde bei allen Ansätzen Acetat nahezu

vollständig abgebaut (Abbildung 14). Bei autoklavierter Schweinegülle (Behandlung mittels Dampfsterilisation) zeigte sich eine deutlich geringere Aktivität bei allen Ansätzen (V2, Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14). Der FOS-Abbau lag hier bei maximal 14 % bei *P. membranefaciens* (V2, S3: von 12,9 auf 11,2 g L⁻¹). Bei der Fermentation mit *M. pulcherrima* wurde eine Verbesserung durch Co-Kultivierung mit *B. subtilis* (V2, S5) erzielt. Dies zeigte sich sowohl im FOS-Abbau (Steigerung Abbauaktivität von 3 auf 12 %) als auch beim Acetat-Abbau (Steigerung Abbauaktivität von 10 auf 22 %) (Abbildung 12, Abbildung 14). In den Versuchsansätzen V1 und V2 wurde durch Zugabe von Acetat der pH-Wert in der Gülle auf 6,5 eingestellt, da die Hefen ihr Wachstumsoptimum eher im sauren Bereich haben. Bei der autoklavierten Schweinegülle war eine große Menge Acetat (ca. 7 g) nötig, um diesen pH-Wert zu erreichen. Acetat-Mengen ab 8 g L⁻¹ können allerdings bereits das Wachstum der verwendeten Hefestämme hemmen (Wendlandt et al., 1987). Bei weiteren Versuchsansätzen (hier gezeigt V6) wurde der pH-Wert der autoklavierten Schweinegülle nicht gesenkt. Allerdings war in diesem Ansatz fast keine Aktivität (FOS-Abbau, NH₄-N-Umsatz, Acetat-Abbau) nachweisbar (Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14). Ursächlich dafür war wahrscheinlich der hohe pH-Wert. Schließlich wurde im Versuchsansatz V7 anstelle der Schweinegülle ein Basalmedium (Nährsalze, Hefeextrakt, Glucose und Acetat als Kohlenstoff-Quelle) eingesetzt. Hier wurde bei allen Ansätzen, ausgenommen *B. subtilis* (V7, S5) die Glucose vollständig umgesetzt (nicht gezeigt). Der FOS-Abbau war am höchsten bei *M. pulcherrima* (von 1,4 auf 0,9 g L⁻¹) (V7, S2; Abbildung 12). Den höchsten NH₄-N-Umsatz zeigte der Ansatz mit *C. jadinii* (V7, S3: von 0,23 auf 0,15 g L⁻¹) (Abbildung 13). Bei den Ansätzen mit *B. subtilis* (beispielsweise V7, S5) wurde unter Einsatz von Basalmedium (Glucose, Acetat und Hefeextrakt als C-Quelle) eher Säure- und Acetat-Bildung als Abbau festgestellt (Zunahme im FOS-Gehalt von 1,37 auf 2,83 g L⁻¹, Abbildung 12; Zunahme im Acetat-Gehalt von 1,29 auf 3,08 g L⁻¹, Abbildung 14). Diese Eigenschaft könnte sich positiv bei einer Co-Kultivierung der Hefen mit *B. subtilis* auswirken. Für V7 wurden TKN- und Proteingehalt untersucht (Abbildung 15). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Ansätze mit *M. pulcherrima* (V7, S2), *C. jadinii* (V7, S3) und *P. jadinii* (V7, S4) Protein gebildet haben (Zunahme Proteingehalt von 138 g kg TS⁻¹ auf 347 bis 398 g kg TS⁻¹).

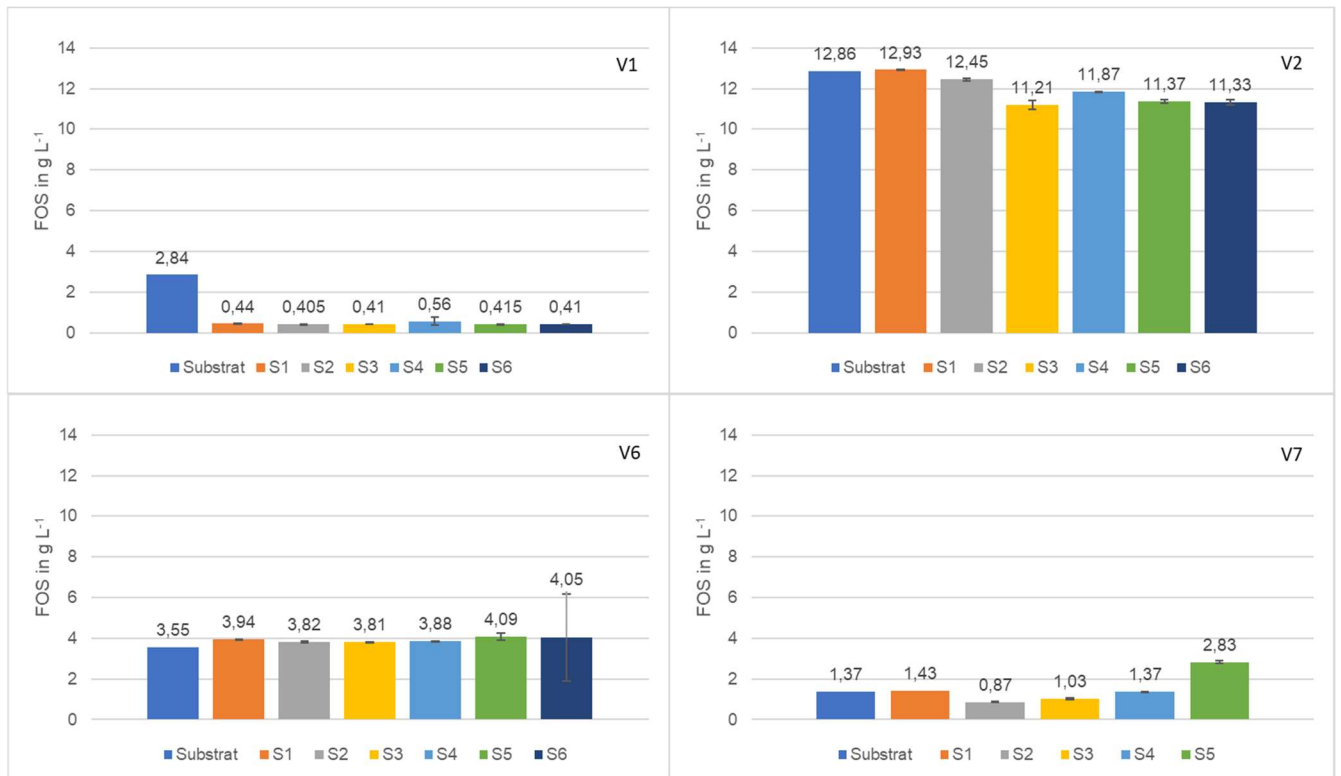


Abbildung 12: FOS-Gehalt in den Versuchsansätzen V1, V2, V6 und V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.)

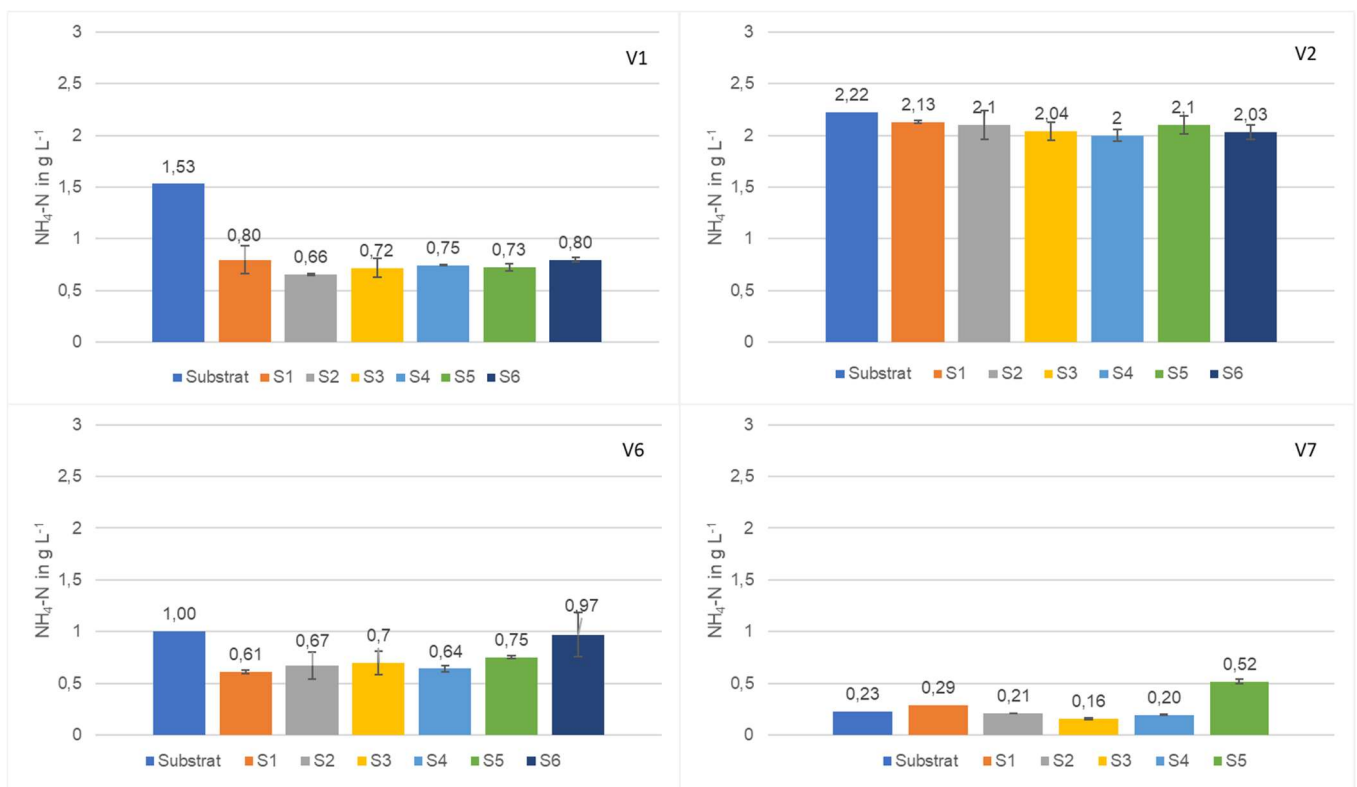


Abbildung 13: Ammoniumstickstoff-Gehalt in den Versuchsansätzen V1, V2, V6 und V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.)

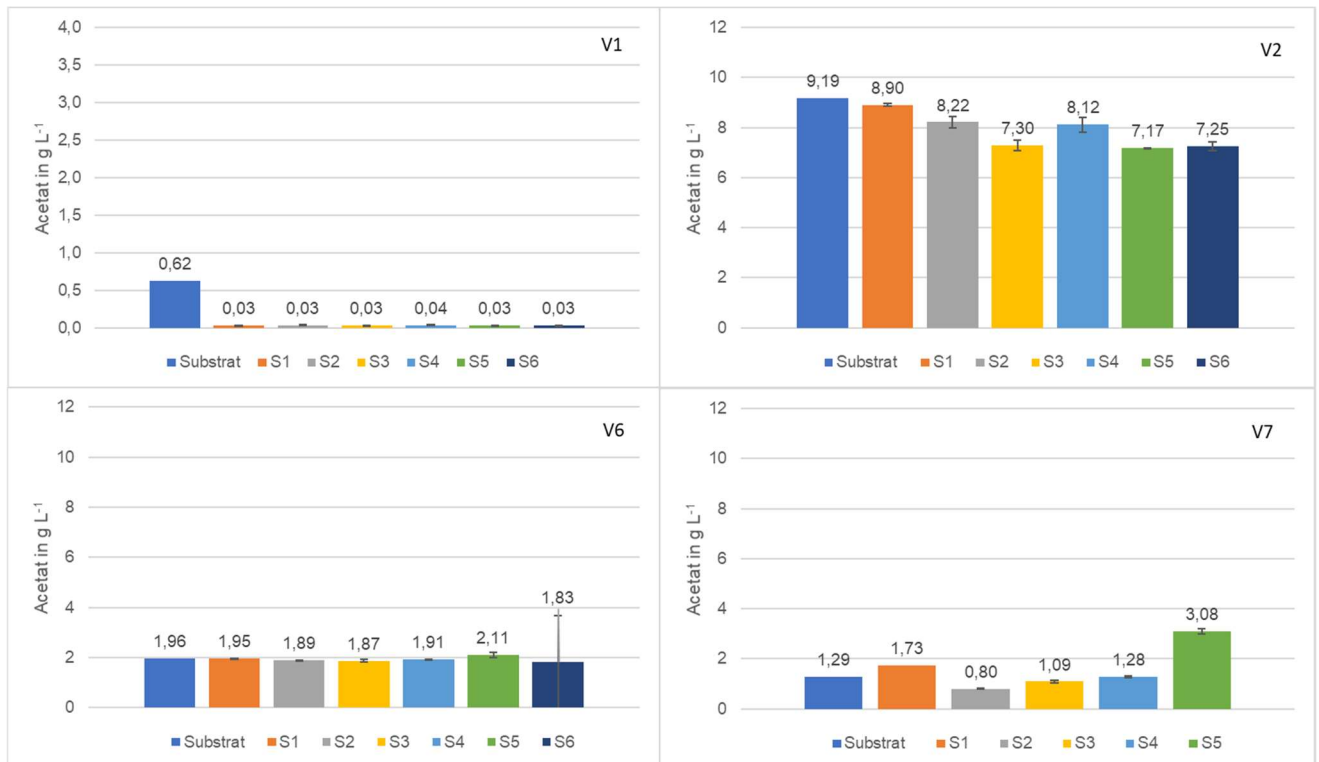


Abbildung 14: Acetat-Gehalt in den Versuchsansätzen V1, V2, V6 und V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.)

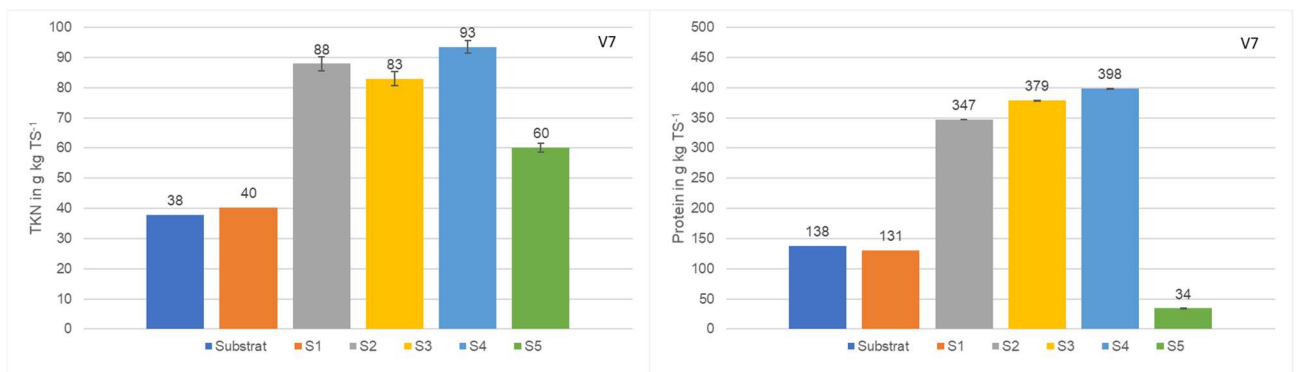


Abbildung 15: TKN- und Protein-Gehalt in Versuchsansatz V7 (Substratbeschaffenheit und Konsortienzusammensetzung ist Tabelle 6 zu entnehmen.)

Im Ergebnis dieser Voruntersuchungen wurde ein Hefestamm (*M. pulcherrima* Me-0118) für die weiterführende Kultivierung auf Schweinegülle im kontinuierlichen Verfahren ausgewählt. Diese erfolgte in einem 1,6 L Reaktor mit gesiebter Schweinegülle als Substrat. Der Reaktor wurde kontinuierlich belüftet mit einem Volumenstrom von 50 L min⁻¹. Die eingestellten Prozessparameter für die jeweiligen Versuchsansätze sind Tabelle 7 zu entnehmen. Die Vorkultivierung von *M. pulcherrima* und *B. subtilis* erfolgte auf YPD Medium. Zur Beurteilung des Wachstums und für die Bewertung des Proteinaufbaus wurden folgende Prozessparameter aufgenommen: pH-Wert, TS-Gehalt, Ammoniumstickstoff-Gehalt, FOS-Gehalt, Acetat-Gehalt, TKN-Gehalt, Rohprotein-Gehalt. Die Bestimmung dieser Parameter erfolgte wie in Liebetrau et al. (2015) beschrieben.

Tabelle 7: Prozessparameter für die kontinuierliche Fermentation von *M. pulcherrima* Me-0118 (DSM 70879) auf gesiebter Schweinegülle

Exp.	Startsubstrat	HRT [d]	OLR [g oTS L d ⁻¹]	Inokulum
I	Schweinegülle	9,6	1,9	<i>M. pulcherrima</i>
II	YPD	9,6	1,7	<i>M. pulcherrima</i>
III	YPD	5,8	1	<i>M. pulcherrima</i>
IV	YPD	5,8	1	<i>M. pulcherrima</i> + <i>B. subtilis</i>

Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, wird bei allen Versuchsansätzen zur kontinuierlichen Fermentation von *M. pulcherrima* auf Schweinegülle Acetat nahezu vollständig abgebaut. Die hohen Acetat-Konzentrationen (über dem Niveau der Schweinegülle) von Exp. II, III und IV zu Versuchsbeginn sind durch den Versuchsstart auf Komplexmedium zu erklären. Bei Exp. IV (Co-Kultivierung mit *B. subtilis*) erfolgte schon während der Phase der Substratzugabe ein relativ starker Acetat-Abbau bis auf Konzentrationen $< 0,1 \text{ g L}^{-1}$. Während bei Exp. III (nur *M. pulcherrima*) erst nach Aussetzen der täglichen Substratzugabe ein deutlicherer Abbau sichtbar war. Bei Exp. IV war die deutlichste $\text{NH}_4\text{-N}$ -Reduzierung von 2,9 auf $1,1 \text{ g L}^{-1}$ messbar (Abbildung 17). Dies war der einzige Versuchsansatz, bei dem ein relativ geringer Anstieg im Rohproteingehalt von 1,8 auf $6,2 \text{ g L}^{-1}$ festgestellt wurde (Abbildung 15).

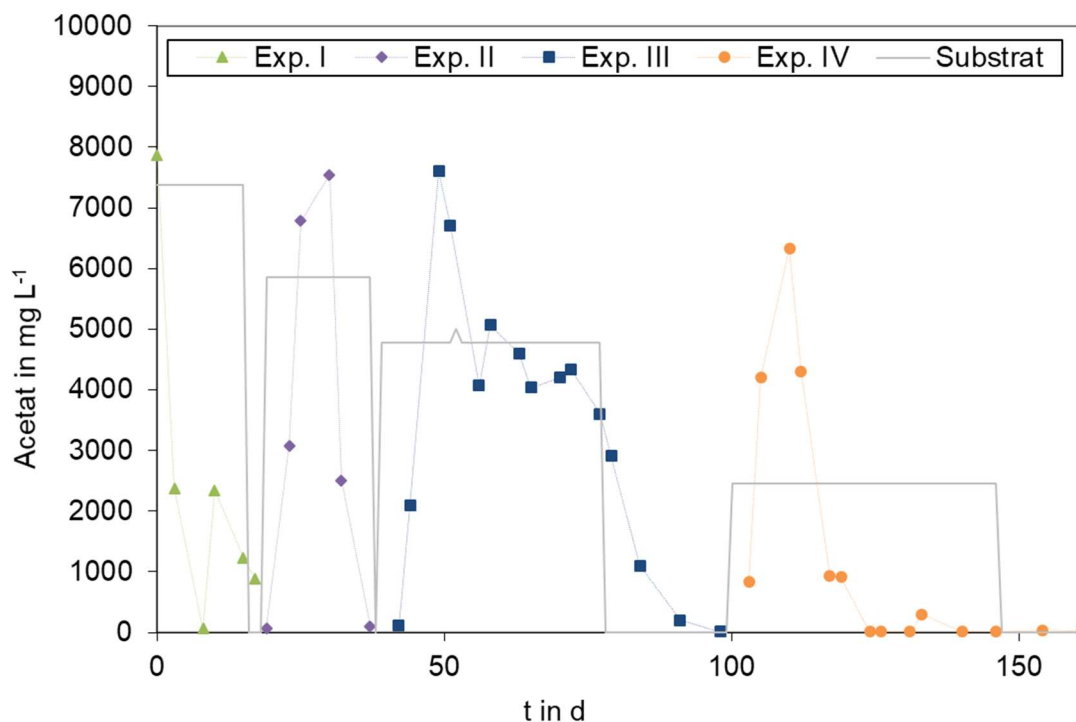


Abbildung 16: Acetat-Gehalt in Experiment I bis IV sowie im Substrat (Die eingestellten Prozessparameter sind Tabelle 7 zu entnehmen.)

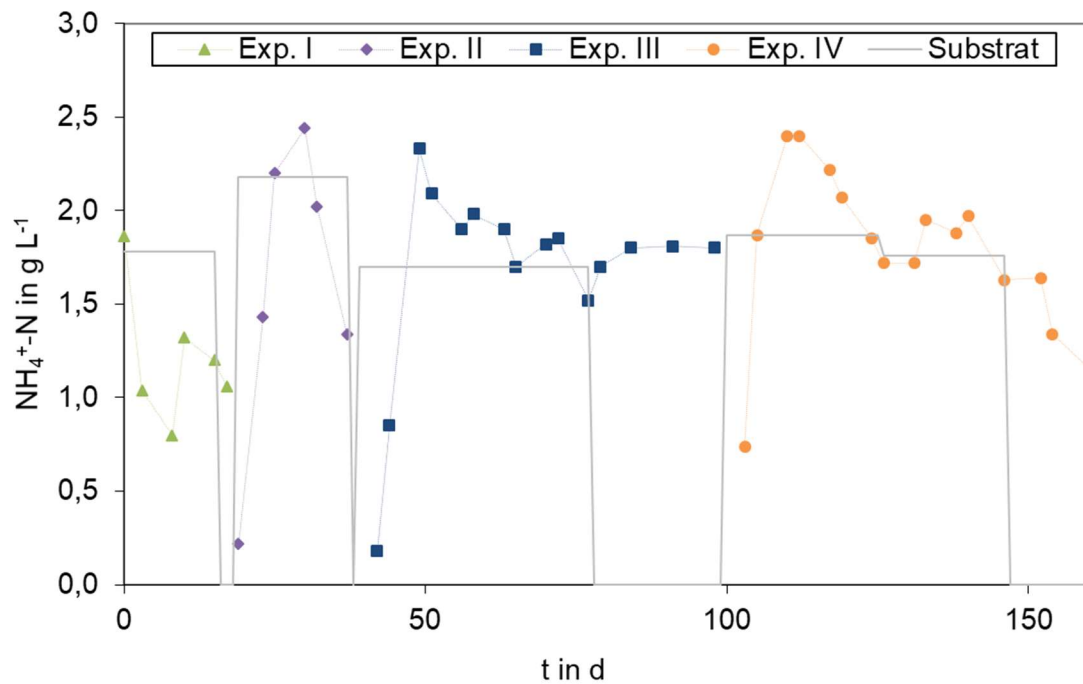


Abbildung 17: Ammoniumstickstoff-Gehalt in Experiment I bis IV sowie im Substrat (Die eingestellten Prozessparameter sind Tabelle 7 zu entnehmen.)

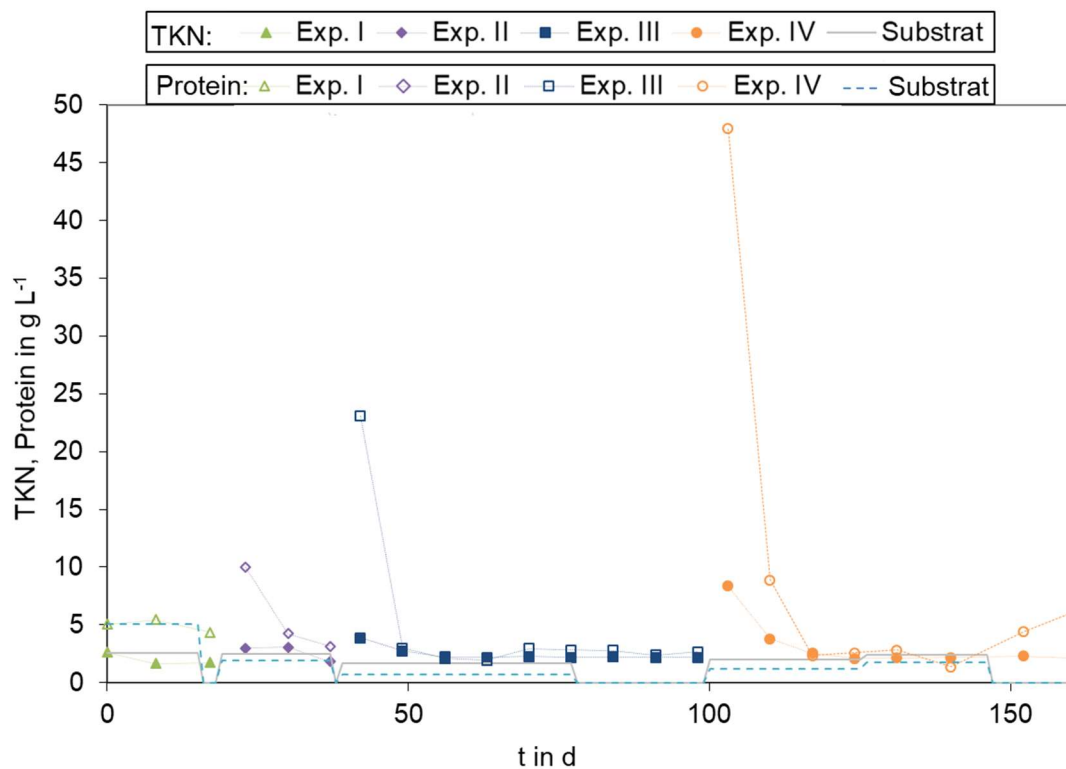


Abbildung 18: TKN- und Protein-Gehalt in Experiment I bis IV sowie im Substrat (Die eingestellten Prozessparameter sind Tabelle 7 zu entnehmen.)

Zusammenfassend wirkte sich die Co-Kultivierung von *M. pulcherrima* und *B. subtilis* bei der kontinuierlichen Kultivierung auf Schweinegülle positiv auf den NH₄-N Umsatz und die Bindung von

Stickstoff in Biomasse aus. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um diesen Ansatz zu verstärken bzw. die Proteinausbeute zu erhöhen und das gewonnene Mikrobenprotein so einer möglichen Nutzung zuzuführen. Ein maßgebendes Hindernis bei der Kultivierung der Hefen auf Schweinegülle war die Überlagerung durch andere Mikroorganismen in der Schweinegülle. Es war deshalb noch zu verfrüht, das Verfahren in den Pilotmaßstab zu überführen.

2.2.4 Simultane Nitrifikation und Denitrifikation im Labormaßstab

Bei diesem Verfahren werden die Teilschritte Nitrifikation und Denitrifikation sowie die Nachklärung in einem Becken ausgeführt. Im Unterschied zum bekannteren SBR (Sequencing Batch Reactor), laufen die Prozesse aber nicht nacheinander, sondern simultan in einer sogenannten Multikaskade ab (Abbildung 19).

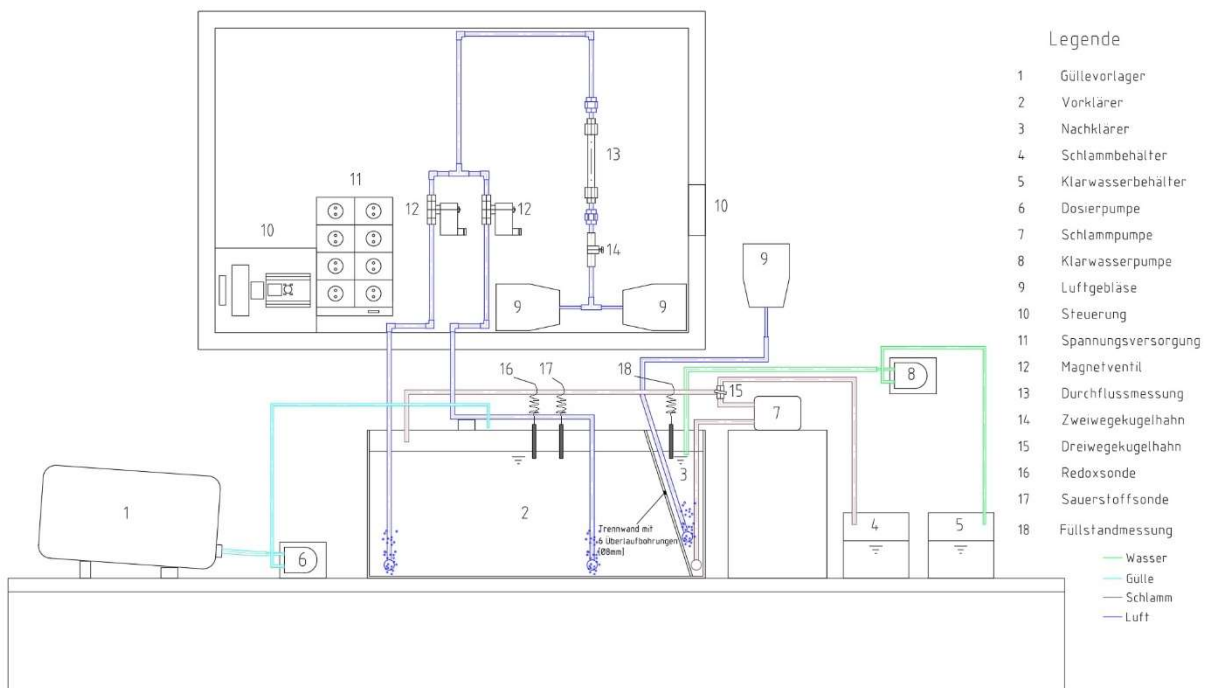


Abbildung 19: Schematischer Aufbau der Laboranlage für die simultane Nitrifikation / Denitrifikation

Die Laboranlage wurde so ausgelegt, dass alle Verfahrensschritte (Nitrifikation, Denitrifikation und Nachklärung) in einem Becken ablaufen können. Die hydraulische Verweilzeit im Gesamtsystem beträgt 20 d. Eine Abschätzung des Schlammalters ist gegenwärtig schlecht möglich, da das Abscheideverhalten des Schwerkraftklärers substratbedingt schlecht ist (geringes Absetzverhalten). In der abgeteilten Belüftungszone des Beckens sind zwei keramische Belüfter angeordnet, die alternierend betrieben werden und so jeweils oxische- und anoxische Zonen ausbilden. In der belüfteten (oxischen) Zone wird daher, neben dem Abbau organischer Kohlenstoffverbindungen, Ammonium (NH_4) oxidiert. In den unbelüfteten (anoxischen) Zonen erfolgt durch die starke Sauerstoffzehrung eine Denitrifikation. Durch periodisches Umschalten (Alternieren) der belüfteten und unbelüfteten Zonen werden viele Nitrifikations- und Denitrifikationsschritte nacheinander ausgeführt (Multikaskade). Über eine Mini-SPS werden die Substrat- und Belüftungszyklen gesteuert. Da Schweinegülle in der näheren Umgebung nicht verfügbar ist, wurde für die Versuche Rindergülle und ausgegorenes Substrat einer Biogasanlage verwendet. Diese Einsatzstoffe kommen in ihrer Stickstoffkonzentration und dem Kohlenstoff-Stickstoffverhältnis der

Schweinegülle nahe (Tabelle 8). Das Originalsubstrat wird vor der Verwendung in der Laboranlage 1:2 mit Wasser verdünnt. Inputsubstrat und Ablauf der Laboranlage wurden regelmäßig im eigenen Labor und in größeren Abständen vom Labor des Projektpartners DBFZ analysiert.

Tabelle 8: Analyseergebnisse des DBFZ zum Input (nach Verdünnung 1:1) in die Laboranlage

Datum	TS[%]	oTS[%]	pH	CSB[g/l]	NO ₃ -N[mg/l]	NH ₄ -N[g/l]
26.10.2022	4,2	63,8	8,0	19,2		1,4
23.02.2023	4,3	63,9	7,8	15,0	8,8	0,8

Die Stickstoffwerte (NH₄-N Zulauf und Ablauf sowie die NO₃-NAblauf) wurden wöchentlich im eigenen Labor mittels photometrischer Messung analysiert. In den folgenden Diagrammen werden die Analysen und Messwerte der bisherigen Versuche dargestellt (Abbildung 20 und Abbildung 21).

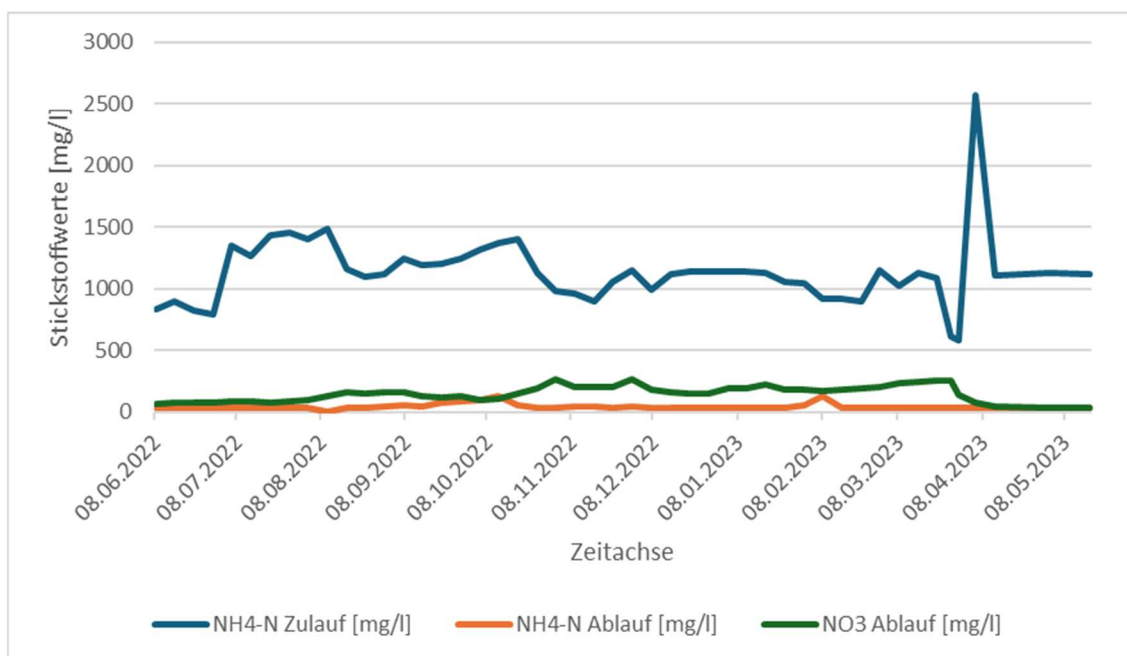


Abbildung 20: Ammoniumwerte für Zu- und Ablauf der Anlage sowie Nitratwerte im Ablauf

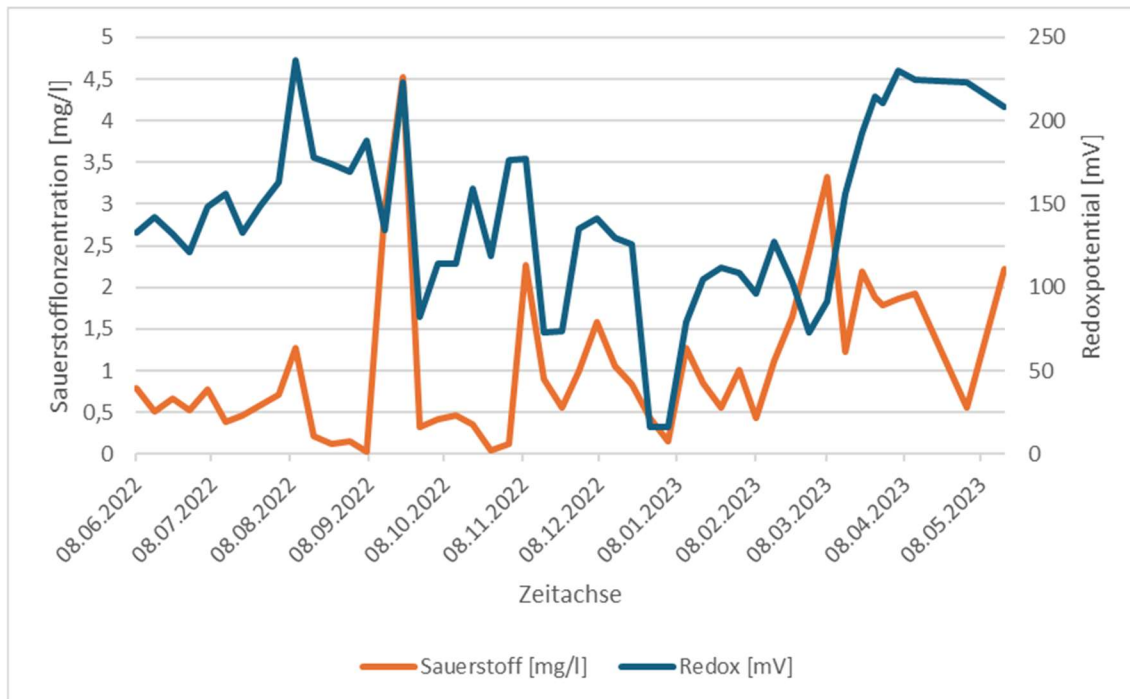


Abbildung 21: Sauerstoff und Redoxpotential der Anlage

Aus den Analysen und Verläufen ist klar zu erkennen, dass die Laboranlage sehr stabil und robust Ammonium zu Nitrat oxidiert und das Nitrat größtenteils durch Denitrifikation in Stickstoff (N_2) umwandelt. Der Abbau von Ammoniumstickstoff liegt im Durchschnitt bei 96.3 %. Gegenüber der im Labormaßstab DBFZ durchgeführten Versuche zur aeroben Güllebehandlung mit Kaskadenschaltung ist die simultane Betriebsführung energiesparsamer (Notwendigkeit einer gleichmäßigen Temperatur von mind. 20 °C der Denitrifikation) und wurde daher für die Auslegung in den technischen Maßstab zu Grunde gelegt (2.5.1).

2.3 AP 4: Entwicklung eines modularen Konzeptes zur optimalen Kombination von aerober und anaerober Güllebehandlung

Auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden Stickstoff- und Massenbilanzen erstellt und für die Konzeptentwicklung zur optimalen Kombination aerober und anaerober Güllebehandlung genutzt. Dieses Konzept wurde an der Pilotanlage umgesetzt (2.4). Die Ergebnisse aus dem Pilotversuch wurden wiederum genutzt, um die Bilanz zu aktualisieren und auf einen technischen Maßstab zu übertragen (2.5).

2.3.1 Vorgehensweise bei der Bilanzierung der anaeroben Vergärung

Bei der Erstellung der Massenbilanzen zu den Anlagen im Labor- und Pilot- und Praxismaßstab wurde wie folgt vorgegangen:

1. Aufnahme eines Verfahrensfließbildes der BGA
2. Ermittlung aller relevanten Daten zur Anlage (Reaktorvolumina, BHKW-Leistung, Methanaufbereitung,...) und Prozessführung, idealerweise Einsicht in Betriebstagebuch
3. Ermittlung von Daten zu den Substraten und Gärresten, wann und wie lange wurden welche Substrate mit welcher Qualität eingesetzt

4. Festlegung der Probenahmestellen, Beprobung, Analyse und Auswertung der gesammelten Proben
5. Vereinfachung des Verfahrensfließbildes zum Massenbilanzierungstool, Zusammenfassung von Anlagenkomponenten, Grundlage des Massenbilanzierungstools: Methodenhandbuch [20]
6. Ermittlung des Biogasertrages auf Basis des Biogaspotentials der einzelnen Substrate bzw. Anpassung der Potentiale bei Validierung der einzelnen BGA
7. Parametereingabe in das Massenbilanzierungstool, Abschätzung nicht messbarer Parameter und Startwerte anhand von Erfahrungswerten
7. Konvergenzkontrolle, ggf. sequenzielle Berechnung (erforderlich bei Kreislaufprozessen)
8. Validierung der Massenbilanz, Anpassung bestimmter Prozessparameter an gemessene Werte (z. B. Parameter der Separation)

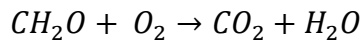
Erste Berechnungen zur Bilanzierung der Pilotbiogasanlage zeigten, dass bei Verwendung der im Batchversuch gewonnenen Biogaspotenziale der Gasertrag der kontinuierlich betriebenen Pilotanlage zu hoch berechnet wurde. Es wurden deshalb aus den Batchversuchen die kinetischen Parameter der Biogasbildung bestimmt. Über das Modell eines kontinuierlichen Reaktors konnten dann der Realität näherkommende Biogaserträge bei der eingestellten Verweilzeit für die einzelnen Substrate errechnet werden. Die für die Bilanzierung der 500 kW Anlage verwendeten Biogaserträge basieren auf Literaturwerten [16].

2.3.2 Massenbilanz für Stickstoffentfernung nach dem Prinzip der Nitrifikation/ Denitrifikation

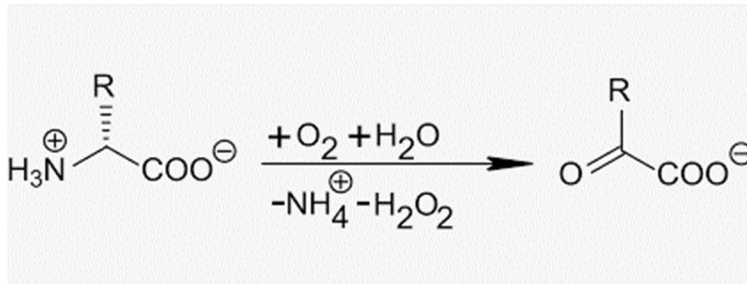
Dieses Bilanzierungstool erforderte zusätzliche Komponenten zur Bilanzierung von Nitrit- und Nitratstickstoff sowie des organisch gebundenen Stickstoffs (TKN), auch unter der Annahme, dass Nitrit- und Nitratstickstoff im anaeroben Milieu der BGA sofort wieder zu Ammoniumstickstoff reduziert werden. Für die Massenbilanzierung der Nitrifikation/ Denitrifikation wurden folgende Stoffwechselprozesse berücksichtigt:

- oTS Oxidation zu CO_2 und Wasser
- Desaminierung (Abspaltung einer Aminogruppe), Freisetzung Ammoniumstickstoff
- Nitrifikation (Nitritation): Oxidation von Ammoniumstickstoff zu Nitritstickstoff
- Nitrifikation (Nitratation): Oxidation von Nitritstickstoff zu Nitratstickstoff
- Denitrifikation: Reduktion von Nitratstickstoff zu N_2

Der Abbau organischer Substanz zu CO_2 und Ammoniumstickstoff durch oTS Oxidation und Desaminierung findet bei der Bilanzierung von Kläranlagen kaum Berücksichtigung. Jedoch reicht der Umsatz von Ammoniumstickstoff und oTS in der Nitrifikation/ Denitrifikation ggf. nicht aus, um den gemessenen Umsatz dieser beiden Stoffgruppen abzubilden. Organische Substanz wird parallel durch Oxidation und Desaminierung zersetzt. Aus bilanztechnischen Gründen wurde dieser Prozess der Nitrifikation/ Denitrifikation vorgeschaltet. Die oTS-Oxidation wurde entsprechend Formel 1 bilanziert. Der notwendige Sauerstoff und das gebildete Wasser findet in der Gesamtbilanz Berücksichtigung. Der Abbau der stickstoffhaltigen, organischen Substanz erfolgt nach dem Prinzip der Desaminierung, dabei wird ein Ammonium-Ion abgespalten (Formel 2). Die Modellierung aller Stoffwandlungsprozesse erfolgte als Reaktion nullter Ordnung. Die Umsätze der einzelnen Prozesse wurden auf Basis der mittels Laborkläranlage ermittelten Daten (2.2.1) durch Parameteranpassung validiert.



Formel 1 [15]



Formel 2 [28]

2.3.3 Modulares Konzept zur kombinierten aeroben und anaeroben Güllebehandlung

Auf Basis der Bilanzierung wurden verschiedene Varianten der Einbindung der Anaerobstufe (vor oder nach Stickstoffreduzierung) miteinander verglichen. Dabei stand sowohl die Energiebilanz der Kombinationslösung beider Systeme (anaerob und aerob) im Vordergrund, als auch die Nährstoffkonzentrationen im Verhältnis zum verfügbaren Kohlenstoff. Ziel war die Bewertung beider Konzepte hinsichtlich der Biogasgewinnung, Stickstoffreduzierung und Biomassegewinnung.

Abbildung 22 zeigt, basierend auf den Ergebnissen aus den Untersuchungen im Labormaßstab (2.2), den prozentualen Methanertrag von abgetrenntem Feststoff der Schweinegülle, Überschussschlamm und Klarlauf (aus der Nachklärungs-Stufe der Kläranlage) bezogen auf die Schweinegülle. Hieraus geht hervor, dass bei der Vergärung von Überschussschlamm und abgetrenntem Feststoff nur 40 % des potenziellen Methanertrags der Schweinegülle genutzt werden. Der Rest des Potenzials würde einer energetischen Nutzung verloren gehen. Daher schien es zunächst einmal sinnvoller, den Biogasprozess einer aeroben Behandlung voranzustellen. Allerdings wurden weitere Faktoren in die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen:

- Einsparung der notwendigen Erwärmung der Gülle, wenn die aerobe Stufe zuerst abläuft
- Minimierung des Einsatzes externer Kohlenstoffquellen
- Minimierung des Verbrauches an Elektroenergie
- Transportwürdigkeit der abgetrennten festen Reststoffe unter Beachtung des Standortes der Anlage
- Integration von Wärmenutzungskonzepten
- Größe der Biogasanlage

Vor allem um den Einsatz einer externen Kohlenstoffquelle für die Denitrifikation zu minimieren, wurde das Konzept einer Teilstrombehandlung entwickelt. Dieses Konzept wurde im Pilotmaßstab umgesetzt. Das Schema dazu ist Abbildung 23 zu entnehmen. Die Grundlage für das gezeigte Schema bildet eine Massen- und Stickstoffbilanz auf Basis der Versuchsergebnisse aus dem Labormaßstab (2.2), die anschließend mit den Daten aus dem Betrieb der Teilstrombehandlung im Pilotmaßstab aktualisiert wurde. Die Vorgaben für die Erstellung der Massen- und Stickstoffbilanz sind dem Anhang zu entnehmen (6.4).

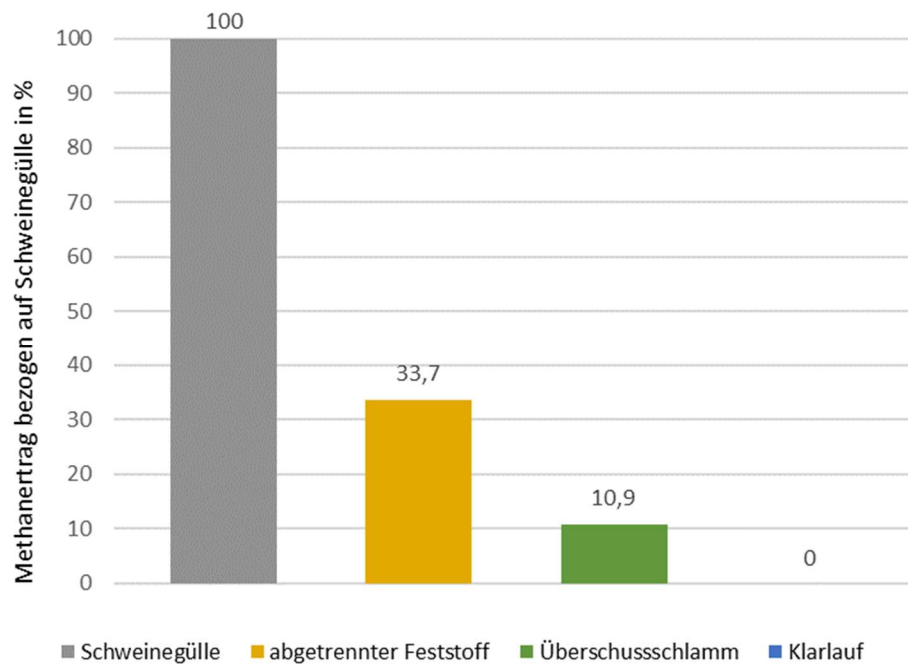


Abbildung 22: Methanertrag der Stoffströme aus der Schweinegülle-Behandlung mittels Laborkläranlage bezogen auf das Ausgangssubstrat (bezogen auf Ergebnisse aus 2.2.2).

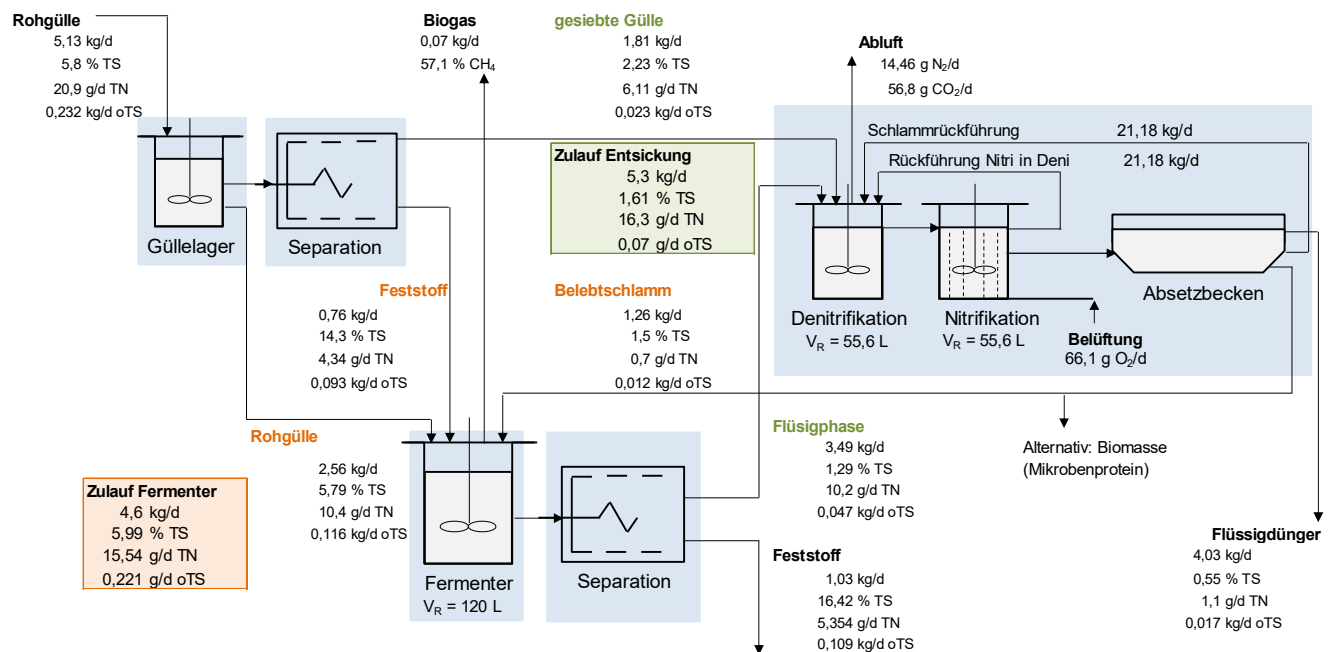


Abbildung 23: Konzept zur Teilstrombehandlung von Schweinegülle an der GülleKOM Pilotanlage; TN, Gesamtstickstoff; TS, Trockensubstanz; oTS, organische Trockensubstanz; V_R, Reaktorvolumen; J, Pröter (DBFZ)

Aus Abbildung 24 geht hervor, dass 69 % des Stickstoffs aus der Schweinegülle bei der kombinierten Behandlung an der Pilotanlage in molekularen Stickstoff umgesetzt wird. Somit wird der Gesamtstickstoff-Gehalt (TKN + Nitritstickstoff + Nitratstickstoff) durch die Behandlung wesentlich reduziert. Grundsätzlich war es ein Projektziel die Produktion von molekularem Stickstoff durch Fixierung

des löslichen Ammoniumstickstoffes in abtrennbarer Biomasse (entspricht dem Klärschlamm einer Kläranlage) zu minimieren. Im Gegensatz zum klassischen Kläranlagenprinzip bestand hier die Maßgabe, den Anfall an Klärschlamm zu maximieren. Bei der Umsetzung des Verfahrens im Pilotmaßstab konnten nur 5,2 %, der in der Gülle enthaltenen organischen Substanz im Belebtschlamm fixiert werden. Bei der im Rahmen des Projektes durchgeführten Variante des Verfahrens, wurde der Belebtschlamm der Fermentation zugeführt, hat aber nur zu einem geringen Anteil zum Biogasertrag beigetragen (Für Schweinegülle Charge VII wurde ein spezifischer Methanertrag im Belebtschlamm von 48 mL g oTS⁻¹ gemessen). Gegenstand weiterer Forschung sollte sein, den Belebtschlammanteil zu erhöhen. Neben einer Anpassung der Betriebsparameter der aeroben Behandlung ist dafür auch eine andere Abscheide-Technik erforderlich. Bei der aeroben Behandlung wurden 17 % oTS des Anlagenzulaufs abgebaut (Abbildung 25).

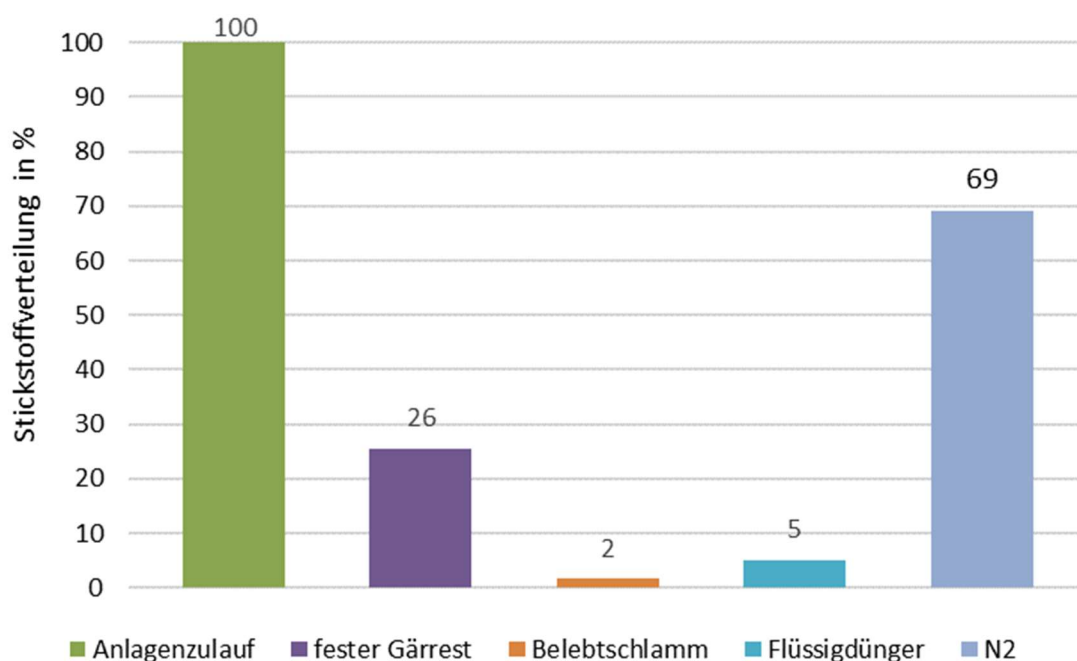


Abbildung 24: Stickstoffverteilung der Stoffströme bei der kombinierten Behandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren (Pilotmaßstab).

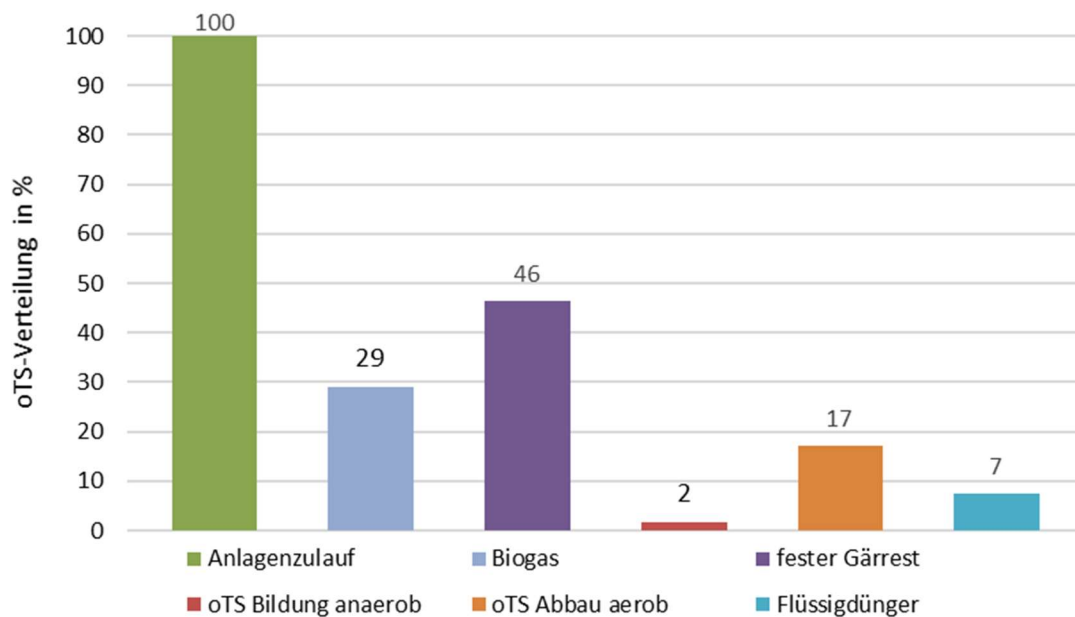


Abbildung 25: oTS-Verteilung der Stoffströme bei der kombinierten Behandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren (Pilotmaßstab).

2.4 AP 5: Umsetzung der kombinierten Güllebehandlung und Proteingewinnung im Pilotmaßstab

Das optimale Konzept zur Güllebehandlung wurde im Pilotmaßstab umgesetzt (Abbildung 26). Es erfolgte dazu ein Upscaling der aus dem Labormaßstab (AP 3) ermittelten Parameter. Abbildung 23 zeigt das Konzept zur Teilstrombehandlung von Schweinegülle an der Pilotanlage (Die Behältervolumina sind ebenfalls dieser Abbildung zu entnehmen). Der Biogasreaktor wurde bei einer Verweilzeit von 29 d und einer Raumbelastung von 1 bis 2 g oTS L⁻¹ d⁻¹ (je nach Qualität der Substratcharge) betrieben. Im Versuchszeitraum wurden 7 Substratchargen verwendet, deren Zusammensetzung (pH-Wert, Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS), Ammoniumstickstoff (NH₄-N), flüchtige organische Säuren (FOS), Kjeldahl-Stickstoff (TKN), Methanpotenzial nach VDI 4630) Tabelle 9 zu entnehmen ist. Als Inokulum wurde zu gleichen Anteilen aktiver Gärrest der Forschungsbiogasanlage des DBFZ (Vergärung von Maissilage und Rindergülle) und an höhere Ammoniumstickstoff-Konzentrationen adaptierter Gärrest aus dem Vorgängerprojekt Nred (Vergärung von Rindermist, Maissilage und Hühnertrockenkot) sowie Rindergülle verwendet. Die aerobe Behandlung erfolgt in drei Behältern, Denitrifikation, Nitrifikation und Nachklärung (absetzen von Überschussschlamm, Klarlauf im Überstand), bei einer Verweilzeit von 27 d und einem Schlammalter von 30 d. In der Nitrifikation wird ein Sauerstoffgehalt von 0,9 – 1 mg L⁻¹ eingestellt. Als Inokulum kam Impfschlamm aus den entsprechenden Behandlungsstufen des Klärwerks AZV Parthe zum Einsatz. Um unabhängig von Schwankungen der Außentemperatur zu sein, wurde die Anlage bei 25 °C betrieben. Es erfolgte eine 4-fache Rückführung (bezogen auf das Zulaufvolumen von 6 L) von Überschussschlamm in die Denitrifikation (Schlammrückführung: 24 L d⁻¹) und für den internen Kreislauf zwischen Nitrifikation und Denitrifikation (24 L d⁻¹). Für den Betrieb des Kombiverfahrens im Pilotmaßstab waren Prozessanalysen und Substratanalysen notwendig, (siehe Tabelle 10). Der Behandlung war eine Fest-Flüssig-Trennung der Gülle und des Gärrestes vorangestellt (Siebung durch 2 mm Maschenweite).

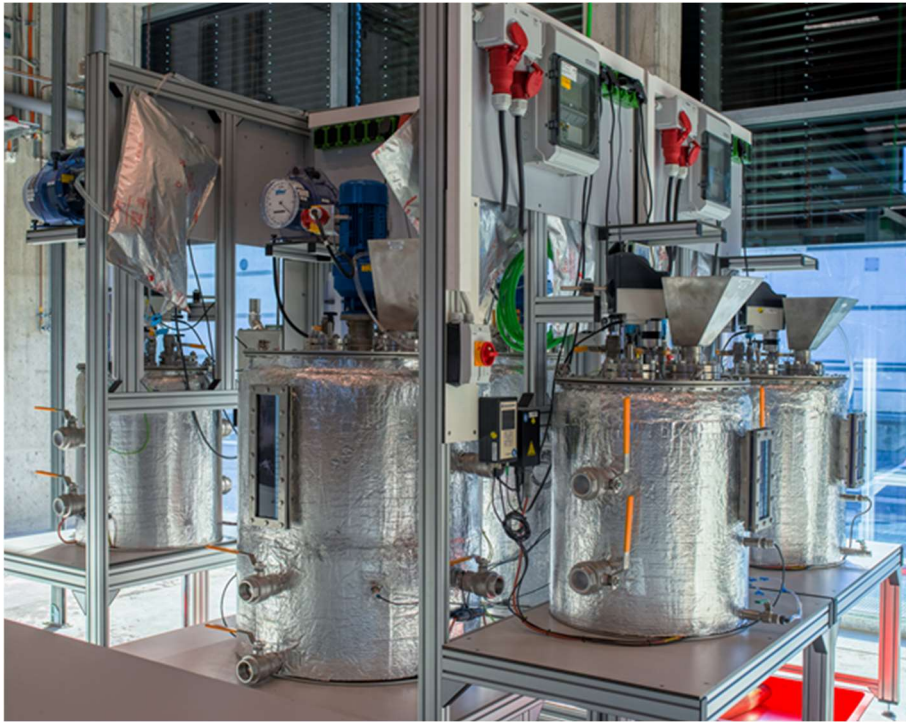


Abbildung 26: GülleKOM Pilotanlage zur anaeroben und aeroben Behandlung von Schweinegülle

Tabelle 9: Analysenergebnisse der eingesetzten Schweinegülle-Chargen (MP, Methanpotenzial ermittelt via Batch-Ansatz nach VDI 4630; SG, Schweinegülle; fest, Feststoff Schweinegülle nach Separation)

Charge	Versuchszeitraum in d	pH [-]	TS [%]	oTS [%TS]	FOS [g L ⁻¹]	NH ₄ -N [g L ⁻¹]	TKN [g kg TS-1]	MP SG [mL g oTS ⁻¹]	MP fest [mL g oTS ⁻¹]
I	1 - 39	7,4	9,3	79	5,7	2,5	54,0	275	266
II	40 - 59, 105 - 120	7,7	3,7	74	3,3	2,1	88,0	-	-
III	60 - 104	7,38	4,1	77	3,5	1,9	65,0	238	272
IV	121 - 150	7,45	5,9	79	5,4	3,2	75,0	161	263
V	151 - 185	7,48	5,8	78	6,5	3,3	83,0	-	-
VI	186 - 197	7,57	6,5	76	6,8	2,7	71,0	-	-
VII	198 - 245	7,4	8,0	79	5,0	2,6	60,0	107	-

Tabelle 10: Analysenplan für den Betrieb der GülleKOM Pilotanlage

Analysen Substrat				
bei Chargen-Wechsel:				
pH, NH ₄ -N, TKN, FOS, FOS/TAC, TS, oTS				
Säurespektrum, FMA, Biogaspotenzial VDI 4630				
Analysen GR/ Klärschlamm:	Biogasreaktor	Denitrifikation	Nitrifikation	Nachklärung
Parameter	Messintervall	Messintervall	Messintervall	Messintervall
Gasvol., -zusammensetzung	kontinuierlich			
O ₂ gel.				kontinuierlich
pH, NH ₄ -N	2 x wöchentlich	2 x wöchentlich	2 x wöchentlich	2 x wöchentlich
FOS, FOS/TAC	2 x wöchentlich	2 x wöchentlich	2 x wöchentlich	
TS, oTS	1 x wöchentlich	1 x wöchentlich	1 x wöchentlich	1 x wöchentlich
Nitrit, Nitrat				1 x wöchentlich
TKN, CSB	aller 2 Wochen	aller 2 Wochen	aller 2 Wochen	aller 2 Wochen

FOS/TAC, Pufferkapazität

CSB, chemischer Sauerstoffbedarf

FMA, Futtermittelanalytik nach Weender und van Soest

Abbildung 27 zeigt die spezifische Methanproduktion und Prozessparameter aus dem Betrieb des Biogasreaktors. Der erwartete Methanertrag auf Basis der KTBL-Werte für unseparierte Schweinegülle (spezif. Methanertrag von 230 mL g oTS⁻¹, bei 50 % Methan-Gehalt, [16]) wird phasenweise erreicht (Versuchstag 50 bis 80, Abbildung 27). Da die gemessenen Methanerträge etwas niedriger sind, ist auf die Teilstrombehandlung zurückzuführen. Nur die Hälfte des Substrats besteht aus Rohgülle. Dieser werden der Feststoff aus der Gülle-Separation und der Überschussschlamm aus der aeroben Behandlung beigemischt (Abbildung 23). Die Schwankungen kommen maßgeblich durch die sehr unterschiedlich beschaffenen Substrat-Chargen zustande (Tabelle 9). Im Gärrest wurde anfangs ein NH₄-N-Gehalt von 3 – 3,5 g L⁻¹ gemessen. Mit dem Einsatz von Überschussschlamm aus der aeroben Behandlung als Teil des Substrates ab Versuchstag 58 ist die NH₄-N-Konzentration kontinuierlich zurückgegangen bis auf Werte zwischen 2 und 1,5 g L⁻¹. Der FOS-Gehalt lag zu Beginn zwischen 1,6 und 2,5 g L⁻¹. Im weiteren Verlauf verringerte sich der FOS-Gehalt auf einen Bereich zwischen 0,7 und 0,9 g L⁻¹. Trotz der Schwankungen im spezifischen Methanertrag, ist der Prozess als stabil zu bewerten, da der FOS-Gehalt nicht ansteigt. Eine Säure-Akkumulation wäre ein Zeichen für eine Prozessstörung. Nach Abschluss der Versuche zur Teilstrombehandlung der Schweinegülle, wurde über einen Versuchszeitraum von 25 d 100 % Rohgülle als Substrat eingesetzt. Über diesen letzten Versuchsabschnitt ergab sich ein mittlerer spezifischer Methanertrag von 139 ± 10 mL g oTS⁻¹ im Vergleich zu 127 ± 14 mL g oTS⁻¹ bei Einsatz der selben Schweinegülle-Charge in der Teilstrombehandlung (Abbildung 27, Abbildung 28). Somit wurden bei der Teilstrombehandlung im GülleKOM-Verfahren 90 % des Methanertrags im Vergleich zur Monovergärung der Schweinegülle erreicht.

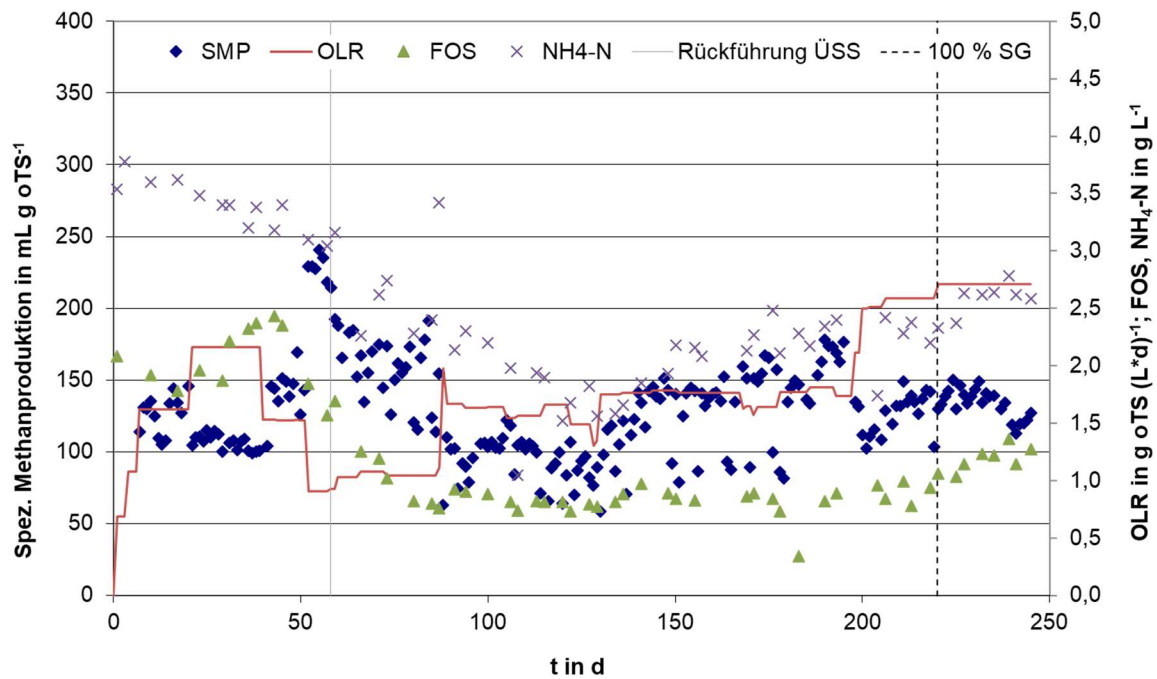


Abbildung 27: Spezifische Methanproduktion (SMP), FOS-Gehalt, Ammoniumstickstoff-Gehalt und Raumbelastung (BR) im Biogasreaktor der GülleKOM Pilotanlage. ÜSS, Überschussschlamm; 100 % SG, Einsatz von Rohgülle als Substrat

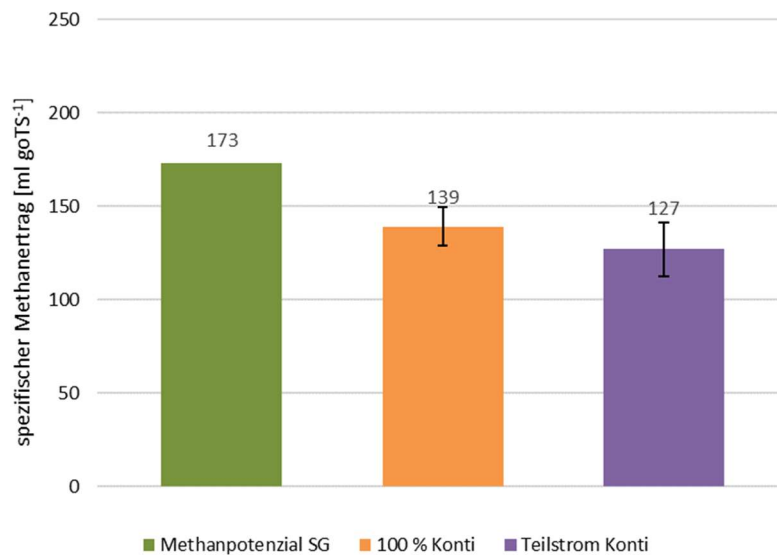


Abbildung 28: Spezifischer Methanertrag der Schweinegülle (SG, ermittelt via Batch-Ansatz nach VDI 4630, SG Charge III, Berechnung auf Verweilzeit im konti. Versuch bezogen → 29 d Verweilzeit), bei kontinuierlicher Vergärung von 100 % Rohgülle (SG Charge VII, Versuchstag 220 - 245) und bei der Teilstrom-Vergärung (SG Charge VII, Versuchstag 199 - 219) im GülleKOM Verfahren

Um exakte Aussagen zur Veränderung des Biogasertrages des GülleKOM-Verfahrens gegenüber einer Monovergärung der Gülle ohne aerobe Behandlung zu treffen, wäre ein Parallelversuch einer Monovergärung über einen längeren Versuchszeitraum (mindestens 2 Verweilzeiten für stabile Prozessbedingungen) notwendig gewesen. Auf Basis der gesammelten Daten wurde eine Massenbilanz

erstellt (ausführlich in 2.3 erläutert), um die Biogaserträge besser bewerten zu können. Bedingt durch die sehr unterschiedlich beschaffenen Substrat-Chargen (abhängig von Phase der Schweinemast, zu der die Proben entnommen wurden), ergaben sich große Unterschiede bei den Methanpotenzialen von 107 bis 275 mL g oTS⁻¹ (Tabelle 9). Dahingegen blieb das Methanpotenzial der aus der Schweinegülle separierten Feststoffe relativ hoch und konstant bei Werten von 263 bis 272 mL g oTS⁻¹ (Tabelle 9). Es gelang trotzdem eine ausgewogene Massenbilanz zu erstellen. Die berechnete Biogasmenge von 55,1 L d⁻¹ kam dem gemessenen Wert von 50,2 L d⁻¹ relativ nah. Die Verweilzeit der Pilotbiogasanlage war mit 29 d relativ kurz. Die in Batchversuchen bestimmten Methanpotenziale der einzelnen, der Biogasanlage zugeführten Teilströme, mussten zu realistischen Biogaserträgen umgerechnet werden (siehe auch 2.3.1). Dies erfolgte über reaktionstechnische Ansätze, wobei die kinetischen Konstanten aus dem diskontinuierlichen Batchprozess auf die kontinuierlich betriebene Biogasanlage übertragen wurden. Dies setzt gleiche biologische Gemeinschaften voraus, was nicht gegeben sein muss und eine Fehlerquelle für die sichtbaren Abweichungen darstellt. Der auf Basis dieser Methanpotenziale berechnete Gasertrag einer reinen Güllevergärung (52,4 L d⁻¹) liegt sogar unter dem berechneten Wert der Pilotanlage, aber über dem gemessenen Wert. Erklärt werden kann das u. a. mit der oben genannten Fehlerquelle aber auch mit einem aeroben Biomasseaufschluss in der Kläranlage oder einem positiven Nitratreffekt (Geringe Nitratkonzentrationen, wie sie im rückgeführten Belebtschlamm der Nachklärung enthalten sind, können einen positiven Effekt auf den Biogasertrag haben. Sheng et al., 2013). Über den oTS-Abbau in der Kläranlage lässt sich die maximale Verringerung des Biogasertrages des GülleKOM-Verfahrens abschätzen. Der Biogasanlage des GülleKOM-Verfahrens wird nur der Teilstrom der gesiebten Gülle entzogen und der Kläranlage zuzüglich des gesiebten Gärrestes zugeführt. Die oTS-Menge der gesiebten Gülle entsprach im betrachteten Pilotversuch 10 % der oTS Menge der eingesetzten Gülle. Aus dem gesiebten Gärrest wurde schon in der Biogasanlage die anaerob abbaubare oTS zu Biogas umgesetzt. Ca. 58 % der der Kläranlage zugeführten oTS werden abgebaut, so dass der oTS-Verlust der Gülle maximal 6 % beträgt. Da nur ca. 30 % der der Biogasanlage zugeführten oTS zu Biogas umgesetzt werden, beträgt die Verringerung des Biogasertrages durch die Aerobstufe ca. 2 – 10 %. Bei den Versuchen mit der Pilotanlage war dieser Effekt nicht messbar.

Abbildung 29 zeigt den NH₄-N-Gehalt in den einzelnen Stufen der aeroben Behandlung der GülleKOM Pilotanlage. Zu Beginn des Betriebs der Anlage war der NH₄-N-Gehalt in allen Prozessstufen sehr niedrig (<0,1 g L⁻¹). Im Laufe der Versuchszeit erhöhte sich dieser Wert auf 0,6 – 0,7 g L⁻¹, durch die Zugabe von separierter Gülle und Gärrest (durchschnittlicher NH₄-N-Gehalt im Zulauf lag bei 1,5 g L⁻¹). Auf Basis dieser Werte wurde ein NH₄-N-Umsatz von etwa 30 % berechnet. Durch Optimierungen der technischen Voraussetzung (Belüftung, Sauerstoffeintrag, Schlammrückführung) wurde der NH₄-N-Umsatz weiter gesteigert auf > 90 % (0,08 g L⁻¹ im Klarlauf) bei einem durchschnittlichen NH₄-N-Gehalt im Zulauf von 2,3 g L⁻¹ (Abbildung 29).

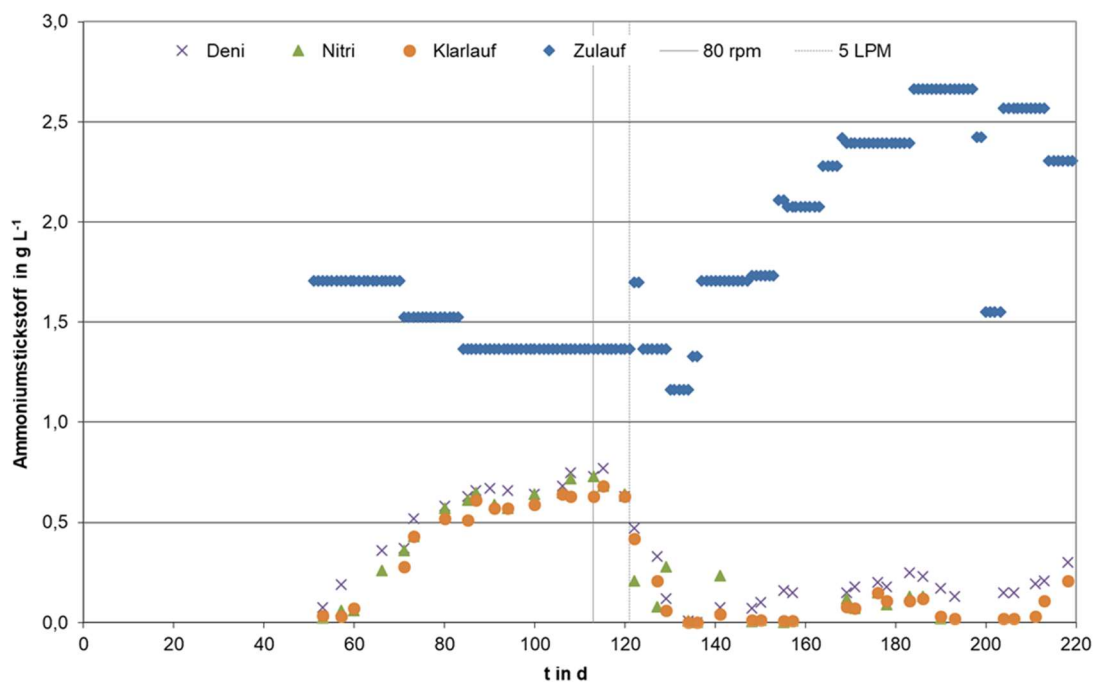


Abbildung 29: NH₄-N-Gehalt in den einzelnen Stufen der aeroben Behandlung der GülleKOM Pilotanlage. Deni, Denitrifikation; Nitri, Nitrifikation; Deni Substrat, Zulauf in Denitrifikation; 80 rpm, Verdopplung der Durchmischungsintensität auf 80 rpm; 5 LPM, Steigerung der Belüftungsintensität von 3 auf 5 Liter pro Minute

Ziel des Arbeitspaketes war es zusammen mit den Ergebnissen aus AP 3 die Datengrundlage für die Konzeption einer großtechnischen Anlage in AP 6 zu schaffen. Dazu wurden auch im Pilotmaßstab die Zusammenhänge von Biogasproduktion, Stickstoffreduzierung und Biomasseproduktion untersucht. Darauf basierend erfolgte eine ökologische und wirtschaftliche Verfahrensoptimierung.

2.5 AP 6: Konzeption einer großtechnischen Anlage zur kombinierten Gülleaufbereitung

Das in AP 4 entwickelte optimierte Konzept zur kombinierten Gülleaufbereitung soll auf Basis der im Pilotmaßstab ermittelten Daten auf eine großtechnische Anlage ausgelegt werden. Dazu wurde zunächst eine Massen- und Stickstoff-Bilanz auf Basis der GülleKOM Pilotanlage erstellt und diese nachfolgend auf eine 500 kW Anlage übertragen (Abbildung 30). Die Konzeption und Auslegung peripherer Anlagenkomponenten (Fest-Flüssig-Trennung, Rührkonzept für die Aerobstufe) erfolgt angepasst an die speziellen Anforderungen des Kombiverfahrens. Bei dem Rührkonzept für die Aerobstufe ist beispielsweise zu beachten, dass die Bemessungsgrenzen für die Auslegung von Rührwerken in Kläranlagen nicht für die geplante Anwendung auf separierte Gülle/ Gärrest geeignet sind. Ziel ist die Einbindung einer Aerobstufe in bestehende Biogasanlagen zur Umsetzung der kombinierten Gülleaufbereitung im technischen Maßstab.

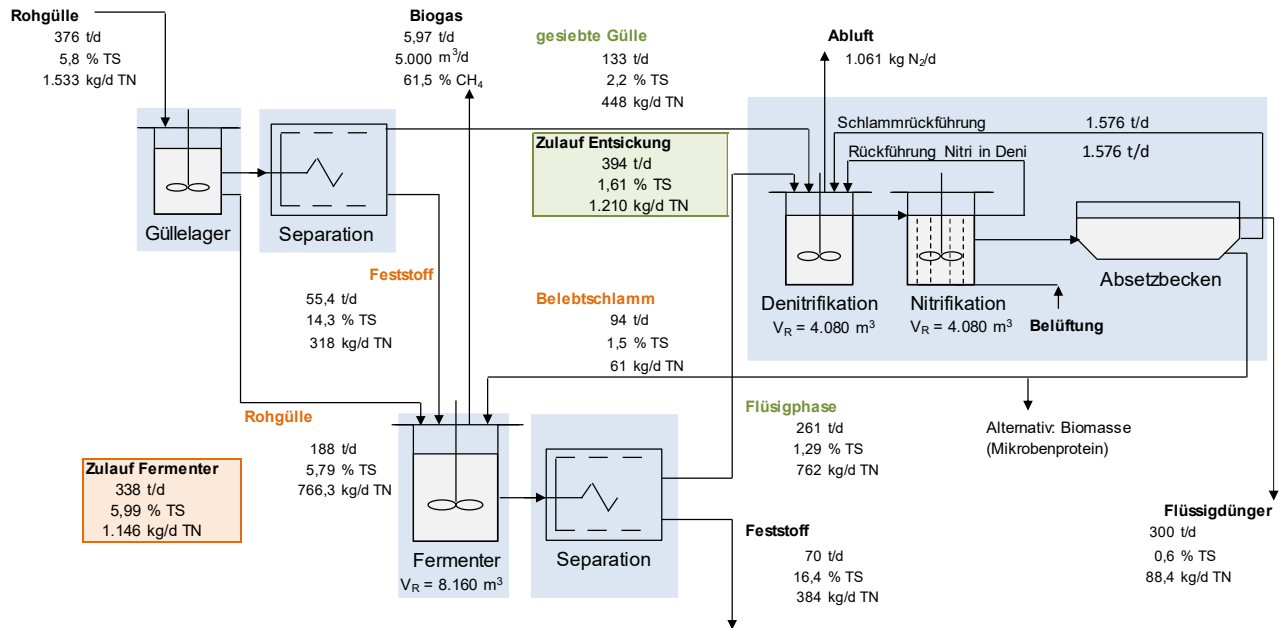


Abbildung 30: Schema 500 kW Anlage GülleKOM zur kombinierten aeroben und anaeroben Teilstrombehandlung von Schweinegülle; TN, Gesamtstickstoff; TS, Trockensubstanz; V_R, Reaktorvolumen; J. Pröter (DBFZ)

2.5.1 Konzeption der kombinierten Güllebehandlung (500 kW Biogasanlage) im GülleKOM Verfahren

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, ein Anlagenkonzept für eine kommerzielle Lösung für die Stickstoffelimination aus Gülle oder Gärrest zu entwickeln, Investitions- und Betriebskosten zu ermitteln, sowie deren Gesamtwirtschaftlichkeit abzuschätzen. Es wurde eine Anlage zur Verarbeitung von 376 m³/d Schweinegülle mit einem TS Gehalt von 5,8 % konzeptioniert, ein Lageplan entworfen und die Investition- und Betriebskosten ermittelt. Das Substrat und die Mengen wurden deshalb gewählt, da eine solche Anlage ca. 500 kW elektrische Leistung produzieren kann, was für unseren heimischen Markt einen repräsentative Anlagengröße darstellt.

Praxisanlage zur Behandlung von 376 m³/d Schweinegülle

Für die Praxisanlage für eine Tagesmenge von 376 m³/d Schweinegülle wird das Verfahren der simultanen Nitrifikation und Denitrifikation ausgewählt, da es hinsichtlich der Investitions- und Betriebskosten Vorteile gegenüber der klassischen Bauweise mit separaten Stufen für Nitrifikation und Denitrifikation bietet. Grundsätzlich folgt das Konzept dem Verfahrensschema der 500 kW Anlage GülleKOM nach Abbildung 30 (Anpassung Behältervolumina und Verfahren der aeroben Behandlung hier simultan in einem Behälter und nicht mit vorgeschalteter Denitrifikation als Kaskade). Ziel des Anlagenkonzeptes ist es, Schweinegülle gezielt von Stickstoffverbindungen zu entfrachten, wobei durch eine sinnvolle Stoffstromaufteilung ein anaerober Teilprozess Biogas, und damit Energie erzeugt, während eine aerobe Prozessstufe einen Flüssigdünger produziert, dessen Stickstoffgehalt nur noch bei 35 % gegenüber dem Ausgangsprodukt (Schweinegülle) liegt. Im Folgenden soll eine Praxisanlage kurz beschrieben werden.

Das Fließbild zeigt zunächst das Verfahrensschema einer Anlagenkombination aus Anaerob-Anlage und simultaner Nitrifikation / Denitrifikation (Abbildung 31). Das Layout für den Bau der Anlage ist Abbildung 32 und eine Zusammenstellung wichtiger Parameter und Dimensionen Tabelle 11 zu entnehmen.

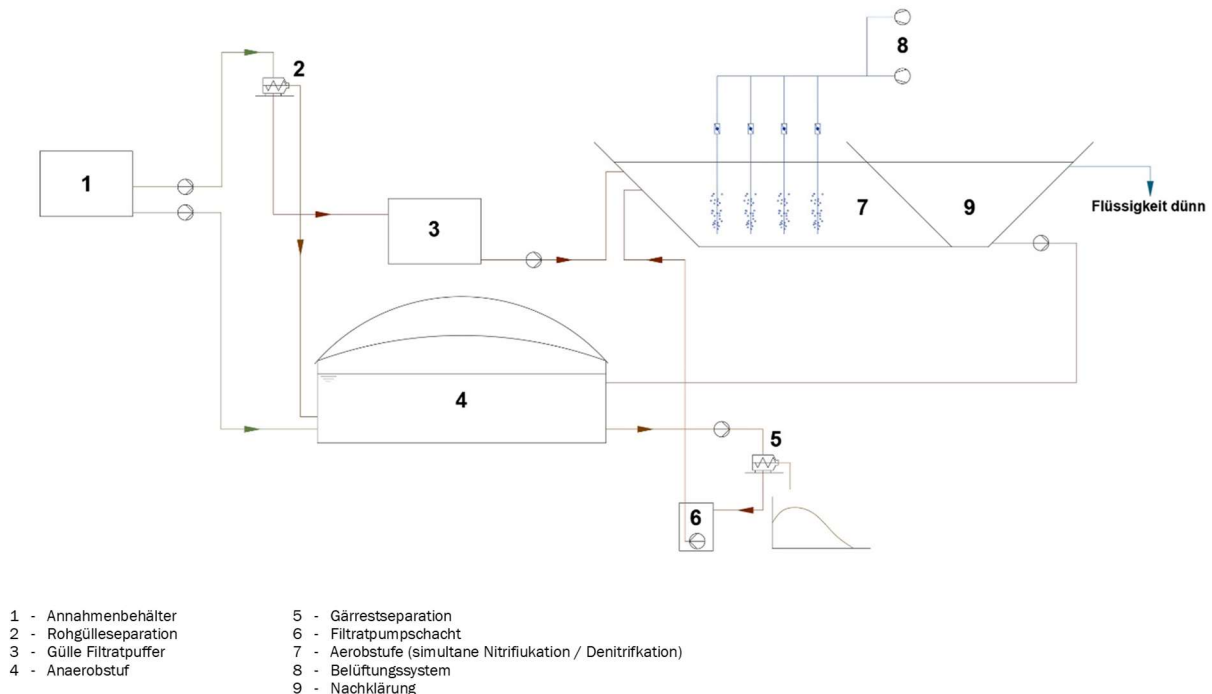


Abbildung 31: Verfahrensschema einer Anlagenkombination aus Anaerob Anlage und Simultaner Nitrifikation / Denitrifikation

Die Schweingülle wird auf der Anlage zunächst in einem Annahmebehälter (1) angenommen und zwischengespeichert. Von dort aus wird ein ca. fünfzigprozentiger Teilstrom direkt einer Anaerob Stufe (4) zugeführt. Der verbleibende Teilstrom wird über eine Separation (2) in eine feste und eine flüssige Fase zerlegt. Die feste Fase wird ebenfalls als Input der Anaerob Anlage (4) zugeführt, während die Flüssigfase direkt zur Aerob stufe (7) gepumpt wird. Das Gärprodukt der Anaerob Anlage (4) wird ebenfalls separiert, wobei die feste Phase als Dünger mit ca. 16,33 % Trockensubstanz verwendet werden kann. Die flüssige Phase des Gärrestes wird zur Aerob Anlage (7) gepumpt und dort gemeinsam mit der flüssigen Phase der Gütleseparation verarbeitet. Auf die Anaerob Anlage soll hier nicht vertiefend eingegangen werden, da das Verfahren durch den Projektpartner AEV in Abschnitt 2.5.1 untersucht wird. Die Aerobanlage ist eine kontinuierlich beschickte Durchfluss-Anlage, deren Hauptstufe ein Belebtschlamm Becken darstellt. Dieses Belebtschlamm Becken enthält Belüftungseinrichtung (8), die in mehrere separaten Zonen unterteilt ist. Diese Belüftungszonen werden intermittierend betrieben, um den Sauerstoffgehalt zu überwachen und eine optimale und wirtschaftliche Betriebsweise sicher zu stellen, verfügt das Belebungsbecken über eine Sauerstoffmessung und eine Redoxpotential Messung. Zur Erzeugung der erforderlichen Druckluft wird ein Drehkolbengebläse verwendet, welches Umgebungsluft ansaugt und die am Boden des Belebungsbeckens installierten Membranbelüfter versorgt. Über einen Frequenzumrichter kann die Drehzahl des Gebläses gesteuert und damit die Förderleistung (Luftmenge) und der Sauerstoffgehalt im Nitrifikationstank dem aktuellen Bedarf angepasst werden kann. Für die simultane Nitrifikation / Denitrifikation wird die Belüftung im Belebungsbecken in Zonen eingeteilt, die dann unabhängig voneinander belüftet oder abgeschaltet werden können. Durch diese Einteilung werden oxische- und anoxische Zonen erzeugt, in denen dann entweder Sauerstoffüberschuss oder eine starke Sauerstoffzehrung entsteht. Auf diese Weise ist eine

Nitrifikation (in oxischen Zonen) und eine Denitrifikation (anoxische Zonen) in derselben Prozessstufe (Belebungsbecken) verwirklicht. Durch intermittierende Weiterschaltung der Zonen kann eine Multikaskade von Nitrifikations- und Denitrifikationsschritten erzeugt werden, die eine sehr effektive Reduktion von Stickstoff in der Gülle ermöglicht. Nach erfolgter Behandlung fließt die stickstoffentfrachtete Gülle zum Nachklärer (9). Dort wird Belebtschlamm durch Schwerkraft sedimentiert. Der Nachklärer (9) ist ein klassischer Schwerkraftklärer. Ziel des Klärprozesses ist es, Biomasse des Nitrifikation / Denitrifikationsprozesses abzutrennen, in den Prozess zurückzuführen. Der Klarlauf des Nachklärers kann dann als Wirtschaftsdünger mit moderatem Stickstoffgehalt entweder in einem Pufferbehälter zwischengespeichert, oder direkt verwertet werden. Eventuell entstehender überschüssiger Schlamm kann problemlos ebenfalls in der Biogasanlage als Substrat eingesetzt werden, um damit zusätzliche Energie zu erzeugen. Die Bauweise der Anlage ist Abbildung 32 zu entnehmen.

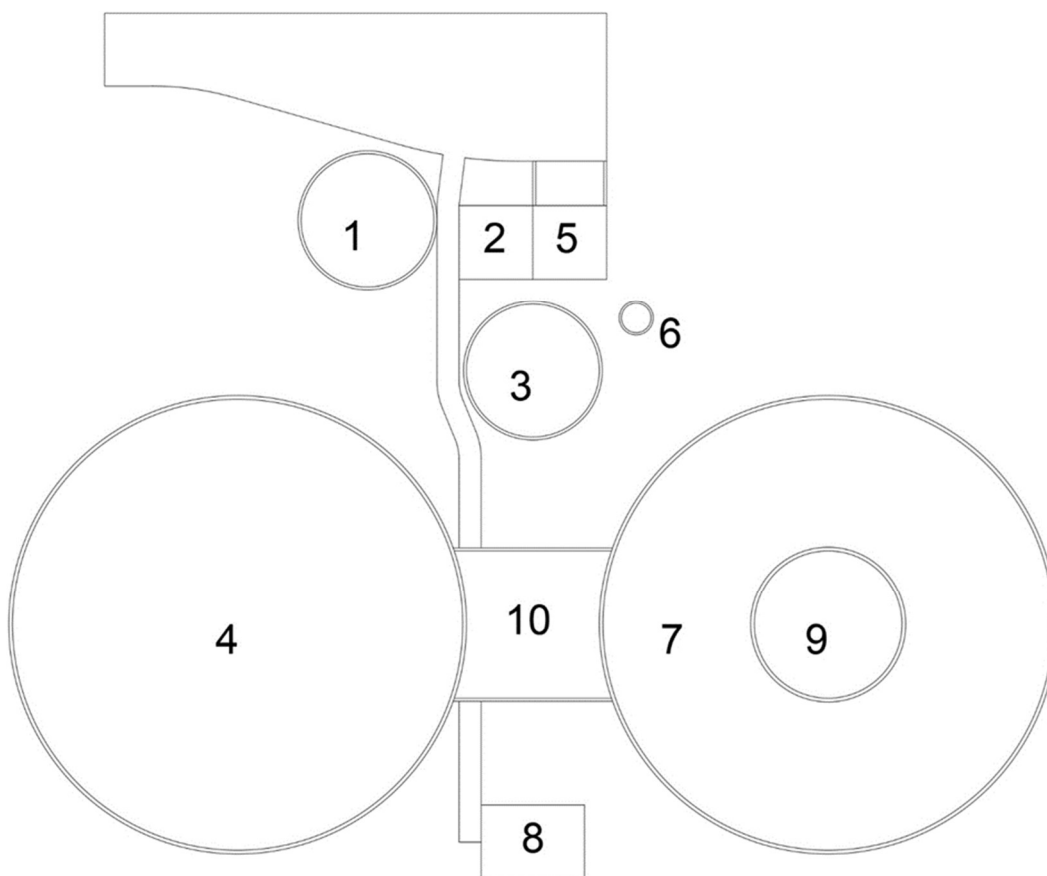


Abbildung 32: Layout für den Bau einer Anlagenkombination aus Anaerob Anlage und Simultaner Nitrifikation / Denitrifikation

Der Annahmebehälter (1) ist ein zylindrischer monolithischer Stahlbetonbehälter, der mit einem Rührwerk ausgestattet ist. Das Separator Gebäude (2,5) beherbergt sowohl die Separation der Rohgülle, als auch die Separation des Gärrestes und wird als Stahlrahmen mit Sandwich Paneelen ausgeführt. Der Pufferbehälter (3) für separierte Gülle ist ebenfalls ein zylindrischer monolithischer Stahlbetonbehälter. Sowohl die Anaerobstufe (4) als auch die Simultane Nitrifikation und Denitrifikation (2) werden als monolithische Stahlbetonbehälter ausgeführt. Die Nachklärung (9) ist als Zylinder im Zentrum des Belebtschlamm Beckens angeordnet (Ring in Ring Bauweise). Als Dachkonstruktion wird jeweils Foliendach mit Gurtunterkonstruktion gewählt. Maschinegebäude (10), Separation und Gebläse Raum (8) werden als Stahlgerüst mit Sandwich Platten auf einer entsprechend gegründeten Bodenplatte ausgeführt.

Tabelle 11: Zusammenstellung wichtiger Dimensionen und Parameter für eine Anlagenkombination aus Anaerob Anlage und Simultaner Nitrifikation / Denitrifikation

	Annahme- behälter	Puffer- tank	Anaerob Hauptfermenter	Simultane Nitrifikation/ Denitrifikation	Nachklärer	Filtratschacht
Volumen [m ³]	800	100	7.500	7.000	500	9,5
Durchmesser [m]	14	5	40	40	10,5	2
Höhe [m]	6	6	6,5	6,5	6,5	4
Füllstand [m]	5,5	5,5	6	6	6	3

2.5.2 Separation von Gülle und Gärrest im GülleKOM Verfahren

Schweine- oder Rindergülle gelangt nach unbelüfteter Güllelagerung (Vor- oder Sammelgrube) in den anaeroben Biogasreaktor. Von dort aus gelangt das Endprodukt des Biogasreaktors direkt in eine Fest-Flüssig-Trennung. Die flüssige Phase (Fugat mit 2 – 5 % TS, Abscheidegrad von rund 45 bis 55 % ohne Flockungsmittel und 60 bis 80 % mit Flockungsmittel, TS-Gehalt der Festphase lag bei 20 bis 25%) wird in die vorgeschaltete Denitrifikation, aus der ein Teil der Stickstoffinhaltsstoffe als Stickstoff entweicht. Der Rest gelang in die aerobe Nitrifikation. Je nach Nitratanteil gelangt die Phase wiederum zurück in die vorgeschaltete Denitrifikation. Ein Teil wird über ein Absetzbecken als Schlammanteil zurück in den Biogasreaktor geleitet.

Welche Rolle spielt die Fest-Flüssig-Trennung für den Gesamtprozess?

1. Die Fest-Flüssig-Trennung wurde im Labormaßstab und in einer kleinen Pilotanlage über ein Rüttelsieb realisiert (möglich wäre auch ein Bogensieb gewesen). Damit wurden TS-Gehalte von 1 bis 2,5 % erreicht. Der Flüssiganteil würde bei Verwendung eines Bogensiebes je nach Größe und Länge mehr oder weniger sein. Die Luftumgebung führt möglicherweise zu einem Aktivieren aerober Mikroorganismen, allerdings mit einem geringen Anteil. Dazu gab es am DBFZ schon Voruntersuchungen.
2. Für eine größere Anlage bietet sich der Pressschneckenseparator an. Der entstehende Feststoff ist mit etwa 30 % direkt zur Kompostierung und Humusherstellung geeignet. Durch die Siebform ist die Trockensubstanz der flüssigen Phase geringer als beim Bogensieb. Durch Zusatz von Flockungsmitteln oder Flockungshilfsmitteln könnte der Restgehalt an TS oder oTS noch gesenkt werden. Theoretisch kann die Wirkung der Flockungsmittel oder Flockungshilfsmittel durch eine aeroben Zwischenlagerung unter Zusatz von Mikropilzen wie *Pichia* spez., *Candida* spez. oder *Metschnikowia* spez. ebenfalls erreicht werden.
3. Bei großen Anlagen könnten Dekanter eingesetzt werden. Allerdings haben Dekanter zwei große Nachteile; der Energiebedarf ist höher als bei Pressschneckenseparator und die Zusammensetzung des Feststoffes ist ggf. schlammiger. Es wäre einfacher, mehrere Pressschneckenseparator als einen Dekanter einzusetzen.
4. Der ausgekreiste Belebtschlamm aus der aeroben Gärrestbehandlung wird im Pilotversuch dem Biogasprozess wieder zugeführt. Es ist sinnvoll diesen Schlamm über einen Separator weiter einzudicken.

2.5.3 Wärmenutzungskonzept

Die Entwicklung eines Wärmenutzungskonzeptes für GülleKOM Anlagen ist in vielerlei Hinsicht sinnvoll und nachhaltig. Das Verfahren besteht bekanntlich aus einem anaeroben Teilprozess, bei dem nicht unerhebliche Wärmemengen für die Aufheizung der Substrate auf mesophile Prozessbedingungen (40 °C) benötigt werden. Andererseits entsteht beim aeroben Prozess Wärme, da aerobe Mikroorganismen unter Zufuhr von Sauerstoff durch Abbauprozesse Wärmeenergie abgeben. Weiterhin sind für die Bereitstellung des Sauerstoffs üblicherweise Kompressoren (Verdichter) im Einsatz, die atmosphärische Luft komprimieren. Dabei entstehen ebenfalls erhebliche Wärmemengen. Basierend auf dem Verfahrensschema wird also Heizungsenergie für die anaerobe Fermentation benötigt, während in folgenden Teilströmen / Teilprozessen Wärme abgegeben wird, bzw. entzogen werden kann:

- Kühlung des Stoffteilstromes von der anaeroben Fermentation zum Belebungsbecken. Hier wird 40 °C warmer Fermenter Inhalt abgegeben. Die Temperatur der Aerob stufe liegt bei 25 °C
- Flüssigdünger aus der Aerobanlage wird mit 25 °C abgegeben
- Abwärme der Verdichter Maschinen für die Belüftung der Aerobanlage. Hier entsteht ein heißer Luftstrom mit 80 °C, dem Wärme entzogen werden kann- Weiterhin geben die Verdichter Maschinen Wärme an den Verdichterstufen und Elektromotoren ab, die jedoch eher für die Beheizung von angrenzenden Räumen verwendet werden kann.

Wärmerückgewinnung aus dem Gärrest der anaeroben Fermentation

Der Gärrest hat eine Temperatur von 40 °C. Diese hohe Temperatur ist für die Aerob Stufe ungeeignet, wo Temperaturen um 25 °C angestrebt werden. Andererseits hat Rohgülle im Winter eine Temperatur von nur 5 – 10 °C und muss auf 40 °C Fermenter Temperatur aufgeheizt werden. Es ist also naheliegend, durch einen Wärmetausch die Temperatur des Gärrestes abzusenken und die gewonnene Wärme dem Inputmaterial zu zuführen. Auf diese Weise verhindert man eine unerwünschte Aufheizung der aeroben Biologie und spart gleichzeitig Energie für die Fermenterheizung der anaeroben Fermentation. Hier bietet sich ein direkter Wärmetausch (z.B. Rohrwärmetauscher) zwischen dem Gärrest und dem Rohgüllestrom zur Anaerob Anlage an.

Flüssigdünger am Auslauf der aeroben Biologie

Der Flüssigdünger wird mit einer Temperatur von 25 °C abgegeben. Ein Wärmeentzug aus diesem Strom ist nur über eine Wärmepumpe möglich und sinnvoll. Dabei können, je nach Auslegung und Ausführung der Anlage, zwischen 4,5 und 6,0 kW Wärme je eingesetztem kW elektrischer Leistung gewonnen werden. Die Heizungsseite der Wärmepumpe kann mit Vorlauftemperaturen von 45-55 °C direkt für die Heizung des anaeroben Fermenters genutzt werden.

Abwärme der Verdichter Maschinen für die Belüftung der Aerobstufe

Durch Einbau eines Wärmetauschers in die Druckleitung der Verdichter kann dem ca. 80 °C heißen Luftstrom Wärme entzogen werden. Hier können Vorlauftemperaturen von 60 °C erreicht und die Wärme direkt für die Fermenterheizung eingesetzt werden.

Zusammenfassung

Die Kombination aus anaerober Fermentation und aerober Biologie bietet im vorliegenden Projekt für Praxisanlagen mehrere erfolgversprechende Ansätze für ein sinnvolles Wärmenutzungskonzept auf späteren Praxisanlagen. Dabei muss im konkreten Fall eine Wärmebilanz erstellt und anhand der Investitions- und Betriebskosten entschieden werden, welche der drei genannten Wärmerückgewinnungsverfahren zur Anwendung kommen sollen.

2.6 AP 7: Bewertung und Optimierung ökonomischer und ökologischer Aspekte

Zur ökonomischen Bewertung erfolgt eine Ausweitung der in AP 4 begonnenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Gesamtverfahrens. Dabei werden auch ökologische Gesichtspunkte wie Emissionen, lokale Nährstoffbilanzen und die energetische Bilanz (Wärme, Elektroenergie) betrachtet: Anpassung des Wärmenutzungskonzeptes aus AP 6 an die Praxisanlage, Integration der Biomassegewinnung und -verwertung. Aus diesen Betrachtungen kann konkretes Optimierungspotential abgeleitet werden.

2.6.1 Wirtschaftlichkeit der kombinierten Güllebehandlung (500 kW Biogasanlage) im GülleKOM Verfahren

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der unter Punkt 2.5.1 vorgestellten Anlage wurden die notwendigen Baukosten, die laufenden Kosten für den Betrieb und die zu erwartenden Einnahmen gegenübergestellt. Die Baukosten wurden durch eine Kostenkalkulation ermittelt.

Es wurden zwei Verschiedene Szenarien betrachtet, ein EEG konformer Betrieb (EEG 2023) und ein Betrieb außerhalb des EEG. Da die Anlage neben der Güllebehandlung auch der Erzeugung von Biogas dient, kann der erzeugte Strom nach dem aktuellen EEG vergütet werden. Hierzu sind gewisse technische Voraussetzungen zu erfüllen (flexible Fahrweise der Anlage), die sich in den Anlagenkosten niederschlagen. Im Gegenzug wird der Strom für eine Vergütungsperiode von 10 Jahren mit einem festen Preis vergütet und durch weitere Boni ergänzt (Flexprämie). Ein EEG-konformer Betrieb ist jedoch keine Pflicht. Biogasanlagen können auch konventionell betrieben werden. Der technische Aufwand und damit das nötigste Investment, ist hier geringer, dafür wird der Strom nur nach den marktüblichen Preisen vergütet. Da es das EEG nur in Deutschland gibt, dient dieses Szenario dazu das Kosten-Nutzen-Verhältnis außerhalb von Deutschland einzuordnen. Die beiden Szenarien unterscheiden sich in folgenden Punkten: Gasspeicher – muss für flexible Fahrweise größer ausfallen (wird aber auch in der Version außerhalb des EEG eingeplant da es bei einem 40 m Behälter die günstigste Form der gasdichten Abdeckung ist), Über- Unterdrucksicherungen – müssen wegen der größeren Gasentnahme bei flexibler Fahrweise auch größer sein, Heizungsbau – für flexiblen Betrieb wird ein Wärmepufferspeicher gebraucht, BHKW – für flexible Fahrweise wird ein mindestens 55 % größeres BHKW benötigt, Gasaufbereitung – um den höheren Gasverbrauch des größeren BHKW abzudecken muss die Gasaufbereitung leistungsfähiger sein.

In der folgenden Tabelle sind die Zwischensummen der einzelnen Positionen aufgeführt (Tabelle 12). Die vollständige Kalkulation ist als Anhang beigelegt (6.5).

Tabelle 12: Baukosten für die 500 kW Anlage zur kombinierten Güllebehandlung

Position	Inhalt	Betrag (Netto) Gemäß EEG	Betrag (Netto) Außerhalb des EEG
Behälterbau	Fermenter, Annahmebehälter, Filtratschacht, Puffertank	920.610 €	920.610 €
Nitrifikation Denitrifikation Ring in Ring	Behälterbau, Rührtechnik, Belüftungssystem, Separatoren	1.293.889 €	1.293.889 €
Gasdichte Abdeckung Fermenter	Gasspeichersystem inkl. technischer und baulicher Ausrüstung	231.091 €	199.859 €
Gasdichte Abdeckung Nitri/Denitrifikation	Betondecke, Betonschutz	100.140 €	100.140 €
Über- Unterdrucksicherungen	Über- und Unterdrucksicherungen für alle drei Gasspeicher	18.377 €	8.500 €
Sonstige Technische Ausrüstung	Pumpen zur Beschickung der Separatoren, Serviceschächte für Einbindung der Rührwerke, Tauchmotorpumpen für Nachklärer, Annahmebehälter und Filtratschacht	183.115 €	183.115 €
Heizung Fermenter	Heizungsrohr, Halter, Anschlüsse	25.262 €	25.262 €
Heizungsbau Gesamtanlage	Heizungsrohr, Isolierung, Pumpen, Mischer, Armaturen	98.026 €	45.898 €
Leitungsbau Biogas, Substrat	Rohre PE DN 150-200 zur Verlegung im Boden, Edelstahl DN 150-200 überirdisch, Flansche, Klappen/Schieber etc.	118.762 €	118.762 €
Montagekosten	Montage der vorgenannten Posten	117.307 €	113.307 €
Elektroinstallation	Steuerung, Sensoren, Schaltschrank, Antriebe, Programmierung, Verkabelung, Inbetriebnahme	103.580 €	103.580 €
Gasfackel	Gasfackel mit Verdichter und Überwachung	29.880 €	29.880 €
BHKW	1067 kW BHKW für Flexbetrieb (doppelte Überbauung), SCR-Kat, Harnstofftank	851.980 €	494.731 €

Position	Inhalt	Betrag (Netto) Gemäß EEG	Betrag (Netto) Außerhalb des EEG
Stromeinspeisung	Trafo/Übergabestation, MS/NS Verkabelung, Schutzmessprüfung, Zuarbeit zum Anlagenzertifikat	153.502 €	103.502 €
Gasaufbereitung	Gastrocknung, Entschwefelung, Druckerhöhung für BHKW	70.332 €	56.199 €
Planungskosten Genehmigung nach BlmSchG	Kosten für Planungsbüro, Kosten Genehmigungsbehörde, externe Gutachten/Stellungnahmen	164.250 €	164.250 €
Transportkosten/Sonstiges	Schwerlasttransporte, Erdarbeiten, Kräne, Statiken	188.197 €	184.428 €
	Gesamtbetrag (Netto)	4.700.949 €	4.177.360 €
	Mehrwertsteuer 19 %	893.180 €	793.698 €
	Gesamtbetrag (Brutto)	5.594.130 €	4.971.058 €

Dem Investitionsbedarf stehen die Einnahmen gegenüber. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist in verkürzter Form in Tabelle 13 dargestellt. Die vollständige Betrachtung ist als Anhang beigefügt (6.7).

Tabelle 13: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die 500 kW Anlage zur kombinierten Güllebehandlung

Jährliche Ausgaben	Betrag (Netto) im EEG	Betrag (Netto) außerhalb EEG
Abschreibung für Baumaßnahmen ¹	223.765 €/a	198.842 €/a
Abschreibung der techn. Ausstattung ²	335.648 €/a	298.263 €/a
Zinsen auf Fremdmittel ³	121.368 €/a	107.349 €/a
Wartung- und Instandhaltungskosten BHKW ⁴	51.552 €/a	51.552 €/a
Wartungs- u. Instandhaltungskost. Maschinen ⁵	83.912 €/a	74.566 €/a
Personalkosten pro Jahr ⁶	93.600 €/a	93.600 €/a
Kosten Abgasnachbehandlung (SCR-Kat) ⁷	8.213 €/a	8.213 €/a
Versicherungskosten pro Jahr ⁸	27.971 €/a	24.855 €/a
	1.011.653 €/a	922.865 €/a
Jährliche Einnahmen		
Stromverkauf ⁹	629.555 €/a	191.938 €/a
Flexzuschlag ¹⁰	71.240 €/a	0 €/a
Zusatzerlöse Fahrplan ¹¹	40.382 €/a	0 €/a
Ersparnis durch Eigenverbrauch von Wärme für Schweinemastanlage ¹²	63.845 €/a	63.845 €/a
	1.670.593 €/a	699.457 €/a
Gewinn	658.940 €/a	-661.026 €/a
Gewinn pro m ³ Schweinegülle	5,56 €/m ³	-5,58 €/m ³

	Betrag (Netto) im EEG	Betrag (Netto) außerhalb EEG
Einnahmen pro kWh ¹³	41,37 ct/kWh	6,48 ct/kWh
Ausgaben pro kWh ¹⁴	25,41 ct/kWh	22,85 ct/kWh

Erläuterung zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung:

- 1: 10 % der Investitionssumme (Abschreibungszeitraum 10 Jahre)
- 2: 10 % der Investitionssumme für technische Ausrüstung (Abschreibungszeitraum 10 Jahre)
- 3: Kalkuliert mit einem Eigenkapital von 200.000 € und einem Zinssatz von 4,5 %
- 4: 1,2 Cent/erzeugte kWh (bewährter Erfahrungswert aus der Praxis)
- 5: 1,5 % der Investitionssumme (bewährter Erfahrungswert aus der Praxis)
- 6: Eine Person 40 h/Woche und 45 €/h
- 7: Erfahrungswert aus der Praxis
- 8: 0,5 % der Investitionssumme (bewährter Erfahrungswert aus der Praxis)
- 9: Jährliche Stromproduktion * Cent/kWh
- 10: Flexzuschlag nach EEG 2023: 65€/kW installierte Leistung
- 11: Kalkuliert mit 1 Cent/kWh, Zusätzlicher Erlös der erzielt werden kann, wenn die Stromproduktion an die Zeiten mit höchsten Strompreisen angepasst wird
- 12: Kalkuliert mit einem jährlichen Wärmeverbrauch von 718.254 kWh und einem Wärmepreis von 8,9 Cent/kWh
- 13: Jährliche Einnahmen/jährliche Stromproduktion
- 14: Jährliche Kosten/jährliche Stromproduktion
- 15: Der Input der anaeroben Stufe wurde wie folgt berechnet: 188,03 t/d die als Teilstrom direkt in die anaerobe Stufe gehen (siehe Abbildung 30) + 136,66 t/d die der TS Menge von 55,43 t/d separiertem Feststoff aus der Schweinegülle entsprechen, die auch in die anaerobe Stufe geleitet werden. 55,43 t/d mit einem TS-Gehalt von 14,3 % entsprechen einer TS-Menge von 7,9 t/d, was wiederum einer Schweinegüllemenge (5,8 % TS-Gehalt) von 136,66 t/d entspricht. Der zusätzliche Input aus der aeroben Behandlung wurde nicht mit einberechnet, dieser wird der aeroben Behandlung zugeordnet.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass das Verfahren innerhalb des EEG wirtschaftlich gut darstellbar ist, was hier vor allen der vorteilhaften Vergütung zu verdanken ist. Außerhalb des EEG ist der Betrieb (wie hier veranschlagt als Neubau) nicht wirtschaftlich. In die Betrachtung ist sowohl der Eigenverbrauch von Strom als auch von Wärme mit einbezogen. Das bedeutet, dass mit einem Teil der erzeugten Wärme und des Stromes die Anlage betrieben wird. Daraus ergeben sich Einsparungen für die Gesamtanlage (mit Schweinemastanlage). Wegen des hohen Wärmebedarfs der Nitrifikation/Denitrifikation wurde bei der Betrachtung kein Verkauf von überschüssiger Wärme an externe Dritte berücksichtigt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass es dennoch einen Wärmeüberschuss gibt der ggf. weitere Einnahmen erzeugen könnte.

Ingesamt betrachtet kann durch die Ergänzung der anaeroben Vergärung als Verfahrensstufe zur aeroben Güllebehandlung die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur aeroben Gülleaufbereitung verbessert werden (5,58 €/m³ Gülle vermutlich günstiger im Vergleich zur rein aeroben Behandlung im BioArmor Verfahren, [3]). Bezogen auf einen EEG konformen Betrieb kann darüber hinaus sogar ein Gewinn von 5,56 €/m³ Gülle bei der Teilstrombehandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren erwirtschaftet werden.

2.6.2 Ökologische Bewertung des gesamten Verfahrens bezogen auf die großtechnische Anlage

Im Vergleich zur direkten Ausbringung der Schweinegülle auf landwirtschaftliche Flächen, ist hier vorgestellte Güllebehandlung als äußerst positiv zu betrachten. Durch die gasdichte Behandlung der Gülle werden sowohl bei anaerob als auch aerob Geruchsstoffe abgebaut. Die Geruchsbelastung die durch die Ausbringung des Gärrückstandes entsteht, ist erheblich geringer als diejenige, die bei direkter Ausbringung der Gülle verursacht werden würde. Die Geruchsemission kann durch fachgerechte Einbringung in den Boden, gegenüber einer oberflächlichen Ausbringung mittels Breitverteiler weiter vermindert werden. Hierdurch steigt auch die Verfügbarkeit der enthaltenen Makro- und Mikronährstoffe für die Pflanzen an. Diese wird auch durch die anaerobe Behandlung verbessert, da in komplexen organischen Verbindungen gebundene Nährstoffe die Phosphate nach der Vergärung als niedermolekulare Verbindungen vorliegen. Durch die aerobe Behandlung wird der Stickstoffgehalt vermindert. Dies ist natürlich nur in Gebieten mit zu hohen Stickstoffimmissionen relevant, dort aber umso wichtiger.

Grundsätzlich war es ein Projektziel die Produktion von molekularem Stickstoff durch Fixierung des löslichen Ammoniumstickstoffes in abtrennbarer Biomasse (entspricht dem Klärschlamm einer Kläranlage) zu minimieren. Im Gegensatz zum klassischen Kläranlagenprinzip bestand hier die Maßgabe, den Anfall an Klärschlamm zu maximieren. Bei der Umsetzung des Verfahrens im Pilotmaßstab konnten nur 5,2 %, der in der Gülle enthaltenen organischen Substanz im Belebtschlamm fixiert werden. Bei der im Rahmen des Projektes durchgeführten Variante des Verfahrens, wurde der Belebtschlamm der Fermentation zugeführt, hat aber nur zu einem geringen Anteil zum Biogasenertrag beigetragen. Gegenstand weiterer Forschung sollte sein, den Belebtschlammanteil zu erhöhen. Neben einer Anpassung der Betriebsparameter der aeroben Behandlung ist dafür auch eine andere Abscheide-Technik erforderlich. Insgesamt sinkt der transportwürdige Anteil an Output-Material (weniger fester Gärrest, mehr Flüssigdünger mit 0,6 % TS). Dieser könnte auf Grund des geringen Stickstoff- und Organik-Gehalts ($< 0,1 \text{ g L}^{-1} \text{ NH}_4\text{-N}$, $1,6 - 2 \text{ g L}^{-1} \text{ CSB}$) über eine Verregnung ausgebracht werden. Die Teilstrombehandlung mit 50 % Gülleanteil ist nur ein Beispiel. Örtliche Gegebenheiten können andere Prämissen setzen. Wieviel Stickstoff reduziert werden muss, hängt letztendlich von der Möglichkeit der landwirtschaftlichen Gärrestverwertung ab. Es ist möglich, über die Prozessmodellierung-Massenbilanzierung für jede Anlage eine optimale Prozessgestaltung zu berechnen.

Besonders hervorzuheben ist die Verminderung von Treibhausgasen. Bei der direkten Ausbringung von Gülle und insbesondere auch während der langen Lagerung in nicht gasdicht abgedeckten Behältern endstehen gasförmige Emissionen. Dabei handelt es sich um CO_2 , CH_4 , N_2O und NH_3 . Während der anaeroben Behandlung hingegen werden alle endstehenden Gas gefasst und letztendlich verbrannt. Durch die thermische Oxidation und die nachgeschalteten Katalysatoren sind dann (neben kleinen Mengen anderer Gase) nur noch CO_2 , N_2 und H_2O im Abgas enthalten. Nach KTBL (2020) ist bei der offenen Güllelagerung (ohne Schwimmschicht) mit einer Methanemission von $3,60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3$ Schweinegülle zu rechnen [17]. Würde der tägliche Input von 376 m^3 Schweinegülle also 137.240 m^3 im Jahr nicht behandelt, sondern nur offen bis zur Ausbringung gelagert, ergäbe sich, vereinfacht betrachtet, eine mögliche Methanemission von 494.064 m^3 Methan im Jahr. Durch die kombinierte Güllebehandlung kann dieses Methan gefasst und durch die energetische Nutzung im BHKW zu Kohlenstoffdioxid umgewandelt werden. Weil Methan etwa 21-mal treibhauswirksamer als Kohlenstoffdioxid ist, entspricht dies einen CO_2 -Äquivalent von gut 10 Mio. m^3 oder umgerechnet 19.713 t CO_2 . Hinzukommen die

Einsparungen an Heizenergie für die Schweinemastanlage welche vom vorher genutzten Energieträger abhängig sind. Ebenso verhält es sich mit den Treibhausgasen, die durch die Stromproduktion vermieden werden.

3 Verwertung

Dem folgenden Kapitel sind Erläuterungen zur Ergebnisverwertung zu entnehmen, insbesondere zu Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen, wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende und der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit.

3.1 Erfindungen/ Schutzrechtsanmeldungen

Im Rahmen des Vorgängerprojektes wurde durch AEV ein Patent beantragt. Das Patent „Verfahren zur Reduzierung des Nährstoffgehalts von Gülle und Geflügelkot“ (EP3608300B1) wurde am 20.09.2023 erteilt.

3.2 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Als wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende ergeben sich für das DBFZ Wettbewerbsvorteile bei der Begutachtung und Weiterentwicklung von Verfahren, die eine aerobe Gärrestbehandlung in anaerobe Vergärung integrieren (zum Beispiel bei Systemen mit hoher Ammoniumstickstoff-Konzentration). Dazu sind mittel- und langfristig Beiträge in Form von Messepräsentationen und Anwenderkonferenzen geplant. Für die Industriepartner AEV und EE bestehen hohe wirtschaftliche Erfolgsaussichten, auf Grund des gesteigerten Bedarfs an adäquaten Lösungen (Zwang zu Verfahren, die Nährstoffeinträge reduzieren (dramatische Nitratbelastung im Grundwasser, EU Klage gegen Dtl.), Zwang zur Reduzierung der THG Emissionen in der Landwirtschaft nur durch Vergärung von Gülle und Mist möglich).

AEV hat Pläne die Ergebnisse (wirtschaftliche Verbesserung aerober Verfahren zur Gülleentstickung) in ein Dienstleistungskonzept zu überführen. Durch die Ergänzung der anaeroben Vergärung als Verfahrensstufe zur aeroben Güllebehandlung, kann die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur aeroben Gülleaufbereitung verbessert werden. Bezogen auf einen EEG konformen Betrieb kann darüber hinaus sogar ein Gewinn von 5,56 €/m³ Gülle bei der Teilstrombehandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren erwirtschaftet werden. Der wirtschaftliche Nutzen für die AEV liegt zum einen in der Vergütung des Dienstleistungsangebots, zum anderen kann ein wachsender Bekanntheitsgrad durch den Innovationscharakter des Verfahrens erwartet werden. Da im Laufe des Projektes viele Erfahrungen im Hinblick auf die Stabilität des Gärprozesses bei erhöhter Stickstoffkonzentration gesammelt wurden, steht dem Anbieten der erläuterten Dienstleistung direkt nach Projektende derzeit nichts im Weg.

Für EE ergibt sich durch Übertragung des GülleKOM-Verfahrens auf andere stickstoffreiche Substrate die Möglichkeit, zukünftig Anaerobanlagen für die Vergärung hoch ammoniumhaltiger Substrate in verstärktem Umfang anzubieten. In vielen Ländern, vor allem in den Ländern der Mittelmeeranrainer, aber auch in Asien gibt es eine große Anzahl Geflügelfleisch- und Eierproduzenten, die erhebliche Mengen an Geflügelkot und damit umweltrelevante Probleme verursachen. Die anaerobe Vergärung bietet hier

die Möglichkeit Umweltprobleme unter gleichzeitiger Produktion von erneuerbarer Energie zu lösen. Eine zeitnahe Umsetzung der Erkenntnisse in Projekten ist dabei innerhalb von 1-2 Jahren möglich.

3.3 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die wissenschaftliche Verwertung der Ergebnisse erfolgte bislang in Form von Präsentationen (Messestände) bei Fachtagungen (5). Durch die Betreuung studentischer Abschlussarbeiten in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, der Hochschule Anhalt und der Hochschule Merseburg wurde ein wichtiger Beitrag zur Vernetzung mit diesen Forschungseinrichtungen geleistet. Für seine Bachelorarbeit zum Thema „Güllebehandlung mittels aerober und anaerober Verfahren“ hat Mourice Wölbeling den ersten Preis in der Kategorie Energie und Umwelt der Energie und Umwelt Stiftung Leipzig erhalten.

Abschlussarbeiten Im Rahmen der Projektbearbeitung:

- E. Ehrlich (2022) Güllebehandlung mittels aerober Verfahren zur Stickstoffreduzierung und Biomassegewinnung. Diplomarbeit, TU Dresden
- M. Wölbeling (2023) Güllebehandlung mittels aerober und anaerober Verfahren. Bachelorarbeit, Hochschule Merseburg
- K. Bhowmick (2025) Yeast cultivation on manure for protein recovery. Masterarbeit, Hochschule Anhalt
- P. Lorek (eingereicht 2025) Güllebehandlung mittels aerober und anaerober Verfahren zur Stickstoffreduzierung im Pilotmaßstab. Masterarbeit, Hochschule Anhalt

Zudem bietet das Projekt die Möglichkeit für Anschlussprojekte (Forschungs- und Entwicklungsprojekte) zur Integration aerober Gülle-/Gärrestbehandlung in Verfahren zur anaeroben Vergärung stickstoffreicher Substrate.

Mögliche Zielsetzungen:

- Verwertung von in Deutschland bisher noch unvollständig genutzten Potenzialen landwirtschaftlicher Abfallstoffe in Biogasanlagen
- Senkung der THG Emissionen durch Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe in Biogasanlagen
- Entsorgungslösung landwirtschaftlicher Reststoffe für Hochlastregionen
- Optimierung der Aerobstufe, Stickstoffbindung in Form von Biomasse

3.4 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Eine mittel- und langfristige wissenschaftliche Anschlussfähigkeit ergibt sich aus dem Ausbau der Kompetenz des DBFZ auf dem Gebiet der Vergärung von Flüssig- und Festmist sowie der biologischen Stickstoffreduzierung. Es resultieren für das DBFZ zudem Wettbewerbsvorteile bei der Begutachtung und Weiterentwicklung von Verfahren mit hohen Hemmstoffkonzentrationen (Folgeprojekte, zum Beispiel zur Optimierung der Stickstoffbindung in Form von Biomasse) und internationale Vernetzungsmöglichkeiten.

Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Konzeption einer großtechnischen Anlage zur kombinierten GÜlleaufbereitung bildet eine gute Basis für die Umsetzung potenzieller Anschlussprojekte (Modellvorhaben) für die Industriepartner AEV und EE. Zudem eröffnet sich eine Erweiterung der Geschäftsfelder/ des Kundenkreises, da die biologische Entstickung nicht nur ausschließlich für Biogasanlagen interessant ist, die sehr stickstoffreiche Substrate (z. B. Hühnertrockenkot) einsetzen. Bedarf für die Reduzierung der Stickstofffracht kann auch bei Anlagen gegeben sein, die ihren Gärrest auf Böden ausbringen müssen, der von Überdüngung bedroht ist. Abhängig von den politischen Entwicklungen in der Landwirtschaft und dem Naturschutz könnte diese Problematik zukünftig weitere Einsatzmöglichkeiten der Gärrestentstickung bieten. Das Verfahren könnte dann auch bei Anlagen eingesetzt werden, die GÜlle und/ oder Nawaro als Substrat nutzen. Hierbei spielt auch Phosphat eine Rolle. Die im Gärrest vorkommenden Phosphate sind schlecht wasserlöslich und verbleiben daher bei der Fest-Flüssig-Trennung größtenteils in der festen Phase. Durch das Abtrennen des Wassers kann so eine erhebliche Aufkonzentrierung bewirkt werden. Der feste, phosphathaltige Gärrest kann dann als Nährstofflieferant auf Böden transportiert werden, die nicht von Überdüngung bedroht sind. Somit können Anschlussprojekte, z. B. für die biologische Stickstoffreduzierung bei der generellen Gärrestaufbereitung, aber auch GÜlleaufbereitungsanlagen entwickelt werden, mit dem Ziel, eine passgenaue Bereitstellung von Nährstoffen für landwirtschaftliche Betriebe zu ermöglichen.

4 Erkenntnisse von Dritten

Innerhalb der Projektlaufzeit sind keine Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

5 Veröffentlichungen

Das Forschungsprojekt GülleKOM wurde auf der internationalen Fachmesse für innovative Energieversorgung, Energy Decentral 15. -18. November 2022 in Hannover in Form eines Handouts vorgestellt. Zudem ist ein Projektdatenblatt auf der FNR Homepage veröffentlicht: <https://biogas.fnr.de/wirtschaftsduenger/fue-projekte>

Das Konzept des Forschungsprojektes und erste Ergebnisse der Untersuchungen im Labormaßstab wurden beim Statusseminar der FNR zur Wirtschaftsdüngerverwertung mit einem DBFZ Beitrag vorgestellt (F. Schäfer (2023) Kombiverfahren zur GÜlleaufbereitung. Statusseminar Vergärung von Wirtschaftsdüngern - Aktuelle Forschungsvorhaben, 02.02.2023).

Ergebnisse der Untersuchungen im Labormaßstab und das Konzept zur optimierten Kombination aus aerober und anaerober GÜllebehandlung wurden bei der IBBK Konferenz „Fortschritt GÜlle & Gärprodukt, 7. – 9. November 2023, Schwäbisch Hall, mit einem DBFZ Poster vorgestellt (Schäfer, F., Pröter, J., Pätz, R. (2023) Kombination anaerober und aerober Verfahren zur GÜllebehandlung – GülleKOM).

Ein Teil der im GülleKOM Projekt ermittelten Ergebnisse wurde im Rahmen eines Artikels zum Vorgängerprojekt Nred (FKZ: 22042118) im Biogasjournal veröffentlicht. W. Rudolph (2024) Ohne Hemmung Vergären. Biogasjournal 3_2024

Im Rahmen einer Präsentation und eines Tagungsbandbeitrages des DBFZ wurden weitere Projektergebnisse beim 18. Rostocker Biomasseforum (20. und 21. Juni 2024) veröffentlicht (F. Schäfer, R. Pätz, A. Himmelstoss, R. Ellmann, J. Pröter (2024) Kombination anaerober und aerober Verfahren zur Güllebehandlung – GülleKOM).

Eine Teilnahme (Projektvorstellung am Messestand) an der Energy Decentral (November 2024, Hannover) und an der Biogas Convention (November 2004, Kassel) erfolgte durch den Projektpartner AEV.

6 Anhang

In den Kapiteln 6.1, 6.2 und 6.3 werden die Arbeiten und Ergebnisse der Teilvorhaben kurz dargestellt.

6.1 Teilvorhaben 1: Verfahrensentwicklung im Labormaßstab

Ziele, bearbeitete Arbeitspakete und wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 1, Verfahrensentwicklung im Labormaßstab, werden im folgenden Abschnitt erläutert.

6.1.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 1

Ziel des Teilvorhabens war die Entwicklung eines Verfahrens zur optimalen Kombination von aerober Gülleaufbereitung und anaerober Güllevergärung. Die Hauptziele waren:

- Kombination von aeroben Verfahren zur Gülleaufbereitung (Stickstoffreduzierung) mit anaerober Güllevergärung → ermöglicht energetische Nutzung (wirtschaftliche Aufwertung der aeroben Güllebehandlung)
- Einbindung einer Verfahrensstufe zur Proteingewinnung aus Gülle → ermöglicht Stickstoffrecycling

Im Labormaßstab sollten dazu Prozessparameter ermittelt, optimiert und anschließend in den Pilotmaßstab übertragen werden. Die Konzeptentwicklung der kombinierten Behandlung (Anordnung der Verfahrensstufen: zuerst aerob oder anaerob) erfolgte durch Auswertung der Versuche im Labormaßstab mittels Massenbilanzierung. Diese Bilanzierung bildete zudem die Grundlage zur Umsetzung des optimierten Konzepts in den Pilotmaßstab. Die im Pilotmaßstab ermittelten Parameter dienten der Anpassung der Massenbilanzierung und der Übertragung des GülleKOM Verfahrens auf den technischen Maßstab.

6.1.2 Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens 1

Der Hauptanteil der Projektkoordination (AP 1) lag beim DBFZ. Zum Erreichen der oben genannten Ziele erfolgte in AP 2 eine umfassende Literatur- und Patentrecherche bezüglich der Verfahren und Anlagen zur aeroben Güllebehandlung. Die ermittelten Daten unterstützten die Versuchsplanung von AP 3 (Verfahrensentwicklung im Labormaßstab) und die Konzeptentwicklung in AP 4. Ziel des Arbeitspakets 3 war die Ermittlung von Basisparametern (notwendige Sauerstoffeintragsleistung, Verhältnis zwischen

Nitrifikations- und Denitrifikationsphasen, optimaler Schlammgehalt) für die Prozessführung der Aerobstufe (Kaskadenschaltung mit Denitrifikationsvorstufe). Um die wirtschaftlich sinnvollste Anordnung der Prozesskomponenten aerobe und anaerobe Schweinegülle-Behandlung zu ermitteln, wurden die Methanpotenziale der einzelnen Stoffströme (Substrat unsepariert, separierter Feststoff, Klarlauf und Überschussschlamm) in Batch-Versuchen bestimmt.

Auf Basis der Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden Stickstoff- und Massenbilanzen erstellt. Diese Daten dienten der Diskussion verschiedener Varianten der Einbindung der Anaerobstufe (vor oder nach Stickstoffreduzierung). Dabei stand sowohl die Energiebilanz der Kombinationslösung beider Systeme (anaerob und aerob) im Vordergrund, als auch die Nährstoffkonzentrationen im Verhältnis zum verfügbaren Kohlenstoff. Ziel war die Bewertung beider Konzepte hinsichtlich der Biogasgewinnung, Stickstoffreduzierung und Biomassegewinnung. Das optimale Konzept zur Güllebehandlung wurde im Pilotmaßstab umgesetzt (AP 5). Es erfolgte dazu ein Upscaling der aus dem Labormaßstab (AP 3) ermittelten Parameter. Auf Basis der Ergebnisse aus dem Pilotmaßstab wurde die Bilanzierung in AP 4 aktualisiert und ermöglichte die Übertragung des GülleKOM Konzepts auf den technischen Maßstab (AP 6).

6.1.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 1

Schwerpunkt der Recherche waren aerobe Verfahren der biologischen Stickstoffreduzierung und Verfahren der Biomassegewinnung aus Gülle. Dabei wurden auch Verfahren betrachtet, die sich mit der Gewinnung von Futtermitteln aus Gülle beschäftigten und aus verschiedenen Gründen nicht weitergeführt wurden. Hierfür erfolgte insbesondere die Prüfung von Patenten und Berichten, die im Rahmen von Forschungsprojekten der Akademie der Wissenschaften (der DDR) erstellt wurden und durch die Zusammenarbeit mit dem am aktuellen Forschungsprojekt GülleKOM beteiligten Prof. Dr. Reinhardt Pätz zur Verfügung gestellt wurden. Eine Zusammenfassung der ermittelten Daten ist Kapitel 1.1.3 zu entnehmen. Im Ergebnis der Recherche wurden 4 Hefestämme *Metschnikowia pulcherrima* Me-0118 (DSM 70879), *Pichia membranifaciens* Y1 (DSM 21959), *Cyberlindnera jadinii* (DSM 2361), *Pichia jadinii* Ca-3308 (DSM 70163) für die Untersuchungen zur Kultivierung auf Schweinegülle ausgewählt.

Möglichkeiten zur Nutzung der gewonnenen Biomasse sind auf Grund rechtlicher Rahmenbedingungen, die auf Abfallprodukten basierende Tiernahrung ausschließen, eher bei technischen Anwendungen zu finden. Hier ist die Eignung des Mikrobenproteins für Anwendungen, die für pflanzliche Proteine beschrieben wurden, wie:

- Proteinkleber
- Bindemittel in Farben und Lacken
- Schmierstoffadditive
- Faserstoffe
- Baumaterialien

zu prüfen [11], [29]. Ein Vorteil bei der Nutzung alternativer Proteinquellen entsteht durch den Ersatz erdölbasierter Rohstoffe.

Bei der aeroben Behandlung von Schweinegülle im Labormaßstab durch die Laborkläranlage, wurde der Ammoniumstickstoff-Gehalt bis zu 99 %, der Gesamtstickstoff-Gehalt bis zu 83 % reduziert (Abbildung 6

,2.2.1). Eine Hemmung der Denitrifikation kann dazu führen, dass Stickstoff in Form von Nitrat liegen bleibt. Für einen späteren Einsatz von Klarlauf oder Überschussschlamm im Biogasprozess ist das nicht nachteilig. Im Biogasprozess wird unter anaeroben Bedingungen Nitrat und Nitrit sofort wieder zu Ammonium reduziert, so dass die eigentliche Ammoniumstickstoff-Entfernung niedriger ausfällt. Laut Sheng et al. wirkt sich Nitrat bis zu einer Konzentration von $1,5 \text{ g L}^{-1}$ sogar positiv auf den Biogasprozess aus [22]. Ob es sinnvoll ist die aerobe der anaeroben Behandlung voranzustellen, sollte durch die Untersuchung des Methanpotenzials der einzelnen Stoffströme ermittelt werden (2.2.2). Der spezifische Methanertrag in abgetrenntem Feststoff der Schweinegülle und Überschussschlamm aus der Laborkläranlage war niedriger im Vergleich zum Ausgangssubstrat (bei aerober Vorbehandlung der Schweinegülle). Für den Klarlauf war kein Methanertrag messbar. Hieraus geht hervor, dass bei der Vergärung von Überschussschlamm und abgetrenntem Feststoff nur 40 % des potenziellen Methanertrags der Schweinegülle genutzt werden. Der Rest des Potenzials würde einer energetischen Nutzung verloren gehen. Daher schien es zunächst einmal sinnvoller, den Biogasprozess einer aeroben Behandlung voranzustellen. Im Rahmen von AP 3 wurde auch die Gewinnung von Hefe und bakterieller Biomasse aus Gülle untersucht (2.2.3). Im Ergebnis von Wachstumsversuchen in Schüttelkolben (um die optimalen Wachstumsbedingungen und Konsortien-Zusammensetzungen, bei denen die höchste Proteinausbeute erzielt wird, zu ermitteln), wurde ein Hefestamm (*M. pulcherrima* Me-0118) für die weiterführende Kultivierung auf Schweinegülle im kontinuierlichen Verfahren ausgewählt. Bei Co-Kultivierung mit *B. subtilis* war die deutlichste $\text{NH}_4\text{-N}$ -Reduzierung von 2,9 auf $1,1 \text{ g L}^{-1}$ messbar (Abbildung 17). Dies war der einzige Versuchsansatz, bei dem ein relativ geringer Anstieg im Rohproteingehalt von 1,8 auf $6,2 \text{ g L}^{-1}$ festgestellt wurde (Abbildung 15). Weitere Untersuchungen sind notwendig, um diesen Ansatz zu verstätigen bzw. die Proteinausbeute zu erhöhen und das gewonnene Mikrobenprotein so einer möglichen Nutzung zuzuführen. Ein maßgebendes Hindernis bei der Kultivierung der Hefen auf Schweinegülle war die Überlagerung durch andere Mikroorganismen in der Schweinegülle.

Im Rahmen von AP 4 erfolgte die Konzeptentwicklung für das GülleKOM Verfahren. Das finale Konzept für die Umsetzung im Pilotmaßstab basierte auf einer Teilstrombehandlung der Rohgülle. Das Schema dazu ist Abbildung 23 zu entnehmen. Daraus geht hervor, dass ein Großteil des Stickstoffs aus der Schweinegülle bei der kombinierten Behandlung an der Pilotanlage in molekularen Stickstoff umgesetzt wird. Somit wird der Gesamtstickstoff-Gehalt (TKN + Nitritstickstoff + Nitratstickstoff) durch die Behandlung wesentlich reduziert. Grundsätzlich ist es Ziel die Produktion von molekularem Stickstoff durch Fixierung des löslichen Ammoniumstickstoffes in abtrennbarer Biomasse (entspricht dem Klärschlamm einer Kläranlage) zu minimieren. Im Gegensatz zum klassischen Kläranlagenprinzip bestand hier die Maßgabe, den Anfall an Klärschlamm zu maximieren. Bei der Umsetzung des Verfahrens im Pilotmaßstab konnten nur 5,2 %, der in der Gülle enthaltenen organischen Substanz im Belebtschlamm fixiert werden. Bei der im Rahmen des Projektes durchgeführten Variante des Verfahrens, wurde der Belebtschlamm der Fermentation zugeführt, hat aber nur zu einem geringen Anteil zum Biogasertrag beigetragen (Für Schweinegülle Charge VII wurde ein spezifischer Methanertrag im Belebtschlamm von 48 mL g oTS^{-1} gemessen). Gegenstand weiterer Forschung sollte sein, den Belebtschlammanteil zu erhöhen. Neben einer Anpassung der Betriebsparameter der aeroben Behandlung ist dafür auch eine andere Abscheide-Technik erforderlich. Bei der aeroben Behandlung wurden 17 % oTS des Anlagenzulaufs abgebaut (Abbildung 25). Das fertige Konzept diente der Übertragung auf den technischen Maßstab. Dafür wurde die Bilanz auf eine 500 kW Anlage angepasst (Abbildung 30, 2.5).

Das optimale Konzept zur Güllebehandlung wurde im Pilotmaßstab umgesetzt (2.4). Es erfolgte dazu ein Upscaling der aus dem Labormaßstab (AP 3) ermittelten Parameter. Der Biogasreaktor wurde bei einer Verweilzeit von 29 d und einer Raumbelastung von 1 bis 2 g oTS L⁻¹ d⁻¹ betrieben. Die aerobe Behandlung erfolgt in drei Behältern, Denitrifikation, Nitrifikation und Nachklärung (absetzen von Überschussschlamm, Klarlauf im Überstand), bei einer Verweilzeit von 27 d und einem Schlammalter von 30 d. In der Nitrifikation wird ein Sauerstoffgehalt von 0,9 – 1 mg L⁻¹ eingestellt. Es erfolgte eine 4-fache Rückführung (bezogen auf das Zulaufvolumen von 6 L) von Überschussschlamm in die Denitrifikation (Schlammrückführung: 24 L d⁻¹) und für den internen Kreislauf zwischen Nitrifikation und Denitrifikation (24 L d⁻¹). Durch Optimierungen der technischen Voraussetzung (Belüftung, Sauerstoffeintrag, Schlammrückführung) wurde der NH₄-N-Umsatz bei der Nitrifikation/ Denitrifikation der Pilotanlage weiter gesteigert auf > 90 % (0,08 g L⁻¹ im Klarlauf) (Abbildung 29). Nach Abschluss der Versuche zur Teilstrombehandlung der Schweinegülle, wurde über einen Versuchszeitraum von 25 d 100 % Rohgülle als Substrat eingesetzt. Über diesen letzten Versuchsabschnitt ergab sich ein mittlerer spezifischer Methanertrag von 139 ± 10 mL g oTS⁻¹ im Vergleich zu 127 ± 14 mL g oTS⁻¹ bei Einsatz der selben Schweinegülle-Charge in der Teilstrombehandlung (Abbildung 27, Abbildung 28). Somit wurden bei der Teilstrombehandlung im GülleKOM-Verfahren 90 % des Methanertrags im Vergleich zur Monovergärung der Schweinegülle erreicht. Dieses Ergebnis deckt sich mit den theoretischen Berechnungen, die eine Verringerung des Methanertrages zwischen 2 und 10 % ergaben.

6.2 Teilvorhaben 2: Versuchsplanung und Verfahrensbewertung

Ziele, bearbeitete Arbeitspakete und wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 2, Versuchsplanung und Verfahrensbewertung, werden im folgenden Abschnitt erläutert.

6.2.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 2

Ziel von Teilvorhaben 2 war die Versuchsplanung (Prozessoptimierung) der aeroben Güllebehandlung in Labor- und Pilotmaßstab. Bezogen auf die Verfahrensstufe zur aeroben Güllebehandlung erfolgten auch eigene Versuche im Labormaßstab (simultane Betriebsführung zur aeroben Güllebehandlung). Im Rahmen von Teilvorhaben 2 sollte zudem eine Verfahrensbewertung (Auswertung Prozessparameter) vorgenommen werden, als Beitrag zur Konzeptentwicklung des GülleKOM-Verfahrens und zur Übertragung in den technischen Maßstab. Schließlich war es Ziel, das Konzept einer großtechnischen Anlage bis zu den für eine Genehmigung erforderlichen Daten zu entwickeln.

6.2.2 Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens 2

Im Rahmen von AP 3 wurden bei EE Laborversuche zur biologisch oxidativen Stickstoffreduzierung in der Flüssigphase von Rindergülle bzw. Gärrest durchgeführt. Die Versuche wurden mittels simultaner Betriebsführung durchgeführt. Bei diesem Verfahren werden die Teilschritte Nitrifikation und Denitrifikation sowie die Nachklärung in einem Becken ausgeführt. Im Unterschied zum bekannteren SBR (Sequencing Batch Reactor), laufen die Prozesse aber nicht nacheinander, sondern simultan in einer sogenannten Multikaskade ab. Es erfolgte die Ermittlung von Basisparametern für die Prozessführung der Aerobstufe (notwendige Sauerstoffeintragsleistung, Verhältnis zwischen Nitrifikations- und Denitrifikationsphasen, optimaler Schlammgehalt) zur Vorbereitung der Konzeptentwicklung und zur Übertragung auf Pilot- und Praxismaßstab (AP 5 und AP 6). Die Entwicklung eines modularen Konzeptes

zur optimalen Kombination von aerober und anaerober Güllebehandlung in AP 4 erfolgte auf Basis der im Labormaßstab des DBFZ und bei EE ermittelten Daten gemeinsam mit allen Projektpartnern. Im Rahmen von AP 6 erfolgte die Konzeption einer großtechnischen Anlage zur kombinierten Gülleaufbereitung (500 kW Anlage). Im Rahmen des Teilvorhabens wurde ein Wärmenutzungskonzept für die großtechnische Anlage erstellt (Darstellung der Ergebnisse im Rahmen von AP 6).

6.2.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 2

Aus den Analysen und Verläufen war klar zu erkennen, dass die Laboranlage zur aeroben Gülle- bzw. Gärrestbehandlung sehr stabil und robust Ammonium zu Nitrat oxidiert und das Nitrat größtenteils durch Denitrifikation in Stickstoff (N_2) umwandelt (Abbildung 20, 2.2.4). Der Abbau von Ammoniumstickstoff lag im Durchschnitt bei 96,3 %. Gegenüber der im Labormaßstab DBFZ durchgeführten Versuche zur aeroben Güllebehandlung mit Kaskadenschaltung ist die simultane Betriebsführung energiesparsamer und wurde daher für die Auslegung in den technischen Maßstab zu Grunde gelegt (2.5). Es wurde eine Anlage zur Verarbeitung von $376 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ Schweinegülle mit einem TS Gehalt von 5,8 % konzeptioniert, ein Lageplan entworfen und die Investition- und Betriebskosten ermittelt (Abbildung 30, Abbildung 31, Abbildung 32, 2.5). Das Substrat und die Mengen wurden deshalb gewählt, da eine solche Anlage ca. 500 kW elektrische Leistung produzieren kann, was für unseren heimischen Markt eine repräsentative Anlagengröße darstellt.

Die Entwicklung eines Wärmenutzungskonzeptes für GülleKOM Anlagen erfolgte basierend auf: Wärmerückgewinnung aus dem Gärrest der anaeroben Fermentation und dem Flüssigdünger am Auslauf der aeroben Biologie und Abwärmenutzung der Verdichter Maschinen für die Belüftung der Aerobstufe. Die Kombination aus anaerober Fermentation und aerober Biologie bietet im vorliegenden Projekt für Praxisanlagen mehrere erfolgversprechende Ansätze für ein sinnvolles Wärmenutzungskonzept auf späteren Praxisanlagen (2.5.3). Dabei muss im konkreten Fall eine Wärmebilanz erstellt und anhand der Investitions- und Betriebskosten entschieden werden, welche der drei genannten Wärmerückgewinnungsverfahren zur Anwendung kommen sollen.

6.3 Teilvorhaben 3: Anlagenauslegung und Rührkonzept

Ziele, bearbeitete Arbeitspakete und wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 3, Anlagenauslegung und Rührkonzept, werden im folgenden Abschnitt erläutert.

6.3.1 Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens 3

Ziel von Teilvorhaben 3 war das Mitwirken an Versuchsplanung und Auswertung der gemessenen Daten im Labor- und Pilotmaßstab, zur Erarbeitung eines ersten verfahrenstechnischen Konzeptes für die optimale Kombination von aerober und anaerober Güllebehandlung. Daran anknüpfend sollte das GülleKOM Konzept auf eine großtechnische Anlage ausgelegt werden. Der Schwerpunkt von Teilvorhaben 3 lag hier bei der Auswahl und Anpassung des Separationsverfahrens. Im Rahmen des Teilvorhabens sollte zudem das Gesamtverfahren aus ökologischer und ökonomischer Sicht bewertet werden.

6.3.2 Bearbeitete Arbeitspakete des Teilvorhabens 3

Im Rahmen von AP 6 erfolgte die Konzeption und Auslegung peripherer Anlagenkomponenten (Fest-Flüssig-Trennung, Rührkonzept für die Aerobstufe) angepasst an die speziellen Anforderungen der kombinierten Güllebehandlung im GülleKOM Verfahren. In AP 7 wurde zur ökonomischen Bewertung die in AP 4 begonnene Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Gesamtverfahrens ausgeweitet. Dabei wurden auch ökologische Gesichtspunkte wie Emissionen, lokale Nährstoffbilanzen und die energetische Bilanz (Wärme, Elektroenergie) betrachtet. Als Basis dafür erfolgte eine umfassende Datenauswertung der Versuche im Labor- und Pilotmaßstab (AP 3 und AP 5). Teil der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung war die Aufstellung einer verbindlichen Kostenkalkulation (Bau- und Betriebskosten). Die ökonomische Bewertung des GülleKOM Verfahrens bildet die Grundlage zum Vergleich mit bestehenden Verfahren der Totalaufbereitung von Gülle oder Gärrest.

6.3.3 Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens 3

Die Fest-Flüssig-Trennung wurde im Labor- und Pilotmaßstab über ein Rüttelsieb realisiert (Maschenweite 2 mm). Damit wurden TS-Gehalte von 1 bis 2,5 % erreicht (2.2.1, 2.4). Für eine größere Anlage bietet sich der Pressschneckenseparator an. Der entstehende Feststoff ist mit etwa 30 % direkt zur Kompostierung und Humusherstellung geeignet. Durch die Siebform ist die Trockensubstanz der flüssigen Phase geringer als beim Bogensieb. Durch Zusatz von Flockungsmitteln oder Flockungshilfsmitteln könnte der Restgehalt an TS oder oTS noch gesenkt werden. Bei großen Anlagen könnten Dekanter eingesetzt werden. Allerdings haben Dekanter zwei große Nachteile; der Energiebedarf ist höher als bei Pressschneckenseparator und die Zusammensetzung des Feststoffes ist ggf. schlammiger. Es wäre einfacher, mehrere Pressschneckenseparator als einen Dekanter einzusetzen (2.5.2). Bei dem Rührkonzept für die Aerobstufe ist beispielsweise zu beachten, dass die Bemessungsgrenzen für die Auslegung von Rührwerken in Kläranlagen nicht für die geplante Anwendung auf separierte Gülle/Gärrest geeignet sind (2.5).

Ingesamt betrachtet kann durch die Ergänzung der anaeroben Vergärung als Verfahrensstufe zur aeroben Güllebehandlung die Wirtschaftlichkeit im Vergleich zur aeroben Gülleaufbereitung verbessert werden (5,58 €/m³ Gülle vermutlich günstiger im Vergleich zur rein aeroben Behandlung im BioArmor Verfahren, [3]). Bezogen auf einen EEG konformen Betrieb kann darüber hinaus sogar ein Gewinn von 5,56 €/m³ Gülle bei der Teilstrombehandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren erwirtschaftet werden (Tabelle 13, 2.6.1). Bei der ökologischen Betrachtung ist die Verminderung von Treibhausgasen besonders hervorzuheben (2.6.2). Bei der direkten Ausbringung von Gülle und insbesondere auch während der langen Lagerung in nicht gasdicht abgedeckten Behältern endstehen gasförmige Emissionen. Dabei handelt es sich um CO₂, CH₄, N₂O und NH₃. Während der anaeroben Behandlung hingegen werden alle endstehenden Gas gefasst und letztendlich verbrannt. Durch die thermische Oxidation und die nachgeschalteten Katalysatoren sind dann (neben kleinen Mengen anderer Gase) nur noch CO₂, N₂ und H₂O im Abgas enthalten. Nach KTBL (2020) ist bei der offenen Güllelagerung (ohne Schwimmschicht) mit einer Methanemission von 3,60 m³ CH₄/m³ Schweinegülle zu rechnen. Würde der tägliche Input von 376 m³ Schweinegülle also 137.240 m³ im Jahr nicht behandelt, sondern nur offen bis zur Ausbringung gelagert, ergäbe sich, vereinfacht betrachtet, eine mögliche Methanemission von 494.064 m³ Methan im Jahr. Durch die kombinierte Güllebehandlung kann dieses Methan gefasst und durch die energetische Nutzung im BHKW zu Kohlenstoffdioxid umgewandelt werden. Weil Methan etwa 21-mal treibhauswirksamer als Kohlenstoffdioxid ist, entspricht dies einen CO₂-Äquivalent von gut

10 Mio. m³ oder umgerechnet 19.713 t CO₂. Hinzukommen die Einsparungen an Heizenergie für die Schweinemastanlage welche vom vorher genutzten Energieträger abhängig sind. Ebenso verhält es sich mit den Treibhausgasen, die durch die Stromproduktion vermieden werden.

6.4 Vorgaben zur Erstellung einer Massen- und Stickstoffbilanz zur Teilstrombehandlung von Schweinegülle im GülleKOM Verfahren

		Pilotanlage ins Modell übertragene Werte	
Rohgülle	Schweinegülle Charge V		
	Menge an Gülle in kg	5,128	
	TS in %	5,79	
	oTS in %	78,23	
	g/kg TS TKN	70	
	g/kg FM NH ₄ -N	3,34	
	FoTS in % TS	60,80	
	lösl. inerter TS-Anteil in %	5,00	
	Methanpotential ml/goTS	133	berechneter Kontiwert aus Batch Pilotanlage Charge IV
	Methangehalt gem. oder KTBL	59,00	gemessen in Pilotanlage
	g/L NO ₂ -N	0,0017	Werte von gesiebter Gülle
	g/L NO ₃ -N	0,0206	Werte von gesiebter Gülle
	Faktor Teilstromaufteufung der Gülle	0,5	
abgesiebter Feststoff	Schweinegülle Charge IV		
	TS in %	14,30	
	g/kg TS TKN	40,00	
	g/kg FM NH ₄ -N	1,50	
	FoTS in % TS	60,80	
	lösl. inerter TS-Anteil in %	38,15	
	Methanpotential ml/goTS	177,00	Charge IV 65 % des Batchwertes aus Kontiabschätzung
	Methangehalt gem. oder KTBL	59,0	
ausgekreister Belebtschlamm	Schweinegülle Charge IV		
	TS in %	1,50	
	oTS in %	65,00	
	FoTS in % TS	60,80	
	lösl. inerter TS-Anteil in %	38,15	
	Methanpotential ml/goTS	48,00	Charge VII
	Methangehalt gem. oder KTBL	52,0	
Siebung Gülle	Schweinegülle Charge V		
	Gülle kg	84,8	Charge V
	Feststoff kg	25	
	flüssig kg	59,8	
gesiebte Schweinegülle	Schweinegülle Charge V		
	% TS lösl. inerter TS-Anteil	38,15	
	oTS %	58,12	
Entstickung	Basis Laborkläranlage Laborkläranlage in kg/d	0,40	
	Faktor für Rücklauf Nitrifikation bezogen auf Zulauf	4	
	Faktor für Schlammrückführung bezogen auf Zulauf	4	
	% Schlammkreisung bezogen auf Zulauf	35,12	
	Faktor Verdünnung Flüssigphase	0	
	Probenahme in L/d	0	
	Reduzierung Gesamt N in g/d	14,46	
	Abbau organischer Inhaltsstoffe in kg/L	0	
	gemessene Summe oTS in Überschussschlamm und Nachklärung in g	38,66	
	gemessene Summe NH ₄ in Überschussschlamm und Nachklärung in g	0,67	
	Nachklärung		
	% Abtrennung Feststoff	100,00	
	% Abtrennung TKN	95,00	
BGA	% Abbau TKN zu NH ₄	34,0	
	% Wasseinbau ins Biogas bezogen auf FoTS	11,3	
	% Biomassebildungs bezogen auf FoTS	5,0	
Separation Gärrest	% Abtrennung Feststoff	99,8	
	% TS des f, abtrennbaren Feststoffes	15,5	
	% Abtrennung TKN	80,0	
	% Anteil oTS in Feststoffphase	70,0	
FM	Frischmasse		
KTBL-Werte	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2021): Gasaubeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. ISBN 978-3-945088-85-2		

6.5 Kostenkalkulation kombinierte Güllebehandlung mit EEG



Kostenkalkulation kombinierte Güllebehandlung GülleKOM

	Anzahl Einh	Betrag
Behälterbau		
Unterbau		
Sauberkeitsschicht und Leckerkennungssystem, Lieferung und Montage, D = 25 m, Montage bauseits	491 m²	8.929
Schutzvlies für Fermenter	572 m²	1.711
Leckerkennungssystem Ansprung für Fermenter	1 St.	28.074
Kontrollstandrohr, KG DN 200, mit Abdeckung, l = 1,0 m, inkl. Montage	3 St.	0
Befestigungsband, Edelstahl oder PE, inkl. Montage	77 m	0
Feuchtesensor	1 St.	1.760
Behälter (Fermenter neu)		
Baustelleneinrichtung	1 Stk.	13.874
Betonbehälter, D = 40 x 6,5 m	7.500 m³	609.375
Wärmedämmung Bodenplatte	527 m²	6.849
Pumpensumpf	1 Stk.	315
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1 Stk.	2.824
Erdungspunkte	4 Stk.	1.357
Fermentertür 0,6 x 0,6 m, Edelstahl	1 St.	4.973
Leitungsdurchbrüche DN 100	22 Stk.	2.059
Leitungsdurchbrüche DN 200	4 Stk.	520
Dämmung und Verkleidung mit Sandwichelemente, 6/10 cm	898 m²	35.642
Montage und Befestigungsmaterial für Verkleidung	898 m²	23.349
Wärmedämmung Decke, Kiesschüttung, Gehwegplatten, Abdichtung, ca. 5 cm	540 m²	35.080
Behälter Annahmebehälter		
Baustelleneinrichtung	0 Stk.	0
Betonbehälter, D = 5 x 6 m, offen	800 m³	45.000
Pumpensumpf	1 Stk.	311
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1 Stk.	3.501
Erdungspunkte	1 Stk.	339
Leitungsdurchbrüche DN 100	4 Stk.	374
Behälter Filtratschacht		
Betonbehälter, D = 2 x 4 m, Fertigbauteil	10 m³	2.500
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1 Stk.	250
Erdungspunkte	1 Stk.	339
Leitungsdurchbrüche DN 100	2 Stk.	187
Behälter Puffertank		
Betonbehälter, D = 5 x 6 m,	100 m³	45.000
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1 Stk.	250
Erdungspunkte	1 Stk.	339
Leitungsdurchbrüche DN 100	2 Stk.	187
Stahlbau (Behälter neu)		
Aufstieg und Arbeitsbühnen für Rührwerke am Fermenter, H = 6,5 m, Aufstieg mit Treppe	1 St.	32.500
Absturzsicherung am Fermenter	76 m	12.842
Zwischensumme		920.610 €
Nitrifikation Denitrifikatoin Ring in Ring, Innen Absetzbecken, dann Zwischenspeicher, außen Nitri- Deni Becken		
Unterbau		
Leckerkennungssystem, Lieferung und Montage, D = 40 m, Montage bauseits	1.521 m²	35.580
Kontrollstandrohr, KG DN 200, mit Abdeckung, l = 1,0 m, Montage bauseits	4 St.	600
Behälter (neu)		
Nitrifikation/Denitrifikation		
Ring im Ring System aus Beton, äußerer Ring für Nitrifikation/Denitrifikation, Größe siehe Auslegung Kläranlage	7.000 m³	315.000



Ring im Ring System aus Beton, mittlerer Ring als Zwischenspeicher und Vorlage, Betonring, Größe siehe Auslegung Kläranlage	500 m³	22.500	
Leitungsdurchbrüche	8 Stk.	2.400	
Verbindungssteg zwischen den Ringen, L = ca. 20,0 m, B = 1,0 m,	20 m	30.000	
Rührtechnik			
Rührtechnik Nitrifikations/Denitrifikationsring, Zwischenbehälter			
Rührtechnik, 16,0 kW,	5 Stk.	47.925	
Führungsrohr, Bedienung und Kabeldurchführung	5 Stk.	18.359	
Belüftungssystem			
Eintragungssystem aus perforierten Rohren	1 Stk.	38.340	
Drucklufizerzeuger	1 Stk.	186.999	
Separatoren			
Kugler® E-OP 11-120 PP	2 Stk.	194.290	
Flockungstank	2 Stk.	9.855	
Schaltschrank	2 Stk.	39.545	
Zwischensumme		1.293.889 €	1.293.889 €
Abdeckung / Gasspeicher Fermenter			
Abdeckung, Kugelkappe, D = 40,0 m, 11.800 m³ Gasspeicher, für Fermenter	1 Stk.	188.573	
Mannloch zur Gasspeicherfolie	1 Stk.	8.730	
Einbindung Serviceschacht	2 Stk.	6.548	
Mittelstütze, 8,0 m, Edelstahl, für Behälter	1 Stk.	3.153	
Fundament Mittelstütze	1 St.	1.468	
Betonschutz Epoxidharz, 2 lagig			
Betonschutz für Decke, Epoxidharz, ohne Montage für Behälter D = 40 m	600 m²	22.620	
Zwischensumme		231.091 €	231.091 €
Abdeckung / Gasspeicher Nitr/Denitrifikation			
Abdeckung, Ring, D = 10,5 m, Betondecke	1 Stk.	55.000	
Einbindung Serviceschacht	4 Stk.	13.095	
Betonschutz Epoxidharz, 2 lagig			
Betonschutz für Decke, Epoxidharz, ohne Montage für Behälter D = 40 m	850 m²	32.045	
Zwischensumme		100.140 €	100.140 €
Unter- / Überdrucksicherung			
Unter- / Überdrucksicherung, DN 250	3 Stk.	18.377	
Zwischensumme		18.377 €	18.377 €
Rührtechnik			
Rührtechnik für Fermenter			
Rührtechnik, 15,0 kW, Eex	3 Stk.	28.719	
Serviceschacht mit Zubehör, Foliendach			
Serviceschacht Foliendach	3 Stk.	72.900	
Führungsrohr 150 x 150 mm, Bedienung und Kabeldurchführung	3 Stk.	12.023	
Zwischensumme		113.642 €	113.642 €
Pumpentechnik			
Drehkolbenpumpe für Fest/Flüssig Trennung und Beschickung			
Drehkolbenpumpe VX 186-184 Q, 150 m³/h, 22 kW	4 St.	37.440	
Trockenlaufschutz	4 St.	1.308	
Drucküberwachung	8 St.	5.760	



Gummi-Kompensator DN 150	8 St.	4.128	
KPO für Vorgube			
KPO, 22 kW, Tauchmotor	1 St.	11.207	
Fü-Rohr 6,0 m, Einrastung, Steckgalgen, Edelstahl	1 St.	3.664	
KPU für Nachklärer			
KPU, 11,0 kW, Lanwellenausführung, L = 2,0 m, verzinkt	1 St.	5.397	
Unterflurabgang	1 St.	570	
Zwischensumme		69.473 €	69.473 €
Heizungsbau			
Heizungsbau Substratheizung Fermenter			
Heizungsbau			
ROHR 1.4301 TIG 114,3X2,0 *6M	37 St.	13.226	
SCHON LAUT ZEICHNUNG GEBOGEN			
INOX 304 SCHWEISSBOGEN 114,3X2	4 St.	144	
INOX 304 RED 114,3X60,3X3	4 St.	168	
ROHR 1.4301 TIG 60,3X2,0 *6M	3 St.	348	
INOX 304 SCHWEISSBOGEN 60,3X2	4 St.	72	
INOX 304 RED. 76,1-60,3X2	0 St.	0	
INOX 304 GEWINDESTUTZEN 2"	4 St.	32	
INOX 304 GEWINDESTUTZEN 1/2"	4 St.	32	
Ringraumdichtung D = 60/100 mm	4 St.	440	
Halter für Heizung	24 St.	4.800	
Halter für Heizung, Doppelrohr	24 St.	6.000	
Zwischensumme		25.262 €	25.262 €
Heizungsbau Gesamtanlage (geschätzt)			
Heizungsrohr, isoliert, 63 x 51,4 mm	50 m	4.725	
Heizungsrohr, isoliert, 90 x 8,2 mm	0 m	0	
Heizungsrohr, isoliert, 110 x 10,0 mm	0 m	0	
T-Stück Isolierung	4 St.	1.172	
T-Stück	4 St.	518	
Reduzierung DN 100 / DN 75	0 St.	0	
Heizungsrohr, isoliert, 63 x 5,8 mm	25 m	2.464	
Übergang Stahlleitung	4 St.	1.080	
Einheit Mischer, Temperaturfühler Anbindung an Fermenterheizung	1 St.	1.013	
Ausdehnungsgefäß, Sonstiges	1 St.	6.750	
Heizungspumpe BHKW	1 St.	4.725	
Heizungspumpe Verbraucher	1 St.	4.725	
Heizungspumpe Wärmerückgewinnung	0 St.	0	
Anbindung Gasbrenner	0 St.	0	
Anbindung BHKW (Neu)	1 St.	10.125	
Anbindung BHKW (Bestand)	0 St.	0	
Heizungsverteiler 1 x BHKW, 1 x BGA, 1 x Trocknung, 1 x Res, 1 x Biogaserwärmung	1 St.	13.500	
Anbindung Gastrocknung	1 St.	2.700	
Plattenwärmetauscher, ca. 600 kW	0 St.	0	
Anbindung AWT 2 des BHKW an Heizungssystem	0 St.	0	
Anbindung GMK 2 des BHKW an Heizungssystem	0 St.	0	
Anbindung Wärmerückgewinnung BGAA an Heizungssystem	0 St.	0	
Anbindung Pufferspeicher Heizungssystem	0 St.	0	
Heizungssystem, Richtpreis	0 St.	0	
Puffertank			
Pufferspeicher, ca. 103 m³, Isolierung	1 St.	38.530	
Zwischensumme		98.026 €	98.026 €
Leitungsbau Biogas, Edelstahl			
Edelstahl			
Edelstahlleitung DN 150	30 m	1.680	
Edelstahlbogen DN 150	10 St.	1.180	
Edelstahlflansch mit Börde DN 150	8 St.	192	
Rohrschellen, DN 150, V2A	5 St.	691	
Reduzierung Edelstahl DN 150/DN 100	2 St.	80	



Absperrklappen DN 150 (Biogasleitung), mit Pneumatik-Antrieb, stromlos geschlossen	0 St.	0
Gasdrossel mit Stellantrieb, DN 100, reduziert auf DN 65	0 St.	0
Edelstahl T-Stück DN 150	0 St.	0
Schweißbördel mit Losflansch, DN 150/160	0 St.	0
Absperrklappen DN 150 (Biogasleitung)	4 St.	894
Absperrklappen DN 200 (Biogasleitung)	0 St.	0
Leitungsbau Biogas, PE		
PE-Rohr DN 150/160	50 m	1.400
PE-Winkel 90°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 45°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 30°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 22°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 15°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Bogen 45°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bogen 90°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bubu mit Losflansch, DN 150/160	4 St.	440
PE-T-Stück, DN 150/160	1 St.	106
Schweißmuffe, Elektro, DN 150/160	25 St.	1.100
Rohrschellen, DN 150, V2A	0 St.	0
Belüftungsventil, 2", V2A mit Anbohrschelle DN 150	0 St.	0
Ringraumdichtung 200/160	0 St.	0
Kondensatablauf in Vorgrube, ohne Pumpe	0 St.	0
Kondensatablauf in Vorgrube, mit Pumpe und Anbindung Vorgrube	1 St.	2.000
Leitungsbau Substrat		
PE-Rohr DN 150/160	75 m	2.100
PE-Winkel 90°, DN 150/160	10 St.	1.000
PE-Winkel 45°, DN 150/160	10 St.	1.000
PE-Winkel 30°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 22°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 15°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Bogen 45°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bogen 90°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bubu mit Losflansch, DN 150/160	10 St.	1.160
PE-T-Stück, DN 150/160	0 St.	0
Rohrschellen, DN 150, V2A	10 St.	1.382
Schweißmuffe, Elektro, DN 150/160	50 St.	2.200
Belüftungsventil, 2", V2A mit Anbohrschelle DN 150	1 St.	168
Ringraumdichtung 200/160	4 St.	355
Kernbohrung 200 mm	4 St.	400
Ausführung Doppelwandig		
PE-Rohr DN 150/160 im KG-Schutzrohr inkl. Gleitkufen	50 m	3.950
Anbohrschelle DN 160/2"	2 St.	144
Kompensationsstücke		
Gummi-Komp. DN 150	4 St.	1.101
Zwischenflanschsieber		
Zwischenflanschschieber DN 150, Hand	6 St.	2.657
Spülanschluss	1 St.	300
Verteiler T-Stücke		
Kreuz mit DIN-Flansch DN 150, verzinkt	4 St.	5.700
Probeentnahme	1 Stk.	400
Technik-Gebäude		
Beton-Technik-Container, LxBxH = ca. 8,5 x 3,7 x 3,0 m	1 St.	45.989
Dämmung Biogasleitungen ab Gasreinigung	1 St.	28.600
Zwischensumme		118.762 €
Montage		
Montage Stahlbau		
Kleinteile	1 St.	12.242
Montagekosten	1 St.	3.061

**Montage U-/Ü-Drucksicherung**

Kleinteile	1 St.	2.481
Montagekosten	1 St.	4.962

Montage Rührtechnik

Lieferung und Montage Rührtechnik	1 Stk.	11.506
-----------------------------------	--------	--------

Montage Pumptechnik

Kleinteile	1 St.	4.689
Montagekosten	1 St.	14.068

Montage Fermenterheizung

Kleinteile	1 St.	2.558
Montagekosten	1 St.	13.641

Montage Leitungsbau

Kleinteile	1 St.	3.563
Montagekosten, inkl. Spiegelschweißen	1 St.	44.536

Zwischensumme

117.307 €	117.307 €
------------------	------------------

Elektroinstallation / Steuerung / Sensoren

Steuerung	1 Stk.	52.000
Verkabelung Rührwerkern, Pumpen, Verdichter	1 Stk.	39.000
Druckschalter für Notabschaltung	2 St.	581
Radarsonde für Füllstandsmessung	2 St.	3.729
Überfüllsicherung	2 St.	2.883
Sensoren Druck und (Temperatur)	10 Stk.	4.050
Inbetriebnahme, Fahrkosten, Fahrzeit	1 Stk.	1.337

Zwischensumme

103.580 €	103.580 €
------------------	------------------

Gasfackel

Gasfackel, bis 180 m³, Edelstahl, mit Verdichter	1 Stk.	19.019
Verkleidung, unten, Windschutz	1 Stk.	3.390
Abspannung	1 Stk.	420
Kompensationsstück	1 Stk.	473
Absperrklappen DN 150 (Biogasleitung)	1 St.	497
PE-Rohr DN 150/160	20 m	896
Kleinteile / Fracht	1 St.	1.482
Montagekosten	1 St.	3.704

Zwischensumme

29.880 €	29.880 €
-----------------	-----------------

BHKW 1076 kW

BHKW, 1076 kW, Jenbacher Gasmotor, AWT, Heizsystem, Steuerung, Abgasführung, Lieferung und Montage, Einzelcontainer	1 St.	839.750
Schmierölversorgung		
Schmierölversorgung 2 x 1.000 l	1 St.	0
Schmierölversorgung, Ölpumpen und Verrohrung	1 St.	0
Inbetriebnahme, Aufstellung, Transport	1 St.	0
Vorerwärmung BHKW, hy	1 St.	0
Gaszähler	1 St.	2.530
Autom. Absperrklappe	1 St.	0

SCR-Kat

Inbetriebnahme SCR-Kat	1 St.	607
------------------------	-------	-----

Harnstofftank

Harnstofftank für SCR-Tank, beheizt, 5.000 l	1 St.	8.188
Harnstofftank für SCR-Tank, beheizt, 5.000 l, Transport	1 St.	540
Harnstofftank für SCR-Tank, Drucksensor	1 St.	365

Einspeisung Strom

Trafostation als Kompaktstation, 1.250 kVA, nicht begehrbar	1 St.	140.000
Erdung	3 St.	4.911
Parametrierung	1 St.	4.275
Bürdenmessung	1 St.	675
Übersichtspläne	1 St.	1.993
Anbindung BHKW 1 an Trafostation, NS	20 m	1.500
Anschluss	16 St.	752
NH-Sicherung	2 St.	96



Zwischensumme		1.006.182 €	1.006.182 €
Gaskühlung und Verdichter			
Verdichter, 140 mbar, ca. 690 Nm³/h	1	1 Stk.	9.284
Kompensationsstück DN 80, Edelstahl	1	2 Stk.	297
Absperrklappen DN 80	1	2 Stk.	297
Biogastrocknung, ca. 400 m³/h, 40°C / 20°C		1 Stk.	23.123
Wiedererwärmung, ca. 400 m³/h, 20°C / 25 °C		1 Stk.	5.600
Aktivkohlefilter 2,4 m³, / 1.200 kg, Ausführung, 700 m³/h		1 Stk.	14.391
Erstbefüllung mit Aktivkohle	1	1200 kg	6.240
Bypass, Einbindung Verdichter, Messanschlüsse		1 Stk.	4.275
Isolierung Gaskühlung, Gaserwärmung, Leitungen		1 Stk.	5.850
Inbetriebnahme		1 Stk.	975
Zwischensumme		70.332 €	70.332 €
Planungskosten Genehmigung nach BImSchG			
Genehmigungsplanung		1 Stk.	25.000
Überarbeitung der Einleitgenehmigung		1 Stk.	750
Überarbeitung der Gefährdungsanalyse		1 Stk.	2.500
Überarbeitung eines Brandschutzkonzeptes		1 Stk.	2.000
Überarbeitung Sicherheitskonzeptes		1 Stk.	1.500
Ausführungsplanung		1 Stk.	50.000
Bauleitung, Abnahme		1 Stk.	50.000
Inbetriebnahme		4 Stk.	16.000
Fahrkosten		30 Stk.	16.500
Zwischensumme		164.250 €	164.250 €
Planungskosten extern für Genehmigungsverfahren			
Gutachter		1 Stk.	8.450
Gutachter, AwSV für Leckerkennung und Leitungen		1 Stk.	6.000
Anlagenzertifikat BHKW		1 Stk.	17.500
Zwischensumme		31.950 €	31.950 €
Transport / Sonstiges			
Transportkosten		1 Stk.	27.197
Erdarbeiten, pauschal		1 Stk.	100.000
Umwallung der Anlage		1 Stk.	25.000
Prüfstatik		2 Stk.	3.000
Kran, Hubsteiger		5 Stk.	1.500
Baustrom, Bauwasser		1 Stk.	1.500
Helferstellung		500 Std.	10.000
Kosten Genehmigungsbescheid		1 Stk.	10.000
Gerüstbau		1 Stk.	10.000
Zwischensumme		188.197 €	188.197 €
Zusammenfassung			4.700.949 €
MwSt.	19,0%		893.180 €
Gesamt (brutto)			5.594.130 €

6.6 Kostenkalkulation kombinierte Güllebehandlung ohne EEG



Kostenkalkulation kombinierte Güllebehandlung GülleKOM

	Anzahl	Einh	Betrag
Behälterbau			
Unterbau			
Sauberkeitsschicht und Leckerkennungssystem, Lieferung und Montage, D = 40 m, Montage bauseits	491	m²	8.929
Schutzvlies für Fermenter	572	m²	1.711
Leckerkennungssystem Ansprung für Fermenter	1	St.	28.074
Kontrollstandrohr, KG DN 200, mit Abdeckung, l = 1,0 m, inkl. Montage	3	St.	0
Befestigungsband, Edelstahl oder PE, inkl. Montage	77	m	0
Feuchtesensor	1	St.	1.760
Behälter (Fermenter neu)			
Baustelleneinrichtung	1	Stk.	13.874
Betonbehälter, D = 40 x 6,5 m	7.500	m³	609.375
Wärmedämmung Bodenplatte	527	m²	6.849
Pumpensumpf	1	Stk.	315
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1	Stk.	2.824
Erdungspunkte	4	Stk.	1.357
Fermentertür 0,6 x 0,6 m, Edelstahl	1	St.	4.973
Leitungsdurchbrüche DN 100	22	Stk.	2.059
Leitungsdurchbrüche DN 200	4	Stk.	520
Dämmung und Verkleidung mit Sandwichelemente, 6/10 cm	898	m²	35.642
Montage und Befestigungsmaterial für Verkleidung	898	m²	23.349
Wärmedämmung Decke, Kiesschüttung, Gehwegplatten, Abdichtung, ca. 5 cm	540	m²	35.080
Behälter Annahmebehälter			
Baustelleneinrichtung	0	Stk.	0
Betonbehälter, D = 5 x 6 m, offen	800	m³	45.000
Pumpensumpf	1	Stk.	311
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1	Stk.	3.501
Erdungspunkte	1	Stk.	339
Leitungsdurchbrüche DN 100	4	Stk.	374
Behälter Filtratschacht			
Betonbehälter, D = 2 x 4 m, Fertigbauteil	10	m³	2.500
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1	Stk.	250
Erdungspunkte	1	Stk.	339
Leitungsdurchbrüche DN 100	2	Stk.	187
Behälter Puffertank			
Betonbehälter, D = 5 x 6 m,	100	m³	45.000
Erdungsband und Anschlußfahne, V2A	1	Stk.	250
Erdungspunkte	1	Stk.	339
Leitungsdurchbrüche DN 100	2	Stk.	187
Stahlbau (Behälter neu)			
Aufstieg und Arbeitsbühnen für Rührwerke am Fermenter, H = 6,5 m, Aufstieg mit Treppe	1	St.	32.500
Absturzsicherung am Fermenter	76	m	12.842
Zwischensumme			920.610 €
			920.610 €
Nitrifikation Denitrifikation Ring in Ring, Innen Absetzbecken, dann Zwischenspeicher, außen Nitri- Deni Becken			
Unterbau			
Leckerkennungssystem, Lieferung und Montage, D = 40 m, Montage bauseits	1.521	m²	35.580
Kontrollstandrohr, KG DN 200, mit Abdeckung, l = 1,0 m, Montage bauseits	4	St.	600
Behälter (neu)			
Nitrifikation/Denitrifikation			
Ring im Ring System aus Beton, äußerer Ring für Nitrifikation/Denitrifikation, Größe siehe Auslegung Kläranlage	7.000	m³	315.000



Ring im Ring System aus Beton, mittlerer Ring als Zwischenspeicher und Vorlage, Betonring, Größe siehe Auslegung Kläranlage	500 m³	22.500	
Leitungsdurchbrüche	8 Stk.	2.400	
Verbindungssteg zwischen den Ringen, L = ca. 20,0 m, B = 1,0 m,	20 m	30.000	
Rührtechnik			
Rührtechnik Nitrifikations/Denitrifikationsring, Zwischenbehälter			
Rührtechnik, 16,0 kW,	5 Stk.	47.925	
Führungsrohr, Bedienung und Kabeldurchführung	5 Stk.	18.359	
Belüftungssystem			
Eintragssystem aus perforierten Rohren	1 Stk.	38.340	
Drucklufizerzeuger	1 Stk.	186.999	
Separatoren			
Kugler® E-OP 11-120 PP	2 Stk.	194.290	
Flockungstank	2 Stk.	9.855	
Schaltschrank	2 Stk.	39.545	
Zwischensumme		1.293.889 €	1.293.889 €
Abdeckung / Gasspeicher Fermenter			
Abdeckung, Kugelkappe, D = 40,0 m, 7.800 m³ Gasspeicher, für Fermenter	1 Stk.	157.341	
Mannloch zur Gasspeicherfolie	1 Stk.	8.730	
Einbindung Serviceschacht	2 Stk.	6.548	
Mittelstütze, 8,0 m, Edelstahl, für Behälter	1 Stk.	3.153	
Fundament Mittelstütze	1 St.	1.468	
Betonschutz Epoxidharz, 2 lagig			
Betonschutz für Decke, Epoxidharz, ohne Montage für Behälter D = 40 m	600 m²	22.620	
Zwischensumme		199.859 €	199.859 €
Abdeckung / Gasspeicher Nitr/Denitrifikation			
Abdeckung, Ring, D = 10,5 m, Betondecke	1 Stk.	55.000	
Einbindung Serviceschacht	4 Stk.	13.095	
Betonschutz Epoxidharz, 2 lagig			
Betonschutz für Decke, Epoxidharz, ohne Montage für Behälter D = 40 m	850 m²	32.045	
Zwischensumme		100.140 €	100.140 €
Unter- / Überdrucksicherung			
Unter- / Überdrucksicherung, DN 125	2 Stk.	8.500	
Zwischensumme		8.500 €	8.500 €
Rührtechnik			
Rührtechnik für Fermenter			
Rührtechnik, 15,0 kW, Eex	3 Stk.	28.719	
Serviceschacht mit Zubehör, Foliendach			
Serviceschacht Foliendach	3 Stk.	72.900	
Führungsrohr 150 x 150 mm, Bedienung und Kabeldurchführung	3 Stk.	12.023	
Zwischensumme		113.642 €	113.642 €
Pumpentechnik			
Drehkolbenpumpe für Fest/Flüssig Trennung und Beschickung			
Drehkolbenpumpe VX 186-184 Q, 150 m³/h, 22 kW	4 St.	37.440	
Trockenlaufschutz	4 St.	1.308	
Drucküberwachung	8 St.	5.760	



Gummi-Kompensator DN 150	8 St.	4.128	
KPO für Vorgrube			
KPO, 22 kW, Tauchmotor	1 St.	11.207	
Fü-Rohr 6,0 m, Einrastung, Steckgalgen, Edelstahl	1 St.	3.664	
KPU für Nachklärer			
KPU, 11,0 kW, Lanwellenausführung, L = 2,0 m, verzinkt	1 St.	5.397	
Unterflurabgang	1 St.	570	
Zwischensumme		69.473 €	69.473 €
Heizungsbau			
Heizungsbau Substratheizung Fermenter			
Heizungsbau			
ROHR 1.4301 TIG 114,3X2,0 *6M	37 St.	13.226	
SCHON LAUT ZEICHNUNG GEBOGEN			
INOX 304 SCHWEISSBOGEN 114,3X2	4 St.	144	
INOX 304 RED 114.3X60.3X3	4 St.	168	
ROHR 1.4301 TIG 60,3X2,0 *6M	3 St.	348	
INOX 304 SCHWEISSBOGEN 60,3X2	4 St.	72	
INOX 304 RED. 76,1-60,3X2	0 St.	0	
INOX 304 GEWINDESTUTZEN 2"	4 St.	32	
INOX 304 GEWINDESTUTZEN 1/2"	4 St.	32	
Ringraumdichtung D = 60/100 mm	4 St.	440	
Halter für Heizung	24 St.	4.800	
Halter für Heizung, Doppelrohr	24 St.	6.000	
Zwischensumme		25.262 €	25.262 €
Heizungsbau Gesamtanlage (geschätzt)			
Heizungsrohr, isoliert, 63 x 51,4 mm	25 m	2.363	
Heizungsrohr, isoliert, 90 x 8,2 mm	0 m	0	
Heizungsrohr, isoliert, 110 x 10,0 mm	0 m	0	
T-Stück Isolierung	4 St.	1.172	
T-Stück	4 St.	518	
Reduzierung DN 100 / DN 75	0 St.	0	
Heizungsrohr, isoliert, 63 x 5,8 mm	15 m	1.478	
Übergang Stahlleitung	4 St.	1.080	
Einheit Mischer, Temperaturfühler Anbindung an Fermenterheizung	1 St.	1.013	
Ausdehnungsgefäß, Sonstiges	0 St.	0	
Heizungspumpe BHKW	1 St.	4.725	
Heizungspumpe Verbraucher	1 St.	4.725	
Heizungspumpe Wärmerückgewinnung	0 St.	0	
Anbindung Gasbrenner	0 St.	0	
Anbindung BHKW (Neu)	1 St.	10.125	
Anbindung BHKW (Bestand)	0 St.	0	
Heizungsverteiler 1 x BHKW, 1 x BGA, 1 x Trocknung, 1 x Res, 1 x Biogaserwärmung	1 St.	10.000	
Anbindung Gastrocknung	1 St.	2.700	
Plattenwärmetauscher, ca. 600 kW	0 St.	0	
Anbindung AWT 2 des BHKW an Heizungssystem	0 St.	0	
Anbindung GMK 2 des BHKW an Heizungssystem	0 St.	0	
Anbindung Wärmerückgewinnung BGAA an Heizungssystem	0 St.	0	
Anbindung Pufferspeicher Heizungssystem	0 St.	0	
Heizungssystem, Richtpreis	0 St.	0	
Zwischensumme		45.898 €	45.898 €
Leitungsbau Biogas, Edelstahl			
Edelstahl			
Edelstahlleitung DN 150	30 m	1.680	
Edelstahlbogen DN 150	10 St.	1.180	
Edelstahlflansch mit Bördel DN 150	8 St.	192	
Rohrschellen, DN 150, V2A	5 St.	691	
Reduzierung Edelstahl DN 150/DN 100	2 St.	80	
Absperrklappen DN 150 (Biogasleitung), mit Pneumatik-Antrieb, stromlos geschlossen	0 St.	0	
Gasdrossel mit Stellantrieb, DN 100, reduziert auf DN 65	0 St.	0	



Edelstahl T-Stück DN 150	0 St.	0
Schweißbördel mit Losflansch, DN 150/160	0 St.	0
Absperrklappen DN 150 (Biogasleitung)	4 St.	894
Absperrklappen DN 200 (Biogasleitung)	0 St.	0
Leitungsbau Biogas, PE		
PE-Rohr DN 150/160	50 m	1.400
PE-Winkel 90°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 45°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 30°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 22°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 15°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Bogen 45°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bogen 90°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bubu mit Losflansch, DN 150/160	4 St.	440
PE-T-Stück, DN 150/160	1 St.	106
Schweißmuffe, Elektro, DN 150/160	25 St.	1.100
Rohrschellen, DN 150, V2A	0 St.	0
Belüftungsventil, 2", V2A mit Anbohrschelle DN 150	0 St.	0
Ringraumdichtung 200/160	0 St.	0
Kondensatablauf in Vorgrube, ohne Pumpe	0 St.	0
Kondensatablauf in Vorgrube, mit Pumpe und Anbindung Vorgrube	1 St.	2.000
Leitungsbau Substrat		
PE-Rohr DN 150/160	75 m	2.100
PE-Winkel 90°, DN 150/160	10 St.	1.000
PE-Winkel 45°, DN 150/160	10 St.	1.000
PE-Winkel 30°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 22°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Winkel 15°, DN 150/160	5 St.	500
PE-Bogen 45°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bogen 90°, DN 150/160	0 St.	0
PE-Bubu mit Losflansch, DN 150/160	10 St.	1.160
PE-T-Stück, DN 150/160	0 St.	0
Rohrschellen, DN 150, V2A	10 St.	1.382
Schweißmuffe, Elektro, DN 150/160	50 St.	2.200
Belüftungsventil, 2", V2A mit Anbohrschelle DN 150	1 St.	168
Ringraumdichtung 200/160	4 St.	355
Kernbohrung 200 mm	4 St.	400
Ausführung Doppelwandig		
PE-Rohr DN 150/160 im KG-Schutzrohr inkl. Gleitkufen	50 m	3.950
Anbohrschelle DN 160/2"	2 St.	144
Kompensationsstücke		
Gummi-Komp. DN 150	4 St.	1.101
Zwischenflanschsieber		
Zwischenflanschsieber DN 150, Hand	6 St.	2.657
Spülanschluss	1 St.	300
Verteiler T-Stücke		
Kreuz mit DIN-Flansch DN 150, verzinkt	4 St.	5.700
Probeentnahme	1 Stk.	400
Technik-Gebäude		
Beton-Technik-Container, LxBxH = ca. 8,5 x 3,7 x 3,0 m	1 St.	45.989
Dämmung Biogasleitungen ab Gasreinigung	1 St.	28.600
Zwischensumme		118.762 €
Montage		
Montage Stahlbau		
Kleinteile	1 St.	12.242
Montagekosten	1 St.	3.061
Montage U-/Ü-Drucksicherung		
Kleinteile	1 St.	1.148
Montagekosten	1 St.	2.295



Montage Rührtechnik		
Lieferung und Montage Rührtechnik	1 Stk.	11.506
Montage Pumptechnik		
Kleinteile	1 St.	4.689
Montagekosten	1 St.	14.068
Montage Fermenterheizung		
Kleinteile	1 St.	2.558
Montagekosten	1 St.	13.641
Montage Leitungsbau		
Kleinteile	1 St.	3.563
Montagekosten, inkl. Spiegelschweißen	1 St.	44.536
Zwischensumme		113.307 €
		113.307 €
Elektroinstallation / Steuerung / Sensoren		
Steuerung	1 Stk.	52.000
Verkabelung Rührwerkern, Pumpen, Verdichter	1 Stk.	39.000
Druckschalter für Notabschaltung	2 St.	581
Radarsonde für Füllstandsmessung	2 St.	3.729
Überfüllsicherung	2 St.	2.883
Sensoren Druck und (Temperatur)	10 Stk.	4.050
Inbetriebnahme, Fahrkosten, Fahrzeit	1 Stk.	1.337
Zwischensumme		103.580 €
		103.580 €
Gasfackel		
Gasfackel, bis 180 m³, Edelstahl, mit Verdichter	1 Stk.	19.019
Verkleidung, unten, Windschutz	1 Stk.	3.390
Abspannung	1 Stk.	420
Kompensationsstück	1 Stk.	473
Absperrklappen DN 150 (Biogasleitung)	1 St.	497
PE-Rohr DN 150/160	20 m	896
Kleinteile / Fracht	1 St.	1.482
Montagekosten	1 St.	3.704
Zwischensumme		29.880 €
		29.880 €
BHKW 500 kW		
BHKW, 500 kW, MAN Gasmotor, AWT, Heizsystem, Steuerung, Abgasführung, Lieferung und Montage, Einzelcontainer	1 St.	482.000
Schmierölversorgung		
Schmierölversorgung 2 x 1.000 l	1 St.	0
Schmierölversorgung, Ölpumpen und Verrohrung	1 St.	0
Inbetriebnahme, Aufstellung, Transport	1 St.	0
Vorerwärmung BHKW, hy	1 St.	0
Gaszähler	1 St.	2.530
Autom. Absperrklappe	1 St.	0
SCR-Kat		
Inbetriebnahme SCR-Kat	1 St.	607
Harnstofftank		
Harnstofftank für SCR-Tank, beheizt, 5.000 l	1 St.	8.188
Harnstofftank für SCR-Tank, beheizt, 5.000 l, Transport	1 St.	540
Harnstofftank für SCR-Tank, Drucksensor	1 St.	365
Einspeisung Strom		
Trafostation als Kompaktstation, 630 kVA, nicht begehbar	1 St.	90.000
Erdung	3 St.	4.911
Parametrierung	1 St.	4.275
Bürdenmessung	1 St.	675
Übersichtspläne	1 St.	1.993
Anbindung BHKW 1 an Trafostation, NS	20 m	800
Anschluss	16 St.	752
NH-Sicherung	2 St.	96
Zwischensumme		597.731 €
		597.731 €

**Gaskühlung und Verdichter**

Verdichter, 140 mbar, ca. 400 Nm³/h	1	1 Stk.	6.531
Kompensationsstück DN 80, Edelstahl	1	2 Stk.	297
Absperrklappen DN 80	1	2 Stk.	297
Biogastrocknung, ca. 400 m³/h, 40°C / 20°C		1 Stk.	18.235
Wiedererwärmung, ca. 400 m³/h, 20°C / 25 °C		1 Stk.	3.487
Aktivkohlefilter 2,4 m³, / 1.200 kg, Ausführung, 550 m³/h		1 Stk.	10.012
Erstbefüllung mit Aktivkohle	1	1200 kg	6.240
Bypass, Einbindung Verdichter, Messanschlüsse		1 Stk.	4.275
Isolierung Gaskühlung, Gaserwärmung, Leitungen		1 Stk.	5.850
Inbetriebnahme		1 Stk.	975

Zwischensumme

56.199 €	56.199 €
-----------------	-----------------

Planungskosten Genehmigung nach BImSchG

Genehmigungsplanung	1 Stk.	25.000
Überarbeitung der Einleitgenehmigung	1 Stk.	750
Überarbeitung der Gefährdungsanalyse	1 Stk.	2.500
Überarbeitung eines Brandschutzkonzeptes	1 Stk.	2.000
Überarbeitung Sicherheitskonzeptes	1 Stk.	1.500
Ausführungsplanung	1 Stk.	50.000
Bauleitung, Abnahme	1 Stk.	50.000
Inbetriebnahme	4 Stk.	16.000
Fahrkosten	30 Stk.	16.500

Zwischensumme

164.250 €	164.250 €
------------------	------------------

Planungskosten extern für Genehmigungsverfahren

Gutachter	1 Stk.	8.450
Gutachter, AwSV für Leckerkennung und Leitungen	1 Stk.	6.000
Anlagenzertifikat BHKW	1 Stk.	17.500

Zwischensumme

31.950 €	31.950 €
-----------------	-----------------

Transport / Sonstiges

Transportkosten	1 Stk.	23.428
Erdarbeiten, pauschal	1 Stk.	100.000
Umwallung der Anlage	1 Stk.	25.000
Prüfstatik	2 Stk.	3.000
Kran, Hubsteiger	5 Stk.	1.500
Baustrom, Bauwasser	1 Stk.	1.500
Helferstellung	500 Std.	10.000
Kosten Genehmigungsbescheid	1 Stk.	10.000
Gerüstbau	1 Stk.	10.000

Zwischensumme

184.428 €	184.428 €
------------------	------------------

Zusammenfassung

		4.177.360 €
MwSt.	19,0%	793.698 €
Gesamt (brutto)		4.971.058 €

6.7 Wirtschaftlichkeit der kombinierten Güllebehandlung mit und ohne EEG



Wirtschaftlichkeit der kombinierten Güllebehandlung (500 kW Biogasanlage) im GülleKOM Verfahren

	1. VP gem. EEG 2023, 1 x 1076 kWel	Betrieb außerhalb EEG, 1 x 550 kWel
1 Ausgaben pro Jahr		
Gesamtkosten geplanten Neubauten	5.594.130 €	4.971.058 €
Fördermittel, Eigenleistung, Eigenkapital	200.000 €	200.000 €
Investitionsbedarf		
Investitionsbedarf der Anlage (Fremdmittel)	5.394.130 €	4.771.058 €
Verfügbarkeit der Anlage	358 d	358 d
Abschreibung für Baumaßnahmen		
Abschreibungssatz	10,00%	10,00%
Abschreibung pro Jahr (Erweiterung)	223.765 €/a	198.842 €/a
Abschreibung der techn. Ausstattung		
Abschreibungssatz	10,00%	10,00%
Abschreibung pro Jahr (Erweiterung)	335.648 €/a	298.263 €/a
Zinsen auf Fremdmittel		
Zins pro Jahr (Durchschnitt über die Vertragslaufzeit), zukünftig	4,50%	4,50%
Zins pro Jahr (Durchschnitt über die Vertragslaufzeit), zukünftig	121.368 €/a	107.349 €/a
Wartung- und Instandhaltungskosten BHKW		
Jahresleistung des BHKW (Brutto)	4.296.000 kWh/a	4.296.000 kWh/a
Wartungs- u. Instandhaltungskosten je kWh	1,20 ct/kWh	1,20 ct/kWh
Wartungs- u. Instandhaltungskosten	51.552 €/a	51.552 €/a
Wartungs- u. Instandhaltungskost. Maschin.		
Investitionskosten Maschinen	5.594.130 €	4.971.058 €
Anteil	1,50%	1,50%
Wartungs- u. Instandhaltungskosten pro Jahr	83.912 €/a	74.566 €/a
Personalkosten pro Jahr		
Arbeitsstunden	2.080 h/a	2.080 h/a
Arbeitskosten pro Stunde	45 €/h	45 €/h
Arbeitskosten pro Jahr	93.600 €/a	93.600 €/a
Kosten Abgasnachbehandlung (SCR-Kat)		
Kosten AdBlue (Harnstoff)	0,75 €/l	0,75 €/l
Verbrauch AdBlue	0,25 l/h/100 kWel	0,25 l/h/100 kWel
BHKW-Leistung (Bemessungsleistung)	500 kW	500 kW
Verbrauch AdBlue (pro Jahr)	10.950 l/h	10.950 l/h
Kosten AdBlue (Harnstoff)	8.213 €/a	8.213 €/a
Versicherungskosten pro Jahr		
Anlagenkosten	5.594.130 €	4.971.058 €
Versicherungssatz	0,50%	0,50%
Versicherungssumme	27.971 €/a	24.855 €/a
Gesamtausgaben pro Jahr	1.011.653 €/a	922.865 €/a
2 Einnahmen		
Energiekosten Strom		
Stromverkauf (nach EEG 2023, IBN 2025)	16,40 ct/kWh	16,40 ct/kWh
Energiekosten Wärme		
Wärme (Heizöl, Gas)	8,89 ct/kWh	8,89 ct/kWh
Stromerzeugung, -bedarf und -verkauf		
Stromerzeugung der Biogasanl. pro Tag	12.010 kWh/d	12.010 kWh/d
Stromerzeugung der Biogasanl. pro Jahr	4.296.000 kWh/a	4.296.000 kWh/a
Eigenverbrauch pro Jahr	257.760 kWh/a	257.760 kWh/a
Stromverkauf pro Jahr	4.038.240 kWh/a	4.038.240 kWh/a
Einnahmen durch Verkauf von Strom	629.555 €/a	629.555 €/a
Flexzuschlag		
Leistung ungeförderter Teil	1096 kW	0 kW
Flexzuschlag ungeförderter Teil	65 €/kW	65 €/kW
Flexzuschlag	71.240 €/a	0 €/a
Zusatz Erlöse Fahrplan		
Zusatz Erlöse gem. Fahrplan	1,00 ct/kWh	0,00 ct/kWh
Zusatz Erlöse aus der Direktvermarktung	40.382 €/a	0 €/a



Wärmeerzeugung, -bedarf und -verkauf
Eigenverbrauch der Wärme pro Jahr
 Wärmeverbrauch des Betriebes plus BGA
 Wärmepreis
 Ersparnis durch Eigenverbrauch von Wärme

Gesamteinnahmen pro Jahr

3 Gegenüberstellung von Ausgaben und Einnahmen

Einnahmen pro Jahr

Ausgaben pro Jahr

Gewinn (gem. Ausschreibung)

Einnahmen pro kWhel

Ausgaben pro kWhel

718.254 kWh/a
 8,89 ct/kWh

63.845 €/a

1.670.593 €/a

1.670.593 €/a

1.011.653 €/a

658.940 €/a

41,37 ct/kWh

25,05 ct/kWh

718.254 kWh/a
 8,89 ct/kWh

63.845 €/a

699.457 €/a

699.457 €/a

922.865 €/a

-223.408 €/a

17,32 ct/kWh

22,85 ct/kWh

7 Literatur- und Referenzverzeichnis

- [1] ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2000). Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen
- [2] Bensmann, M. (2021). Stickstoff eliminieren, Phosphor mit Feststoff exportieren. Biogas Journal, Bd. 24, Nr. 4, S. 19
- [3] Bio Armor (2020) http://www.bioarmor.be/de_DE/page/homepage
- [4] Boersma, L. (1978). Management of swine manure for the recovery of protein and biogas.
- [5] Driessen, W., & Hendrickx, T. (2021). Two Decades of Experience with the Granular Sludge-Based ANAMMOX® Process Treating Municipal and Industrial Effluents. Processes, 9(7), 1207.
- [6] Ellmann, R. (2013). Verfahren zur Aufbereitung eines aus einem Fermenterreaktor stammenden Reststoffes. Patent-Nr.: DE 10 2013 018 833 A1
- [7] Fuchs, W.; Drosch, B.: Technologiebewertung von Gärrestbehandlungs- und Verwertungskonzepten. Wien: Eigenverlag der Universität für Bodenkultur Wien, (2010), 215 S. - ISBN 978-3-900962-86-9
- [8] Gujer, W. (1993). Grundlagen der Nitrifikation und der Denitrifikation in Belebungsanlagen, 35.
- [9] Häußermann, U., Bach, M., Klement, L., Breuer, L. (2019) Stickstoff-Flächenbilanzen für Deutschland mit Regionalgliederung Bundesländer und Kreise – Jahre 1995 bis 2017, Hrsg. Umweltbundesamt, ISSN 1862-4804, Dessau-Roßlau
- [10] Heppe, A., Pätz, R. (1993) Verfahren und Anlage zur biologischen Reinigung von Abwasser. Patent-Nr.: EP0739860A1
- [11] Höhling, A. (2017). Innovationsallianz "Techno-Funktionelle Proteine" (TeFuProt) - Proteinmodifikationen aus landwirtschaftlichen Reststoffen für industrielle Anwendungen. Abschlussbericht, Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2014-31.08.2017
- [12] Janke, H. D. (2008). Umweltbiotechnik: Grundlagen und Verfahren. UTB. ISBN: 3-8252-8380-3
- [13] Kartchner, H. H. (2003). Process for recovering feed-grade protein from animal manure ., U.S. Patent No. 6,524,632. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [14] Koster, I. W., Klapwijk, A. (1990). Method and installation for processing manure, fermented manure and Kjeldahl-N containing waste water. Patent-Nr.: EP 0 423 889 A1
- [15] Krebs, P. (2006) Vorlesung Abwasserreinigung, TU Dresden, Fachrichtung Wasserwesen, Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft
- [16] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2021): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. ISBN 978-3-945088-85-2
- [17] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (2020): Gasdichte Lagerung von Rinder- und Schweinegülle. Eine Maßnahme zur Minderung und Vermeidung von klimarelevanten Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung. In: www.ktbl.de
- [18] Lackner, S., Thoma, K., Gilbert, E. M., Gander, W., Schreff, D., & Horn, H. (2015). Start-up of a full-scale deammonification SBR-treating effluent from digested sludge dewatering. Water Science and Technology, 71(4), 553-559.
- [19] Leendert, A.; Koster, I. W. (1993): DE 693 20 473 T2, Verfahren zur Behandlung eines flüssigen stickstoffreichen Abfallprodukts nach diesem Verfahren hergestellte Düngemittellösung sowie seine Herstellung

- [20] Liebetrau, J.; Pfeiffer, D.; Trähn, D. (2015): Messmethodensammlung Biogas. Methoden zur Bestimmung von analytischen und prozessbeschreibenden Parametern im Biogasbereich, Leipzig, Fischer Druck, ISSN 2192–1806.
- [21] Pape, S. (1990). Verfahren und Anlage zur Einstellung des Nährstoffgehaltes von Flüssigmist. Patent-Nr.: DE 3920539 C 1
- [22] Sheng, K., Chen, X., Pan, J., Kloss, R., Wei, Y., & Ying, Y. (2013). Effect of ammonia and nitrate on biogas production from food waste via anaerobic digestion. *Biosystems Engineering*, 116(2), 205-212.
- [23] Shuler, M. L., Roberts, E. D., Mitchell, D. W., Kargi, F., Austic, R. E., Henry, A., ... & Seeley Jr, H. W. (1979). Process for the aerobic conversion of poultry manure into high-protein feedstuff. *Biotechnology and Bioengineering*, 21(1), 19-38.
- [24] Sobhi, M., Han, T., Stinner, W., Cui, X., Sun, H., Li, B., ... & Dong, R. (2020). Hybrid technology for nutrients recovery as microbial biomass and ammonium sulfate from un-diluted biogas liquid digestate using a modified airlift reactor. *Journal of Cleaner Production*, 121976.
- [25] Steinmetz, W., Vollmer, G.-R. (1992). Verfahren zur biologischen Nitrifikation von Abwässern. Patent-Nr.: DE 40 41 820 A 1
- [26] UBA (2015) <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/stickstoff#textpart-1>
- [27] VDI 4630 (2016). Vergärung organischer Stoffe, Verein Deutscher Ingenieure e.V., Richtlinie
- [28] Voet, D., Voet, J. G., & Pratt, C. W. (2019). Lehrbuch der Biochemie. John Wiley & Sons.
- [29] Von der Haar, D., Langowski, H.-C. (2017). IBÖM01: Mizellenkleber - Barriereklebstoffe für Lebensmittelverpackungen auf Basis von pflanzlichen Mizellenproteine. Veröffentlichung der Ergebnisse von Forschungsvorhaben im BMBF-Programm, Projektlaufzeit: 01.11.2015 bis 31.10.2017, Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV)
- [30] Wagner, F. (1991). Verfahren und Vorrichtung zur biologischen Verarbeitung von organisch belasteten, stark stickstoffhaltigen, wässrigen Flüssigkeiten. Patent-Nr.: DE 4001855 A 1
- [31] Wedekind, P., Reimann, W., Linke, B., Franz, J. (1981). Verfahren zur mechanisch-mikrobiologischen Behandlung von Schweinegülle. Patent-Nr.: D 147 091 A1
- [32] Wedwitschka, H., Gallegos Ibanez, D., Schäfer, F., Jenson, E., & Nelles, M. (2020). Material Characterization and Substrate Suitability Assessment of Chicken Manure for Dry Batch Anaerobic Digestion Processes. *Bioengineering*, 7(3), 106.
- [33] Wendland, K-D., Pätz, R., Wandt, A., Skowny, H., Brühl, E., Heine, M., Hubald, M. (1987) Verfahren zur Gewinnung von Biomasse., Patent-Nr.: DD 241 916 A1
- [34] Wett, B., & Hell, M. (2008). Betriebserfahrungen mit dem DEMON®-Verfahren zur Deammonifikation von Prozesswasser. *KA Abwasser Abfall*, 55(3), 245.