

Empfehlungen für eine gute fachliche Praxis in landwirtschaftlichen Biogasanlagen aus hygienischer Sicht



Nr. III – 8/2023 (4. Auflage)



Dr. Michael Lebuhn
Dr. Johannes Ostertag †
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Mathias Hartel
Fachverband Biogas e.V.



Dr. Michael Knabel
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	2
2	Einführung.....	2
3	Begriffsbestimmungen	3
3.1	Verweilzeit.....	3
3.2	Indikatorprinzip.....	4
3.3	Hygienisierung.....	4
4	Mechanismen der Hygienisierung.....	4
5	Rechtliche Grundlagen	6
6	Human- und Tierhygiene.....	7
7	Phytohygiene.....	10
8	Umwelthygiene.....	11
9	Empfehlungen für eine gute fachliche Praxis hinsichtlich Hygieneanforderungen.....	13
10	Literaturverzeichnis	16

1 Zusammenfassung

Biogasanlagen wurden in der Vergangenheit wiederholt bezichtigt, verantwortlich für verschiedene Krankheitsausbrüche wie z.B. Fälle von Botulismus oder auch die letzte EHEC-Epidemie zu sein. Der vorliegende Artikel nimmt hierzu auf Basis bisheriger Forschungsergebnisse Stellung.

Zum besseren Verständnis werden Begriffe im Zusammenhang mit der Hygienisierung durch den Biogasprozess erläutert und entsprechende rechtliche Grundlagen sowie wichtige Mechanismen der Hygienisierung vorgestellt. Es werden Fakten und neuere Ergebnisse wissenschaftlicher Studien aus den Bereichen Human-, Tier-, Phyto- und Umwelthygiene aufgeführt, wobei ein Schwerpunkt auf die Bereiche Human- und Tierhygiene gelegt ist.

In der Zusammenschau zeigen die Ergebnisse, dass alle bislang untersuchten Krankheitserreger abhängig von den Prozessbedingungen und der Verweilzeit mehr oder weniger stark abnahmen, dass sich also in keinem Fall ein Erreger im Biogasprozess vermehrte. Hieraus lässt sich schließen, dass das Gärprodukt bei regulärem, effizientem Anlagenbetrieb weniger mit Krankheitserregern belastet ist als die Einsatzstoffe.

In der vorliegenden Fachinformation werden aber auch Grenzen der Hygienisierung und Schwachstellen in der Prozesskette der Biogasproduktion angesprochen. Diesen Punkten sollten Betreiber besondere Beachtung schenken.

Aus den vorgestellten Fakten und Erkenntnissen werden schließlich Empfehlungen für eine gute fachliche Praxis hinsichtlich Hygieneanforderungen beim Betrieb von landwirtschaftlichen Biogasanlagen abgeleitet. Die Autoren raten Betreibern von Biogasanlagen, die Empfehlungen umzusetzen. Dadurch werden die Hygiene und die Akzeptanz der Technologie verbessert.

2 Einführung

Aus der Öffentlichkeit und in den Medien wurden wiederholt Stimmen laut, dass die landwirtschaftliche Biogasproduktion Ursache hygienischer Probleme sei. Hier wurde beispielsweise behauptet, dass sich toxinbildende Clostridien (v.a. *Clostridium botulinum*, ein sporenbildendes Bakterium und Erreger des Botulismus) bei der Biogasproduktion vermehren würden, dass Biogasanlagen Keimschleudern von krankheitserregenden Salmonellen seien, und auch für die jüngste EHEC (bzw. EAEC, enterohämorrhagische bzw. enteroaggregative *Escherichia coli*) -Epidemie im Jahr 2011 wurden Biogasanlagen verantwortlich gemacht. Für diese Vermutungen wurden allerdings bisher keine in der wissenschaftlichen Gemeinschaft anerkannten Belege veröffentlicht.

Eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen (Hoferer, 2001; Reinhold und Jahn 2004; Lebuhn und Wilderer, 2006; Tebbe et al., 2007; Bagge et al., 2010; Dunière et al., 2011; Breves, 2014; Fröschle et al., 2015a; Carraturo et al., 2022) ergab dagegen, dass sich die Konzentration aller bisher geprüfter Krankheitserreger (Pathogene) von Mensch, Tier und Pflanze in den Prozessschritten Silierung, Lagerung in der Güllegrube und vor allem im Biogasprozess abhängig von der Widerstandsfähigkeit der Erreger und den Prozessbedingungen mehr oder weniger stark verringert. In keinem Fall hatte ein Erreger gegenüber der Konzentration im Ausgangssubstrat zugenommen.

Auch wenn dies eine „Entwarnung“ nahelegt, besteht aber zu völliger Sorglosigkeit kein Anlass. Bei mesophiler Prozesstemperatur (etwa 35 – 42°C), die in landwirtschaftlichen Biogasanlagen überwiegt, können manche Pathogene den Prozess besser (wenn auch dezimiert) als bei thermophilem Betrieb (etwa 45 – 60°C) überstehen (Fröschle et al., 2015a). Hinsichtlich des Einsatzes einer thermophilen Prozessstufe ist jedoch zu bedenken, dass die Vergärung proteinreicherer Substrate (z.B. Grassilage) bei höherer Raumbelastung Schwierigkeiten bereiten kann (Andrade et al., 2009). Voraussetzung für eine effiziente Abtötung der Pathogenen ist eine möglichst lange Verweilzeit im anaeroben Abbau. Dies ist bei einer Kurzschlussströmung im Fermenter (siehe 3, Begriffsbestimmungen) nicht der Fall. Die Verweilzeit ist dann verkürzt und die Absterberate dadurch verringert. Gleiches gilt, wenn die Erreger in eine schützende Matrix eingebettet sind. Wenn sie sich tief in grobkörnigen Substraten befinden, die nicht oder kaum im Prozess abgebaut werden, können sie diesen auch weniger beschädigt verlassen. Auch wenn Pathogene in abnorm hoher Konzentration im Ausgangsmaterial vorliegen, ist die Chance größer, dass eine fallweise sogar beträchtliche Fraktion überlebt (Fröschle et al., 2015a).

Manche Krankheitserreger sind auch zur Bildung von Überdauerungsformen wie Sporen oder Zysten fähig, um widrige Umweltbedingungen zu überstehen. *C. botulinum*, *C. perfringens* und manche *Bacillus*-Arten sowie *Clostridioides* (vormals *Clostridium*) *difficile* unter den „neuartigen“, ggf. Antibiotika-resistenten Krankheitserregern (Mößnang et al., 2019) gehören dazu. Damit besteht zumindest theoretisch die Möglichkeit, dass manche (eher die resistenten) Krankheitserreger in besonders gelagerten Fällen den Prozess teilweise überstehen, und dass damit das Gärprodukt hygienisch nicht völlig unbedenklich ist (siehe 4, Mechanismen der Hygienisierung). Im vorliegenden Artikel wird der Stand der Forschung dargestellt, Mechanismen der hygienisierenden Effekte von Biogasprozessen werden erklärt, und ihre Grenzen werden angesprochen. Aufbauend auf dieser Kenntnis werden Hinweise zu einer auch hinsichtlich der Hygiene im Gärprodukt optimierten guten fachlichen Praxis in landwirtschaftlichen Biogasanlagen gegeben. Ihre Beachtung wird den Anlagenbetreibern nahegelegt. Der Schwerpunkt ist dabei auf den Bereich Human- und Tierhygiene gelegt, die Bereiche Phyto- und Umwelthygiene sind eher kurz angesprochen. Die Autoren gehen davon aus, dass die Ausbringung von Gärprodukten aus der landwirtschaftlichen Biogasproduktion nach den geltenden Regeln und Empfehlungen bei Beachtung der Ratschläge keine gesundheitlichen Gefahren für Mensch, Tier und Pflanze nach sich zieht, sondern dass sich im Gegenteil die hygienische Situation durch den Einsatz von Gärprodukten gegenüber den unvergorenen Einsatzstoffen verbessert.

3 Begriffsbestimmungen

3.1 Verweilzeit

Bei der Verweilzeit ist zwischen der minimalen gesicherten Verweilzeit (minimum guaranteed retention time, MGRT) und der hydraulischen Verweilzeit (hydraulic retention time, HRT) strikt zu unterscheiden. Die MGRT bezeichnet die Zeit, die ein betrachteter Partikel den Bedingungen im Fermenter ausgesetzt ist. In den in landwirtschaftlichen Biogasanlagen weit verbreiteten Rührkesselfermentern ist das wegen möglicher Kurzschlussströme streng genommen nur die Zeit zwischen Befüllung und der folgenden Entnahme. In Verfahren, die auf dem Pfropfenstrom-Prinzip basieren, sind die Verweilzeiten typischerweise länger. Die HRT bezeichnet dagegen das Verhältnis des Volumenstroms der in eine Anlage zugeführten Substratmenge zum Anlagenvolumen, und ist nur ein statistisch-kalkulatorischer Wert. Bei Bio-

gasanlagen, die der BioAbfV unterliegen, muss bei Ermittlung der Mindestverweilzeit Anwendung einer alternativen Methode zur Hygienisierung (z.B. thermophile Vergärung) eine adäquate Wirkung nachgewiesen werden (siehe 4 Mechanismen der Hygienisierung; 5 Rechtliche Grundlagen). Dazu wird die Mindestverweilzeit mittels Traceruntersuchung ermittelt.

3.2 Indikatorprinzip

In der Praxis wird bei der Evaluierung der Hygienisierungsleistung durch den betrachteten Prozess meist nach dem Indikatorprinzip vorgegangen. Dabei dient ein gut beherrschter Leitkeim (oder eine Mikroorganismengruppe) als Indikator, wenn gezeigt wurde, dass er/sie hinsichtlich des Stressors (bestimmte Prozessbedingungen) resistenter ist als die Mikroorganismen bzw. Krankheitserreger, auf die hin geprüft werden soll. Mehr zum Thema Indikatorprinzip und andere Bioindikatoren der Hygienisierung findet sich bei Fröschle et al. (2015b).

3.3 Hygienisierung

Hygienisierung bezeichnet im wissenschaftlichen Sprachgebrauch eine Reduktion aktiver (bzw. koloniebildender) Individuen - hier von Krankheitserregern oder Indikatoren - um mindestens 4, typischerweise 5 \log_{10} -Stufen, also um 99,99 bzw. 99,999 %. Die Verordnung (EU) Nr. 142/2011 schreibt bei alternativen thermischen und chemischen Umwandlungsverfahren in Biogasanlagen für eine ausreichende Reduzierung biologischer Risiken u.a. den Nachweis einer Verminderung von *Salmonella* Senftenberg (775W, H₂S-negativ) um 5 \log_{10} -Stufen vor.

Häufig wird für die Inaktivierung bzw. Abtötung von Krankheitserregern der „D-Wert“ angegeben. Er beschreibt die dezimale Reduktionszeit, also die Zeit, die zur Abtötung um eine \log_{10} -Stufe bzw. um den Faktor 10 notwendig ist.

Die Mechanismen, die eine Inaktivierung oder Abtötung von Krankheitserregern bewirken, sind in Kapitel 4 Mechanismen der Hygienisierung vorgestellt.

4 Mechanismen der Hygienisierung

Generell sind für die Hygienisierungseffizienz (Ausmaß der Keimabtötung) im Biogasprozess biologische, chemische und physikalische Faktoren bestimmend (Tabelle 1).

Tabelle 1: Faktoren, die die Hygienisierungseffizienz der anaeroben Gärung bestimmen

Faktoren	Wirkungsmechanismus der Hygienisierung
Biologische	Hoher mikrobieller Umsatz mit starkem Konkurrenz- oder Fraßdruck durch die umgebenden Mikroflora;
Chemische	Starke pH-Änderung weg vom Neutralpunkt, z.B. Versäuerung (v.a. Milchsäure) bei der Silierung; Hohe Konzentrationen von Zwischen- und Endprodukten des anaeroben Stoffwechsels, z.B. Ammoniak, Fettsäuren, Alkohole, Lösungsmittel; Sehr tiefes Redoxpotenzial;
Physikalische	Hohe Prozesstemperatur und lange Verweilzeit

Den wissenschaftlichen Untersuchungen zufolge nimmt die abtötende Wirkung auf Pathogene typischerweise vom mesophilen zum thermophilen Temperaturbereich zu, weil Krankheitserreger meist an die niedrigere Temperatur des Wirts angepasst sind, und weil sich das Ammonium-Ammoniak-Gleichgewicht mit steigender Temperatur und steigendem pH-Wert stark in Richtung des toxischen Ammoniaks verschiebt. Je länger die pathogenen Organismen den für sie widrigen Prozessbedingungen ausgesetzt sind, je länger also ihre Verweilzeit im Biogasprozess ist, desto intensiver ist die abtötende oder inaktivierende Wirkung.

Die Belastung mit Krankheitserregern kann über verschiedene Mechanismen vermindert werden. Bereits bei einer guten Silierung werden selbst säureretolerante Krankheitserreger wie EHEC stark abgetötet (Dunière et al., 2011). Bei Pathogenen, die strikt an die Gegenwart des Wirts gebunden sind und keine Überdauerungsformen bilden, reicht es häufig, die Infektionsketten zu unterbrechen bzw. zu unterbinden. Dies betrifft besonders den phytosanitären Bereich (Kapitel 7, Phytohygiene). Weiterhin bzw. zusätzlich können Krankheitserreger über verfahrens- und prozesstechnische Maßnahmen (z.B. Vakuumverdampfung bei der Gärproduktaufbereitung) inaktiviert werden. Dabei hängt das Ausmaß der Inaktivierung und damit des residualen Verbleibs der Pathogenen von verschiedenen Faktoren ab, von

- den Prozessbedingungen (z.B. Temperatur, Ammoniakkonzentration, Redoxpotenzial, Schwefelwasserstoff und andere chemische Komponenten, Verweilzeit u.a.m.) und der Ausprägung der einzelnen Faktoren,
- der Widerstandsfähigkeit der betrachteten Krankheitserreger gegenüber den einzelnen, oben genannten Stressfaktoren und ihrer Fähigkeit, Überdauerungsformen zu bilden,
- der Prozesseffizienz (eine schlechte Effizienz kann auf Kurzschlussströmungen beruhen) sowie der Gegenwart schützender Hüllen und damit der tatsächlichen Expositionsdauer im Prozess und
- den Anfangsgehalten der Pathogenen in der Substratmischung.

Weiterhin können verschiedene organische Fremdstoffe (z.B. Antibiotika, Desinfektionsmittel, hormonell wirksame Verbindungen, Mykotoxine, Fungizide u.a.m.) oder auch Schwermetalle gewollt oder ungewollt in den Prozess gelangen. Da manche dieser Verbindungen hochgiftig sind und nicht im Prozess abgebaut werden, ist entsprechende Vorsicht beim Umgang mit

ihnen angesagt. Finden sich solche Substanzen in unnatürlich hohen Gehalten im Gärprodukt, kann dies eine Belastung für Mensch, Tier und Umwelt darstellen. Hierbei ist zu beachten, dass für derartige Fremdstoffe und Schwermetalle die Grenzwerte der Bioabfallverordnung und der DüMV einzuhalten sind, insbesondere wenn das Gärprodukt in Verkehr gebracht werden soll. Eingehender dargestellt ist das Thema in Kapitel 8, Umwelthygiene.

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen hängt der seuchen- und phytohygienische Status des Gärprodukts von der Belastung der Substrate sowie von der Art eventuell eingesetzter Aufbereitungsverfahren ab. Die hygienisierende Wirkung ist zwar ein willkommener Nebeneffekt der anaeroben Vergärung, in der landwirtschaftlichen Biogasproduktion ist sie aber nicht der Hauptzweck. Allerdings kann die reine mesophile Vergärung, wie sie in diesen Anlagen überwiegend vorliegt, nach rechtlicher Begriffsdefinition aber nicht als Hygienisierung anerkannt werden.

5 Rechtliche Grundlagen

Von den Produkten bzw. Gärprodukten aus Biogasanlagen darf kein Risiko der Verbreitung von Seuchen für Mensch, Tier oder Pflanze ausgehen. Mit solchen Erregern befallene Substrate dürfen nicht in Biogasanlagen eingebracht werden bzw. sind einer geeigneten Hygienebehandlung zu unterziehen.

Abhängig vom hygienischen Risikopotenzial, das von den verarbeiteten Substraten ausgeht, unterscheidet der Gesetzgeber hinsichtlich tierischer Nebenprodukte drei Kategorien, die in der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, der Verordnung (EU) Nr. 142/2011 bzw. der "Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung" (TierNebV, 2006) definiert sind. Sie stellen in Abhängigkeit vom Infektionsrisiko unterschiedliche Anforderung an die Hygienisierung:

- Material der Kategorie 1 (K 1) darf nicht in Biogasanlagen eingesetzt werden.
- Material der Kategorie 2 (K 2) muss zur Verwendung in Biogasanlagen drucksterilisiert werden. Hiervon ausgenommen sind Betriebe, die Gülle zusammen mit Magen- und Darminhalt, Milch und Kolostrum aus einem einzigen Betrieb mit Nutztieren einsetzen. Der Betrieb darf dabei keinen tiereseuchenrechtlichen Maßregeln unterliegen und der Fermentationsrückstand nur auf Flächen dieses Betriebes ausgebracht werden. Weiterhin sind Betriebe ausgenommen, die Gülle aus Betrieben einsetzen, die keinen tiereseuchenrechtlichen Maßregeln unterliegen.
- Für Material der Kategorie 3 (K 3) ist eine Pasteurisierung bzw. eine äquivalente keimreduzierende Behandlung durchzuführen.

Die hier betrachteten landwirtschaftlichen Biogasanlagen bedürfen der Zulassung nach Verordnung (EG) Nr. 1069/2009, wenn sie tierische Nebenprodukte einsetzen. Anlagen, die bereits vor 2009 in Betrieb gegangen sind, müssen eine Zulassung nach Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 vorweisen können. Diese Zulassung ist auch erforderlich, wenn eine Mischung aus tierischen Nebenprodukten (z.B. Gülle) und nachwachsenden Rohstoffen vergoren wird. Die Einsatzstoffe dürfen nur aus Betrieben stammen, die keinen tiereseuchenrechtlichen Maßregeln unterliegen.

Seit der Aufhebung des Ausschließlichkeitsprinzips für Neuanlagen im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG, 2012) ist entsprechend genehmigte Anlagen die Verschneidung von nachwachsenden Rohstoffen auch mit nur grundvergüteten Einsatzstoffen (ggf. Abfällen)

erlaubt. Vor einem solchen Ansinnen sollte aber geprüft werden, ob dadurch ein Bonus-Verlust droht. Wenn risikobehaftete Substrate verstärkt eingesetzt werden, steigt allerdings auch das hygienische Risikopotenzial. Beim Einsatz von Bioabfällen unterliegen die Behandlung und die Ausbringung der erzeugten Gärprodukte den Anforderungen der Bioabfallverordnung (BioAbfV, 2022). Eingesetzte Substrate müssen dieser entsprechend hygienisiert und stabilisiert werden. Des Weiteren sind die Grenzwerte der BioAbfV für Fremdstoffe und Schwermetalle einzuhalten.

Das Gärprodukt von Biogasanlagen unterliegt bei Inverkehrbringen zur landwirtschaftlichen Verwertung der Düngemittelverordnung und ist dementsprechend auch zu kennzeichnen (DüMV, 2019). Wenn die Lagerung in einem gemeinschaftlichen Lager (z.B. Gärproduktlager) erfolgt und die Abgabe an einen Dritten vorgenommen werden soll, der nicht an der Nutzung des Lagers beteiligt ist, muss es beim Inverkehrbringen mit Angaben zum Salmonellengehalt, und *E. coli* bzw. Enterokokken gekennzeichnet sein. Dies ist insbesondere dann zwingend erforderlich, wenn Material der Kategorie 3 eingesetzt wird.

Die Autoren haben hier die gesetzlichen Anforderungen aus dem Bereich Hygiene zusammengestellt, die sie für die Praxis als besonders wichtig erachten. Die Aufstellung ist keinesfalls vollständig, sie stellt einen eher generellen Überblick über die aktuellen rechtlichen Zusammenhänge und Querbezüge im Bereich Hygiene dar. Für Details und andere Bereiche wird auf das Biogashandbuch Bayern, Kapitel 2.2.6 (insbesondere 2.2.6.2) verwiesen (<https://www.lfu.bayern.de/energie/biogashandbuch/doc/kap226.pdf>). Zu bedenken ist, dass künftige gesetzliche Änderungen auch derzeit nicht vorhersehbare, gegebenenfalls veränderte Handlungsweisen erfordern können.

6 Human- und Tierhygiene

Es gibt eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Erreger von Krankheiten bei Mensch und Tier. Die meisten sind an die Körpertemperatur ihres Wirts angepasst und sterben bei erhöhter Temperatur relativ schnell ab, während sie tiefere Temperaturen meist länger überdauern können. Solche Erreger, beispielsweise die als Hygienisierungsindikator verwendeten Salmonellen, sterben schon bei relativ kurzer Verweilzeit im Biogasprozess und bei erhöhter Temperatur schnell ab (Fröschle et al., 2012; Abbildung 1): Bei 60°C wurden im Prozess mit Maissilage schon nach weniger als 3,2 min mehr als 10^8 Salmonellen abgetötet, während die Inaktivierung bei 38°C, abhängig von der Prozessführung und der chemischen Zusammensetzung des Gärgemischs, nach 2 Tagen gesicherter Verweilzeit (MGRT) zwischen 99,995 % und 99,999999 % (4,5 bis 8 \log_{10} -Stufen) betrug. Beim Betrieb mit Grassilage erfolgte die Hygienisierung noch schneller. Die Ergebnisse unterstreichen die bisherigen Erkenntnisse, sie zeigen aber auch, dass die Bedeutung der chemischen Zusammensetzung des Gärgemischs bei der Inaktivierung bisher unterschätzt wurde.

Salmonella Senftenberg (Abbildung 1) wird als Hygienisierungsindikator (s.a. Kapitel 3.2) verwendet. Den bisherigen Untersuchungen zufolge sind die in Abschnitt 2 genannten pathogenen *E. coli* Varianten (u.a. EHEC, EPEC, EAEC und ähnliche) sowie außer den Sporenbildnern (s. unten) die meisten bekannten Krankheitserreger bei Mensch und Tier vergleichbar empfindlich wie oder empfindlicher gegenüber den Bedingungen in der anaeroben Vergärung als *S. Senftenberg* und sterben dementsprechend auch ähnlich schnell oder schneller ab (Tabelle 2; Hoferer, 2001; Godfree and Farrell, 2005; Fröschle et al., 2015b). Damit ist in der Praxis mit einem Nachweis lebender derartiger Erreger im Gärprodukt bei den

üblichen hydraulischen Verweilzeiten nur bei Vorliegen sehr hoher Ausgangskonzentrationen, einer ausgeprägten Kurzschlussströmung und/oder bei Einbettung der Erreger in eine stark schützende Hülle bzw. Matrix zu rechnen. Meist ist der Prozess in Praxisanlagen auch mehrstufig gestaltet (Fermenter – Nachgärer). Dadurch addiert sich die Absterberate nicht nur, sie ist zumindest rechnerisch multipliziert. Gegenüber der Vergärung in einem Fermenter mit dem gleichen Volumen ist die Hygienisierung auf alle Fälle deutlich gefördert (Lebuhn und Effenberger, 2011; Fröschle et al., 2015a).

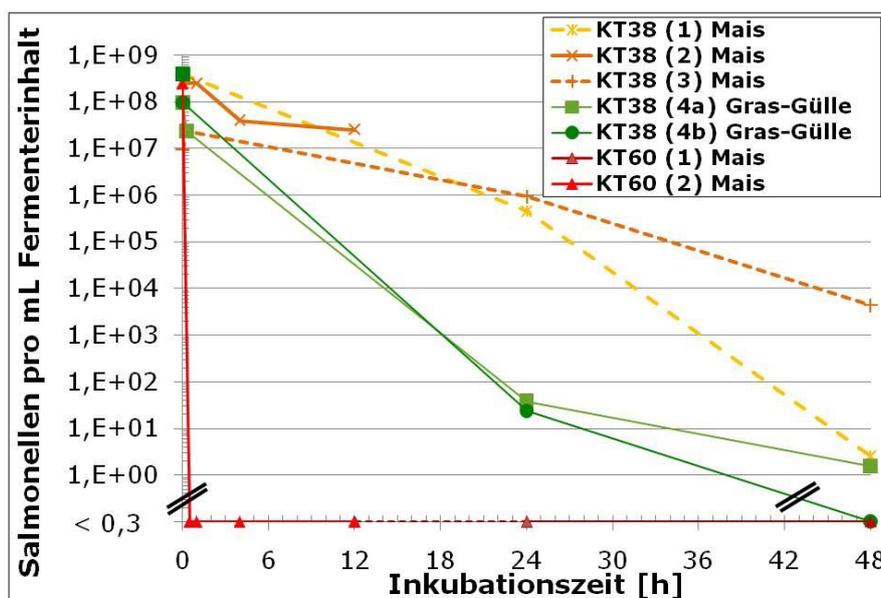


Abbildung 1: Abtötung von *Salmonella* Senftenberg im Biogasprozess bei verschiedenen Prozessbedingungen; KT38, KT60: Keimträgerversuch bei 38°C bzw. 60°C Betriebstemperatur

Human- und Tierpathogene finden sich eher in tierischen Reststoffen. In pflanzlichen Substraten bzw. Einsatzstoffen kommen sie typischerweise nicht in höherer Konzentration vor, hier ist eher mit der Gegenwart von Pflanzenschädlingen, Pilzgiften (Mykotoxinen) und Pflanzenschutzmitteln zu rechnen. Wie aber Untersuchungen zu Ursachen der EHEC/EAEC-Epidemie in Deutschland 2011 (vgl. Abschnitt 2) zeigen, ist eine Gegenwart infektiöser Krankheitserreger in Pflanzenteilen nicht völlig auszuschließen.

Tabelle 2: Expositionszeiten in Stunden (h) oder Tagen (d) in Biogasprozessen, die zur Reduktion der genannten aktiven Krankheitserreger um den Faktor 10 (90 %) führen („D-Wert“)

Organismus	D-Wert mesophil	D-Wert thermophil
<i>Salmonella</i> Senftenberg W 775	9,4 ± 3,7 h (38°C)	≤ 3,2 min (60°C)
EPEC LGL 38122	7,5 ± 5,2 h (38°C)	≤ 3,2 min (55°C)
<i>Clostridium botulinum</i> LGL E2625	34,6 ± 9,2 d (38°C)*	1,2 ± 1,0 d (55°C)*
<i>Clostridioides difficile</i> RT 140, RT 010	10,8 – 19,7 d (38°C)*	3,0 – 4,1 d (55°C)*

* Sporenbildung ist berücksichtigt

Widerstandsfähige Organismen scheinen den Vergärungsprozess weniger dezimiert bzw. geschädigt überstehen zu können. Solche Erreger sind insbesondere sporenbildende Bakterien wie die in Abschnitt 2 genannten *Clostridium*- und *Bacillus*-Arten (Lebuhn und Wilderer, 2006; Fröschle et al., 2015b) sowie *Clostridioides difficile* (Mößnang et al., 2019). Wenn solche Krankheitserreger in nur geringer Konzentration in der Prozesskette nachgewiesen werden, ist dies noch kein Grund zur Besorgnis, da sie ubiquitär (überall in der Umwelt) vorkommen. Allerdings ist der „natürliche Hintergrund“ nur für wenige dieser Erreger bekannt, hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Bei einem Nachweis solcher Krankheitserreger in höherer Konzentration wären aber Bedenken angebracht, weil ein Hinweis auf eine unzulässige Verunreinigung mit Tierleichen bzw. Leichenteilen gegeben wäre. *Clostridium*- und *Bacillus*-Arten sind am Verwesungsprozess beteiligt, und einige dieser Arten können mit die stärksten bekannten Toxine (z.B. Botulinum-Neurotoxine, BoNT) bilden. Ergebnissen von Köhler (2011; 2012) zufolge wurde *C. botulinum* in Ausnahmefällen auch in der Verfahrenskette von mit Bioabfällen betriebenen Biogasanlagen vereinzelt in Substraten und Gärresten gefunden. Der Autor zeigte auch, dass das BoNT-Bildungsvermögen von *C. botulinum* im Biogasprozess reduziert wird. Dem entsprechend fanden Bagge et al. (2010) eine Abnahme von *C. botulinum* im mesophilen Vergärungsprozess einer mit tierischen Nebenprodukten incl. Schlachtabfällen betriebenen Biogasanlage. Während die Sporenbildner die eigentlich zur Hygienisierung vorgeschaltete Pasteurisierung unbeschadet überstanden, wurde *C. botulinum* nach der anaeroben Vergärung nicht mehr gefunden.

Weiterhin konnten in einer Studie (Breves, 2011; 2014) in den Gärgemischen und in den Gärprodukten von 15 bzw. 80 verschiedenen niedersächsischen landwirtschaftlichen Biogasanlagen keine pathogenen Clostridien, keine krankheitserregenden *E. coli* und Salmonellen nur in einer Substratprobe nachgewiesen werden. In einer anderen Untersuchung (Dohrmann et al., 2015) wurden in lediglich 3 Proben *C. botulinum* bzw. *C. argentinense* zugeordnete DNA-Sequenzen gefunden, es war aber auch in diesen im Bioassay keine Botulinum-Neurotoxin- (BoNT-) Toxizität feststellbar. Weiterhin wurden in einer neueren Bayerischen Studie (Fröschle et al., 2015a; 2015c) tierische (tSub) und pflanzliche Substrate (pSub), Gärgemische (FI) und Gärprodukte (GP) aus landwirtschaftlichen Praxis-Biogasanlagen auf die Anwesenheit von Krankheitserregern untersucht. In keiner Probe waren BoNT-bildende *Clostridium* spp., *C. chauvoei*, *C. haemolyticum* und *C. septicum* nachzuweisen. *C. perfringens* und *C. novyi* wurden mit sehr geringer Nachweisrate gefunden, EHEC dagegen in Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft relativ häufig. *Salmonella* spp. wurden in Gärgemischen untersucht und nicht nachgewiesen. Dem ähnlich wurde *Clostridioides difficile* zwar in der gesamten Biogas-Prozesskette gefunden, dabei besonders in Substraten tierischer Herkunft, in Gärgemischen und Gärresten aber nur in äußerst geringer Konzentration (Mößnang et al., 2019). Für eine Anreicherung von Krankheitserregern während der unterschiedlichen Biogasprozesse lag in keiner der Studien ein Hinweis vor.

Um das Schicksal relevanter Sporenbildner in Biogasprozessen zu prüfen, wurde in Bayerischen Studien (Fröschle et al., 2015a; 2015c; Mößnang et al., 2019) in Keimträgerversuchen das Verhalten von einem nicht-toxinogenen *Clostridium botulinum*-Stamm (LGL E2625) und von zwei nicht-toxinogenen *Clostridioides difficile* Stämmen (RT 140, RT 010) in mesophil bzw. thermophil betriebenen Laborfermentern untersucht. Es ergab sich bei beiden Gärtemperaturen für alle Stämme eine Reduktion. Bei 38°C wurden mittlere D-Werte (dezimale Reduktion; Zeit, die zur Abtötung um den Faktor 10 notwendig ist; s.a. 3.3

Hygienisierung) von ca. 35 d für *C. botulinum* und von 10,8 – 19,7 d für *Clostridioides difficile* bestimmt (Tabelle 2). Thermophil verlief die dezimale Reduktion schneller (etwa 1 d bei *C. botulinum* und 3,0 – 4,1 d bei *C. difficile*, Tabelle 2).

Eine neuartige Herausforderung stellt die Verbreitung von Antibiotikaresistenzen auch in der Landwirtschaft dar. Zwar besteht zur Wirkung unterschiedlicher Bedingungen in Biogasprozessen noch Forschungsbedarf, es zeichnet sich jedoch ab, dass bei thermophilem Betrieb und längeren Verweilzeiten verschiedenste Antibiotikaresistenzgene (ARGs) stärker abgebaut werden als bei mesophilem Betrieb (Mößnang et al., 2019; Wang et al., 2021; Kempf et al., 2022), bei dem ARGs auch in gedüngtem Boden nachgewiesen wurden (Visca et al., 2022). ARGs scheinen sich demnach ähnlich wie die ARG-tragenden Mikroorganismen zu verhalten. Zu berücksichtigen ist, dass manche ARGs auch natürlicherweise vorkommen und nicht über Antibiotika-Behandlungen „herangezüchtet“ wurden. Weiterhin ist auch noch unklar, ob ARGs auf Mikroorganismen übertragen werden können, die zentrale Funktionen in Biogasprozessen ausüben (Mößnang et al., 2019; Sun et al., 2022).

Der Einsatz von Tierkadavern oder -teilen in Biogasanlagen ist bekanntermaßen verboten. Es ist aber nicht auszuschließen, dass Kleintiere (z.B. Mäuse und Ratten bei der Nagerbekämpfung, Vögel/Geflügel) unbemerkter Weise in den Prozess gelangen. Wenn sie sich schon im Verwesungsprozess befinden, können sie wie oben beschrieben mit den genannten *Clostridium*- und *Bacillus*-Krankheitserregern befallen sein und stellen dann eine potentielle Infektionsquelle dar. Es ist nicht auszuschließen, dass mit der immer großflächigeren Beerntung und Mahd getötete Kleintiere (z.B. Kitze, Vögel, Mäuse) in die Silagen gelangen (zur Vermeidung siehe Kapitel 9 Empfehlungen für eine gute fachliche Praxis hinsichtlich Hygieneanforderungen) und mit den Erregern infiziert werden. Der Betreiber sollte deswegen auf eine Gegenwart toter Kleintiere in der Substratmischung achten und sie ggf. sachgemäß entsorgen. Aus ähnlichen Gründen gehört auch Kot von Fleischfressern nicht in eine landwirtschaftliche Biogasanlage. Wie mit der Gülle einzelner erkrankter Tiere zu verfahren ist, sollte mit dem zuständigen Veterinäramt geklärt werden.

7 Phytohygiene

Nach aktuellem Rechtsstand unterliegen Gärprodukte aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen beim Inverkehrbringen auch den Anforderungen der DüMV an die Phytohygiene. Hierzu geben Seigner et al. (2011) einen Überblick. Quarantäneschädlinge (QSO) wie Kartoffelkrebs, Ring- oder Schleimfäule dürfen nicht verbreitet und damit auch nicht in die Biogasanlage eingebracht werden. Mit widerstandsfähigen Pflanzenschädlingen befallene Wirtschaftsdünger bzw. Gärprodukte können die Anforderungen der Phytohygiene nur erfüllen, wenn sie einer geeigneten Hygienebehandlung unterzogen werden. Sie dürfen nur in Verkehr gebracht werden, wenn neben der hygienischen auch die phytohygienische Unbedenklichkeit gewährleistet ist, wenn sie also frei sind von QSO, widerstandsfähigen Pilzen und thermoresistenten Viren.

Um das Hygienisierungspotenzial des Biogasprozesses im Hinblick auf phytopathogene Schaderreger zu evaluieren, führten u.a. Seigner et al. (2010) Untersuchungen durch. Die Ergebnisse des Monitorings verschiedener Praxisanlagen ergaben keinen Hinweis auf eine Verbreitung von Pilzkrankheiten durch landwirtschaftliche Biogasanlagen. Für die meisten untersuchten Schadpilze ergab sich, dass die Gärprodukte bei praxisüblicher

Verfahrensführung, also bei mesophiler Vergärung (38 – 39°C) und einer hydraulischen Verweilzeit von 30 bis 40 d, phytohygienisch unbedenklich waren. Die Autoren stellten allerdings bei mesophilen Bedingungen in Laborversuchen ein Verschleppungsrisiko für persistentere Erreger fest, beispielsweise für den Erreger der Ring- und Schleimfäule (QSO, 30 d bzw. 100 d Überdauerung), den Kartoffelkrebserreger (QSO, 137 d Überdauerung), die Bakterielle Gräserwelke (50 d Überdauerung), den Tabakmosaikvirus (78 d Überdauerung) und für *Verticillium albo-atrum* (8 Wochen Überdauerung bei Hopfen). Wegen des Verschleppungsrisikos kann ein Einbringen von mit persistenteren Erregern befallenem Substrat und von widerstandsfähigen Unkrautsamen in mesophil betriebene Biogasanlagen ohne Hygienisierungsstufe nicht empfohlen werden.

Schultheiss et al. (2012) folgern aus einer Zusammenstellung verschiedener Untersuchungen zum Thema, dass sich „zumindest im Hinblick auf die Verbreitung von Pilzkrankheiten sowohl bei thermo- als auch mesophil betriebenen Anlagen keine Hinweise auf ein Risiko für eine Verschleppungsgefahr von Pathogenen mit den Gärprodukten ergeben“. Es wird hervorgehoben, dass eine gute Silierung, eine lange Gärproduktlagerung und vor allem eine mehrstufige Prozessgestaltung die Hygienisierungsleistung fördern. Um mögliche Infektionsketten zu unterbrechen und möglichst zu unterbinden, sollte das Gärprodukt bei Hinweisen auf Gegenwart eines wirtsspezifischen Erregers nicht auf Flächen ausgebracht werden, die den Wirt des Erregers in der Fruchtfolge haben. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2 ist Vorsicht geboten, wenn grobkörnige Substrate mit schützender Matrix (z.B. Kartoffeln) (mit)vergoren werden sollen. Partien mit Befall durch Quarantäneschädlinge müssen sachgemäß entsorgt werden, in Zweifelsfällen ist eine Absprache mit dem amtlichen Pflanzenschutzdienst erforderlich. Für Chargen mit Befall durch andere Schädlinge und/oder Durchsetzung mit Unkrautsamen wird die Entsorgung in einer Bioabfallanlage bzw. Biogasanlage mit Pasteurisierung empfohlen. Eine Alternative könnte auch die thermophile Vergärung sein, da ähnlich der in Kapitel 6 genannten Ergebnisse im Bereich Human- und Tierhygiene, thermophil eine wesentlich höhere Absterberate von Unkrautsamen und Parasiten erzielt wurde als bei mesophiler Vergärung (Johansen et al., 2013).

Weitere Ausführungen zum Themenkreis Biogasanlagen und Phytohygiene finden sich bei Fröschle et al. (2015b).

8 Umwelthygiene

Mit der Bildung von Biogas, der Überführung der organischen Substanz in gasförmige Verbindungen, verliert das Gärgemisch entsprechend an Masse und Volumen. Es geht auch ein Teil Wasser aus dem Gärgemisch als Wasserdampf in die Gasphase über. Gleichzeitig werden Salze, Schwermetalle und andere, nicht abbaubare Feststoffe nicht oder praktisch nicht in die Gasphase überführt. Ihre Konzentration nimmt daher im verbleibenden Gärgemisch und damit im Gärprodukt zu, während sich ihre absoluten Gehalte bzw. die Frachten nur unwesentlich ändern. Solche Verbindungen reichern sich also gegenüber ihrer Konzentration in der Substratmischung eher an.

Weiterhin können verschiedene, u.U. schädliche organische Fremdstoffe (z.B. Antibiotika, Desinfektionsmittel, hormonell wirksame Verbindungen, Fungizide u.a.m.) und Schwermetalle in den Prozess gelangen (Bauer et al., 2009; Sayder et al., 2009). Schwermetalle werden dem Gärgemisch auch mit dem Einsatz von Prozesshilfsmitteln (Henkelmann et al., 2022) wie Spurenelementmischungen und durch Geräteabrieb zugeführt. Typischerweise werden die

genannten Fremdstoffe und Gifte verstärkt beim Einsatz von Gülle und Reststoffen aus der Tierhaltung eingebracht. Ein Eintrag von Pilzgiften (Mykotoxinen) kann auch über verpilzte Silagen ([Hartel et al., 2019](#)) erfolgen.

Viele dieser Substanzen sind gesundheitsschädlich oder giftig, manche, z.B. Nickel oder Dioxine, sogar sehr giftig. Zur Vorbeugung vor eventuellen schädlichen Wirkungen beim Aus- bzw. Inverkehrbringen sehen die DüMV (2019) und die BioAbfV (2022) Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte für diese Substanzen vor (Tabelle 3).

Tabelle 3: Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte für verschiedene Substanzen in der DüMV und der BioAbfV

Substanz	DüMV Kennzeichnung ab	DüMV Grenzwert	BioAbfV (Aufbringung < 20 t TM / 3 a)	BioAbfV (Aufbringung < 30 t TM / 3 a)
	Konzentration in der Trockenmasse (mg•kg ⁻¹)			
Blei	100	150	150	100
Cadmium	1,0	1,5	1,5	1
Chrom (ges.)	300	----	100	70
Chrom (VI)	1,2	2	---	---
Kupfer	500** / 200*	700*	100	70
Nickel	40	80	50	35
Quecksilber	0,5	1,0	1,0	0,7
Zink	1000** / 200*	5000*	400	300
Arsen	20	40	---	---
Thallium	0,5	1	---	---
Selen	5	---	---	---
Perfluorierte Tenside	0,05	0,1	---	---
Summe Dioxine, dl-PCB (WHO-TEQ 2005)***		30 ng/kg****		

* nur Typen bezeichnete Düngemittel, nicht für Wirtschaftsdünger

** nur für Wirtschaftsdünger

*** gilt nicht für Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft und Gärprodukte ohne Bioabfallanteil

**** 8 ng/kg bei Anwendung auf Grünland zur Futtergewinnung und auf Ackerfutterflächen mit nichtwendender Bodenbearbeitung nach der Aufbringung, ausgenommen Maisanbauflächen.

Die Kennzeichnungsschwellen und Grenzwerte werden bei Gärprodukten typischerweise eingehalten. Bei Einsatz von Schweine- und besonders von Ferkelgülle, teilweise aber auch von Rindergülle und Geflügelkot, können allerdings fallweise deutlich höhere, primär wohl meist fütterungsbedingte Cu- und Zn-Gehalte auftreten (Müller, 2006; 2007). Den Betreibern wird geraten, die Gärprodukte vor der Ausbringung auch auf den eigenen Flächen auf Schwermetalle zu untersuchen und die Düngung entsprechend der guten fachlichen Praxis zu gestalten.

Weil bei der Vergärung von Mischungen mit hohen Anteilen mancher Substrate ein Mangel an bestimmten Spurenelementen auftreten kann, setzen viele Betreiber den Substraten Spurenelementmischungen zu. Manche Schwermetalle wie z.B. Nickel (Ni), Selen und Kobalt

(Co) sind sehr giftig, weswegen besondere Sicherheitsvorkehrungen bei der Lagerung und Applikation sowie notwendigen Fachkunde berücksichtigt werden müssen. Weitere Informationen sind den jeweiligen Sicherheitsdatenblätter der Inverkehrbringer bzw. der TRGS 529 zu entnehmen.

Lebuhn und Effenberger (2012) führen Zielwerte für Spurenelementkonzentrationen für einen effizienten Biogasprozess mit schwefelarmen nachwachsenden Rohstoffen auf. Eine regelmäßige oder zumindest sporadische Messung der Spurenelementgehalte in der Substratmischung, im Fermenter und im Gärprodukt durch erfahrene Laboratorien (Henkelmann et al., 2022) macht nicht nur dafür Sinn, Mangelsituationen in der Ernährung der Mikroorganismen rechtzeitig zu erkennen und damit Prozessstörungen vorzubeugen. Einschlägige Messwerte geben auch Auskunft über einen eventuell unnötig hohen Einsatz dieser Stoffe, der zu Vergiftungen und Umweltschäden führen könnte. Hier gilt ganz ausdrücklich: „viel mehr“ bringt eben nicht „viel mehr“ sondern kann schwerwiegende Gesundheits- und Umweltschäden hervorrufen.

Zumindest erwähnt werden sollen an dieser Stelle auch die Gase Ammoniak (NH_3) und Schwefelwasserstoff (H_2S), die besonders beim Abbau proteinreicherer organischer Substanz entstehen (Bauer et al., 2009). Einige Unfälle sogar mit Todesfolge machen es ratsam, bei entsprechend kritischer Substratzusammensetzung insbesondere die H_2S -Konzentration im Arbeitsbereich zu überwachen, um die maximalen Arbeitskonzentrationen einzuhalten. Entsprechende Hinweise finden sich in der TRGS 529 und müssen beachtet werden.

9 Empfehlungen für eine gute fachliche Praxis hinsichtlich Hygieneanforderungen

Im Folgenden sind stichpunktartig Empfehlungen für die Praxis zusammengestellt, die sich aus den im vorhergehenden Textteil dargestellten Fakten und dem Stand des Wissens ergeben. Sie stellen keine Vorgaben sondern fachliche Hinweise und Anreize dar, die jeweiligen Gegebenheiten auf dem eigenen Betrieb hinsichtlich der Hygienesituation zu überprüfen und ggf. zu verbessern. Bei Beachtung der Hinweise kann der hygienische Status auf dem Betrieb in der gesamten Prozesskette optimiert werden.

Anlagenplanung, Prozessführung:

- Mehrstufige sequenzielle Fermenteranordnung bietet eine bessere Prozesseffizienz sowie eine deutlich effizientere Hygienisierung.
- Bypassmöglichkeiten (direkt ins Endlager) und hydraulische Kurzschlüsse weitestmöglich eliminieren bzw. unterbinden.
- Nutzung der Abwärme des BHKW zur Hygienisierung, z.B. über eine Pasteurisierung oder eine thermophile Vergärungsstufe im Fall von Hygieneproblemen.
- Schwermetalle/Spurenelemente regelmäßig messen (Substratmischung, Fermenter und Gärprodukt), bilanzieren und eventuellen Bedarf am Zielbereich orientieren und ggf. ausgleichen.
- Auf Sauberkeit auf der gesamten Anlage ist zu achten.
- Trennung der Biogasanlage und der Tierhaltung, insbesondere bei den Lagerbehältern von Gülle und Gärprodukt (s.a. <https://www.biogas-forum-bayern.de/media/files/0001/Hinweise-zum-Gulleinsatz-in-Biogasanlagen.pdf>).
 - Reinigung und Desinfektion von Fahrzeugen und Behältern
 - Reinigung / Wechsel von Schuhwerk, Kleidung, Händen etc.

Ernte/Mahd:

- Kontaktaufnahme vor der Mahd mit dem Jagdpächter.
- Begehen von Verdachtsflächen nach Möglichkeit mit Hunden am Vortag, Vergrämungsmethoden anwenden, Einsatz eines „Wildretters“.
- Von innen nach außen mähen, um Tieren, die sich im Feld aufhalten, die Flucht zu ermöglichen.
- Ausreichend Abstand zum Boden einhalten, da Bodenpartikel Träger von Krankheitserregern und Schadstoffen sein können.

Silierung:

- Sichtkontrolle der angelieferten Materialien auf Verunreinigungen.
- Auf Sauberkeit (besenrein) des Silos achten.
- Verendete Tiere (z.B. durch Maßnahmen zur Schädnerbekämpfung) einsammeln und ordnungsgemäß entsorgen (nicht in die Biogasanlage einbringen!).
- Eine Abdeckung von Silos und Lagerbehältern kann einen Eintrag von Krankheitserregern z.B. über Vogelkot verhindern.
- Eine gute und ausreichend lange Silierung reduziert eventuell vorhandene Krankheitserreger.
- Bildung von Silagesickerwässern vermeiden und deren Austrag in die Umwelt unterbinden.

Gülle:

- Auf Sauberkeit im Bereich der Tierhaltung und der Biogaserzeugung achten.
- Kein Fleischfresserkot oder fleischhaltige Abfälle in die Güllegrube oder in den Festmist „entsorgen“.
- Zugang von Tieren zu Substraten unterbinden, auch zur Güllegrube.
- Bei Verdacht auf Krankheiten in der Tierhaltung bzw. im Stall umgehend das zuständige Veterinäramt kontaktieren und den Einsatz der Gülle in die Biogasanlage sowie als Dünger aussetzen (aber Achtung: Verlust des Güllebonus möglich, aber wiederum Ausnahmen aufgrund einer Sperre im Sinne von § 6 Absatz 1 Nummer 18 des Tiergesundheitsgesetzes möglich (siehe § 101 Abs. (3) EEG 2017). Eine Analyse der Gülle auf Krankheitserreger, ggf. nicht nur auf die gesetzlich geforderten, kann für eine Entscheidung hilfreich sein.

Biogasprozess:

- Je höher die Prozesstemperatur ist, desto schneller erfolgt die Hygienisierung (beim Einsatz proteinreicherer Substrate wird er aber auch zunehmend instabil; generell sind Temperaturen über ca. 60°C kritisch).
- Die Prozesstemperatur sollte nicht absinken, bei höheren Temperaturen ist die Hygienisierungsleistung besser.
- Eine Biogasanlage sollte nicht mit Material angefahren werden, das mit Krankheitserregern belastet ist. Eine entsprechende Analyse des Inokulums (Impfmaterials) ist hier hilfreich.
- Der Prozessablauf sollte zuweilen auf Vorliegen von Kurzschlussströmen untersucht werden, z.B. über Restgas-/Restmethanpotenzialbestimmungen.
- Ein hoher Methanertrag weist auf eine effizient arbeitende Biozönose hin. Krankheitserreger haben hier kaum Chancen sich anzusiedeln und werden reduziert.

- Eine lange Verweilzeit ohne Kurzschlussströme gewährleistet die bestmögliche Hygienisierung und Prozesseffizienz. Insbesondere sollten Kurzschlüsse von frischem Material in das Gärproduktlager vermieden werden.
- Eine gute Durchmischung fördert die Prozesseffizienz und damit die Hygienisierungsleistung.

Gärrest/Gärprodukte:

- Das Gärprodukt sollte so gelagert werden, dass keine Krankheitserreger von frischem Material oder aus der Umwelt (z.B. auch durch Tiere) eingetragen werden können („Schwarz-Weiß-Trennung“; Re-Infektion verhindern).
- Bei Verdacht auf Vorliegen von Krankheitserregern sollten in Absprache mit dem zuständigen Veterinär zusätzlich zu den gesetzlich geforderten u.U. weitere, spezifische Analysen beauftragt werden.

Zitervorschlag:

Lebuhn, M., J. Ostertag, M. Hartel und M. Knabel (2023): Empfehlungen für eine gute fachliche Praxis in landwirtschaftlichen Biogasanlagen aus hygienischer Sicht. In: Biogas Forum Bayern III – 8/2023 (4. Auflage), Hrsg. ALB Bayern e.V., Stand [Abrufdatum].

10 Literaturverzeichnis

- Andrade, D., C. Marin-Perez, H. Heuwinkel, M. Lebuhn und A. Gronauer (2009): Biogasgewinnung aus Grassilage: Untersuchungen zur Prozessstabilität. Kongressband Internationale Wissenschaftstagung Biogas Science 2009, 2.12. – 4.12.2009, Erding, LfL-Schriftenreihe 16/3, ISSN 1611-4159, 529-538
- Bagge, E., M. Persson and K.-E. Johansson (2010): Diversity of spore-forming bacteria in cattle manure, slaughterhouse waste and samples from biogas plants. *Journal of Applied Microbiology* 109, 1549–1565, ISSN 1364-5072
- Bauer, C., M. Lebuhn und A. Gronauer (2009): Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. LfL-Schriftenreihe 12, ISSN 1611-4159, pp. 38
- BioAbfV (2022): Verordnung zur Änderung abfallrechtlicher Verordnungen vom 28. April 2022; Bundesgesetzblatt Jahrgang 2022 Teil I Nr. 15, S. 700 – 722 (https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl122s0700.pdf%27%5D__1666300293669)
- Breves, G. (2011): Untersuchungen zum mikrobiologischen Risikopotenzial von Gärsubstraten und Gärresten aus niedersächsischen Biogasanlagen. Physiologisches Institut der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover. http://www.ml.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=1375&article_id=101070&psmand=7
- Breves, G. (2014): Abschlussbericht - Mikrobiologisches Risikopotenzial von Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung von Hühnertrockenkot als Gärsubstrat (Teilprojekt 2). <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Tier/Tiergesundheit/Tierseuchen/Botulismus-Abschlussbericht-Hannover.htm>
- Carraturo, F., Panico, A., Giordano, A., Libralato, G., Aliberti, F., Galdiero, E., and Guida, M. (2022): Hygienic assessment of digestate from a high solids anaerobic co-digestion of sewage sludge with biowaste by testing *Salmonella* Typhimurium, *Escherichia coli* and SARS-CoV-2. *Environmental Research*, 206, 112585.
- Dohrmann, A.B., M. Walz, A. Löwen und C.C. Tebbe (2015): *Clostridium* cluster I and their pathogenic members in a full-scale operating biogas plant. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 99(8): 3585-3598
- DüMV (2019): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414).
- Dunière, L., A. Gleizal, F. Chaucheyras-Durand, I. Chevallier, D. Thévenot-Sergentet (2011): Fate of *Escherichia coli* O26 in corn silage experimentally contaminated at ensiling, at silo opening, or after aerobic exposure, and protective effect of various bacterial inoculants. *Appl. Environ. Microbiol.* 77/24, 8696-8704.
- EEG (2012): Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG)

- EEG (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, "Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 21. Dezember 2020 (BGBl. I S. 3138) geändert"
- Fröschle, B., B. Munk, A. Gronauer and M. Lebuhn (2012): Inactivation of *Salmonella* in biogas processes – determination by conventional and qPCR methods. In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice 2012, pp 14.
- Fröschle, B., U. Messelhäusser, M. Lebuhn, und C. Höller (2015a): Abschlussbericht des Forschungsprojektes "Verhalten von EHEC und krankheitserregenden Clostridien in Biogasanlagen", Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Oberschleißheim
- Fröschle, B., M. Heiermann, M. Lebuhn, U. Messelhäusser and M. Plöchl. (2015b): Hygiene and Sanitation in Biogas Plants. In: Biogas Science and Technology (G.M. Guebitz, ed.), Adv. Biochem. Eng. Biotechnol. 151, 63-99
- Fröschle, B., U. Messelhäusser, C. Höller und M. Lebuhn M (2015c): Fate of *Clostridium botulinum* and incidence of pathogenic clostridia in biogas processes. J. Appl. Microbiol. 1–12. doi:10.1111/jam.12909
- Godfree, A. and J. Farrell (2005): Processes for Managing Pathogens. J. Environ. Qual. 34, 105–113
- Hartel, M., Preißler, D. und Ostertag, J. (2019): Verpilzte Einsatzstoffe als Biogassubstrat. <https://www.biogas-forum-bayern.de/bfb6>
- Henkelmann, G., K. Fischer, K. Meyer zu Köcker, K. Koch, M. Lebuhn, M. Effenberger und K. Bayer (2012): Marktübersicht Zusatz- und Hilfsstoffe in Biogasanlagen - Stand August 2022. <https://www.biogas-forum-bayern.de/media/files/0005/markt-bersicht-zusatz-und-hilfsstoffe.pdf>
- Hoferer, M. (2001): Seuchenhygienische Untersuchungen zur Inaktivierung ausgewählter Bakterien und Viren bei der mesophilen und thermophilen anaeroben alkalischen Faulung von Bio- und Küchenabfällen sowie anderen Rest- und Abfallstoffen tierischer Herkunft. Inaugural Dissertation beim Fachbereich Veterinärmedizin an der Freien Universität Berlin, Journal-Nr. 2528, S. 1-211
- Johansen, A., Nielsen, H. B., Hansen, C. M., Andreasen, C., Carlsgart, J., Hauggard-Nielsen, H. and Roepstorff, A. (2013). Survival of weed seeds and animal parasites as affected by anaerobic digestion at meso-and thermophilic conditions. Waste management, 33(4), 807-812.
- Kempf, I., Le Devendec, L., Lucas, P., Druilhe, C., & Pourcher, A. M. (2022). Impact of mesophilic anaerobic digestion and post-treatment of digestates on the transfer of conjugative antimicrobial resistance plasmids. Waste Management, 152, 1-5.
- Köhler, B. (2011): Wechselwirkungen von Clostridien-Tox-Infektionen mit der Umwelt unter besonderer Berücksichtigung von *Clostridium botulinum* und Entsorgungsverfahren in der Tierhaltung. Vortrag an der Tierärztlichen Hochschule Hannover, 30.11.2011, http://www.ml.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=1375&article_id=101070&psmand=7
- Köhler, B. (2012): Hygienische Probleme von Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung von *Clostridium botulinum* und anderer pathogener Clostridien. Vortrag an der TLL Jena. http://www.tll.de/imperia/ft_biog/tbi60412.pdf

- Lebuhn, M. und P. Wilderer (2006): Abschlussbericht des StMUGV-Projekts "Biogastechnologie zur umweltverträglichen Flüssigmistverwertung und Energiegewinnung in Wasserschutzgebieten: wasserwirtschaftliche und hygienische Begleituntersuchung, Projektteil: Mikrobiologische, parasitologische und virologische Untersuchungen". Technische Universität München, Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft.
http://www.sww.bgu.tum.de/fileadmin/w00bom/www/migrated_content/uploads/StMUGV-Abschlussbericht_2006_Lebuhn.pdf
- Lebuhn, M. und M. Effenberger (2011): Hygienische Aspekte beim Betrieb einer Biogasanlage. In: Kongressband des C.A.R.M.E.N. Fachgesprächs „Hygienische Unbedenklichkeit von Biogasanlagen“, 27.10.2011, Rottersdorf/Landau, S. 79-96
- Lebuhn, M. und M. Effenberger (2012): Hygienisierung durch Biogastechnologie. Korrespondenz Wasserwirtschaft 8/12, 419-424
- Mößnang, B. Lerch, B., Kinker, I., Barth, J., Andrade, D., Streicher, G., Kliche, R., Effenberger, M., Osterholz, B., Belmann, P., Sczyrba, A., Zucker, R., Huber, S., Messelhäuser, U. und Lebuhn, M. (2019): Bedeutung und Verbleib von *Clostridium difficile* und anderen neuartigen Erregern in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Abschlussbericht zum Projekt N/15/04 an das Bayerische Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten; 134 Seiten.
- Müller, C. (2006): Schwermetalle und Spurenelemente in Gülle. In: Schweinegülle – Quelle für potentiell unerwünschte Stoffe? LfL-Schriftenreihe 12, 2006, ISSN 1611-4159, S. 29-35
- Müller, C. (2007): Organische und anorganische Schadstoffe in Gülle und Gärresten. In: Chancen und Risiken der pflanzenbaulichen Gärrestverwertung (M. Lebuhn, C. Müller, L. Seigner, M. Effenberger und F. Lichti, 2011),
http://www.nachwaxsenderohstoffe.de/fileadmin/allgemein/pdf/veranstaltungen/Verwertung_Reststoffe_2011/8_Lebuhn_ChancenRisiko.pdf
- Reinhold, G. und O. Jahn (2004): Hygienisierende Wirkungen der Biogaserzeugung auf die Gärsubstrate. In: Tagungsband des 116. VDLUFA-Kongresses Rostock, 13. – 17.9.2004
- Sayder, B., H. Vitz, S. Mohring, U. Merrettig-Bruns, S. Kabasci, G. Hamscher, J. Türk, (2009): Gehemmte Biologie. Biogas Journal 02/09, 44-45
- Seigner, L., R. Friedrich, D. Kaemmerer, P. Büttner, G. Poschenrieder, A. Hermann und A. Gronauer (2010): Hygienisierungspotenzial des Biogasprozesses, Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt. LfL-Schriftenreihe 8, 2010, ISSN 1611-4159
- Seigner, L., M. Wendland und M. Schneider, (2011): Anforderungen an die Hygiene und die Kennzeichnung von Gärresten aus NawaRo-Anlagen bei der Verwendung als Wirtschaftsdünger. https://www.biogas-forum-bayern.de/De/Fachinformationen/Garreste/nachhaltig-erneuerbar-energie_Anforderungenhygiene.html
- Schultheiss, U., H. Döhler, M. Hofmann und S. Wulf (2012): Phytohygienische Aspekte bei der anaeroben Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen – Zusammenfassende Betrachtung. In: Untersuchungen zum phytosanitären Risiko bei der anaeroben Vergärung von pflanzlichen Biomassen in Biogasanlagen, KTBL Darmstadt, S. 80-85

- Tebbe, C.C., A.-B. Dohrmann und S. Baumert (2007): Abschlussbericht über das Vorhaben „Untersuchungen zum qualitativen und quantitativen Vorkommen von *Clostridium botulinum* in Substraten und Gärrückständen von Biogasanlagen. Institut für Technologie und Biosystemtechnik und Institut für Agrarökologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, pp. 109
- Sun, H., Schnürer, A., Müller, B., Mößnang, B., Lebuhn, M. and Makarewicz, O. (2022). Uncovering antimicrobial resistance in three agricultural biogas plants using plant-based substrates. *Science of the Total Environment*, 829, 154556.
- TierNebV (2018): Verordnung zur Durchführung des Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsgesetzes (Tierische Nebenprodukte-Beseitigungsverordnung - TierNebV), vom 27. Juli 2006 (BGBl. I S. 1735), zuletzt (geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 4. Dezember 2018. <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/tiernebv/gesamt.pdf>
- TRGS 529: Technische Regeln für Gefahrstoffe, Tätigkeiten bei der Herstellung von Biogas, TRGS 529, Geändert und ergänzt: GMBI 2015 S. 190-207 [Nr. 11] (vom 13.04.2015) zuletzt geändert und ergänzt: GMBI 2017, S. 778 [Nr. 41-42] (vom 06.10.2017), https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/pdf/TRGS-529.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1774/2002 (Verordnung über tierische Nebenprodukte)
- Verordnung (EU) Nr. 142/2011 der Kommission vom 25. Februar 2011 zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 1069/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates mit Hygienevorschriften für nicht für den menschlichen Verzehr bestimmte tierische Nebenprodukte sowie zur Durchführung der Richtlinie 97/78/EG des Rates hinsichtlich bestimmter gemäß der genannten Richtlinie von Veterinärkontrollen an der Grenze befreiter Proben und Waren
- Visca, A., Rauseo, J., Spataro, F., Patrolecco, L., Grenni, P., Massini, G., Miritana, V.M. and Caracciolo, A.B. (2022). Antibiotics and antibiotic resistance genes in anaerobic digesters and predicted concentrations in agroecosystems. *Journal of Environmental Management*, 301, 113891.
- Wang, Y., Pandey, P.K., Kuppu, S., Pereira, R., Aly, S. and Zhang, R. (2021). Degradation of antibiotic resistance genes and mobile gene elements in dairy manure anerobic digestion. *PloS one*, 16(8), e0254836.

Herausgeber:


Arbeitsgemeinschaft Landtechnik
 und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.
 Vöttinger Straße 36
 85354 Freising
 Telefon: 08161/887-0078
 Internet: <https://www.biogas-forum-bayern.de>
 E-Mail: info@biogas-forum-bayern.de