

Gasdichte Lagerung von Rinder- und Schweinegülle

Eine Maßnahme zur Minderung und Vermeidung von klimarelevanten Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung

Sonderveröffentlichung



Gasdichte Lagerung von Rinder- und Schweinegülle

Eine Maßnahme zur Minderung und Vermeidung
von klimarelevanten Emissionen aus der
Wirtschaftsdüngerlagerung

Gerd Reinhold | Ursula Roth | Sebastian Wulf | Matthias Hahm | Ansgar Lasar |
Arnold Niehage | Hans Oechsner | Carsten Tietjen

Herausgeber
Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) | Darmstadt

Fachliche Begleitung

KTBL–Arbeitsgruppe „Gasdichte Güllelagerung“

Matthias Hahm | Ansgar Lasar | Arnold Niehage | Dr. Hans Oechsner | Dr.-Ing. Gerd Reinhold | Ursula Roth | Carsten Tietjen | Dr. Sebastian Wulf

Bitte zitieren Sie dieses Dokument bzw. Teile daraus wie folgt: KTBL (2021): Gasdichte Lagerung von Rinder- und Schweinegülle. Eine Maßnahme zur Minderung und Vermeidung von klimarelevanten Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). In: www.ktbl.de

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Text das generische Maskulinum verwendet.

© KTBL 2021

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
Bartningstraße 49 | 64289 Darmstadt
Telefon +49 6151 7001-0 | E-Mail ktbl@ktbl.de
vertrieb@ktbl.de | Telefon Vertrieb +49 6151 7001-189
www.ktbl.de

Herausgegeben mit Förderung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Titelfoto

© KTBL | Andreas Hackeschmidt

Inhalt

1	Einleitung.	5
2	Methanbildungsprozess und Gasanfallsmengen bei der Lagerung von Gülle	5
2.1	Methanbildung bei der Güllelagerung im landwirtschaftlichen Emissionsinventar.	5
2.2	Einfluss der Temperatur.	7
2.3	Dynamik der Methanbildung während der Güllelagerung	10
3	Sicherheitsaspekte	11
4	Gasdichte Abdeckungen und Gasspeicherung	13
4.1	Doppelmembranhauben.	13
4.2	Schwimmende Membranabdeckungen (Schwimmfolien)	15
5	Gasbehandlung.	17
5.1	Gasfackeln.	17
5.2	Regenerative thermische Oxidation (RTO-Anlagen).	19
5.3	Biofilter.	21
6	Genehmigungsrechtliche Bewertung	21
7	Kosten	22
8	Güllevergärung als Alternativen zur gasdichten Güllelagerung	25
9	Zusammenfassung	26
	Literatur.	28
	Autoren	29

1 Einleitung

Als mögliche Maßnahme zur Minderung der Methanemissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung nennt das Klimaschutzprogramm 2030 (Bundesregierung 2019) neben der Biogaserzeugung die gasdichte Lagerung von Gülle mit Behandlung des entstehenden Gases. Bisher liegen jedoch keine praktischen Erfahrungen vor. Die technische Machbarkeit und praktische Umsetzung müssen noch geprüft werden.

Das KTBL hat im November 2019 die Arbeitsgruppe „Gasdichte Güllelagerung“ ins Leben gerufen, die sich der Fragen zur technischen Machbarkeit, zur Anlagensicherheit und zu genehmigungsrechtlichen Aspekten angenommen hat. Im vorliegenden Papier werden die Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt.

Als Grundlage der Betrachtung schätzen die Mitglieder der Arbeitsgruppe ab, wie hoch die Methanbildung bei der Lagerung von Rinder- und Schweinegülle ist und welchen Einfluss Temperatur sowie praxisübliche Betriebsbedingungen auf die Gasmenge und Gasqualität haben. Darauf aufbauend werden mögliche technische Minderungsstrategien betrachtet und beurteilt. Abschließend beschreiben die Autoren, welche Verfahren und Lösungen für eine gasdichte Lagerung und Behandlung des entstehenden Gases verfügbar sind und welcher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Bei der Analyse werden sicherheitstechnische und rechtliche Bedingungen sowie die Anwendbarkeit auf verschiedene Behältertypen berücksichtigt.

2 Methanbildungsprozess und Gasanfallsmengen bei der Lagerung von Gülle

2.1 Methanbildung bei der Güllelagerung im landwirtschaftlichen Emissionsinventar

Bei der Güllelagerung kommt es zu anaeroben Umsetzungsprozessen unter Bildung von CO_2 (Kohlendioxid) und CH_4 (Methan) aus dem Abbau organischer Trockenmasse. Darüber hinaus kann sich z. B. in trockenen Schwimmschichten Lachgas (N_2O) bilden. Die Emission von Ammoniak (NH_3) erfolgt an der Grenzschicht zwischen Luft und Gülle. Durch eine Schwimmschicht und eine Reduzierung des Luftaustausches über dieser Grenzschicht kann die Ammoniakemission vermindert werden.

Im landwirtschaftlichen Emissionsinventar wird von einer mittleren Methanfreisetzung bei der offenen Güllelagerung ausgegangen, die bei Schweinegülle 25 % (ohne Schwimmschicht) und bei Rindergülle 10 % (mit Schwimmschicht) des Methanbildungspotenzials beträgt. Grund für die deutlich geringere Methanbildung bei Rindergülle ist u. a. die Annahme, dass in der natürlichen Schwimmschicht eine Methanoxidation stattfindet. Daraus ergibt sich rechnerisch eine Methanemission von $3,60 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ je m^3 Schweinegülle bzw. $1,84 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ je m^3 Rindergülle (Tab. 1).

Tab. 1: Methanbildung bei der offenen Lagerung von Wirtschaftsdünger auf Basis der Annahmen im landwirtschaftlichen Emissionsinventar (Haenel et al. 2020)

	Einheit	Rindergülle	Schweinegülle
TM-Gehalt	% FM	10	6
oTM-Gehalt	% TM	80	80
Methanbildungspotenzial	$I_N \text{ CH}_4/\text{kg oTM}$	230	300
Methanumwandlungsfaktor (MCF in % des Potenzials)			
ohne Schwimmschicht	%	(17) ¹⁾	25
natürliche Schwimmschicht	%	10	(15) ¹⁾
Methanbildung im Güllelager			
ohne Schwimmschicht	$\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3 \text{ Gülle}$	(3,13) ¹⁾	3,60
natürliche Schwimmschicht	$\text{m}^3 \text{ CH}_4/\text{m}^3 \text{ Gülle}$	1,84	(2,12) ¹⁾

TM = Trockenmasse FM = Frischmasse oTM = organische Trockenmasse MCF = methane conversion factor

¹⁾ Werte in Klammern stehen für die in der Praxis eher unübliche Situation Rindergülle ohne Schwimmschicht und Schweinegülle mit Schwimmschicht.

Unter der Voraussetzung, dass verfahrens- und sicherheitstechnisch tragfähige Lösungen gefunden werden, die auch ökonomisch vertretbar sind, könnte durch eine gasdichte Lagerung und Behandlung des gesammelten Gases ein Teil dieser Emissionen vermieden werden. Zusätzlich ergeben sich Synergien hinsichtlich der Minderung von Geruchs-, NH_3 - und N_2O -Emissionen.

Die tatsächliche Höhe der Methanemissionen aus der Wirtschaftsdüngerlagerung wird stark durch Lagertemperatur und Lagerdauer bestimmt. Es existieren nur wenige Studien zur Abhängigkeit der Methanbildung von der Temperatur, insbesondere ohne Animpfung – also dem Zusatz aktiver methanbildender Bakterien – bzw. zum Jahresgang der Temperatur in Güllebehältern. Vor allem fehlen gezielte Untersuchungen zum Einfluss der Lagerungstemperatur und der sich daraus ergebenden Gasbildung unter Labor- und Praxisbedingungen. Die derzeit im Emissionsinventar verwendeten Emissionsfaktoren basieren teilweise auf einer geringen Datenbasis aus den 80er- und 90er-Jahren. Seither wurde die Messtechnik deutlich verbessert. Ergebnisse aus neueren Labortests im Batchverfahren weisen oft auf eine geringere Biogas- oder Methanbildung aus Güllen als im Inventar angenommen hin. Auf diesen Labortests basieren die KTBL-Richtwerte für die Gasausbeute in Biogasanlagen (KTBL 2015), die für Rindergülle von $210 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg oTM}$ und für Schweinegülle von $250 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg oTM}$ ausgehen. Weiterhin hat sich aufgrund der Anforderungen der Düngeverordnung der Hauptlagerzeitraum von Gülle in die kühlen Wintermonate verlagert.

2.2 Einfluss der Temperatur

Die Geschwindigkeit biologischer Umsetzungsprozesse wird stark von der Temperatur beeinflusst. Dies gilt auch für die gasförmigen Emissionen bei der Lagerung von Gülle infolge der Umsetzung von organischen Bestandteilen. So ist mit einer deutlich geringeren Gasbildung zu rechnen als bei der kontrollierten Biogaszeugung. Biogasanlagen werden in der Regel beheizt und durchmischt, um optimale Abbaubedingungen zu erreichen.

Derzeit sind nur wenige Messungen zur Gülleteperatur während der Lagerung unter Praxisbedingungen bekannt (Abb. 1). Die verfügbaren Messungen zeigen, dass die gelagerte Gülle im Sommer eine Temperatur von etwa 18 °C aufweist und im Winter Temperaturen zwischen 5 und 10 °C.

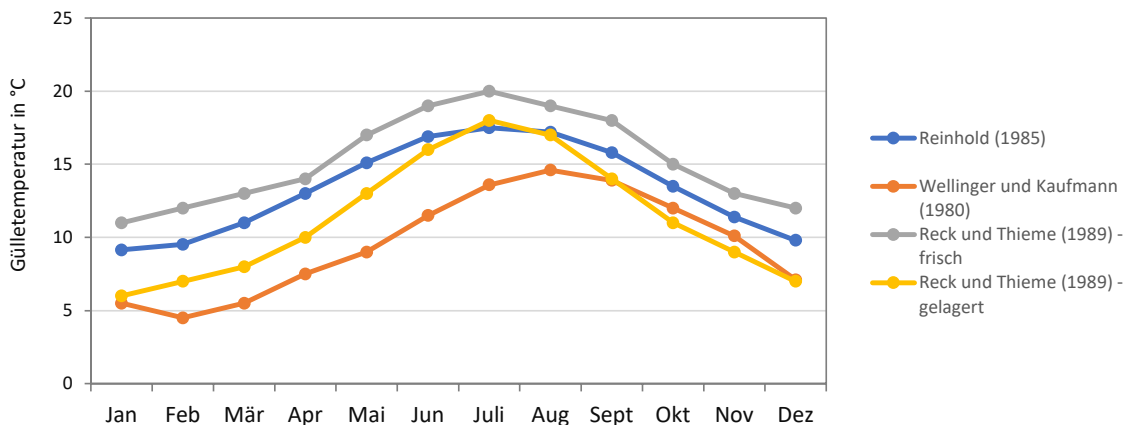


Abb. 1: Lagerungstemperaturen von Gülle (Reinhold 1985, Reck und Thieme 1989, Wellinger und Kaufmann 1980).

In einer Untersuchung von Bäger und Hesse (2020) zur Temperaturabhängigkeit erfolgte die Messung der Gasbildung von einem Gärrest (GR), zwei Rindergüllen (RG) und 3 Schweinegüllen (SG) bei 10 °C (Bedingungen ähnlich Winterlagerung), bei 20 °C (Bedingungen ähnlich Sommerlagerung) und bei 25 °C (extreme Lagertemperatur zur Ermittlung des Trends). Der Versuch wurde in 1-l-Flaschen ohne zusätzliches Inokulum – also ohne Zugabe aktiver methanbildender Bakterien – durchgeführt. Der Gärrest stammt aus einer Biogasanlage mit 72 % Rindergülle im Substratinput, die im mesophilen Bereich, bei einer Raumbelastung von 2,1 kg/m³·d und 66 Tagen Verweilzeit betrieben wird.

Die gemessenen Methangehalte bei 20 °C und 25 °C lagen zwischen 50 und 55 %, sodass bei der Gasbildung in gasdicht abgedeckten Güllebehältern von Biogasqualität ausgegangen werden kann. Für die Varianten bei 10 °C und alle Gärrestvarianten konnte aufgrund der geringen Gasbildung und des Kopfraumvolumens der Methangehalt nicht bestimmt werden.

Der Versuch zeigte einen deutlichen Temperatureinfluss der Gasfreisetzung (Tab. 2, Abb. 2) und bestätigte frühere Untersuchungen mit einem temperaturabhängigen Trockenmasseabbau (Reinhold et al. 1991). Während bei einer Temperatur von 10 °C Rindergülle und Gärrest nur eine marginale Gasbildung aufwiesen, zeigte eine Schweinegülle bereits eine Gasbildung von 4 NI/kg FM oder 80 NI/kg oTM (SG 1 in Tab. 2, Abb. 2). Dies ist fast ein Fünftel des Biogasbildungspotenzials nach KTBL-Richtwerten für Biogasanlagen (KTBL 2015). Ein paralleler Ansatz mit einer anderen Schweinegülle wies jedoch keine Gasbildung bei dieser Temperatur auf. Bei 20 °C lag die Gasbildung aller drei Schweinegülle doppelt so hoch und erreichte ein Drittel bis die Hälfte des KTBL-Richtwerts. Die Gasbildung aus Rindergülle erreichte bei dieser Temperatur lediglich 9 bis 12 % des Biogasbildungspotenzials.

Tab. 2: Kumulative Biogasbildung nach 90 Tagen Lagerzeit bei unterschiedlichen Lagerungstemperaturen (Bäger und Hesse 2020) und Vergleich mit den KTBL-Richtwerten für die Gasausbeute von Schweine- und Rindergülle (KTBL 2015).

Lagerungsvariante	Schweinegülle			Rindergülle		Gärrest
	SG1	SG2	SG3	RG1	RG2	GR
	Gasbildung bezogen auf FM in NI/kg FM					
10 °C (Winterlagerung)	4,1	0,0	- ¹⁾	0,8	0,9	0,1
20 °C (Sommerlagerung)	7,5	7,4	8,1	3,4	2,4	0,2
25 °C (extreme Lagertemperatur)	10,0	11,8	10,4	12,6	8,6	0,9
Gasbildungspotenzial nach KTBL ²⁾	22	16	24	28	26	73 ³⁾
	Gasbildung bezogen auf oTM in NI/kg oTM					
10 °C (Winterlagerung)	80,0	0,9	- ¹⁾	10,0	12,1	2,6
20 °C (Sommerlagerung)	145	215	159	42,7	32,4	4,6
25 °C (extreme Lagertemperatur)	195	345	204	159	118	21,5
	Ausnutzung des TM-korrigierten Gasbildungspotenzials in %					
10 °C (Winterlagerung)	18,7	0,2	- ¹⁾	2,8	3,4	0,2
20 °C (Sommerlagerung)	33,8	45,3	33,7	12,0	8,9	0,3
25 °C (extreme Lagertemperatur)	45,3	72,5	43,2	44,8	32,5	1,2

GR = Gärrest RG = Rindergülle SG = Schweinegülle

¹⁾ Bei 10 °C keine Messung.

²⁾ Gasbildungspotenzial nach KTBL-Richtwerten, korrigiert auf den in den Versuchen gemessenen TM-Gehalt der eingesetzten Güllen.

³⁾ Gasbildungspotenzial berechnet für die Substratmischung der Biogasanlage: 72 % Rindergülle (korrigiert auf im Tierhaltungsbetrieb gemessenen TM-Gehalt von 6,8 % FM) und 28 % Maissilage (Kennwerte nach KTBL 2015).

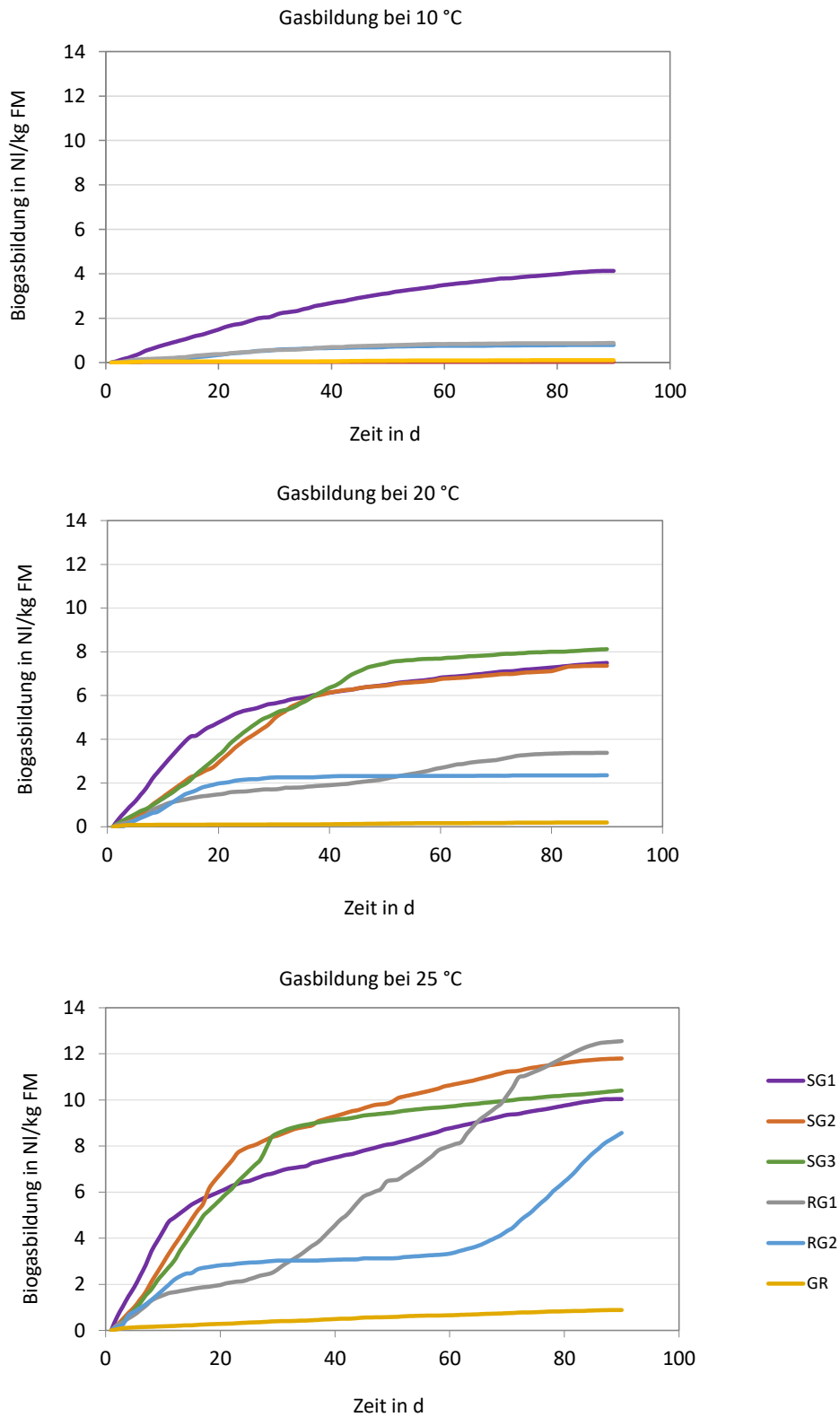


Abb. 2: Verlauf der Biogasfreisetzung (NI/kg FM) bei der Lagerung von Rindergülle (RG), Schweinegülle (SG) und Gärrest (GR) bei unterschiedlichen Lagerungstemperaturen (Bäger und Hesse 2020) – bei 10 °C keine Messung von SG3

Bei der bewusst über den durchschnittlichen praktischen Verhältnissen im Güllelager gewählten Temperatur von 25 °C erreichte eine Schweinegülle (SG2) über 70 % des Gasbildungspotenzials und die beiden anderen etwa 45 %. Rindergülle wies bei dieser hohen Temperatur eine un stetige Gasbildung auf: Nach 30 bzw. 60 Tagen war ein erneuter Anstieg der Gasfreisetzung zu beobachten. Es scheint, als ob sich bei dieser hohen Temperatur eine ausreichend große methanogene Bakterienpopulation ausbilden kann, die eine zweite Phase mit hohen Gasbildungsraten ermöglicht. Insgesamt wurden 32 bis 45 % des Biogasbildungspotenzials umgesetzt.

Der zum Vergleich gemessene Gärrest bildete in allen Temperaturstufen sehr geringe Gasmengen. Dies zeigt, dass auch bei der hier gewählten kurzen Verweilzeit von 60 Tagen in einer Biogasanlage die vergorene Gülle eine deutlich geringere Gasbildung im Vergleich zu unvergorener Gülle aufweist.

Für Rindergülle ergeben die Untersuchungen bei Mittelung der Gasbildung bei 10 und 20 °C eine Freisetzung von 5 bis 7 % des Gasbildungspotenzials und für Schweinegülle von 15 bis 30 %. Neben diesen Laborergebnissen wären ergänzende Praxisversuche zum Verlauf der Methanemissionen im Jahresgang sinnvoll. Diese könnten auch zur Verifizierung der Annahmen im Emissionsinventar genutzt werden.

Zusätzlich zum Einfluss der Temperatur auf die mikrobiellen Prozesse ist auch das Lagermanagement für die Gasbildung bedeutend. Den höchsten Füllstand haben Güllelager in den kühlen Wintermonaten, in denen von geringen Emissionen ausgegangen werden kann. Nach der Leerung für die Frühjahrsdüngung wird der Lagerbehälter sukzessive wieder befüllt. Die höheren Methanbildungsraten während des Frühjahrs und des Sommers kommen also nur für einen geringeren Teil des Gülleanfalls zum Tragen.

2.3 Dynamik der Methanbildung während der Güllelagerung

Die Außenlagerung von Gülle erfolgt oft in runden Hochbehältern, die auch ganz oder teilweise ins Erdreich abgesenkt sein können. Seltener sind rechteckige Hochbehälter zu finden. Teilweise wird Gülle auch in Lagunen gelagert mit in der Regel geneigten Wänden. Lagunen haben im Vergleich zu Hochbehältern meist ein wesentlich größeres Volumen.

Ausgehend von den Anforderungen der Düngeverordnung werden Güllebehälter im Frühjahr einmalig vollständig entleert und dann, abgesehen von kleineren Entnahmen, im Herbst zu Beginn der Sperrzeit kontinuierlich wieder mit Gülle über den Lagerzeitraum von 180 Tagen befüllt.

Für die folgende beispielhafte Berechnung der Gasbildung in einem Behälter (5.000 m³ Rundbehälter, Durchmesser 34 m, Höhe 6 m) wird angenommen, dass dieser kontinuierlich über 180 Tage mit Rindergülle (10 % TM) bzw. Schweinegülle (6 % TM) befüllt wird. Dies entspricht dem Gülleanfall von etwa 300 GV oder 5.000 Mastschweinen. Es wird unterstellt, dass die Methanbildungsraten während einer Lagerdauer von 180 Tagen konstant sind und den in den Emissionsinventaren angenommenen Mengen entsprechen (siehe Tab. 1).

Der Volumenstrom des Gasgemisches steigt von 0 m³/h zu Beginn auf maximal 3,9 m³/h zum Ende der Lagerdauer für Rindergülle und auf maximal 7,6 m³/h für Schweinegülle. Dies entspricht 2,1 m³/h Methan bzw. einer Feuerungswärmeleistung von 21 kW für Rindergülle und 4,2 m³/h Methan bzw. 42 kW für Schweinegülle (Abb. 3). Auf Grundlage der berechneten Gasbildungsraten werden über die Lagerzeit von 180 Tagen bei Rindergülle insgesamt 4.626 m³ und bei Schweinegülle 9.050 m³ Methan gebildet.

Der Verlauf der Gasbildung und die Aussagen zur maximalen Leistung gelten nur für den angenommenen Gülleanfall von 27,8 m²/d.

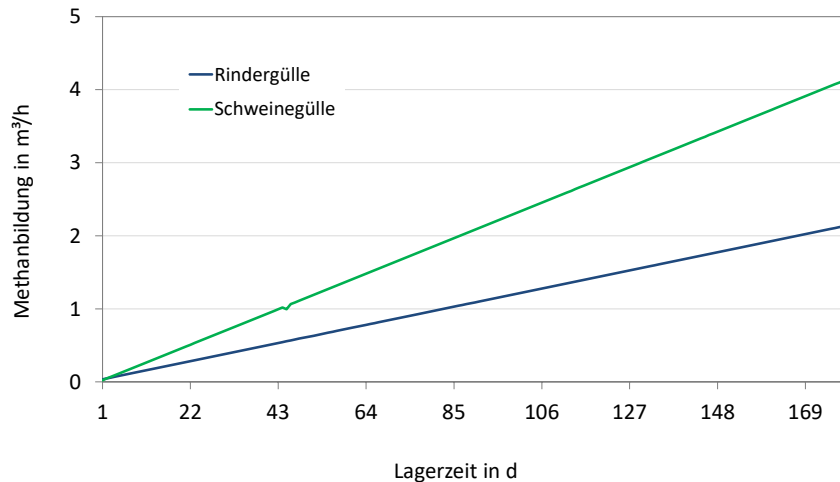


Abb. 3: Gasbildung bei der Befüllung eines Lagers mit 5.000 m³ Rinder- und Schweinegülle (Reinhold 2020). Die Berechnung erfolgt auf Basis der Emissionsinventare (Haenel et al. 2020).

Die oben dargestellten Ergebnisse und darauf basierenden Aussagen stellen lediglich eine erste Abschätzung dar und gehen für wichtige Parameter wie die tägliche Gasbildungsrate und die Temperatur im Güllebehälter von gleichbleibenden Bedingungen aus. So ist damit zu rechnen, dass im Winter aufgrund geringerer mikrobiologischer Aktivität weniger Gas gebildet wird. Da die Hauptlagerzeit in die kalten Monate fällt, kommt es in den Berechnungen ggf. zu einer Überschätzung der tatsächlichen Gasbildung. Weitere Abweichungen können sich durch die nicht lineare Gasbildung ergeben, mit in der Regel höheren Raten zu Beginn der Versuchsdauer – also im vorliegenden Fall nach Einlagerung der einzelnen Güllechargen.

Es liegen keine ausreichenden Erkenntnisse vor, um diese Aspekte in den Berechnungen zu berücksichtigen. Auch lassen sich die genannten Effekte unter Laborbedingungen nur schwer darstellen. Hierfür wären Untersuchungen an Praxisbehältern nötig.

3 Sicherheitsaspekte

Behälter mit Kopfraum

Bei einem Rundbehälter mit einer Folienhaube als gasdichte Abdeckung (Abb. 4) ist zu Beginn ein großer Teil des Volumens nicht mit Gülle, sondern mit Luft gefüllt (Kopfraumvolumen). Da zu Beginn der Lagerzeit aus der geringen Menge Gülle zunächst auch wenig Methan in dieses große Luftvolumen freigesetzt wird, ist nur ein langsames Ansteigen der Methankonzentration zu erwarten. Im weiteren Verlauf kommt es mit zunehmender Methankonzentration zur Bildung eines explosionsfähigen Gasgemisches. In Abhängigkeit von der Gasbildungsrate kann sich das Gasgemisch über mehrere Wochen im explosionsgefährdeten Bereich (4,4–16,5 % Methan in der Luft) befinden.

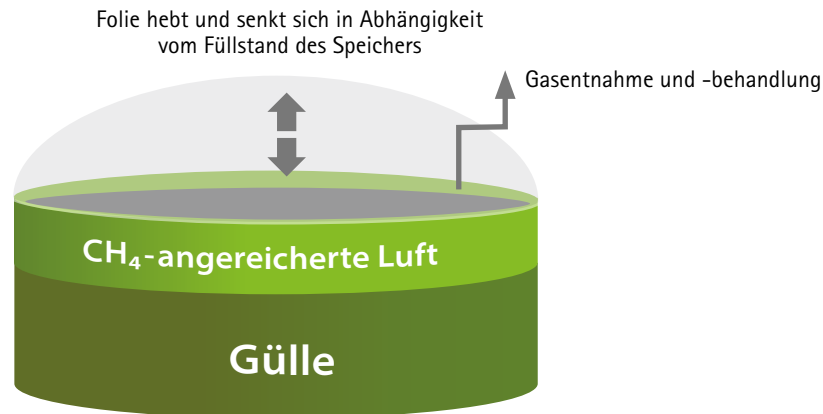


Abb. 4: Schema der gasdichten Güllelagerung im Hochbehälter mit Folienhaube

Ein explosionsfähiges Gasgemisch im Kopfraum über dem Güllespiegel bildet sich nicht nur einmalig bei der Erstbefüllung. Wird im Verlauf der Vegetationszeit oder am Ende der Lagerdauer Gülle in größeren Mengen aus dem Behälter entnommen, reicht das im Gasspeicher vorhandene Gas und die noch vorhandene Gasbildung in der Regel nicht aus, um das entnommene Volumen auszugleichen und es strömt Luft in den Behälter nach. Der Methangehalt kann in der Folge unter die obere Explosionsgrenze absinken. Je nach Füllstand im Behälter und entnommener Güllemenge kann es dann mehrere Wochen dauern, bis die Methankonzentration wieder über der oberen Explosionsgrenze liegt. Verhindert werden kann dies nur durch sehr große Gasspeicher, die aber wirtschaftlich und technisch schwer zu realisieren sind.

Wird das Gas nicht bereits bei Konzentrationen unterhalb der Explosionsgrenze aus dem Gasraum entfernt oder behandelt, sind besondere Sicherheitsvorkehrungen bezüglich Technik und Management zu treffen. So müssen innenliegende Rührwerke explosionsgesichert und stromfrei schaltbar sein, um eine Funkenquelle zu Beginn der Füllung des zuvor leeren Behälters zu vermeiden. Sobald der Behälter so weit gefüllt ist, dass die Rührwerke nicht mehr im Gasraum, sondern in der Gülle sind, ist ein Rührbetrieb nicht mehr problematisch. Es ist davon auszugehen, dass bei bestehenden Güllelagern Tauchmotorrührwerke nachgerüstet werden müssen, da das Aufrühren der Gülle bei offener Lagerung in der Regel über nicht fest installierte Stabrührwerke erfolgt.

Soll die Gasbehandlung mit einer Fackel stattfinden, so darf dieser keine explosionsfähige Atmosphäre zugeführt werden. Neben dem Methangehalt ist auch der Sauerstoffgehalt im Kopfraum zu beachten. Hier sind alternative Lösungsansätze zu einer kostenintensiven explosionsgesicherten Ausführung der Fackeln zu entwickeln und erproben.

So ist auch eine Inertisierung des Gasraums vor der Befüllung und bei jeder Entleerung denkbar, um eine Explosionsgefahr zu vermeiden. Hierbei könnte die Luft und somit der für die Explosion notwendige Sauerstoff aus dem Gasraum des Behälters verdrängt werden. Möglichkeiten zur Umsetzung müssen aber noch überprüft werden.

Güllebehälter ohne Kopfraum

Wird der Güllebehälter mit einer Abdeckung ohne Kopfraumvolumen, z. B. einer schwimmenden Membran, versehen, entsteht von Beginn an ein Gas mit einer Methankonzentration oberhalb des Explosionsbereiches. Bei Gülleentnahme sinkt die Abdeckung mit dem Güllespiegel ab, sodass auch dann keine Explosionsgefahr entsteht.

4 Gasdichte Abdeckungen und Gasspeicherung

Prinzipiell lassen sich Rundbehälter, aber auch Lagunen, mit Schwimmfolien oder mit Doppelmembranhauben abdecken. Der wesentliche Unterschied ist, dass bei den aus der Biogasanlagentechnik bekannten Doppelmembranhauben im Gegensatz zu Schwimmfolien zu Beginn der Lagerung das gesamte vorhandene Volumen als Kopfraumvolumen vorhanden und mit Luft gefüllt ist. Doppelmembranhauben sind bei Lagunen aufgrund der Windlast kaum einsetzbar.

4.1 Doppelmembranhauben

Doppelmembranhauben sind eine im Biogasbereich vielfach umgesetzte und erprobte Technik (Abb. 5). Damit steht aus technischer Sicht für Rundbehälter mit ausreichender Statik ein Verfahren für die Abdeckung und Gasspeicherung zur Verfügung. In Biogasanlagen, für die diese Hauben entwickelt wurden, sind in der Regel nur sehr geringe Schwankungen im Behälterfüllstand und hohe Gasbildungsraten vorhanden. Ihre Eignung für die gasdichte Güllelagerung ist daher zu prüfen.



Abb. 5: Fermenter einer Biogasanlage mit Doppelmembranhauben, teils mit geöffnetem Dach (© Landpixel)

Für den in Kapitel 2.3 betrachteten 5.000 m^3 Güllebehälter wurde die Entwicklung der Methankonzentration über die Lagerdauer von 180 Tagen für den Fall betrachtet, dass dieser mit einer Doppelmembranhaube mit einem Speichervolumen von 500 m^3 ausgestattet ist. Dabei wurde angenommen, dass das gebildete Gas immer dann entnommen und behandelt wird, wenn der Gasspeicher gefüllt ist.

Auf Basis dieser Annahmen befindet sich über einen Zeitraum von 34 (Rindergülle) bzw. 28 Tagen (Schweinegülle) ein explosionsfähiges Gasgemisch ($4,4\text{--}16,5 \text{ \% CH}_4$; Abb. 6) im Gasraum. Zusätzlich ist zu beachten, dass der Restsauerstoffgehalt in dieser Zeit noch über der kritischen Grenze von $11,6 \text{ \%}$ liegen dürfte (nicht modelliert). Von den hier betrachteten Gasbehandlungsverfahren könnten Fackeln ohne zusätzliche Maßnahmen in diesem Zeitraum nicht betrieben werden (Kap. 5.1).

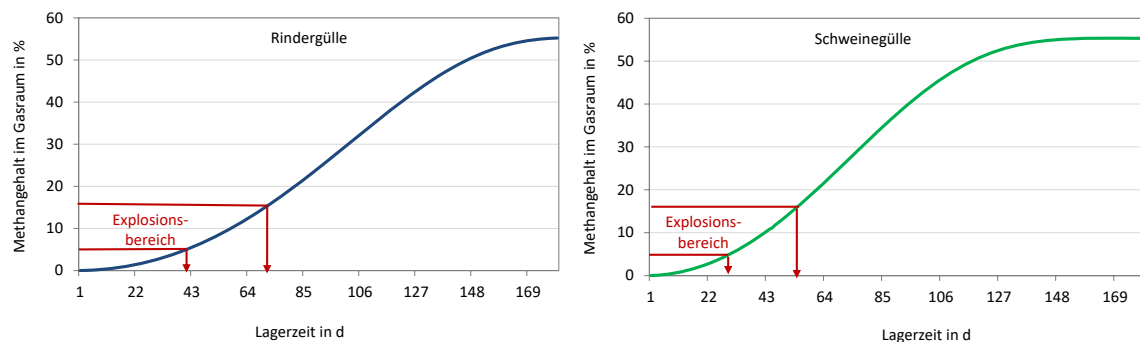


Abb. 6: Entwicklung der Methankonzentration für Rinder- und Schweinegülle bei der gasdichten Lagerung im Rundbehälter mit Doppelmembranhaube (Reinhold 2020). Zusätzlich ist der Bereich eingezeichnet, in dem das Gasgemisch explosionsfähig ist. Berechnung auf Basis der Emissionsinventare (Haenel et al. 2020).

Die obige Konzentrationskurve gilt nur für den Beispielbehälter in Verbindung mit dem Gülleanfall von $27,8 \text{ m}^3/\text{d}$ unter Beachtung der bereits in Kapitel 2.3 getroffenen Annahmen. Je nach dem Verhältnis von Behältergröße zu Güllemenge können sich unterschiedliche Verläufe der Methankonzentration ergeben. Im Winter ist aufgrund der geringeren Gasbildung der Zeitpunkt des Erreichens und die Dauer des Ex-Bereiches später zu erwarten und verlängert. Dies konnte hier jedoch nicht berücksichtigt werden.

Möglichkeiten, das Kopfraumvolumen baulich zu reduzieren, z.B. durch eine durchhängende Folie oder mastgestützte einschalige Membranen, würden die Phasen im Explosionsbereich zwar verkürzen, die ggf. wiederkehrende Problematik wird jedoch nicht gelöst. Zudem wäre hierfür ein hoher Entwicklungsaufwand notwendig. Einschalige Systeme sind für Biogasanlagen nach der Technischen Regel für Anlagensicherheit (TRAS 120) nicht mehr zulässig und werden nicht mehr als Stand der Technik betrachtet. Es ist unklar, ob dies auch auf die Güllelage zu übertragen ist.

Bei einem Neubau können Doppelmembranhauben auf Betonrundbehältern unproblematisch eingeplant und realisiert werden. Demgegenüber ist eine Nachrüstung bestehender Behälter mit einer gasdichten Abdeckung nur möglich, wenn die statischen Voraussetzungen für die Aufnahme der zusätzlich wirkenden Kräfte gegeben sind. Zur Prüfung der Statik müssen folgende Unterlagen vorhanden sein bzw. nachträglich (soweit möglich) erstellt werden:

- Standsicherheitsnachweise zum Behälter als Einzelstatik oder Typenstatik
- Bewehrungspläne
- Betonüberwachungsberichte
- Bescheinigungen zu verwendeten Beschichtungsmaterialien

Aussagen darüber, welcher Anteil des Behälterbestandes in Deutschland für eine Nachrüstung geeignet ist, sind derzeit nicht möglich. Edelstahl- und Emaillebehälter sind statisch nicht dafür ausgelegt, weitere Kräfte aus einer Abdeckung aufzunehmen. Auch für (Beton)Rechteckbecken bestehen derzeit keine erprobten Lösungen.

Für eine Nachrüstung vorhandener offener Hochbehälter mit einer gasdichten Doppelmembranhaube ist bei großem Durchmesser die Einbringung einer Mittelstütze mit dazugehörigem Fundament erforderlich. Ein Haltesystem, das ein Eintauchen der Folie in die Gülle verhindert, ist ebenfalls nachzurüsten, wie auch eine Kompressoranlage, um den Druck zwischen Wetterschutz-

und Gasfolie aufrecht zu erhalten. Die Installation von geeigneter Rührwerkstechnik und das Auskleiden der Betonbehälter nach intensiver Reinigung mit einem passiven Korrosionsschutz sind weitere zwingend notwendige Maßnahmen (Tab. 3).

Tab. 3: Zusätzliche Anforderungen an Lagerbehälter bei gasdichter Abdeckung

	Abdeckungsart	
	Doppelmembranhauben	Schwimmfolien
Innenliegende Rührwerke	X	X
Behälterbeschichtung (passiver Korrosionsschutz)	X	X
Überfüllmelder (Flüssigkeit und Gasspeicher)	X	X
Gasentnahmeleitung	X	X
Güllebefüll- und Entnahmeleitung im unteren Bereich der Behälterwand	X	X
Über- und Unterdrucksicherung	X	-
Unterdruckwächter zur Abschaltung des Gasverbrauchers	X	-
Mittelstütze	X	-
Spanngurte/Balkenlage	X	-
Ebene Behälterkrone	X	-
Statische Anforderungen an den Behälter	X	(X)
Tragluftgebläse	X	-
Erfassung und Entsorgung des Niederschlagswassers	-	X

X = erforderlich - = nicht erforderlich (X) = nur geringe Anforderungen

4.2 Schwimmende Membranabdeckungen (Schwimmfolien)

Schwimmende gasdichte Membranabdeckungen eignen sich für alle Behälterarten, auch für Lagunen und Behälter mit für eine Doppelmembranhaube nicht ausreichender Statik (z. B. Stahl oder Emaille). Im Prinzip sind auch Lösungen für Rechteckbehälter denkbar. Diese sind jedoch wenig verbreitet. Mit zunehmender Behälteroberfläche, wie sie bei Lagunen anzutreffen ist, ist die Windanfälligkeit dieser Systeme zu beachten.

Schwimmfolien auf Güllelagern ermöglichen eine Gasfassung ohne Kopfraumvolumen und erfordern nur geringere bauliche Veränderungen am Behälter (Tab. 3). Da kaum Kopfraumvolumen vorhanden ist, tritt keine Explosionsgefahr auf oder der Explosionsbereich wird sehr schnell durchfahren. Auch bei schwankendem Füllstand des Behälters entsteht keine explosive Gasmischung, da keine Luft nachströmt.

Auf die Dynamik der Gasbildung über die Lagerdauer hat diese Art der Abdeckung keinen Einfluss. Sollte die Speicherung von Gas notwendig sein, z. B. weil eine Behandlung in der Anfangsphase mit geringem Gasvolumenstrom nicht möglich ist, ist ein externer Speicher notwendig.

In Deutschland gibt es erste gasdichte Schwimmfolien in der Praxiserprobung an Gärrestlagerbehältern auf Biogasanlagen (Abb. 7). Bei diesen ist ein Anschluss an ein gasführendes System gegeben und somit keine Gasbehandlung erforderlich. Für die gasdichte Lagerung unvergorener Gülle ohne Anschluss an eine Biogasanlage besteht wesentlicher Entwicklungs- und Demonstrationsbedarf.



Abb. 7: Gasdichte Schwimmfolie mit Gasfassung in einem Gärrestlagerbehälter. Die Folie liegt auf der Gärrestoberfläche auf. (© N-E-ST, Neue Energie Steinfurt GmbH)

Mit Schwimmfolien wird allerdings anders als bei Doppelmembranhauben meist keine komplette Gasdichtheit erzielt. In der Regel besteht zwischen Behälterwand und Folie ein Spalt, sodass nicht die gesamte Oberfläche abgedeckt wird. Die verbleibende Emissionsfläche ergibt sich aus dem Verhältnis der Fläche des Spalts zur Gülleoberfläche. Die Emissionen über diesen meist rund 10 cm breiten Spalt sind für den genannten Beispielbehälter mit einem Durchmesser von 34 m mit 1,2 % der Oberfläche tolerierbar, sofern das Gas unter dem abgedeckten Teil kontinuierlich gefasst und abgeführt wird. Diese Systeme wären nach Aussage von Herstellern nur mit hohem Aufwand vollständig gasdicht ausführbar. Eine dauerhafte Gasdichtheit wäre zudem nur mit intensiver Kontrolle und Wartung zu gewährleisten.

Bedingt durch Einbauten und die notwendigen Rührwerke können Behälter mit gasdichten Schwimmfolien unter Umständen nicht vollständig entleert werden, was die Behälterkapazität um bis zu 20 % (bis 1 m Restfüllung) reduzieren kann. Um diese Einschränkung zu mindern und zu verhindern, dass die Folie auf den Rührwerken aufliegt und Schäden an der Abdeckung auftreten, könnten diese in einen Pumpensumpf abgesenkt werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, eine Serviceklappe vorzusehen, durch die ein höhenverstellbares Rührwerk eingeführt werden kann.

Beim Homogenisieren wirken starke Scherkräfte auf die Schwimmfolie, die im Extremfall zu einer Beschädigung der Folie führen können. Ob ein Anheben oder Fixiermöglichkeiten der Folie für größere Behälter zu realisieren sind, kann derzeit nicht beantwortet werden. Allerdings hätte dies höhere Anforderungen an die Statik der Behälter. Das Methan, das beim Aufrühren freigesetzt wird, könnte möglicherweise nicht zuverlässig erfasst werden. Bei Rindergülle muss gegebenenfalls weniger stark gerührt werden als ohne Abdeckung, da die Schwimmdecke durch die aufliegende Abdeckung nicht in gleichem Maße wie bei offener Lagerung austrocknet. Die bei Schweinegülle üblichen Sinkschichten müssen auf jeden Fall aufgerührt werden. Ob die Folien für die dann geringeren Scherkräfte ausgelegt sind, ist nicht bekannt.

Bei Schwimmfolien sind auch Einrichtungen zur Abführung des Regenwassers zu errichten.

5 Gasbehandlung

Bisher gibt es keine Praxiserfahrungen zur Behandlung des bei der Güllelagerung entstehenden Gases. Prinzipiell könnten Schwachgasfackeln mit und ohne Erwärmung des Luft- und Gasstromes und Anlagen zur regenerativen thermischen Oxidation (RTO) dazu eingesetzt werden. Auch eine Behandlung mit Biofiltern wird diskutiert.

5.1 Gasfackeln

Gasfackeln (Abb. 8) benötigen einen Mindestmethangehalt im zu verwertenden Gas, um ohne Stützfeuerung oder Vorwärmung arbeiten zu können. Darüber hinaus benötigen sie für ihren Betrieb ausreichende Gasmengen und erfordern somit gegebenenfalls eine Gasspeicherung. Zu Beginn der Lagerdauer reichen in der Regel die Gasbildungsraten nicht für einen kontinuierlichen autothermen – d. h. von externer Wärmezufuhr unabhängigen – Betrieb der Fackeln aus (Tab. 4). Bei Doppelmembranhauben ermöglicht zusätzlich die anfangs geringe Gasqualität keinen Fackelbetrieb, je nach Verhältnis von Behältergröße zu Güllemenge auch über einen vergleichsweise langen Zeitraum. Schwachgasfackeln mit Gebläsebrenner und Gas- sowie Brennluftvorwärmung, die ab einem Methangehalt von 3 Vol-% betrieben werden können, sind bisher erst wenig verbreitet. Es liegen noch keine Langzeiterfahrungen zur Behandlung von Gas mit niedrigen Methangehalten vor.



Abb. 8: Schwachgasfackel mit Gebläsebrenner und Brennluftvorwärmung zur Behandlung von Schwachgas ab einem Methangehalt von 6 Vol-% (© BMF HAASE GmbH)

Tab. 4: Leistungsspektrum und Anforderungen an den Methangehalt derzeit verfügbarer Schwachgasfackeln (SGF; Herstellerangaben)

Fackelgröße	Leistungs- spanne	Durchsatz	SGF Gewebebrenner	SGF „Plus“ Gebläsebrenner, Brennluftvorwärmung	SGF „Ultra“ Gebläsebrenner, Gas-/ Brennluftvorwärmung
	kW				
50 kW	5–50	2–25			1)
100 kW	10–100	4–50	12	6	3
250 kW	25–250	8–120			
500 kW	50–500	15–250			

1) Beim angefragten Hersteller nicht verfügbar.

Ein schwerwiegendes Hemmnis für den Einsatz von Fackeln in Verbindung mit einer Doppelmembranhaube stellt die Explosionsgefahr beim Fackelbetrieb aufgrund zu hoher Sauerstoffkonzentrationen bei Zuführung eines explosionsgefährdeten Gemisches dar. Es besteht die Gefahr eines Rückschlagens in den Behälter, die nur durch eine Erweiterung der Fackeln verhindert werden kann. Der Einsatz explosionsgeschützter Fackeln ist jedoch mit hohem technischen, finanziellen und auch genehmigungsseitigen Aufwand verbunden. Ob alternative sicherheitstechnische Vorkehrungen hier Abhilfe schaffen können, ist noch zu diskutieren und zu demonstrieren. Bisher gibt es keine erprobten Konzepte.

Zumindest zu Beginn der Lagerdauer muss das entstehende Gas somit höchstwahrscheinlich zwischengespeichert und in größeren Zeitabständen mit einer Gasfackel behandelt werden, bis ein kontinuierlicher Betrieb möglich ist. Gerade bei kleineren Tierbeständen mit geringerem Gülleanfall und folglich geringerer Gasbildung kann ein diskontinuierlicher Betrieb über weite Teile der Lagerdauer nötig sein. Die Fackel ist dabei auf den maximalen Gasanfall bei vollständig gefülltem Behälter auszugehen (im Beispiel: Rindergülle > 20 kW und Schweinegülle > 40 kW).

Gasfackel in Verbindung mit einer Doppelmembranhaube

Bisher gibt es keine Praxiserfahrungen für Güllelager in Kombination mit einer Behandlung des entstehenden Gases über eine (Schwach-)Gasfackel. Es besteht daher noch erheblicher Erprobungs- und Demonstrationsbedarf. Die nachfolgenden Erwägungen gelten nur unter der Voraussetzung, dass eine Explosionsgefahr (siehe oben) vermieden werden kann.

Der für den Fackelbetrieb nötige Mindestgehalt an Methan im Gasstrom ist beim Befüllen des Behälters zunächst nicht gewährleistet (siehe Kap. 4.1). Daher muss entweder der Gasspeicher sehr groß ausgelegt werden, das Gas unter Zuführung von Stützgas behandelt oder zu Beginn der Befüllung bis zum Erreichen des Mindestmethangehalts unbehandelt abgelassen werden. Für Gasfackeln ohne Luftvorwärmung, die einen Mindestmethangehalt von 12 % benötigen, würden beim anfangs dargestellten Berechnungsbeispiel (5.000 m³ Rundbehälter, 500 m³ zusätzlicher Gasspeicher, kontinuierliche Befüllung über 180 Tage) rund 12 % (Rindergülle; Tag 63) und 6,9 % (Schweinegülle; Tag 47) der Methanmenge als Emission unbehandelt in die Umgebung abgelassen. In Verbindung mit einer Schwachgasfackel mit Luftvorwärmung, die einen Mindestmethangehalt von 6 % benötigt, könnten

6,3 % (Rindergülle; Tag 45) und 3,4 % (Schweinegülle; Tag 33) nicht behandelt werden. Soll das in der Anfangsphase gebildete Gas behandelt werden, wären für Rindergülle 3 und für Schweinegülle 2 Speicherleerungen mit Stützfeuerung nötig.

Da beim Erreichen des Mindestmethangehalts jeweils bereits eine Leistung von 5 kW erreicht ist, könnten unter den angenommenen Bedingungen die kleinsten der in Tabelle 4 genannten Fackeln von diesem Zeitpunkt an kontinuierlich betrieben werden. Für andere Behältergrößen und Güllemengen sind diese Aussagen entsprechend zu prüfen.

Gasfackel in Verbindung mit einer Schwimmfolie

Bei Verwendung einer Schwimmfolie weist das entstehende Gas von Beginn an eine dauerhaft hohe Methankonzentration auf, die eine Verbrennung über eine Fackel ermöglicht. Allerdings gilt auch hier, dass zumindest zu Beginn der Befüllung die Gasbildung nicht zum Erreichen der unteren Leistungsgrenze der Fackeln ausreicht, je nach Tierbestandsgröße gilt dies auch über weite Teile der Lagerdauer. Daher muss die Gasbehandlung auch mit einer Schwimmfolie über diesen Zeitraum diskontinuierlich in Verbindung mit einem externen Speicher erfolgen. Eventuell ist der nötige Vordruck für den Fackelbetrieb durch ein explosionsgeschütztes Gasgebläse zu sichern.

Für den betrachteten Beispielbehälter mit 5.000 m³ mit einem kleinen externen Speicher von 150 m³ müsste der Speicher erstmals nach 23 (Rindergülle) bzw. 16 Tagen (Schweinegülle) geleert und das Gas mit einer Fackel behandelt werden. Bis genügend Gas für einen kontinuierlichen Betrieb gebildet wird (Tag 45 bzw. 33), müsste der Speicher noch weitere 2-mal entleert werden.

5.2 Regenerative thermische Oxidation (RTO-Anlagen)

Eine Behandlung von Schwachgas mit sehr geringem Brennwert ist mit sogenannten RTO-Anlagen (regenerative thermische Oxidation, Abb. 9) denkbar, die bereits für Deponiegase eingesetzt werden. Mit ihnen kann auch Gas mit einem sehr geringen Methangehalt behandelt werden. Die



Abb. 9: Regenerative thermische Oxidationsanlage (RTO) zur Schwachgasbehandlung ab einem Methangehalt von 0,7 Vol-% (© BMF HAASE GmbH)

Anlage könnte somit dauerhaft unterhalb der Explosionsgrenze betrieben werden. Die RTO ist für einen kontinuierlichen Betrieb konzipiert, da die Anlage auf Betriebstemperatur gehalten werden muss. Während des Dauerbetriebs geschieht dies in der Regel über die entstehende Prozesswärme. Eine externe Energiezufuhr durch Zuspiesung von Flüssig- oder Erdgas ist in der Regel nur dann notwendig, wenn die zugeführte kalorische Fracht des Gases 10 kW unterschreitet. Die Technik ist vergleichsweise wenig anfällig für Änderungen der zugeführten Energiemenge, wie dies z. B. nach Teilentleerungen des Behälters oder bei geringen Temperaturen im Winter der Fall sein kann. Auch Gas mit stark schwankenden Methangehalten kann behandelt werden.

Im Gegensatz zu Fackeln können RTO-Anlagen das entstehende Gas behandeln, wenn sich die Methankonzentration im explosionsgefährdeten Bereich befindet. Denn das Gas wird vor der Zuführung auf die Anlage mit Luft auf Methankonzentrationen unterhalb des Explosionsbereiches verdünnt.

Zu Beginn der Lagerdauer ist die produzierte Methanmenge für einen kontinuierlichen Betrieb der meisten bisher auf dem Markt verfügbaren RTO-Anlagen ohne zusätzliche Energiezufuhr nicht ausreichend. Diese sind meist für kalorische Frachten von 25 bis 500 kW in der zu behandelnden Abluft, z. B. in Deponiegasen, ausgelegt. Kleinere Anlagen mit einem Leistungsspektrum von 10 bis 50 kW sind erst seit kurzem verfügbar. Breite Praxiserfahrungen bestehen für diese Anlagengröße noch nicht.

Jedoch kann auch mit einer kleinen RTO-Anlage kein kontinuierlicher Betrieb von Beginn an erfolgen: Die untere Leistungsgrenze von 10 kW dürfte zu Beginn der Befüllung in der Regel für längere Zeit nicht erreicht werden. Bis zu diesem Zeitpunkt muss entweder mit Strom oder Propan gas zugeheizt werden, um einen kontinuierlichen Betrieb zu erreichen. Oder es erfolgt eine Gasbehandlung im Intervallbetrieb, wobei die Anlage für jeden Betriebszyklus neu aufgeheizt werden müsste. Ein solcher diskontinuierlicher Betrieb wurde bisher noch nicht erprobt.

RTO in Verbindung mit einer Doppelmembranhaube

Die untere Leistungsgrenze der kleinen RTO-Anlage und somit die Möglichkeit zum Dauerbetrieb wird bei dem betrachteten Beispielbehälter (5.000 m³ Rundbehälter, 500 m³ Gasspeicher, kontinuierliche Befüllung über 180 Tage) für Rindergülle erst nach 85 Tagen erreicht, für Schweinegülle bereits nach 43 Tagen. Bis dahin müsste die Anlage zunächst 2-mal bei Rindergülle und 4-mal bei Schweinegülle im Intervall betrieben werden. Um die Betriebstemperatur zu erreichen, ist im Intervallbetrieb ein Aufheizen der Anlage über jeweils 12 bis 24 h nötig. Außerdem müsste zusätzlich Brenngas zugeführt werden.

RTO in Verbindung mit einer Schwimmfolie

Prinzipiell ist eine Gasbehandlung über eine RTO-Anlage auch in Verbindung mit einer Schwimmfolie möglich. Auch hier reicht die kalorische Fracht zunächst nicht für einen kontinuierlichen Betrieb aus. Da eine Schwimmfolie im Gegensatz zur Doppelmembranhaube kein Gasspeichervolumen beinhaltet, ist ein externer Speicher notwendig, wenn auch das zu Beginn der Lagerung entstehende Gas behandelt werden soll. Dieser müsste größer ausgelegt werden als die im genannten Beispiel für eine Schwimmfolie mit Gasfackel angenommenen 150 m³, da ansonsten der Aufwand für das Aufheizen der Anlage im Vergleich zur behandelten Gasmenge unverhältnismäßig wäre.

Die Angaben zum Erreichen der für einen kontinuierlichen Betrieb notwendigen kalorische Fracht unterscheiden sich nicht von der Variante RTO mit Doppelmembranhaube im vorherigen Abschnitt.

5.3 Biofilter

Eine Behandlung des Gases über Biofilter (biologische Methanoxidation), wie sie vereinzelt in Depo- nien eingesetzt wird, benötigt je nach Methankonzentration und absoluter Methanfracht eine hohe Filterfläche sowie eine gute Wartung und Pflege. Im vorliegenden Fall einer Behandlung von Methan aus der gasdichten Güllelagerung sind entscheidende Voraussetzungen (Temperatur, kontinuierliche Gasmenge/-qualität) für eine funktionierende Biozönose nicht durchgängig gegeben. Eine wirkungsvolle Methanminderung kann nicht garantiert werden, weil die Methanumsetzung bei diesem Verfahren stark von der Filterfeuchte und der Filtertemperatur abhängig ist. Es fehlen experimentelle Erkenntnisse, um die Eignung von Biofiltern zur Behandlung von Methan aus der Güllelagerung in der Praxis abschließend zu beurteilen. Das Verfahren wird aber aufgrund der vorher genannten Gründe als weniger geeignet eingeschätzt, zumal die Lagerung vornehmlich in kühlen bis kalten Monaten mit ungünstigen Bedingungen für die Biozönose erfolgt.

6 Genehmigungsrechtliche Bewertung

Die gasdichte Abdeckung von Güllelagern mit anschließender Gasbehandlung kann nach gegenwärtiger Rechtslage für die betroffenen Betriebe folgende genehmigungsrechtliche Konsequenzen haben:

- Für Anlagen, die nach der Ersten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) genehmigt wurden, ist davon auszugehen, dass in den meisten Fällen eine Anzeige der Nachrüstung nicht ausreicht. Wahrscheinlich wird ein immissionsschutzrechtlicher Genehmigungsvorbehalt ausgesprochen. Dies kann ein Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung notwendig machen.
- Für Anlagen, die nach Baurecht genehmigt wurden, muss lediglich die Statik des Behälters nachgewiesen und eine Baugenehmigung eingeholt werden. Die Nachweisführung ist ähnlich aufwendig wie für die Statik bei BImSch-Anlagen.
- Bei Überschreiten einer gelagerten Menge an entzündlichem Gas von 10.000 kg ist nach Zwölfter Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung – 12. BImSchV; StörfallVO) ein hoher Dokumentationsaufwand gefordert. Diese Gasmenge kann bei großen oder mehreren Güllebehältern in Verbindung mit einer Doppelmembranhaube erreicht werden.
- Bei Altanlagen könnte die Forderung nach einer Leckageerkennung nach der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) einen Neubau des Güllebehälters notwendig machen. Andererseits lässt sich aufgrund einer gasdichten Nachrüstung von Güllebehältern noch keine Forderung zur Umwallung nach AwSV ableiten.
- Die Installation einer stationären Fackel zur bestimmungsmäßigen Behandlung des entstehenden Gases löst nach BImSchV einen Genehmigungsvorbehalt aus. Dies macht – anders als bei Notfackeln – eine regelmäßige Prüfung der Fackel und des dazugehörigen Behälters sowie ggf. auch des Gesamtbetriebs notwendig und hat regelmäßige Überwachungsmessungen nach der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) zur Folge. Deren Anforderungen (Mindesttemperatur Fackeln 850 °C, Emissionsminderung von 99,9 % für organische Stoffe) sind hoch und setzen eine regelmäßige Wartung voraus.

- Laut Technischer Regel für Anlagensicherheit (TRAS 120) sind einschalige Membranabdeckungen für den Biogasbereich nicht mehr zulässig. Die gasdichte Güllelagerung fällt zwar nicht in deren Anwendungsbereich. Vor dem Hintergrund der dabei zu beachtenden Sicherheitsaspekte und dem Unfallgeschehen der vergangenen 15 Jahre in Biogasanlagen (Verpuffungen, Brand, Erstickung) ist jedoch davon auszugehen, dass Genehmigungsbehörden die TRAS 120 als Erkenntnisquelle heranziehen. Sollen einschalige Abdeckungen für die gasdichte Güllelagerung genutzt werden, müsste der Gesetzgeber daher zunächst durch entsprechende Vorschriften die genehmigungsrechtliche Basis schaffen.
- Um sicherzustellen, dass das anfallende Gas sachgerecht behandelt wird, empfiehlt sich die Einführung einer Dokumentations- und Nachweispflicht durch die Betriebe.

7 Kosten

Aufgrund der offenen Fragen wurden bisher keine detaillierten Kostenbetrachtungen vorgenommen. Zunächst müssen die technischen und sicherheitsrelevanten Punkte geklärt werden. Allerdings können für Abschätzungen Kosten aus dem Biogasanlagenbau (Abdeckungen von Fermentern und Gärrestlagern mit Doppelmembranhaube, explosionsgeschützte Technik etc.) herangezogen werden. So kann z. B. der Vergleich des Investitionsbedarfs für ein gasdicht abgedecktes gegenüber einem offenen Gärrestlager (Abb. 10) als Hinweis auf die Kosten einer gasdichten Abdeckung eines Güllelagers genutzt werden. Zusätzlich müssen der Investitionsbedarf für eine Gasbehandlungseinrichtung und die Betriebskosten berücksichtigt werden.

Das KTBL lässt derzeit aktuelle Kosten für die Nachrüstung oder den Neubau von Güllebehältern mit NH_3 -mindernden und gasdichten Abdeckungen anhand von Marktstudien und Praxiserhebungen ermitteln. Mit den Ergebnissen ist 2021 zu rechnen.

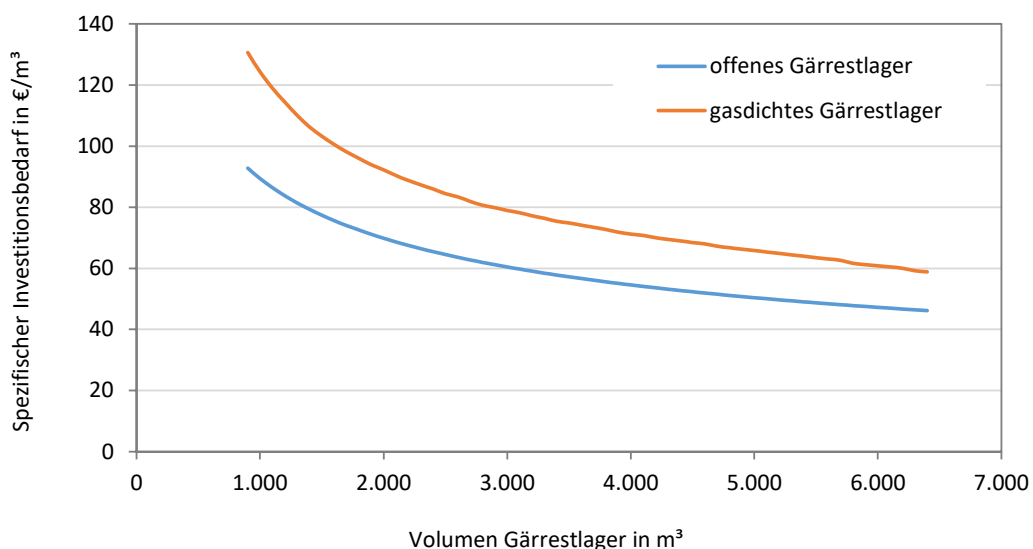


Abb. 10: Investitionsbedarf ohne Mehrwertsteuer für den Neubau eines offenen oder gasdichten Gärrestlagers (KTBL 2017)

Bisher konnten nur einzelne Angebote für die Nachrüstung bestehender Behälter mit einer **Doppelmembranhaube** bei verschiedenen Behälterdurchmessern eingeholt werden (Tab. 5). Kosten für vorbereitende oder ergänzend notwendige Arbeiten wie die Reinigung des Behälters oder ein Korrosionsschutzanstrich und zusätzliche Technik wie stationäre, explosionsgeschützte Rührwerke sind darin nicht enthalten. Für die Reinigung des Behälters ist je nach Behältergröße von 4.000 bis 7.000 € auszugehen (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2018). Für den säurefesten Anstrich ist mit 25 bis 30 € je m² Behälterfläche zu rechnen, was für den Beispielbehälter mit 5.000 m³ eine Summe von 15.000 bis 18.000 € bedeuten würde. Je nach Behältergröße sind ein oder mehrere Rührwerke nachzurüsten. Für beispielsweise einen 17-kW-Tauchmotorrührwerk ist ein Investitionsbedarf von 9.800 € zu veranschlagen (KTBL 2013, aktualisiert).

Tab. 5: Investitionsbedarf für die Nachrüstung von Betonrundbehältern mit einer Doppelmembranhaube für unterschiedliche Behälterdurchmesser (Herstellangaben); Preise ohne Mehrwertsteuer

Durchmesser Behälter in m	Investitionsbedarf Komplettsystem in €
20	18.000–33.000
25	27.000–41.000
30	32.000–53.000

Bisher bieten nur einzelne Hersteller Schwimmfolien an. Nach Aussagen eines Anbieters kann für die Abdeckung selbst von einem Investitionsbedarf ähnlich einer Doppelmembranhaube ausgegangen werden. Hinzu kommen jedoch Kosten (o. MwSt.) für die Wasserableitung (2.000–4.000 €) und die Gasfassung (15.000–20.000 €). Diese sind unabhängig vom Durchmesser des Behälters und können bei kleinen Behältern das System erheblich verteuern. Gasdichte Abdeckungen mit Schwimmfolien können somit insbesondere bei kleinen Behältern deutlich teurer als Doppelmembranhauben sein. Bei Behältern mit mangelhafter Statik könnten sie allerdings eine Nachrüstung überhaupt erst ermöglichen. Zusätzliche Kosten entstehen für den gegebenenfalls zu errichtenden externen Gasspeicher.

Zur externen Gasspeicherung gibt es mehrere Möglichkeiten. Die Speicher können als Doppelmembranspeicher auf einem Betonring ausgeführt werden (Abb. 11). Daten zum Investitionsbedarf für diese Technik sind in Tabelle 6 dargestellt.



Abb. 11: Freistehender Doppelmembranspeicher zur Speicherung von Biogas (© Sattler Ceno Top-TEX GmbH)

Tab. 6: Investitionsbedarf für externe Doppelmembrangasspeicher; Preise (o. MwSt.) inklusive Transport und Montage (IWES 2014; aktualisiert), ohne Kosten für Betonfundament und Zuleitung (ca. 180 €/m)

Speichervolumen in m ³	Investitionsbedarf Komplettsystem in €
140–170	31.000–38.000
300–330	39.000–46.000
550–570	46.000–53.000
660–710	50.000–62.000

Für die im Berechnungsbeispiel in Kapitel 5 verwendete kleinste genannte Größe von 150 m³ liegen die Investitionskosten für die externe Speicherung im Bereich einer Doppelmembranhaube (siehe Tab. 5).

Seit kurzem werden vermehrt auch einschalige Gassäcke auf Biogasanlagen eingesetzt. Der Gassack muss zum Windschutz in einem Gebäude untergebracht und fest verankert sein (Abb. 12). Aus sicherheitstechnischen Gründen ist ein ständiger Luftaustausch zu gewährleisten. Für Gassäcke liegen derzeit keine Kostendaten vor. Aufgrund des deutlich geringeren baulichen und auch technischen Aufwands kann von geringeren Kosten als für externe Doppelmembranspeicher ausgegangen werden.



Abb. 12: Einschaliger Gassack mit Befestigungen (© Gerd Reinhold)

Für die **Gasbehandlung** ist die auf dem Markt verfügbare Technik in der Regel zu groß dimensioniert. Für den Beispielbehälter von 5.000 m³ wäre eine Maximalleistung von 21 kW bei Rindergülle und 42 kW bei Schweinegülle ausreichend. Es ist zu erwarten, dass bei Bedarf angepasste Technik durch die Hersteller entwickelt und angeboten wird. Dies macht Kostenschätzungen schwierig. In Tabelle 7 sind Kosten für derzeit verfügbare Gasbehandlungstechniken aufgeführt. Zwar ist für kleinere Anlagen mit geringeren Kosten zu rechnen, allerdings sinkt der Investitionsbedarf nicht proportional zur Anlagengröße. Insgesamt ist für die gasdichte Güllelageung also bei kleineren Tierhaltungsanlagen von deutlich höheren spezifischen Kosten aus Behälterneubau/-nachrüstung und Gasbehandlung als auf größeren Betrieben auszugehen. Gleiches gilt für die dargestellten Betriebskosten, die keine Kosten für ggfs. notwendiges Stützgas oder das Aufheizen der Anlagen im Intervallbetrieb enthalten.

Tab. 7: Investitionsbedarf für derzeit auf dem Markt verfügbare Einrichtungen zur Gasbehandlung (Herstellerangaben), Preise ohne Mehrwertsteuer

Anlagenart	Mindest-methangehalt	Maximale Feuerungsleistung	Investitionsbedarf	Betriebskosten im Normalbetrieb		
	Vol.-%	kW		Strombedarf	Wartung	Verschleißteile
			€	kWh/h	€/a	€/a
Fackelanlage mit Gasfördergebläse, 10-ft.-Container	12	5-50	90.000	2	2.000	250
		50-500	95.000	3	2.000	250
	6	5-50	90.000	2	2.000	250
		25-250	120.000	4	2.200	250
	3	10-100	155.000	5	2.500	300
RTO-Anlage mit Gasfördergebläse auf 20-ft.-Rahmen	> 0,7	10-50	185.000	3	2.500	1.000
		20-100	205.000	5	2.500	1.000

ft. = Fuß

8 Güllevergärung als Alternative zur gasdichten Güllelagerung

Die Güllevergärung ist eine alternative Möglichkeit zur Vermeidung der Treibhausgasemissionen aus einer nicht gasdichten Wirtschaftsdüngerlagerung und stellt ein erprobtes und vielfach umgesetztes Verfahren dar. Die Biogasproduktion aus Gülle vereint den Vorteil der Treibhausgasminderung mit der energetischen Nutzung. Selbst im Falle einer anschließenden nicht gasdichten Lagerung der Gärreste liegen die Restgasemissionen sehr deutlich unter den Methanemissionen aus der Lagerung von unvergorener Gülle ohne Abdeckung. Seit Einführung einer weitgehenden Verpflichtung zur gasdichten Gärrestlagerung mit dem EEG 2012 wird bei seither errichteten Anlagen der Großteil der Gärreste bereits gasdicht gelagert. Dementsprechend sind auch der Erhalt und der Ausbau der Güllevergärung ein erklärtes Ziel im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung.

Nach Angaben des Deutschen Biomasseforschungszentrum (DBFZ) werden derzeit etwa 30 % des Wirtschaftsdüngeranfalls vergoren und die Gärreste anschließend zumindest teilweise gasdicht gelagert (Majer et al. 2019). Durch das Auslaufen der EEG-Förderung ist jedoch davon auszugehen, dass ein Teil dieser Anlagen stillgelegt und weniger Gülle vergoren und somit emissionsarm gelagert wird. Dies hätte auch verstärkte Geruchsemissionen während Lagerung und Ausbringung zur Folge. Zusätzlich würden Treibhausgaseinsparungen aus der Strom- und Wärmebereitstellung durch Biogas im Vergleich zu fossilen Energieträgern verloren gehen. Es ist nicht abzuschätzen, ob andere Biogasanlagen in größerem Umfang einen Teil der aus der Vergärung fallenden Güllekapazitäten aufnehmen werden.

Vor einer Entscheidung, in welchem Maße die Entwicklung und Verbreitung von Verfahren zur gasdichten Güllelagerung angestrebt wird, sollten Kosten-Nutzen-Analysen durchgeführt werden. Diese sollten auch einen Vergleich zu den Kosten und Nutzen einer weiteren Förderung bzw. des Erhalts der Güllevergärung berücksichtigen.

9 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- Die Gasfreisetzung bei offener Lagerung von Gülle ist stark temperaturabhängig und erfolgt mit Methangehalten von 50 bis 60 Vol-%, die für Biogas üblich sind.
- Die Menge an täglich freigesetztem Methan ist abhängig von der Gülleart, der Temperatur im Lager und der gelagerten Güllemenge zum jeweiligen Zeitpunkt.
- Die Gasbildung ist zu Beginn der Behälterbefüllung gering und steigt mit zunehmendem Füllstand kontinuierlich an.
- Es existieren verschiedene Lösungsansätze zur gasdichten Abdeckung von Güllelagerstätten, z.B. Schwimmfolien und Doppelmembranhauben, deren technische Umsetzbarkeit sowie die Praktikabilität für Güllebehälter jedoch noch nachgewiesen werden muss. Hierzu sind Entwicklungs-, Erprobungs- und Einführungsarbeiten notwendig. Auch ist zu bedenken, dass nur für einen Teil der bestehenden Behälter Umrüstkonzepte möglich sind. Die in der Biogaserzeugung gebräuchliche gasdichte Abdeckung von Gärrestbehältern kann nicht ohne weiteres auf Behälter für unvergorene Gülle übertragen werden.
- Werden Doppelmembranhauben auf Güllelagern eingesetzt, kommt es zu Beginn zu einer sehr starken Verdünnung durch das große Kopfraumvolumen mit der Folge geringer Methankonzentrationen im Gasgemisch. Die führt zu folgenden Effekten:
 - Aufgrund des langsam ansteigenden Methangehaltes ist das zu Beginn der Befüllung anfallende Gas mit den derzeit existierenden Verfahren nicht behandelbar. Auch ein Ablassen von Gas in die Umgebung während der Anfangsphase bis zum Erreichen einer ausreichenden Methankonzentration ist denkbar.
 - Werden keine Gegenmaßnahmen, wie z.B. eine Inertisierung des Behälters ergriffen, werden mehrere Wochen benötigt, um den sicherheitsrelevanten, explosionsgefährdeten Bereich zu durchfahren (4,4 bis 16,5 % Methan in der Luft).
 - In Güllebehältern auftretende schwankende Füllstände durch die Ausbringung der Gülle können nicht wie in Biogasanlagen durch nachströmendes Gas aus anderen Gasspeichern ausgeglichen werden. Strömt Luft nach, kann es wiederholt zu explosionsfähigen Gasmischungen im Gasraum kommen.
- Bei Abdeckungen ohne Kopfraumvolumen, wie z.B. Schwimmfolien, wird das entstehende Gas nicht verdünnt und es kann von Beginn an mit hohen Methankonzentrationen im Gas gerechnet werden. Die Bildung eines explosionsfähigen Gasgemisches ist somit unwahrscheinlicher. Weiter ist zu beachten, dass:
 - aufgrund des Ringspaltes auch hier geringe Gasverluste in Kauf genommen werden müssen,
 - innenliegende Rührwerke zu einer Einschränkung im nutzbaren Behältervolumen führen können, wenn nicht durch Serviceklappen oder Ähnliches eine gesamte Nutzung des Behältervolumen möglich gemacht wird,
 - die Homogenisierung der Gülle durch Aufrühren zu erheblichen mechanischen Belastungen der Folien führen und dass
 - aufgrund der nicht konstanten Gasbildung eine externe Gasspeicherung notwendig ist.
- Für eine kontinuierliche Gasbehandlung existieren bisher keine sofort einsetzbaren Lösungen, die das gesamte bei der Güllelagerung auftretende Leistungsspektrum abdecken. In der Regel ist zu Beginn der Behälterbefüllung eine diskontinuierliche Gasbehandlung mit einer Gasspeicherung notwendig oder es muss Methan zu Beginn der Behälterbefüllung ohne Behandlung abgelassen

werden. Bei geringen täglichen Gülleanfallmengen muss die Gasbehandlung unter Umständen über einen Großteil der Lagerdauer diskontinuierlich erfolgen.

- Gasfackeln benötigen einen Mindestmethangehalt von 6 bzw. 12 % im zu entsorgenden Gas, um ohne Stützfeuerung oder Beheizung arbeiten zu können. Zudem ist die Behandlungskapazität von Fackeln deutlich höher als die zu Beginn der Befüllung zu erwartende Gasbildung. Eine kontinuierliche Gasbehandlung ist anfangs somit nicht möglich.
Für einen möglichen Einsatz von Fackeln in Verbindung mit Doppelmembranhauben ist zu klären, ob und wie mit vertretbarem Aufwand verhindert werden kann, dass der Fackel ein explosionsfähiges Gemisch zugeführt wird.
- Anlagen zur regenerativen thermischen Oxidation (RTO) müssen für den Betrieb auf Temperatur gehalten werden. Hierfür ist eine Mindestmenge an kalorischer Fracht von 10 kW notwendig, die am Anfang der Behälterbefüllung nicht erreicht wird. Zumindest in der ersten Lagerphase kann daher eine RTO nur diskontinuierlich mit längeren Aufheizphasen und einer Gasspeicherung betrieben werden.
- Die Eignung von Biofiltern zur Behandlung von Methan aus der Güllelagerung kann aufgrund fehlender experimenteller Erkenntnisse nicht abschließend beurteilt werden. Es ist davon auszugehen, dass ihre Funktionsweise durch nicht stabile Bedingungen (Temperatur, Feuchte, Gasvolumenstrom) im Verlauf der Lagerdauer beeinträchtigt wird.
- Aus Sicht der Arbeitsgruppe bestehen noch eine Reihe technischer Herausforderungen und noch deutlicher Entwicklungsbedarf, um eine gasdichte Abdeckung von Güllelagern mit anschließender Gasbehandlung zu realisieren. Sie ist daher kurzfristig nicht umsetzbar. Vor einer flächendeckenden Umsetzung bedarf es der Demonstration zumindest im Technikums-, wenn nicht im Praxismaßstab.
- Vor allem in Verbindung mit einer Gasbehandlung über eine Fackel ergeben sich unter Umständen genehmigungsrechtliche Hürden. Diese sind vor Einführung der Maßnahme zu prüfen und gegebenenfalls für die Güllelagerung entsprechende Ausnahmen und Voraussetzungen zu formulieren.
- Auch ohne kostenseitige Bewertung der Gasbehandlung fallen für gasdicht mit Doppelmembranhauben abgedeckte Hochbehälter im Neubau fast doppelt so hohe Investitionskosten an wie für offene Güllelager. Hinzu kommen Betriebskosten z.B. für die zyklische Erneuerung des passiven Korrosionsschutzes im Betonbehälter, den Folienwechsel nach etwa 10 Jahren, die Gasdichtheitsüberwachung der Innenfolie. Die Kosten einer gasdichten Abdeckung von Bestandsbehältern und der erforderliche Umfang des Ersatzes nicht umrüstbarer Behälter durch Neubauten mit Gasspeicherung und Gasbehandlung können gegenwärtig nicht exakt abgeschätzt werden. Ein Vergleich mit den Kosten der Güllevergärung in Biogasanlagen ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.
- Mit der Güllevergärung existiert ein in der Praxis bereits vielfach umgesetztes Verfahren, mit dem sich die Methanemissionen aus der Güllelagerung zu einem Großteil vermeiden lassen. Der Erhalt und der Ausbau der Güllevergärung ist ebenfalls ein erklärtes Ziel im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung. Die Autoren begrüßen dies, weisen aber auf den dringenden Handlungsbedarf hin: Durch das baldige Auslaufen der EEG-Vergütung für einen Teil der bestehenden Anlagen ist damit zu rechnen, dass der Umfang der Güllevergärung in den nächsten Jahren deutlich zurückgeht, da besonders im Geltungsbereich des EEG 2000 Güllevergärungsanlagen errichtet wurden. Es sind dringend lösungsorientierte Anreize für Gülle und Biogas produzierende Betriebe zu schaffen, damit bisher ungenutzte Gülle in bestehenden oder eventuell auch neuen Biogasanlagen langfristig und nachhaltig verwertet werden kann.

Fazit

Die gasdichte Güllelageung mit Behandlung des entstehenden Gases stellt eine Chance zur Vermeidung von Emissionen dar. Allerdings sind keine etablierten verfahrenstechnischen Lösungen verfügbar. Daher sollte zweigleisig vorgegangen werden, indem sowohl Verfahren zur gasdichten Lagerung und Gasbehandlung entwickelt und demonstriert werden als auch der Stand der Güllevergärung kurzfristig gesichert und ausgebaut wird. Klare und langfristig gültige rechtliche Bedingungen für die betroffenen Betriebe sind hierbei unerlässlich.

Auf längere Sicht sollte die Option mit den geringsten Kosten zur CO₂-Vermeidung gefördert werden. Dies kann jedoch erst nach ausreichender Erprobung der gasdichten Güllelageung beurteilt werden.

Literatur

- Bäger, N.; Hesse, S. (2020): Gasemissionen und Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Gülle und Gärrest. Abschlussbericht des Pilot- und Demonstrationsvorhaben. BTN Biotechnologie GmbH, Nordhausen (unveröffentlicht)
- Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf>, Zugriff am 09.12.2020
- Haenel, H.-D.; Rösemann, C.; Dämmgen, U.; Döring, U.; Wulf, S.; Eurich-Menden, B.; Freibauer, A.; Döhler, H.; Schreiner, C.; Osterburg, B.; Fuß, R. (2020): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990–2018. Report on methods and data (RMD) Submission 2020. Thünen Report 77, Braunschweig, Johann Heinrich von Thünen-Institut
- IWES (Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik; 2014): Techniken zur flexiblen Stromeinspeisung aus Biogasanlagen. Marktanalyse im Rahmen des KTBL-Programms Kalkulationsunterlagen (unveröffentlicht)
- KTBL (2013): Faustzahlen Biogas. Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 3. Aufl.
- KTBL (2015): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. KTBL-Heft 107, Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 3. Aufl.
- KTBL (2017): Anpassungsstrategien für Biogasanlagen. KTBL-Heft 118, Darmstadt, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2018): Persönliche Mitteilung
- Majer, S.; Kornatz, P.; Daniel-Gromke, J.; Rensberg, N.; Brosowski, A.; Oehmichen, K.; Liebetrau, J. (2019): Stand und Perspektiven der Biogaserzeugung aus Gülle. Leipzig, Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH (DBFZ)
- Reck, N.; Thieme, H. J. (1989): Güllelangzeitlagerung als Maßnahme zur bedarfsgerechten Biogaserzeugung. *agrartechnik* 39(5), S. 229–230
- Reinhold, G.; Klimanek, E.-M.; Breitschuh, G. (1991): Zum Einfluß der Biogaserzeugung auf Veränderungen in der Kohlenstoffdynamik von Gülle. *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.* 35(2), S. 129–137
- Reinhold, G. (1985): Untersuchungen zur großtechnischen Erzeugung und Verwertung von Biogas bei Berücksichtigung der Substratveränderungen. Dissertation, Technische Hochschule Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik
- Reinhold, G. (2020): Modellierung der Gasbildung aus Rinder- und Schweinegülle im Verlauf der Lagerdauer für einen gasdicht abgedeckten Rundbehälter mit Doppelmembranhaube, persönliche Mitteilung
- Wellinger, A.; Kaufmann, N. (1980): Temperaturen Güllelage, persönliche Mitteilung an G. Reinhold

Autoren

Matthias Hahm, BMF Haase GmbH, Neumünster

Ansgar Lasar, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Oldenburg

Arnold Niehage, Plancomp GmbH, Leopoldshöhe

Dr. Hans Oechsner, Universität Hohenheim, Stuttgart

Dr.-Ing. Gerd Reinhold, Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, Jena

Ursula Roth, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt

Carsten Tietjen, MT Energy Service GmbH, Zeven

Dr. Sebastian Wulf, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt

