

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Verbundvorhaben: Einfluss von unterschiedlichen Lagerungsverfahren und Prozessparametern auf das Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten.

Akronym:

Gaeremission

Zuwendungsempfänger:

**Teilvorhaben 1: Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT**

Teilvorhaben 2: Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK)

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2220WD014A

Teilvorhaben 2: 2220WD014B

Laufzeit:

01.01.2022 bis 30.09.2025

Datum der Veröffentlichung: 25.06.2026

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Landwirtschaft, Ernährung
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

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

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht	1
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	2
4.	Glossar	4
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	6
1.	Erzielte Ergebnisse	6
	Arbeitspaket 1: Organisation	6
	Arbeitspaket 2: Festlegung von Kriterien zur Auswahl von Wirtschaftsdünger- und Gärrestlagern und Erarbeitung eines Prozedere für die Beprobung	6
	Arbeitspaket 3: Gemeinsame Beprobung einer Anlage durch Fraunhofer UMSICHT und HAWK und Durchführung von Gärtests	6
	Arbeitspaket 4 und Arbeitspaket 7: Beprobung von Anlagen und Anlagencharakterisierung in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und angrenzenden Bundesländern; Temperaturmessung an Güllelagern	10
	Arbeitspaket 5 und Arbeitspaket 8: Durchführung von Gärtests zur Bestimmung von Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen	15
	Arbeitspaket 6 und Arbeitspaket 9: Bewertung des Einflusses der Behältersysteme und Lagerungsbedingungen sowie der Vergärung in einer Biogasanlage auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern (Fraunhofer UMSICHT, HAWK)	41
	Arbeitspaket 10: Ökobilanzielle Einordnung der ermittelten Emissionskennwerte innerhalb des Gesamtsystems der Biogaserzeugung (HAWK)	47
	Arbeitspaket 11: Erarbeitung von technischen und ökonomischen Empfehlungen (HAWK, Fraunhofer UMSICHT)	54
2.	Literaturverzeichnis	55
3.	Verwertung	56
4.	Erkenntnisse von Dritten	57
5.	Veröffentlichungen	58
ANHANG I	59	
	Teilvorhaben 1: (Methan-Emissionen bei Lagerung von Wirtschaftsdüngern)	59
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	59
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	59
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	60
	Teilvorhaben 2: Einfluss der Vergärung und ökobilanzielle Bewertung	61
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	61
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	61
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	62
ANHANG II	63	
	Fragebogen	63
	Probenahmeprotokoll	66

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Ziel des Projekts ist die Ermittlung des Einflusses von unterschiedlichen Lagerungssystemen und Lagerungsbedingungen bei Wirtschaftsdüngern und Gärresten auf die Emission von treibhausrelevanten Gasen, insbesondere Methan.

Dazu werden verschiedene Wirtschaftsdüngerlager aus der Rinder- und Schweinehaltung und Gärrestlager von vorwiegend wirtschaftsdüngergeführten Biogasanlagen beprobt und die wichtigsten Prozessparameter der Anlagen wie Behältersysteme, Temperatur und Verweilzeit erfasst.

Die Wirtschaftsdünger- und Gärrestproben werden im Labor chemisch-analytisch charakterisiert und Gärtests zur Ermittlung folgender Parameter durchgeführt:

- Gas- bzw. Methanbildungspotenzial
- Lagerungsemissionen

Anhand der Ergebnisse wird der Einfluss der Lagerungssysteme und -bedingungen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten auf die Emission klimarelevanter Gase bewertet und die bestimmenden Faktoren herausgearbeitet. Außerdem wird an wirtschaftsdüngergeführten Biogasanlagen untersucht, welchen Einfluss die Vergärung auf die Emissionen hat. Auf Basis der Ergebnisse können die Lagerung optimiert, Emissionen minimiert und aufgrund der verringerten Lagerverluste der Gasertrag von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen gesteigert werden. Darüber hinaus werden die Ergebnisse für eine ökobilanzielle Bewertung der Treibhausgasemissionen genutzt, die aus dem jeweiligen Umgang mit Wirtschaftsdünger und Gärresten entstehen.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben wurde von Fraunhofer UMSICHT (Teilvorhaben 1) in enger Kooperation mit der HAWK (Teilvorhaben 2) koordiniert und über die Laufzeit 01/2022 bis 09/2025 in klar strukturierten Phasen umgesetzt. Zu Beginn wurden ein gemeinsamer Kriterienkatalog zur Standortauswahl, standardisierte Arbeits- und Probenahme-Anweisungen sowie eine einheitliche Datenablage etabliert. Die effiziente Steuerung erfolgte über einen zweiwöchentlichen Online-Jour fixe sowie vier Projekttreffen.

Zur Qualitätssicherung war eine gemeinsame Erstbeprobung im Sommer 2022 sowie eine Wiederholung an derselben Anlage im Winter 2023 eingeplant, ergänzt um einen Interlaborvergleich mit Ringversuchsstandards (Cellulose, KTBL/VDLUFA). Für die zweite gemeinsame Beprobung war die Nutzung eines identischen, separierten Gärrests als Inokulum vorgesehen, um systematische Laborunterschiede auszuschließen.

Die Beprobung erfolgte entlang eines vorab definierten, für Deutschland repräsentativen Anlagenpanels in viehstarken Regionen mit Schwerpunkt auf Rinder- und Schweinehaltung sowie güllegeführten Biogasanlagen. Erfasst wurden frische und gelagerte Gülle (Rind, Schwein), Festmiste, Gärreste (ggf. getrennte Phasen) sowie relevante Co-Substrate. Vor Ort wurden Behältersysteme, Verweilzeiten, Durchmischung, Beschickung und Lagerbedingungen mittels Fragebogen dokumentiert. Zur Abbildung realer Randbedingungen wurden an zwei Güllelagern kontinuierliche Temperaturmessungen über zwölf Monate installiert.

Die Laboruntersuchungen waren gemäß VDI-Richtlinie 4630 ausgelegt: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen bei 20 °C (LE, LE(CH₄)) wurden als Emissionsparameter sowie Biogas- und Methanbildungspotenziale bei 37 °C (BP, BP(CH₄)) als Effizienzparameter bestimmt. Die Begleitanalytik umfasste TS/oTS, NH₄-N, pH, FOS/TAC (HAWK), flüchtige Fettsäuren sowie Makronährstoffe; die Gasanalytik schloss CH₄ ein. Zur einheitlichen Auswertung wurden die Gasbildungskinetiken projekteinheitlich modelliert (Richards- bzw. Gompertz-Ansatz), um Niveaus und Raten vergleichend zu bewerten.

Die Datenauswertung kombinierte deskriptive und inferenzstatistische Verfahren (Varianz- und Regressionsanalysen), um die Einflüsse von Behältersystem, Verweilzeit, Temperatur und Substratmix auf LE(CH₄) und BP(CH₄) zu quantifizieren. Darauf aufbauend wurden Kennwerte wie B₀ und Methankonversionsfaktoren (MCF) ermittelt. Die konsolidierten Datensätze bildeten die Grundlage der ökobilanziellen Bewertung nach ISO 14040/14044 mit GaBi; der Abgleich mit IPCC-Methodik und Thünen-Daten diente der Einordnung in nationale Emissionsinventare. Die Rückkopplung in die Praxis erfolgte über anonymisierte Betriebsberichte und die Erarbeitung „Best-Practice“-Empfehlungen für ein emissionsarmes Lager- und Anlagenmanagement.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Organisation (UMSICHT)	01/2022 bis 09/2025	Regelmäßige Projektabstimmung (alle 2 Wochen) online via MS Teams, gemeinsame Ablage von Dateien über MS Teams, Führung eines fortlaufenden Protokolls (Ablage in MS Teams) 06.06.2022 Kick-off Meeting, online via MS Teams 15.02.2023 Projekttreffen bei der HAWK, Göttingen 14.03.2024 Projekttreffen Probenaustausch bei UMSICHT, Oberhausen 13.12.2024 Projekttreffen bei UMSICHT, Oberhausen
AP 2 Festlegung von Kriterien zur Auswahl von Wirtschaftsdünger- und Gärrestlagern und Erarbeitung eines Prozedere für die Beprobung (beide)	01/2022 bis 03/2022	Die Kriterien wurden gemeinsam mit der HAWK festgelegt und ein entsprechendes Prozedere wurde erarbeitet.
AP 3 Gemeinsame Beprobung einer Anlage durch Fraunhofer UMSICHT und HAWK und Durchführung von Gärtests (beide)	01/2022 bis 09/2022	Die gemeinsame Beprobung wurde am 13.07.2022 durchgeführt und am 07.02.2023 wiederholt. Zudem wurde ein Laborvergleich mit Cellulose und Proben aus dem KTBL/VDLUFA-Ringversuch durchgeführt.
AP 4 Beprobung von Anlagen und Anlagencharakterisierung in NRW und angrenzenden Bundesländern (UMSICHT)	07/2022 bis 06/2025	Es wurden insgesamt 16 Probenahmen an fünf unterschiedlichen Biogasanlagen und einem Güllelager durchgeführt.
AP 5 Durchführung von Gärtests zur Bestimmung von Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen (UMSICHT)	07/2022 bis 06/2025	Von den Proben der 16 Anlagenbeprobungen wurden entsprechend Gärtests zur Bestimmung von Gasbildungspotenzial und Lagerungsemissionen durchgeführt und ausgewertet.
AP 6 Bewertung des Einflusses der Behältersysteme und Lagerungsbedingungen auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern (UMSICHT)	01/2025 bis 09/2025	Die Bewertung wurde durchgeführt.
AP 7 Beprobung von Anlagen und Anlagencharakterisierung in Niedersachsen und angrenzenden Bundesländern (HAWK)	07/2022 bis 06/2025	Von der HAWK wurden insgesamt 11 Probenahmen an vier unterschiedlichen Biogasanlagen durchgeführt. Es wurden unter anderem 9 Gärrest-, 16 Rinder- und 2 Schweinegülle- sowie 9 Rindermistproben genommen.
AP 8 Durchführung von Gärtests zur Bestimmung von Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen (HAWK)	01/2024 bis 08/2025	Für alle neuen Proben wurden die entsprechenden Lagerungsemissionen und die Gasbildungspotenziale bestimmt. Noch ausstehende Versuche für die bereits zuvor beschafften Proben wurden ebenfalls abgeschlossen. Alle Messwerte bezüglich der Gaserträge und der Probencharakterisierung liegen vor.

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 9 Bewertung des Einflusses der Vergärung in einer Biogasanlage auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern (HAWK)	01/2025 bis 09/2025	Die Bewertung wurde durchgeführt.
AP 10 Ökobilanzielle Einordnung der ermittelten Emissionskennwerte innerhalb des Gesamtsystems der Biogaserzeugung (HAWK)	01/2022 bis 06/2022 und 01/2024 bis 09/2025	Die Ziele wurden erreicht: Zunächst wurde eine Literaturrecherche hinsichtlich der benötigten Hintergrunddaten, des aktuellen Standes der Bilanzierung von volatilen Treibhausgasen aus Wirtschaftsdünger und Gärresten und möglicher Minderungsmaßnahmen durchgeführt. Außerdem erfolgte eine Aufbereitung der in den anderen Arbeitspaketen erhobenen Daten, welche als Grundlage für die erstellten Modelle in der Ökobilanzierungssoftware dienten. Damit wurden für unterschiedliche Szenarien mit Nutzung von Literaturdaten und Ergebnissen aus diesem Projekt Ökobilanzierungen für die Lagerung von Wirtschaftsdüngern und alternativ für deren Nutzung in Biogasanlagen erstellt und diskutiert.
AP 11 Erarbeitung von technischen und ökonomischen Empfehlungen	04/2025 bis 09/2025	Aus den Projektergebnissen wurden konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Die Kriterien für die Anlagenauswahl und das Prozedere für die Probenahme und Durchführung der Gärtests sind festgelegt.	09/2022	Meilenstein wurde erreicht
M 2 Die Güllelager wurden einmal beprobt und die Ergebnisse liegen vor. Die erneute Beprobung und das Prozedere werden gegebenenfalls angepasst. (UMSICHT)	09/2023	Alle geplanten Beprobungen des angepassten Beprobungsplans wurden durchgeführt
M 3 Die Anlagen wurden hinsichtlich des Einflusses von Lagerbedingungen und Betriebsbedingungen auf die Methanbildung bewertet. (UMSICHT)	09/2025	Meilenstein wurde erreicht
M 4 Die Güllelager mit nachgelagerter Biogaserzeugung wurden einmal beprobt und die Ergebnisse liegen vor. Die erneute Beprobung und das Prozedere werden gegebenenfalls angepasst. (HAWK)	09/2023	Alle Anlagen wurden mindestens zweimal beprobt, die Ergebnisse liegen vor. Zusätzlich wurden noch Mistproben genommen.
M 5 Die Anlagen wurden hinsichtlich des Einflusses der Vergärung in einer Biogasanlage auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern bewertet. (HAWK)	09/2025	Meilenstein wurde erreicht

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 6 Handlungsempfehlungen für einen möglichst emissionsarmen Umgang mit Wirtschaftsdüngern und Gärresten wurden erarbeitet	09/2025	Meilenstein wurde erreicht
M 7 Technische und ökonomische Empfehlungen für den Betrieb von Gärrestlagern und Wirtschaftsdüngerlagern wurden erarbeitet.	09/2025	Meilenstein wurde erreicht

b) Zusammenfassung

Das Verbundvorhaben „Gaeremission“ (Laufzeit 01/2022–09/2025) wurde vom Fraunhofer-Institut UMSICHT und der HAWK durchgeführt und untersuchte den Einfluss von Lagerungsverfahren und Prozessparametern auf das Methanbildungspotenzial sowie die Lagerungsemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten. Ziel war die Quantifizierung klimarelevanter Emissionen und die Bewertung des Nutzens der anaeroben Vergärung.

Für die Untersuchungen wurden in viehstarken Regionen Deutschlands repräsentative Gülle-, Mist- und Gärrestlager beprobt (UMSICHT: 16 Probenahmen an fünf Biogasanlagen und einem Güllelager; HAWK: elf Probenahmen an vier Betrieben). Die Laboranalysen erfolgten nach VDI-Richtlinie 4630 und umfassten die Bestimmung von Lagerungsemissionen bei 20 °C sowie Biogas- und Methanbildungspotenzialen bei 37 °C. Ergänzend wurde an zwei Güllelagern ein 12-monatiges Temperaturmonitoring durchgeführt. Interlaborvergleiche bestätigten die Methodenvergleichbarkeit; Unterschiede ließen sich durch das Inokulum minimieren.

Die zentralen Ergebnisse zeigen, dass die Lagertemperatur ein wichtiger Einflussfaktor für die Methanemissionen ist. Das Güllealter beeinflusst die Emissionsdynamik zusätzlich: Frische Gülle zeigt verzögerte Methanbildung, während vorgelagerte Gülle durch etablierte methanogene Gemeinschaften schneller emittiert. Je nach Lagerbedingungen gingen bis zu 80 % des theoretischen Methanpotenzials bereits während der Lagerung verloren.

Die ökobilanzielle Bewertung belegt, dass die Vergärung das Treibhauspotenzial gegenüber der Direktausbringung um 70–95 % senken kann, sofern eine emissionsarme Gärrestlagerung und zügige Prozessführung gewährleistet sind. Mehrstufige Anlagen mit Verweilzeiten von über 80 Tagen erreichen Effizienzen von 85–95 % bei der Ausnutzung des Methanpotenzials.

Folgende Handlungsempfehlungen wurden abgeleitet: gasdichte Gärrestlagerung mit Gasverwertung (höchste Wirksamkeit), optimierte mehrstufige Vergärung mit langen Verweilzeiten, kurze Vorlagerungszeiten sowie Abdeckungen oder Schwimmschichten. Die ermittelten Methankonversionsfaktoren (MCFi) sind konsistent mit IPCC-Literaturwerten und unterstützen die Aktualisierung nationaler Emissionsinventare.

Angesichts des ungenutzten Potenzials von ca. 100 Mio. t FM/Jahr an Wirtschaftsdüngern in Deutschland bietet deren energetische Nutzung in Biogasanlagen erhebliche Möglichkeiten zur Vermeidung von Lagerungsemissionen bei gleichzeitiger Gewinnung erneuerbarer Energie. Die Kombination von Minderungsmaßnahmen (Kühlung, Abdeckung, kurze Lagerung) mit optimierter Vergärung stellt den vielversprechendsten Ansatz zur Maximierung der Treibhausgaseinsparungen dar.

4. Glossar

Nachfolgend wird ein Überblick über die im Projekt verwendeten Kenngrößen gegeben.

- BP (Biogasbildungspotenzial): Gesamtgasbildung bei 37 °C nach VDI 4630; Einheit: L_N/kg oTS. Häufig als Effizienzparameter genutzt.
- BP(CH₄): Methanbildungspotenzial bei 37 °C; Einheit: L_N CH₄/kg oTS. Entspricht dem theoretischen B₀ (in m³/kg oTS) dividiert durch 1.000.
- LE (Biogas-Lagerungsemissionen): Gesamtes gebildetes Gas bei 20 °C während der definierten Lagerungszeit (60 Tage); Einheit: L_N/kg oTS.

- LE(CH₄) (Methan-Lagerungsemissionen): Methananteil der Lagerungsemissionen bei 20 °C; Einheit: L_N CH₄/kg oTS.
- B₀: Theoretisches Methanbildungspotenzial (in m³ CH₄/kg oTS). Im Projekt durch BP(CH₄)/1.000 äquivalent abgebildet.
- MCF (Methane Conversion Factor): Anteil von B₀, der unter gegebenen Lagerbedingungen als Methan emittiert (in %). Im Projekt experimentell über LE(CH₄)/B₀ (bzw. LE(CH₄)/BP(CH₄)) abgeleitet.
- MCFi: im Projekt berechnete MCF-Werte

Die **Proben-Codierung** wurde wie folgt vorgenommen: Substrat (RG/SG/...); Anlagen-/Betriebsnummer (1/2/...); laufende Probenahmenummer (1/2/...); Partnerkennung (.U = UMSICHT, .H = HAWK). Römische Ziffern (I/II/III) kennzeichnen Mehrfachproben.

Prozess- und Lagerbegriffe

- Güllekeller/Unterflurlager: Güllelager unter dem Stall (unter Spaltenboden)
- Vorgrube: Zwischenlager/Anfahrtspeicher vor der Biogasanlage
- Offener Hochbehälter: Überirdischer, offener Lagerbehälter für Gülle/Gärrest
- Tiefbehälter/Erdbecken: Im Erdreich liegendes Lager mit gedämpften Temperaturschwankungen.
- Abdeckung/Schwimmschicht: Natürliche oder technische Abdeckung, nicht gasdicht; reduziert Emissionen moderat.
- Gasdichte Abdeckung: Dichte Abdeckung mit Gasfassung zur energetischen Verwertung; reduziert direkte Lageremissionen stark.
- Verweilzeit: Aufenthaltsdauer des Substrats im Fermenter/Lager; beeinflusst Abbaugrad und Restgasemission.
- Separierung: Fest-/Flüssigtrennung von Gülle oder Gärrest; verändert TS/oTS und Emissionseigenschaften.
- Co-Substrate: Nicht-tierische Substrate (z. B. Silagen, Zuckerrüben), die mit Wirtschaftsdüngern vergoren werden.
- Güllegeführte Biogasanlage: Anlage, bei der Wirtschaftsdünger den Hauptsubstratanteil bilden.
- Mehrstufige Anlage: Prozessführung mit Fermenter und Nachgärer(n) zur höheren Ausnutzung des Methanpotenzials.

Ökobilanz (LCA) und Inventarbegriffe

- LCA/Ökobilanz: Umweltbewertung gemäß ISO 14040/14044 entlang der Prozesskette
- EF-Methode: Environmental-Footprint-Methode der EU für Wirkungsabschätzung
- GWP: Global Warming Potential (Klimawirkung)
- AP: Acidification Potential (Versauerung)
- PM: Particulate Matter (Feinstaub-/Partikelwirkung)
- FD: Fossil Depletion (Verbrauch fossiler Ressourcen)
- FETP/HTPc: Aquatische Toxizität/Toxizität für den Menschen (karzinogen) – je nach EF-Kategoriebezeichnung
- Systemgrenzen foreground/background: Abgrenzung zwischen modellierten Hauptprozessen (Betrieb, Lagerung) und Datenbankprozessen (Herstellung, Energie)
- GaBi: LCA-Software/Datenbank
- Substitutionsgutschrift: Anrechnung vermiedener Umweltwirkungen durch ersetzte Mineraldüngeräquivalente

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Organisation

Die Organisation des Vorhabens wurde vom Fraunhofer UMSICHT in Oberhausen koordiniert. Es fand ein regelmäßiger Austausch zwischen den Projektpartnern und mit dem Projektträger statt.

Arbeitspaket 2: Festlegung von Kriterien zur Auswahl von Wirtschaftsdünger- und Gärrestlagern und Erarbeitung eines Prozedere für die Beprobung

Die Hauptkriterien wurden unterschieden in Tierart, Haltungsform, Wirtschaftsdüngerart, Größe der Biogasanlage (installierte Leistung in kW_{el}), Lagerform und Probenahmezeitpunkt (Temperatur).

Als Tierart wurden Schweine und Rinder ausgewählt. Um die Haltungsform und die Art des Wirtschaftsdüngers noch genauer charakterisieren zu können, wurde hier noch weiter unterteilt in Jungbullen, Milchvieh, Schweineaufzucht und Schweinemast. Die entsprechenden Haltungsformen und Wirtschaftsdüngerarten ergeben sich demnach aus den Tierarten. Zusätzlich wurde noch Gärrest aus der Biogasanlage als ein mögliches Substrat aufgenommen. Die Größe der Biogasanlage wurde in die Kriterienauswahl mit aufgenommen, da es sich bei den güllegeführten Anlagen meist um kleinere Anlagen handelt. Bei den Lagerformen wurde nach Wirtschaftsdünger und Gärrest unterschieden, da es sich hier um unterschiedliche Lager handelt. Die Probenahme sollte wegen der Temperaturabhängigkeit der Emissionen mindestens einmal bei kaltem und einmal bei warmem Wetter vorgenommen werden. Für den Kriterienkatalog wurde der Einfachheit halber nach den vier Jahreszeiten unterschieden.

Für die Probenahme wurde ein Kurzfragebogen entworfen, der vor Ort mit der jeweiligen Ansprechperson durchgegangen werden kann. Zusätzlich wurde ein Anschreiben erstellt, das den Anlagenbetreibern im Vorfeld bzw. am Tag der Probenahme zur Verfügung gestellt werden kann. Hierin werden kurz der Inhalt des Projektes erläutert und die Ansprechpersonen beider Projektpartner genannt. Zudem werden die Anonymisierung der Daten versichert und ein Ausblick gegeben auf die Analyseergebnisse, die den Anlagenbetreibern zur Verfügung gestellt werden.

Die Probenahme aus den Lagerbehältern erfolgt unter Beachtung der in der VDI-Richtlinie 4630 und in VDLUFA VII 4.1.2 beschriebenen Verfahren. Auch hierfür wurde eine Protokollvorlage erstellt, die beiden Projektpartnern vorliegt. Wichtig bei der Probenahme ist vor allem eine Durchmischung des Behälterinhalts vor der Probenahme. Der Ansatz der Lagerungsemissionen sollte innerhalb von 24 Stunden nach der Probenahme erfolgen. Die Proben für die Bestimmung der Gasbildungspotenziale (Gärtests) können eingefroren werden, falls ein Ansatz innerhalb von 24 Stunden nicht möglich ist.

Arbeitspaket 3: Gemeinsame Beprobung einer Anlage durch Fraunhofer UMSICHT und HAWK und Durchführung von Gärtests

Die gemeinsame Beprobung wurde im Juli 2022 durchgeführt und im Februar 2023 an derselben Anlage wiederholt. Es wurden Schweinegülle und Gärrest aus dem Nachgärer beprobt. Bei der Schweinegülle wurde jeweils eine Probe direkt unter dem Stallboden sowie aus der Vorgrube an der Biogasanlage entnommen. Damit kann der Einfluss der Lagerungsdauer und der Umgebungstemperatur (Beprobung je einmal im Winter und im Sommer) auf die Emissionen untersucht werden. Wie in Tabelle 1 dargestellt, wurde von der Schweinegülle das Gasbildungspotenzial bei 37 °C (mit Inokulum) und die Lagerungsemissionen bei 20 °C bestimmt sowie vom Gärrest die Lagerungsemissionen bei 20 °C. Zusätzlich wurden in beiden Laboren Gärtests mit Cellulose als Standardsubstrat und einer Rindergülleprobe aus dem KTBL/VDLUFA-Ringversuch durchgeführt.

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Untersuchungen

	Gasbildungspotenzial BP + BP(CH ₄) bei 37 °C	Lagerungsemissionen LE + LE(CH ₄) bei 20 °C
Schweinegülle (2 Beprobungen), Biogasanlage	x	x
Gärrest (2 Beprobungen), Biogasanlage		x
Cellulose, Ringversuch	x	
Rindergülle, Ringversuch	x	

Die Gasbildungspotenziale (BP) und die Lagerungsemissionen (LE) wurden bei beiden Projektpartnern in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 4630 bestimmt. Der Aufbau der Versuchsstände der beiden Projektpartner

unterscheidet sich hauptsächlich in der Größe der Ansätze und in der Art des eingesetzten Inokulums (Tabelle 2).

Die Bestimmung der Gasbildungspotenziale (BP) erfolgte bei UMSICHT in Eudiometer-Apparaturen (mit 500 mL bzw. 1000 mL Versuchsgefäßen) in temperierten Räumen bzw. in dem Yieldmaster-System der Firma Bluesens (Temperierung der Versuchsgefäße im Wasserbad, automatische Messung von Gasvolumen und Methangehalt). Die Bestimmung des BP erfolgte gemäß der VDI-Richtlinie 4630 bei der HAWK in 30-Liter PET-Fässern mit einem Nutzvolumen von 20 Liter bei 37 °C in einer Klimakammer (Tabelle 2, (d)). Jede Probe wurde in 3-fach-Bestimmung mit arbeitstäglichem Biogasgemisch angesetzt. Das oTS-Verhältnis von Probenmaterial zu Inokulum beträgt maximal 0,5. Die Lagerungsemissionen (LE) wurden bei UMSICHT in Eudiometer-Apparaturen bestimmt, die in Wasserbädern auf 20 °C temperiert wurden. Bei der HAWK wurden die Gasbildungspotenziale in 30-Liter PET-Behältern, die in temperierten Räumen standen, bestimmt, wobei das gebildete Gas in Gasbeuteln aufgefangen und regelmäßig qualitativ und quantitativ gemessen wurde. Die Lagerungsemissionen wurden bei der HAWK nach dem gleichen Prinzip, allerdings in 19-Liter-Kanistern bestimmt (Tabelle 2, (e)).

Tabelle 2: Aufbau der Versuchsstände

	UMSICHT	HAWK
Probenvolumen	500 bzw. 1.000 mL (Schott-Glasflaschen)	30-L-PET-Behälter mit 20 L Nutzvolumen (Gasbildungspotenzial), 19-L-Kanister mit 13 L Nutzvolumen (Lagerungsemissionen)
Inokulum	Faulschlamm	Separierte, flüssige Gärrestfraktion aus einer landwirtschaftlichen Biogasanlage
Gasmenge und - zusammensetzung	(a) Gaszusammensetzung über saure (Biogas) bzw. alkalische (Methan) Sperrflüssigkeit (Eudiometer) (b) Gerät „Yieldmaster“ der Firma „Bluesens“, automatisierte Volumen- und Gasmessung mit Korrektur auf Normbedingungen; 1013 mbar, 273 K	(c) Gasmenge: Trommelgaszähler (Firma Ritter mit Korrektur auf Normbedingungen; 1013 mbar, 273 K) (c) Gaszusammensetzung: Gasmessgerät (Firma Eheim; Bestimmung von Methan, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Schwefelwasserstoff)
Fotos der Versuchsstände	(a)  (b) 	(c)  (d)  (e) 

Beide Forschungseinrichtungen nehmen regelmäßig an den Ringversuchen der KTBL/VDLUFA teil. Die Cellulose aus den Ringversuchen wurde zur Validierung der Messverfahren zwischen den beiden Laboren verwendet, sowohl für die Bestimmung der Parameter TS und oTS (Tabelle 3) als auch für die Bestimmung des Biogas- bzw. Methanbildungspotenzials. Die Trockensubstanz einer Probe wird durch Trocknen bei einer Temperatur von 105 °C und Wägung der Gewichts Differenz zwischen frischer und getrockneter Probe bestimmt. Die Bestimmung wird auf Basis der Norm DIN 11465 durchgeführt. Der Gehalt an organischer Substanz einer Probe wird durch Glühen bei 550 °C unter Luftzufuhr bestimmt. Die Analyse erfolgte nach DIN EN ISO 18122 als 2-fach-Bestimmung.

Bei dem Vergleich der Trockensubstanz (TS) und der organischen Trockensubstanz (oTS) fällt auf, dass die Werte bei der Schweinegülle und dem Gärrest stärker schwanken als bei der Rindergülle (Tabelle 3). Für die Berechnung der Abweichung wurde die Differenz aus den beiden Werten auf die entsprechenden Werte der ersten Spalte (UMSICHT) bezogen.

Eine Erklärung für die Schwankungen könnte eine mögliche Inhomogenität der Proben sein, entweder bedingt durch die Probenahme an der Biogasanlage oder durch die unterschiedliche Verteilung auf die beiden Projektpartner. Die Rindergülle, die im Rahmen des KTBL/VDLUFA-Ringversuchs untersucht wurde, zeichnet sich versuchsbedingt durch eine bessere Homogenität aus. Ebenso sind die Ergebnisse für die Cellulose zwischen den Laboren nahezu identisch, da es sich bei der Cellulose um ein pulverförmiges sehr homogenes Substrat handelt.

Bei dem Ringversuch der KTBL/VDLUFA aus dem Jahr 2022 lag die erlaubte Abweichung zwischen dem höchsten und niedrigsten Wert bei 2,4 % bzw. 0,1 % für den TS- bzw. oTS von Cellulose. Für TS und oTS von Rindergülle lag die erlaubte Abweichung bei 13,9 % bzw. 7,8 %. Für den TS und oTS von Gärrest lag die erlaubte Abweichung bei 22 % bzw. 17 %. Alle Werte der beiden Labore liegen innerhalb der erlaubten Abweichung. Daran wird deutlich, dass die Verfahren zur Bestimmung von TS und oTS der beiden Projektpartner eine sehr gute Vergleichbarkeit mit geringen Abweichungen zeigen.

Tabelle 3: TS und oTS der untersuchten Proben

	UMSICHT		HAWK		Abweichung TS bzw. oTS
	TS [%]	oTS [%TS]	TS [%]	oTS [%TS]	
Schweinegülle, 1. Probenahme Biogasanlage (SG1.1)	4,5	75,4	4,2	70,3	6,7 % bzw. 6,8 %
Gärrest, 1. Probenahme Biogasanlage (GR1.1)	6,1	61,7	5,0	63,1	18 % bzw. -2,3 %
Schweinegülle, 2. Probenahme Biogasanlage (SG1.2)	4,5	71,8	5,3	73,1	-18 % bzw. -1,8 %
Gärrest, 2. Probenahme Biogasanlage (GR1.2)	7,5	69,2	7,7	69,1	-2,7 % bzw. 0,1 %
Rindergülle, Ringversuch (RG RV)	8,5	73,0	8,3	74,0	2,4 % bzw. -1,4 %
Cellulose, Ringversuch	96,0	99,9	95,6	99,9	0,4 % bzw. 0,0 %

Im Rahmen der ersten gemeinsamen Probenahme wurden zeitgleich in beiden Laboratorien das Biogasbildungspotenzial (BP) und das Methanbildungspotenzial (BP(CH₄)) von Schweinegülle (SG1.1) sowie von Cellulose als Referenzsubstanz bestimmt. In Abbildung 1 sind die Methanbildungspotenziale der Gülle und der Cellulose im Vergleich mit Literaturwerten dargestellt. Die Werte der beiden Projektpartner liegen höher als die Literaturwerte aus den Faustzahlen Biogas (KTBL 2013). Auffällig ist zudem, dass die BP(CH₄) der Gülle in den HAWK-Ansätzen höher ausfallen als in den UMSICHT-Ansätzen, während sich bei Cellulose das umgekehrte Bild zeigt. Dieser Unterschied lässt sich auf die unterschiedlichen Inokula zurückführen: HAWK verwendet separierten Gärrest, der an Gülle besser adaptiert ist, wohingegen UMSICHT Faulschlamm einsetzt, der besser an cellulosehaltige Substrate adaptiert ist.

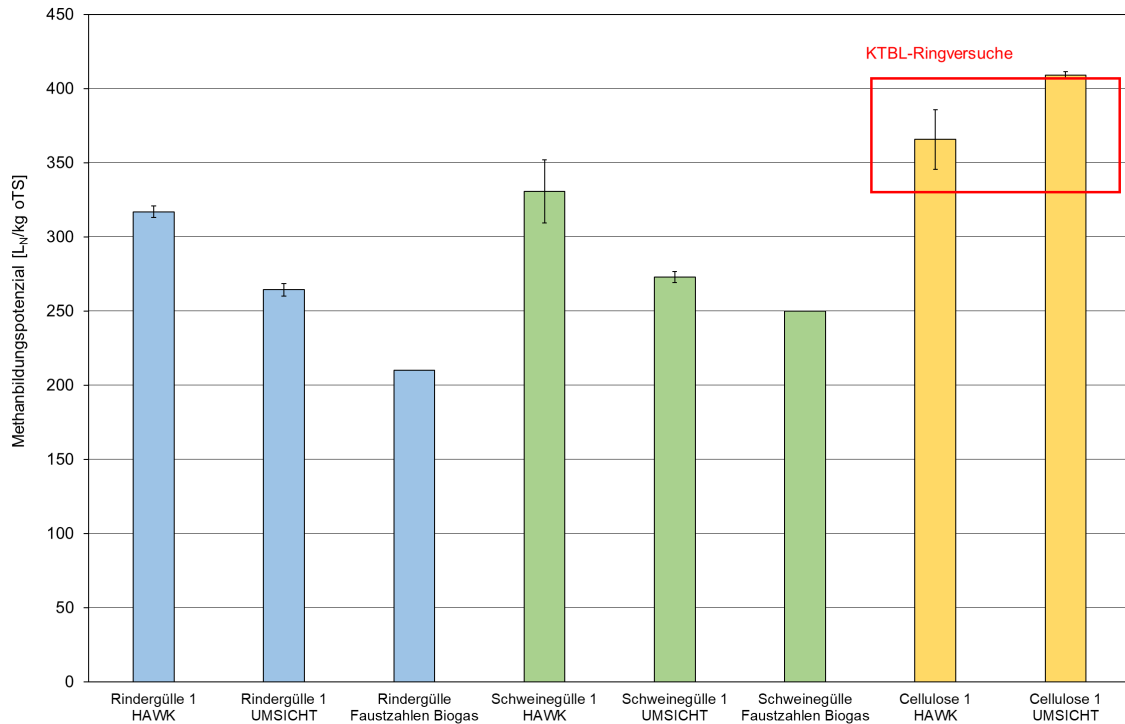


Abbildung 1: Methanbildungspotenzial von Rindergülle, Schweinegülle und Cellulose im Laborvergleich

Daher wurde für die Bestimmung des Gasbildungspotenzials im Rahmen der zweiten gemeinsamen Beprobung in beiden Laboren der gleiche separierte, flüssige Gärrest als Inokulum verwendet. Außerdem wurde zur weiteren Optimierung und Qualitätssicherung ein Protokoll zur Durchführung der Analysen angelegt, in welchem die einzelnen Arbeitsschritte der jeweiligen Labore abgeglichen werden.

Die Ergebnisse der Bestimmung von Biogasbildungspotenzial (BP), Methanbildungspotenzial (BP(CH₄)) und der Lagerungsemissionen (LE und (LE(CH₄))) sowie die Abweichungen der beiden Labore sind in Tabelle 4 dargestellt. Für die Berechnung der Abweichung wurde analog zu den TS und oTS-Werten die Differenz der beiden Werte auf die entsprechenden Werte der oberen Zeile (UMSICHT) bezogen. Hier ist zu sehen, dass die Abweichungen bei BP und BP(CH₄) bei den Werten der zweiten gemeinsamen Probenahme deutlich geringer ausfallen (4 % statt 25–27 %). Die hohen Abweichungen bei den Lagerungsemissionen im Rahmen der zweiten Probenahme (SG1.2) in Höhe von -17 bzw. -21 % lassen sich auf die Unterschiede bei der TS-Bestimmung zurückführen. Werden die LE- und LE(CH₄)-Werte auf Frischmasse bezogen, liegt die Abweichung lediglich bei 0 bzw. 6 %. Die Abweichungen beim Biogasbildungspotenzial und beim Methanbildungspotenzial für die Cellulose verändern sich im Vergleich von UMSICHT und HAWK nur geringfügig von -8 % auf +5 % (BP) bzw. bleiben bei -13 % (BP(CH₄)). Auch hier sind die Werte weiterhin im Rahmen der Vorgaben des KTBL/VDLUFA-Ringversuchs.

Tabelle 4: Ergebnisse der Bestimmung der Gasbildungspotenziale und Lagerungsemissionen aus den beiden Probenahmen

	BP L _N /kg oTS	BP(CH ₄) L _N /kg oTS	LE L _N /kg oTS	LE(CH ₄) L _N /kg oTS
1. Probenahme				
SG1.1, UMSICHT	423	273	323	225
SG1.1, HAWK	529	346	355	242
Abweichung	+25 %	+27 %	+10 %	+8 %
Cellulose 1, UMSICHT	765	413	n. v.	
Cellulose 1, HAWK	712	366		
Abweichung	-7 %	-11 %		
GR1.1, UMSICHT	n. v.		34,9	29,9
GR1.1, HAWK			36,4	22,5
Abweichung			+4 %	-25 %
2. Probenahme				
SG1.2, UMSICHT	426	281	283	201
SG1.2, HAWK	444	292	236	158
Abweichung	+4 %	+4 %	-17 %	-21 %
Cellulose 2, UMSICHT	686	409	n. v.	
Cellulose 2, HAWK	720	355		
Abweichung	+5 %	-13 %		
GR1.2, UMSICHT	n. v.		28,4	19,9
GR1.2, HAWK			27,5	18,6
Abweichung			-3 %	-7 %

BP: Biogasbildungspotenzial, BP(CH₄): Methanbildungspotenzial, LE: Lagerungsemissionen, LE(CH₄): Methan-Lagerungsemissionen, SG1.1: Schweingülle aus 1. Probenahme, GR1.1: Gärrest aus 1. Probenahme, SG1.2: Schweinegülle aus 2. Probenahme, GR1.2: Gärrest aus 2. Probenahme, n. b.: nicht bestimmt, n. v.: Untersuchung nicht vorgesehen

Arbeitspaket 4 und Arbeitspaket 7: Beprobung von Anlagen und Anlagencharakterisierung in Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und angrenzenden Bundesländern; Temperaturmessung an Güllelagern

Von UMSICHT wurden insgesamt 16 Probenahmen an fünf unterschiedlichen Biogasanlagen und einem Güllelager durchgeführt. Dabei wurden zwei Anlagen zweifach, zwei Anlagen dreifach und jeweils eine Anlage vierfach bzw. fünffach beprobt. Zusätzlich wurde Rindergülle von einer Anlage und Schweinegülle aus dem Lager bei UMSICHT bei Raumtemperatur gelagert und beprobt. Die Probenahmen und die Kriterien der Anlagen sind in Tabelle 5 aufgeführt. Von UMSICHT wurden immer Gülle bzw. die pumpfähige Mischung der Eingangssubstrate (Anmaische) und Gärrest beprobt und untersucht.

Von der HAWK wurden insgesamt elf Probenahmen auf vier unterschiedlichen Tierhaltungsbetrieben mit Biogasanlage durchgeführt. Von der HAWK wurden teilweise zusätzlich zu den Güllen und Gärresten auch weitere Eingangssubstrate wie Zuckerrübe, Maissilage, Hähnchenmist, Putenmist und Rinder-/Pferdemist beprobt. Zusätzlich fanden teilweise Beprobungen von Güllen und Misten an unterschiedlichen Probenahmestellen (Stall, Vorgrube, Lager) zu unterschiedlichen Zeitpunkten (frisch/gelagert) statt. Die Kriterien der von der HAWK beprobten Anlagen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Bei der Anlage 1 wurde eine gemeinsame Probenahme von UMSICHT und HAWK durchgeführt, daher wird sie auch in beiden Teilen dieses Berichts gleich bezeichnet. Alle weiteren Anlagen wurden von den Projektpartnern fortlaufend nummeriert und mit einem „U“ bzw. „H“ versehen, um Verwechslungen auszuschließen. Es handelt sich hierbei durchweg standortbedingt um unterschiedliche Anlagen.

In Anlage 4.U wurden unterschiedliche feste Proben von den Eingangssubstraten genommen (AM, RD, HTK, WDX). Unter Anmaische (AM) wird die Mischung der Eingangssubstrate verstanden, d. h. Rinderdung (RD), Hühnertrockenkot (HTK) und Wirtschaftsdüngermix (WDX) wurden vom Anlagenbetreiber mit der Flüssigphase des Gärrestes (GR(fl)) vermischt und dann als Substrat in die Biogasanlage eingebracht. Daher wurde die Entscheidung getroffen, dass bei UMSICHT die Anmaische als Eingangssubstrat auf ihr Gasbildungspotenzial und auf die Lagerungsemission untersucht wird. Die Begleitanalytik der Feststoffe wurde wie im Projektantrag beschrieben, bei der HAWK durchgeführt, da dies bei UMSICHT technisch nicht möglich war.

Da bei den vor Ort durchgeführten Probenahmen immer mehrere Faktoren verändert waren (Füllstand der Lager, Umgebungstemperatur, TS- bzw. oTS-Gehalt der Proben), wurde zum Ende der Projektlaufzeit ein interner Lagerungsversuch bei UMSICHT im Technikum durchgeführt. Hierzu wurde einmalig von Anlage 5 U (Rindergülle) und vom Lager 6 U (Schweinegülle) etwa 10 Liter Gülle entnommen. Direkt nach der Probenahme wurden wie gewohnt Lagerungsemissionen und Gasbildungspotenziale der frischen Güllen bestimmt. Die Reste der Güllen wurden unter kontrollierten Temperaturbedingungen bei UMSICHT gelagert. Hieraus wurden nach 100 Tagen erneut Proben entnommen und analysiert.

Tabelle 5: Durchgeführte Beprobungen (UMSICHT)

Bezeichnung/ Probenahme	Anlage 1 1.1 + 1.2	Anlage 2 U 2.1.U + 2.2.U	Anlage 3 U 3.1.U	Anlage 4 U 4.1.U–4.3.U	Anlage 5 U 5.1.U–5.4.U; 5.6.U	Lager 6 U 6.1.U–6.2.U; 6.4.U	Interne Lagerung UMSICHT
Art der Wirtschaftsdünger	Schwein (Mast), Rindermist, Geflügelmist	Mischgülle: Rind, HTK, Mist (Schwein, Rind, Geflügel, Pferd, Pute)	Mischgülle: Rind, Schwein, Mist (Rind, Schwein, Pute)	Rind (Gülle + Mist), HTK, Pferd	Rind (Gülle und Mist)	Schwein	Rind (RG5.5.U); Schwein (SG6.3.U)
Biogasanlage, installierte Leistung BHKW	< 500 kW	< 1000 kW	< 1000 kW	1500 kW	1200 kW	Keine BGA	--
Zusatzsubstrate, Substratmix	Maissilage	--	Maissilage	Maissilage	Maissilage	--	--
Lager Wirtschaftsdünger 1	100 m³ (Lager unter Spaltboden)	1200 m³	5500 m³	ca. 225 t Feststoffe	350 m³	1200 m³ (Lager unter Spaltboden)	10 Liter Kanister
Lager Wirtschaftsdünger 2	40 m³ (Vorgrube)	--	--	--	-	-	--
Probenahmen							
Zeitpunkt	Juli 2022; Feb. 2023	Nov. 2022; Apr. 2023	Jan. 2023	März 2024; Aug. 2024; Jan. 2025	Apr. 2024; Juli 2024; Jan. 2025; Apr. 2025; Okt. 2025	Apr. 2024; März 2025; Okt. 2025	nach 100 Tagen Lagerung
Wetter	Sonne; Sonne	Sonne; Regen/Wind	bewölkt	Regen; bewölkt; sonnig	Regen; sonnig; sonnig; bedeckt	Regen; sonnig; bedeckt	--
Umgebungstemperatur	26 °C; 0 °C	15 °C; 10 °C	6 °C	10 °C; 23 °C; 6 °C	14 °C; 23 °C; -3 °C; 17 °C; 15 °C	14 °C; 17 °C; 15 °C	Raumtemperatur, Technikum
Uhrzeit Start	12:00; 10:30	11:00; 10:00	10:30	11:00; 10:30; 11:00	12:00; 11:00; 12:00; 11:30; 12:00	10:00; 10:30; 11:00	--
Jahreszeit	Sommer; Winter	Herbst, Frühling	Winter	Frühling; Sommer; Winter	Frühling; Sommer; Winter; Frühling; Herbst	Frühling; Frühling; Herbst	--
erfasste Proben	SG, GR	MG, NG, GR	SG, RG, MG, GR	AM, GR(fl), GR(s), RD, HTK, WDX	RG, GR	SG	RG, SG
Beschreibung der Proben	SG: aus Lager unter Stall GR: aus Gärrestlager	MG: Mischgülle vor Zugabe BGA NG: aus Nachgärer; GR: aus Gärrestlager	MG: Mischgülle vor Zugabe BGA GR: aus Gärrestlager	AM: Mischung aus RD, HTK, WDX, GR(fl) vor Zugabe BGA	RG: aus Güllelager GR: aus Gärrestlager	SG: aus Lager unter Stall	--

AM: Anmaische, GR: Gärrest, GR(fl): flüssige Phase Gärrest, GR(s): feste Phase Gärrest, HTK: Hühnertrockenkot, MG: Mischgülle, NG: Nachgärer, RD: Rinderdung, RG: Rindergülle, SG: Schweinegülle, WDX: Wirtschaftsdünger mix

Tabelle 6: Durchgeführte Beprobungen (HAWK)

Bezeichnung/ Probenahme	Anlage 1 1.1 + 1.2	Anlage 2 H 2.1.H + 2.4.H	Anlage 3 H 3.1.H + 3.2.H	Anlage 4 H 4.1.H – 4.3.H
Art der Wirtschaftsdünger	Schweingülle (Mast), Schweine-, Rinder-, Geflügelmist	Rindergülle, Rindermist	Rindergülle, Pferde, Schweine-, Rindermist	Rindergülle
Biogasanlage , installierte Leistung BHKW	< 500 kW	< 150 kW	1000 kW	< 150 kW
Zusatzsubstrate, Substratmix	Maissilage		Maissilage, Zuckerrübe	
Lager Wirtschaftsdünger 1	100 m³ (Lager unter Spaltboden)	100 m³ (Lager unter Stall)	135 m³ (Lager unter Stall)	direkt aus Stall (Schiebersystem)
Lager Wirtschaftsdünger 2	40 m³ (Vorgrube)	70 m³ offene Grube, abgedeckt, nicht gasdicht	5500 m³ offene Grube mit Schwimmdecke	90 m³ offene Grube
Probenahmen				
Zeitpunkt	Juli 2022; Feb. 2023	Feb. 2023; Aug. 2023; Sept. 2023; Jan. 2024	Nov. 2023; Aug. 2024	Feb. 2024; Juni 2024; Juli 2024
Wetter	Sonne; Sonne	nebelig, bedeckt; bedeckt, Nieselregen; sonnig; klar, kein Regen	bedeckt, Regen	bedeckt, kein Regen
Umgebungstemperatur	26 °C; 0 °C	1 °C; 14 °C; 14 °C; 5 °C	9 °C; 24 °C	6 °C; 12 °C; 17 °C
Uhrzeit Start	12:00; 10:30	11:10; 11:30; 11:00; 10:30	10:00; 11:00	10:00; 10:30; 10:00
Jahreszeit	Sommer; Winter	Winter; Sommer; Herbst; Winter	Winter; Sommer	Winter; Sommer; Sommer
erfasste Proben	1: (SG, GR) 2: (SG, GR, ZR, MS, Mist gemischt)	1: (RG I, RG II, GR) 2: (RG I, RG II, GR) 3: (RM I, RM II, RM III) 4: (RM I, RM IV)	1: (RG I, RG II, PfM, RM, MS, GR, ZR) 2: (RG I, RG II, SM, RM, GR)	1: (GR, RG I, RG II) 2: (RG I, RG II) 3: (GR, RG I, RG II)
Beschreibung der Proben	SG: aus Lager unter Stall GR: aus dem Gärrestlager	RG I: direkt aus dem Stall RG II: aus der Vorgrube RM I: Miete frisch RM II: Miete 10 Tage gelagert RM III: Miete 21 Tage gelagert RM IV: 38 Tage gelagert	RG I: direkt aus Stall RG II: aus der Vorgrube GR: aus dem Gärrestlager	RG I : direkt aus dem Stall RG II: aus der Vorgrube GR: aus Fermenter

Abkürzungen: GR: Gärrest, SG: Schweinegülle, RG: Rindergülle, MS: Maissilage, RM: Rindermist, PfM: Pferdemist, ZR: Zuckerrübe, PM: Putenmist, HM: Hähnchenmist

Temperaturmessung an Güllelagern (UMSICHT)

Bislang wurden nur wenige Temperaturmessungen an Güllelagern unter Praxisbedingungen durchgeführt. Messungen aus den 1980er Jahren zeigen, dass die Temperaturen in den Gülle zwischen 5 bis 10 °C (Winter) und 18 °C (Sommer) schwanken (KTBL 2021). Im Rahmen des Projektes Gaeremission wurden an zwei unterschiedlichen Güllelagern Systeme zur kontinuierlichen Temperaturmessung installiert (Abbildung 2). Die Datenspeicherung, Datenauswertung und -visualisierung erfolgt über die institutseigene IoT-Plattform „Thingsdata“. Es wurde in beiden Lagern jeweils die Temperatur der Gülle und die Außentemperatur gemessen.



Abbildung 2: Fotos der Güllelager (links: Güllelager 1 mit Rindergülle – Biogasanlage 5 U; rechts: Güllelager 2 mit Schweinegülle – Lager 6 U)

In Abbildung 3 sind die gemittelten Monatstemperaturen für die Güllelager im Verlauf von 12 Monaten dargestellt. Zusätzlich wurden die Werte von (Reck 1989) sowie aus der Dissertation von (Reinhold 1988) aufgenommen. Die Gülletemperaturen wurden von (Reinhold 1988) zum einen in den Jahren 1983 und 1984 gemessen und zum anderen basierend auf dem langjährigen Mittel der Außen- und Erdtemperaturen von umliegenden meteorologischen Stationen (Langjähriges Mittel mit 20 bis 30 Jahren als Datenbasis) berechnet. Die Werte von (Reck 1989) wurden gemessen.

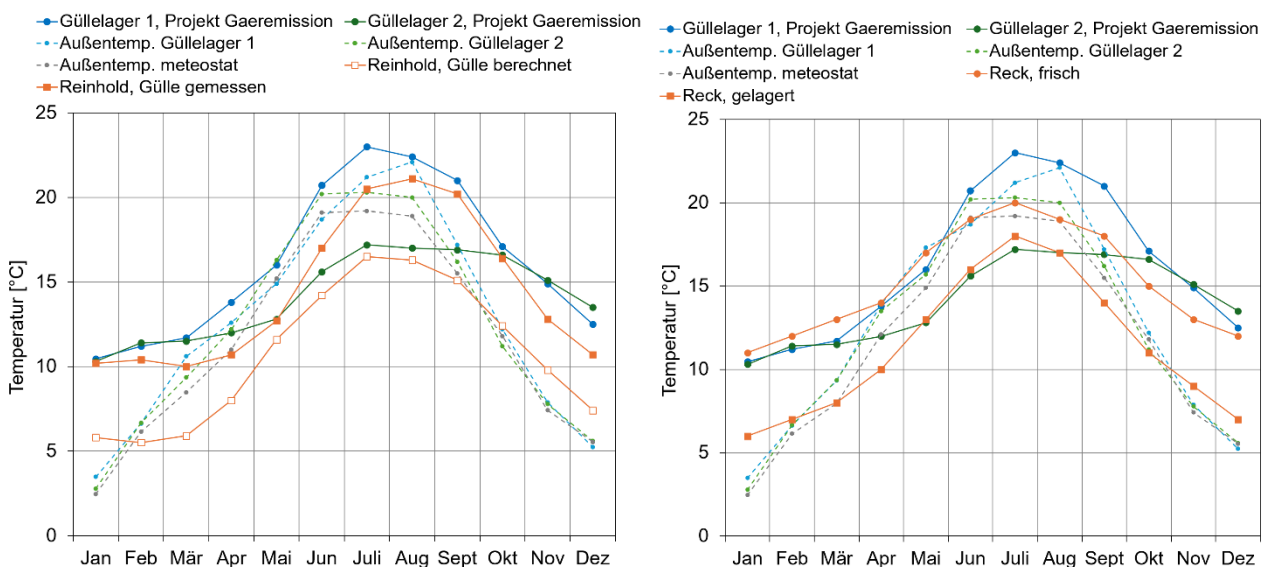


Abbildung 3: Lagerungstemperaturen von Gülle

Abbildung 4 zeigt für beide Güllelager die Monatsmitteltemperaturen sowie die jeweiligen Monatsminima und Monatsmaxima (Mittel, Min, Max).

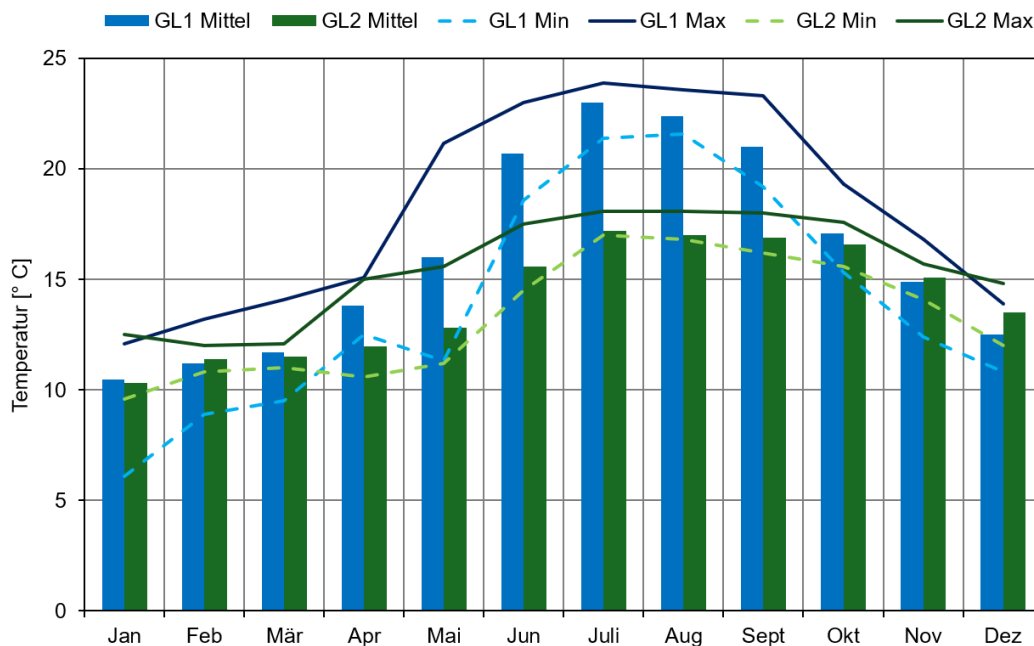


Abbildung 4: Mittel-, Min- und Max-Werte der Gülle in Güllelager 1 und Güllelager 2

Die im Projekt erfassten Zeitreihen beider Güllelager (Abbildung 3 und Abbildung 4) zeigen ausgeprägte saisonale Schwankungen der Gülletemperatur mit gedämpfter Amplitude und zeitlicher Verzögerung gegenüber der Außenluft. Das freistehende Lager (Güllelager 1) weist dabei eine größere Spannweite auf (Winter: 6–17 °C; Sommer: 19–24 °C) als das unter dem Spaltboden liegende Lager (Güllelager 2; Winter: 10–16 °C; Sommer: 15–18 °C).

Rennie et al. zeigen, dass in praxisrelevanten, flachen Großbehältern der Wärmehaushalt der Gülle primär durch vertikale Prozesse am freien Spiegel geprägt wird; Wärmeflüsse über die Wände sind demgegenüber nachrangig. Maßgeblich sind damit die Oberfläche-zu-Volumen-Relation sowie die resultierende „thermische Masse“. Das unter dem Stall angeordnete Güllelager 2 besitzt im Verhältnis zur Oberfläche eine höhere Tiefe und ist gegenüber direkter solarer Einstrahlung abgeschirmt. In Übereinstimmung mit dem Modell resultieren geringere Sommermaxima und eine insgesamt stärker gedämpfte Jahresamplitude als im freistehenden Güllelager 1. (Rennie 2018) Eine Überdachung (ohne Seitenwände) kann die sommerliche Aufheizung durch Reduktion der solaren Einstrahlung begrenzen und zugleich winterliche Auskühlung durch veränderte langwellige Strahlungsbilanz abmildern. Das Temperaturprofil von Güllelager 2 ähnelt dieser „überdachten“ Randbedingung: niedrigere Sommerhöchstwerte und höhere Winterminima als in Güllelager 1 sprechen für eine wirksame Abschattung und eine verringerte Kopplung an Wind- und Strahlungseinflüsse im Stallumfeld.

Es bestehen teils deutlichen Abweichungen zwischen Gülle- und Lufttemperatur, bedingt durch solare Gewinne, Verdunstungskühlung, langwellige Strahlung sowie die große Wärmekapazität der Flüssigkeit (Rennie 2018). Die gemessenen Monatsmittel in den beiden Güllelagern belegen diese Dynamik: Die Maxima in Güllelager 1 liegen über den Werten von Güllelager 2, was auf den Einfluss der Sonneneinstrahlung auf das Lager hinweist; gleichzeitig zeigen beide Lager eine eindeutige Dämpfung und Verzögerung gegenüber der Außenwitterung.

In Anknüpfung an Rennie et al. ist bereits eine Erhöhung der Gülletemperatur um wenige Grad im relevanten Bereich mit deutlichen Zunahmen der methanogenen Aktivität verknüpft. Vor diesem Hintergrund sind die um 3–6 °C höheren Sommerwerte in Güllelager 1 gegenüber Güllelager 2 emissionsrelevant zu bewerten. Umgekehrt deuten die höheren Winterminima in Güllelager 2 auf eine geringere Unterkühlung und eine schnellere Frühljahrsaufwärmung hin, was – abhängig von Füllstandsdynamik und Lagerhistorie – die saisonale Emissionsspitze zeitlich verlagern kann.

Arbeitspaket 5 und Arbeitspaket 8: Durchführung von Gärtests zur Bestimmung von Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen

Für die Bestimmung der Gasbildungspotenziale und Lagerungsemissionen für die unterschiedlichen Wirtschaftsdünger und Gärreste wurden Gärtests wie in Arbeitspaket 3 beschrieben durchgeführt.

Die oTS-bezogenen Gasbildungspotenziale und Lagerungsemissionen wurden zusätzlich auf Basis der experimentell ermittelten Gasbildungskinetiken mathematisch mittels Richards-Funktion modelliert, die in den meisten Fällen eine bessere Näherung zeigt als die Gompertz-Funktion:

$$y(t) = y_{max}(1 + v e^{-k(t-t_0)})^{-\frac{1}{v}}$$

mit	$y(t)$ [L _N /kg oTS]	zeitabhängige Gasproduktion
	y_{max} [L _N /kg oTS]	maximal erreichbare Gasproduktion
	k [1/d]	Wachstumsrate k
	v [-]	Formparameter v
	t_0 [d]	zeitliche Verschiebung, Indikator für den Beginn der Gasbildung

Die Näherungsfunktionen werden genutzt, um die Kinetiken der Gasbildung vergleichend zu bewerten. Für die Berechnung der Näherungsfunktion wurden für die Lagerungsemissionen die experimentell ermittelten Ergebnisse für den Zeitraum von 60 Tagen und für das Bildungspotenzial für den Zeitraum bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums herangezogen. Vergleichende Betrachtungen werden vor allem stoffspezifisch und zum Teil auch anlagenspezifisch vorgenommen.

Die oTS-bezogenen **Gasbildungspotenziale und Lagerungsemissionen** für die unterschiedlichen Wirtschaftsdünger und Gärreste sind im Folgenden vergleichend dargestellt:

- Biogas- und Methanbildungspotenzial (BP und BP(CH₄)): Rindergülle, Schweinegülle, Rindermist, Rest-Mist, Mischgülle/Anmaische
- Biogas- und Methanbildungspotenzial (BP und BP(CH₄)) – Kinetik der Gasbildung: Rindergülle, Schweinegülle, Rindermist, Sonstige Wirtschaftsdünger fest
- Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen (LE und LE(CH₄))
- Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen (LE und LE(CH₄)) – Kinetik der Gasbildung
- Anlagenspezifischer Vergleich der Gasbildungskinetiken der Lagerungsemissionen der Gärreste ausgewählter Anlagen

Zur **Charakterisierung der Gärrest- und Wirtschaftsdüngerproben** wurde neben der Bestimmung der Gasbildungspotenziale und der Lagerungsemissionen die folgende Begleitanalytik durchgeführt:

- Trockensubstanz (TS) und organische Trockensubstanz (oTS): Wirtschaftsdünger und Gärreste; Co-Substrate (nur HAWK)
- Ammonium-Stickstoff (NH₄-N), pH-Wert und FOS/TAC (nur HAWK)
- Makronährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium)
- Organische Säuren (Essigsäure, Propionsäure, iso-Buttersäure, Buttersäure, iso-Valeriansäure und Valeriansäure)

Eine ausführliche Beschreibung der Messsysteme und der Unterschiede bei den beiden Projektpartnern ist in AP2 nachzulesen.

Biogas- und Methanbildungspotenzial (BP und BP(CH₄))

Rindergülle

In Abbildung 5 sind die Bildungspotenziale für Biogas (BP) und Methan (BP(CH₄)) von Rindergüllen dargestellt. Das mittlere BP liegt mit 406 L_N/kg oTS und das mittlere BP(CH₄) mit 231 L_N/kg oTS über dem Wert der in der Literatur (KTBL 2013) mit 380 L_N/kg oTS angegeben wird. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht nur frische Rindergüllen, sondern auch gelagerte Rindergüllen eingeflossen sind. Das BP der frischen Rindergüllen liegt im Mittel mit 418 L_N/kg oTS leicht höher als das BP(CH₄) der gelagerten Rindergüllen mit 403 L_N/kg oTS.

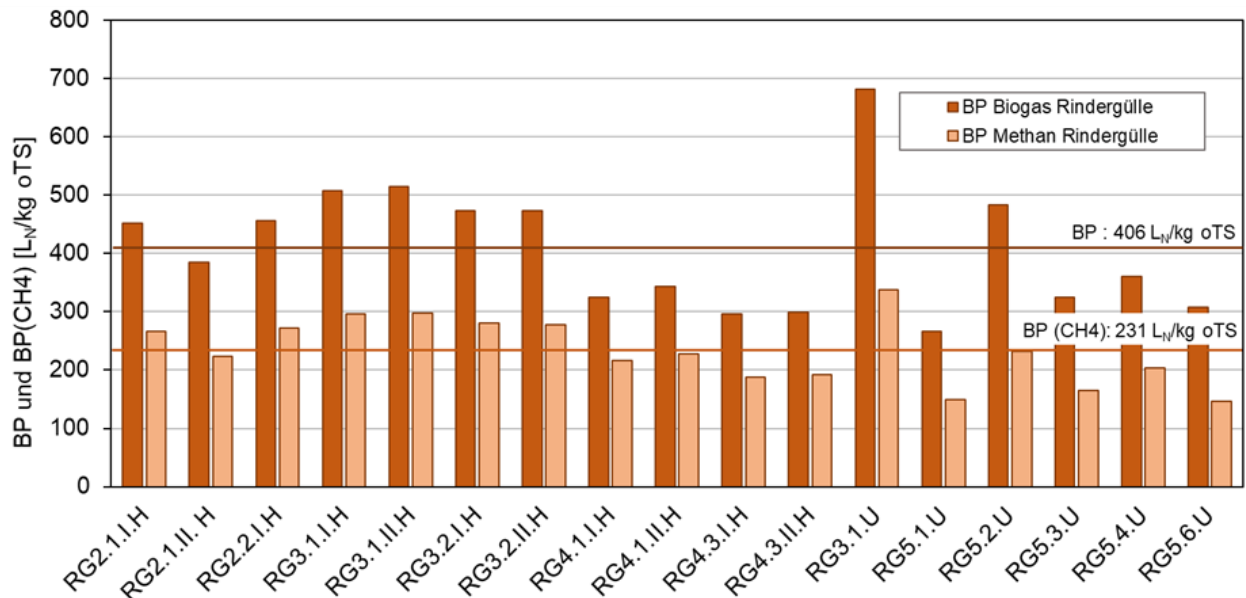


Abbildung 5: Biogas- (BP) und Methanbildungspotenzial (BP(CH₄)) von Rindergülle

Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, unterscheiden sich die ermittelten Biogas- und Methanbildungspotenziale zwischen den beprobten landwirtschaftlichen Betrieben. Die Rindergülleproben der Anlagen 3 H und 3 U weisen die höchsten und die Proben der Anlagen 2 H und 5 U (mit Ausnahme von RG 5.2.U) die niedrigsten Werte auf. Die Unterschiede im BP und BP(CH₄) der Rindergüllen zwischen den landwirtschaftlichen Betrieben lassen sich durch die Haltungsform, Fütterung und die Lagerung der Gülle erklären.

Schweinegülle

In Abbildung 6 sind die Biogas- und Methanbildungspotenziale dargestellt. Im Mittel liegt das BP bzw. das BP(CH₄) der analysierten Proben bei 429 L_N/kg oTS bzw. bei 276 L_N/kg oTS. In der Literatur (KTBL 2013) wird das BP mit 420 L_N/kg oTS angegeben.

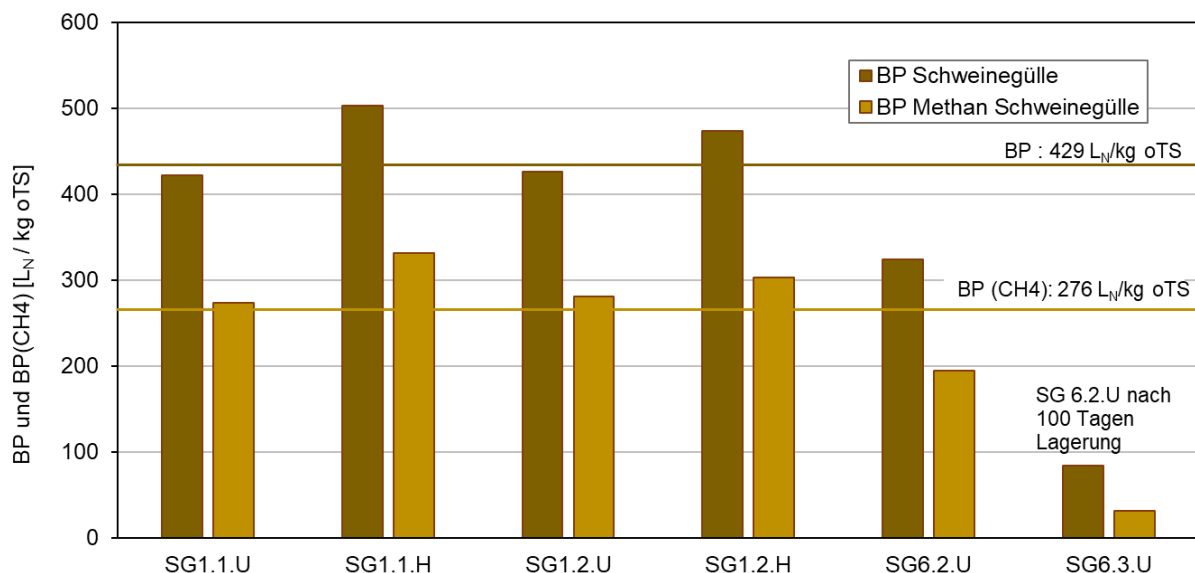


Abbildung 6: Biogas- (BP) und Methanbildungspotenzial (BP(CH₄)) von Schweinegülle mit unterschiedlicher Lagerungsdauer

Die Biogas- und Methanbildungspotenziale der Schweinegülle von Anlage 1 liegen mit 421–502 L_N/kg oTS am höchsten. Bei der Schweinegülle SG 6.3 U sind die Werte mit 84 bzw. 31 L_N/kg oTS sehr niedrig. Diese Schweinegülle entspricht der SG6.2.U, wurde aber zusätzlich für 100 Tage im Technikum bei UMSICHT gelagert. Der Verlust bezüglich der Biogas- und Methanbildungspotenziale aufgrund der Lagerung beläuft sich auf 240 L_N/kg oTS.

Rindermist

Bei der Beprobung der ersten Versuchsanlage fielen mehrere Mieten an Mist auf. Um die Relevanz von Lagerungsverlusten und den Einfluss auf die Emissionen von Mist ebenfalls im Projekt erfassen zu können,

wurden Miste mit in die Beprobung und Analyse der Biogas- und Methanbildungspotenziale aufgenommen und betrachtet. In Abbildung 7 sind die Biogas- und Methanbildungspotenziale von Rindermist dargestellt. Abhängig vom Kot/Stroh Verhältnis können die Werte bei Mist stark schwanken. In der Literatur wird das BP mit 450 L_N/kg oTS angegeben. Damit liegen die gemessenen Werte mit 410 L_N/kg oTS (BP) bzw. 221 L_N/kg oTS (BP(CH₄)) unter den angegebenen Werten.

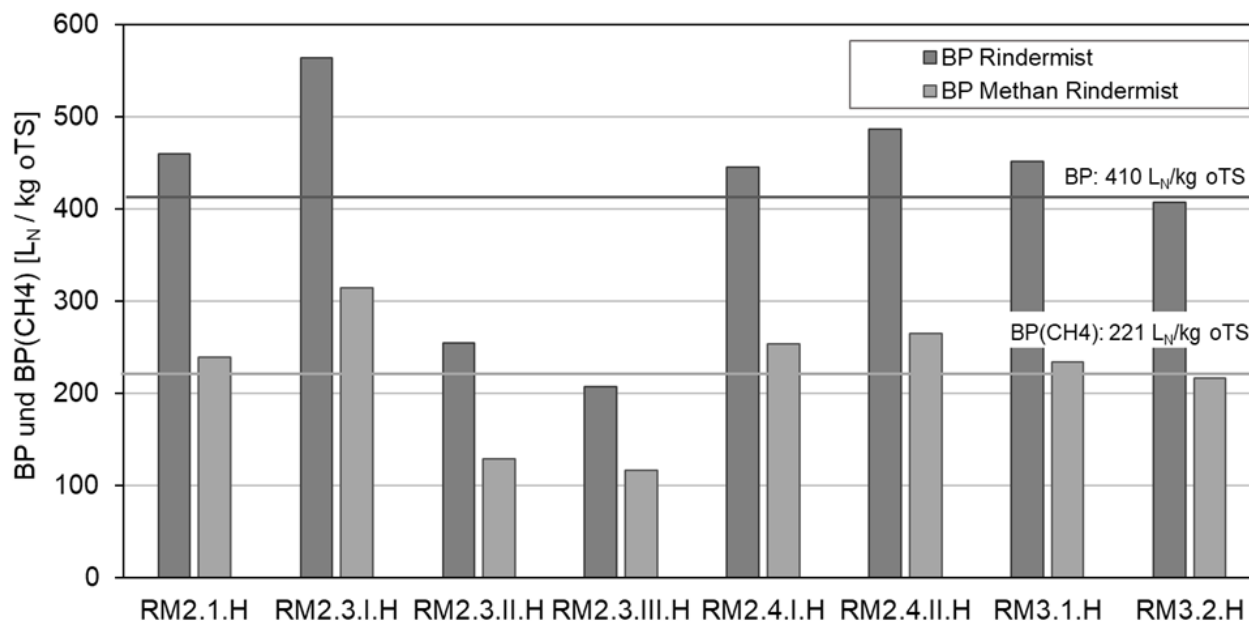


Abbildung 7: Biogas- (BP) und Methanbildungspotenzial (BP(CH₄)) von Rindermist mit unterschiedlicher Lagerungsdauer

Die Rindermistproben RM 2.3.I bis III unterscheiden sich in ihrer Lagerungsdauer. Bei der Probe RM 2.3.I handelt es sich um eine frische Rindermistprobe, die Probe RM 2.3.II wurde 10 Tage und die Probe RM 2.3.III 21 Tage in einer Miete gelagert (vgl. Tabelle 5). Das Biogas- bzw. Methanbildungspotenzial der frischen Rindermistprobe verringert sich nach 10 Tagen Lagerung von 564 bzw. 315 L_N/kg oTS auf 254 bzw. 129 L_N/kg oTS. Die Rindermistprobe, welche 21 Tage gelagert wurde, weist mit einem BP von 207 bzw. BP(CH₄) von 116 L_N/kg oTS den niedrigsten Wert auf. Für Rindermist wiesen frische Sommerproben ein höheres BP (BP(CH₄)) von 550 L_N/kg oTS (307 L_N/kg oTS) auf im Vergleich zu den Winterproben, die zwischen 452–506 L_N/kg oTS (235–268 L_N/kg oTS) lagen.

Rest-Mist

Unter dem Sammelbegriff „Rest Mist“ werden Mistproben bezeichnet, die auf Anlagen beprobt wurden, jedoch nur als einzelne Probe dieser Substratgruppe vorliegen. Im Projekt wurden das Biogas- und Methanbildungspotenzial für einen Schweinemist und einen Pferdemit bestimmt und in Abbildung 8 dargestellt. Das BP für Pferdemit liegt bei 578 L_N/kg oTS und für Schweinemist bei 377 L_N/kg oTS.

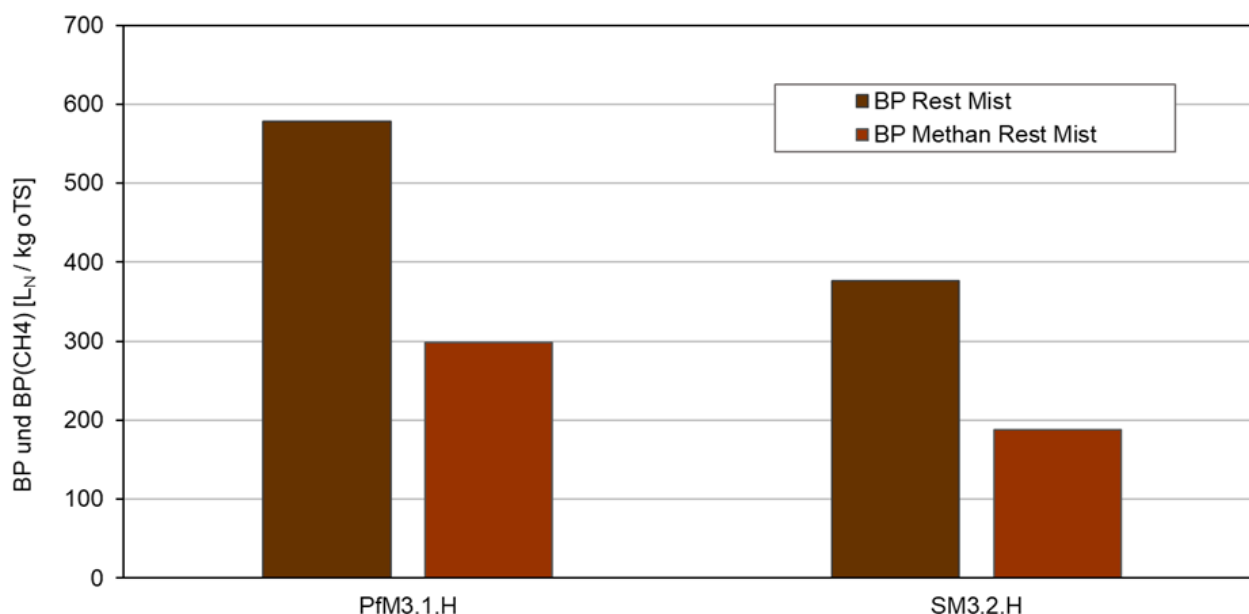


Abbildung 8: Biogas- (BP) und Methanbildungspotenzial (BP(CH₄)) von Pferde- und Schweinemist

Der Pferdemist hatte ein höheres Biogas- bzw. (Methan-)bildungspotenzial von 588 L_N/kg oTS (303 L_N/kg oTS) im Vergleich zu Rindermist. Es konnten jedoch keine klaren Schlussfolgerungen gezogen werden, da nur eine Pferdemistprobe gesammelt wurde. Hierbei ist wieder zu berücksichtigen, dass das Stroh/Kot-Verhältnis der Mistproben sowie die Lagerungsdauer Einfluss auf das Biogas- und Methanbildungspotenzial haben. Zur Lagerungsdauer der beiden Mistproben gibt es keine Angaben.

Mischgülle/Anmaische

Bei der Beprobung mehrerer Anlagen wurden Mischgülle als Probe genommen. Dabei handelt es sich um Gülle aus Rinder- und Schweinegülle, welche jedoch nicht separat gelagert wurden, sondern als Mischgülle mit unterschiedlichen Anteilen als Substrat in die jeweilige Biogasanlage gefüttert wurden. Bei Anmaische (AM) handelt es sich um eine Mischung der Eingangssubstrate, d. h. Rinderdung, Hühnertrockenkot und Wirtschaftsdüngermix wurden vom Anlagenbetreiber mit der Flüssigphase des Gärrestes (GR(fl)) vermischt. In Abbildung 9 sind die Biogas- und Methanbildungspotenziale für zwei Mischgülle und die Anmaische dargestellt.

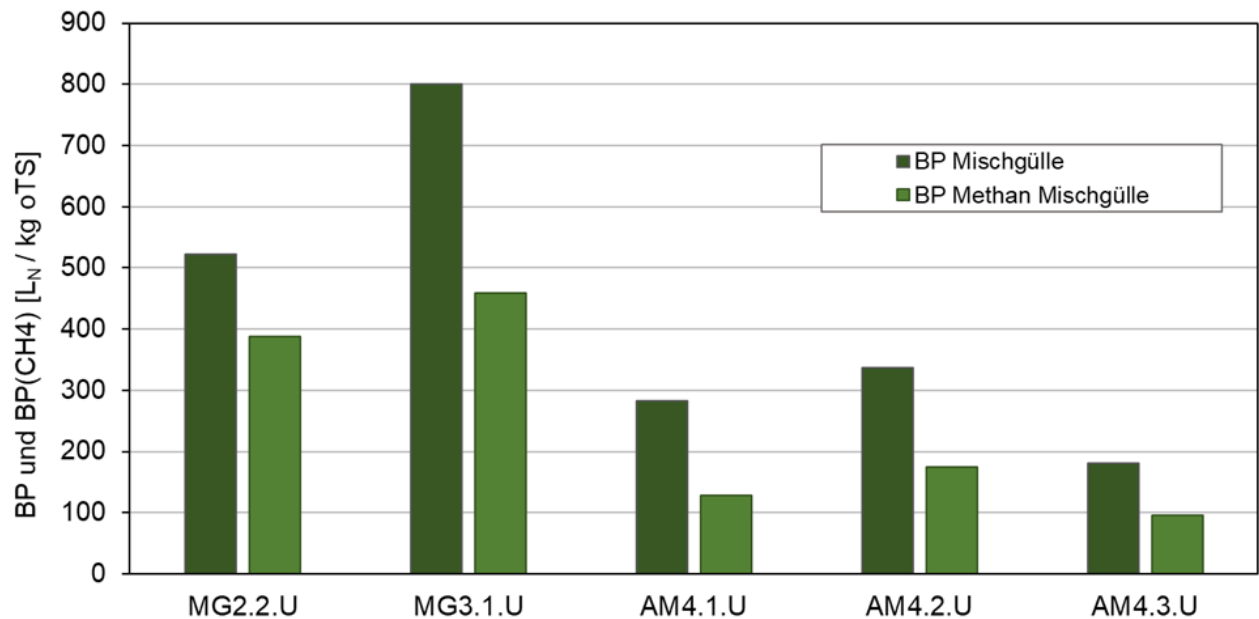


Abbildung 9: Biogas- (BP) und Methanbildungspotenzial (BP(CH₄)) von Mischgülle und Anmaische

Das mittlere Biogas- bzw. Methanbildungspotenzial der Anmaische liegt mit 267 bzw. 133 L_N/kg oTS deutlich unter den BP bzw. BP(CH₄) der Mischgülle.

Biogas- und Methanbildungspotenzial (BP und BP(CH₄)) – Kinetik der Gasbildung

Die Kinetiken von Biogas- und Methanbildungspotenzial werden für die Produktgruppen dargestellt. Vergleichende anlagenspezifische Darstellungen erfolgen später im Zusammenhang mit den Lagerungsemissionen.

In Abbildung 10 wird exemplarisch für das Methanbildungspotenzial der Rindergülle die gute Näherung der experimentellen Daten durch die Richards-Funktion gezeigt.

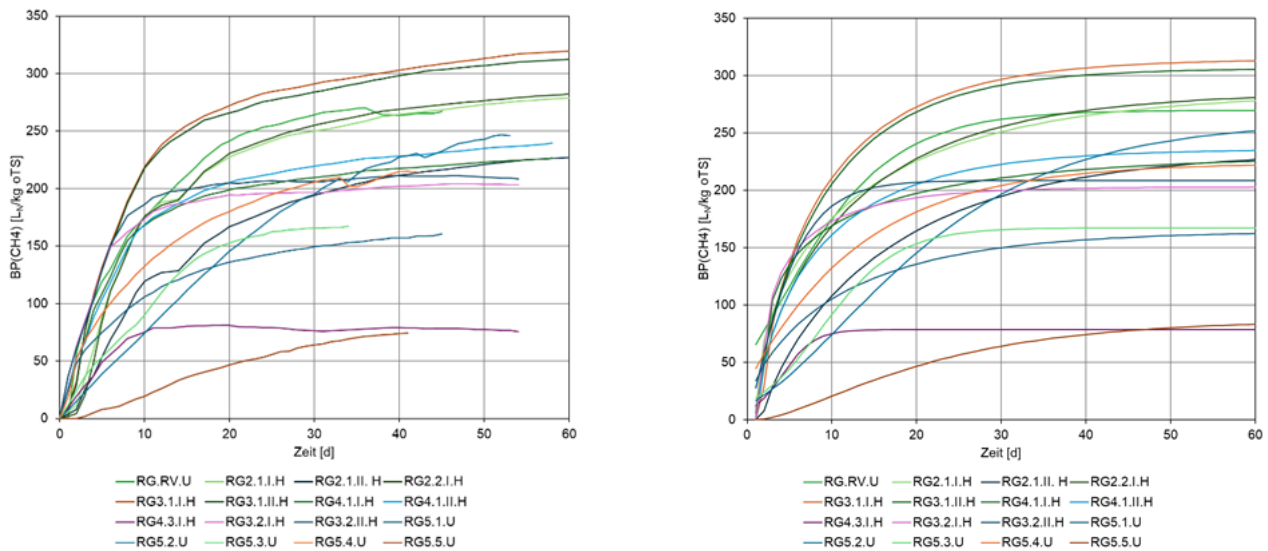


Abbildung 10: Vergleich der Gasbildungskinetik für das Methanbildungspotenzial der Rindergülle (links: experimentell bestimmt mit Ausgleichsgerade, rechts: bestimmte Richards-Funktion unter Verwendung der Einzelwerte bis Erreichen des Abbruchkriteriums)

Die gruppenspezifischen Kinetiken für Biogas- und Methanbildungspotenzial werden im Folgenden ausschließlich mittels ermittelter Richards-Funktion dargestellt.

Neben den unterschiedlichen Niveaus für das ermittelte Methan- bzw. Biogasbildungspotenzial ist die Kinetik der untersuchten Rindergülle unterschiedlich (Abbildung 11). Gründe werden in der anlagenspezifischen Betrachtung untersucht.

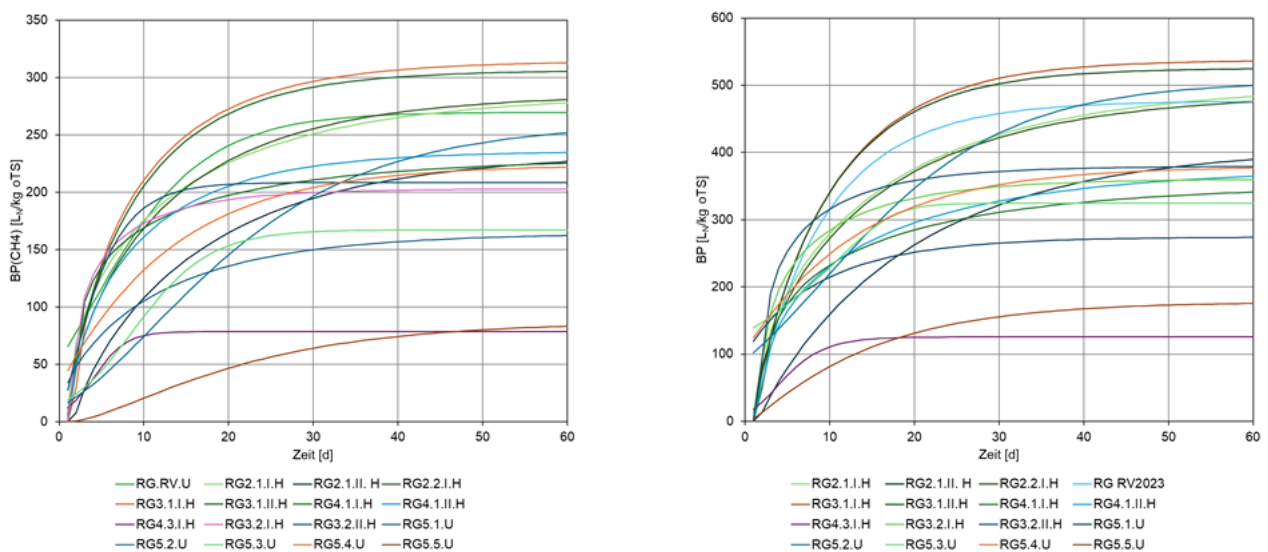


Abbildung 11: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogasbildungspotenzial, Rindergülle

Für Rindermist sind die Unterschiede weniger ausgeprägt, was sich durch geringere Überschneidungen der Kurven zeigt (Abbildung 12).

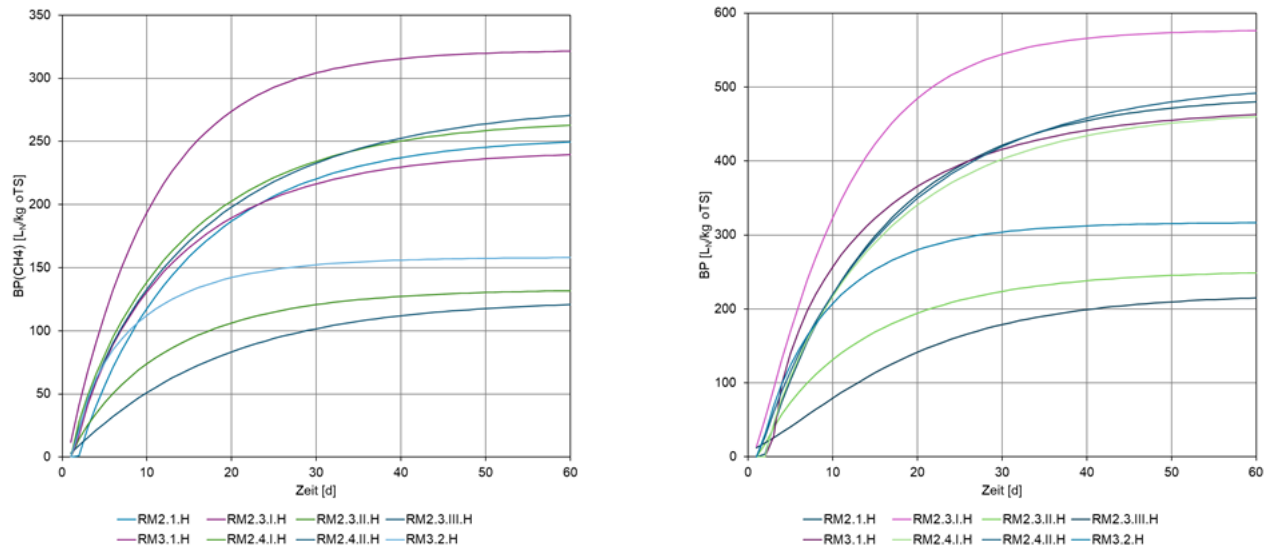


Abbildung 12: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogasbildungspotenzial, Rindermist

Die Kinetik der Bildungspotenziale für die Schweinegülle ist in Abbildung 13 dargestellt. Dabei fällt auf, dass sich die Kinetiken der Schweinegülle SG1.1.U und SG1.1.H deutlicher unterscheiden als bei SG1.2.U und SG1.2.H. Gründe hierfür sind in Arbeitspaket 3 erläutert.

Bei den Proben SG6.2.U und SG6.3.U handelt es sich um die gleiche Probe, deren Bildungspotential frisch (SG6.2.U) und nach einer Lagerung von 100 Tagen (SG6.3.U) untersucht wurde. Aus der grafischen Darstellung geht hervor, dass die Näherung durch die Richards-Funktion für die Probe SG6.2.U vor allem in der Anfangsphase nicht optimal ist. Hinsichtlich der Kinetik der Gasbildung beider Proben fällt auf, dass die frische Probe nach ca. 50 Tagen ein Plateau erzielt, während dies für die gelagerte Probe nicht der Fall ist. Details dieser vergleichenden Untersuchung werden im Zusammenhang mit einem internen Lagerungsversuch erläutert (vgl. Tabelle 10).

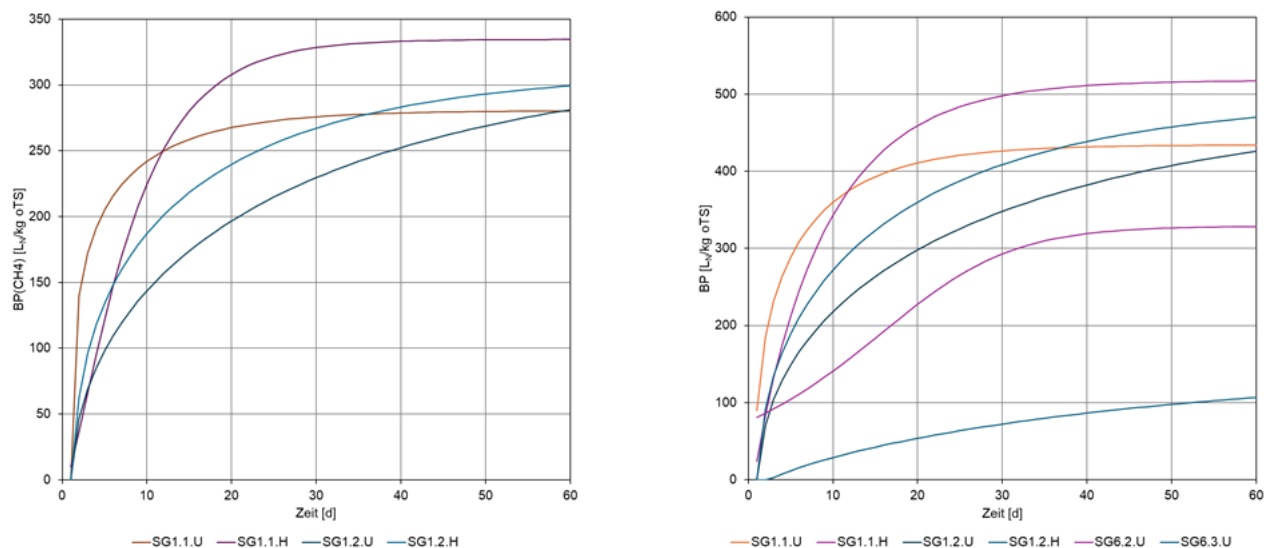


Abbildung 13: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogasbildungspotenzial, Schweinegülle

Außerdem wurden Methan- und Biogasbildungspotenzial an zwei festen Wirtschaftsdüngern untersucht. Die Proben unterscheiden sich deutlich hinsichtlich des Niveaus, sind hinsichtlich der Gasbildungskinetik aber unauffällig (Abbildung 14).

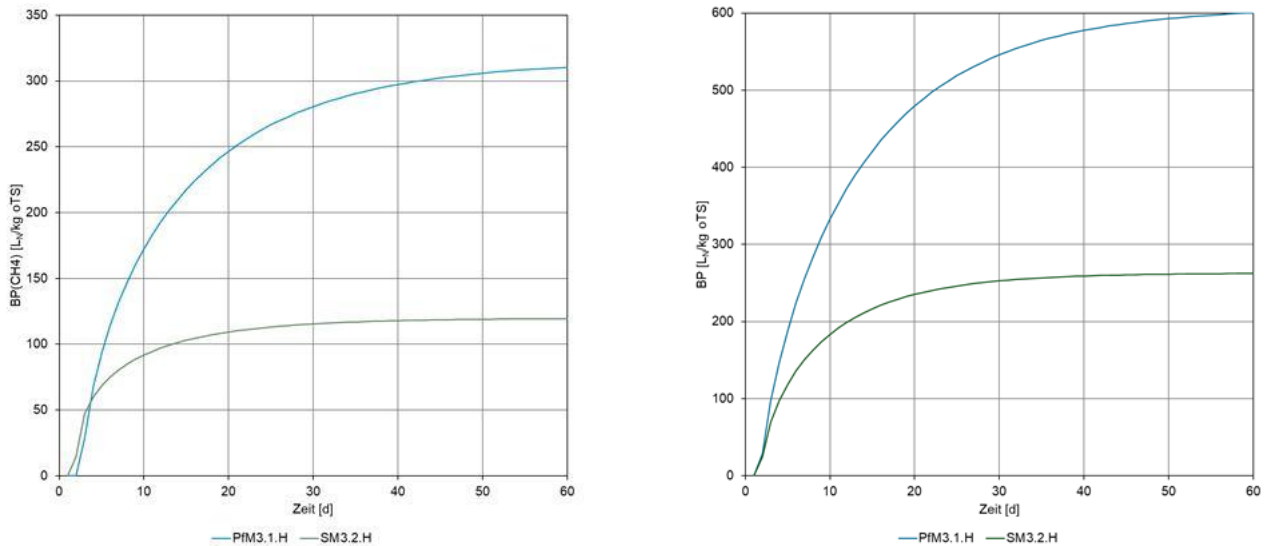


Abbildung 14: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogasbildungspotenzial, Sonstige Wirtschaftsdünger (fest)

Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen (LE und LE(CH₄))

Die Lagerungsemissionen (LE) weisen die gebildete Menge an Gas nach 60 Tagen Lagerung bei 20 °C aus. Die Methan-Lagerungsemissionen LE(CH₄) bilden den Anteil an Methan in der gemessenen Gesamtgasmenge. Neben Methan wurden auch Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff, Schwefelwasserstoff und Sauerstoff im Gasmisch analysiert. Stickstoffverbindungen wie Ammoniak konnten nicht gemessen werden. In Abbildung 15 sind die Methan-Lagerungsemissionen für Gülle, Mist und Gärreste dargestellt.

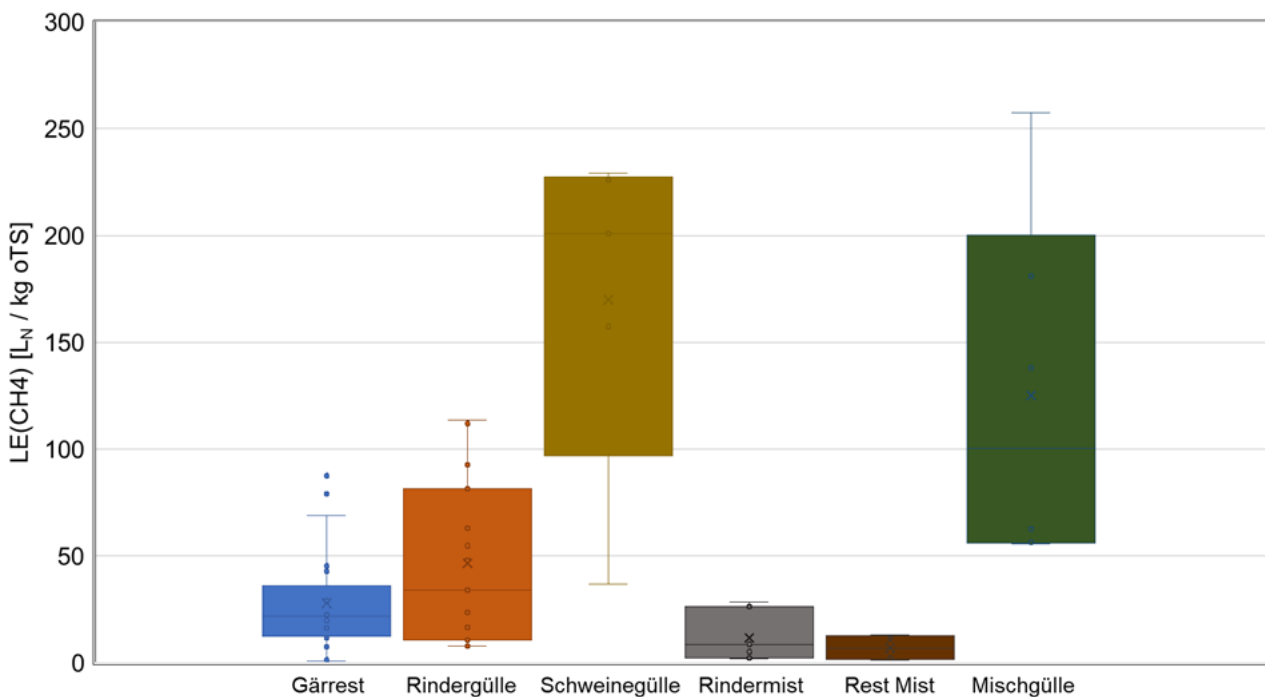


Abbildung 15: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten

Die Methan-Lagerungsemissionen von Schweinegülle mit 170 L_N/kg oTS und von Mischgülle mit 125 L_N/kg oTS wiesen die höchsten Werte und die größten Spannbreiten auf. Die LE(CH₄) von Rindermist und „Rest Mist“ liegen mit 12 und 7 L_N/kg oTS deutlich niedriger. Hierbei ist zu beachten, dass es sich nur um die Methanemissionen und nicht die Gesamtemissionen handelt. Im Folgenden werden die Lagerungsemissionen sowie die Methan-Lagerungsemissionen detailliert für Gärreste und Wirtschaftsdünger dargestellt.

Gärrest

Für die Gärreste wurden nur die Lagerungsemissionen bestimmt, da die Bestimmung des Gasbildungspotenzials nur sinnvoll ist, wenn es sich bei den Proben um Substrate handelt. Eine Ausnahme

bildet Anlage 4 H, da diese nur einstufig ist und die Gärreste noch ein hohes Biogas- bzw. Methanbildungspotenzial aufwiesen. Die LE und LE(CH₄) der Gärreste sind in Abbildung 16 dargestellt.

Die Gärrestprobe GR4.1.H wies die höchsten Lagerungsemissionen auf. Die Anlage 4 H verfügt über eine einstufige Biogasanlage, die Gärrestprobe entspricht also einer Fermenterprobe. Außerdem berichtete der Betreiber von Problemen mit der Beheizung des Fermenters, was eine Verschlechterung des Substratabbaus zur Folge hatte.

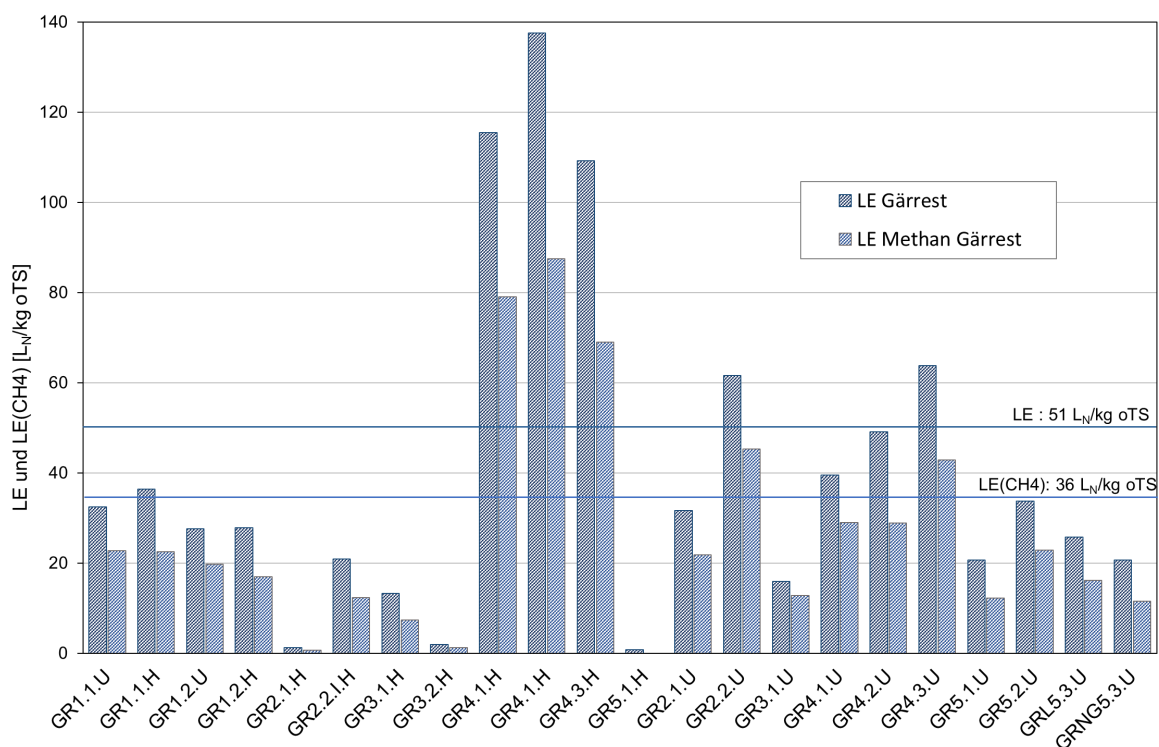


Abbildung 16: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen von Gärresten

Die niedrigen Emissionen, die für die Wintersaison festgestellt wurden, sind vergleichbar mit den Emissionen aus altem Mist. Da es sich bei Gärresten um die bereits in der Biogasanlage abgebauten Substrate und eingesetzten Wirtschaftsdünger handelt, weisen die Gärreste erwartungsgemäß geringere Lagerungsemissionen auf als frischer Mist und Gülle. Die Lagerungsemissionen liegen im Durchschnitt bei 51 L_N/kg oTS bzw. die Methan-Lagerungsemissionen bei 23 L_N/kg oTS. Dabei liegt der Anteil an Methan zu den gesamten Lagerungsemissionen im Durchschnitt bei 71 %. Wird bei der Betrachtung die Anlage 4 H nicht berücksichtigt und nur Anlagen mit separatem Gärrestlager betrachtet, verringern sich die Lagerungsemissionen auf 26 L_N/kg oTS bzw. 18 L_N/kg oTS. Der Methananteil an den Gesamtemissionen verringert sich dann auf 66 %.

Rindergülle

Bei den verschiedenen Probenahmen zeigte sich, dass sich die Entnahme homogener Proben trotz Aufrühren und Umpumpen oft schwierig gestaltete. Die Güllen wiesen große Unterschiede bzgl. TS-Gehalten auf, abhängig von Förderverfahren, Spülvorgängen oder Regenwassereinleitung (vgl. Abbildung 50). In Abbildung 17 sind die Methan-Lagerungsemissionen dargestellt.

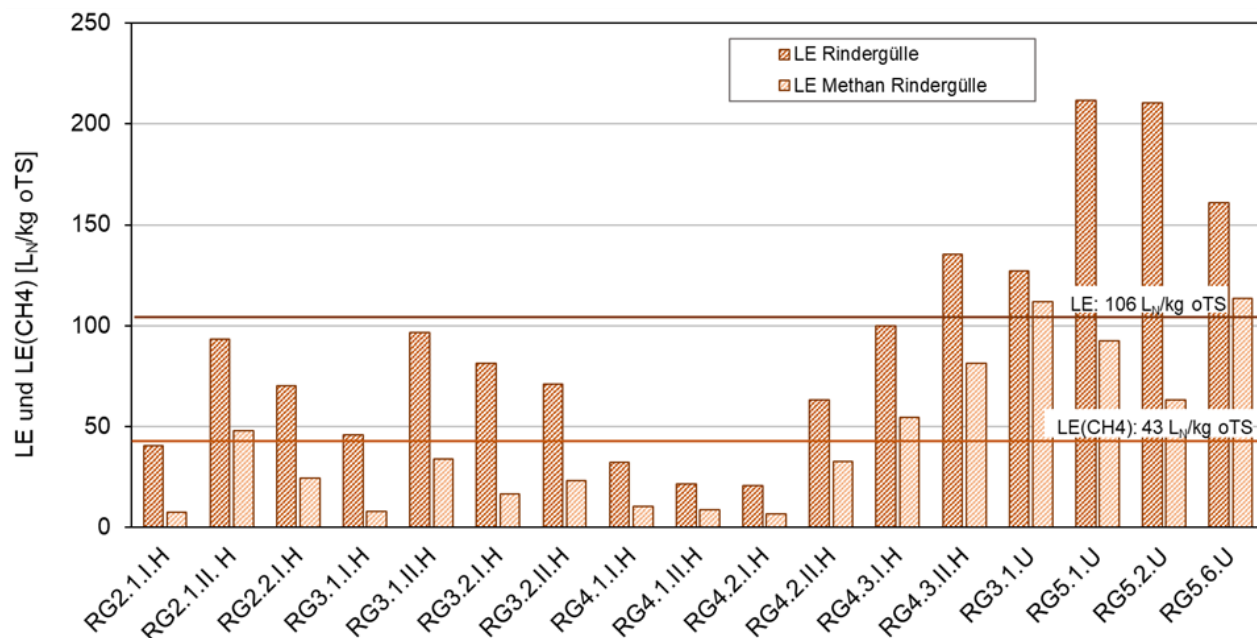


Abbildung 17: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen von Rindergülle

Mit 106 L_N/kg oTS sind die Biogas-Lagerungsemissionen von Rindergülle doppelt so hoch wie die von Gärresten. Die Methan-Lagerungsemissionen sind dagegen mit 43 L_N/kg oTS nur gering höher als bei den Gärresten (36 L_N/kg oTS.) Dementsprechend beträgt der Anteil an Methan an den Lagerungsemissionen bei Rindergüllen 40 % und liegt damit deutlich unter dem Wert für Gärreste. Außerdem liegen die Methan-Lagerungsemissionen der Sommerproben mit 59 L_N/kg oTS höher als die der Winterproben mit 45 L_N/kg oTS. Eine Erklärung dafür könnte sein, dass niedrige Umgebungstemperaturen die mikrobielle Aktivität in der Gülle verzögerten und die Methanbildung reduzierten.

Schweinegülle

In Abbildung 18 sind die Lagerungsemissionen von Schweinegülle dargestellt. Die Lagerungsemissionen bzw. die Methan-Lagerungsemissionen sind mit 256 L_N/kg oTS bzw. mit 170 L_N/kg oTS deutlich höher als die Werte von Rindergülle. Im Vergleich zu den Lagerungsemissionen von Gärrest sind die Werte von Schweinegülle sogar 5-mal höher. Der Methananteil an den Gesamt-Lagerungsemissionen liegt bei 67 % und somit ebenfalls deutlich höher als bei Rindergülle.

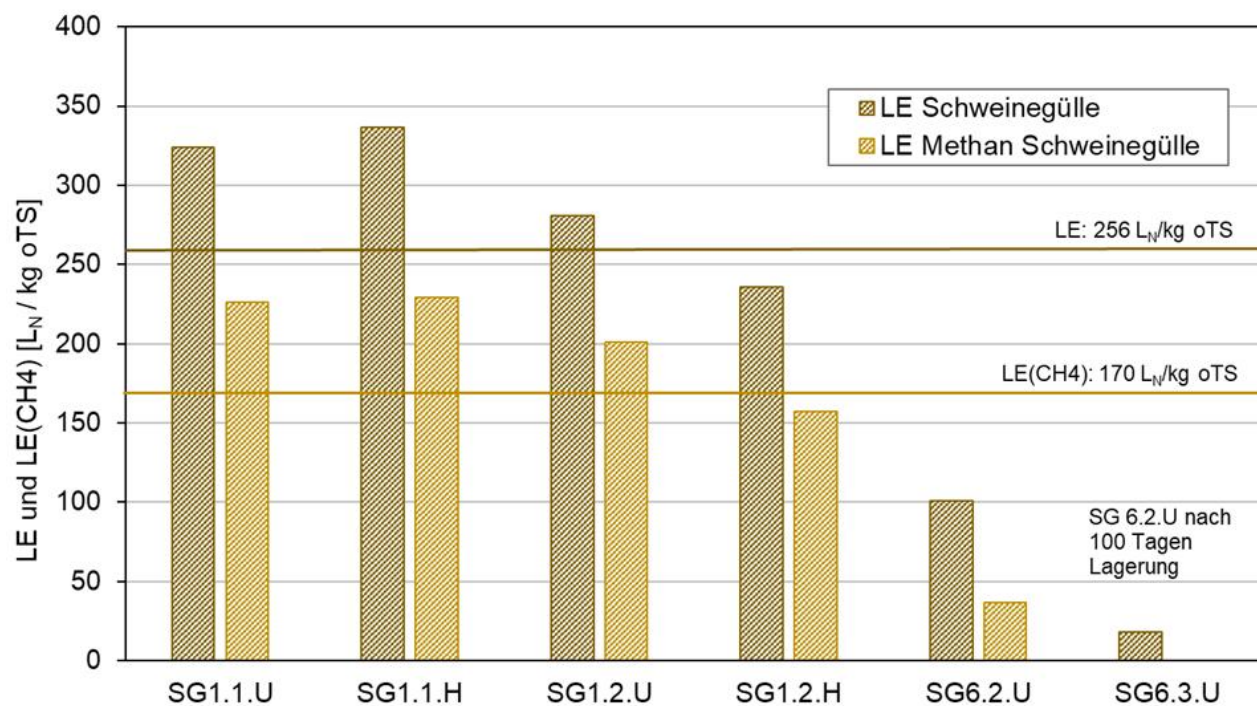


Abbildung 18: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen von Schweinegülle mit unterschiedlicher Lagerungsdauer

Die Methan-Lagerungsemissionen der Schweinegülle weisen zwischen den Sommer- und Winterprobenahmen ebenfalls Unterschiede auf. Die Sommerproben liegen bei 228 L_N/kg oTS und die Winterproben bei 179 L_N/kg oTS.

Rindermist

Im Projekt wurden auch mehrere Rindermistproben genommen. Auf Anlage 2 H wurden, wie bereits im Unterpunkt „Biogas- und Methanbildungspotenzial“ erwähnt, Mistproben mit der Lagerungsdauer 0 Tage = frisch (RM2.3.I.H), 10 Tage und 21 Tage genommen. Dementsprechend sind die Gesamt- und Methan-Lagerungsemissionen der gelagerten Proben deutlich niedriger als in der frischen Probe (Abbildung 19). Die Lagerungsemissionen liegen im Mittel bei 27 L_N/kg oTS bzw. bei 12 L_N/kg oTS. Die Emissionen aus Rindermist waren allgemein niedriger im Vergleich zu Gülle. Betrachtet man nur frische Rindermistproben liegen die LE bei 54 L_N/kg oTS und somit im Bereich der Lagerungsemissionen der Gärreste. Die LE(CH₄) der frischen Proben liegen bei 27 L_N/kg oTS.

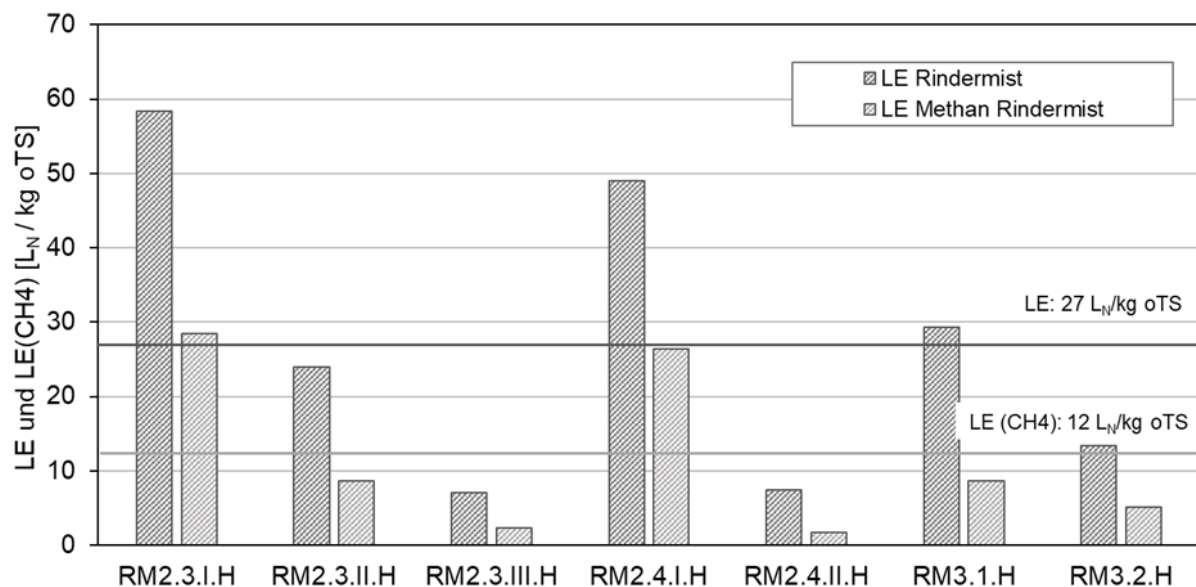


Abbildung 19: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen von Rindermist mit unterschiedlicher Lagerungsdauer

Die LE und LE(CH₄) weiterer Mistproben wie Pferdemit (PfM), Rinderdung (RD), Hühnertrockenkot (HTK) und Schweinemist (SM) sind in Abbildung 20 dargestellt.

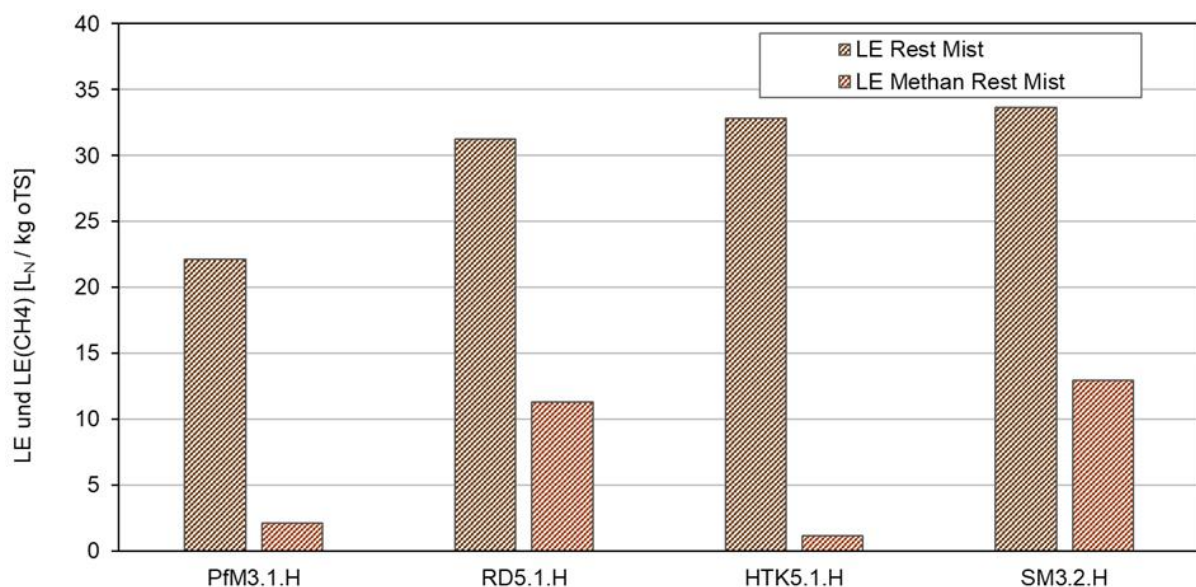


Abbildung 20: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen von Mist

Die Lagerungsemissionen der Miste liegen zwischen 22 und 34 L_N/kg oTS. Auffällig sind die starken Schwankungen bei den Methan-Lagerungsemissionen mit sehr geringen Werten von 1 bzw. 2 L_N/kg oTS bei

Pferdemist und HTK sowie deutlich höheren Werten von 11 bzw. 13 L_N/kg oTS bei Rinderdung und Schweinemist.

Bei der Betrachtung von Mischgüllen und Anmaische der Anlage 4 U ist in Abbildung 21 zu sehen, dass die Lagerungsemissionen sowie die Methan-Lagerungsemissionen der Anmaische mit Werten zwischen 96–110 L_N/kg oTS bzw. 56–63 L_N/kg oTS ähnliche Bereiche wie Rindergülle aufweisen. Die Mischgüllen weisen mit 250 (LE) bzw. 192 L_N/kg oTS (LE(CH₄)) hingegen ähnliche Werte wie Schweinegülle auf. Auch der Methananteil an den Lagerungsemissionen liegt mit 76 % in einem ähnlichen Bereich.

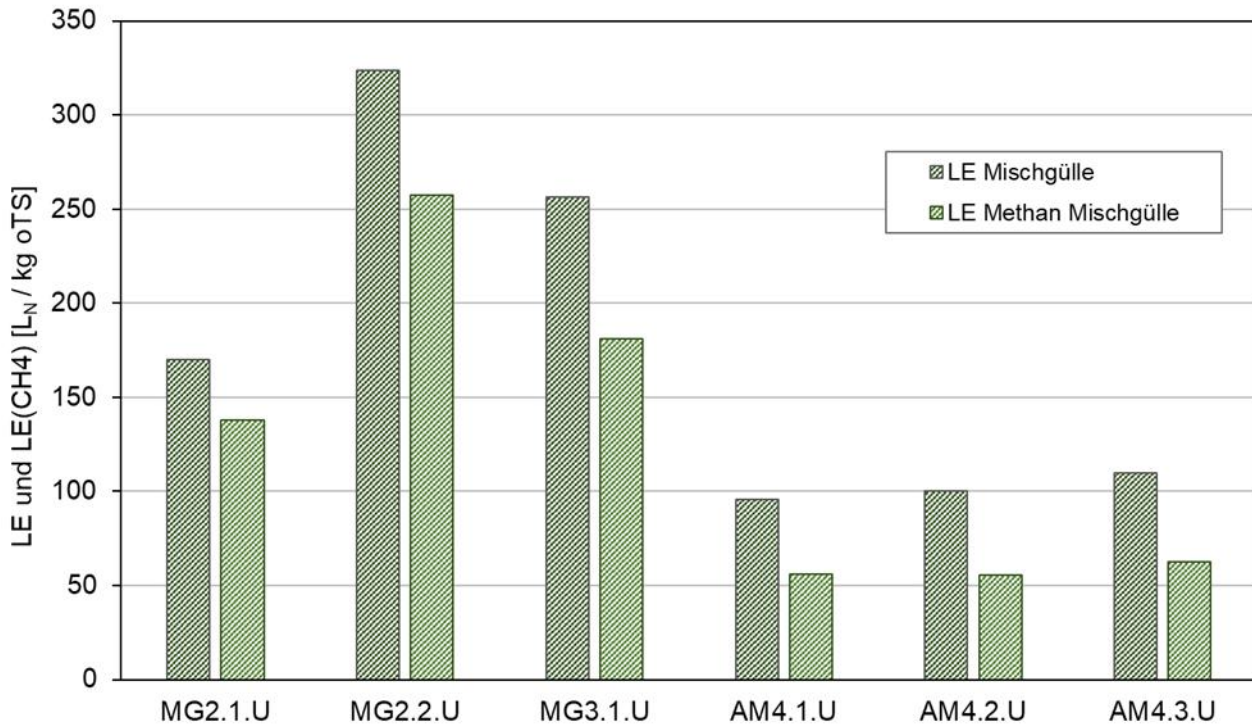


Abbildung 21: Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen von Gülle gemischt

Biogas- und Methan-Lagerungsemissionen (LE und LE(CH₄)) – Kinetik der Gasbildung

Die gruppenspezifischen Kinetiken für die Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen werden im Folgenden mittels ermittelter Richards-Funktionen dargestellt.

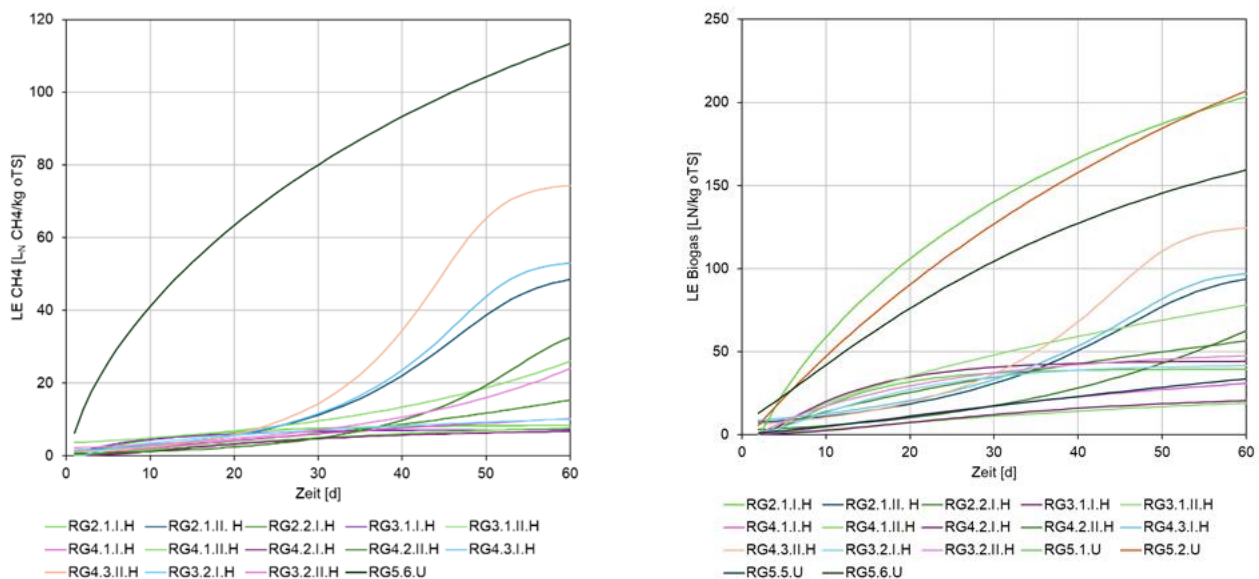


Abbildung 22: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen, Rindergülle

Für die Lagerungsemissionen der Rindergüllen liegen zum Teil für die Anlage 5 U nur die Werte für Biogas vor. Einige der Kurven zeigen in der zweiten Hälfte der Untersuchung sowohl hinsichtlich der Methan- als auch der Biogas-Lagerungsemissionen einen deutlichen Anstieg.

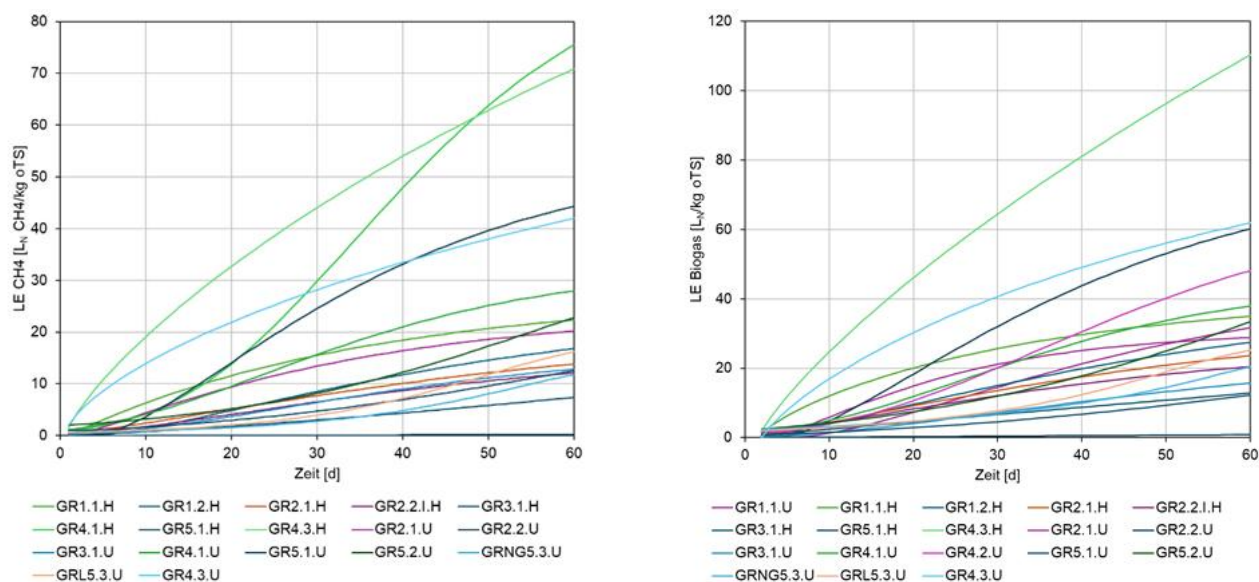


Abbildung 23: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen, Gärrest

Auch die Lagerungsemissionen der Gärreste weisen sehr unterschiedliche Niveaus auf. Hinsichtlich der Kurvenform sind die Unterschiede deutlich geringer als bei den Rindergüllen. Im Vergleich zu den Rindergüllen liegen die Methangehalte des gebildeten Biogases durchgehend deutlich höher.

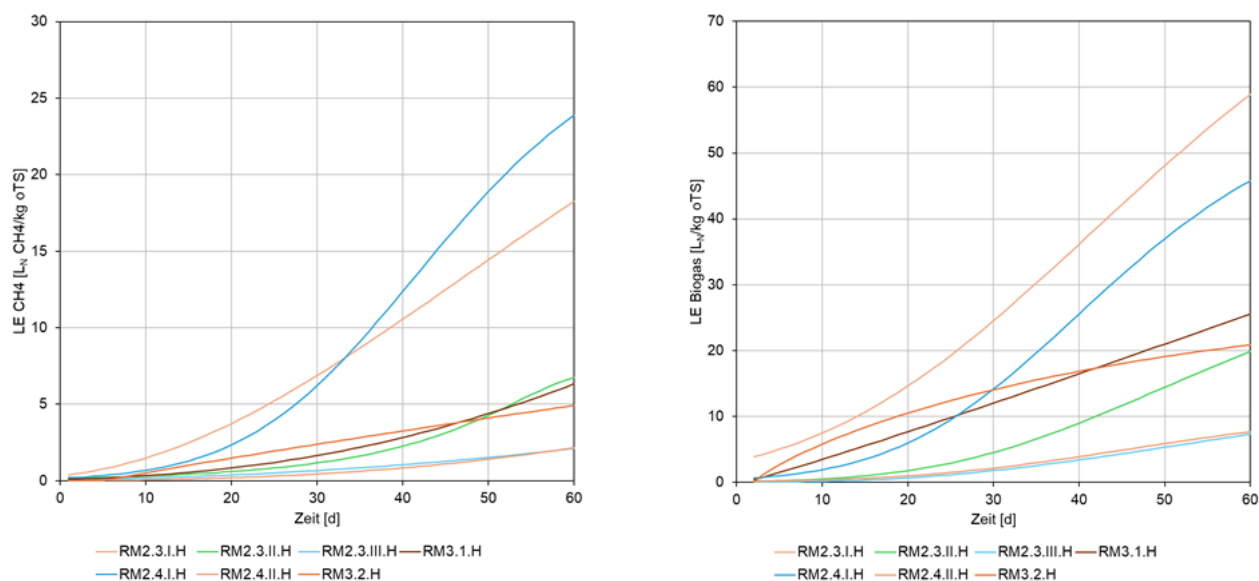


Abbildung 24: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen, Rindermist

Die Lagerungsemissionen von Rindermist weisen vor allem hinsichtlich der Methan-Lagerungsemissionen deutliche Unterschiede hinsichtlich des Niveaus und der Kinetik auf. Die Verläufe der Biogas-Lagerungsemissionen für die unterschiedlichen Proben sind ähnlicher. Dies äußert sich durch unterschiedliche Methangehalte der Biogase.

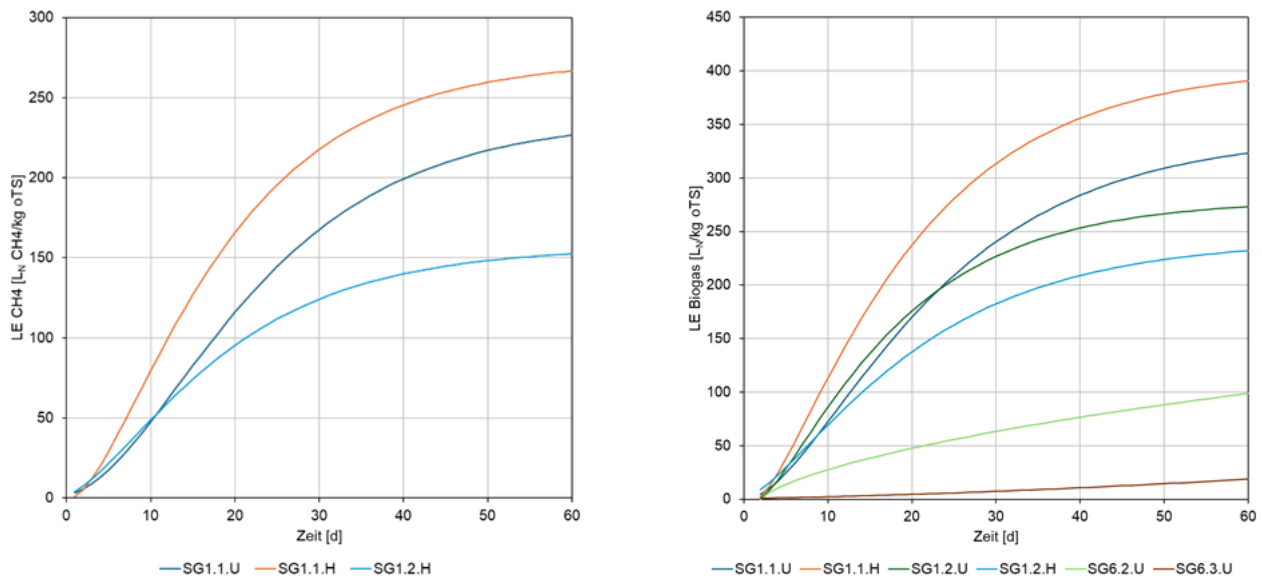


Abbildung 25: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen, Schweinegülle

Bei Schweinegülle wurde die Untersuchung der Methan-Lagerungsemissionen für drei Proben durchgeführt. Hinsichtlich der Biogas-Lagerungsemissionen wurden sechs Proben untersucht. Die Schweinegülle SG6.2.U und SG6.3.U stammen aus internen Lagerungsversuchen (Technikum, UMSICHT), die an anderer Stelle diskutiert werden.

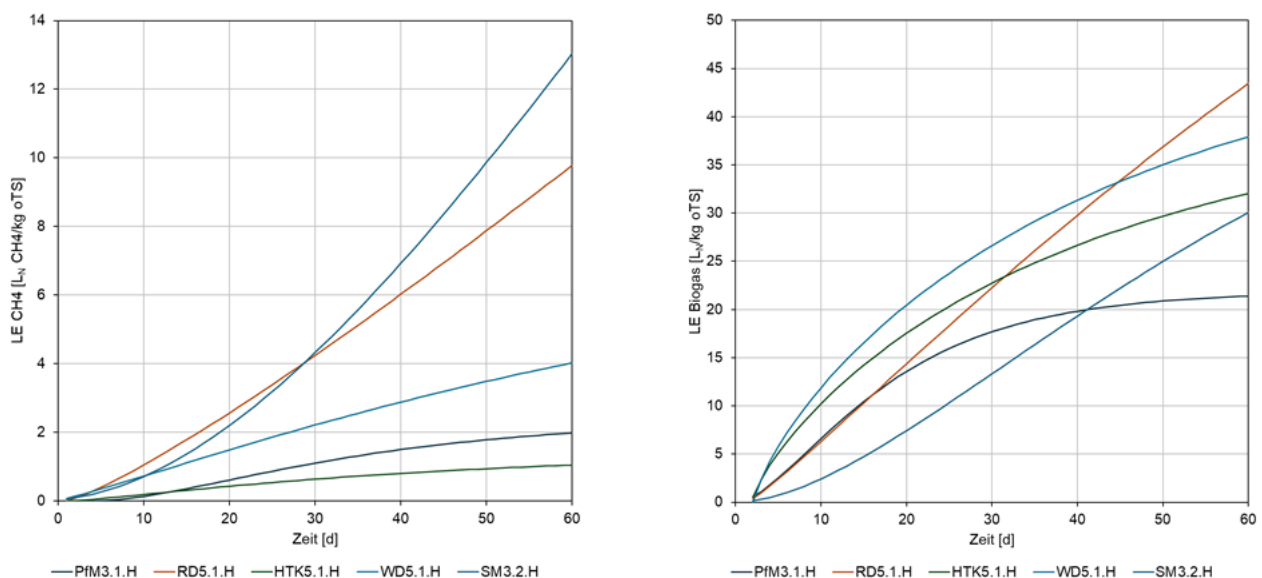


Abbildung 26: Kinetik (Richards-Funktionen) Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen, sonstige Wirtschaftsdünger

Auch für die sonstigen stapelfähigen Wirtschaftsdünger wird ersichtlich, dass diese sich deutlich hinsichtlich des Verhältnisses von Methan- zu Biogas-Lagerungsemissionen unterscheiden. So entsteht bei der Lagerung bei 20 °C vor allem CO₂. Für die Wirtschaftsdünger Pferdemist, Rinderdung und Schweinemist ist nach 60 Tagen noch kein Plateau erreicht. Der Kurvenverlauf der Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen für die Probe HTK weist hingegen nach 60 Tagen eine geringe Steigung auf.

Anlagenspezifischer Vergleich der Gasbildungskinetiken der Rindergülle (BP und LE)

Im Folgenden wird die Gasbildungskinetik von einzelnen Anlagen im Zusammenhang mit Güllecharakteristika dargestellt und diskutiert.

Die Anlage 2 H wurde insgesamt 4-mal beprobt. Details der Probenahmen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Von den Rindergülle wurden die Proben RG2.1.I, RG2.1.II und RG2.2.I in die folgenden Betrachtungen einbezogen. RG2.2.II wurde nicht betrachtet, da die Gülle extrem geringe TS-Gehalte hatte.

Tabelle 7: Charakteristika der Proben von Anlage 2 H (Infos Probenahme (oben), geschätztes Alter in Tagen (unten))

Anl.	Datum	GR2.1	GR2.2.I	RG2.1.I	RG2.1.II	RG2.2.I	RG2.2.II	RG2.4.	RM2.1	RM2.3.I	RM2.3.II	RM2.3.III	RM2.4.I	RM2.4.II
2 H	15.02.2023	Gärrest-lager		Stall frisch	Vorgube				Rindermist undef.					
	08.08.2023		Gärrest-lager			Güllelager	Güllelager unter Stall							
	14.09.2023					Stall offen				frisch	ca. 10 Tage	ca. 21 Tage		
	23.01.2024							Stall frisch					frisch	5-6 Wochen
Anl.	Datum	GR2.1	GR2.2.I	RG2.1.I	RG2.1.II	RG2.2.I	RG2.2.II	RG2.4.	RM2.1	RM2.3.I	RM2.3.II	RM2.3.III	RM2.4.I	RM2.4.II
2 H	15.02.2023	135		3	180				undef.					
	08.08.2023		90			90	52,5							
	14.09.2023									1	10	21		
	23.01.2024							1					2	48,5

Der Vergleich der Kinetik der Gasbildungskurven für die Rindergülle der Anlage 2 H zeigt für die am 15.2. genommene Probe RG2.1.II mit einem geschätzten Güllealter von 180 Tagen im Vergleich zu den frischeren Güllen erwartungsgemäß geringere Methan- und Biogasbildungspotenziale, aber vergleichsweise hohe Methan- und Biogas-Lagerungsemissionen. Auffällig ist bei den Lagerungsemissionen für die Rindergülle 2.1.I, Güllealter drei Tage, dass die Biogas-Lagerungsemissionen mehr als 4-mal so hoch sind wie die Methan-Lagerungsemissionen. Trotz eines hohen Methan- und Biogasbildungspotenzials steigen die Lagerungsemissionen der im Winter beprobten drei Tage alten frischen Gülle nur in der Anfangsphase und stabilisieren sich nach ca. 30 Tagen.

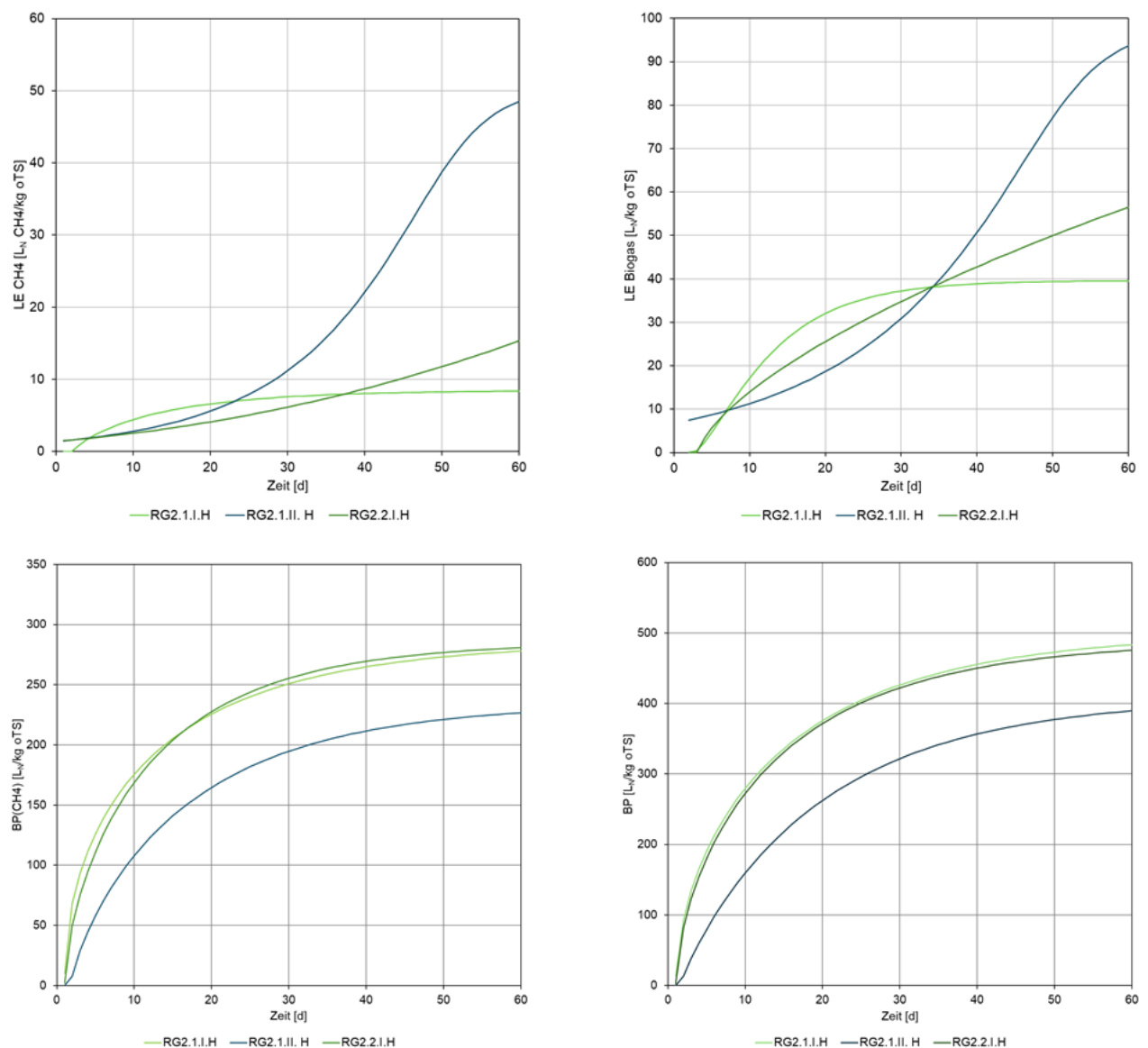


Abbildung 27: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen und Bildungspotenzial (Methan und Biogas), Rindergülle Anlage 2 H

Die Anlage 3 H wurde 2-mal beprobt. Details der Probenahmen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Tabelle 8: Charakteristika der Proben von Anlage 3 H (Infos Probenahme (oben), geschätztes Alter in Tagen (unten))

Anl.	Datum	GR3.1	GR3.2	PfM3.1	RG3.1.I	RG3.1.II	RG3.2.I	RG3.2.II	RM3.1	RM3.2	SM3.2
3 H	14.11.2023	Gärrestlager		undef.	Lager unter Spaltboden	Vorgrube, offenes Lager			Misthaufen Siloplatte		
	20.08.2024		Gärrestlager				Rinne Stall	Vorgrube, offenes Lager		Misthaufen Siloplatte	Misthaufen Siloplatte
Anl.	Datum	GR3.1	GR3.2	PfM3.1	RG3.1.I	RG3.1.II	RG3.2.I	RG3.2.II	RM3.1	RM3.2	SM3.2
3 H	14.11.2023	undef.		undef.	1	2			undef.		
	20.08.2024		undef.				0,1	2		undef.	undef.

Alle Rindergüllen waren vergleichsweise frisch. Das Alter bewegte sich im Bereich weniger Tage. Die Probenahmetemperatur im August betrug 19 °C und im November 10 °C.

Das Niveau des Methan- und Biogas-Bildungspotenzials der jeweils zwei gezogenen Proben ist nahezu identisch. Das Niveau der im November gezogenen Proben liegt ca. 50 % über den im August gezogenen Proben. Die Ergebnisse deuten nicht darauf hin, dass das Bildungspotenzial innerhalb des ersten Tages sinkt.

Für die Lagerungsemissionen ist bei dieser Anlage abweichend von den anderen Darstellungen nicht die Richards-Funktion, sondern die Darstellung mit Ausgleichsfunktion gewählt, da diese den Verlauf besser abbildet. Bei diesen sehr frischen Proben erfolgt gegen Ende des Betrachtungszeitraums ein deutlicher Anstieg der Lagerungsemissionen. Zum Zeitpunkt der Beendigung der Versuche nach 60 Tagen ist für mindestens drei der vier untersuchten Proben noch keine Plateaubildung zu erkennen. Das Niveau der Methan-Lagerungsemissionen ist für alle vier Proben im Vergleich zu den Biogas-Lagerungsemissionen sehr gering (< 30 %).

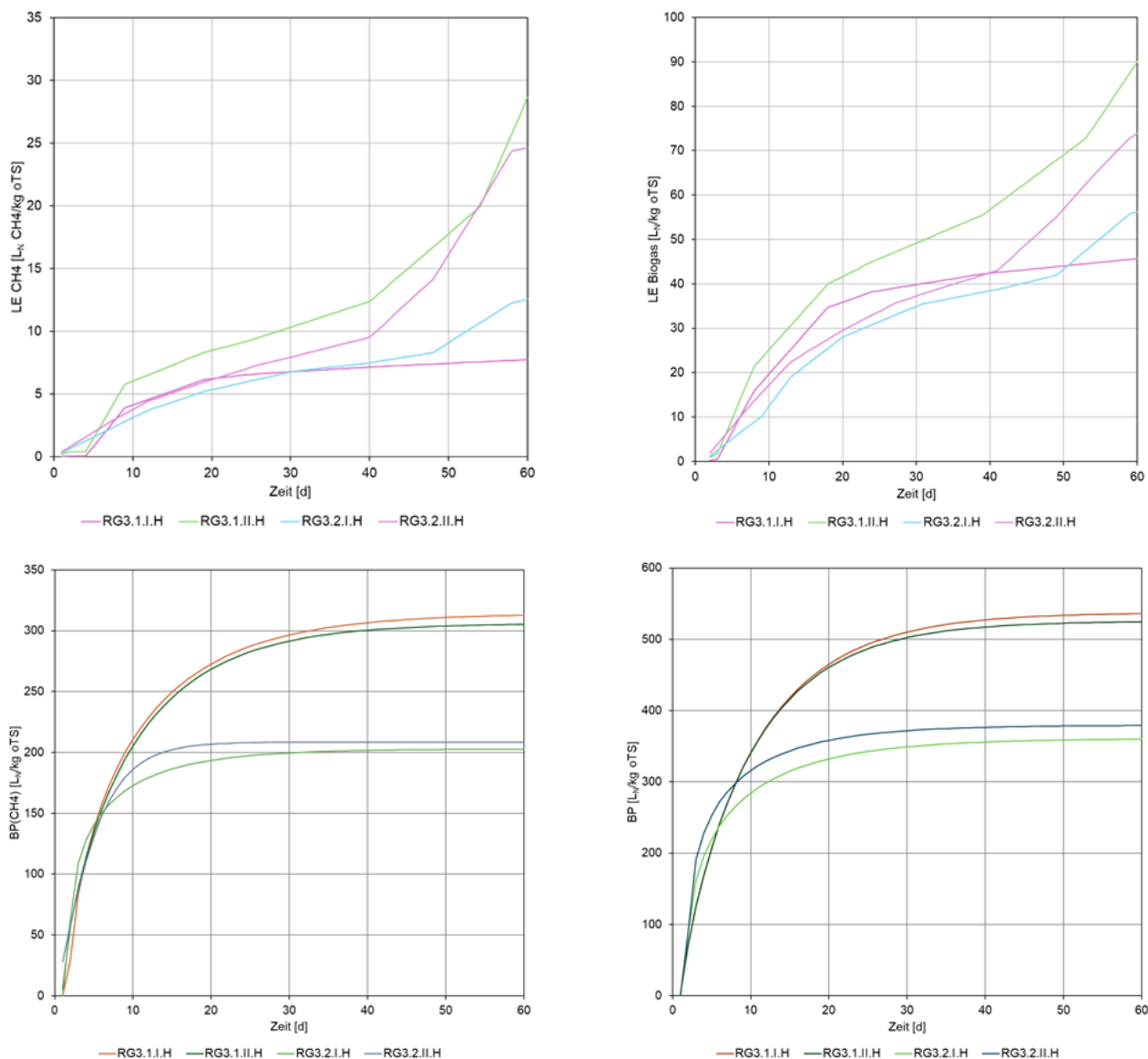


Abbildung 28: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen und Bildungspotenzial (Methan und Biogas), Rindergülle Anlage 3 H

Die Anlage 4 H wurde insgesamt 3-mal beprobt. Details der Probenahmen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt. Für die sechs Proben wurden die Lagerungsemissionen bestimmt. Die Bestimmung des Bildungspotenzials erfolgte nur für die Proben der ersten und der dritten Probenahme. Das Alter der Proben lag zwischen frisch (0,1 Tagen) und geschätzten 2,5 Tagen für die Probe aus der Vorgrube. Die Temperaturen zum Zeitpunkt der Probenahme lagen für die Proben vom 01.02.24 bei 6 °C, für die Proben vom 11.06.24 bei ca. 19 °C und für die Proben im Juli bei ca. 27 °C.

Tabelle 9: Charakteristika der Proben von Anlage 4 H (Infos Probenahme (oben), geschätztes Alter in Tagen (unten))

		GR4.1.	GR4.3.	RG4.1.I.	RG4.1.II.	RG4.2.I.	RG4.2.II.	RG4.3.I.	RG4.3.II.
4 H	01.02.2024	Fermenter		Stall frisch	Vorgrube offen				
	24.07.2024		Fermenter					Stall	Vorgrube offen
	11.06.2024					Vorgrube offen	Stall		
		GR4.1.	GR4.3.	RG4.1.I.	RG4.1.II.	RG4.2.I.	RG4.2.II.	RG4.3.I.	RG4.3.II.
4 H	01.02.2024	90		0,1	2,5				
	24.07.2024		undef.					1	2,5
	11.06.2024					2,5	1		

Die Lagerungsemissionen der Proben, die am 24.07. gezogen wurden, sind im Endwert besonders hoch. Nach einem moderaten Anstieg in den ersten 25 Tagen wird dieser beschleunigt. Der Wendepunkt liegt bei ca. 40 Tagen. Auch die Rindergülle 4.2.II zeigt einen ähnlichen Verlauf, allerdings auf einem insgesamt niedrigeren Niveau. Die Lagerungsemissionen der anderen Rindergüllen liegen auf einem sehr niedrigen Niveau. Dies betrifft auch die Rindergüllen, die im Februar gezogen wurden, obwohl diese im Vergleich der Rindergüllen dieser Anlage hohe Methan- und Biogasbildungspotenziale aufweisen.

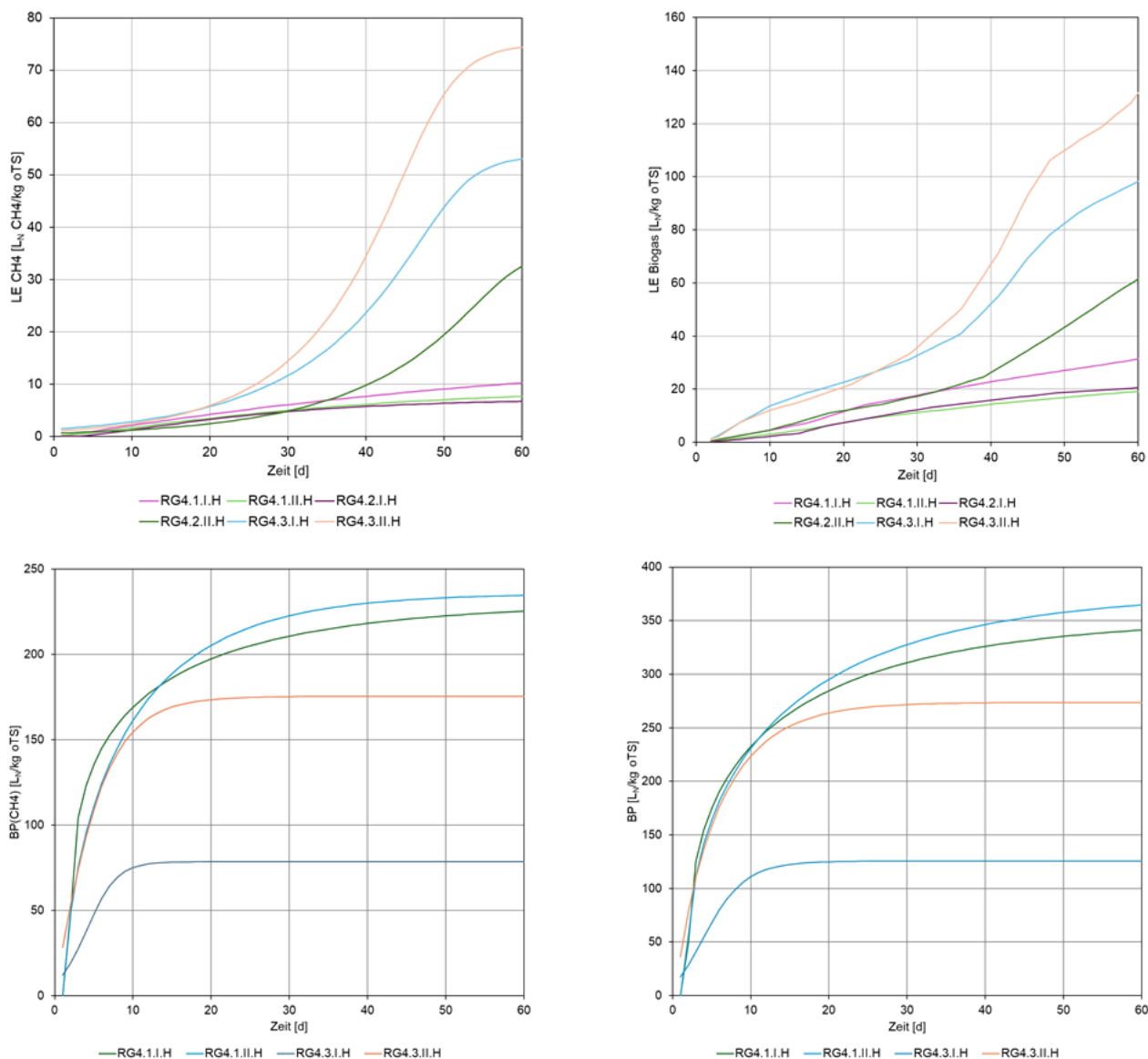


Abbildung 29: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen und Bildungspotenzial (Methan und Biogas), Rindergülle Anlage 4 H

Anlagenspezifischer Vergleich der Gasbildungskinetiken der Lagerungsemissionen von Gärresten ausgewählter Anlagen

Für die Gärrestproben aus der Anlage 1, die im Juli gezogen wurden, ist der Zeitpunkt der letzten Entleerung des Gärrestlagers nicht bekannt. Bei der Probenahme im Februar ist die letzte Entleerung vor ca. 270 Tagen erfolgt. Für diese Probe liegen die Lagerungsemissionen deutlich niedriger als für die Juliprobe (Abbildung 30). Hier kann angenommen werden, dass der Gärrest deutlich weniger lange gelagert wurde.

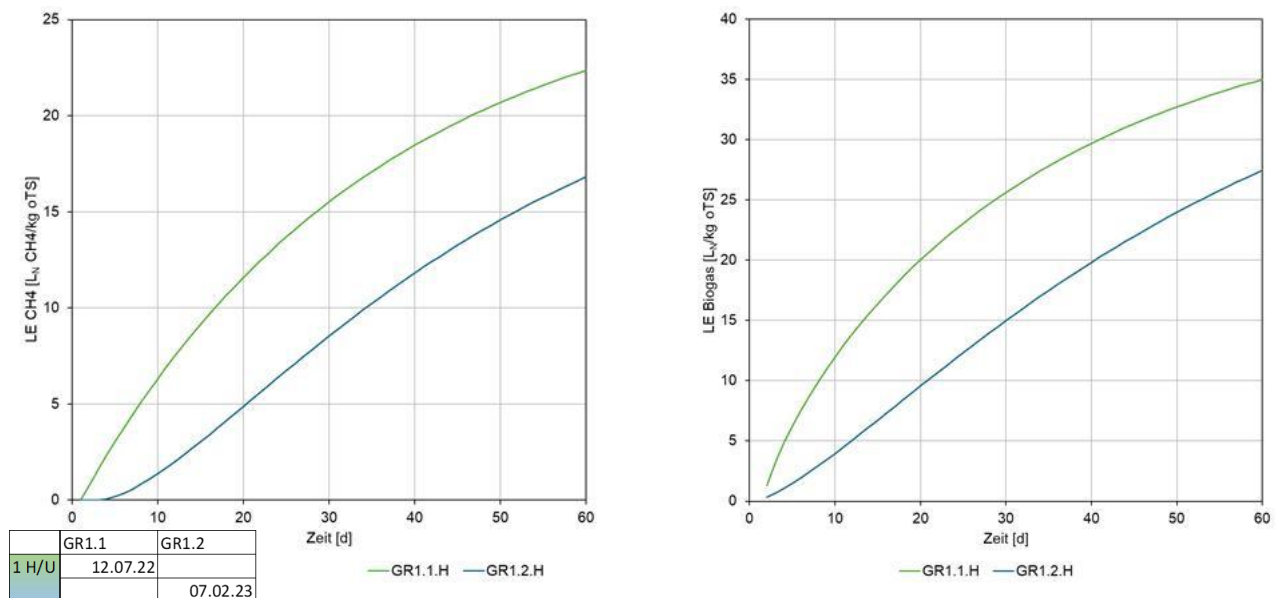


Abbildung 30: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen (Methan und Biogas), Gärrest Anlage 1

Die Gärrestlager der Anlage 2 H wurden zum Zeitpunkt der Probenahme im Februar vor 135 Tagen das letzte Mal entleert. Bei der Probenahme im August ist die letzte Entleerung des Gärrestlagers etwa 90 Tage her. Die Lagerungsemissionen beider Gärreste haben eine ähnliche Größenordnung (Abbildung 31). Tendenziell weist die Augustprobe geringere Lagerungsemissionen auf. Die Kinetiken sind vergleichbar.

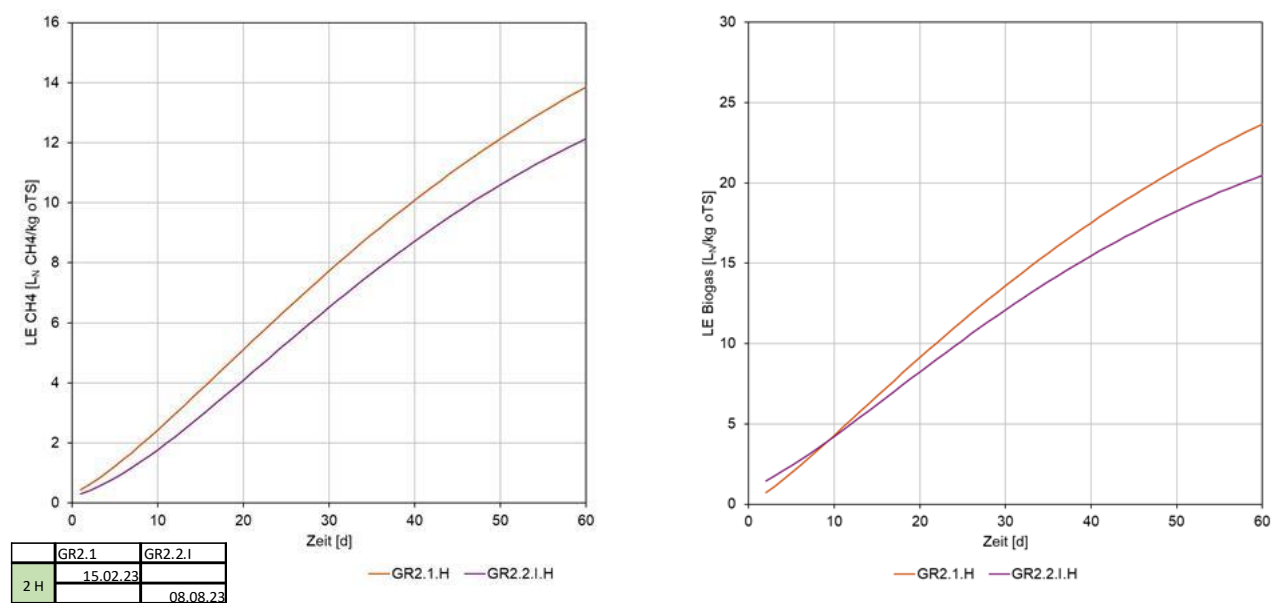


Abbildung 31: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen (Methan und Biogas), Gärrest Anlage 2 H

Die Zeitpunkte der letzten Entleerung sind für die Anlage 4 H nicht bekannt. Die Kinetiken der Lagerungsemissionen für die beiden Proben unterscheiden sich. Während die im Februar gezogene Probe eine im Vergleich geringere Gasbildungsrate aufweist, liegt das finale Ergebnis für die Methan-Lagerungsemissionen nach 60 Tagen etwas höher (Abbildung 32). Insgesamt liegt das Niveau im Vergleich zu den anderen beprobten Anlagen mit Lagerungsemissionen von ca. 70 bzw. 75 L_N/kg oTS deutlich höher. Während der Winterperiode gab es laut Betreiberangaben Probleme mit der Fermenterheizung, dadurch war die Biogas- und Methanbildung geringer als im Normalbetrieb.

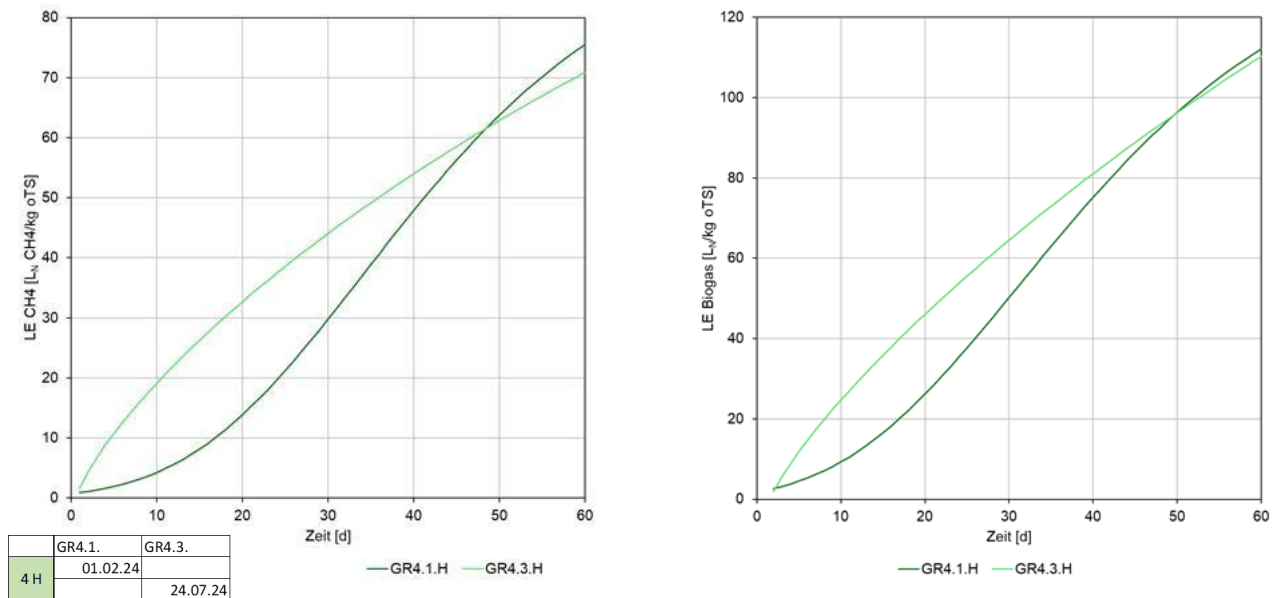


Abbildung 32: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen (Methan und Biogas), Gärrest Anlage 4 H

Für die Proben der Anlage 2 U ist der Zeitraum seit der letzten Entleerung nicht bekannt. Die Lagerungsemissionen liegen auf mittlerem Niveau, wobei die Emissionen der im November gezogenen Probe nur ungefähr halb so hoch sind wie die der im April gezogenen Probe (Abbildung 33).

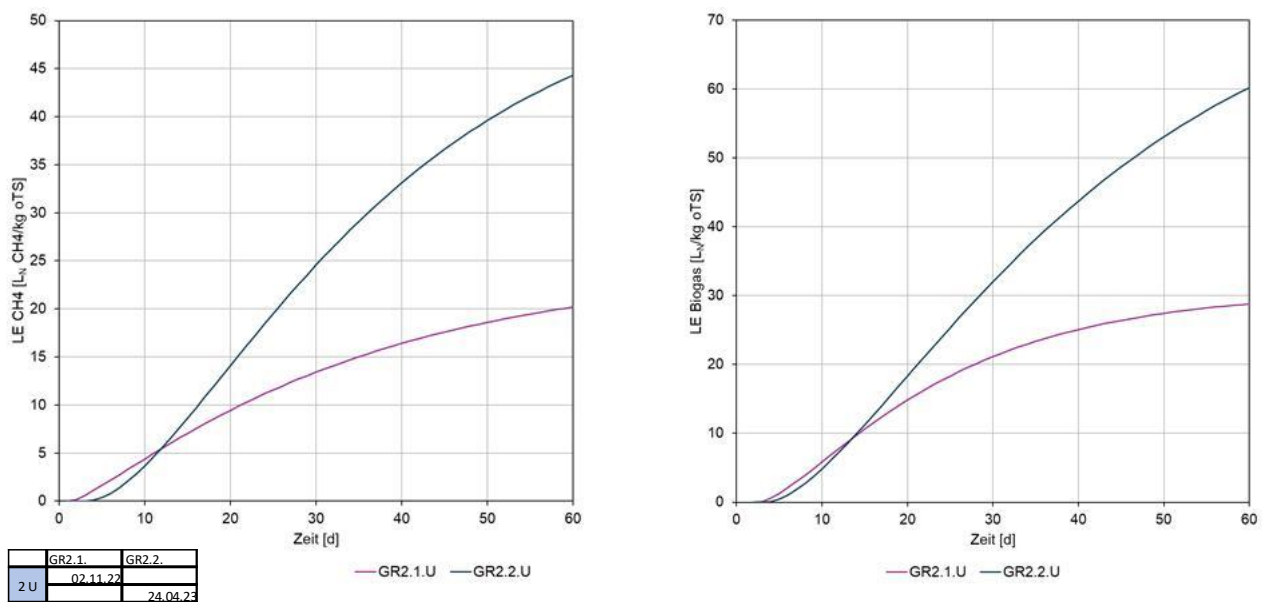


Abbildung 33: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen (Methan und Biogas), Gärrest Anlage 2 U

Für die aus Anlage 4 U gezogenen Proben ist der Zeitpunkt der letzten Entleerung nicht bekannt. Für die im Januar gezogene Proben liegen die Lagerungsemissionen auf einem höheren Niveau als die der Probe, die im März gezogen wurde.

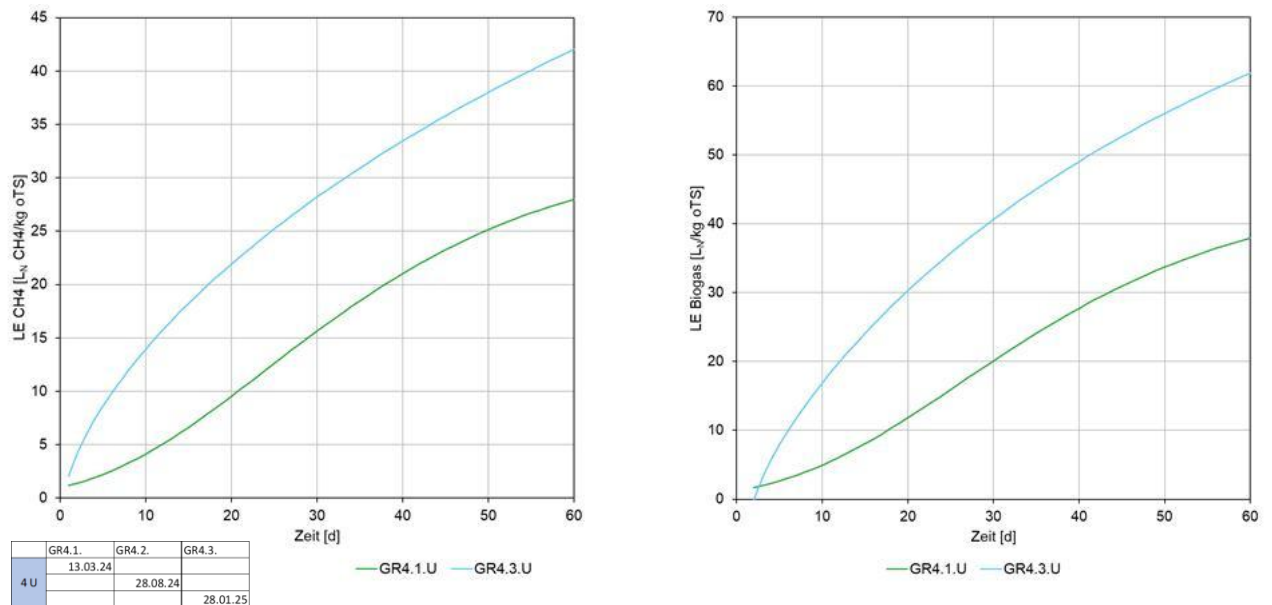


Abbildung 34: Kinetik (Richards-Funktionen) Lagerungsemissionen (Methan und Biogas), Gärrest Anlage 4 U

Der jahreszeitliche Einfluss auf die Lagerungsemissionen der Gärreste lässt sich anhand der mehrfach beprobten Anlagen tendenziell ableiten.

Charakterisierung der Proben

Trockensubstanz und organische Trockensubstanz

In Abbildung 4 sind die mittleren TS- und oTS-Werte von GülLEN, Misten und Gärresten dargestellt. Wie im Abschnitt „Arbeitspaket 3“ beschrieben wurde die Trockensubstanzbestimmung nach DIN EN 11465 durchgeführt. Die Untersuchung des Gehalts an organischer Substanz erfolgte nach DIN EN ISO 18122 als 2-fach-Bestimmung.

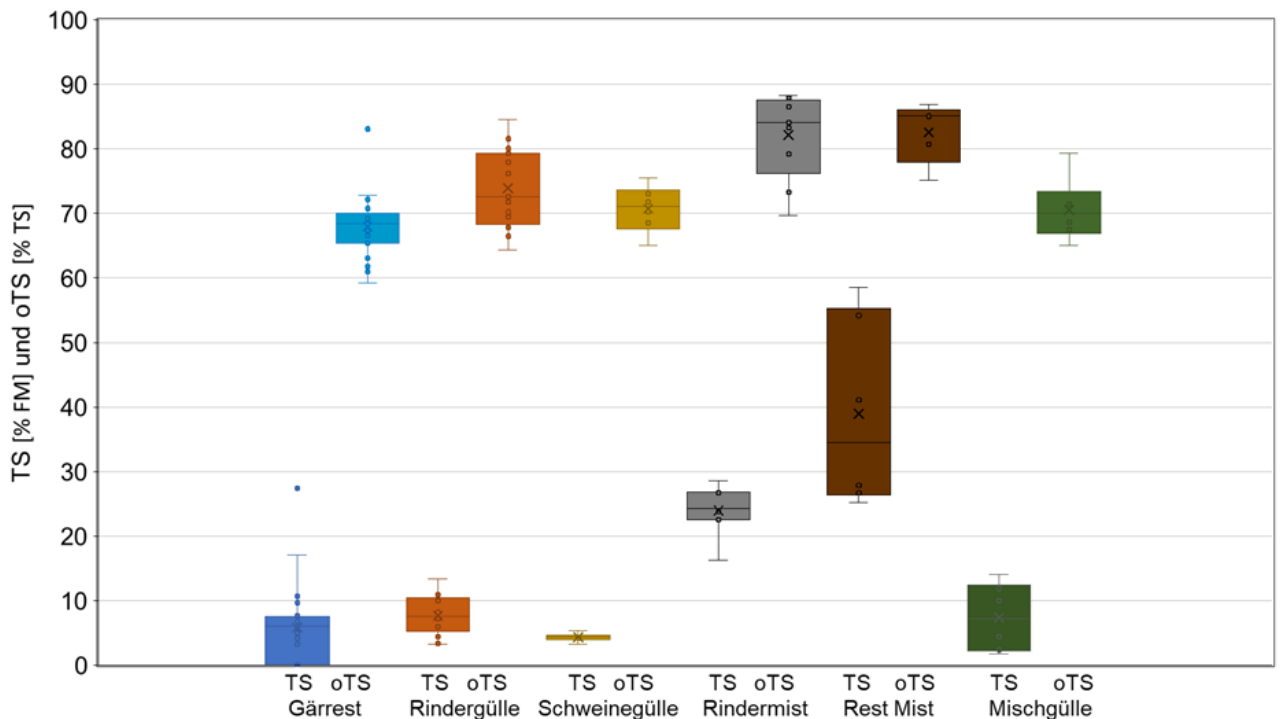


Abbildung 35: Mittlere TS- und oTS-Gehalte der untersuchten Wirtschaftsdünger und Gärreste

Flüssige Proben wie Gülle und Gärreste weisen erwartungsgemäß die geringsten TS-Gehalte auf, die oTS-Gehalte in den Gärresten sind im Mittel mit 68 % durch den Abbau der Organik im Biogasprozess geringer als die oTS-Gehalte der untersuchten Wirtschaftsdünger. Die Miste, welche unter „Rest Mist“ zusammengefasst sind, weisen aufgrund ihrer unterschiedlichen Beschaffenheit und Herkunft TS-Gehalte zwischen 25 und 59 % FM auf. Die oTS-Werte von Rindergülle und Rindermist schwanken am stärksten.

Die TS- und oTS-Gehalte der sechs Rindermistproben unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung, der Lagerungsdauer und dem Anteil an Sand und Steinen. Die oTS-Werte der untersuchten Gärreste unterscheiden sich ebenfalls deutlich aufgrund der Verweildauer und Vergärungsverfahren der einzelnen Anlagen. Tendenziell konnte am Beispiel der Anlage 2 H eine Abnahme der organischen Substanz mit zunehmender Lagerungsdauer in den Mistproben festgestellt werden. Der TS-Gehalt schwankte aufgrund der Witterung stark, da die Lagerung des Mists offen auf einer Siloplatte erfolgte.

Ammonium-Stickstoff, pH-Wert und FOS/TAC

Ammoniak kann auf die Biogasmikroorganismen hemmend wirken und steht mit dem Ammoniumgehalt in einem Gleichgewicht. Durch die Messung der $\text{NH}_4\text{-N}$ Werte kann ein optimaler Gehalt im Fermenter ermittelt werden. Ab Gehalten von 3,5 g/L (Eder 2012) können Hemmungen in der Biogasanlage entstehen.

Der Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) wird bei UMSICHT über Wasserdampfdestillation und anschließende Titration mit dem VAPODEST 500C der Firma Gerhardt bestimmt. Der FOS/TAC-Wert wurde bei UMSICHT nicht bestimmt. Der Ammonium-Stickstoff ($\text{NH}_4\text{-N}$) wird bei der HAWK photometrisch nach DIN 38406, Teil 5 bestimmt. Flüssige Proben wurden aus dem Filtrat des zentrierten Überstands analysiert, bei den festen Proben wurde die Analyse in einem wässrigen Eluat bestimmt.

Der pH-Wert wird bei beiden Forschungseinrichtungen mit einer Glaselektrode nach DIN 38404 bestimmt. In flüssigen Proben, wie Gülle oder Gärresten wird der pH-Wert direkt, für feste Substrate, wie Mist, im wässrigen Auszug nach DIN EN 15933 gemessen. Der optimale pH-Bereich in Biogasanlagen liegt in volldurchmischten Behältern zwischen 7,5 und 8 (Eder 2012).

Der FOS/TAC-Wert wird bei der HAWK als Quotient aus den flüchtigen organischen Säuren (FOS) und der Pufferkapazität (TAC) berechnet. Diese werden durch Titration mit Schwefelsäure (0,05 mol/L) aus dem Überstand einer zentrifugierten Probe auf die pH-Werte 5,0 und 4,4 bestimmt. Der FOS/TAC-Wert ist ein wichtiger Parameter für die Prozessstabilität während der Biogasbildung und zeigt mit steigendem Wert ein Ungleichgewicht zwischen den organischen Säuren im Fermenter und der Pufferkapazität an. Die gemittelten Werte für Gärreste, Gülle und Miste sind in Abbildung 36 als Grafik dargestellt. Hier wird die starke Schwankung der Werte deutlich.

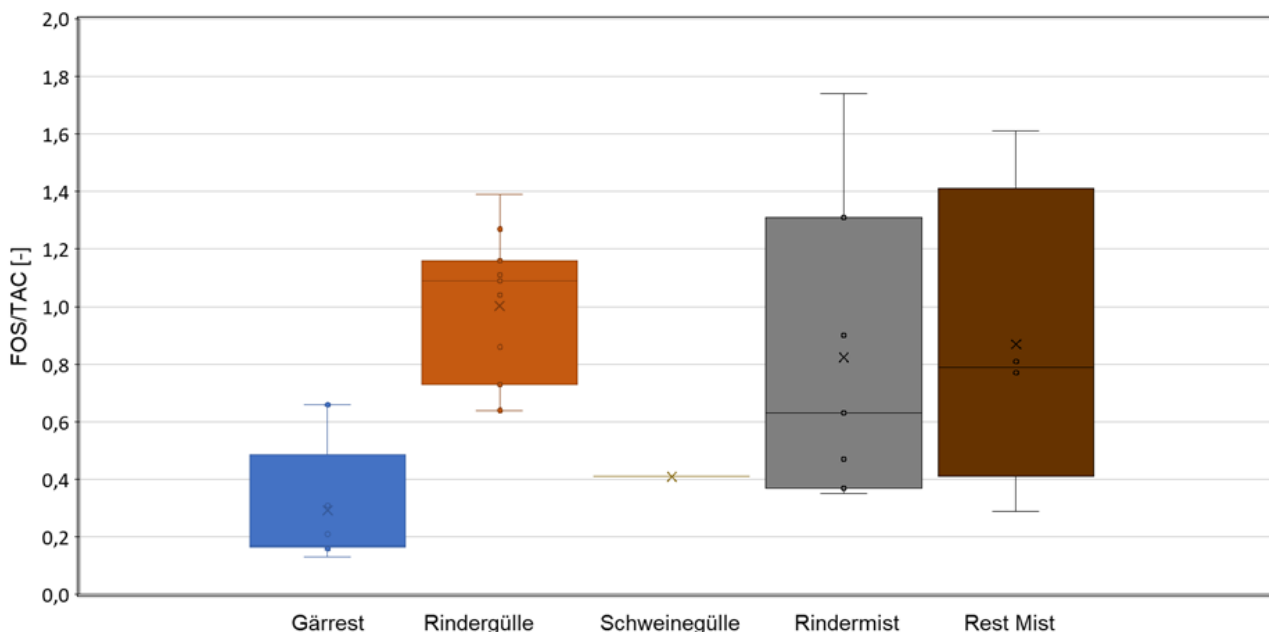


Abbildung 36: Mittlere FOS/TAC-Werte der untersuchten Wirtschaftsdünger und Gärreste

Der ideale Bereich in einem volldurchmischten Behälter während eines störungsfreien Prozesses in der Biogasanlage liegt in der Regel zwischen 0,15 und 0,35, variiert jedoch je nach Anlage, Fütterung und Milieubedingungen. In tierischen Exkrementen wie Gülle finden sich, je nach Art, Alter und Lagerung organische Säuren, weshalb der FOS/TAC-Wert dort höher liegt.

In Abbildung 37 sind die Ammonium-Stickstoff- ($\text{NH}_4\text{-N}$) und die pH-Werte der Wirtschaftsdünger und der Gärreste dargestellt. Die Werte für $\text{NH}_4\text{-N}$ der Gärreste liegen in einem Bereich von 0,14 bis 0,64 %FM, die der Rindergülle zwischen 0,03 bis 0,27 %FM und die der Schweinegülle bei 0,25 und 0,26 %FM. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ Werte der Miste wurden in Eluaten bestimmt und betragen für Rindermist 0,029 bis 0,31 %FM und für die restlichen Miste zwischen 0,06 und 0,44 %FM. Auffällig ist dabei der extrem hohe $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt von 2,1 %FM für Pferdemit. Der Wert an Ammoniumstickstoff der Anmaische als Mischung unterschiedlicher fester Wirtschaftsdünger mit der Flüssigphase des separierten Gärrestes liegt bei 0,42 %FM.

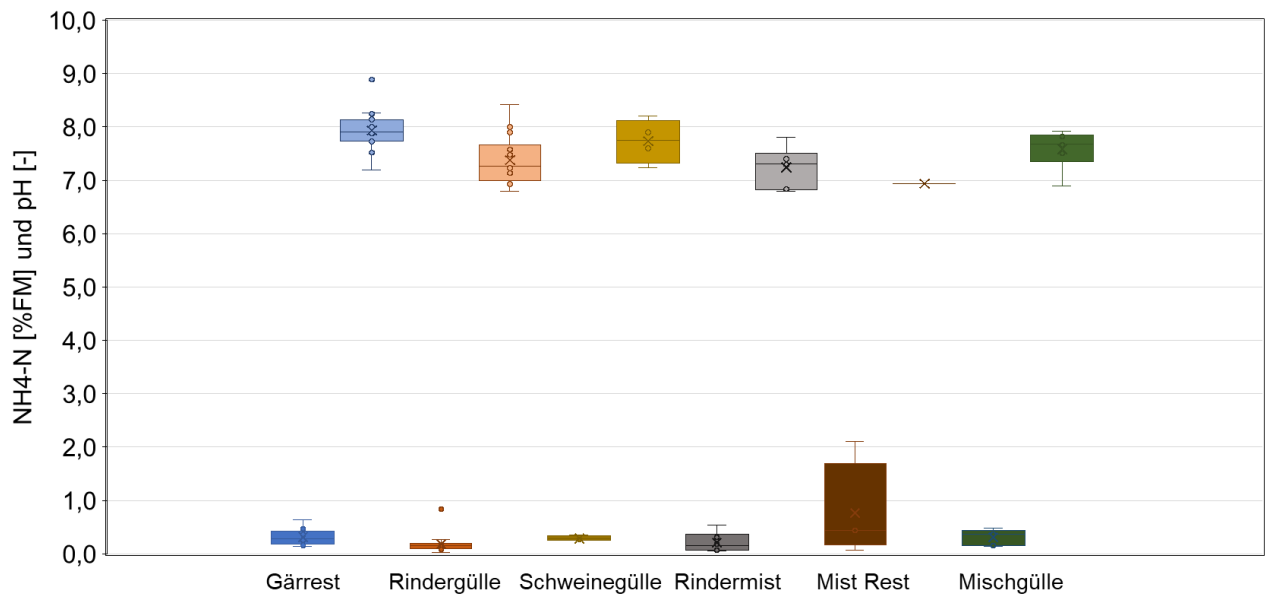


Abbildung 37: Ammonium-Stickstoff und pH-Werte der untersuchten Wirtschaftsdünger und Gärreste

Es konnte am Beispiel der Anlage 2 H eine deutliche Verringerung der Ammoniumgehalte mit zunehmender Lagerungsdauer beobachtet werden (Mist frisch: 1,1 g/kg FM und Mist 38 Tage gelagert: 0,3 g/kg FM). Mögliche Ursachen für die Verluste durch Auswaschung und gasförmige Emissionen in Form von NO_x werden in der Literatur beschrieben und können maßgeblich zu Emissionen aus Wirtschaftsdüngern beitragen.

Die pH-Werte der Gärreste liegen im Durchschnitt bei 7,95 und die Rinder- bzw. Schweinegülle bei 7,3 bzw. 7,7. Bei Rindermist liegen die pH-Werte zwischen 6,8 und 7,8.

Makronährstoffe

Die Proben wurden zusätzlich hinsichtlich ihrer Gehalte an Makronährstoffen wie Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium untersucht. Für die Bestimmung der Makronährstoffe wurden die getrockneten und gemahlten Proben bei der HAWK gemäß DIN EN ISO 16967 mittels Säuredruckaufschluss aufgeschlossen und die Gehalte anschließend mittels Flammen-Atomabsorptions-Spektrometrie nach ISO 7980, ISO 9964-1, ISO 9964-2 und ISO 9964-3 bestimmt. Die Bestimmung von Stickstoff (N) wurde mit dem Elementaranalysator Vario MACRO cube der Firma Elementar nach DIN EN ISO 16948 durchgeführt.

Bei UMSICHT erfolgte die Bestimmung des Stickstoffgehalts nach Kjeldahl mit den Geräten „Kjeldatherm KT-L Aufschlusseinheit“ sowie „Vapodest 500 Carousel VAP 500 C“ der Firma C. Gerhardt GmbH & Co. KG. Die Makronährstoffe Phosphor, Kalium und Magnesium wurden mittels Mikrowelle mit Königswasser aufgeschlossen und nach DIN EN ISO 11885 mittels ICP-OES bestimmt.

In Abbildung 38 sind die Gehalte an Ammonium, Kalium, Phosphor und Magnesium (NH₄-N, K₂O, P₂O₅, MgO) als prozentuale Anteile der jeweiligen Frischmasse und der Gesamtstickstoff als prozentualer Anteil der Trockensubstanz dargestellt.

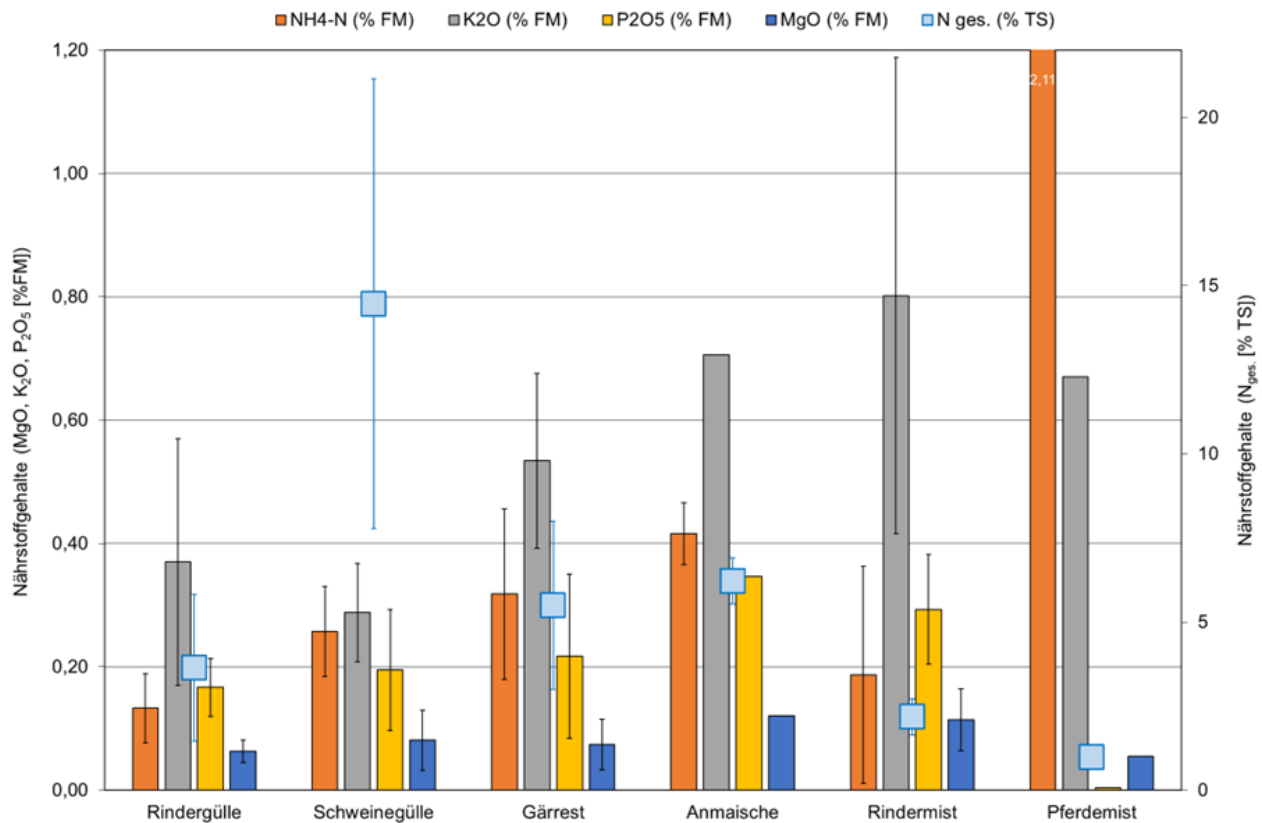


Abbildung 38: Mittlere Gehalte an Stickstoff, Ammonium-Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium der untersuchten Wirtschaftsdünger und Gärreste

Pferdemist hat dabei einen sehr hohen Stickstoffwert und die Rindermiste weisen zum Teil hohe Kalium, Phosphor- und Stickstoffwerte auf, verglichen mit Literaturdaten (KTBL 2018). Auch die Anmaische hat hohe Kaliumwerte.

Organische Säuren

Die Bestimmung der organischen Säuren kann einen Hinweis auf Abbauprozesse und Alter der Gülle und Mist geben, da bei der Lagerung durch mikrobielle Aktivität eine Versäuerung stattfindet. In Gärresten können anhand der Gehalte an organischen Säuren Rückschlüsse auf den Ausgärungs- und Abbaugrad gezogen werden. Zur weiteren Charakterisierung der Wirtschaftsdünger- und Gärrestproben wurden daher die organischen Säuren Essigsäure, Propionsäure, iso-Buttersäure, Buttersäure, iso-Valeriansäure und Valeriansäure bestimmt. Bei UMSICHT erfolgte die Messung nach zweistündigem Zentrifugieren (ca. 24.000 Umdrehung pro Minute), Dekantieren und Filtrieren (0,45 µm Spritzenvorsatzfilter) an der IC Professional Vario 940. Bei der HAWK wird das Säurespektrum mittels HPLC-Messung an zentrifugierten (10 Minuten) und filtrierten (0,45 µm Spritzenvorsatzfilter) Proben durchgeführt. In Abbildung 39 sind die mittleren Gehalte an organischen Säuren in unterschiedlichen Wirtschaftsdüngern und Gärresten dargestellt.

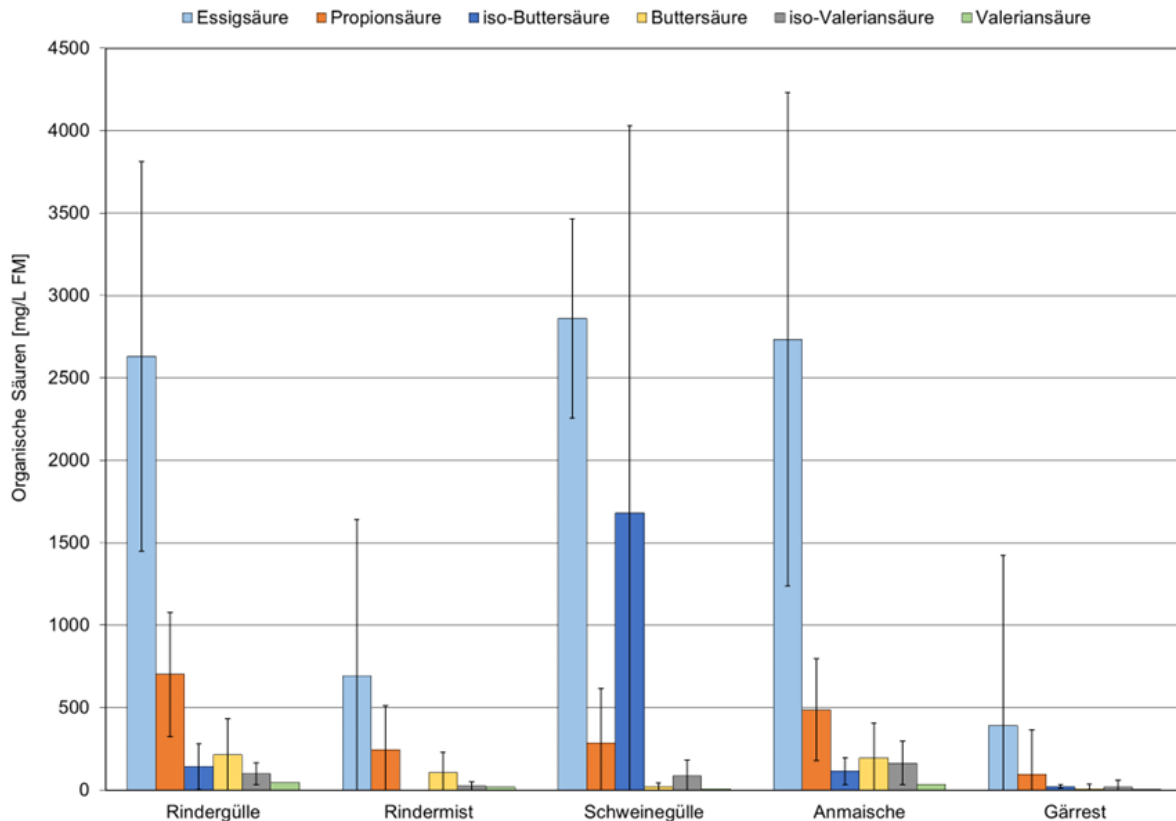


Abbildung 39: Mittlere Gehalte an organischen Säuren der untersuchten Wirtschaftsdünger und Gärreste

Erwartungsgemäß weisen die Gärrestproben die geringsten Gehalte an organischen Säuren auf, da es sich um bereits ausgegorenes Material handelt. Die Mittelwerte von Essigsäure betragen bei Rindergülle 2.500 mg/L und bei Schweinegülle 2.860 mg/L. Dabei liegt der gemittelte Wert der frischen Rindergüllen mit 2.655 mg/L deutlich unter dem der gelagerten Rindergüllen mit 3.498 mg/L, was sich durch die bereits beschriebene Säurebildung durch mikrobielle Abbauprozesse erklären lässt. Bei Betrachtung des Säurespektrums von Schweinegülle fallen der stark erhöhte Mittelwert an iso-Buttersäure sowie die große Streuung der Werte auf. In einer Schweinegülleprobe der Anlage 6 U wurden iso Buttersäuregehalte von über 4.000 mg/L gemessen. Alle weiteren Proben liegen zwischen 27 und 130 mg/L. Über die Lagerungsdauer oder evtl. auftretenden Störungen im landwirtschaftlichen Betrieb, die den hohen Wert erklären könnten, gibt es keine Informationen. Die Bildung der organischen Säuren sowie der Abbau von länger-kettigen organischen Säuren in Wirtschaftsdüngern ist neben der Lagerungsdauer noch von weiteren Parametern wie der Lagerungstemperatur, der Zusammensetzung oder Verunreinigungen durch Hemm- oder Störstoffe abhängig.

Ergebnisse aus den internen Lagerungsversuchen (Technikum, UMSICHT)

Im Rahmen interner Lagerungsversuche wurden eine Schweinegülle im März 2025 (SG6.2.U) sowie eine Rindergülle im April 2025 (RG5.4.U) beprobt und anschließend für 100 Tage bei Raumtemperatur im Technikum von Fraunhofer UMSICHT gelagert. Die Lagerung erfolgte in 10-Liter-Kanistern bei geöffnetem Deckel. Nach Abschluss der Lagerung wurden die Proben erneut analysiert (SG6.3.U bzw. RG5.5.U). Die in Abbildung 40 dargestellte Umgebungstemperatur im Technikum betrug im Mittel 24 °C (Minimum: 21,3 °C, Maximum: 33,0 °C).

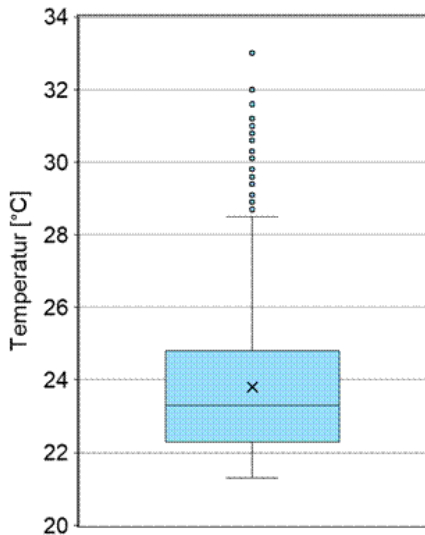


Abbildung 40: Temperaturwerte während der 100-tägigen Lagerung im Technikum

Die Werte für die Trockensubstanz (TS) und die organische Trockensubstanz (oTS) der beiden Güllen haben sich nach 100 Tagen Lagerung wie in Abbildung 41 dargestellt verändert. Bei der Rindergülle ist eine Verringerung (TS -9,6 % bzw. oTS -23 %) und bei der Schweinegülle ein Anstieg (TS +4,0 % bzw. oTS +31 %) zu beobachten.

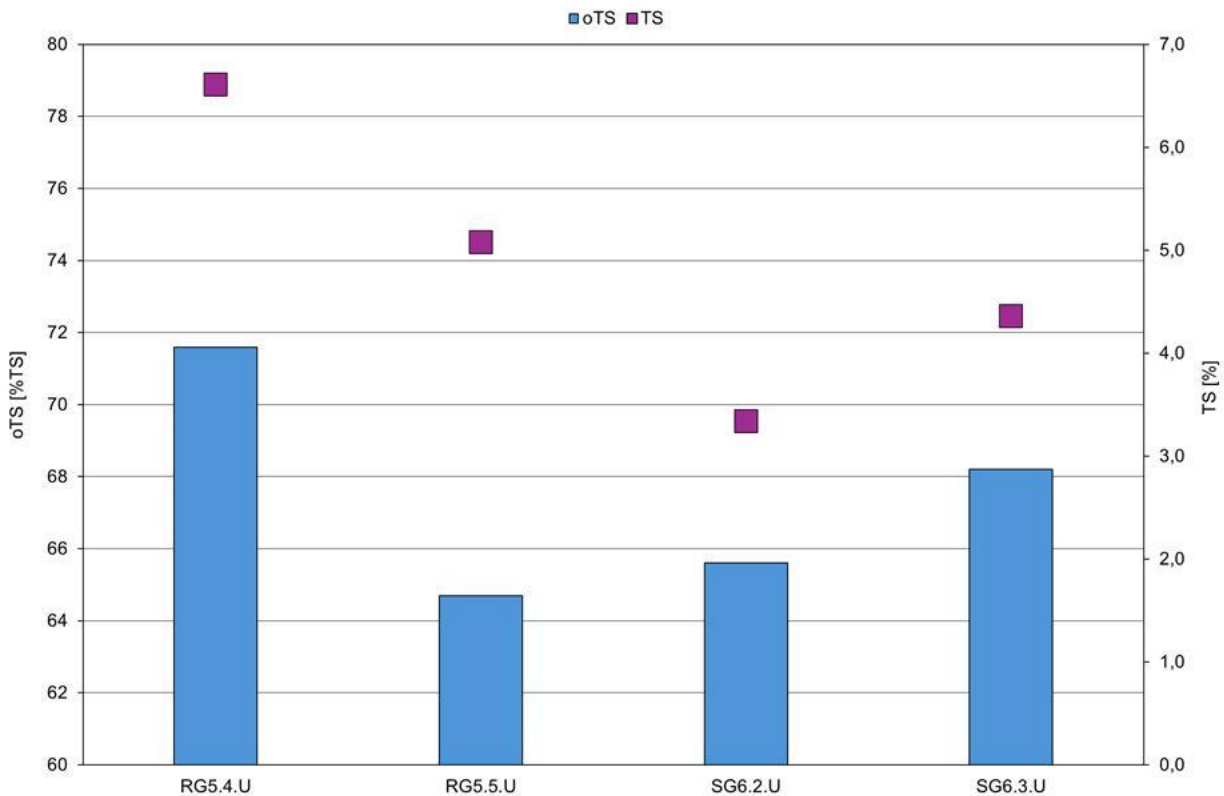


Abbildung 41: TS- und oTS-Werte der frischen und gelagerten Güllen

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Bestimmung der Gasbildungspotenziale (BP und BP(CH₄)) sowie die der Lagerungsemissionen (LE und LE(CH₄)) aufgezeigt. Hier ist zu sehen, dass nach der 100-tägigen Lagerung das Gasbildungspotenzial stark abnimmt. Bei der Schweinegülle sinkt das Methanbildungspotenzial um 84 %, bei der Rindergülle um 67 %. Auch der Methangehalt im gebildeten Biogas nimmt ab. Er sinkt von 55 % auf 42 % bei der Rindergülle und von 60 % auf 38 % bei der Schweinegülle.

Tabelle 10: Übersicht der gemessenen Werte für frische und gelagerte Rinder- und Schweinegülle

Bezeichnung	RG5.4.U	RG5.5.U	SG6.2.U	SG6.3.U
Beschreibung	RG frisch Apr. 2025	RG5.4.U nach 100 d	SG frisch März 2025	SG6.2.U nach 100 d
BP [LN/kg oTS]	360	161	325	83,6
BP(CH₄) [LN/kg oTS]	204	67,8	195	31,3
Methangehalt BP [%]	55,4	42,1	60,1	37,5
LE [LN/kg oTS]	286	34,6	103	18,4
LE(CH ₄) [LN/kg oTS]	162	n. b.	n. b.	n. b.
Methangehalt LE [%]	56,9	n. b.	n. b.	n. b.

In Abbildung 42 sind die relativen (prozentualen) Veränderungen der untersuchten Parameter während der Lagerung dargestellt. Bei den organischen Säuren kommt es bei beiden Güllearten zu deutlichen Verlusten während der Lagerung. Die geringste Abnahme zeigt die iso-Buttersäure mit 30 % in der Rindergülle (RG) bzw. 34 % in der Schweinegülle (SG). Fehlen Balken, liegen die Konzentrationen vor und nach der Lagerung unterhalb der Bestimmungsgrenze der Analytik. Bei den Makronährstoffen (K₂O, P₂O₅, MgO) kommt es in der Schweinegülle während der Lagerung zu Zunahmen um 41–130 %, wohingegen die Rindergülle Veränderungen zwischen -21 % und +16 % aufweist.

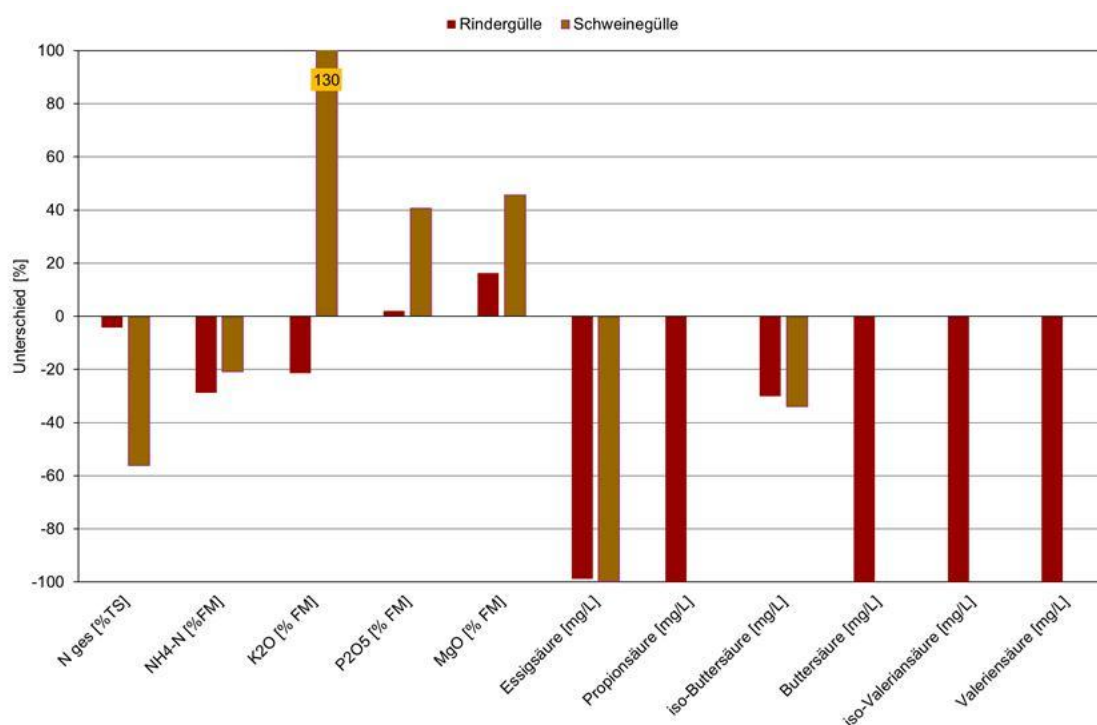


Abbildung 42: Prozentuale Unterschiede von unterschiedlichen Parametern der frischen und gelagerten Gülle

Durch den Abbau der organischen Säuren kann auf die mikrobiologische Aktivität in der Probe während der Lagerung geschlossen werden. Das Temperaturoptimum von mesophilen Methanbildnern liegt zwischen 38 und 42 °C (Weiland 2001) wohingegen die säurebildenden und hydrolytischen Mikroorganismen auch bei niedrigeren Temperaturen gute Aktivitäten aufweisen. Werden also organische Säuren gebildet, aber nicht zu kurzkettigen organischen Säuren oder zu Methan verstoffwechselt, zeigt dies eine verminderte Anzahl an Methanbildnern oder eine eingeschränkte Aktivität der vorhandenen Methanbildner.

Arbeitspaket 6 und Arbeitspaket 9: Bewertung des Einflusses der Behältersysteme und Lagerungsbedingungen sowie der Vergärung in einer Biogasanlage auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern (Fraunhofer UMSICHT, HAWK)

Im Rahmen der Arbeitspakete 6 und 9 werden der Einfluss unterschiedlicher Lagersysteme und Lagerungsbedingungen sowie der Einfluss der Vergärung in Biogasanlagen auf die Methanemissionen von Wirtschaftsdüngern untersucht und bewertet. Grundlage der Bewertung bilden die in den Arbeitspaketen 5 und 8 erhobenen Daten zu Methanbildungspotenzialen (BP(CH₄)) und Lagerungsemissionen (LE(CH₄)).

sowie die umfangreiche Charakterisierung der beprobten Lagerungssysteme mittels Laboranalysen und standardisierter Fragebögen.

Ein Ziel war es, zu quantifizieren, welchen Beitrag die anaerobe Vergärung zur Emissionsminderung leistet und welche Restemissionen aus der Gärrestlagerung resultieren. Die Bewertung erfolgte anhand des BP(CH₄) bei 37 °C als Effizienzparameter und der LE(CH₄) bei 20 °C als Emissionsparameter. Außerdem wird der Methankonversionsfaktor (MCF) als international vergleichbarer Emissionskennwert berechnet und mit Literaturdaten verglichen und eingeordnet. Ein weiteres Ziel ist es, Erkenntnisse aus der Bewertung von Einflussfaktoren wie Lagerungstemperatur und -system gewinnen zu können, indem die Methanemissionen im Verhältnis zu den Lagerungsemissionen und zum Bildungspotenzial betrachtet wurden. Außerdem wurden die Lagerungsemissionen der Gärreste mit den Lagerungsemissionen der Wirtschaftsdünger ins Verhältnis gesetzt. In Arbeitspaket 10 werden dann die Methanemissionen entlang der Prozesskette bilanziert und bewertet.

Methanbildungspotenziale, Methan-Lagerungsemissionen und MCFi

Der MCF (Methane Conversion Factor) gibt an, welcher Anteil des theoretischen Methanbildungspotenzials B₀ unter gegebenen Bedingungen (Lagersystem, Klima, Verweilzeit) tatsächlich als Methan emittiert. Die Emission wurde im Rahmen des Projektes Gaeremission als Lagerungsemissionen (LE(CH₄)) bestimmt.

B₀ ist das theoretische Methanbildungspotenzial der flüchtigen organischen Substanz (oTS) eines Substrats und wird üblicherweise in m³ CH₄ pro kg oTS angegeben. B₀ entspricht dem im Rahmen des Projektes Gaeremission bestimmten BP(CH₄). Zur Angleichung der Einheit werden die BP(CH₄)-Werte durch 1000 geteilt (im Projekt wurden die ermittelten Werte in Liter angegeben, im IPCC-Standard in m³). Die IPCC-Standardwerte für Rindergülle und Schweinegülle liegen bei 0,24 bzw. 0,45 m³ CH₄ pro kg oTS.

$$\text{MCF} = \frac{\text{Lagerungsemission Gülle (LE bzw. LE(CH}_4\text{)) [L_N/kg oTS]}}{\text{Gasbildungspotenzial Gülle (BP bzw. BP(CH}_4\text{)) [L_N/kg oTS]}}$$

Anhand des MCF-Wertes können folgende Aussagen abgeleitet werden: Je kleiner der MCF, desto geringer sind die Methanverluste während der Lagerung im Verhältnis zum Methanbildungspotenzial. Dabei können folgende Parameter den MCF-Wert beeinflussen:

- Ausgärungsgrad bei Gärresten,
- eine inaktive oder noch nicht ausgebildete Mikroorganismengemeinschaft für die Methanogenese,
- bereits länger gelagerten Proben, bei denen bereits Methan während der Lagerung emittiert wurde.

Für alle Wirtschaftsdüngerproben wurde der MCF-Wert berechnet und wird im Folgenden mit MCF_i bezeichnet. Dieser wurde mit den in der Literatur angegebenen MCF-Werten verglichen. In Abbildung 43 sind die MCF_i für Rindergüllen dargestellt. Der Literaturwert für den MCF für Rindergülle bei Lagerung im offenen, abgedeckten Lager oder bei Lagerung unter dem Spaltenboden liegt bei 0,17.

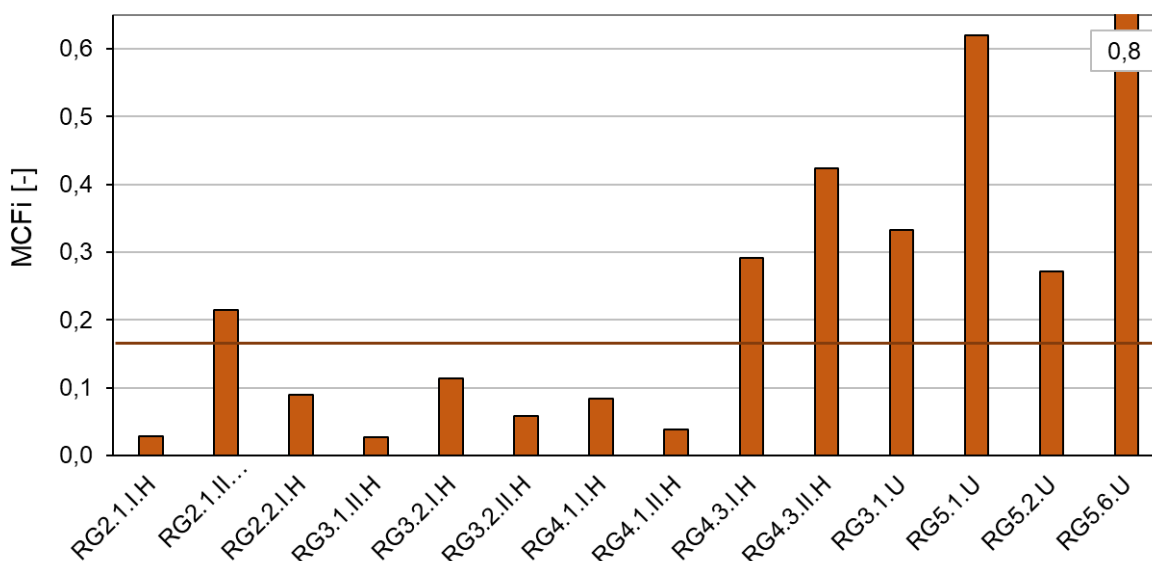


Abbildung 43: MCF_i für Rindergülle im Vergleich mit MCF-Literaturwert

Die MCFi von sieben Rindergüllen liegen unter dem angegebenen Literaturwert von 0,17, wobei sieben weitere Proben zum Teil deutlich über dem Literaturwert liegen. Interessant ist hierbei der Lagerungseffekt auf die Rindergüllen. Dabei sind gegenläufige Tendenzen zu erkennen. Bei den Proben RG2.1 und RG4.3 weisen die frischen Rindergüllen (I) niedrigere MCF-Werte auf als die gelagerte Rindergüllen (II) von der jeweils gleichen Anlage. Jedoch liegen die MCF-Werte der Rindergüllen RG3.1, RG3.2 und RG4.1 frisch (I) über den MCF-Werten der gelagerten Rindergüllen (II).

In Abbildung 44 sind die MCFi Werte von Schweinegülle dargestellt.

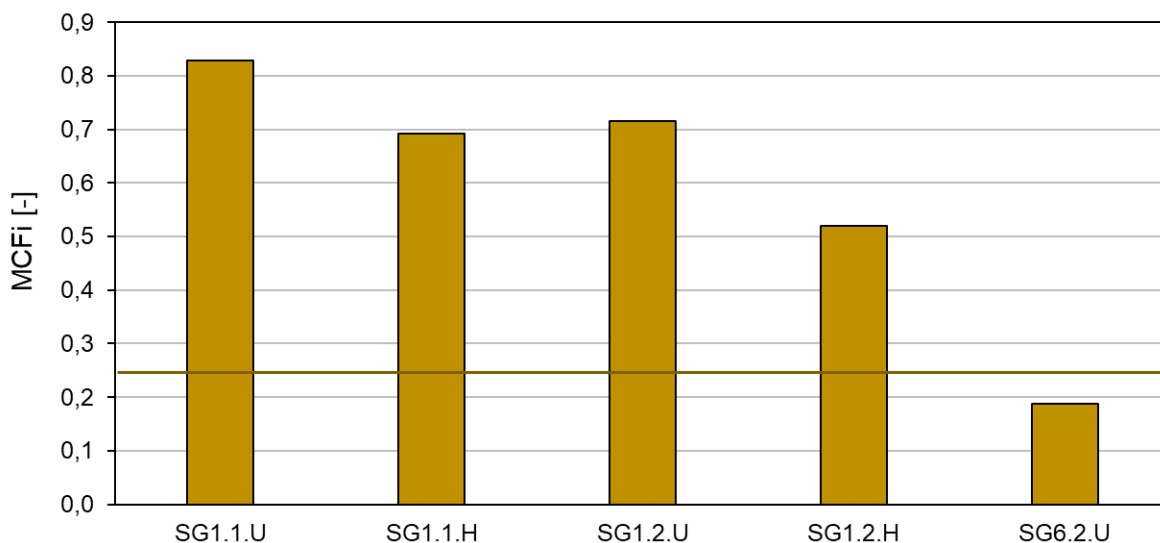


Abbildung 44: MCFi für Schweinegülle im Vergleich mit MCF-Literaturwert

Der Literaturwert für Schweinegülle bei Lagerung im offenen, abgedeckten Lager oder bei Lagerung unter dem Spaltenboden beträgt 0,25. Alle Gülleproben der Anlage 1 liegen deutlich über dem Literaturwert. Mit 0,19 ist der MCFi-Wert für die Schweinegülle SG6.2.U geringer als in der Literatur angegeben.

In Abbildung 45 sind die MCFi-Werte von Rindermist dargestellt. In der Literatur werden je nach Haltungssystem unterschiedliche Werte angegeben. Für Mist aus Tiefstreuverfahren beträgt der Wert 0,17 und für alle anderen Systeme 0,02. Da es sich bei den Rindermist Proben in diesem Projekt um Mist aus der Milchviehhaltung handelt, wurde der Wert für Mist aus anderen Systemen gewählt.

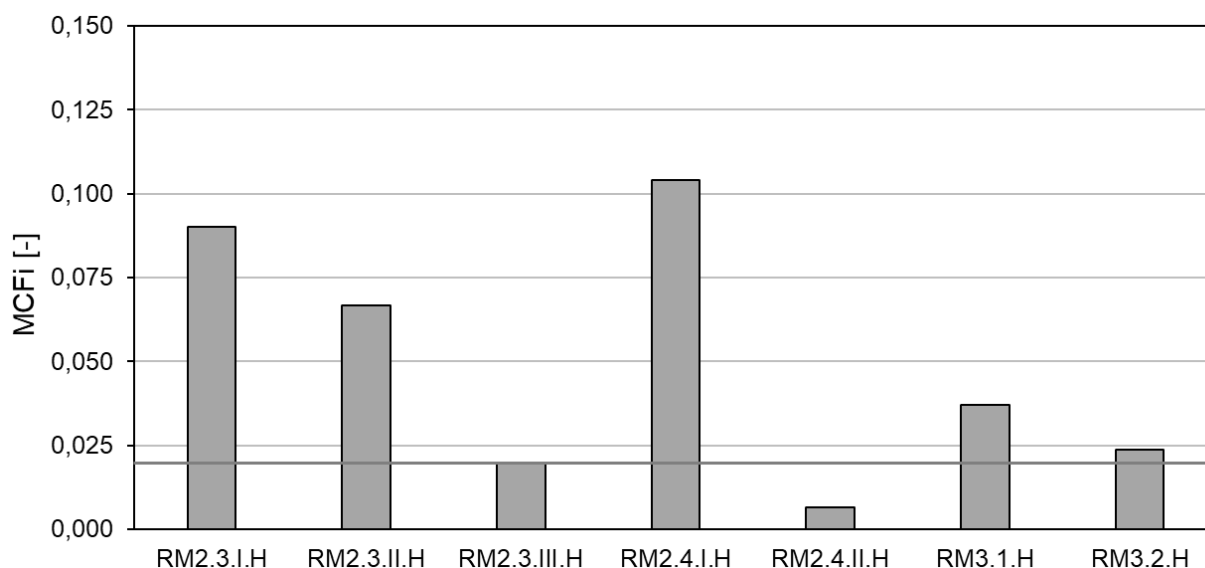


Abbildung 45: MCFi für Rindermist im Vergleich mit MCF-Literaturwert

Die MCFi-Werte für Rindermist schwanken zwischen 0,01 und 0,11. Bei den Proben RM2.3.I (frisch), RM2.3.II (10 Tage gelagert) und RM2.3.III (21 Tage gelagert) und bei den Proben RM2.4.I (frisch) und RM2.4.II (38 Tage gelagert) nehmen die MCFi-Werte mit zunehmender Lagerungsdauer ab. Dies ist mit nicht erfassten Methanemissionen auf der Siloplatte während der Lagerung am ehesten zu erklären. Eine geringe oder gehemmte Methanogenese sowie Auswaschung durch Regen sind weitere Einflussparameter.

Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit weiteren Forschungsergebnissen aus der Literatur werden von (Hilgert 2022) die IPCC-Spannweiten für flüssige Rindergülle und Schweinegülle bei warmen Bedingungen (26–28 °C) mit MCF-Werten von 0,71–0,8 und bei kühlen Bedingungen (10–14 °C) mit MCF-Werten von 0,17–0,25 zitiert. Dies entspricht den Literaturwerten, welche in diesem Abschnitt zum Vergleich herangezogen werden.

In der Studie von (Hilgert 2022) wurden ebenfalls Lagerungsversuche mit Gülle durchgeführt (90 Tage Lagerung bei 5–25 °C). Die dabei berechneten experimentellen MCF-Werte für Schweinegülle lagen bei 15–25 °C in derselben Größenordnung wie die IPCC-MCFs. Für Rindergülle wurden deutlich geringere MCF-Werte beobachtet, was im Artikel u. a. mit Akkumulation der organischen Säuren und Hemmung der Methanogenese diskutiert wird. Nach (Hilgert 2023) beeinflussen Parameter wie die Fütterung, der TS-Gehalt, die Faser- und Ligninanteile sowie der Gehalt an organischen Säuren das $BP(CH_4)/B_0$. Wie in Abbildung 5 und Abbildung 6 (Gasbildungspotenziale von RG und SG) dargestellt, wiesen auch die Güllen, welche im Projekt Gaeremission untersucht wurden, starke Schwankungen im BP auf.

Ebenso zeigen die im Projekt Gaeremission berechneten MCFi-Werte eine große Spannweite zwischen den Proben. Das passt sehr gut zu den Ergebnissen von (Hilgert 2022). Dort erreichen Schweinegülle bei Lagerung bei 20–25 °C MCF-Werte von 0,5–0,7. Die MCFi-Werte von Schweinegülle aus dem hier vorgestellten Projekt liegen ebenfalls in diesem Bereich (mit Ausnahme von SG6.2.U).

Der beobachtete Unterschied frisch (I) vs. älter (II) wird auch von (Hilgert 2022) beschrieben. Dort wird beobachtet, dass gelagerte Gülle mit aktiver mikrobieller Gemeinschaft deutlich höhere CH_4 -Emissionen innerhalb des Beobachtungszeitraums erreicht als frische Gülle, bei der die Methanemissionen erst verzögert einsetzen. Bei älteren Güllen hat der Prozess der Säurebildung bereits begonnen und die Methanbildung erfolgt schneller.

Daraus lässt sich folgendes ableiten:

Frische Gülle (direkt aus dem Stall):

- Initialer CO_2 -Überschuss durch hydrolytische und acidogene Prozesse
- Verzögerte Etablierung der methanogenen Mikrobiom-Gemeinschaft
- Nach 60 Tagen bei 20 °C häufig noch kein Plateau der CH_4 -Bildung erreicht

Gelagerte Gülle (aus Vorgrube):

- Hydrolytische und acidogene Phasen bereits abgeschlossen
- Etablierte methanogene Gemeinschaft
- Schnellere und höhere Rate der Methanbildung
- Nach 60 Tagen häufig Plateau erreicht

Charakteristika der Gülle- und Gärrestlager

Die beprobten Wirtschaftsdüngerlager wurden hinsichtlich folgender Parameter charakterisiert.

Behältersysteme:

- Geschlossene Behälter (Gülle Keller unter dem Stall)
- Offene Hochbehälter (Vorgruben, Lagersilos)
- Tiefbehälter (Erdbecken)

Lagerungsbedingungen:

- Lagerungstemperatur: saisonale Schwankungen zwischen 5–10 °C (Winter) und ca. 18 °C (Sommer)
- Verweilzeiten: von wenigen Tagen (direkt unter dem Stall) bis zu mehreren Monaten (Langzeitlager)
- Abdeckung: mit/ohne natürliche Schwimmschicht, teilweise mit Folienabdeckung

Details der Probenahmen und die erfragten Charakteristika der Güllelager sind in den Tabelle 5 und Tabelle 6 aufgeführt. Die Größen der Gärrestlager wurden ebenfalls ermittelt. Alle Gärrestlager sind gasdicht ausgeführt und ihre Größe orientiert sich am Volumen der Fermenter, dem zu vergärenden Volumen und dem für die Lagerung vorzuhaltenden Volumen. Das wesentliche Unterscheidungskriterium lag bei der Größe der Lager und somit in einem unterschiedlichen Verhältnis von Volumen zu Oberfläche. Eine Beheizung der Gärrestlager wurde in keinem Fall berichtet. Für die Volumina der Gärrestlager und die Lagerungsemissionen ließen sich keine Korrelationen ermitteln. Unterschiede in den Lagerungsemissionen sind vor allem auf Verweilzeiten, Substratzusammensetzung und die mittlere Lagerungsdauer der Gärrestes zurückzuführen.

Einfluss der Temperatur auf die Lagerungsemissionen

Die kontinuierlichen Temperaturmessungen an zwei ausgewählten Güllelagern (Arbeitspaket 4) zeigten, dass die Gülletemperaturen den saisonalen Schwankungen der Außentemperatur folgen, jedoch mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung und gedämpfter Amplitude. Die gemessenen Werte bestätigen die Literaturangaben von Reck und Thieme (1989) sowie Reinhold (1988).

Diese Ergebnisse korrelieren mit den Erkenntnissen aus der Literatur. Im et al. (2020) zeigten, dass eine Temperaturerhöhung von 15 °C auf 35 °C die CH₄-Emissionen aus Rindermist um den Faktor 18 steigern kann. Die im Projekt gemessenen Werte bei 20 °C liegen erwartungsgemäß zwischen den Literaturwerten.

Ein zentrales Ergebnis des Projektes ist der Nachweis des Einflusses des Güllealters auf die Emissionsdynamik. Frische Gülle (direkt aus dem Stall) zeigt einen initialen CO₂-Überschuss durch hydrolytische und acidogene Prozesse, die verzögerte Etablierung der methanogenen Mikrobiom-Gemeinschaft und dass nach 60 Tagen bei 20 °C häufig noch kein Plateau der CH₄-Bildung erreicht wird. Als Konsequenz lässt sich ableiten, dass die im Projekt bestimmte Lagerungsemission LE(CH₄) das tatsächliche Emissionspotenzial unterschätzt. Bei bereits vorgealterter Gülle (aus Vorgrube/Langzeitlager) sind die hydrolytische und acidogene Phase bereits abgeschlossen, es besteht eine etablierte methanogene Gemeinschaft, es kommt zu einem schnelleren Einsatz und einer höheren Rate der Methanbildung und nach 60 Tagen ist häufig ein Plateau erreicht. Diese Werte liegen damit näher am tatsächlichen Emissionspotenzial. Diese Beobachtungen stimmen mit den Erkenntnissen von Dalby et al. (2021) überein, die betonen, dass bestehende Emissionsmodelle die mikrobielle Dynamik unzureichend abbilden.

Die Auswertung der Daten nach Behältersystemen zeigt klare Unterschiede mit emissionsrelevanten Implikationen: Güllekeller unter dem Stall weisen aufgrund der Stallwärme ein höheres und über das Jahr stabileres Temperaturniveau auf, was temperaturabhängige Emissionsprozesse tendenziell verstärkt. Offene Hochbehälter sind hingegen durch saisonale Schwankungen geprägt und können natürliche Schwimmschichten ausbilden, die den Wärme- und Stoffaustausch an der Oberfläche beeinflussen. Tiefbehälter zeigen infolge der Erdreisolisierung geringere Temperaturschwankungen. Hung et al. (2023) berichten, dass das Verhältnis von Lageroberfläche zu Lagervolumen die Gülletemperatur maßgeblich prägt: Bei einem Verhältnis, das oberhalb von 0,47 liegt, kann die Spitzen-Gülletemperatur die Lufttemperatur überschreiten.

Einfluss der Lagerungsdauer und des Monats der Probenahme

Die Lagerungsdauer der Rindergüllen war nicht in allen Fällen klar zu bestimmen. Insbesondere für Lager, die längere oder unregelmäßige Entleerungszyklen aufwiesen, wurden in der Regel die Angaben der Lagerdauer nicht konkretisiert. Der Vergleich der Methan-Lagerungsemissionen in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer in Abbildung 46 zeigt, dass die Emissionen von nicht oder nur kurz gelagerte Güllen tendenziell deutlich niedriger liegen als die der Rindergüllen, für die keine Lagerungsdauer angegeben wurde.

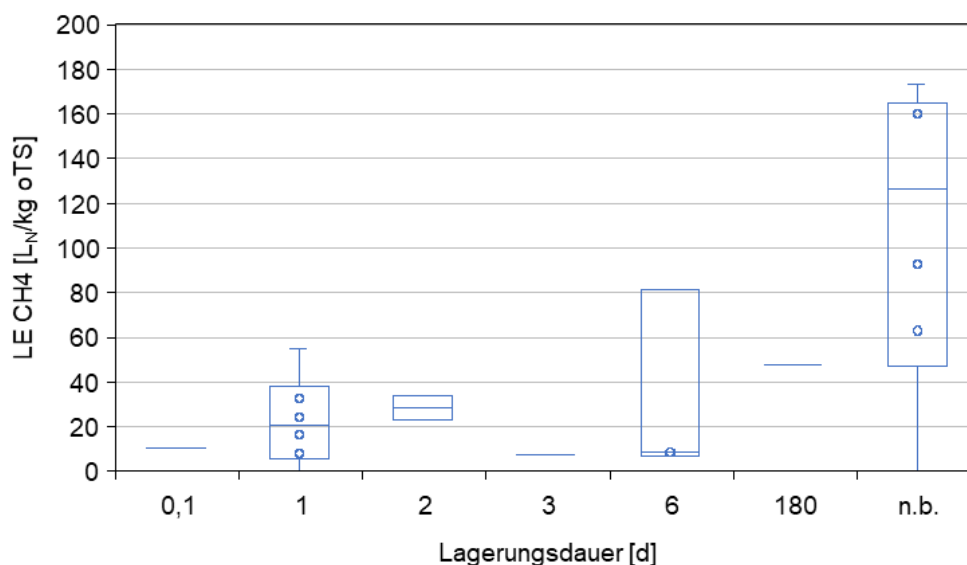


Abbildung 46: Rindergülle – Einfluss der Lagerungsdauer auf die Methan-Lagerungsemissionen

Die Lagerungsemissionen der Gärreste unterliegen je nach Anlagenbetrieb starken Schwankungen, so dass sich keine Aussagen hinsichtlich der Größenordnung in Abhängigkeit von der Lagerungszeit treffen lassen. Aus diesem Grund wurden gezielt Lagerungsversuche im Technikumsmaßstab durchgeführt.

In Abbildung 47 sind die Anteile an Methan an den Lagerungsemissionen dargestellt. Tendenziell können die Anteile an Methan darauf hinweisen, in welchem Maß der Gärrest bereits hydrolysiert wurde (je höher der Grad der Hydrolyse, umso höher ist der Methangehalt). Hier wäre zu erwarten, dass der Anteil an Methan mit zunehmender Lagerungsdauer des Gärrests steigt. Diese Aussage lässt sich allerdings durch die hier untersuchten Proben nicht eindeutig nachweisen. Da die Ausbringung vor allem in den Monaten März bis Mai sowie September bis November erfolgt, sind die Gärrestlager von diesen Ausbringungszeiträumen abhängig. Hohe Methangehalte weisen auf eine längere Lagerungsdauer hin, hängen aber auch von der Substratzusammensetzung ab, die gefüttert wird (Proteine (also viel Gülle) ergeben tendenziell einen höheren Methananteil).

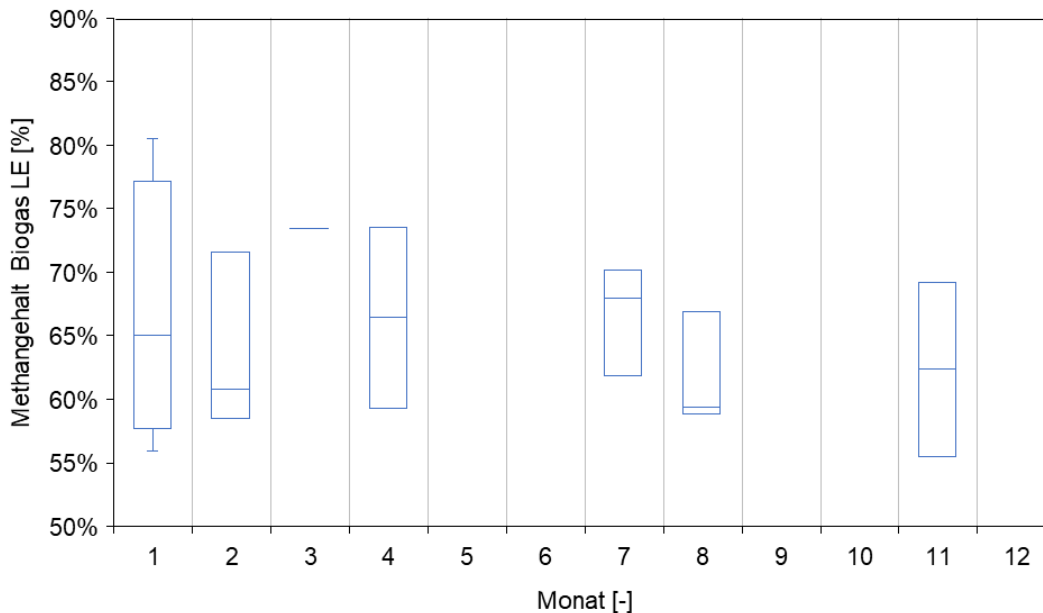


Abbildung 47: Gärrest aus Gärrestlagern – Einfluss des Monats der Probenahme auf den Methangehalt der Lagerungsemissionen

Interne Lagerungsversuche (Technikum, UMSICHT)

Die internen Lagerungsversuche bei UMSICHT (100 Tage bei Raumtemperatur, Ø 24 °C) liefern wertvolle Erkenntnisse zur Emissionsdynamik unter kontrollierten Bedingungen.

Rindergülle (RG5.4.U → RG5.5.U)

- Abnahme des oTS-Gehalts um ca. 15 % durch mikrobiellen Abbau
- deutlicher Anstieg der bereits vorhandenen methanogenen Aktivität

Schweinegülle (SG6.2.U → SG6.3.U)

- vergleichbare Trends wie bei Rindergülle
- höhere absolute Emissionen aufgrund des höheren Methanbildungspotenzials von Schweinegülle

Diese Ergebnisse bestätigen die Projektannahme, dass frische Gülle zunächst lagerungsstabil sind und der Anstieg der Gasbildung erst nach Tagen einsetzt.

Fazit

Die systematische Untersuchung des Einflusses von Lagersystemen und Lagerungsbedingungen sowie der Vergärung in einer Biogasanlage auf die Methanemissionen bei Wirtschaftsdüngern ergab folgende zentrale Erkenntnisse.

- **Temperatur ist ein dominierender Einflussfaktor:** Die Methanemissionen steigen mit höherer Lagerungstemperatur signifikant an. Bei Wintertemperaturen (< 10 °C) sind die Emissionen deutlich niedriger als bei Sommertemperaturen (> 18 °C).
- **Die Vergärung reduziert die Methanemissionen erheblich:** Im Vergleich zur Direktausbringung können durch die Vergärung 70–95 % der Lagerungsemissionen vermieden werden. (siehe Ökobilanzielle Einordnung, Arbeitspaket 10)

- **Das Güllealter beeinflusst die Emissionsdynamik:** Frische Gülle zeigen verzögerte Methanbildung, während vorgealterte Gülle durch bereits etablierte methanogene Gemeinschaften schneller und intensiver emittieren.
- **Die Anlagenkonfiguration beeinflusst die Effizienz:** Mehrstufige Anlagen (Hauptfermenter und Nachgärer) und Anlagen mit hohen Verweilzeiten (> 80 Tage) erreichen Effizienzen von 85–95 % bei der Ausnutzung des Methanpotenzials.
- **Die ermittelten MCF-Werte sind konsistent mit der Literatur:** Die Projektergebnisse bestätigen die IPCC-Spannen, zeigen aber auch die Notwendigkeit differenzierter Emissionsfaktoren.
- **Optimierungspotenzial bzgl. Verweilzeiten:** Kurze Verweilzeiten führen zu hohen relativen Restgaspotenzialen. Eine Verlängerung der Verweilzeit und/oder eine mehrstufige Prozessführung kann die Effizienz deutlich verbessern.
- **Gasdichte Gärrestlagerabdeckung ist wirksam:** Die Erfassung und Verwertung des Restgases eliminiert die direkten Emissionen aus der Gärrestlagerung.
- **Die Ergebnisse unterstützen die Aktualisierung von Emissionsinventaren:** Die differenzierten MCF-Werte für Gärreste ermöglichen eine präzisere Abbildung der tatsächlichen Emissionen in nationalen Inventaren.

Arbeitspaket 10: Ökobilanzielle Einordnung der ermittelten Emissionskennwerte innerhalb des Gesamtsystems der Biogaserzeugung (HAWK)

Im Rahmen des Projekts wurden die Umweltwirkungen verschiedener Szenarien des Wirtschaftsdünger- und Gärrestmanagements mittels Ökobilanzierung (LCA) nach ISO 14040/14044 analysiert. Ziel war es, die Entwicklung emissionsarmer Bewirtschaftungsstrategien mittels LCA abzubilden und Emissionsminderungspotenziale innerhalb der gesamten Prozesskette zu erheben. Durch die Quantifizierung der Umweltwirkungen entlang relevanter Prozessketten mittels LCA erfolgte die Ableitung emissionsarmer Managementszenarien und Handlungsempfehlungen, insbesondere zur Einordnung der ermittelten Ergebnisse gegenüber den Standardwerten für die jeweiligen Wirtschaftsdünger und Gärreste.

Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der durchgeführten ökobilanziellen Bewertung war es, den potenziellen Umweltnutzen der Verwendung landwirtschaftlicher Wirtschaftsdünger als Substrat im Biogasprozess besser zu verstehen sowie die Emissionsminderungspotenziale aufzuzeigen und zu validieren. Zu diesem Zweck wurde eine vergleichende Ökobilanz für verschiedene Prozessketten von Wirtschaftsdüngern durchgeführt. Dabei wurden die Umweltwirkungen der einzelnen Wirtschaftsdünger und deren Lagerungsbedingungen, der Einsatz in verschiedenen Substratkombinationen zur Biogaserzeugung sowie die Gärrestemissionen über den gesamten Lebenszyklus ermittelt und anschließend diskutiert. Insbesondere sollten zwei Unterziele verfolgt werden:

- 1) Vergleich der Standardwerte mit den im Projekt ermittelten Emissionswerten für die unterschiedlichen Wirtschaftsdünger.

Zunächst wurden dafür die Standardwerte für die Emissionen aus dem nationalen Treibhausgasinventar und anschließend die im Projekt ermittelten Werte genutzt, um die Auswirkungen miteinander zu vergleichen. Anschließend erfolgte der Vergleich der Prozessketten mit und ohne Vergärung (Abbildung 48 a) und b)).

- 2) Beurteilung der Emissionsminderungspotenziale innerhalb beprobter Beispielbetriebe

Um die Auswirkungen der jeweiligen Emissionsparameter innerhalb der untersuchten Prozessketten besser beurteilen zu können, erfolgte die Modellierung zweier Projektbetriebe jeweils mit generischen Emissionskennzahlen und den im Projekt ermittelten Werten für jeweils zwei Betriebsjahre mit unterschiedlichen Substratmischen sowie Wirtschaftsdünger- und Gärresteigenschaften. Zudem wurden jeweils zwei Lagerungsdauern der Wirtschaftsdünger betrachtet: zunächst die Lagerung der Wirtschaftsdünger am Stall mit anschließendem Transport zur Biogasanlage und einer offenen Gärrestlagerung sowie die direkte Nutzung der Wirtschaftsdünger in einer Biogasanlage und eine luftdichte Gärrestlagerung (Abbildung 49).

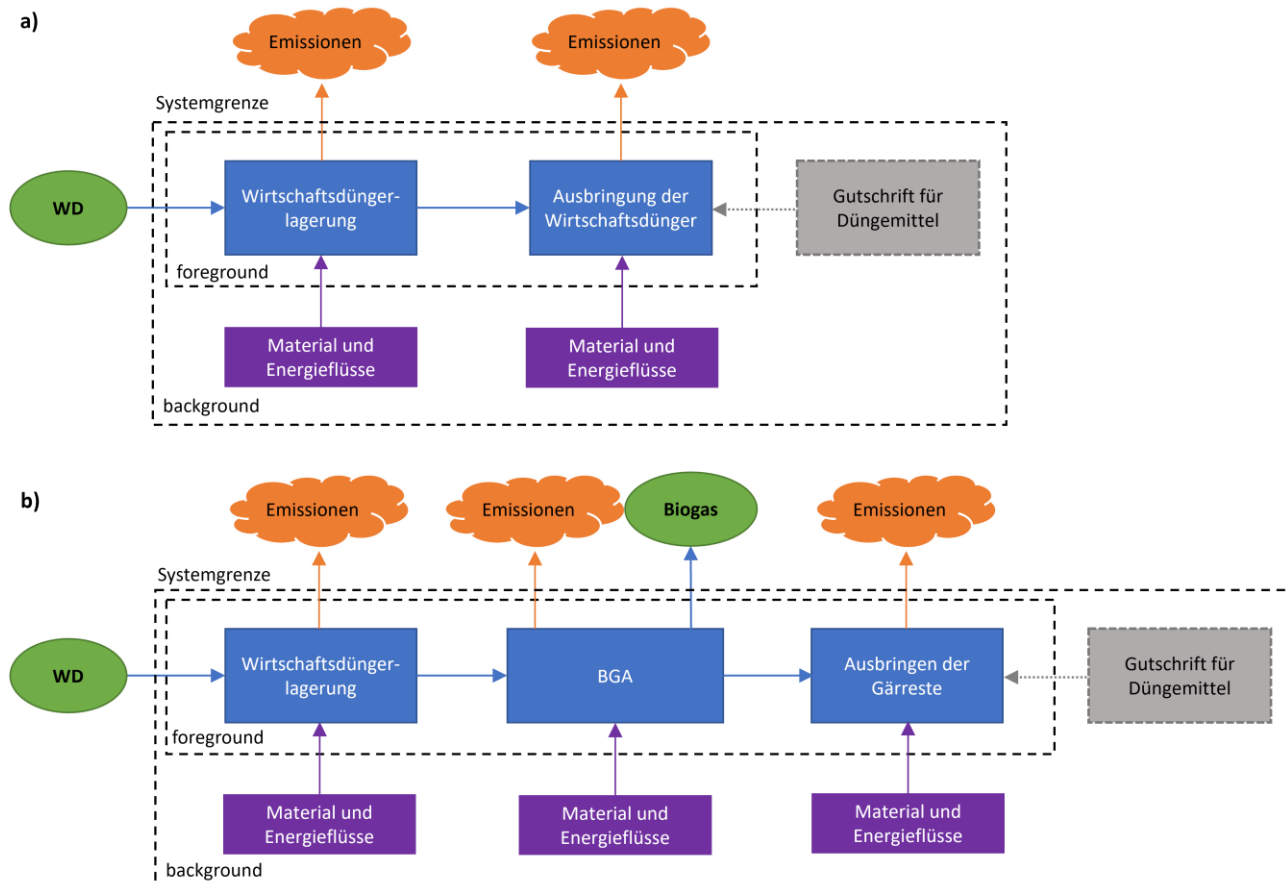


Abbildung 48: Systemgrenzen des Vergleichs der Direktausbringung (a) mit der Vergärung (b) von Wirtschaftsdüngern (WD). Die Systemgrenzen beinhalten sowohl das modellierte System (foreground) als auch die Daten aus den LCA-Datenbanken (background).

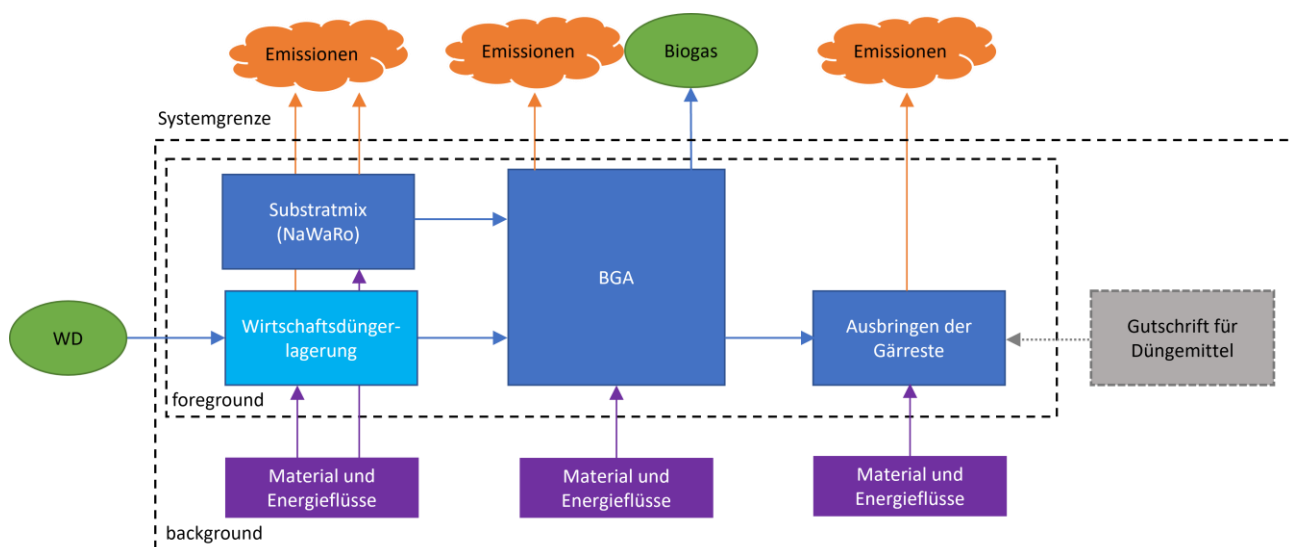


Abbildung 49: Systemgrenzen für die Bewertung der unterschiedlichen Faktoren innerhalb der Beispielbetriebe

Abbildung 48 und Abbildung 49 zeigen die Systemgrenzen der unterschiedlichen Szenarien und Fragestellungen. Diese beinhalteten sowie die unterschiedlichen Prozessketten der Wirtschaftsdünger-Verwertung als modellierte Vordergrundprozesse (foreground) als auch die Hintergrundprozesse aus den Datenbanken (background) zur Abbildung der benötigten Material- und Energieflüsse für Prozesse wie die Herstellung der Biogasanlage oder das Ausbringen und Einarbeiten der Wirtschaftsdünger und Gärreste. Um die unterschiedlichen Charakteristika der untersuchten Wirtschaftsdünger und Gärreste abzubilden, wurden für entsprechenden Nährstoffgehalte (NPK) Gutschriften für die substituierten Düngemittel in Höhe der äquivalenten Düngewirkung gewährt. Die Nutzung des Biogases wurde aufgrund der Fragestellung und des

mannigfaltigen Einflusses unterschiedlicher Nutzungsoptionen (Treibstoff, Strom, Wärme) in der Modellierung nicht mitbetrachtet.

Funktionelle Einheit

Da im Projekt der Einfluss der ermittelten Werte gegenüber den Standardemissionswerten geprüft werden sollte und vielfältige Substratmischungen vorlagen, wurde für die Bereitstellung des erneuerbaren Energieträgers Biogas in der Bilanzierung der Beispielbetriebe die funktionelle Einheit auf die Erzeugung von 1 MJ Methan aus den jeweiligen Substratmischen festgelegt. Zur separaten Bewertung prozess- und parameterbezogener Einflüsse in der angegliederten Bewertung der Wirtschaftsdüngerverwertung mit und ohne Biogaserzeugung und zur verbesserten Übersichtlichkeit wird für die Bewertung der einzelnen Wirtschaftsdünger die funktionelle Einheit als die Verwertung von 1 kg Wirtschaftsdünger (Frischmasse; FM) definiert.

Wirkungsabschätzung

Die in der Sachbilanz erfassten Flüsse werden im Rahmen der Wirkungsabschätzung mittels der Environmental-Footprint-(EF)-Methode der Europäischen Union (EU) zusammengeführt und über kategoriespezifische Charakterisierungsfaktoren auf die relevanten Umweltwirkungskategorien abgebildet. Dadurch lassen sich für jede Wirkungskategorie die Beiträge der verschiedenen Substratmischungen und Szenarien zu den resultierenden Emissionen quantifizieren. Um die Minderungspotenziale und die ökologischen Auswirkungen der Verwertung der Wirtschaftsdünger in einer Biogasanlage darzustellen, wurden die in Tabelle 11 aufgeführten Umweltwirkungskategorien nach der EF-Methode herangezogen.

Tabelle 11: Verwendete Wirkungskategorien nach EF zur Beurteilung der Umweltwirkungen

Wirkungskategorie	Charakterisierungsfaktor	Einheit
Klimawandel	Global warming potential (GWP)	[kg CO ₂ -äq.]
Feinstaub	Particulate matter (PM)	[Disease incidences per kg of PM _{2.5}]
Fossiler Ressourcenverbrauch	Resource use, fossils (FD)	[MJ]
Süßwasser Ökotoxizität	Ecotoxicity, Freshwater (FETP)	[CTUe]
Versauerung	Acidification (AP)	[mol H ⁺ äq.]
Humantoxizität, krebserregend	Human toxicity, cancer (HTPc)	[CTUh]

Datenquellen

Als Datenquellen standen primär die im Projekt erhobenen Daten zu Charakteristik der Wirtschaftsdüngerproben sowie die Methanerträge und Lagerungsemissionen aus den Technikums-Versuchen zur Verfügung. Darüber hinaus wurden Hintergrunddaten aus ecoinvent 3.11 und den LCA for Experts-Datenbanken sowie Daten aus Literaturquellen für die Bilanzierung verwendet

Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse beinhaltete neben der Analyse der unterschiedlichen Szenarien auch die Betrachtung des Einflusses der im Projekt ermittelten Parameter auf das Gesamtergebnis der Umweltwirkungskategorien. Diese Werte repräsentieren das obere und untere Ende der ermittelten Bandbreite und wurden verwendet, um die Robustheit der Ergebnisse gegenüber Unsicherheiten zu testen. Konkret wurden die MCF und B₀ als auch die Nährstoffgehalte und TS- und oTS-Gehalte der Wirtschaftsdünger-Einzelproben gewählt, welche die maximalen und minimalen Werte innerhalb der Wirtschaftsdünger-Kategorie abbildeten. Ziel war es, die potenzielle Variabilität aufgrund von Datenunsicherheiten abzubilden und somit eine Abschätzung der Umweltwirkung der Wirtschaftsdünger in den Szenarien mit und ohne Biogasanlage zu erhalten.

Ergebnisse der LCA

Vergleich der unterschiedlichen Wirtschaftsdünger-Prozessketten

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse zur Bewertung der Umweltauswirkungen unterschiedlicher Wirtschaftsdünger-Prozessketten dargestellt und interpretiert. Ziel dieser Analyse ist, die ökologischen Vor- und Nachteile der Nutzung von Rindermist (RM), Rindergülle (RG) und Schweinegülle (SG) in Biogasanlagen im Vergleich zur direkten Ausbringung ohne vorherige Vergärung zu vergleichen. Dabei werden die Umweltauswirkungen entlang der gesamten Prozesskette betrachtet, sowohl anhand der Emissionskennzahlen (B₀, MCF) aus dem nationalen Treibhausgasinventar sowie anhand von Durchschnittskennwerten für die Nährstoffzusammensetzung für die Wirtschaftsdünger aus der Literatur

(KTBL 2018) als auch anhand der im Projekt ermittelten Kennzahlen und Parameter (“_i”). Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die Umweltwirkungen der Wirtschaftsdünger für die betrachteten Umweltwirkungskategorien. Für jeden Dünger werden zwei Szenarien dargestellt:

- Direkte Ausbringung (z. B. Rindermist; RM): Der Dünger wird nach der Lagerung direkt auf die Felder ausgebracht.
- Einbindung einer Biogasanlage (+BGA): Der Dünger wird nach kurzer Lagerung in einer Biogasanlage vergoren, und das resultierende Gärprodukt wird dann ausgebracht.

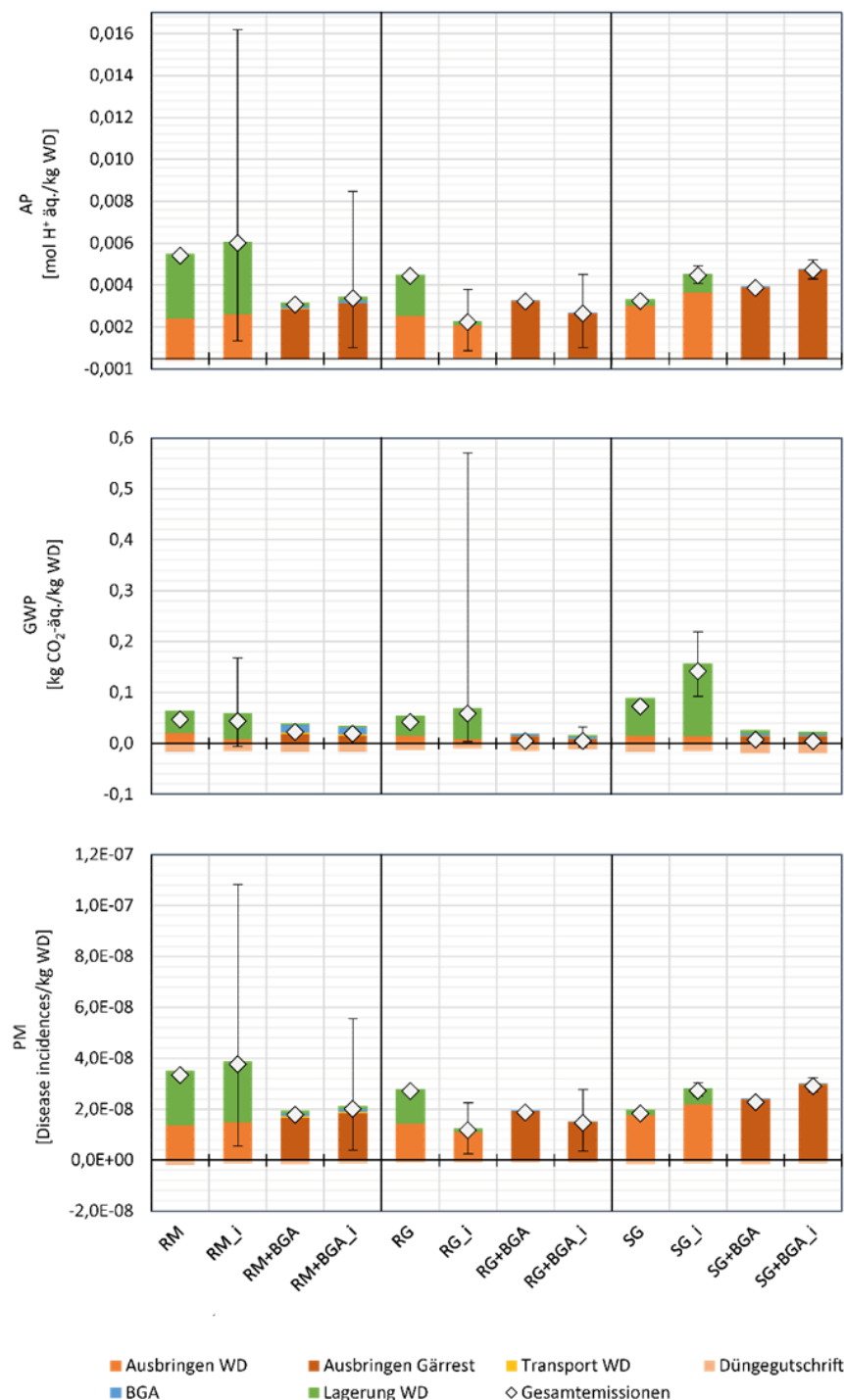


Abbildung 50: Umweltwirkungen der untersuchten Wirtschaftsdünger (WD) für die Ausgangswerte sowie die im Projekt ermittelten Werte, jeweils mit und ohne Biogasprozesskette (Teil 1)

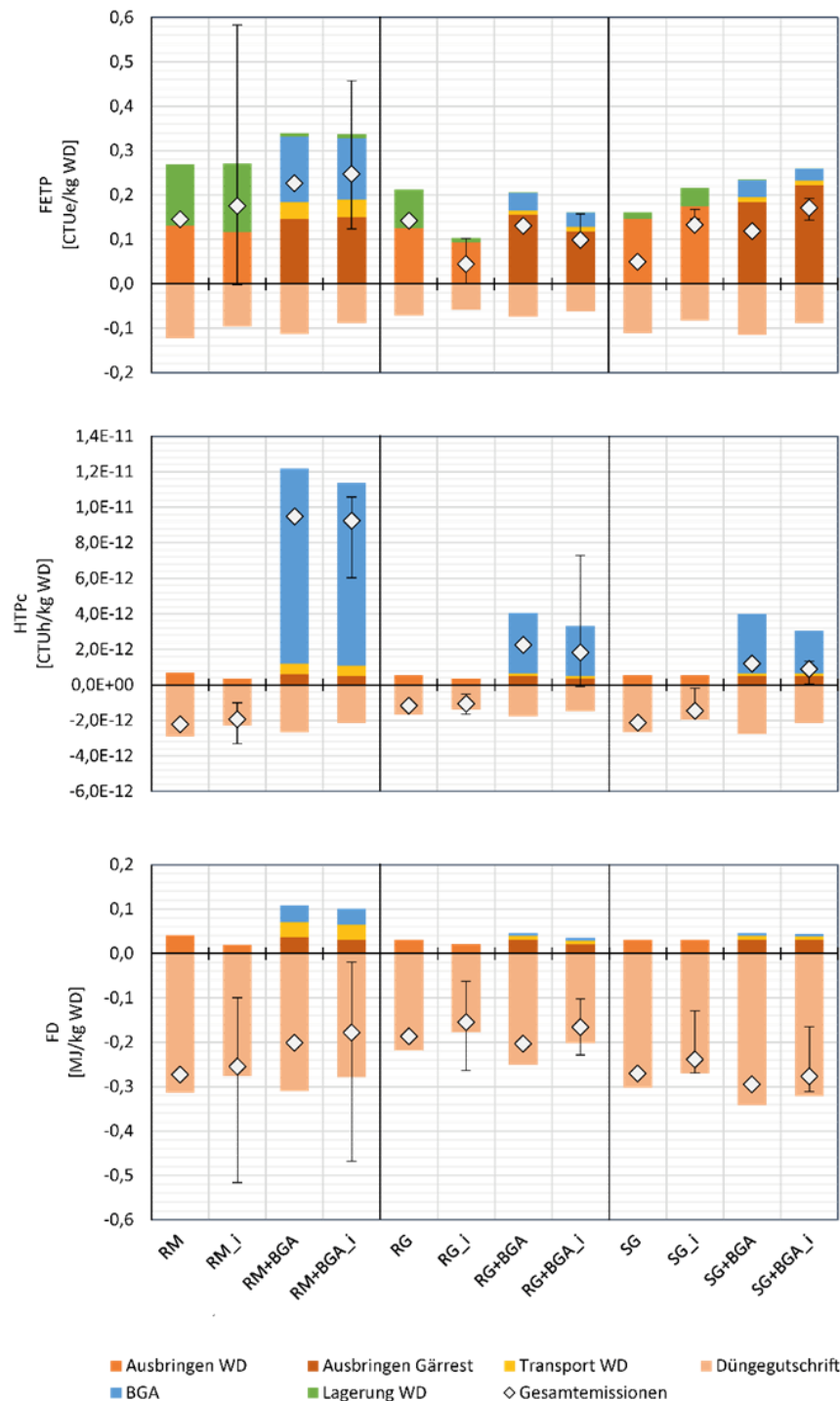


Abbildung 51: Umweltwirkungen der untersuchten Wirtschaftsdünger (WD) für die Ausgangswerte sowie die im Projekt ermittelten Werte, jeweils mit und ohne Biogasprozesskette (Teil 2)

Die Analyse des Treibhauspotenzials (GWP) zeigt eine erhebliche Bandbreite bei Rindergülle, die primär auf die hohe Variabilität der Stickstoffgehalte zurückzuführen ist. Diese führen zu potenziell hohen Emissionen von Lachgas. Ergänzend tragen fiktive, aber hohe Werte für den Methanemissionsfaktor (MCF) und die spezifische Biogasproduktion (B_0) zu einer weiteren Ausweitung der Bandbreite im GWP bei, da diese Parameter Methanemissionen quantifizieren. Im Vergleich dazu wurde bei Schweinegülle im Projekt ein deutlich höherer mittlerer MCF-Wert ermittelt als bei Rindergülle und Rindermist, was auf eine verstärkte Methanproduktion bzw. auf einen leichteren Abbau während der Lagerung zurückzuführen ist. Die Einbindung einer BGA führt bei allen Düngern zu einer deutlichen Reduzierung des GWP. Dies liegt in der Reduzierung der Methanemissionen durch die Vergärung des Wirtschaftsdüngers begründet. Allgemein wurden die im Projekt ermittelten MCF-Faktoren allerdings bei 20 °C ermittelt, und spiegeln tendenziell höhere Emissionsfaktoren wider als die MCF-Faktoren aus dem nationalen Treibhausgasinventar für die niedrigeren Lagerungstemperaturen der Wirtschaftsdünger. Die Lagerungsemissionen der Wirtschaftsdünger sind in allen Szenarien ein wesentlicher Faktor, der die Gesamtemissionen beeinflusst. Insbesondere Acidification (AP),

Global warming potential (GWP) und Particulate matter (PM) haben durch die Emissionen von Ammoniak, Lachgas und Methan einen hohen Einfluss. Die Einbindung einer Biogasanlage kann dazu beitragen, die Lagerungsemissionen zu reduzieren, da der Wirtschaftsdünger nach der Erzeugung vergoren und somit die Lagerzeit verkürzt wird. Allerdings erhöhen sich auch die Emissionen an Ammoniak bei dem Ausbringen der Gärreste, da der Ammoniumgehalt in den Gärresten durch die Vergärung tendenziell steigt. Allerdings können die Emissionen insgesamt durch die Nutzung der Wirtschaftsdünger und Gärreste positiv beeinflusst werden, was sich in den hohen Gutschriften für die konventionellen Düngemittel in den Kategorien FETP, HTPc und vor allem FD widerspiegelt. Der Verbrauch an fossilen Ressourcen kann damit maßgeblich reduziert werden, was in allen Szenarien zu Emissionseinsparungen führt. Daher führt die Einbindung einer Biogasanlage zu einer komplexen Verschiebung der Umweltbelastungen. Während das Treibhauspotenzial (GWP) in der Regel reduziert wird, können andere Indikatoren (z. B. AP, HTPc oder FD) durch unter anderem den erhöhten Logistikaufwand und die baulichen und energetischen Aufwendungen für die BGA erhöht werden, welche mit Prozessen aus den Ökobilanzierungsdatenbanken abgebildet wurden.

Diese LCA fokussiert auf die Umweltauswirkungen der Wirtschaftsdüngerlagerung und der Nutzung in Biogasanlagen und bilanziert nicht die nachgelagerte Nutzung des Biogases. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der Prozesskette und eine klare Identifizierung von Optimierungspotenzialen hinsichtlich Emissionen. Die Nicht-Berücksichtigung der Biogasnutzung ermöglicht eine eindeutige Darstellung der Umweltauswirkungen, die direkt mit der Prozesskette der Wirtschaftsdüngernutzung (mit und ohne Biogasanlage) verbunden sind, ohne die Komplexität der nachgelagerten Nutzungspfade (z. B. Stromerzeugung, Wärmenutzung, Kraftstoffanwendung) hinzuzufügen. Dies erleichtert die Interpretation der Ergebnisse und deren Vergleichbarkeit mit denen anderer Studien, die möglicherweise ähnliche Systemgrenzen verwenden. Die präsentierten Ergebnisse stellen somit eine konservative Schätzung der Umweltbelastungen dar, da die Vorteile der Biogasnutzung – insbesondere die Substitution fossiler Energieträger – nicht berücksichtigt wurden. Eine effiziente Nutzung des Biogases ist entscheidend, um die tatsächlichen Umweltvorteile von Biogasanlagen voll auszuschöpfen. Tabelle 12 zeigt die zusätzlich für die betrachteten Prozessketten und Szenarien mit Biogasanlage erzeugte Biogasmenge.

Tabelle 12: Erzeugte Biogasmenge in den jeweiligen Szenarien und die Eingangsparameter für B_0 und den oTS-Gehalt.

Szenario	Parameter		
	B_0 [Nm ³ /kg oTS]	oTS-Gehalt [kg/Mg WD]	Biogasmenge [MJ/Mg WD]
RM	0,230	213	1656,8
RM_eigen	0,222 (0,116–0,315)*	197 (114–253)*	1549,3
RG	0,230	64	499,0
RG_eigen	0,232 (0,147–0,337)*	52 (22–109)*	409,7
SG	0,300	48	488,1
SG_eigen	0,297 (0,273–0,331)*	34 (30–40)*	341,0

*(Mittelwert (Min–Max))

Innerhalb der untersuchten Szenarien zeigt die Biogasmenge, bezogen auf die Frischmasse der Wirtschaftsdünger (WD), eine starke Korrelation mit deren Frischmasse-bezogenen oTS-Gehalten. Rindermist (RM) mit typischen Substrateigenschaften generiert mit 1656,8 MJ/Mg die höchste Energiemenge, gefolgt von Rindergülle (499,0 MJ/Mg) und Schweinegülle (488,1 MJ/Mg). Die im Rahmen dieses Projekts erhobenen Daten („eigen“) stimmen im Mittel mit Literaturwerten für Methanbildungsraten und Frischmasse-bezogene oTS-Gehalte überein, weisen jedoch eine beträchtliche Variabilität für alle Parameter auf. Im Vergleich zu Literaturwerten wurden für alle Wirtschaftsdünger-Typen tendenziell niedrigere oTS-Mittelwerte ermittelt. Folglich liegen die Biogaserträge in den drei Szenarien, die auf Projektdaten basieren, unterhalb der Szenarien, die auf Literaturdaten basieren.

Vergleich der Auswirkungen von Lagerung innerhalb der Biogasprozesskette

Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse einer Ökobilanz für zwei im Projekt untersuchte Biogasanlagen (BGA 1: Substrat hauptsächlich Schweinegülle und BGA 2: Substrat hauptsächlich Rindergülle (und Rindermist)) über zwei Betriebsjahre (1.1/1.2 und 2.1/2.2). Die Ergebnisse werden für verschiedene Umweltindikatoren dargestellt, sowohl mit als auch ohne (oL) Berücksichtigung von Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdünger und Gärresten.

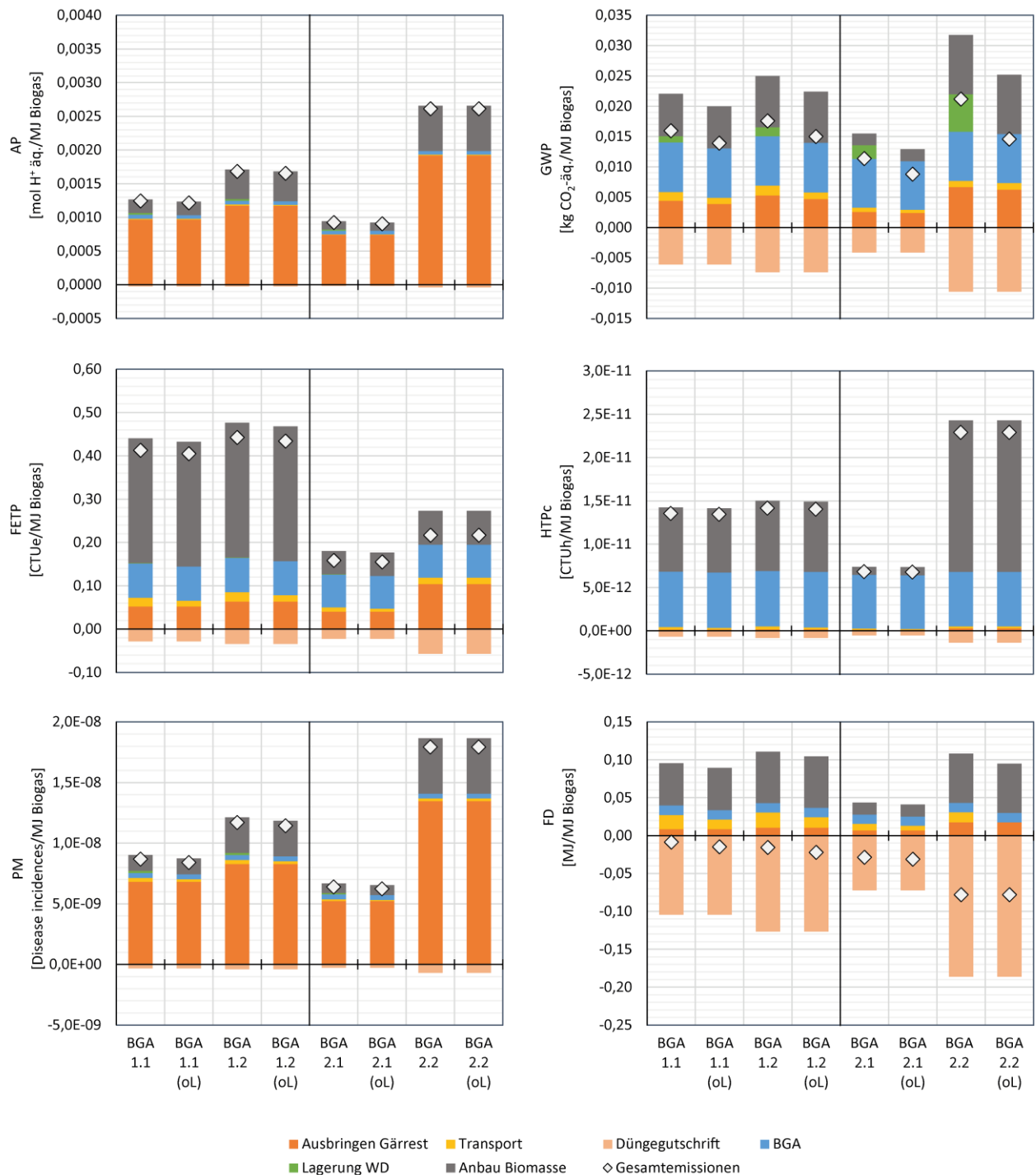


Abbildung 52: Umweltwirkungen der beiden Beispielbiogasanlagen BGA 1 und BGA 2 für jeweils zwei Betriebsjahre sowie mit und ohne Lagerungsemissionen.

Die Mehrzahl der untersuchten Umweltindikatoren weist positive Werte auf, was auf einen Beitrag der Biogasanlagen zu den entsprechenden Umweltbelastungen hindeutet. Die Einbeziehung von Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern (WD) vor der Vergärung und von Gärresten nach der Biogasanlage (BGA) führt ausschließlich im Global Warming Potential (GWP) zu erhöhten Werten. Dies lässt darauf schließen, dass die Lagerung von Wirtschaftsdüngern und Gärresten eine signifikante Emissionsquelle darstellt, deren relativer Einfluss auf die gesamte Prozesskette jedoch in Abhängigkeit vom Wirtschaftsdüngern-Anteil im Substratmix vorrangig auf Treibhausgasemissionen beschränkt bleibt. Ein wesentlicher Einfluss auf das Umweltprofil der Szenarien ergibt sich zudem aus der Bereitstellung der Anbaubiomasse, dem Betrieb der BGA selbst sowie den Emissionen bei der Gärrestausrückführung.

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse, dass die Emissionen je nach Betriebsjahr erheblichen Schwankungen unterliegen. Diese Schwankungen sind primär auf Unterschiede in den Substratmixen und den damit verbundenen Veränderungen der Nährstoffzusammensetzung sowie den resultierenden Emissionen und Gutschriften bei der Gärrestausrückführung zurückzuführen. Insbesondere die Ammoniak- und

Lachgasemissionen (PM und AP) und die Gutschriften durch die Substitution von Stickstoffdünger (FD) werden maßgeblich durch den Stickstoff- bzw. Ammoniumgehalt der Gärreste beeinflusst.

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine verbesserte Lagerung von Wirtschaftsdüngern bzw. eine zeitnahe Einbringung in den Biogasfermenter eine effektive Maßnahme zur Reduzierung der Umweltwirkungen, insbesondere der Treibhausgasemissionen, darstellen kann. Zusätzlich können durch eine gasdichte Lagerung der Gärreste Restgasemissionen minimiert werden.

Arbeitspaket 11: Erarbeitung von technischen und ökonomischen Empfehlungen (HAWK, Fraunhofer UMSICHT)

Während der Projektlaufzeit wurden zu unterschiedlichen Jahreszeiten mit entsprechend unterschiedlichen Außentemperaturen Anlagen beprobt, die unterschiedliche Substrate einsetzen. In einigen Fällen konnte ermittelt werden, wie lange die genommenen Proben an Wirtschaftsdüngern und Gärresten bereits gelagert wurden; dies war aber nicht immer der Fall. Außerdem wiesen die Proben jeweils spezifische Zusammensetzungen, TS- und oTS-Gehalte auf. Diese hingen bei den Wirtschaftsdüngern von der Art und Fütterung der Tiere sowie den entsprechenden Stallbeschaffenheiten (Spaltböden, Kratz- oder Spülförderung etc.) ab. So unterscheiden sich z. B. Rinder- und Schweinegülle erheblich voneinander. Bei den Biogasanlagen sind die eingesetzten Substratmischungen und die Prozessparameter maßgeblich für die Beschaffenheit der Gärreste. Im Projekt war es aufgrund der baulichen Gegebenheiten an den verschiedenen Probenahmestellen nicht immer möglich, sicherzustellen, dass tatsächlich homogene und genau repräsentative Proben genommen wurden. Insbesondere diese Schwierigkeiten bei den Probenahmen erwiesen sich im Projektverlauf als größer als zuvor angenommen. Im Nachhinein wäre es evtl. auch sinnvoll gewesen, weniger Anlagen zu beproben, diese dafür aber häufiger. Somit wären einige Parameter deutlich weniger Änderungen unterworfen worden und die Auswirkungen anderer Parameter leichter erkennbar. Andererseits war es aber auch gut, verschiedene repräsentative Arten von Anlagen einzubeziehen, um allgemeingültigere Aussagen treffen zu können.

Alle oben genannten Aspekte beeinflussten die Ergebnisse bzgl. Biogaspotenzialen und -zusammensetzung sowie Lagerungsemissionen. Aufgrund der Vielzahl an Variablen war es folglich nicht möglich, alle genauen Abhängigkeiten der Ergebnisse aus den Technikumsversuchen und der Laboranalytik von allen Einflussparametern zu ermitteln bzw. zu quantifizieren. Dennoch konnten durch die umfangreichen Messungen und Auswertungen einige Empfehlungen abgeleitet werden. Die folgenden Aussagen sind sicher nicht gänzlich neu, basieren nun aber auch auf den Ergebnissen dieses Projekts und können somit durch konkrete Zahlen untermauert werden. Basierend auf den Labor- und Technikumsuntersuchungen sowie den Lebenszyklusanalysen (LCA) lassen sich folgende Empfehlungen hinsichtlich der Treibhausgasemissionen ableiten:

- Wenn möglich, sollten Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen eingesetzt werden. Die Vergärung reduziert die Methanemissionen gegenüber einer Lagerung und direkten Ausbringung von Wirtschaftsdüngern erheblich. Wie die LCA gezeigt hat, können je nach Anlage bzw. Art der Wirtschaftsdünger im Vergleich zur Direktausbringung durch die Vergärung 70–95 % der Lagerungsemissionen vermieden werden (siehe Abbildungen 51 und 52). Dabei beeinflusst die Anlagenkonfiguration die Effizienz: Mehrstufige Anlagen, bestehend aus Hauptfermenter und Nachgärer, sowie entsprechend hohe Verweilzeiten stellen eine möglichst weitgehende Umsetzung des Methanbildungspotenzials in der Anlage sicher und reduzieren die Restgasemissionen der Gärreste nach Ausbringung maßgeblich. Hinzu kommen weitere wesentliche positive Effekte durch die Biogasnutzung (z. B. Ersatz fossiler Brennstoffe bei der Strom- und Wärmezeugung), welche hier noch gar nicht einbezogen sind. Diese Handlungsempfehlung richtet sich nicht nur an Tierhalter, sondern auch an die Gesetzgebung, damit die rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen einen möglichst weitgehenden Einsatz von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen ermöglichen.
- Gülle- und Gärrestlager sollten möglichst gasdicht abgedeckt werden; die Dichtigkeit sollte regelmäßig überprüft werden. Hinsichtlich der Wirtschaftsdünger ist so eine annähernd 100-prozentige Emissionsminderung möglich. Außerdem ist die Temperatur in den Lagern möglichst gering zu halten, beispielsweise durch die Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung, da die Methanemissionen mit höherer Lagerungstemperatur deutlich ansteigen.
- Grundsätzlich sind Lagerungszeiten im Rahmen der gesetzlich vorgegebenen Regelungen möglichst gering zu halten. Frische Gülle sollten möglichst zeitnah in Biogasanlagen eingebracht werden, um unnötige Lagerverluste vor der Vergärung zu vermeiden. Allerdings haben die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen gezeigt, dass frische Gülle eine verzögerte Methanbildung zeigen und daher nicht unmittelbar den Biogasanlagen zugeführt werden müssen. Eine kurzzeitige Lagerung ist durchaus auch ohne relevante Verluste möglich, sodass beispielsweise bei der Anlieferung von Gülle von Höfen ohne eigene Biogasanlage in eine zentrale Anlage ein paar Tage Spielraum

verbleiben. Die genaue Anzahl an Tagen lässt sich allerdings nicht angeben, da diese von verschiedenen Parametern wie insbesondere der Temperatur abhängt.

- Da vorgealterte Gülle durch bereits etablierte methanogene Gemeinschaften schneller und intensiver emittieren, kann es ggf. sinnvoll sein, eine starke Durchmischung in Lagern zu vermeiden, sodass frische Gülle nicht sofort den bestehenden methanogenen Gemeinschaften ausgesetzt werden.
- Die ermittelten Methankonversionsfaktoren (MCF) sind konsistent mit Literaturwerten und bestätigen die vom IPCC angegebenen Spannweiten, zeigen aber auch die Notwendigkeit differenzierter Emissionsfaktoren. Da sich Höfe bzw. Anlagen in einer Vielzahl von Parametern unterscheiden können, ist es sinnvoll, soweit möglich differenzierte Emissionsfaktoren, anstatt von allgemeinen (Durchschnitts-)Werten zu nutzen, um konkrete Einsparpotenziale vor Ort zu ermitteln. Dazu sollten die im Rahmen dieses Projekts ermittelten Werte genutzt werden, um eine präzisere Abbildung tatsächlicher Emissionen in nationalen Inventaren zu erzielen.

Ein Bericht des DBFZ (Majer 2019) quantifiziert das erhebliche ungenutzte Potenzial von Wirtschaftsdüngern in Deutschland (ca. 100 Mio. t FM/Jahr). Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die energetische Nutzung von Wirtschaftsdüngern in Biogasanlagen die Möglichkeit bietet, sowohl Lagerungsemissionen zu vermeiden als auch erneuerbare Energie zu gewinnen. Die Kombination von Minderungsmaßnahmen während der Lagerung (Kühlung, Abdeckung, Vorbehandlung) mit optimierter Vergärung erscheint als vielversprechender Ansatz zur Maximierung der THG-Einsparungen.

2. Literaturverzeichnis

Dalby 2021: Dalby, F. R.; Hafner, S. D.; Petersen, S. O.; VanderZaag, A. C.; Habtewold, J.; Dunfield, K.; Chantigny, M. H.; Sommer, S. G. (2021). Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development. *Journal of Environmental Quality*, 50(4), 817–835. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20252>

Eder 2012: Eder, B. (Hrsg.) (2012): *Biogas-Praxis. Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Umwelt*. 5. Auflage, Ökobuch Freiburg

Hilgert 2022: Hilgert, J. E.; Amon, B.; Amon, T.; Belik, V.; Dragoni, F.; Ammon, C.; Cárdenas, A.; Petersen, S. O.; Herrmann, C. (2022): Methane Emissions from Livestock Slurry: Effects of Storage Temperature and Changes in Chemical Composition. *Sustainability* 2022, 14, 9934. <https://doi.org/10.3390/su14169934>

Hilgert 2023: Hilgert, J. E.; Herrmann, C.; Petersen, S. O.; Dragoni, F.; Amon, T.; Belik, V.; Ammon, C.; Amon, B. (2023): Assessment of the biochemical methane potential of in-house and outdoor stored pig and dairy cow manure by evaluating chemical composition and storage conditions. *Waste Management* 2023, 168. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.031>

Hung 2023: Hung, C.-Y.; Koc, E. K.; Grant, B.; Smith, W.; VanderZaag, A. (2023). Perspectives on peak liquid manure temperature with implications for methane emissions. *Journal of Environmental Quality*, 52(4), 939–947. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20483>

Im 2020: Im, S.; Petersen, S. O.; Lee, D.; Kim, D.-H. (2020). Effects of storage temperature on CH₄ emissions from cattle manure and subsequent biogas production potential. *Waste Management*, 101, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.036>

KTBL 2013: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) Hrsg.: *Faustzahlen Biogas*, 3. Aufl., Darmstadt, 2013

KTBL 2018: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) Hrsg.: *Faustzahlen für die Landwirtschaft*. 15. Auflage. Darmstadt, 2018

KTBL 2021: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) Hrsg.: *Gasdichte Lagerung von Rinder- und Schweinegülle. Eine Maßnahme zur Minderung und Vermeidung von klimarelevanten Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung*. In: <https://www.ktbl.de/themen/gasdichte-quellelagerung>

Majer 2019: Majer, S.; Kornatz, P.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Brosowski, A.; Oehmichen, K.; Liebetrau, J. (2019). *Stand und Perspektiven der Biogaserzeugung aus Gülle*. Leipzig: DBFZ. 43 S. ISBN: 978-3-946629-48-1

Reck 1989: Reck, N.; Thieme, H. J. (1989): Güllelangzeitlagerung als Maßnahme zur bedarfsgerechten Biogaserzeugung. *agrartechnik* 39(5), S. 229-230

Reinhold 1988: Reinhold, G. (1988): *Untersuchungen zur großtechnischen Erzeugung und Verwertung von Biogas bei Berücksichtigung der Substratveränderungen*. Dissertation, Technische Hochschule Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik

Rennie 2018: Rennie, T. J.; Gordon, R. J.; Smith, W. N.; VanderZaag, A. C. (2018): Liquid manure storage temperature is affected by storage design and management practices—A modelling assessment. Agriculture, Ecosystems & Environment, Vol. 260, ISSN 0167-8809, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.03.013>.

Weiland 2001: Weiland, P. (2001): Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate; VDI-Berichte, Nr. 1620 „Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven“; S. 19-32; VDI-Verlag

3. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

nicht geplant

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Verwertungs-kategorie	Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten der Verwertung	- Sicherung der Verwertung von Wirtschaftsdüngern - Verbesserung der Nachhaltigkeit durch Verringerung von Treibhausgasemissionen aus Wirtschaftsdüngern - Nutzen für verschiedene Anwendergruppen wie Landwirte mit Viehhaltung und Biogasanlagenbetreiber - Effizienzsteigerung durch verbesserte Nutzung von Methanbildungspotenzialen - Verbesserung der Wettbewerbssituation	- Verbreitung der Ergebnisse über Veröffentlichungen, Internet, Vorträge auf Tagungen und den Abschlussbericht - Information zum Projekt auf den Internetseiten von Fraunhofer UMSICHT und der HAWK - Anwenderkonferenzen, z. B. über Landwirtschaftskammer NRW - Nutzung in der Beratung von Landwirten, u.a. im projektbegleitenden Beirat	- Vorträge und Veröffentlichungen sind zum Teil bereits erfolgt - erledigt - kurz- bis mittelfristig - kurz- bis mittelfristig

Informationen zum Projekt sind in Form einer Pressemitteilung auf der Homepage von Fraunhofer UMSICHT zu finden unter:

<https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2022/gaeremission.html>

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Verwertungs-kategorie	Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten der Verwertung	- Schaffung von Know-how zur Kompetenzerhaltung - Steigerung der wissenschaftlichen Konkurrenzfähigkeit - Transfer zu Nutzergruppen: Landwirte mit Viehhaltung	- Veröffentlichungen - Konferenzen wie z. B. Biogasfachtagung - Austausch und Vorstellung über Innovationsforen und Arbeitskreise	- zum Teil bereits erfolgt - kurz- bis mittelfristig - kurz- bis mittelfristig

Poster und Abstract auf dem 14. WISSENSCHAFTSKONGRESS Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft am 13. und 14. März 2025 an der Universität Kassel: Walz, M., Warnecke, M., Gievers, F., Loewen, A.: Einfluss unterschiedlicher Lagerungsverfahren und Prozessparameter auf das Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten.

Vortrag im Rahmen des FNR Online-Seminars „Emissionsvermeidung bei der Lagerung, Aufbereitung und Ausbringung von Gärprodukten“ vom 27.3.2025: Loewen, A., Sayder, B.: Einfluss unterschiedlicher Lagerungsverfahren und Prozessparameter auf das Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärprodukten.

Vortrag und Konferenzbeitrag auf dem FNR/KTBL-Kongress „Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven“ am 8. und 9. September 2025 an der Universität Hohenheim in Stuttgart: Loewen, A., Walz, M., Warnecke, M., Sayder, B., & Körner, H.-J.: Einfluss verschiedener Lagerungssysteme und -bedingungen auf die THG-Emissionen von Gülle und Gärresten. In K. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., *Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven* (pp. 144–151). Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL).

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Verwertungs-kategorie	Verwertung	Instrumente	Zeithorizont
Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit im Hinblick auf eine Verwertung	- Kontaktaufnahme mit weiteren potenziellen Nutzern für die weitere Umsetzung der Ergebnisse	- Einschaltung von Multiplikatoren wie Landwirtschaftskammern, 3N Kompetenzzentrum und Fachverband Biogas auch über die Projektlaufzeit hinaus	- kurz- bis mittelfristig
	- Folgeprojekte zur Schaffung von weiterem Know-how	- Antragstellung bei potenziellen Fördergebern	- in Planung

e) Stand der Erreichung der in der Vorhabenbeschreibung aufgeführten Verwertungsoptionen, Forschungsdaten

In der Vorhabensbeschreibung wurden im Wesentlichen die Verwertungsoptionen wie unter a) bis d) aufgeführt angegeben. Den Anlagen, bei denen im Laufe des Projekts Proben genommen wurden, werden die Ergebnisse direkt zur Verfügung gestellt. Außerdem sind Projektergebnisse bereits in einigen Vorträgen und Veröffentlichungen publiziert worden. Dies soll nach Fertigstellung des Abschlussberichts fortgeführt werden. Die Ergebnisse wurden und werden mit Fachverbänden, Forschungseinrichtungen und Betreibern diskutiert und es werden daraus Ansätze für weitere Projekte entwickelt. Es werden nur anonymisierte und nicht personenbezogene Daten freigegeben. Sensible Daten werden nicht veröffentlicht.

Die Forschungsdaten sind auf den Servern der beteiligten Partner strukturiert abgelegt. Die HAWK hat inzwischen ein hochschulinternes Forschungsdatenmanagement und verabschiedet zurzeit eine Forschungsdaten-Policy (Entwurf liegt vor und ist in der Endabstimmung), sodass sicher davon ausgegangen werden kann, dass die Daten auch langfristig für eine weitere Nutzung zur Verfügung stehen.

Zur Sicherstellung der Datensicherheit werden bei Fraunhofer UMSICHT verschlüsselte Speichersysteme und regelmäßige Backups genutzt. Der Datenschutz wird durch die Einhaltung der EU-Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) und institutioneller Datenschutzrichtlinien gewährleistet. Rechtliche Aspekte wie Urheberrechte und Nutzungslizenzen werden ebenfalls berücksichtigt. Das Forschungsdatenmanagement (FDM) orientiert sich an den FDM-Richtlinien der antragstellenden Institution sowie an nationalen FDM-Standards. Es werden vorhandene FDM-Infrastrukturen der Institution genutzt, darunter Repositorien, Datenmanagementpläne und Schulungsangebote

4. Erkenntnisse von Dritten

Aktuelle Veröffentlichungen (aus den Jahren 2025 und 2026)

Bakkaloglu 2025: Bakkaloglu, S. (2025): Quantifying Methane Emissions in European Biogas Systems: A Comparative Supply Chain Analysis. Study commissioned by Deutsche Umwelthilfe, European Environmental Bureau, Zero Waste Europe

Lacasse 2026: Lacasse, A.-A.; Hung, C.-Y.; Smith, W.; Yanni, S.; Liang, C.; MacDonald, D.; VanderZaag, A. (2026). Review of research on methane and nitrous oxide emissions from manure storage across Canada from 1990 to 2023. *Canadian Journal of Animal Science*, 106, 1–15. <https://doi.org/10.1139/cjas-2025-0055>

Stöckler 2025: Stöckler, A. H.; Kamp, J. N.; Feilberg, A.; Dalby, F.; Hafner, S. D.; Pedersen, J. (2025). Greenhouse gas emissions from storage of untreated pig slurry, digestate and the corresponding liquid fractions after solid-liquid separation. *Journal of Environmental Management*, 390, 126333. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126333>

Wechselberger 2025: Wechselberger, V.; Hrad, M.; Bühler, M.; Kupper, T.; Spangl, B.; Fredenslund, A. M.; Huber-Humer, M.; Scheutz, C. (2025). Assessment of whole-site methane emissions from anaerobic digestion plants: Towards establishing emission factors for various plant configurations. *Waste Management*, 191, 253–263. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.11.021>

5. Veröffentlichungen

Poster und Abstract auf dem 14. WISSENSCHAFTSKONGRESS Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft am 13. und 14. März 2025 an der Universität Kassel: Walz, M., Warnecke, M., Gievers, F., Loewen, A.: Einfluss unterschiedlicher Lagerungsverfahren und Prozessparameter auf das Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärresten.

Vortrag im Rahmen des FNR Online-Seminars „Emissionsvermeidung bei der Lagerung, Aufbereitung und Ausbringung von Gärprodukten“ vom 27.3.2025: Loewen, A., Sayder, B.: Einfluss unterschiedlicher Lagerungsverfahren und Prozessparameter auf das Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen von Wirtschaftsdüngern und Gärprodukten.

ANHANG I

Teilvorhaben 1: (Methan-Emissionen bei Lagerung von Wirtschaftsdüngern)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Im Rahmen des Teilvorhabens 1 sollen Beprobungen von Güllelagern und Biogasanlagen im Raum Nordrhein-Westfalen und weiteren anliegenden Bundesländern sowie eine umfassende chemisch-analytische Charakterisierung der Proben durchgeführt werden. Auf Basis der Ergebnisse zu Methanbildungspotenzialen und Lagerungsemissionen wird der Einfluss von verschiedenen Lagersystemen und Lagerbedingungen wie Verweilzeit und Temperatur auf die Emission von Treibhausgasen bei Wirtschaftsdüngern bewertet.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Organisation

Die Organisation des Vorhabens wurde vom Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen koordiniert. Es fand ein regelmäßiger Austausch zwischen den Projektpartnern und mit dem Projektträger statt. Etwa alle zwei Wochen fand eine Abstimmung online via MS Teams statt. Die Dateiablage wurde über das Cloud-System der HAWK organisiert. Über die Besprechungen wurde ein gemeinsames fortlaufendes Protokoll geführt und für alle verfügbar in der HAWK-Cloud abgelegt.

Arbeitspaket 2: Festlegung von Kriterien zur Auswahl von Wirtschaftsdünger- und Gärrestlagern und Erarbeitung eines Prozedere für die Beprobung

Die Kriterien wurden gemeinsam mit der HAWK festgelegt und ein entsprechendes Prozedere wurde erarbeitet. Es wurden Fragebögen und Probenahmeprotokolle erarbeitet, die von den Projektpartnern bei den Probenahmen genutzt wurden. Die Kriterien sind in Tabelle A1 dargestellt.

Tabelle A1: Kriterien für die Beprobungen

Kriterium				
Tierart	Rind (Jungbullen)	Rind (Milchvieh)	Schwein (Aufzucht)	Schwein (Mast)
Haltungsform	Spaltboden	Tretmist	regelmäßige Entmistung	sonstiges
Substratart	Gülle	Jauche	Festmist	Gärrest
Größe der BGA [kW]	< 150	< 500	< 1000	
Lagerform Wirtschaftsdünger	Lager offen	unter Spaltboden	Misthaufen	Lager abgedeckt
Lagerform Gärrest	offen	abgedeckt	gasdicht abgedeckt	
Probenahmezeitpunkt	Sommer	Frühling	Herbst	Winter

Arbeitspaket 3: Gemeinsame Beprobung einer Anlage durch Fraunhofer UMSICHT und HAWK und Durchführung von Gärtests

Die gemeinsame Beprobung wurde am 13.07.2022 durchgeführt und am 07.02.2023 wiederholt. Zudem wurde ein Laborvergleich mit Cellulose und Proben aus dem KTBL/VDLUFA-Ringversuch durchgeführt.

Arbeitspaket 4: Beprobung von Anlagen und Anlagencharakterisierung in Nordrhein-Westfalen und angrenzenden Bundesländern

Es wurden insgesamt 16 Probenahmen an fünf unterschiedlichen Biogasanlagen und einem Güllelager durchgeführt. Dabei wurden zwei Anlagen zweifach, zwei Anlagen dreifach und jeweils eine Anlage vierfach bzw. fünffach beprobt. Zusätzlich wurde Rindergülle von einer Anlage und Schweinegülle aus dem Lager bei UMSICHT bei Raumtemperatur gelagert und beprobt. Von UMSICHT wurden immer Gülle bzw. die pumpfähige Mischung der Eingangssubstrate (Anmaische) und Gärrest beprobt und untersucht.

Weiterhin wurden an zwei unterschiedlichen Güllelagern Systeme zur kontinuierlichen Temperaturmessung installiert. Es wurde in beiden Lagern jeweils die Temperatur der Gülle und die Außentemperatur gemessen.

Arbeitspaket 5: Durchführung von Gärtests zur Bestimmung von Methanbildungspotenzial und Lagerungsemission

Die im Rahmen von AP 4 genommenen Proben wurden auf folgende Parameter untersucht:

- Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS)
- Gasbildungspotenzial bei 37 °C (BP: Biogasbildungspotenzial, BP(CH₄): Methanbildungspotenzial)
- Lagerungsemissionen bei 20 °C (LE: Biogas-Lagerungsemissionen, LE(CH₄): Methan-Lagerungsemissionen)
- Ammonium-Stickstoff (NH₄-N), pH-Wert
- Makronährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium)
- Organische Säuren (Essigsäure, Propionsäure, iso-Buttersäure, Buttersäure, iso-Valeriansäure und Valeriansäure)

Arbeitspaket 6: Bewertung des Einflusses von Lagersystemen und Betriebsbedingungen auf die Methanbildung

Im Rahmen von Arbeitspaket 6 wurde der Einfluss unterschiedlicher Lagersysteme und Lagerungsbedingungen sowie der Einfluss der Vergärung in Biogasanlagen auf die Methanemissionen von Wirtschaftsdüngern untersucht und bewertet. Grundlage der Bewertung bildeten die in Arbeitspaket 5 erhobenen Daten zu Methanbildungspotenzialen (BP(CH₄)) und Lagerungsemissionen (LE(CH₄)) sowie die umfangreiche Charakterisierung der beprobten Lagerungssysteme mittels Laboranalysen und standardisierter Fragebögen.

Arbeitspaket 11: Erarbeitung von technischen und ökonomischen Empfehlungen

Basierend auf den Projektergebnissen wurden unterschiedliche Maßnahmen zur Emissionsminderung abgeleitet.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Temperatur ist ein dominierender Einflussfaktor: Die Methanemissionen steigen mit höherer Lagerungstemperatur signifikant an. Bei Wintertemperaturen (< 10 °C) sind die Emissionen deutlich niedriger als bei Sommertemperaturen (> 18 °C).

Das Güllealter beeinflusst die Emissionsdynamik: Frische Gülle zeigen verzögerte Methanbildung, während vorgealterte Gülle durch bereits etablierte methanogene Gemeinschaften schneller und intensiver emittieren.

Gasdichte Gärrestlagerabdeckung ist wirksam: Die Erfassung und Verwertung des Restgases eliminiert die direkten Emissionen aus der Gärrestlagerung.

Die ermittelten MCF-Werte sind konsistent mit der Literatur: Die Projektergebnisse bestätigen die IPCC-Spannen, zeigen aber auch die Notwendigkeit differenzierter Emissionsfaktoren.

Die Ergebnisse unterstützen die Aktualisierung von Emissionsinventaren: Die differenzierten MCF-Werte für Gärreste ermöglichen eine präzisere Abbildung der tatsächlichen Emissionen in nationalen Inventaren.

Teilvorhaben 2: Einfluss der Vergärung und ökobilanzielle Bewertung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens ist die Untersuchung und Bewertung des Einflusses einer Vergärung auf die Emission von Treibhausgasen bei Wirtschaftsdüngern. Dazu werden Gülle- und Gärrestlager von Biogasanlagen vorwiegend im Raum Niedersachsen beprobt und die Proben chemisch-analytisch charakterisiert. Mit den Gülle- und Gärrestproben werden Gärtests zur Erfassung von Methanbildungspotenzial und Lagerungsemissionen durchgeführt. Zusätzlich wird der Substratmix der Biogasanlagen hinsichtlich des Methanbildungspotenzials untersucht.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Festlegung von Kriterien zur Auswahl von Wirtschaftsdünger- und Gärrestlagern und Erarbeitung eines Prozedere für die Beprobung

Die Kriterien wurden gemeinsam mit UMSICHT festgelegt und ein entsprechendes Prozedere wurde erarbeitet. Es wurden Fragebögen und Probenahmeprotokolle erarbeitet, die von den Projektpartnern bei den Probenahmen genutzt wurden. Die Kriterien sind in Tabelle A1 dargestellt.

Tabelle A1: Kriterien für die Beprobungen

Kriterium				
Tierart	Rind (Jungbullen)	Rind (Milchvieh)	Schwein (Aufzucht)	Schwein (Mast)
Haltungsform	Spaltboden	Tretmist	regelmäßige Entmistung	sonstiges
Substratart	Gülle	Jauche	Festmist	Gärrest
Größe der BGA [kW]	< 150	< 500	< 1000	
Lagerform Wirtschaftsdünger	Lager offen	unter Spaltboden	Misthaufen	Lager abgedeckt
Lagerform Gärrest	offen	abgedeckt	gasdicht abgedeckt	
Probenahmezeitpunkt	Sommer	Frühling	Herbst	Winter

Arbeitspaket 3: Gemeinsame Beprobung einer Anlage durch Fraunhofer UMSICHT und HAWK und Durchführung von Gärtests

Die gemeinsame Beprobung wurde am 13.07.2022 durchgeführt und am 07.02.2023 wiederholt. Zudem wurde ein Laborvergleich mit Cellulose und Proben aus dem KTBL/VDLUFA-Ringversuch durchgeführt.

Arbeitspaket 7: Beprobung von Anlagen und Anlagencharakterisierung in Niedersachsen und angrenzenden Bundesländern

Von der HAWK wurden insgesamt 11 Probenahmen auf vier unterschiedlichen Tierhaltungsbetrieben mit Biogasanlage durchgeführt. Von der HAWK wurden teilweise zusätzlich zu den Gülle- und Gärresten auch weitere Eingangssubstrate wie Zuckerrübe, Maissilage, Hähnchenmist, Putenmist und Rinder-/Pferdemist beprobt. Zusätzlich fanden teilweise Beprobungen von Gülle- und Misten an unterschiedlichen Probenahmestellen (Stall, Vorgrube, Lager) zu unterschiedlichen Zeitpunkten (frisch/gelagert) statt.

Arbeitspaket 8: Durchführung von Gärtests zur Bestimmung von Methanbildungspotenzial und Lagerungsemission

Die im Rahmen von AP 7 genommenen Proben wurden auf folgende Parameter untersucht:

- Trockensubstanz (TS), organische Trockensubstanz (oTS)
- Gasbildungspotenzial bei 37 °C (BP: Biogasbildungspotenzial, BP(CH₄): Methanbildungspotenzial)
- Lagerungsemissionen bei 20 °C (LE: Biogas-Lagerungsemissionen, LE(CH₄): Methan-Lagerungsemissionen)
- Ammonium-Stickstoff (NH₄-N), pH-Wert, FOS/TAC-Wert
- Makronährstoffe (Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium)
- Organische Säuren (Essigsäure, Propionsäure, iso-Buttersäure, Buttersäure, iso-Valeriansäure und Valeriansäure)

Arbeitspaket 9: Bewertung des Einflusses der Vergärung in einer Biogasanlage auf die Methan-Emission bei Wirtschaftsdüngern

Im Rahmen von Arbeitspaket 9 wird der Einfluss der Vergärung in Biogasanlagen auf die Methanemissionen von Wirtschaftsdüngern untersucht und bewertet. Grundlage der Bewertung bilden die in Arbeitspaket 8 erhobenen Daten zu Methanbildungspotenzialen (BP(CH₄)) und Lagerungsemissionen (LE(CH₄)) sowie die umfangreiche Charakterisierung der beprobten Lagerungssysteme mittels Laboranalysen und standardisierter Fragebögen.

Arbeitspaket 10: Ökobilanzielle Einordnung der ermittelten Emissionskennwerte innerhalb des Gesamtsystems der Biogaserzeugung

Die ökobilanzielle Bewertung der untersuchten Lagerungsformen und deren Treibhausgasemissionen beider Teilprojekte bildet die Grundlage zum einen für die Erstellung von Handlungsempfehlungen zum emissionsarmen Umgang mit Wirtschaftsdüngern und Gärresten und zum anderen für die Aktualisierung des nationalen Treibhausgasinventars.

Arbeitspaket 11: Erarbeitung von technischen und ökonomischen Empfehlungen

Basierend auf den Projektergebnissen wurden unterschiedliche Maßnahmen zur Emissionsminderung abgeleitet.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die Vergärung reduziert die Methanemissionen erheblich: Im Vergleich zur Direktausbringung können durch die Vergärung 70–95 % der Lagerungsemissionen vermieden werden. (siehe Ökobilanzielle Einordnung, Arbeitspaket 10)

Das Güllealter beeinflusst die Emissionsdynamik: Frische Gülle zeigen verzögerte Methanbildung, während vorgealterte Gülle durch bereits etablierte methanogene Gemeinschaften schneller und intensiver emittieren.

Die Anlagenkonfiguration beeinflusst die Effizienz: Mehrstufige Anlagen (Hauptfermenter und Nachgärer) und Anlagen mit hohen Verweilzeiten (> 80 Tage) erreichen Effizienzen von 85–95 % bei der Ausnutzung des Methanpotenzials.

Die ermittelten MCF-Werte sind konsistent mit der Literatur: Die Projektergebnisse bestätigen die IPCC-Spannen, zeigen aber auch die Notwendigkeit differenzierter Emissionsfaktoren.

Optimierungspotenzial bzgl. Verweilzeiten: Kurze Verweilzeiten führen zu hohen relativen Restgaspotenzialen. Eine Verlängerung der Verweilzeit und/oder eine mehrstufige Prozessführung kann die Effizienz deutlich verbessern.

Die Ergebnisse unterstützen die Aktualisierung von Emissionsinventaren: Die differenzierten MCF-Werte für Gärreste ermöglichen eine präzisere Abbildung der tatsächlichen Emissionen in nationalen Inventaren.

ANHANG II

Fragebogen

Fragebogen Biogasanlage Gäremissionen



Biogasanlage: _____ Datum: _____

Ansprechpartner: _____ erfasst durch: _____

Tierhaltung Art	Anzahl	Fütterung

Biogasanlage	Bezeichnung Behälter		
Substrate	Fermenter 1	Fermenter 2	Nachgärer
Maissilage			
Grassilage			
GPS			
Zuckerrübe			
Gülle			
Mist (R/S)			
Parameter	Fermenter 1	Fermenter 2	Nachgärer
Behältergröße [m ³]			
Raumbelastung [kg _{OMS} /m ³ *d]			
Verweilzeit [Tage]			
Tägl. Biogasbildung [m ³ /L]			
Tägl. Methanbildung [m ³ /L]			
Erzeugte Strommenge [kWh]			
Inst. el. Leistung [kW]			
Sonstige Nutzung Biogas (Abwärme, Aufbereitung)			

Weitere Bemerkungen/Beobachtungen (wie z.B. Prozessstörungen, Auffälligkeiten, geänderte Fütterung usw.). Falls die Fermentertechnik von einem vollaufmischten kontinuierlich gerührten Fermenter abweicht, bitte auch hier vermerken.

Lagerung Gülle/Gärreste	Lager Bezeichnung				Vorgrube	Jauchegrube
	Güllelager 1	Güllelager 2	GRL 1	GRL 2		
Größe des Lagers [m³]						
Ort						
Füllstand bei Probennahme (Einheit)						
Oberfläche						
Zulaufmenge [m³] pro Monat od. Jahr						
Befüllung (Fass, Rohre, etc.)						
Vollständige Entleerungen pro Jahr						
Zulaufmenge Sickersaft [m³] pro Monat od. Jahr						
Zulaufmenge Regenwasser [m³] pro Monat od. Jahr						
Rührwerk vorhanden?						
Rührintervall						
Art der Lagerung						
offen (ohne natürliche Schwimmdecke)						
gasdichte Abdeckung						
natürliche Schwimmdecke						
schwimmende Abdeckung (Strohhäcksel)						
schwimmende Abdeckung (Folie)						
Lager unter Spaltboden > 1 Monat						
Lager unter Spaltboden < 1 Monat						
sonstige						

Weitere Bemerkungen / Beobachtungen

Lagerung feste Wirtschaftsdünger	Menge	Bemerkung
----------------------------------	-------	-----------

M.Eng. Meike Walz, HAWK, Fachgebiet NEUTec, Rudolf-Diesel-Str. 12, 37075 Göttingen, meike.walz@hawk.de, 0551/5032-270Dr.-Ing. Lukas Rüller, Fraunhofer UMSICHT, Osterfelder Str.3, 46047 Oberhausen, lukas.rueller@umsicht.fraunhofer.de,

0208/8598-1553

Festmist/Misthaufen (Anbindehaltung, Laufstall mit regelmäßiger Entmistung)		
Festmist/Misthaufen (Tiefstreu, Tretmist mit einmaliger Entmistung nach Umtrieb)		
Sonstige		

Weitere Bemerkungen /Beobachtungen

Probenahmeprotokoll Gäremissionen

Kontakt Daten

Ansprechpartner:	Probennehmer:
Anschrift Biogasanlage:	Anlagenkategorie nach Kriterien:
Telefon-Nr.: Email:	Welche Proben wurden genommen:

Probenbezeichnung (bitte beim Ausfüllen folgende Abkürzungen verwenden):

Fermenter	Nachgärer	Gärrestlager	Schweine/ Rindergülle	Schweine/ Rindermist	Gärrest	
FM	NG	GRL	SG/RG	SMi/RMi	GR	

Probenahmestelle:		Probenbezeichnung:
Uhrzeit:	Luft-Temp.: °C	Wetter:
Gesamt volumen, Form der Lagerung		
Lagerungsdauer, Füllstand		
Probenahmestelle (oben / unten / mitte)		
Beschreibung / Homogenität / Geruch / Foto		
Probenahmegerät, -verfahren		
Anzahl und Volumen der Einzelproben / Sammelprobe		
Volumen der endgültigen Probe		
Kühlung / Transportzeit		
Gasbeutel an einer Probe während der Fahrt?		
Bemerkungen		

Messungen Probe (vor Ort)	
Temperatur:	pH-Wert: