



Berner
Fachhochschule

Beurteilung der Ansäuerung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoni- akemissionen in der Schweiz - Aktueller Stand

Evaluation de l'acidification du lisier comme mesure pour réduire les émissions d'ammoniac en Suisse - Etat actuel

Evaluation of slurry acidification for mitigating ammonia emissions in Switzerland – Update

Bericht auf Deutsch mit Zusammenfassung auf Französisch und Englisch
Rapport en allemand avec résumé en français
Report in German with summary in English

**Bericht erstellt im Auftrag
des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) 3003 Bern**

Thomas Kupper

Berner Fachhochschule

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften

23. Januar 2017

Inhalt

<i>Zusammenfassung</i>	4
<i>Résumé</i>	5
<i>Summary</i>	6
1. Ausgangslage und Zielsetzung	7
2. Resultate der Literaturrecherche	8
2.1 Chemisch-physikalische Grundlagen.....	8
2.2 Einfluss der Ansäuerung auf chemisch-physikalische Eigenschaften von Gülle	8
2.3 Grundlagen zu den Verfahren.....	8
2.3.1 Übersicht.....	8
2.3.2 Ansäuerung von Gülle im Stall	9
2.3.3 Ansäuerung der Gülle im Lager	9
2.3.4 Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung	9
2.4 Emissionsminderung bei Ansäuerung von Gülle	10
2.4.1 Ansäuerung von Gülle im Stall	10
2.4.1.1 Systembeschreibung	10
2.4.1.2 Daten aus der Literatur.....	11
2.4.1.3 Messungen von kommerziellen Systemen zur Ansäuerung von Gülle.....	13
2.4.1.4 Bemerkungen zur Messmethodik	14
2.4.2 Ansäuerung der Gülle im Lager	15
2.4.2.1 Verlauf des pH-Werts während der Lagerung	15
2.4.2.2 Ammoniak	15
2.4.2.3 Treibhausgase	16
2.4.2.4 Schwefelwasserstoff	17
2.4.3 Ausbringung von angesäuerter Gülle	18
2.4.3.1 Ansäuerung von Gülle während der Ausbringung	18
2.4.3.2 Ausbringung von angesäuerter Gülle (Exaktversuche, Ansäuerung im Lager, im Stall).....	19
2.4.3.3 Modellrechnungen.....	21
2.4.4 Emissionsminderung über sämtliche Emissionsstufen	22
2.5 Einsatz von angesäuerter Gülle im Pflanzenbau	22
2.5.1 Düngewirkung	22
2.5.2 Auswirkungen auf den Boden und das Grundwasser.....	23

2.6 Geruchsbildung	26
2.7 Arbeitssicherheit und Tiergesundheit	27
2.7.1 Ansäuerung von Gülle im Stall	27
2.7.2 Ansäuerung von Gülle während der Ausbringung.....	27
2.8 Weitere mögliche Probleme.....	28
2.8.1 Korrosion von Baumaterialien	28
2.8.2 Schaumbildung.....	28
2.8.3 Verfügbarkeit und Qualität von Schwefelsäure.....	28
2.9 Kosten der Ansäuerung von Gülle	29
3. Diskussion und Schlussfolgerungen.....	31
4. Dank	32
5. Literatur.....	33
Anhang 1	40
Bericht zum internationalen Seminar zur Ansäuerung von Gülle.....	40
1. Dänische Umweltgesetzgebung	40
2. Betriebsbesuche (Notizen in Stichworten)	41
2.1 Ansäuerung von Gülle im Stall, Betrieb mit Schweinezucht	41
2.2 Ansäuerung von Gülle im Stall, Betrieb mit Milchkühen.....	41
Anhang 2.....	43
Anhang 3.....	45

Hinweis: Diese Studie wurde im des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat zum Ziel, den Einfluss der Ansäuerung von Gülle auf Ammoniakemissionen basierend auf einer Literaturstudie und deren Umsetzbarkeit in der Schweiz zu beurteilen. In Dänemark ist diese Technik relativ weit verbreitet (geschätzter Anteil von angesäuerter Gülle für 2016: rund 20 %). Mehrere Systeme sind als Techniken zur Emissionsminderung anerkannt und auf einer Liste des dänischen Umweltbundesamtes aufgeführt.

Schwefelsäure ist in der Praxis die am häufigsten angewendete Säure. Bei der Ansäuerung von Gülle auf einem Zielwert von ca. pH 5.5 bis 6.0, welcher je nach Verfahren zur Erreichung einer wesentlichen Emissionsminderung notwendig ist, verändern sich die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Gülle, deren Zusammensetzung und die in der Gülle ablaufenden Prozesse. Man unterscheidet drei Verfahren: Ansäuerung im Stall, im Güllelager und während der Ausbringung. Bei der Ansäuerung im Stall wird die Gülle aus dem Stallbereich in einen Behälter befördert, wo die Zumischung von Schwefelsäure zur Gülle erfolgt. Dabei sind Säuremengen von rund 5.5 kg pro m³ Rindviehgülle bis ca. 15 kg pro m³ Schweinegülle erforderlich. Ein Teil der angesäuerten Gülle wird zurück in den Stall und ein Teil in einen Lagerbehälter gepumpt. Im Laufe der Güllelagerung steigt der pH-Wert von angesäuerter Gülle etwa parallel zu demjenigen von unbehandelter Gülle an. Gemäss Literatur werden in den verschiedenen Verfahren die folgenden Werte hinsichtlich Emissionsminderung für Ammoniak erreicht:

- Ansäuerung im Stall: rund 50 % (Rindvieh) und ca. 40 bis 70 % (Schweine) auf der Stufe Stall und 30 bis 50 % über alle Emissionsstufen Stall, Hofdüngerlagerung und -ausbringung
- Ansäuerung im Güllelager: rund 50 bis >90 % auf der Stufe Güllelagerung
- Ansäuerung während Ausbringung: rund 50 bis 60 % auf der Stufe Gülleausbringung (teilweise niedrigere Werte in einigen Versuchen)

Für Methan beträgt die Emissionsminderung aus dem Güllelager rund 60 bis >90 %. Die Lachgas-Emissionen aus Lagerung und Ausbringung von Gülle lassen sich von der unbehandelten Kontrolle kaum unterscheiden.

Mehrere Studien zeigten eine verbesserte Düngewirkung von angesäuerter Gülle. Die Güllemenge muss dem Schwefelbedarf der Kulturen angepasst werden. Zudem ist eine häufigere Aufkalkung der Böden erforderlich bei Verwendung von angesäuerter Gülle. Geruchsemissionen im Zusammenhang mit der Ansäuerung von Gülle lassen sich nicht vollständig ausschliessen. Risiken für das Personal im Umgang mit konzentrierter Schwefelsäure werden in Dänemark durch die vollständige Auslagerung der entsprechenden Arbeiten an spezialisierte Unternehmen reduziert. Die Bildung von Schwefelwasserstoff in der Gülle ist aufgrund der verminderten mikrobiellen Aktivität reduziert. Bei Ansäuerung im Stall wurde während der Spülung der Kanäle mit angesäuerter Gülle teilweise eine starke Erhöhung der Konzentration in der Stallluft beobachtet.

Es besteht weitgehender Konsens, dass die Ansäuerung von Gülle eine wesentliche Reduktion der Emissionen von Ammoniak und Treibhausgasen bewirkt. Die Anwendung im Stall erscheint als besonders geeignet, da zusätzlich eine Abnahme der Emissionen auf den nachgelagerten Stufen erfolgt. In der Schweiz äussern sich jedoch einige Akteure aus Forschung und Vollzug skeptisch zu dieser Technik. Sie müsste im Rahmen von Pilotprojekten unter schweizerischen Praxisbedingungen weiter überprüft werden mit Untersuchungen zu den folgenden Punkten: Umsetzbarkeit der Technologie allgemein, Emissionen von Ammoniak, Treibhausgasen und Geruch, Auswirkungen von angesäuerter Gülle auf den Boden sowie Sicherstellung der Arbeitssicherheit. Als Grundlage für die Erstellung von ersten Anlagen wurde in einem ersten Schritt eine Anleitung zur Anrechnung der Emissionsminderung für Modellrechnungen mittels Agrammon erarbeitet.

Résumé

La présente étude a pour but d'évaluer l'impact de l'acidification du lisier sur les émissions d'ammoniac sur la base d'une étude bibliographique et de leur faisabilité sous conditions suisses. En Danemark, cette technique est assez répandue (part estimée du lisier acidifié pour 2016 : env. 20 %). Plusieurs systèmes sont homologués comme techniques limitant les émissions et sont mentionnés dans une liste de l'Agence danoise de protection de l'environnement.

L'acide sulfurique représente de loin l'acide le plus fréquemment utilisé. Lors de l'acidification du lisier visant une valeur cible du pH d'environ 5.5 à 6.0 qui est nécessaire pour atteindre une réduction des émissions suffisante les propriétés physico-chimiques du lisier, sa composition et les processus influençant le lisier changent. Trois méthodes sont appliquées : l'acidification dans le bâtiment d'élevage, l'acidification dans le stockeur du lisier et l'acidification pendant l'application du lisier. Le processus de l'acidification dans les bâtiments d'élevage comprend le transfert du lisier dans un réservoir de mélange où l'acide est ajouté au lisier. Les quantités nécessaires d'acide se situent entre 5.5 kg par m³ de lisier bovin et environ 15 kg par m³ de lisier de porcs. Une partie du lisier acidifié est retournée dans le bâtiment d'élevage et une partie est transférée dans le stockeur. Au cours du stockage, la valeur pH du lisier acidifié ainsi que celle du lisier non traité augmente.

Les taux de réduction des émissions d'ammoniac suivants sont atteignables d'après la littérature :

- l'acidification dans le bâtiment d'élevage : environ 50 % (bovins) et 40 à 70 % (porcs) relatif aux pertes provenant du bâtiment d'élevage ; 30 à 50 % relatif à l'ensemble des sources d'émissions qui sont le bâtiment d'élevage, le stockeur et l'épandage du lisier
- l'acidification dans le stockeur : env. 50 à >90 % relatif aux pertes provenant du stockeur
- l'acidification pendant l'application : environ 50 à 60 % relatif aux pertes provenant de l'épandage du lisier. Quelques études ont montré des taux de réduction plus faibles.

Pour le méthane la réduction des émissions se monte à environ 60 à >90 %. Les émissions du protoxyde d'azote provenant du stockage et de l'épandage de lisier ne diffèrent guère du contrôle non acidifié.

Plusieurs études ont démontré un effet fertilisant amélioré pour le lisier acidifié. La quantité épandue doit être adaptée au besoin des cultures en soufre. En outre, un chaulage plus fréquent est nécessaire due à l'utilisation du lisier acidifié. Des émissions d'odeurs supplémentaires liées à l'acidification du lisier ne sont pas à craindre mais ne peuvent, pourtant, pas être totalement exclues. En Danemark, les risques pour les exploitants liés aux managements avec l'acide sulfurique concentré sont minimisés par sous-traitance des travaux auprès des entreprises spécialisées. Les émissions de sulfure d'hydrogène provenant du lisier sont réduites suite à l'activité microbienne diminuée. Pourtant, pendant le rinçage des caniveaux à lisier avec le lisier acidifié une forte augmentation de la concentration en sulfure d'hydrogène dans l'air de la stabulation a été observée dans certains cas.

Il existe un large consensus sur l'efficacité de l'acidification concernant la réduction des émissions d'ammoniac et des gaz à effet de serre. Pour réduire les émissions, l'acidification dans le bâtiment d'élevage est particulièrement appropriée parce que les pertes sont également diminuées sur les étapes ultérieures. Cependant, plusieurs experts restent sceptiques quant à cette technique. Elle devrait être testée dans le cadre de projets pilotes sous conditions suisses ce qui inclue une évaluation de la faisabilité de l'acidification du lisier en générale, des émissions d'ammoniac et des gaz à effet de serre ainsi que des nuisances olfactives, des impacts du lisier acidifié sur le sol et de la sécurité au travail. Dans une première étape un guide a été élaboré pour déterminer la réduction des émissions dans le cadre des calculs sur modèle avec Agrammon qui peut servir comme base pour la construction des premières installations.

Summary

The present study evaluates the impact of the acidification of slurry on ammonia emissions and its applicability in Switzerland by means of a literature review. In Denmark, this technique is widely applied. For 2016, 20% of the total amount of slurry is estimated to be acidified. Several systems have been approved as techniques reducing ammonia emissions and are included in the list of environmental technologies established by the Danish environmental agency.

In the practical application, sulfuric acid is by far the most frequently used acid. Acidifying the slurry to a target pH value of between approx. 5.5 and 6.0 which is necessary to achieve a substantial emission reduction for the different methods, the physical-chemical properties of the slurry, its composition and the processes in the slurry change. Three distinct methodologies are available: in-house acidification, storage tank acidification and acidification at field application. When in-house acidification is applied, the slurry is flushed from the housing into a treatment tank where sulfuric acid is added. The amount of acid required ranges between 5.5 kg per m³ cattle slurry and approx. 15 kg per m³ pig slurry. A part of the acidified slurry is returned into the housing and a part is pumped to the slurry storage tank. During the storage, the pH values of both the acidified and of the non-treated slurry increase.

The methods achieve the following emission reductions for ammonia according to the literature:

- In-house acidification: approx. 50% (cattle), ca. 40 to 70% (pig) at the stage of housing and 30 to 50% over all emission stages housing, slurry storage and application
- Storage tank acidification: approx. 50 to >90% at the stage of slurry storage
- Acidification at field application: approx. 50 to 60% at the stage of slurry application (lower values were found in some studies)

For methane, the emission reduction for the slurry storage tank amounts to 60 to >90%. The emissions of nitrous oxide from slurry storage and application are similar to the one of non-acidified slurry.

Several studies have demonstrated an improvement of the fertilizer use efficiency of acidified slurry. The application rate has however to be adapted according to the need of the crops for sulfur. Additionally, more frequent liming is necessary if acidified slurry is applied. Odor emissions do usually not increase if slurry acidification is used, but additional nuisances cannot be completely excluded. In Denmark, risks for farmers are eliminated by outsourcing all works related to concentrated acids to specialized operators. The formation of hydrogen sulfide in the slurry is reduced due to the lower microbial activity. Although for in-house acidification, strong increases of air concentrations in the housings were occasionally observed during flushing of the channels.

There is consensus that the acidification of slurry substantially reduces the emissions of ammonia and greenhouse gases. The in-house acidification is particularly appropriate since an emission reduction occurs at the subsequent emission stages as well. However, several stakeholders in Switzerland are reluctant towards this technique. It should be further evaluated under Swiss conditions including the following investigations: the feasibility of slurry acidification, emissions of ammonia, greenhouse gases and odor, impacts of acidified slurry on the soil, occupational safety. As a first step, a guideline for the calculation of the emission reduction for emission modeling using Agrammon was elaborated which might serve a basis for the implementation of the first facilities.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Die Umweltbelastung mit Stickoxiden, Ammoniak (NH_3) und ihren Umwandlungsprodukten in der Schweiz liegt im Vergleich zu den national und international festgelegten wirkungsorientierten Kriterien (Immissionsgrenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung, Critical Loads und Levels der UNECE) deutlich zu hoch. So sind zum Beispiel mehr als 90 % der Waldstandorte und rund 55 % der Flächen von weiteren naturnahen Ökosystemen mit übermässigen Stickstoffeinträgen belastet (EKL, 2005; vgl. auch Roth et al., 2013). Die Stickstoffverbindungen bewirken zudem eine Versauerung der Böden. Im schweizerischen Durchschnitt sind etwa zwei Drittel der atmosphärischen Stickstoffeinträge auf Ammoniakemissionen zurückzuführen (FOEN, 2014). Diese stammen zu rund 92 % aus der Landwirtschaft (Kupper et al., 2015). Gemäss Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes ist eine Reduktion der Ammoniakemissionen um ca. 40 % im Vergleich zum Niveau von 2005 erforderlich, um die Anforderungen gemäss Critical Load für Stickstoff (N) einhalten zu können (Schweiz. Bundesrat, 2009). In der Agrarpolitik 2014-2017 ist hinsichtlich der NH_3 -Emissionen die Zielgrösse von 41 kt NH_3 -N für 2017 festgelegt (BLW, 2012). Weiter ist die Schweiz im Rahmen des Göteborg Protokolls verpflichtet, die Ammoniakemissionen im Zeitraum 2005 bis 2020 von 63.5 auf 58.4 kt NH_3 (bzw. von 52.3 auf 48.1 kt NH_3 -N) zu reduzieren (FOEN, 2014). Diese Zielvorgabe bildet ein Etappenziel auf dem Weg zur Einhaltung der Critical Loads für Stickstoffeinträge in empfindliche Ökosysteme.

Die Ansäuerung von Gülle ist eine anerkannte Technologie zur Emissionsminderung von Ammoniak (Fangueiro et al., 2015a, Hou et al. 2015; UNECE, 2014). In Dänemark wird die die Ansäuerung mittels Schwefelsäure seit rund 15 Jahren angewendet und ist aktuell relativ weit verbreitet (Peters, 2016). In der Schweiz wurden bisher keine solchen Systeme installiert. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwieweit und unter welchen Voraussetzungen diese Technologie hier angewendet werden könnte. Die vorliegende Literaturstudie hat zum Ziel, den Einfluss der Ansäuerung von Gülle auf Ammoniakemissionen sowie die Umsetzbarkeit dieser Technik als Massnahme zur Emissionsminderung in der Schweiz zu beurteilen. Der Fokus liegt auf Ammoniak. Methan (CH_4), Lachgas (N_2O) und Schwefelwasserstoff (H_2S) werden ebenfalls betrachtet. Sie beschränkt sich auf die Ansäuerung mittels Schwefelsäure, da diese in der Praxis weitaus am häufigsten verwendet wird.

Der Bericht umfasst die folgenden Themen:

1. Grundlagen zur Ansäuerung von Gülle
2. Emissionsminderung der Ansäuerung von Gülle auf den Stufen Stall, Hofdüngerlagerung und -ausbringung basierend auf Angaben aus der Literatur
3. Auswirkungen der Ansäuerung von Gülle hinsichtlich
 - Geruchsbildung und Arbeitssicherheit (Gesundheit von Mensch und Tier)
 - Pflanzen, Düngewirkung
 - Boden, weitere mögliche Probleme, Kosten
4. Schlussfolgerungen in Bezug auf eine weitergehende Überprüfung der Ansäuerung von Gülle in der Schweiz als Voraussetzung für eine allfällige spätere Umsetzung

Der vorliegende Bericht ist eine aktualisierte Version des ursprünglichen Berichts „Beurteilung der Ansäuerung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen in der Schweiz“ vom 3. Dezember 2015 zuhanden des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW). Er enthält die Daten von zusätzlichen Studien, die 2015 und 2016 publiziert, sowie Daten und Informationen, welche im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle, Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency) präsentiert wurden (vgl. Anhang 1).

2. Resultate der Literaturrecherche

2.1 Chemisch-physikalische Grundlagen

Die Freisetzung von gasförmigem NH_3 aus einer flüssigen Phase basiert auf einem Gleichgewicht zwischen Ammoniak und Ammonium (NH_4^+) (Formel 1 unten).



Bei einem pH von <6.0 befindet sich das Gleichgewicht der Reaktion auf der linken Seite, d.h. in der flüssigen Phase liegt vorwiegend NH_4^+ vor (Formel 2). Umgekehrt überwiegt bei $\text{pH} > 6.0$ gelöstes Ammoniak ($\text{NH}_{3,L}$) (Formel 3), welches gasförmig entweichen kann.



Fangueiro et al. (2015a) geben für angesäuerte Gülle Zielwerte im Bereich von pH 4.5 bis 6.8 an. Der angestrebte pH-Wert hängt vom Gülletyp und vom Verfahren ab (vgl. Kap. 2.3). In der Gülle liegt der pH im Bereich von 7.0 und höher. Ein pH von 6.5 oder weniger kommt in unbehandelter Gülle kaum vor (Häni et al., 2016; Sintermann et al., 2012). Für kommerziell betriebene Systeme wird überwiegend Schwefelsäure verwendet (Fangueiro et al., 2015a). Phosphorsäure führt zu einer Vergrößerung der Fracht von Phosphor (P) in der Gülle, was in den meisten Fällen zu einem P-Überschuss in der Nährstoffbilanz des Landwirtschaftsbetriebs führt. Salpetersäure kann aufgrund der Zugabe von Stickstoff zu einem ausgewogeneren N:P-Verhältnis führen. Um gasförmige N-Verluste (u.a. Lachgas, N_2O) zu vermeiden, sind aber eine Absenkung des pH-Werts auf unter 4 und entsprechend hohe Säuremengen erforderlich (Bussink, 2012, UNECE, 2014). Organische Säuren haben den Nachteil, dass sie relativ rasch abgebaut werden. Allerdings wird nach Alternativen zu Schwefelsäure basierend auf organischen, kohlenstoffreichen Substraten gesucht (Hjorth, et al., 2015; 2016).

2.2 Einfluss der Ansäuerung auf chemisch-physikalische Eigenschaften von Gülle

Bei der Ansäuerung von Gülle von einem pH-Wert von rund 7 auf pH 5.5 verändern sich die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Gülle und deren Zusammensetzung. Dabei werden sämtliche chemisch und mikrobiell gesteuerten Gleichgewichte hinsichtlich des Abbaus von organischen Verbindungen, der Lösung von anorganischen Molekülen und der Aggregation von Partikeln beeinflusst. Zwecks Charakterisierung dieser Veränderungen untersuchten Hjorth et al. (2015) eine Gülle von Mastschweinen sowie eine Gülle, die im gleichen Stall mittels „In-house acidification“ (vgl. Kap. 2.3.2; Verwendung von 96 % Schwefelsäure) auf pH 5.5 angesäuert wurde. Die Menge von Mg, Ca und P in Lösung nahm zu. Generell wurde die Menge von Vorläufersubstanzen für die Bildung von NH_3 , CH_4 und H_2S reduziert. Ottosen et al. (2009) stellten eine starke Verminderung des Sauerstoffverbrauchs, der Methanogenese und der Reduktion von Sulfat fest. Die mikrobielle Aktivität in der angesäuerten Gülle war stark eingeschränkt.

2.3 Grundlagen zu den Verfahren

2.3.1 Übersicht

Fangueiro et al. (2015a) unterscheiden zwischen den folgenden Verfahren: 1. Ansäuerung im Stall, 2. Ansäuerung im Güllelager, 3. Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung.

Im Jahr 2013 wurden in Dänemark rund 20 % der insgesamt ausgebrachten Gülle angesäuert (Birkmose, Vestergaard, 2013). Dieser Anteil ist bis 2016 weiter angestiegen. Eine detaillierte Übersicht aus Peters (2016) zeigt, dass das Verfahren zur Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung mehr als die Hälfte des Anteils von angesäuerter Gülle aus-

macht (Tabelle 1). Der Rest verteilt sich rund je zur Hälfte auf die Ansäuerung im Stall bzw. im Güllelager.

Tabelle 1: Anzahl Systeme zur Ansäuerung von Gülle in Dänemark (2016) sowie Menge und Anteile von angesäuerter Gülle (Quelle: Peters, 2016)

System	Anzahl	Menge in Mio. m ³	Anteil*	Anteil**
Ansäuerung im Stall	140	1.3	20 %	4 %
Ansäuerung im Güllelager	75	1.6	24 %	5 %
Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung	110***	3.7	56 %	12 %
Total		6.6	100 %*	21 %

* Anteil im Verhältnis zum Total von angesäuerter Gülle

** Anteil im Verhältnis zur totalen Menge von produzierter Gülle (35.1 Mio. m³)

*** Toft (2016) gibt eine höhere Zahl von 140 Systeme an

In Dänemark sind mehrere Systeme als anerkannte Technologien zur Emissionsminderung auf der Technolieliste des Umweltbundesamtes (The Danish Ministry for the Environment, 2015) aufgeführt.

2.3.2 Ansäuerung von Gülle im Stall

Beim Verfahren der Ansäuerung von Gülle im Stall wird die Gülle aus dem Stallbereich in einen Mischtank befördert, wo die Zumischung von Schwefelsäure zur Gülle täglich bzw. ein- oder mehrere Mal pro Woche erfolgt. Die Säuremenge richtet sich nach dem angestrebten pH-Wert. Um die Bildung von Schaum (Fangueiro et al., 2015a) und von Schwefelwasserstoff (Botermans et al., 2010) zu vermeiden, wird die Gülle gleichzeitig belüftet. Ein Teil der angesäuerten Gülle wird zurück in den Stall und ein Teil in einen Lagerbehälter geleitet. Der angestrebte pH-Wert in der Gülle beträgt 5.5 (Andersen, 2013; Birkmose, Vestergaard, 2013; Fangueiro et al., 2015a).

2.3.3 Ansäuerung der Gülle im Lager

Bei der Ansäuerung im Güllelager erfolgt die Säurezugabe im Güllelagerbehälter unter intensivem Umrühren der Gülle. Der dabei entstehende Schaum muss entfernt werden, was diesen Prozess limitiert. In Dänemark sind 75 Lager mit Ansäuerung der Gülle eingerichtet. Die Ansäuerung wird in den meisten Fällen mit mobilen Anlagen durch einen Lohnunternehmer durchgeführt (Peters, 2016). Es gibt zwei Systeme auf dem Markt¹.

Die Zugabe der Säure kann kurz vor der Ausbringung oder kurz nach der Befüllung des Lagerbehälters bzw. mehrere Monate vor der Gülleausbringung erfolgen. In Dänemark wird die Säure normalerweise zugegeben, wenn der Behälter voll ist oder kurz vor der Ausbringung (mündl. Mitteilung E.N.L. Christiansen, K. Peters, Dänisches Umweltbundesamt).

2.3.4 Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung

Bei Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung erfolgt die Säurezugabe unmittelbar vor der Ausbringung beim Ausgang des Fasses. Dabei wird Schwefelsäure in einem IBC-Behälter², der an der Fronthydraulik befestigt ist, mitgeführt. Bei einem neuen System wird der IBC-Behälter auf dem Güllefass montiert (Toft, 2016). Der Behälter ist für den Transport auf der Strasse und auf dem Feld mittels einer soliden Konstruktion geschützt

¹ www.oerum.com; <http://www.harso.dk> vgl. auch http://eng.mst.dk/media/mst/9410017/meltindstilling_hars__inkl_till_g4.pdf

² IBC: Intermediate Bulk Container

(z.B. Toft, 2011; vgl. Kap. 2.7.2). In Dänemark gibt es zwei Systeme: SyreN und Kyndestoft Acid-system³. Ersteres verwendet 96 %, letzteres 50 % Schwefelsäure (Nyord, 2016). Der Ziel-pH-Wert beträgt 6.0. Der Säureverbrauch liegt zwischen 0.5 und 3 Liter 96 % Schwefelsäure pro m³ je nach Gülleart (Toft, 2011). Der pH-Wert der ausgebrachten Gülle wird dabei kontinuierlich gemessen und die Säure entsprechend dosiert (Birkmose, Vestergaard, 2013). Vor der Entleerung der Schläuche wird die Zugabe der Säure gestoppt. Sämtliche Daten werden beim System SyreN während Transport und Ausbringung aufgezeichnet und gespeichert, u.a. mittels GPS, so dass jede Lieferung nachverfolgt werden kann (Toft, 2011).

Systeme zur Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung werden in Dänemark von grossen Betrieben oder von Lohnunternehmern betrieben (Peters, 2016). In der Schweiz wird die Ansäuerung von Gülle während der Ausbringung von einem Lohnunternehmer angeboten⁴.

2.4 Emissionsminderung bei Ansäuerung von Gülle

2.4.1 Ansäuerung von Gülle im Stall

2.4.1.1 Systembeschreibung

In Dänemark wurden Systeme zur Ansäuerung von Gülle im Stall von zwei Firmen installiert: JH-FORSURING NH₄⁺ (Firma JH Staldservice A/S) und Infarm A/S. Die letztere Firma wurde 2015 von JH Staldservice A/S aufgekauft. Daraus entstand die Firma JH AGRO A/S (Jonassen, 2016). Das System JH-FORSURING NH₄⁺ ist für Rindvieh auf der Technologielliste des dänischen Umweltbundesamtes aufgeführt (provisorische Aufnahme für Rindvieh gemäss The Danish Ministry for the Environment, 2015⁵). Für Schweine wurde das System 2012 definitiv in die Technologielliste aufgenommen. In Dänemark sind gemäss Jonassen (2016) 151 Ställe (76 für Schweine, 75 für Rindvieh) mit Ansäuerung von Gülle eingerichtet.

Abbildung 1 zeigt das System JH-FORSURING NH₄⁺ zur Ansäuerung von Gülle im Stall von einem der vier dänischen Praxisbetriebe, auf welchem Versuche durchgeführt wurden (Andersen, 2013).

Das System enthält die folgenden Teile:

- Lagertank für technische Schwefelsäure (Konzentration 96 %). Schwefelsäure hat eine Dichte von 1850 kg pro m³ (Jørgensen, 2016).
- Mischtank, in dem die Durchmischung der Gülle, die Zugabe der Säure und die Gülförderung stattfinden. Die Dosierung von Schwefelsäure liegt zwischen 5 kg (Rindvieh) und 15 kg (Schweine) pro m³ Gülle.
- Behälter zur Lagerung der angesäuerten Gülle.
- Steuerungseinheit inkl. Datenspeicherung und Alarm im Falle von Störungen.

Der Prozess läuft in chronologischer Reihenfolge täglich wie folgt ab:

- Die beiden pH-Elektroden im Mischtank werden mit Wasser gespült.
- Durchmischung der Gülle im Mischtank. Nach einer Rührdauer von 10-20 Minuten wird technische Schwefelsäure (96 %) mittels Dosierpumpe in den Mischtank gepumpt.

³<http://www.biocover.dk/home>; <http://kyndestoft.eu/Produkte/Landbrug/Gylleforsuring.html> (11.10.2016)

⁴ <http://www.direktsaat.info/agro-klima-plus/>

⁵ "Temporarily admitted to List of Environmental Technologies by special agreement with the Danish Environmental Protection Agency" (vgl. <http://eng.mst.dk/topics/agriculture/environmental-technologies-for-livestock-holdings/livestock-housing-system>; 04.10.2016)

- Die Durchmischung stoppt nach 30-60 Min. Zu diesem Zeitpunkt ist der Zielwert von pH 5.5 in der Gülle erreicht.
- Nach 10 Min. wird der pH-Wert in der Gülle im Mischtank gemessen.
- Förderung von Gülle vom Mischtank in den Güllekeller unter den Spalten. Die Höhe der Gülleschicht liegt bei rund 20-30 cm (Daten für Schweine; Leegaard Riis, 2016). Je nach Füllstand wird ein Teil der angesäuerten Gülle vom Mischtank in den Behälter zur Lagerung der angesäuerten Gülle gepumpt.
- Der Prozess (Pumpen, Rühren, Säurezugabe etc.) erfolgt via elektronische Steuerung vollautomatisch. Die Daten werden gespeichert und sind zur Kontrolle der Steuerung via Web zugänglich.

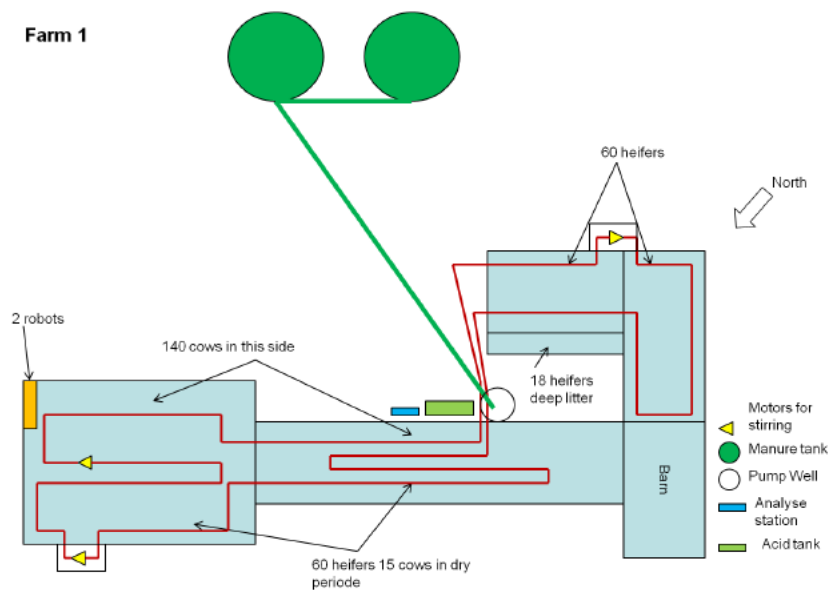


Figure 1 shows a diagram of the building design at farm 1

Abbildung 1: Schema des System JH-FORSURING NH₄⁺ zur Ansäuerung von Gülle im Stall von einem der vier Versuchsbetriebe (Andersen, 2013).

2.4.1.2 Daten aus der Literatur

Insgesamt sind 10 Studien zu dieser Technologie verfügbar. Die erreichte Emissionsminderung auf der Stufe Stall liegt im Bereich zwischen 43 % und 71 % (Tabelle 2). Kai et al. (2008) verwendeten für ihre Studie einen zwangsgelüfteten Maststall mit 1200 Plätzen und 4 identischen Abteilen (je 2 mit behandelter und unbehandelter Gülle), Vollspalten sowie ad libitum Fütterung. In einen Säuretank mit 20 m³ Inhalt erfolgte die Zumischung von 96 % Schwefelsäure (H₂SO₄) in einer Menge von 5 kg Säure pro m³ Gülle. Die Spülung der Kanäle im Stall mit angesäuerten Gülle wurde 6 bis 10 Mal pro Tag durchgeführt. Die Höhe der Gülle in den Kanälen nach der Spülung betrug 15 cm. Die Emissionsmessung wurde im Stall während 3 Perioden von je 3 bis 4 Monaten Dauer über alle Jahreszeiten verteilt durchgeführt. Die erreichte Emissionsminderung von 70 % stimmt gut mit Messwerten von andern Untersuchungen überein. Teilweise wurden in diesen Studien (z.B. Andersen, 2013) die Emissionen eines Systems ohne Referenz gemessen.

Tabelle 3 zeigt den pH-Wert in der Gülle in einem Versuchsstall vor und nach der Ansäuerung sowie der Spülung der Kanäle mit der angesäuerten Gülle. Die Daten zeigen, dass bei täglicher Zugabe der Säure der pH-Wert in der Gülle im Stall um weniger als 0.3 Einheiten zunimmt. Ein deutlich stärkerer Anstieg um rund 0.5 Einheiten wird beobachtet, wenn nur zweimal pro Woche angesäuert wird. Dementsprechend nimmt bei einer weniger häufigen Behandlung die Emissionsreduktion ab.

Tabelle 2: Emissionsminderung auf der Stufe Stall für Ammoniak bei Ansäuerung von Gülle im Stall im Vergleich zur unbehandelten Gülle in Prozent

Emissionsreduktion	Quelle	Bemerkungen
Rindvieh		
43 %*	Andersen (2013)	vgl. Kap. 2.4.1.3 System JH-FORSURING NH4+
50 %	Zhang et al. (2004, 2005)	Grundlage für den Wert der Technologielliste des dänischen Umweltbundesamts (The Danish Ministry for the Environment, 2015) für das System JH-FORSURING NH4+
Schweine		
ca. 80 %	Jensen (2002)	pH 5.5; nur Konzentrationen im Stall gemessen, Zugabe Schwefelsäure in Kanal im Stall
70 %	Kai et al. (2008)	Messung in Stall, 1200 Plätze
70 %	Pedersen (2004)	Gleiche Versuchsanordnung wie in Kai et al. (2008); vgl. Kap. 2.4.1.1, 2.4.1.3 System Infarm
64 %	ETA-Danmark A/S (2014)	JH-FORSURING NH4+. Grundlage für den Wert der Technologielliste des dänischen Umweltbundesamts (The Danish Ministry for the Environment, 2015)
71 %	Pedersen, Albrecht-sen (2012)	JH-FORSURING NH4+ (dieser Wert ist Teil der rapportierten Resultate von ETA-Danmark A/S (2014))
56 %	Jørgensen (2016)	System Infarm; Versuch auf einem Praxisbetrieben mit ca. 2000 Mastschweineplätzen über rund 13 Monate
63 % 66 %	Leegaard Riis (2016)	System JH-FORSURING NH4+; Versuch auf 2 Praxisbetrieben mit je ca. 1200 Mastschweineplätzen über 10 bzw. 9 Monate
66 %	Petersen et al. (2016)	Frühling
71 %		Herbst
44 %		Sommer

*Die Herleitung dieses Werts ist aus Andersen (2013) kaum nachvollziehbar.

Tabelle 3: pH-Wert der Gülle in einem Versuchsstall vor und nach Ansäuerung sowie Spülung der Kanäle, NH₃-Emissionen sowie Emissionsminderung (Jonassen, 2016, mündl. Mitteilung K. Jonassen, Dänisches Umweltbundesamt)

	pH nach Ansäuerung	pH vor Ansäuerung	NH ₃ -Emission*	Emissionsminderung
			NH ₃ -N h ⁻¹ Tier ⁻¹	%
Kontrolle (ohne Ansäuerung)	-	-	0.15 ^a (0.13-0.18)	-
Ansäuerung einmal pro Tag	5.46 (5.45-5.46)	5.60 (5.58-5.61)	0.058 ^b (0.042-0.073)	62
Ansäuerung zweimal pro Woche	5.46 (5.45-5.47)	5.93 (5.88-5.98)	0.094 ^c (0.079-0.11)	38

*Unterschiedliche Buchstaben geben eine statistisch signifikante Differenz an.

Petersen et al. (2016) fanden für Mastschweine eine Emissionsminderung von Methan um 50 % (Messung im Frühling). Allerdings liess sich die Herkunft des CH₄ nicht bestimmen, wobei der grösste Anteil vermutlich aus der enterischen Fermentation stammte. Deshalb ist es nicht möglich, in diesem Versuch den Zusammenhang zwischen Ansäuerung und

CH₄-Emissionen aus dem Stall aufzuzeigen. Die Emissionen von Kohlendioxid unterschieden sich während allen 3 Messperioden nicht zwischen den beiden Verfahren. Die Emissionen von Lachgas lagen im Verfahren mit Ansäuerung um 25 % niedriger als im Referenzverfahren (Messung im Frühling). Die Resultate von flüchtigen schwefelhaltigen Verbindungen zeigten mit Ansäuerung niedrigere Emissionen gegen Ende der Versuche von Frühling und Herbst, jedoch stark erhöhte Mengen in der Mitte der Versuchsperiode vom Sommer. Die absolut höchsten Flüsse wurden im Referenzverfahren am Ende des Umtriebs im Sommer gemessen.

Pedersen und Albrechtsen (2012) untersuchten die Bildung von Schwefelwasserstoff. Sie beobachteten eine Reduktion der Emissionen um 70 %, stellten aber gleichzeitig ausgeprägte Spitzenbelastungen fest von bis zu 10 ppm zum Zeitpunkt der Behandlung der Gülle im Mischtank und des Umpumpens der behandelten Gülle in den Stall (vgl. auch Kap. 2.4.2). Leegaard Riis (2016) und Jørgensen (2016) fanden eine Reduktion der Emissionen von H₂S von 67 % und 90 % bzw. 78 % in Praxisställen mit Ansäuerung im Vergleich zur Kontrolle.

2.4.1.3 Messungen von kommerziellen Systemen zur Ansäuerung von Gülle

System JH-FORSURING NH₄⁺, Rindvieh

Die Versuche zur Bestimmung der Emissionen wurden wie folgt durchgeführt (Andersen, 2013):

Versuchsstandorte

- 4 Praxisbetriebe
- Tierbestand: 150-550 Milchkühe; 3 Betriebe mit Holstein-Friesian, 1 Betrieb mit 20 % Holstein-Friesian und 80 % Jersey
- N-Ausscheidung pro Kuh und Jahr: 141-162 kg N_{tot}; 69-86 kg TAN (engl. Total Ammoniacal Nitrogen)
- Freilaufställe mit Spaltenböden; Sammlung der Gülle in runden Behältern unter den Spalten im Stall. Reinigung der Spalten mit mittels Schieber oder Roboter
- Freie Lüftung mit Curtains auf den Seiten
- Einstreue: Strohpellets oder Sägemehl
- Ration: Mais und Grassilage ergänzt mit Soja und Futterweizen

Das Versuchsdesign zur Emissionsmessung war wie folgt:

- Messung der NH₃-Emissionen mittels Tracer Gas Methode⁶ (Tracer: CO₂; Schätzung des CO₂ Anfalls aufgrund der Grösse und der Milchleistung der Tiere)
- Messungen à 6 Perioden von je 3 Tagen Dauer, regelmässig über ein Jahr verteilt
- Messmethodik: INNOVA 1412, photoakustischer Gasdetektor, Korrektur für Temperatur und Interferenzen auf H₂O und CO₂
- Probenahme entlang von drei perforierten Schläuchen, die längs der Ställe parallel angeordnet waren. Die beiden äusseren Schläuche erfassten die in den Stall eintretende Luft, der mittlere bzw. innere Schlauch sowie der Schlauch auf der Luv Seite Luft, die den Stall verliess und mit den im Stall anfallenden Gasen gesättigt war.

Der Säureverbrauch betrug im Mittel 5.7 kg/m³ Gülle (Bereich: 5.50 - 5.97 kg/m³ Gülle). Im Vergleich dazu lag der Verbrauch von Schwefelsäure in einem Stall für Mastschweine bei 14.8 kg/m³ Gülle (Pedersen, Albrechtsen, 2012). Andersen (2013) erklärte den höheren Verbrauch durch die höhere Temperatur in der Gülle und der daraus folgenden grö-

⁶ Wird von Zhang et al. (2005) als CO₂-Bilanzierungsmethode bezeichnet.

seren Mineralisierungsrate für Schweinegülle. Weiter weist Schweinegülle einen höheren TAN Anteil im Verhältnis zu N_{tot} auf. Da NH_3 basisch wirkt, folgt daraus ein höherer Säureverbrauch, um die gleiche Absenkung des pH-Werts wie für Rindviehgülle zu erreichen.

Basierend auf 6 Messperioden von jeweils mehreren Tagen Dauer, verteilt über ein Jahr auf 4 Betrieben, ermittelte Andersen (2013) eine Emissionsminderung im Stall von 43 %. Als Referenz verwendete er Messwerte von vergleichbaren Betrieben in Dänemark ohne Ansäuerung. Auf der Technologielliste des dänischen Umweltbundesamtes wird eine Emissionsminderung von 50 % angegeben (The Danish Ministry for the Environment, 2015).

System JH-FORSURING NH_4^+ , Schweine

ETA-Danmark A/S (2014) gibt für zwei Messkampagnen Emissionsminderungen von 62.7 % und 66.0 % an. Im Mittel entspricht dies dem Wert von 64 %, welcher auf der Technologielliste des dänischen Umweltbundesamtes aufgeführt ist. Das System wurde definitiv in die Technologielliste aufgenommen (The Danish Ministry for the Environment, 2015).

System Infarm Rindvieh

Miljøministeriet_Miljøstyrelsen (2011a) gibt basierend auf Zhang et al. (2004) eine Emissionsminderung von 50 % aus einem frei gelüfteten Stall an.

System Infarm Schweine

Miljøministeriet_Miljøstyrelsen (2011b) gibt basierend auf Pedersen (2004) eine Emissionsminderung von 70 % bei Vollspaltenboden an. Für einen Anteil von 25-49 % und 50-75 % Festboden ist eine Emissionsminderung von 65 % bzw. 68 % aufgeführt. Wie diese Werte hergeleitet wurden, ist nicht nachvollziehbar. Pedersen (2007) gibt eine Emissionsminderung von 85 % bei einer Behandlung mit Schwefelsäure und Wasserstoffperoxid an.

2.4.1.4 Bemerkungen zur Messmethodik

Die Bestimmung der Gaskonzentrationen in Ställen in den oben zitierten Versuchen (Kap. 2.4.1.2, 2.4.1.3) erfolgte in den meisten Fällen mittels eines photoakustischen Gasmonitors der Firma Innova Airtech Instruments, Ballerup, Dänemark. Dieses Gerät weist Nachteile auf wie lange Ansaugleitungen (Brehme, 2013) und Querempfindlichkeiten gegenüber verschiedenen Gasen, welche zu einer Über- oder Unterschätzung der gemessenen Konzentrationen führen können (Hassouna et al., 2013). Empfehlungen zur Vermeidung solcher Messfehler sind vorhanden (Brehme, 2013; Hassouna et al., 2013). Es ist jedoch unklar, inwieweit diese in den einzelnen Versuchen umgesetzt wurden, und ob diese sämtliche der möglichen Querempfindlichkeiten abdecken. Inwieweit die möglichen Messfehler die hier aufgeführten Werte zur Emissionsminderung in Frage stellen könnten, liess sich im Rahmen der vorliegenden Studie nicht klären und muss somit offenbleiben.

Die Methodik der Studien zu Rindvieh (Andersen, 2013; Zhang et al., 2004, 2005), welche in Tabelle 2 aufgeführt sind, wurde von Agroscope Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH kritisch hinterfragt: z.B. CO_2 -Bilanz-Methode als Ersatz für die Quantifizierung des Luftvolumenstrom, Ort der Probenahme für die Gasmessung, keinen echten Vergleich mit Referenzen (als Referenzwert wird der dänische Standard-Emissionsfaktor für Milchkühe in Laufställen angenommen), Ausscheidungen und Lebendgewicht der Tiere, Fehlen von Untersuchungen in Ställen mit planbefestigten Böden⁷. Die Bemerkungen von Agroscope INH sind in Anhang 2 aufgeführt.

⁷ Milchkühe, die in einem Laufstall gehalten werden, stehen zu rund 2/3 in Ställen mit Laufgang planbefestigt (Lauffläche) und zu rund 1/3 in Ställen mit Laufgang perforiert (Lauffläche) (Quelle: Zusatzerhebung BFS 2013, unveröffentlichte Daten)

2.4.2 Ansäuerung der Gülle im Lager

2.4.2.1 Verlauf des pH-Werts während der Lagerung

Wenn angesäuerte Gülle während längerer Zeit gelagert wird, ist die Entwicklung des pH-Werts von Interesse. Petersen et al. (2012) stellten in einem Laborversuch mit Rindviehgülle einen Anstieg des pH-Werts von 4.5 auf 6.0 bis 6.5 während 95 Tagen Lagerdauer fest. In der unbehandelten Gülle nahm der pH-Wert ebenfalls zu, allerdings weniger ausgeprägt. Der pH-Wert nach 95 Tagen Lagerdauer lag in der angesäuerten Gülle trotz des relativ stärkeren Anstiegs unter dem Wert der unbehandelten Gülle. Während einer Lagerdauer über 13 Monate beobachteten Kai et al. (2008) einen Anstieg des pH-Werts von 1.1 Einheiten, was auf einen Abbau von organischen Säuren und eine Zunahme des Gehalts von Bikarbonat (HCO_3^-) hinweist. Regueiro et al. (2016a) fanden in einem Laborversuch einen Anstieg um rund 1.5 Einheiten nach 60 Tagen bei Rindvieh- und Schweinegülle, welche auf pH 5.5 angesäuert wurden. Bei Ansäuerung auf pH 3.5 war die Zunahme etwas niedriger. In beiden Verfahren lag der pH am Ende der Lagerdauer um ca. 0.5 Einheiten (Ausgangs-pH 5.5) bzw. ca. 3 Einheiten (Ausgangs-pH 3.5) niedriger als in der unbehandelten Referenz. In der Studie von Misselbrook et al. (2016) stieg der pH-Wert in angesäuerter Rindviehgülle bei den zwei Verfahren Lagerung im Sommer bzw. im Winter innerhalb von 60 bis 70 Tagen Lagerdauer von rund 5.5 ungefähr auf das Niveau der unbehandelten Kontrolle an. Einzig für das Verfahren Lagerung im Herbst zeigte die angesäuerte Gülle (Anfang pH bei ca. 5; zu hohe Säurezugabe) eine leichte Abnahme im Laufe der Lagerung. Wang et al. (2014) beobachteten folgenden Verlauf des pH von anaerob behandelter Schweinegülle in einem Laborversuch:

- Kontrolle: pH 7.46 Tag 0 bis pH 8.40 Tag 38; dann ungefähr konstant bis Tag 100
- Angesäuert auf pH 6.5 : pH 6.50 Tag 0 bis pH 7.75 Tag 25; dann ca. pH 8 bis Tag 100
- Angesäuert auf pH 5.5 : pH 5.50 Tag 0 bis pH 7.20 Tag 25; dann ca. pH 8 bis Tag 100

Huang et al. (2012; zit. in Wang et al., 2014) fanden einen ähnlichen Verlauf des pH-Werts bei der Lagerung von anaerob behandelter Schweinegülle.

2.4.2.2 Ammoniak

Die Resultate zur Ansäuerung von Gülle im Lager sind in Tabelle 4 aufgeführt. Die meisten übrigen Studien zeigten eine Emissionsminderung zwischen 40 % und >90 % (Ausnahme Wang et al. (2014): keine Emissionsminderung bei auf pH 6.5 angesäuerter vergorener Schweinegülle). Dai et al. (2013) zeigten, dass ein pH-Wert von 5.5 anstelle von 6.0 einen deutlichen Effekt zeigt, nämlich eine zusätzliche Reduktion der Emission um 27 Prozentpunkte. Petersen et al. (2014) untersuchten die Emissionen in einer Pilotanlage mit Behältern von 6.5 m³ Inhalt. Interessant ist der Datensatz, welcher auf Gülle aus Ansäuerung im Stall basiert (vgl. Kap. 2.4.1) und eine Emissionsminderung von 51 % bzw. 84 % aufweist (Petersen et al., 2014). Nach den Resultaten von Petersen et al. (2012) ist auch bei Rindviehgülle eine hohe Emissionsreduktion von mehr als 90 % möglich. Eine Emissionsminderung tritt trotz des Anstiegs des pH-Werts während der Lagerung ein. So beobachteten Kai et al. (2008) eine deutliche Emissionsminderung (> 90 %) bei gleichzeitigem Anstiegs des pH-Werts um 1.1 Einheiten. Petersen et al. (2014) und Misselbrook et al. (2016) fanden ähnliche Resultate.

Interessant sind auch die Resultate von Regueiro et al. (2016b), die allerdings auf der Ansäuerung mittels Kaliumaluminiumsulfat-Dodecahydrat basieren. Sie säuerten vor der fest-flüssig Separierung unvergorene und vergorene Schweinegülle auf pH 5.5 an und untersuchten im Labormassstab während 70 Tagen die Emissionen der nicht angesäuerten sowie der angesäuerten Ausgangsgülle und der flüssigen und festen Phase nach der Separierung. Von total 6 Verfahren führten die folgenden 5 zu einer statistisch signifikanten Reduktion der Emissionen aufgrund der Ansäuerung: unvergorene Schweinegülle, flüssige

Fraktion der unvergorenen Schweinegülle, vergorene Schweinegülle, flüssige Fraktion der vergorenen Schweinegülle sowie feste Fraktion der vergorenen Schweinegülle. Keine statistisch signifikante Differenz war beim Verfahren feste Fraktion der unvergorenen Schweinegülle zu beobachten.

Tabelle 4: Emissionsminderung bei Ansäuerung auf der Stufe Güllelager für Ammoniak gemessen im Rahmen von Laborversuchen oder Pilotanlagen im Vergleich zur unbehandelten Gülle in Prozent

Emissionsreduktion	Quelle	Bemerkungen
Rindvieh		
94 %	Petersen et al. (2012)	Zugabe von HCl; fresh slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
95 %		Zugabe von HCl und K ₂ SO ₄ ; fresh slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
98 %		Zugabe von HCl; aged slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
97 %		Zugabe von HCl und K ₂ SO ₄ ; aged slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
85 %	Regueiro et al. (2016a)	pH 5.5 (Laborversuch)
62 %	Sommer et al. (2016)	ca. pH 5.5 (Pilotanlage)
75 %	Misselbrook et al. (2016)	~ pH 5.5 (Pilotanlage) 3 Messperioden à 62, 71, 72 Tage in Winter, Herbst, Sommer; Ø Emissionsred. über alle 3 Messper.
Schweine		
40 %	Wang et al. (2014)	pH 5.5; vergorene Gülle (Pilotanlage)
0 %		pH 6.5; vergorene Gülle (Pilotanlage)
>90 %	Kai et al. (2008)	2 Messperioden à 6 bzw. 13 Monate. Bestimmung der NH ₃ Verluste mittels Massenbilanz von N _{tot} . Die angesäuerte bzw. nicht angesäuerte Gülle stammte vom gleichen Betrieb.
84 %	Petersen et al. (2014)	2 Versuche Mai und Aug.; Vergleich von Gülle aus Anlage zur Ansäuerung von Gülle im Stall mit unbehandelter Gülle aus dem gleichem Stall; pH 5.6; 5.9 (Pilotanlage)
51 %		2 Versuche Mai und Aug; Gülle aus gleichem Betrieb; angesäuert (6 kg m ⁻³ Gülle 96 % H ₂ SO ₄) und unbehandelt; pH 6.6; 6.8 (Pilotanlage)
75-99 %	Alkanani et al. (1992)	Emissionsreduktion je nach Dosierung von Säure (Säuremenge nicht ersichtlich aus der Publikation (Laborversuch)
80 %	Regueiro et al. (2016a)	pH 5.5 (Laborversuch)

2.4.2.3 Treibhausgase

Für Methan wurde eine Minderung der Emissionen im Bereich zwischen rund 30 % und über 90 % beobachtet (Tabelle 5). Regueiro et al. (2016b; vgl. Kap. 2.4.2.2) fanden bei allen Verfahren für CO₂ und CH₄ statistisch signifikant tiefere Emissionen bei Ansäuerung der Gülle vor der Separierung. Für Lachgas wurden für die feste Fraktion der unvergorenen sowie der angesäuerten, vergorenen Schweinegülle statistisch signifikant tiefere Emissionen gemessen. Die übrigen Verfahren zeigten ähnlich hohe N₂O-Emissionen und keine statistisch gesicherten Differenzen. Die Studie von Sommer et al. (2016) zeigte für CH₄ eine Emissionsminderung von 64 %. Für N₂O und CO₂ waren keine klaren Trends erkennbar. Bussink et al. (2012), Bussink und van Rotterdam-Los (2011), Fanguero et al. (2015a) und Huo et al. (2015) bezeichnen die Ansäuerung von Gülle als wirksame Methode zur Minderung von Treibhausgasemissionen.

Tabelle 5: Emissionsminderung bei Ansäuerung auf der Stufe Güllelager für Methan gemessen im Rahmen von Laborversuchen oder Pilotanlagen im Vergleich zur unbehandelten Gülle in Prozent

Emissionsreduktion	Quelle	Bemerkungen
Rindvieh		
66 %	Petersen et al. (2012)	Zugabe von HCl; fresh slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
62 %		Zugabe von HCl und K ₂ SO ₄ ; fresh slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
81 %		Zugabe von HCl; aged slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
88 %		Zugabe von HCl und K ₂ SO ₄ ; aged slurry; pH 5.5 (Laborversuch)
64 %	Sommer et al. (2016)	ca. pH 5.5 (Pilotanlage)
61 %	Misselbrook et al. (2016)	~ pH 5.5 (Pilotanlage) 3 Messperioden à 62, 71, 72 Tage in Winter, Herbst, Sommer; Ø Emissionsred. über alle 3 Messper.
Schweine		
81 %	Wang et al. (2014)	pH 5.5; vergorene Gülle (Pilotanlage)
31 %		pH 6.5; vergorene Gülle (Pilotanlage)
>90 %	Petersen et al. (2014)	2 Versuche Mai und Aug.; Vergleich von Gülle aus Anlage zur Ansäuerung von Gülle im Stall mit unbehandelter Gülle aus dem gleichem Stall; pH 5.6; 5.9 (Pilotanlage)
>90 %		2 Versuche Mai und Aug; Gülle aus gleichem Betrieb; angesäuert (6 kg m ⁻³ Gülle 96 % H ₂ SO ₄) und unbehandelt; pH 6.6; 6.8 (Pilotanlage)

2.4.2.4 Schwefelwasserstoff

Wang et al. (2014) beobachteten eine Zunahme der Emissionen von Schwefelwasserstoff bei auf pH 5.5 angesäuerter vergorener Schweinegülle (Tabelle 6). In der Studie von Dai und Blanes-Vidal (2013) blieben diese konstant, was mit den Angaben verschiedener Autoren übereinstimmt (z.B. Figueiro et al., 2015; vgl. auch Angaben zu H₂S am Ende von Kap. 2.4.1.2), steht jedoch scheinbar im Gegensatz zum grossen Pool an Sulfat, der in der mit Schwefelsäure behandelten Gülle vorhanden ist. Denn Sulfat reduzierende Bakterien können Sulfat unter anaeroben Bedingungen und bei Vorhandensein von organischem Kohlenstoff (z.B. kurzkettige organische Fettsäuren) zu H₂S reduzieren (Eriksen et al., 2008, 2012).

Tabelle 6: Emissionsminderung von Schweinegülle bei Ansäuerung auf der Stufe Güllelager für Schwefelwasserstoff (H₂S) gemessen im Rahmen von Laborversuchen oder Pilotanlagen im Vergleich zur unbehandelten Gülle in Prozent. Negative Werte bedeuten eine Zunahme der Emissionen

Emissionsreduktion	Quelle	Bemerkungen
-11 %	Wang et al. (2014)	pH 5.5; vergorene Gülle; Laborversuch
0 %		pH 6.5; vergorene Gülle; Laborversuch
0 %	Dai, Blanes-Vidal (2013)	pH 6.0; Laborversuch; Peaks von H ₂ S und CO ₂ während Behandlung
0 %		pH 5.8; Laborversuch; Peaks von H ₂ S und CO ₂ während Behandlung
0 %		pH 5.5; Laborversuch; Peaks von H ₂ S und CO ₂ während Behandlung

Allerdings liegt der organische Kohlenstoff in Schweinegülle nur zu geringen Teilen gelöst und überwiegend in Form von komplexen Verbindungen vor. Weiter ist die mikrobiel-

le Aktivität in der angesäuerten Gülle stark eingeschränkt. Demzufolge fanden Eriksen et al. (2008) sowie Ottosen et al. (2009) keine erhöhten Sulfidgehalte in angesäuerter Schweinegülle im Vergleich zu unbehandelter Gülle, was auf die Unterbindung der Reduktion von Sulfat durch Mikroorganismen bei einem pH von 5.5 zurückzuführen ist (Eriksen et al., 2012). Ottosen et al. (2009) erklären dies mit dem um einen Faktor von mehr als 100 höheren Anteil von protonierten kurzkettigen organischen Säuren in angesäuerter Gülle im Vergleich zu unbehandelter Gülle und deren Einfluss auf mikrobielle Prozesse. Eriksen et al. (2012) beobachteten ebenfalls eine Verminderung der Bildung von H₂S in angesäuerter Rindviehgülle, währendem die Bildung von Methanthiol zunahm, was zu erhöhten Geruchsemissionen führen kann.

2.4.3 Ausbringung von angesäuerter Gülle

2.4.3.1 Ansäuerung von Gülle während der Ausbringung

Daten zum Verfahren Ansäuerung von Gülle während der Ausbringung sind in Tabelle 7 aufgeführt. In diesen Versuchen wurde die Gülle jeweils mittels Schleppschauchverteiler ausgebracht. Die gemessene Emissionsminderung für Ammoniak liegt im Bereich von 50 % gemäss VERA Secretariat (2012) und Birkmose, Vestergaard (2013). Nyord (2016) fand Werte zwischen 12 % und 44 % Emissionsreduktion, wobei bei höherer Dosierung von Säure eine bessere Emissionsminderung erreicht wurde. Der pH-Wert bei der Ausbringung stimmt beim Verfahren SyreN im Mittel mit dem Zielwert von 6.0 überein (Toft, 2016). In Feldversuchen mit diesem System lag der pH zwischen 6.1 und 6.7 (ALFAM2 Datenbank; unveröffentlichte Daten).

Tabelle 7: Emissionsminderung für das Verfahren Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung auf der Stufe Ausbringung für Ammoniak im Vergleich zur unbehandelten Gülle in Prozent

Emissionsreduktion	Quelle	Bemerkungen
Rindvieh		
49 %	VERA Secretariat (2012)	pH 6.4; Feldversuch (36 m x 36 m); Messdauer: 144 h; Ausbringung mit Schleppschauch
Herkunft der Gülle nicht definiert		
50 %	Birkmose, Vestergaard (2013)	
12 %	Nyord et al. (2016)	Feldversuch Weizen, Ausbringung mit Schleppschauch; 1.5-3 L Säure t ⁻¹ Gülle
26 %		Feldversuch Weizen, Ausbringung mit Schleppschauch 3.5-5 L Säure t ⁻¹ Gülle
22 %		Feldversuch Grasland, Ausbringung mit Schleppschauch; 1.5-3 L Säure t ⁻¹ Gülle
44 %		Feldversuch Grasland, Ausbringung mit Schleppschauch; 3.5-5 L Säure t ⁻¹ Gülle

In Versuchen von Nyord (2016) nahm der pH-Wert an der begüllten Bodenoberfläche innerhalb von 24 h nach der Ausbringung um 1.5 bis 2.0 Einheiten zu und anschliessend während der folgenden 5 Tage wieder um ca. 1 Einheit ab. Der pH-Wert der angesäuerten Gülle lag über die ganze Dauer um ca. 1 Einheit niedriger als derjenige der unbehandelten Referenz. Dies gilt für Gülle der Verfahren Ansäuerung im Stall (Infarm, heute JH AG-RO A/S) und während der Ausbringung (SyreN).

2.4.3.2 Ausbringung von angesäuerter Gülle (Exaktversuche, Ansäuerung im Lager, im Stall)

Ammoniak

Der Effekt von Gülle, die vor der Ausbringung angesäuert wurde, auf die Emissionen, wurde bereits in den 1990er Jahren untersucht. Dementsprechend sind zahlreiche Untersuchungsergebnisse vorhanden (Tabelle 8, Tabelle 9). Die Emissionsminderung beträgt 0 % bis >90 % für NH₃, wobei die Mehrzahl der Werte über 50 % liegt. Die pH-Werte der Gülle, soweit diese verfügbar waren, lagen zwischen 5.5 bis 6.8. Emissionen bei Ausbringung von Gülle nach Ansäuerung im Stall wurden von Nyord et al. (2013) gemessen. Sie fanden in je 2 Feldversuchen im Frühjahr (Schweinegülle) und im Sommer (Rindviehgülle) eine Emissionsminderung von rund 70 %. Bei Schweinegülle handelte es sich um einen echten Vergleich: die angesäuerte und die nicht behandelte Gülle stammten aus dem gleichen Betrieb bzw. aus Abteilen desselben Stalls, deren Güllekeller im Rahmen des Versuchs mit angesäuerter bzw. nicht angesäuerter Gülle gespült wurden. Da bei einem Laufstall für Milchkühe im Praxismassstab eine solche Unterteilung nicht möglich ist, wurde für Rindviehgülle die unbehandelte Referenz aus einen nahe gelegenen, möglichst ähnlichen Betrieb entnommen. Die ausgebrachte Gülle stammte jeweils aus dem Endlager der Betriebe, die Entnahme erfolgte nach mindestens 4 Monaten Lagerdauer. Beide Betriebe wendeten das System der Firma Infarm, heute JH AGRO A/S an (mündl. Mitteilung T. Nyord, Aarhus University).

Tabelle 8: Emissionsminderung von angesäuerter Rindviehgülle auf der Stufe Ausbringung für Ammoniak von angesäuerter Gülle im Vergleich zur unbehandelten Gülle in Prozent

Emissionsreduktion	Quelle	Bemerkungen
95 %	Stevens et al. (1989)	pH 5.5; Laborversuch
>80 %		pH 5.5; Kleinparzellenversuch, Gras; Messdauer 2 h
83 %	Stevens et al. (1992)	pH 6.5; Kleinparzellenversuch, Gras; Messdauer 4 h
98 %		pH 6.0; Kleinparzellenversuch, Gras; Messdauer 4 h
83 %	Frost et al. (1990)	pH 5.5; Kleinparzellenversuch, Gras, Herbst 40 m ³ /ha*
30 %	Pain et al. (1990)	pH 5.5; Kleinparzellenversuch, Gras, Herbst 40 m ³ /ha
33 %		pH 5.5; Kleinparzellenversuch, Gras, Herbst 80 m ³ /ha
62 %		pH 5.5; Kleinparzellenversuch, Gras, Frühling 40 m ³ /ha
48 %		pH 5.5; Kleinparzellenversuch, Gras, Frühling 80 m ³ /ha
~70 %	Nyord et al. (2013); ALFAM2 Datenbank (unveröffentlicht)	pH 6.1-6.3; 2 Feldversuche (36 m x 36 m); mikromet. Messmethode; Messdauer: ca. 65 h; 2 bis 4 Wiederholungen; Ausbringung mit Schleppschauch; ca. 30 m ³ ha ⁻¹ ; Ansäuerung im Stall
62 %/61 %	Birkmose (2016)	Links: frühe Ausbringung/ rechts: späte Ausbringung

*Messung der NH₃-Emissionen: 10 Messungen à je 2 h; 0 bis 99 h nach der Ausbringung

Birkmose und Vestergaard (2013) geben einen typischen Wert von 50 % Emissionsminderung von NH₃ bei der Ausbringung von angesäuerter Gülle an, wobei Gülle nach Ansäuerung im Stall eingeschlossen zu sein scheint.

Fangueiro et al. (2015b) untersuchten in einem Kleinparzellenversuch auf gepflügtem Boden (Emissionsmessung mittels Kammer) Emissionen von unterschiedlich aufbereiteter (unbehandelt, fest-flüssig Separierung, Ansäuerung mittels H₂SO₄ auf pH 5.5) und mittels verschiedener Techniken ausgebrachte Rindviehgülle (vgl. auch Legende von Abbildung

3). Sie fanden um rund 62 % höhere Emissionen von angesäuerter Rindviehgülle, ausgebracht mittels Schleppschlauch, im Vergleich zur unbehandelten Gülle, die mittels Injektion ausgebracht wurde bzw. um 65 % tiefere Emissionen gegenüber unbehandelter Gülle, ausgebracht mittels Breitverteiler und unmittelbar eingearbeitet nach der Ausbringung. Die angesäuerte Dünngülle emittierte um 98 % weniger Ammoniak als die unbehandelte Dünngülle (Ausbringung mittels Schleppschlauch in beiden Verfahren). Der NH₃-Verlust der angesäuerten Dünngülle lag um 13 % tiefer als die angesäuerte unbehandelte Rindviehgülle.

Tabelle 9: Emissionsminderung von angesäuerter Schweinegülle auf der Stufe Ausbringung für Ammoniak im Vergleich zur unbehandelten Gülle in Prozent

Emissionsreduktion	Quelle	Bemerkungen
Schweine		
50 %	Dai, Blanes-Vidal (2013)	pH 6.0
62 %		pH 5.8
77 %		pH 5.5
67 %	Kai et al. (2008)	Ausbringung von nicht angesäuerter (pH: 7.5) bzw. angesäuerter Gülle (pH: 6.3) von unterschiedlichen Betrieben mit Schleppschlauch auf Winterweizen; 10 Messungen à je 2 h; 0 bis 99 h nach der Ausbringung
82 %	Stevens et al. (1989)	pH 6.0; Laborversuch
58 %	Nyord et al. (2013)	pH 6.8; Laborversuch; Messd.: 70 h; Appl. auf Bodenoberfläche
65 %		pH 6.2; Laborversuch; Messd.: 70 h; Appl. auf Bodenoberfläche
~70 %	Nyord et al. (2013); ALFAM2 Datenbank (unveröffentlicht)	pH 5.9; 2 Feldversuche (36 m x 36 m); mikromet. Messmethode; Messdauer: ca. 65 h; 2 bzw. 4 Wiederholungen; Ausbringung mit Schleppschlauch; ca. 30 m ³ ha ⁻¹ ; Ansäuerung im Stall
40 %	Wang et al. (2014)	pH 5.5; vergorene Gülle
20 %/0 %	Birkmose (2016)	Links: frühe Ausbringung/rechts: späte Ausbringung
Gärgülle		
44 %/57 %	Birkmose (2016)	Links: frühe Ausbringung/rechts: späte Ausbringung
Gülle von Nerzen		
50 %/78 %	Birkmose (2016)	Links: frühe Ausbringung/rechts: späte Ausbringung

In einem Laborversuch mit 92 Tagen Messdauer fanden Fangueiro et al. (2015c) eine Emissionsreduktion von 88 % von Rindviehgülle, die mittels H₂SO₄ auf pH 5.5 angesäuert und auf die Oberfläche breit verteilt wurde. Die Dünngülle nach fest-flüssig Separierung, angesäuert oder nicht weiter behandelt, erreichte im gleichen Versuch eine etwas grössere Emissionsminderung als die angesäuerte Rohgülle.

Treibhausgase

Fangueiro et al. (2015b) fanden in einem Kleinparzellenversuch (vgl. Kap. 2.4.3.2, Ammoniak) etwa gleich hohe N₂O-Emissionen von auf pH 5.5 angesäuerter Rindviehgülle, ausgebracht mit einem Schleppschlauch, im Vergleich zur unbehandelten Gülle, die mittels Injektion ausgebracht wurde. Für CH₄ resultierte eine Emissionsminderung von ca. 50 % für die angesäuerte Gülle. Im Vergleich zur Ausbringung mittels Breitverteiler und Einarbeitung wurde für die angesäuerte Gülle, ausgebracht mit einem Schleppschlauch, eine Emissionsminderung von 65 % für N₂O und von 42 % für CH₄ gemessen.

In einem Laborversuch fanden Fangueiro et al. (2015c; vgl. Kap. 2.4.3.2, Ammoniak) eine Reduktion des Treibhausgaspotentials von 28 % für Rindviehgülle, die mittels H_2SO_4 auf pH 5.5 angesäuert und auf die Oberfläche breit verteilt wurde, im Vergleich zur unbehandelten Gülle. Die Dünggülle nach fest-flüssig Separierung, angesäuert oder nicht weiter behandelt, unterschied sich im gleichen Versuch bezüglich Treibhausgaspotential nicht von der unbehandelten Gülle.

Petersen (2016) verglich in zwei Feldversuchen die folgenden Verfahren: i) unbehandelte Gülle, Ausbringung mittels Schleppschlauch, ii) angesäuerte Gülle (Ansäuerung während der Ausbringung), iii) angesäuerte Gülle (Ansäuerung im Stall), iv) unbehandelte Gülle, Ausbringung mittels Injektion mit einer nicht gedüngten Referenzfläche. Im ersten Versuch wurde Schweinegülle auf Winterweizen im April, im zweiten Versuch Rindviehgülle auf Grasland in Juni ausgebracht. Die Messdauer betrug je rund 1 Monat. Die Verfahren mit angesäuerter Gülle zeigten vergleichbar hohe N_2O -Emissionen wie diejenigen mit nicht angesäuerter Gülle, wobei das Verfahren iii) (Gülle angesäuert im Stall, Schleppschlauch) eher höhere Emissionen aufwies als das Verfahren i) (unbehandelte Gülle, Schleppschlauch). In einem über 21 Tage dauernden Laborversuch mit 3 verschiedenen Bodentypen, oberflächlicher Ausbringung von unbehandelter und auf pH 5.5 angesäuerter Rindvieh- und Schweinegülle liess sich kein Unterschied zwischen angesäuerter und nicht angesäuerter Gülle hinsichtlich N_2O -Emissionen feststellen (Langgaard Jensen, 2015, zit. in Petersen, 2016). In einem Laborversuch über 60 Tage, sandiger Boden, fanden Fangueiro et al. (2010) dagegen höhere N_2O Emissionen von mittels H_2SO_4 auf pH 5.5 angesäuerter Schweinegülle (1.39 % N_{tot}) im Vergleich zur gleichen unbehandelten Gülle (1.12 % N_{tot}). Die flüssige und feste Fraktion der gleichen Gülle nach fest-flüssig Separierung wiesen nach Ansäuerung niedrigere Emissionen auf im Vergleich zur den nicht angesäuerten Produkten.

2.4.3.3 Modellrechnungen

Hafner et al. (2016) modellierten im Rahmen des ALFAM2 Projekts (Hafner et al., 2015) die Wirkung der Ansäuerung von Gülle auf Ammoniakemissionen. Bei einer Ausbringungsmenge von $35 t ha^{-1}$ bzw. $100 kg TAN ha^{-1}$ und einem pH-Wert der angesäuerten Gülle von 6.0 resultiert eine Emissionsminderung zwischen 56 % und 74 % bei Breitverteilung sowie zwischen 74 % und 80 % für die Ausbringung mit Schleppschlauverteiler (Abbildung 2⁸).

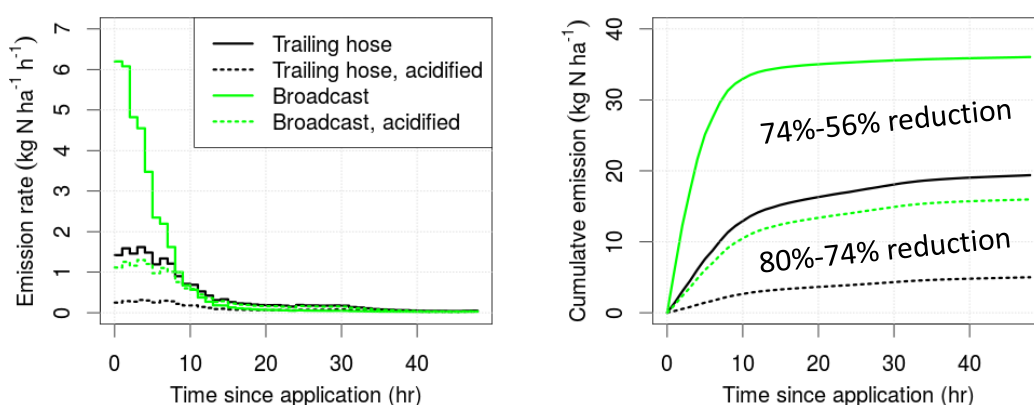


Abbildung 2: Emission in $kg N$ pro ha und Stunde (links) und kumulierte Emissionen in $kg N ha^{-1}$ sowie Emissionsminderung in Prozent (rechts) bei Ausbringung von angesäuerter Gülle mittels Schleppschlauch (schwarze Linien) und Breitverteiler (grüne Linien) im Vergleich zu nicht angesäuerter Gülle (Ausbringungsmenge von $35 t ha^{-1}$ bzw. $100 kg TAN ha^{-1}$, pH-Wert der angesäuerten Gülle: 6.0). Abbildung übernommen von Hafner et al. (2016); vgl. auch Text am Ende von Kap. 2.4.3.3.

⁸ Etliche der in Tabelle 7 bis Tabelle 9 aufgeführten Werte sind in dieser Modellrechnung enthalten.

Eine Emissionsminderung in der gleichen Grössenordnung wird unabhängig von den meteorologischen Bedingungen erreicht, d.h. sowohl bei warmen und windigen Verhältnissen (=hohes Emissionspotential) als auch bei Regen (=niedriges Emissionspotential). Allerdings ist zu beachten, dass die präsentierten Resultate der Modellrechnungen höher liegen als die aus Versuchen direkt berechneten Werte zur Emissionsminderung (mündl. Mitteilung S. Hafner, University of Southern Denmark). Vermutlich spielen unter Umweltbedingungen verschiedene Faktoren und Wechselwirkungen (Ausbringmethode, Boden, meteorologische Bedingungen) eine Rolle, die in einem Modell nur schwer abgebildet werden können.

2.4.4 Emissionsminderung über sämtliche Emissionsstufen

Bussink und van Rotterdam-Los (2011, 2012) geben aufgrund von Literaturstudien folgende Emissionsminderung über die Emissionsstufen Stall, Lager und Ausbringung an: bei Ansäuerung auf pH 5.5: 54 % bis 65 % und auf pH 6.0: 35 % bis 44 %. Die Reduktion ist am niedrigsten auf sandigen Böden und nimmt zu in Richtung Tonböden bzw. Torfböden. Die technische Beschreibung der Systeme zur Ansäuerung von Gülle im Stall (Miljøministeriet_Miljøstyrelsen, 2011a) gibt eine Emissionsminderung von 11 kg NH₃-N pro Milchkuh und Jahr an. Bei einer Emission von rund 36 kg NH₃-N pro Milchkuh und Jahr (Kupper et al., 2015) entspricht dies einer Reduktion der Gesamtemissionen eines Betriebs von ca. 30 %, sofern alle Tiere eines Betriebs in einem Stall mit Ansäuerung von Gülle gehalten werden. Diese Angaben basieren auf Modellrechnungen oder auf Annahmen. Messungen über alle Emissionsstufen sind nicht verfügbar. Hou et al. (2015) bezeichnen die Ansäuerung von Gülle als Technik zur Minderung von Treibhausgasemissionen.

2.5 Einsatz von angesäuerter Gülle im Pflanzenbau

2.5.1 Düngewirkung

Birkmose und Vestergaard (2013) führten einen Review zur Düngewirkung von angesäuerter Gülle durch. 55 Feldversuche aus der Zeit zwischen 2007 und 2012 zeigten für Winterweizen einen Mehrertrag von 170 kg pro 100 kg ausgebrachten N. In einer weiteren Serie von 4 Feldversuchen wurde ein Mehrertrag von 0.5 t Körner erreicht bei einem Ertragsniveau von rund 7 t pro ha. Birkmose (2016) fand in Feldversuchen (2014, 2015) Mehrerträge für Winterweizen von durchschnittlich 170 kg bei Ausbringung von angesäuerter Gülle mittels Schleppschauch. Eine Ertragszunahme zeigte sich bei allen Güllearten (Tabelle 10). Auf Grasland (Klee Gras Mischung; 11 Versuche 2012-2014) resultierten leicht höhere Erträge im Vergleich zur unbehandelten Gülle. Allerdings hatten die Verfahren mit angesäuerter Gülle eine leichte Abnahme des Kleeanteils zur Folge (mündl. Mitteilung T. Birkmose). Dies ist vermutlich auf den niedrigen pH-Wert der Gülle zurückzuführen.

Tabelle 10: Mehrertrag in kg Körner pro ha bei Ausbringung von angesäuerter Gülle mittels Schleppschauch in Winterweizen; Versuche von 2014, 2015 (Birkmose, 2016)

Hofdüngerart	Anzahl Versuche	Mehrertrag (kg ha ⁻¹)
Schweinegülle	9	50
Rindviehgülle	9	110
Gärgülle	7	220
Gülle von Nerzen	9	310
Mittelwert		170

Fangueiro et al. (2015b; vgl. Kap. 2.4.3.2) schloss aus seinem Versuch, dass die Ansäuerung von Rindviehgülle zu keiner Einschränkung des Ertrags im Vergleich zur Referenz (Ausbringung mittels Breitverteiler und unmittelbare Einarbeitung) führt.

Kai et al. (2008) fanden einen um 43 % höheren Düngewert (ausgedrückt als MFE: Mineral N Fertilizer Equivalent) von angesäuerter Gülle im Vergleich zur unbehandelten Gülle bei Anwendung in Hafer und Winterweizen. Alkanani et al. (1992) fanden keinen Einfluss der Ansäuerung von Gülle auf den Ertrag von Hafer im Rahmen von Topfversuchen. Frost et al. (1990) verglichen die Stickstoff Effizienz von unbehandelter und auf pH 5.5 angesäuerter Rindviehgülle mit einer mineralischen Variante. Letztere wies mit 96 % eine deutlich höhere Effizienz auf im Vergleich zur unbehandelten Gülle (36 % Effizienz). Gemäss Bus-sink und van Rotterdam-Los (2011) lassen sich bei Verwendung von angesäuerter Gülle 15-30 kg Mineraldünger N pro ha einsparen.

Sorensen und Eriksen (2009) untersuchten den Umsatz und die Pflanzenverfügbarkeit von N bei Ausbringung von angesäuerter Schweine- und Rindviehgülle in Hafer mittels Injektion und in Winterweizen mittels Schleppschlauchverteiler. Die angesäuerte Gülle zeigte höhere Gehalte an organischen Fettsäuren, was auf einen geringeren Abbau von organischer Substanz im Lager hinweist. Die Behandlung der Gülle hatte keinen Einfluss auf die Mineralisierung von N im Boden. Der Düngewert der Gülle, ausgedrückt als MFE, unterschied sich zwischen der angesäuerten Gülle und der unbehandelten Gülle bei Injektion nicht. Hingegen resultierte bei Ausbringung mittels Schleppschlauchverteiler ein MFE von 39 % und 63 % für Rindviehgülle bzw. 74 % und 101 % für Schweinegülle nicht behandelt und angesäuert. Nach Eriksen et al. (2008) ist der Düngewert des Schwefels in mit H_2SO_4 angesäuerter Schweinegülle nicht eingeschränkt, da der Pool an Sulfat im Lager über längere Zeit (in dieser Studie während 11 Monaten) stabil blieb.

Zudem weisen Beobachtungen und Erfahrungen aus der Praxis darauf hin, dass die Anwendung von angesäuerter Gülle zu einer besseren Stickstoffversorgung von Ackerkulturen und Grasland führten im Vergleich zu unbehandelter Gülle. Gemäss Sommer et al. (2015) verbessert die Ansäuerung von Gülle im Stall die Verfügbarkeit von N und bei Separierung der angesäuerten Gülle stimmt der Gehalt des Pflanzen verfügbaren Anteils von N, P und K in den Endprodukten besser mit dem Pflanzenbedarf überein. Bei einer Anwendung dieser Technik in der Schweiz ist davon auszugehen, dass im Zusammenhang mit dem höheren Düngewert eine Erhöhung des N-Ausnutzungsgrades von angesäuerter Gülle gemäss Suisse-Bilanz diskutiert werden muss.

2.5.2 Auswirkungen auf den Boden und das Grundwasser

Gemäss Fangueiro et al. (2010, 2013, 2015a, 2016) wird die Nitrifikation durch die Ausbringung von angesäuerter Gülle reduziert oder unterbunden. Im Rahmen eines Laborversuchs wurde eine Hemmung der Nitrifikation festgestellt, wobei diese niedriger lag als diejenige des Nitrifikationshemmers 3,4-Dimethylepyrazolephosphat (DMPP). Der Effekt hing vom Bodentyp ab. Auf Böden mit einer hohen Pufferkapazität war der Effekt geringer. Die Hemmung der Nitrifikation kann zur Verminderung von N_2O -Emissionen beitragen (Ruser, Schulz, 2015). Gleichzeitig besteht ein Potential zur Zunahme von Ammoniakemissionen (Kim et al., 2012). Dagegen sehen Fangueiro et al. (2016) in angesäuerter Gülle gegenüber Nitrifikationshemmern den Vorteil, dass eine Emissionsminderung von N_2O möglich ist, ohne dass eine Zunahme des Verlusts von NH_3 erfolgt.

Fangueiro et al. (2015b) untersuchten Bodenparameter (Enzymaktivität und Nitrifikationspotential) im Rahmen eines Feldversuchs nach Ausbringung von unterschiedlich aufbereiteter und ausgebrachter Rindviehgülle (vgl. Kap. 2.4.3.2). Allgemein lassen sich keine negativen Effekte aufzeigen (Abbildung 3). Das verminderte Nitrifikationspotential zeigt sich auch in dieser Studie.

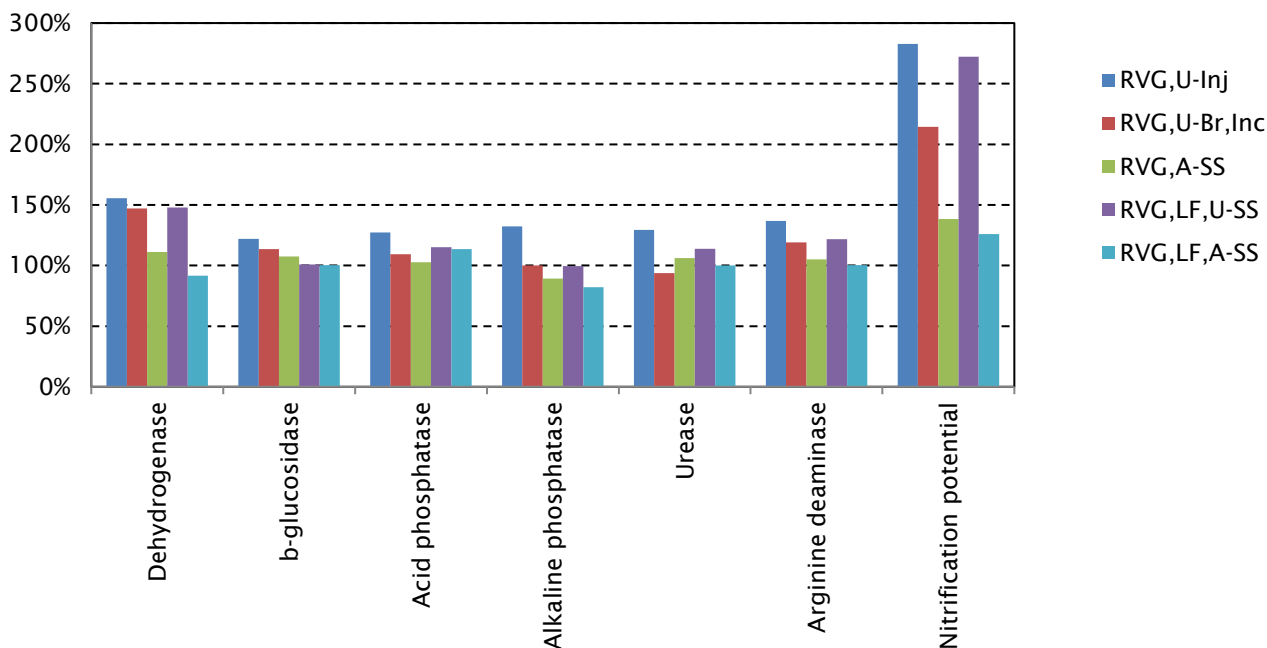


Abbildung 3: Bodenparameter (Enzymaktivität und Nitrifikationspotential) nach Ausbringung von unterschiedlich aufbereiteter und ausgebrachter Rindviehgülle in Prozent der nicht gedüngten Kontrolle gemäss Fangueiro et al. (2015b). RVG,U-Inj: unbehandelte Gülle, Injektion; RVG,U-Br,Inc: unbehandelte Gülle, Breitverteiler-unmittelbar eingearbeitet; RVG,A-SS: angesäuerte Gülle, Schleppschlauch; RVG,LF,U-SS: Dünggülle Schleppschlauch; RVG,LF,A-SS: angesäuerte Dünggülle Schleppschlauch.

Fangueiro et al. (2013) beobachteten den Umsatz von C und N nach Ansäuerung von Rindviehgülle mit hohem und niedrigem TS-Gehalt im Vergleich zur jeweils unbehandelten Gülle. Erstere zeigte einen höheren Verlust von CO₂ auf der Stufe Lager gegenüber der nicht angesäuerten Referenz, währendem bei Letzterer kein Unterschied bestand. Nach der Ausbringung waren die Werte für Bodenrespiration, Nitrifizierung und mikrobieller Biomasse im Boden geringer für die angesäuerte Gülle. Insgesamt resultierten niedrigere C-Verluste bei angesäuerter Gülle in beiden Fällen und über beide Stufen Lager und Ausbringung.

Mahrn et al. (1999) untersuchten den Einfluss von unbehandelter und angesäuerter Schweinegülle (pH 5.5) auf Nematoden⁹ im Rahmen von Laborexperimenten. Die totale Anzahl von Nematoden sowie die Anzahl von einzelnen taxonomischen Gruppen unterschieden sich zwischen den Verfahren mit unbehandelter und angesäuerter Schweinegülle. Diese Studien weisen auf eine Beeinflussung mikrobiologischer Vorgänge im Boden hin. Weitere Untersuchungen über Auswirkungen von angesäuerter Gülle auf bodenbiologische Parameter sind nicht bekannt.

Bei Anwendung von angesäuerter Gülle sind zusätzliche Mengen von Kalk nötig, um ein Absinken des pH-Werts der Böden zu vermeiden (Bussink et al., 2012; pers. Mitteilung A. Vestergaard, Knowledge Center for Agriculture P/S, Aarhus). Sorensen (2016) schätzte den Bedarf von Kalk (in CaCO₃ Äquivalenten) aufgrund der Ansäuerung von Gülle auf 153 kg ha⁻¹ und 122 kg ha⁻¹ für Rindvieh und Schweinegülle (Tabelle 11).

⁹ Nematoden sind ein sehr geeigneter Indikator zur Beurteilung von Struktur und Funktion von Lebensgemeinschaften im Boden und deren Reaktion auf Veränderungen des Bodens (Bongers, Ferris, 1999 zit in. Mahrn et al., 1999)

Tabelle 11: Jährlicher Bedarf von Kalk (in CaCO₃ Äquivalenten) pro ha aufgrund der Ansäuerung von Gülle gemäss Schätzung von Sorensen (2016)

	Rindviehgülle	Schweinegülle
Annahmen:		
Menge von 96 % Schwefelsäure in kg/t	6	6
Gehalt der Gülle N _{tot} in kg/t	4	5
Ausbringungsmengen pro Jahr:		
Menge N _{tot} in kg/ha	100	100
Menge von 96 % Schwefelsäure in kg/ha	150	120
Menge erforderlich zur Aufkalkung in CaCO ₃ Äquivalenten (kg/ha)	153	122

In Dänemark scheint die zunehmende Verwendung von angesäuerter Gülle mit einer Zunahme des Verbrauchs von Kalk einherzugehen¹⁰. Der Verbrauch lag zwischen 2004 und 2010 im Bereich von 345'000 t CaCO₃ (2010) und betrug im Jahr 2013 552'000 t CaCO₃, wobei zwischen 2004 und 2010 von Jahr zu Jahr Schwankungen im Verbrauch von rund 20-25 % üblich waren. Wenn man eine Kalkmenge von rund 400'000 t CaCO₃ für die Zeit von vor ca. 2010 bzw. vor der breiten Anwendung der Ansäuerung von Gülle annimmt und dieser Menge den Verbrauch von und 552'000 t CaCO₃ für 2013 gegenüberstellt, kann man den Schluss ziehen, dass der Verbrauch von Kalk aufgrund der Ansäuerung von Gülle um rund 20-25 % zugenommen hat.

Verschiedene Studien zeigten höhere N₂O Emissionen aus dem Boden bei abnehmendem pH-Wert des Bodens: i) Ackerland, Braunerde mit pH 5.5 bis 7.0 (Russenes et al., 2016), ii) zu Waldfläche umgewandeltes Grasland bepflanzt mit Birken, Alter 35 Jahre, Moorboden mit pH 3.6 bis 5.9 (Weslien et al., 2009), iii) Waldboden mit pH 4.0 bis 7.0 (Van den Heuvel et al., 2011). Cuhel et al. (2010) konnten diesen Zusammenhang nicht bestätigen. Sie fanden aber ein höheres Verhältnis N₂O/(N₂O+N) bei tieferem Boden pH. Diese Resultate weisen darauf hin, dass ein Absinken des Boden pH-Werts infolge der Ansäuerung von Gülle vermieden werden muss. Dies insbesondere aus der Sicht der Treibhausgasemissionen, da erhöhte N₂O-Emissionen aus dem Boden die Vorteile dieses Systems hinsichtlich Emissionsminderung untergraben würden.

Fangueiro et al. (2015a) weisen darauf hin, dass aufgrund der grösseren Löslichkeit verschiedener Elemente in angesäuerter Gülle höhere Anteile davon ausgewaschen werden könnten. Gemäss Sorensen (2016) ist in durchnässten Böden unter reduzierenden Bedingungen eine Mobilisierung von Phosphor und dessen Auswaschung möglich.

Bussink et al. (2012) berechneten bei einer Dosierung von 10 kg H₂SO₄ pro t Gülle eine Fracht von 117-165 kg Schwefel (S) in die Böden pro Jahr. Birkmose (2016) berechnete die ausgebrachte Menge von S für eine Klee-gras-Mischung (Tabelle 12).

Flisch et al. (2009a) geben einen Bedarf je nach Kultur, Boden und Hofdüngereinsatz von 0-60 kg S pro ha und Jahr an. Würden eine Dosierung von 5.7 kg Schwefelsäure pro m³ Gülle (vgl. Kap. 2.4.1.3) und eine Verdünnung mit Wasser 1:1, 4 Güllegaben à 25 m³ Rindviehgülle pro ha und Jahr angenommen, was praxisüblich ist bzw. einer total ausgebrachten Menge von rund 120 kg N₁₀₅ bzw. 90 kg P₂O₅ pro ha und Jahr gleichkommt, entspräche dies einer Zufuhr von rund 110 kg S/ha und Jahr (inkl. in der Gülle vorhandener Schwefel von 0.3 bis 0.4 kg S pro m³ Rindviehvollgülle gemäss Flisch et al., 2009a).

¹⁰https://www.landbrugsinfo.dk/planteavl/goedskning/kalkning/sider/Kalkstatistik-for-2013_pl_po_14_220.aspx

Tabelle 12: Zufuhr von Schwefel bei unterschiedlich hohen Güllegaben und unterschiedlich hoher Dosierung von 96 % Schwefelsäure (H₂SO₄) im Vergleich zum Bedarf von Schwefel (S) im Futterbau. Die kursiv gedruckten Zahlen geben die Differenz zwischen S-Bedarf von Klee gras und ausgebrachter S-Menge an. Zahlen <0 bzw. >0: Bedarf bzw. Überschuss (angepasst nach Birkmose, 2016)

S-Bedarf	Anzahl Gaben	Ausbringung von 20 t Gülle pro Gabe*		
		1 Liter H ₂ SO ₄ t ⁻¹	2 Liter H ₂ SO ₄ t ⁻¹	3 Liter H ₂ SO ₄ t ⁻¹
30 kg S ha ⁻¹ a ⁻¹	1	11 (-19) kg S	22 (-8) kg S	32 (2) kg S
	2	22 (-8) kg S	43 (13) kg S	65 (35) kg S
	3	32 (2) kg S	65 (35) kg S	97 (67) kg S
	4	43 (13) kg S	86 (56) kg S	130 (100) kg S

* Bei den ausgebrachten Mengen an S ist nicht klar, ob der in Gülle enthaltene Schwefel eingerechnet ist oder nicht.

In der Gülle vorliegendes oder durch den Abbau von organisch gebundenem Schwefel gebildetes Sulfat (SO₄²⁻) verhält sich in Boden ähnlich wie Nitrat (Flisch et al., 2009a). Bei einem Überschuss an Schwefel ist mit einer Auswaschung ins Grundwasser zu rechnen (Bussink, van Rotterdam-Los, 2011). Um dies zu vermeiden, müsste die ausgebrachte Menge von angesäuerter Gülle demnach auf rund 30 bis 50 m³ Gülle pro ha und Jahr begrenzt werden¹¹. Dies kann dazu führen, dass angesäuerte Gülle ausserhalb der betriebs-eigenen Fläche ausgebracht werden muss, was zusätzliche Transporte zur Folge hätte.

2.6 Geruchsbildung

Der hohe Gehalt an anorganischem Schwefel in mittels H₂SO₄ angesäuerter Gülle kann potentiell zur Bildung von flüchtigen schwefelhaltigen Verbindungen führen (Eriksen et al., 2008), welche eine niedrige Geruchsschwelle aufweisen. Eriksen et al. (2012) untersuchten die Bildung von Schwefelwasserstoff (H₂S), Methanthiol (MT), Dimethylsulfid (DMS) und Dimethyldisulfid (DMDS) in angesäuerter Rindviehgülle. Sie beobachteten eine Verminderung der Bildung von H₂S, währenddem die Bildung von Methanthiol zunahm. Sie kamen zum Schluss, dass die Ansäuerung von Gülle potentiell zu erhöhten Geruchsemissionen führen kann. Im Rahmen von Feldversuchen auf 2 Betrieben mit Mastschweinen wurde bei Ansäuerung im Stall je eine verminderte und eine gleich bleibende Geruchsbelastung festgestellt (ETA-Danmark A/S, 2014). Eine verstärkte Geruchsbelastung aus dem Stall ist gemäss Miljøministeriet_Miljøstyrelsen (2011a,b) im Zusammenhang mit der Ansäuerung von Gülle im Stall nicht gegeben. Aus dem Mischtank könnten aber lokal Geruchsbelastungen auftreten.

Miljøministeriet_Miljøstyrelsen (2011b) enthält den Hinweis, dass der Mischtank mit einem Kohlefilter ausgestattet werden könnte. JH AGRO A/S bietet einen Filter an, der auf Betrieben mit Schweinen die Geruchsbelastung um 50 % vermindert (Christiansen, 2016). Diese Informationen weisen darauf hin, dass mit einer erhöhten Geruchsbelastung zu rechnen ist.

¹¹ Berechnung: bei einer praxisüblichen Ausbringung von Gülle 4 Güllegaben à 25 m³ Rindviehgülle pro ha und Jahr wird rund 110 kg S ausgebracht. Bei einem Bedarf von 0-60 kg S/ha und Jahr muss die Ausbringmenge auf die Hälfte bis einen Drittel reduziert werden.

2.7 Arbeitssicherheit und Tiergesundheit

2.7.1 Ansäuerung von Gülle im Stall

Die Arbeitssicherheit bezieht sich vor allem auf (i) die Lagerung und den Umgang mit einer konzentrierten Säure auf einem landwirtschaftlichen Betrieb und (ii) die Bildung von gesundheitsschädlichen Gasen, insbesondere Schwefelwasserstoff in geschlossenen Räumen (v.a. Ställen). Die Ausführungen zum Punkt (i) basieren auf den Regelungen und der Praxis in Dänemark.

(i) Zur Lagerung von konzentrierter Schwefelsäure auf einem landwirtschaftlichen Betrieb sind ein doppelwandiger Tank sowie Rammschutzpoller zur Verhinderung von Anfahrtschäden vorgeschrieben. Die Anforderungen der Arbeitssicherheit im Umgang mit konzentrierter Säure wird sichergestellt, indem das Personal der Betriebe selbst keine Manipulationen mit den entsprechenden Einrichtungen durchführt, sondern Transport der Säure, Unterhalt der Anlage und Behebung von Störungen vollständig ausgelagert werden (pers. Mitteilung A. Vestergaard, Knowledge Center for Agriculture P/S, Aarhus). Ein landwirtschaftlicher Betrieb, welcher Säure auf dem Betrieb lagert, muss die gleichen Anforderungen erfüllen wie ein Industriebetrieb: Kontrolle des Lagertanks, Präsenz des Betreibers, sicherer Zugang zum Lagerbehälter für den Lieferanten, beschränkter Zugang für Drittpersonen, Warnaufschriften, Wasser/Notdusche in der Nähe des Lagertanks (Jørgensen, 2016).

(ii) Aus den Ausführungen von Kap. 2.4.2 geht hervor, dass die Bildung von Schwefelwasserstoff durch die Ansäuerung von Gülle grundsätzlich nicht verstärkt wird. Dies wird durch verschiedene Studien bestätigt. Hjorth et al. (2013) beobachteten eine geringere Konzentration von H_2S und CH_4 in der Stallluft bei im Stall angesäuerter Gülle. Jensen (2002) verfolgte die Konzentration von Schwefelwasserstoff in Güllekanälen, gefüllt mit angesäuerter Gülle, und fand keine Anreicherung auf ein Niveau, welches eine gesundheitsschädigende Wirkung für Mensch und Tier haben könnte. Die Tageszunahme der Schweine im System mit angesäuerter Gülle war erhöht. Pedersen und Albrechtsen (2012) stellten dagegen ausgeprägte Spitzenbelastungen von bis zu 10 ppm fest zum Zeitpunkt der Behandlung der Gülle im Mischtank und des Umpumpens der behandelten Gülle in den Stall. In BVET (2013) ist eine Höchstkonzentration von H_2S in der Stallluft von 0.5 ppm aufgeführt (kurzfristig während Entmistung: 5 ppm). Die technische Beschreibung der Systeme zur Ansäuerung von Gülle im Stall (Miljøministeriet_Miljøstyrelsen, 2011a,b) enthält keine spezifischen Hinweise auf Gefahren verbunden mit der Bildung von Schwefelwasserstoff in Ställen.

2.7.2 Ansäuerung von Gülle während der Ausbringung

Das Verfahren der Ansäuerung der Gülle während der Ausbringung basiert auf IBC. Diese werden in Dänemark wie Tanks zur Lagerung der Schwefelsäure von einer Transportfirma befüllt. Dieser Arbeitsschritt erfolgt mittels eines speziell dafür entwickelten Stutzens, der beim Erreichen des Füllniveaus den Durchfluss unterbricht. Aufgrund einer freiwilligen Vereinbarung werden die IBC-Behälter nach 5 Jahren Betrieb nicht weiterverwendet (Jørgensen, 2016). Die Anforderungen an den Standort zur Befüllung der IBC sind im Übrigen analog denjenigen des Verfahrens Ansäuerung von Gülle im Stall (Kap. 2.7.1). Die IBC Behälter werden auf die Vorrichtung an der Fronhydraulik aufgeladen. Der Anschluss an die Leitung zum Druckfass erfolgt durch den Traktorführer mittels einer Kupplung, die einen Rücklauf von Säure verhindert. Neben dem Säuretank ist ein Wasserbehälter montiert zum Spülen von Handschuhen und Geräten sowie für Notfälle.

Das System unterliegt nicht der ADR Konvention der UNECE¹² (Strassentransport von Gefahrgut). Die Herstellerfirma von SyreN unterzieht sich trotzdem einem freiwilligen Beilligungsverfahren vor der Lieferung an die Nutzer, welches die folgenden Punkte beinhaltet: Inspektion des Geräts, um sicherzustellen, dass die verwendeten Komponenten den Zulassungsanforderungen entsprechen sowie eine Dichtigkeitsprüfung. Die Nutzer werden in einem zweitägigen Kurs geschult. Der Fronttank ist mit seitlichen Kameras ausgerüstet, welche dem Fahrer helfen, Kollisionen bei Manövern zu vermeiden (Toft, 2016).

Bisher hat das dänische Umweltbundesamt Kenntnis von einem Zwischenfall im Zusammenhang mit der Ansäuerung im Stall. Er soll sich aufgrund eines Konstruktionsfehlers ereignet haben (mündl. Mitteilung E.N.L. Christiansen, K. Peters, Dänisches Umweltbundesamt). Für die übrigen zwei Verfahren Ansäuerung während der Lagerung und während der Ausbringung sind keine Unfälle im Zusammenhang mit Säure bekannt.

2.8 Weitere mögliche Probleme

2.8.1 Korrosion von Baumaterialien

Sorensen und Eriksen (2009) stellten die Frage, inwieweit hohe Sulfatkonzentrationen im Zusammenhang mit der Ansäuerung von Gülle den Beton von Behältern und Kanälen angreifen können. Sie stellten fest, dass sich dieses Problem auf bestimmte Typen von Beton beschränkt. In Dänemark gibt es dazu eine Anleitung zur Auswahl geeigneter Typen von Beton¹³. Hinsichtlich Korrosion von weiteren technischen Einrichtungen wie Rührwerke liegen keine Untersuchungen vor. Gemäss Christiansen (2016) wurden keine Schäden innerhalb von Ställen festgestellt.

Nach Peters (2016) ist in Dänemark eine Inspektion von Güllelagerbehältern im Abstand von 10 Jahren (5 Jahre für Behälter in der Nähe von Oberflächengewässern) vorgeschrieben. Dabei werden pro Jahr ca. 2500 Anlagen inspiziert (Total Betriebe mit Tierhaltung: 16300). Bisher wurden keine Schäden festgestellt, welche auf die Lagerung von angesäuerter Gülle zurückzuführen waren.

2.8.2 Schaumbildung

Starmans et al. (2009) geben an, dass die Bildung von Schaum auf vielen Betrieben mit Schweinen auftritt und ein Problem darstellt. Schaumbildung wird auch von Bussink et al. (2012) als Problem genannt. Die Ausführungen von Peters (2016) und von Misselbrook et al. (2016) zeigen, dass es bei der Ansäuerung im Güllelager zur Bildung einer dicken Schaumschicht kommen kann.

2.8.3 Verfügbarkeit und Qualität von Schwefelsäure

Schwefel weist einen Anteil von 0.052 % (Gewichtsprozent) in der Erdkruste auf (Louie, 2005) und ist damit eines der 20 am häufigsten Elemente. Er kommt in elementarer Form in festen Lagerstätten in der Erdkruste oder in Erdgas vor. Schwefel wird selten in elementarer Form für Endprodukte verwendet, sondern meistens in Form eines Zwischenprodukts wie Schwefelsäure. Diese ist eine der wichtigsten Chemikalien überhaupt und zählt weltweit zu den meistproduzierten chemischen Grundstoffen¹⁴. 1993 wurden ca. 135 Mio. t Schwefelsäure produziert. Eine andere Quelle gibt für 2012 230.7 Mio. t an (Anonym,

¹² European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road; http://www.unece.org/trans/danger/publi/adr/adr_e.html (11.10.2016)

¹³ Landbrugets Byggeblad nr. 102.17.19 –"Vejledning i valg af betonkvalitet i forbindelse med forbinding af gylle" https://www.landbrugsinfo.dk/byggeri/byggeblade/sider/Byggeblad_102_17_19_20111101.pdf

¹⁴ Dieses Kapitel basiert soweit nicht anders referenziert auf Informationen aus Wikipedia: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwefels%C3%A4ure> (27.02.2015)

2014). Ausgangsmaterial für die Herstellung ist oft elementarer Schwefel, der in großen Mengen (2007: 66 Mio. t) bei der Entschwefelung von Erdgas und Rohöl anfällt. Die Verhüttung schwefelhaltiger Erze zur Gewinnung von Kupfer, Zink oder Blei ist eine wichtige Quelle von Schwefeldioxid.

Würde in der Schweiz die gesamte Güllemenge¹⁵ auf ca. pH 5.5 angesäuert (angenommene Dosierung für Rindviehgülle 5.5 kg m⁻³ und für Schweinegülle 8.0 kg m⁻³), resultierte ein Verbrauch von ca. 90'000 t Schwefelsäure. Dies entspricht 0.07 % der gesamten weltweit pro Jahr hergestellten Menge (135 Millionen t). Ob sich die Verfügbarkeit von Schwefelsäure limitierend auf die Verwendung zur Ansäuerung von Gülle auswirkt, falls dieses Verfahren breit angewendet würde, lässt sich derzeit nicht abschliessend beantworten.

Unter Annahme der Schwermetallgehalte nach Andersen (2013) und Louie (2005) würden bei Ansäuerung der gesamten Güllemenge in der Schweiz die in Tabelle 13 aufgeführten Schwermetallfrachten resultieren und mit der Gülle in die Böden eingetragen. Der geschätzte maximale Anteil liegt für alle Elemente in der Grössenordnung Promille bis wenige Prozente gemessen an der Gesamtfracht, welche gemäss Kupper et al. (2014) in die landwirtschaftliche Nutzfläche eingetragen wird.

Tabelle 13: Publierte Schwermetallgehalte von Schwefelsäure (H₂SO₄). Angenommene Gehalte für die Frachtberechnungen: Mittelwert (MW): ½ des Gehalts gemäss Andersen (2013). Minimum (Min): ½ von MW. Maximum (Max): höchster Wert gemäss Publikationen. Eintrag in Gülle: Schwermetallfracht, welche mit H₂SO₄ in die Gülle eingetragen wird bei Ansäuerung der gesamten Güllemenge. Fracht LN: totale Schwermetallfracht gemäss Kupper et al. (2014), welche pro Jahr in die landwirtschaftliche Nutzfläche der Schweiz eingetragen wird. Fracht Anteil H₂SO₄: Anteil der berechneten Fracht in Schwefelsäure bei Ansäuerung der gesamten Güllemenge im Vergleich zum totalen Schwermetalleintrag in die landwirtschaftliche Nutzfläche

	Gehalt H ₂ SO ₄ publiziert		Gehalt H ₂ SO ₄ angenommen			Eintrag in Gülle Ansäuerung mit H ₂ SO ₄			Fracht LN***	Fracht Anteil H ₂ SO ₄ Ansäuerung Gülle
	*	**	MW	Min	Max	MW	Min	Max		
	ppm					t a ⁻¹			t a ⁻¹	% der totalen Fracht
Cadmium	<0.5	-	0.25	0.13	0.5	0.023	0.011	0.045	2	1.33 % (0.66-2.65 %)
Chrom	<1	<0.5	0.25	0.13	1	0.023	0.011	0.090	43	0.05 % (0.03-0.21 %)
Kupfer	1-50	<0.3	0.15	0.08	50	0.014	0.007	4.506	202	0.01 % (0.00-2.23 %)
Nickel	<1	<0.6	0.3	0.15	1	0.027	0.014	0.090	31	0.09 % (0.04-0.29 %)
Blei	1-5	<0.6	0.3	0.13	5	0.027	0.014	0.451	52	0.05 % (0.03-0.87 %)
Zink	<1-40	<0.3	0.15	0.08	40	0.014	0.007	3.605	641	0.00 % (0.00-0.56 %)

* Louie (2005): typische Spezifikationen von verschiedenen Herstellern

** Andersen (2013): Spezifikation des Lieferanten

*** Fracht in die landwirtschaftliche Nutzfläche gemäss Kupper et al. (2014)

2.9 Kosten der Ansäuerung von Gülle

JH Agro A/S geben Kosten einer Anlage zur Ansäuerung im Stall für mittlere/grosse Einheiten (d.h. Grössenordnung mehrere 100 Milchkühe, mehrere 1000 Mastschweine) im Bereich zwischen 75'000 und 100'000 Euro für Milchkühe und zwischen 135'000 und 175'000 Euro für Schweine an (nur Anlage, d.h. Leitungen, Steuerung; ohne Arbeitskosten, ohne Säuretank). Für den Service der Anlage sind ca. 2700 Euro pro Jahr zu rechnen (mündl. Mitteilung Kurt West, Agro A/S). In der Schweiz betragen die Kosten für 96 % Schwefelsäure inkl. Lieferung SFR 0.16 pro kg exkl. MWSt bei einer Liefermenge von rund

¹⁵ Schätzung der Menge gemäss Tierzahlen von 2010, der Verteilung der Stallssysteme mit Produktion von Vollgülle und Gülle/Mist gemäss Kupper et al. (2015) sowie der je Tierkategorie produzierten Güllemenge gemäss Flisch et al. (2009b).

10 t (mündl. Mitteilung Brenntag Schweiz). Pro m³ Gülle entspricht dies SFR 0.8 bis SFR 2.4. Weiter zu den Betriebskosten sind die Auslagen für elektrischen Strom zu rechnen.

Jonassen (2016) gibt die Kosten einer Anlage zur Ansäuerung von Gülle im Stall an, welche einen Fluss von 50'000 kg N_{tot} in den Hofdüngern generiert (Tabelle 14). Die Basis für die Berechnungen ist das Jahr 2011.

Tabelle 14: Kostenschätzung für eine Anlage zur Ansäuerung von Gülle im Stall (Basis der Werte: 2011; Quelle: Jonassen, 2016)

	Milchkühe	Mastschweine
Tierzahl	375	5'455*
Produzierte Güllemenge (t pro Jahr)	8'000	9'500
Baukosten (Euro)	100'000	250'000
Servicekosten (Euro pro Jahr)	1'000	4'000
Kosten für die Schwefelsäure (Euro pro Jahr)	7'500**	17'500***
Stromkosten (Euro pro Jahr)	900**	3'200***
Arbeitskosten / Stroh für natürliche Schwimmdecke auf Güllelager (Euro pro Jahr)	2'000	100
Zusatzkosten für Produkt zur Aufkalkung der Böden (Euro pro Jahr)	1'500	1'500
Zusätzlicher Nutzen für N und S in der Gülle (Euro pro Jahr)	-8'500	-11'000

*Anzahl produzierte Tiere bei 3.3 Umtrieben pro Jahr: 18'000.

**Annahme: 7 kg 96 % Schwefelsäure pro m³ Gülle; 1 kWh pro m³ Gülle

*** Annahme: 14 kg 96 % Schwefelsäure pro m³ Gülle; 3 kWh pro m³ Gülle

Sindhøj und Rodhe (2013) beziffern die Baukosten einer Anlage zur Ansäuerung im Stall auf rund 100'000 Euro (Säuretank, Pumpen, Steuerung), wobei keine Angaben zur Grösse der Anlage gemacht werden. Der Bau solcher Systeme wurde 2016 in Dänemark mit rund 1.3 Mio. Euro unterstützt (Ravnborg, 2016). Für alle Systeme zur Ansäuerung von Gülle, die auf der Liste des dänischen Umweltamtes aufgeführt sind, steuert der dänische Staat einen Beitrag von bis zu 40 % der Anschaffungskosten bei (Toft, 2016; mündl. Mitteilung E.N.L. Christiansen, K. Peters, Dänisches Umweltbundesamt).

Die Kosten der Ansäuerung während der Ausbringung werden mit 0.55 Euro pro m³ Gülle angegeben plus die Kosten für die Säure (0.35 Euro pro Liter oder 0.19 Euro pro kg). Bei einem Verbrauch von 1.5 Liter Säure pro m³ Gülle entstehen Gesamtkosten von 1.1 Euro pro m³ Gülle (Vestergaard, 2013 zit. in Sindhøj und Rodhe, 2013). Birkmose (2016) gibt Kosten der Ansäuerung von Gülle während der Ausbringung von Gülle von rund 20 Euro pro ha an. Je nach Bedingungen kann aber auch eine Einsparung von 2 Euro pro ha resultieren. Bei dieser Rechnung scheinen die zusätzlichen Kosten für eine Kalkung nicht enthalten zu sein. Diese werden von Brink et al. (2011) allgemein auf 0.1 Euro pro kg ausgebrachten N geschätzt.

3. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ansäuerung von Gülle mittels konzentrierter Schwefelsäure wird in Dänemark relativ breit angewendet. Der Anteil der angesäuerten Gülle entspricht ca. 20 % der gesamten Güllemenge. Wird Gülle im Stall auf rund pH 5.5 angesäuert, was eine Säuremenge von rund 5.5 kg m⁻³ Gülle (Rindvieh) bis ca. 15 kg m⁻³ Gülle (Schweine) erfordert, ist für einen Betrieb eine wesentliche Emissionsminderung von rund 30 bis 50 % über alle Emissionsstufen möglich. Diese Einschätzung lässt sich trotz der in Kap. 2.4.1.4 geäusserten Bemerkungen hinsichtlich Messmethodik aufrechterhalten, da es keinen Anlass gibt, den Zusammenhang zwischen pH-Wert in der Gülle und dessen Einfluss auf die Freisetzung von Ammoniak in Frage zu stellen. Die gemessene Emissionsminderung auf den Stufen Lagerung und Ausbringung bei Gülle, welche im Stall angesäuert wurde, bestätigen dies. Voraussetzung für die Wirksamkeit der Ansäuerung ist jedoch, dass die Exkremate unmittelbar nach der Ausscheidung in ein Milieu mit niedrigem pH-Wert gelangen. Dies dürfte in der Praxis für Rindvieh nur bei einem gut gereinigten Vollspaltenboden gegeben sein. Bei planbefestigten Böden in Rindvieh-Laufställen, welche in der Schweiz am häufigsten vorkommen (vgl. Fussnote 7), ist dies nicht der Fall. In solchen Systemen dürfte die erreichbare Emissionsminderung niedriger sein, als auf der Technolieliste des dänischen Umweltbundesamtes angegeben wird. Dies gilt ebenso für Teilspaltenböden in der Schweinehaltung, sofern die Tiere ihre Exkremate nicht ausschliesslich im perforierten Teil des Stalles absetzen. Inwieweit die in der Schweiz vermutlich grössere Verwendungsmenge von Stroh zur Einstreue einen Einfluss auf die Emissionsminderung hat, lässt sich nicht abschliessend beantworten. Möglicherweise ist eine Erhöhung der Zugabe von Säure erforderlich (mündl. Mitteilung S.O. Petersen, Aarhus University).

Auf den Stufen Lagerung und Ausbringung von Gülle beträgt die Emissionsminderung für NH₃ rund 50 % bis mehr als 90 % bzw. 50 bis 60 %, wobei in einigen Versuchen auch niedrigere Werte gemessen wurden. Auch Gülle von Anlagen zur Ansäuerung von Gülle im Stall erreichen solche Werte auf den Stufen Lagerung und Ausbringung trotz des beobachteten Anstiegs des pH-Werts im Güllelager. Zudem wurde auf allen Emissionsstufen eine verminderte Freisetzung von Methan beobachtet. Da in den verfügbaren Versuchen die Ansäuerung wenig Einfluss auf die Freisetzung von N₂O zeigte, kann man insgesamt von einer Reduktion der Treibhausgasemissionen ausgehen. Die Bildung von Schwefelwasserstoff wird trotz des Eintrags von Schwefel in die Gülle nicht erhöht.

Die Düngewirkung der angesäuerten Gülle wird im Vergleich zur unbehandelten Gülle verbessert. Für den Pflanzenbau sind bisher keine grundlegenden Nachteile bekannt. Der Einfluss von angesäuerter Gülle auf die Zusammensetzung von Naturwiesen wurde bisher jedoch nicht untersucht. Der Leguminosenanteil von Klee-Grasmischungen dürfte abnehmen. Es gibt in der Literatur Hinweise sowohl in Richtung negative als auch keine Auswirkungen auf Bodenlebewesen. Allerdings sind Langzeitstudien zu den Folgen von angesäuerter Gülle auf Boden und Pflanzen bisher nicht verfügbar.

Da der atmosphärische Eintrag von Schwefel seit den 1980er Jahren aufgrund von Umweltschutzmassnahmen stark zurückgegangen ist, besteht heute ein Bedarf zur Versorgung der Kulturen mit Schwefel (Flisch et al., 2009a). Allerdings muss die ausgebrachte Menge aufgrund des relativ hohen Schwefelgehalts von angesäuerter Gülle begrenzt und dem Bedarf der Kulturen an Schwefel entsprechend angepasst werden. Dies kann zu vermehrtem Export von Gülle und entsprechenden Transporten führen. Die Ausbringung von angesäuerter Gülle erfordert zudem ein häufigeres Aufkalken der Böden.

International besteht weitest gehender Konsens, dass die Ansäuerung von Gülle wesentlich zur Reduktion der Emissionen von Ammoniak und Treibhausgasen beiträgt (Fanguero et al., 2015a; Huo et al., 2015; UNECE, 2014). Die Anwendung im Stall erscheint hinsichtlich Emissionsminderung als besonders geeignet, da zusätzlich eine Abnahme der

Emissionen auf den nachgelagerten Stufen erfolgt (Kai et al. 2008; Nyord et al., 2013; Petersen et al. 2014). Da es in der Schweiz momentan nur wenige wirksame Techniken zur Reduktion der Emissionen auf der Stufe Stall gibt (Kupper et al., 2015; UNECE, 2014), sind zusätzliche Optionen zur Umsetzung von emissionsmindernden Techniken erwünscht. Dabei steht die Installation von in Dänemark auf der Technologielliste aufgeführten Anlagen (The Danish Ministry for the Environment, 2015) im Vordergrund. Allerdings dürfte diese Technik nur bei Neubauten und aus Kostengründen nur für grosse Einheiten umsetzbar sein. Ob diese Systeme unter den in der Schweiz gegebenen Rahmenbedingungen umsetzbar sind, ist derzeit unklar. Die grössten Herausforderungen zur Anwendung der Technologie in der Schweiz dürften der Umgang mit grossen Mengen von konzentrierter Schwefelsäure auf den landwirtschaftlichen Betrieben und der Aufbau der nötigen Dienstleistungen (insbes. Service) zuhanden der anwendenden Betriebe darstellen. Weiter besteht unter Fachkreisen Skepsis betreffend die Freisetzung von Schwefelwasserstoff in Ställen mit den entsprechenden Gefahren für Mensch und Tier. Es ist nicht auszuschliessen, dass die Ansäuerung von Gülle zu einer Erhöhung der Geruchsbelastung führen kann. Zudem werden die dänischen Untersuchungen von Fachleuten kritisch hinterfragt (Kap. 2.4.1.4), und es bestehen seitens Vertreter von Behörden Zweifel, ob der Vollzug eine fachgerechte und umweltfreundliche Umsetzung dieser Technologie sicherstellen kann. Eine weitere Frage betrifft die Verfügbarkeit von Schwefelsäure. Inwieweit die verfügbare Menge eine breite Anwendung der Ansäuerung von Gülle längerfristig limitiert, lässt sich im Moment nicht abschliessend beantworten.

Um die offenen Fragen der Anwendbarkeit der Ansäuerung von Gülle, insbesondere zur Arbeitssicherheit beantworten zu können, sind (i) Abklärungen durch Fachleute auf Betrieben vor Ort, beispielsweise in Dänemark, bei Forschungsstellen und bei den zuständigen Behörden notwendig. Weiter müsste (ii) die Umsetzung der Technologie unter schweizerischen Praxisbedingungen im Rahmen von Pilotprojekten geprüft werden. Dabei sollten Umsetzbarkeit der Technologie allgemein, die Emissionen von Ammoniak, Treibhausgasen und Geruch, Auswirkungen von angesäuerter Gülle auf den Boden sowie die Sicherstellung der Arbeitssicherheit Gegenstand der Untersuchungen sein. Voraussetzung für den Schritt (ii) ist eine Grundlage zur Anrechnung der Emissionsminderung im Rahmen von Modellrechnungen für Bewilligungsverfahren. Ein entsprechendes Dokument wurde im Anschluss an die erste Fassung des vorliegenden Berichts vom 03.12.2015 erstellt, Vertretern von ausgewählten Institutionen (agriss, Agroscope, BAFU, BLW, HAFL) zur Stellungnahme vorgelegt und anschliessend überarbeitet. Das revidierte Dokument ist in Anhang 3 enthalten.

4. Dank

Diese Studie wurde vom Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert. Die Erstellung der ursprünglichen Version „Beurteilung der Ansäuerung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen in der Schweiz“ vom 3. Dezember 2015 war möglich dank der finanziellen Unterstützung durch das Bundesamt für Landwirtschaft. Weiter zu verdanken ist die Durchführung des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency), namentlich Karin Peters. Ihr und ihren Kolleginnen und Kollegen, den Referentinnen und Referenten, den Betriebsleitern der besuchten Betriebe sowie dem Personal der Firmen sei gedankt für die Besichtigungen vor Ort, die wertvollen Diskussionen und Rückmeldungen auf Fragen. Mein Dank geht auch an A. Vestergaard (Knowledge Center for Agriculture P/S, Aarhus), B. Reidy, S. Burgos, A. Keiser (HAFL Zollikofen), Margret Keck, Jochen Mayer, Harald Menzi, Sabine Schrade, Beat Steiner (Agroscope) für ihre fachliche Unterstützung und kritischen Rückmeldungen.

5. Literatur

- Alkanani, T., Akochi, E., Mackenzie, A.F., Alli, I., Barrington, S. 1992. Organic and inorganic amendments to reduce ammonia losses from liquid hog manure. *J. Environ. Qual.* 21(4): 709-715.
- Andersen, M. 2013. Test report for JH-FORSURING NH₄⁺ version 1-5. DANETV verification Centre AgroTech. 8200 Aarhus N, Denmark.
- Anonym. 2014. Sulfuric Acid: 2014 World Market Outlook and Forecast up to 2018. URL: <http://www.redorbit.com/news/science/1113091709/global-sulfuric-acid-production-to-exceed-267-mln-tonnes-in/> (01.03.2015).
- Birkmose, T. 2016. Business economics and results from field trials with acidified slurry. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Birkmose, T., Vestergaard, A. 2013. Acidification of slurry in barns, stores and during application: review of Danish research, trials and experience. 15th RAMIRAN International Conference. 10-13 June 2013, Versailles France.
- BLW. 2012. Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik in den Jahren 2014-2017 (Agrarpolitik 2014-2017) vom 1. Februar 2012. Bundesamt für Landwirtschaft BLW. Bern. pp.320.
URL: <http://www.blw.admin.ch/themen/00005/00044/01178/01591/index.html?lang=de> (25.01.2015).
- Bongers, T., Ferris, H. 1999. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends. Ecol. Evol.* 14(6): 224-228.
- Botermans, J., Gustafsson, G., Jeppsson, K.-H., Brown, N., Rodhe, L. 2010. Measures to reduce ammonia emissions in pig production – Review. Uppsala, Sweden: Department of Rural Buildings, Swedish University of Agricultural Sciences, Alnarp Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering, Uppsala.
- Brehme, G. 2003. Richtig messen mit „Innova“. *Landtechnik* 59(4): 222-223.
- Brink, C., van Grinsven, H., Jacobsen, B.H., Rabl, A., Gren, I.-M., Holland, M., Klimont, Z., Hicks, K., Brouwer, R., Dickens, R., Willems, J., Termansen, M., Velthof, G., Alkemade, R., van Oorschot, M., Webb, J. 2011. Costs and benefits of nitrogen in the environment. In: Sutton, M. A., Howard, C. M., Erisman, J. W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Grizzetti, B., (eds.). *The European Nitrogen Assessment. Sources, Effects and Policy Perspectives.* Cambridge Cambridge University Press. pp 211-228.
- Bussink, D.W., van Rotterdam-Los, A.M.D. 2011. Perspectieven om broeikasgas- en ammoniakemissies te reduceren door het aanzuren van mest. Rapport.1426.N.11 (in Dutch). Wageningen, NL: Nutrient Management Institute NMI.
- Bussink, D.W., van Rotterdam-Los, A.M.D., Wenzl, W. 2012. Potential of biologically acidifying cow slurry to reduce NH₃ emissions. Rapport.1422.N.11. Wageningen, The Netherlands: Nutrient Management Institute NMI.
- BVET. 2013. Stallklimawerte und ihre Messung in Rinderhaltungen (Nr. 6.5_(2)_d | 1.September 2013). Bundesamt für Veterinärwesen, Bern. pp 12.
<http://www.blv.admin.ch/themen/tierschutz/05466/05669/05671/index.html?lang=de> (31.07.2015).

- Christiansen, M. 2016. Ammonia emissions reduction in-house, in-store, in-field. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Cuhel, J., Simek, M., Laughlin, R.J., Bru, D., Cheneby, D., Watson, C.J., Philippot, L. 2010. Insights into the Effect of Soil pH on N₂O and N₂ Emissions and Denitrifier Community Size and Activity. *Appl. Environ. Microb.* 76(6): 1870-1878.
- Dai, X.R., Blanes-Vidal, V. 2013. Emissions of ammonia, carbon dioxide, and hydrogen sulfide from swine wastewater during and after acidification treatment: Effect of pH, mixing and aeration. *J. Environ. Manage.* 115: 147-154.
- Dalgaard, T., Hansen, B., Hasler, B., Hertel, O., Hutchings, N.J., Jacobsen, B.H., Jensen, L.S., Kronvang, B., Olesen, J.E., Schjorring, J.K., Kristensen, I.S., Graversgaard, M., Termansen, M., Vejre, H. 2014. Policies for agricultural nitrogen management-trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environ. Res. Lett.* 9(11).
- Dodensig Pedersen, A. 2016. Environmental regulation of livestock housing systems and land application of manure in Denmark. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017)..
- EKL. 2005. Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz. Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL). Schriftenreihe Umwelt Nr. 384. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).
- Eriksen, J., Sorensen, P., Eisgaard, L. 2008. The fate of sulfate in acidified pig slurry during storage and following application to cropped soil. *J. Environ. Qual.* 37(1): 280-286.
- Eriksen, J., Andersen, A.J., Poulsen, H.V., Adamsen, A.P.S., Petersen, S.O. 2012. Sulfur turnover and emissions during storage of cattle slurry: effects of acidification and sulfur addition. *J. Environ. Qual.* 41(5): 1633-1641.
- ETA-Danmark A/S. 2014. VERA Verification Statement. Technology: JH Forsuring NH₄⁺. Charlottenlund, DK: ETA-Danmark A/S. http://mst.dk/media/mst/9430974/jh_forsuring_verification_statement_final_draft.pdf (04.02.2015).
- Fangueiro, D., Hjorth, M., Gioelli, F. 2015a. Acidification of animal slurry- a review. *J. Environ. Manage.* 149(0): 46-56.
- Fangueiro, D., Surgy, S., Fraga, I., Cabral, F., Coutinho, J. 2015b. Band application of treated cattle slurry as an alternative to slurry injection: Implications for gaseous emissions, soil quality, and plant growth. *Agric. Ecosyst. Environ.* 211: 102-111.
- Fangueiro, D., Pereira, J., Bichana, A., Surgy, S., Cabral, F., Coutinho, J. 2015c. Effects of cattle-slurry treatment by acidification and separation on nitrogen dynamics and global warming potential after surface application to an acidic soil. *J. Environ. Manage.* 162: 1-8.
- Fangueiro, D., Ribeiro, H., Coutinho, J., Cardenas, L., Trindade, H., Cunha-Queda, C., Vasconcelos, E., Cabral, F. 2010. Nitrogen mineralization and CO₂ and N₂O emissions in a sandy soil amended with original or acidified pig slurries or with the relative fractions. *Biol. Fertil. Soils* 46(4): 383-391.

- Fangueiro, D., Surgy, S., Coutinho, J., Vasconcelos, E. 2013. Impact of cattle slurry acidification on carbon and nitrogen dynamics during storage and after soil incorporation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 176(4): 540-550.
- Fangueiro, D., Surgy, S., Fraga, I., Monteiro, F.G., Cabral, F., Coutinho, J. 2016. Acidification of animal slurry affects the nitrogen dynamics after soil application. *Geoderma* 281: 30-38.
- Flisch, R., Sinaj, S., Charles, R., Richner, W. 2009a. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau - Kapitel 7-10. *Agrarforschung* 16(2): 32-49.
- Flisch, R., Sinaj, S., Charles, R., Richner, W. 2009b. Grundlagen für die Düngung im Acker- und Futterbau - Kapitel 11-14. *Agrarforschung* 16(2): 50-71.
- FOEN, 2014: Switzerland's Informative Inventory Report 2014 (IIR). Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Federal Office for the Environment FOEN, Berne.
URL: http://www.ceip.at/ms/ceip_home1/ceip_home/status_reporting/2014_submissions/#S (25.01.2015).
- Frost, J.P., Stevens, R.J., Laughlin, R.J. 1990. Effect of separation and acidification of cattle slurry on ammonia volatilization and on the efficiency of slurry nitrogen for herbage. *J. Agric. Sci.* 115: 49-56.
- Hafner, S.D., Pacholski, A., Pedersen, S.V., Sommer, S.G. 2016. Slurry acidification and the ALFAM2 model. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/topics/agriculture/acidification/> (04.10.2016).
- Hafner, S.D., Pedersen, S.V., Sommer, S.G., Pacholski, A. 2015. The ALFAM2 project – Predicting ammonia loss from field-applied manure. 16th RAMIRAN International Conference. 8-10 September 2015, Hamburg Germany.
- Häni, C., Sintermann, J., Kupper, T., Jocher, M., Neftel, A. 2016. Ammonia emission after slurry application to grassland. *Atmos. Environ.* 125: 92-99.
- Hassouna, M., Robin, P., Charpiot, A., Edouard, N., Meda, B. 2013. Infrared photoacoustic spectroscopy in animal houses: Effect of non-compensated interferences on ammonia, nitrous oxide and methane air concentrations. *Biosyst. Eng.* 114(3): 318-326.
- Hjorth, M., Cocolo, G., Jonassen, K., Abildgaard, L., Sommer, S.G. 2015. Continuous in-house acidification affecting animal slurry composition. *Biosyst. Eng.* 132: 56-60.
- Hjorth, M., Cocolo, G., Jonassen, K., Sommer, S. 2013. Acidifications effect on transformations in and composition of animal slurry. 15th RAMIRAN International Conference. 10-13 June 2013, Versailles France.
- Hjorth, M., Fernandez, M.S.; Jayaram, S.; Sørensen, J.A.; Adamsen, A.P.S. 2015. Bioacidification of manure – By supplying manure with 2-3% sugar or cellulose. 16th RAMIRAN International Conference. 8-10 September 2015, Hamburg Germany.
- Hjorth, M., 2016. Replacement of the sulfuric acid in manure acidification. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Hou, Y., Velthof, G.L., Oenema, O. 2015. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions from manure management chains: a meta-analysis and integrated assessment. *Glob. Change Biol.* 21(3): 1293-1312.

- Huang, D.D., Luo, H., Ying, H., Wang, K. 2012. Methane and ammonia emissions patterns during digested slurry storage. *Trans. Chin. Soc. Agricult. Machin.* 43(SUPPL.1): 190-193.
- Jensen, A.O. 2002. Changing the environment in swine buildings using sulfuric acid. *T. ASAE* 45(1): 223-227.
- Jonassen, K.E.N. 2016. Ammonia emission reduction during in house slurry acidification. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Jørgensen, F. 2016. Safety during handling and transportation of sulfuric acid. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Jørgensen, M. 2016. Infarm Forsuringsanlæg i slagtesvinestald med drænet gulv. (Meddelse No. 1077). Copenhagen, DK: Videncenter for Svineproduktion.
- Kai, P., Pedersen, P., Jensen, J.E., Hansen, M.N., Sommer, S.G. 2008. A whole-farm assessment of the efficacy of slurry acidification in reducing ammonia emissions. *Eur. J. Agron.* 28(2): 148-154.
- Kim, D.G., Saggari, S., Roudier, P. 2012. The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: a meta-analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 93(1): 51-64.
- Kupper, T., Bonjour, C., Menzi, H. 2015. Evolution of farm and manure management and their influence on ammonia emissions from agriculture in Switzerland between 1990 and 2010. *Atmos. Environ.* 103(0): 215-221.
- Kupper, T., Bürge, D., Bachmann, H.J., Güsewell, S., Mayer, J. 2014. Heavy metals in source-separated compost and digestates. *Waste Manage.* 34(5): 867-874.
- Kupper, T., Schrade, S., Menzi, H. 2015. Arbeitspapier Ammoniakmindernde Massnahmen bei Rindvieh-, Schweine- und Geflügelhaltung. Zuhanden der Arbeitsgruppe "Ammoniakmindernde Massnahmen im Stallbau" (unveröffentlicht).
- Langgaard Jensen, M. 2015. The effect of acidification on slurry nitrogen turnover in arable soils, and on nitrous oxide emissions. *MSC Thesis, Aarhus University.*
- Leegaard Riis, A. 2016. Effekt av JH Forsuringsanlæg i slagtesvinestald med drænet gulv. (Meddelse No. 1078). Copenhagen, DK: Videncenter for Svineproduktion.
- Louie, D.K. 2005. Handbook of sulphuric acid manufacturing. DKL Engineering Inc., 8171 Yonge Street P.O. Box 2312, Thornhill Ontario CAN, L3T 2C6.
- Mahran, A., Tenuta, M., Lumactud, R.A., Daayf, F. 2009. Response of a soil nematode community to liquid hog manure and its acidification. *Appl. Soil Ecol.* 43(1): 75-82.
- Miljøministeriet_Miljøstyrelsen. 2011a. Teknologiblad Svovlsyrebehandling af gylle. Malkekvæg. Version: 3. udgave, 23.05.2011. http://mst.dk/media/mst/66945/Malkekv%C3%A6g_Svovlsyrebehandling%20af%20gylle_version%204.pdf (26.02.2015).
- Miljøministeriet Miljøstyrelsen. 2011b. Teknologiblad Svovlsyrebehandling af gylle. Slagtesvin. Version: 2. udgave, 23.05.2011. http://mst.dk/media/mst/66945/Malkekv%C3%A6g_Svovlsyrebehandling%20af%20gylle_version%204.pdf (25.02.2015).

- Misselbrook, T., Hunt, J., Perazzolo, F., Provolo, G. 2016. Greenhouse gas and ammonia emissions from slurry storage: impacts of temperature and potential mitigation through covering (pig slurry) or acidification (cattle slurry). *J. Environ. Qual.* 45(5): 1520-1530.
- Nyord, T., Liu, D., Eriksen, J., Adamsen, A.P.S. 2013. Effect of acidification and soil injection of animal slurry on ammonia and odour emission. 15th RAMIRAN International Conference. 10-13 June 2013, Versailles France.
- Ottosen, L.D.M., Poulsen, H.V., Nielsen, D.A., Finster, K., Nielsen, L.P., Revsbech, N.P. 2009. Observations on microbial activity in acidified pig slurry. *Biosyst. Eng.* 102(3): 291-297.
- Pain, B.F., Thompson, R.B., Rees, Y.J., Skinner, J.H. 1990. Reducing Gaseous Losses of Nitrogen From Cattle Slurry Applied to Grassland by the Use of Additives. *J. Sci. Food Agric.* 50(2): 141-153.
- Pedersen, P. 2004. Svovlsyrebehandling af gulle i slagtesvinestald med draenet gulv. Meddelelse nr. 683, Landsudvalget for svin, pp. 12.
- Pedersen, P., Albrechtsen, K. 2012. JH Forsuringsanlæg i slagtesvinestald med drænet gulv. (Meddelelse No. 932). Copenhagen, DK: Videncenter for Svineproduktion, pp. 23.
- Peters, K. 2016. International seminar on slurry acidification. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/topics/agriculture/acidification/> (04.10.2016).
- Petersen, S.O. 2016. Soil fertility and climate effects related to use of acidified slurry. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Petersen, S.O., Andersen, A.J., Eriksen, J. 2012. Effects of cattle slurry acidification on ammonia and methane evolution during storage. *J. Environ. Qual.* 41(1): 88-94.
- Petersen, S.O., Hojberg, O., Poulsen, M., Schwab, C., Eriksen, J. 2014. Methanogenic community changes, and emissions of methane and other gases, during storage of acidified and untreated pig slurry. *J. Appl. Microbiol.* 117(1): 160-172.
- Petersen, S.O., Hutchings, N.J., Hafner, S.D., Sommer, S.G., Hjorth, M., Jonassen, K.E.N. 2016. Ammonia abatement by slurry acidification: A pilot-scale study of three finishing pig production periods. *Agr. Ecosyst. Environ.* 216: 258-268.
- Ravnborg, H. 2016. Slurry acidification in a Danish environmental regulation scheme. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Regueiro, I., Coutinho, J., Figueiro, D. 2016a. Alternatives to sulfuric acid for slurry acidification: impact on slurry composition and ammonia emissions during storage. *J. Clean Prod.* 131: 296-307.
- Regueiro, I., Coutinho, J., Gioelli, F., Balsari, P., Dinuccio, E., Figueiro, D. 2016b. Acidification of raw and co-digested pig slurries with alum before mechanical separation reduces gaseous emission during storage of solid and liquid fractions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 227: 42-51.

- Roth, T., Kohli, L., Rihm, B., Achermann, B. 2013. Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland. *Agr. Ecosyst. Environ.* 178: 121-126.
- Ruser, R., Schulz, R. 2015. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils-a review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 178(2): 171-188.
- Russenes, A.L., Korsæth, A., Bakken, L.R., Dorsch, P. 2016. Spatial variation in soil pH controls off-season N₂O emission in an agricultural soil. *Soil Biol. Biochem.* 99: 36-46.
- Schweiz. Bundesrat. 2009. Bericht Konzept betreffend lufthygienische Massnahmen des Bundes. Der Schweizerische Bundesrat. pp.32. URL: www.admin.ch/ch/d/ff/2009/6585.pdf (25.01.2015).
- Sindhøj, E., Rodhe, L. 2013. Examples of implementing manure processing technology at farm level. Report 412. Agriculture and Industry. JTI – Swedish Institute of Agricultural and Environmental Engineering 2013, Uppsala Sweden ISSN-1401-4963. http://www.jti.se/uploads/jti/r-412_manure_processing_technology_final_se_web.pdf (13.10.2013).
- Sintermann, J., Neftel, A., Ammann, C., Häni, C., Hensen, A., Loubet, B., Flechard, C.R. 2012. Are ammonia emissions from field-applied slurry substantially over-estimated in European emission inventories? *Biogeosciences* 9(11): 1611-1632.
- Sommer, S.G., Hjorth, M., Leahy, J.J., Zhu, K., Christel, W., Sorensen, C.G., Sutaryo. 2015. Pig slurry characteristics, nutrient balance and biogas production as affected by separation and acidification. *J. Agric. Sci.* 153(1): 177-191.
- Sommer, S.G., Clough, T.J., Balaine, N., Hafner, S., Cameron, K.C. 2016. Methane, nitrous oxide and carbon-dioxide emissions from the liquid dairy manure management chain in New Zealand as affected by acidification and separation: a pilot study. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- Sorensen, P., Eriksen, J. 2009. Effects of slurry acidification with sulphuric acid combined with aeration on the turnover and plant availability of nitrogen. *Agric. Ecosyst. Environ.* 131(3-4): 240-246.
- Starmans, D.A.J., Blanken, K., Kupers, G.C.C., Timmerman, M. 2009. Schuimvorming op mest Rapport 288 (in Dutch). Wageningen, NL: Livestock Research Wageningen UR. URL: <http://edepot.wur.nl/14942> (19.02.2015).
- Stevens, R.J., Laughlin, R.J., Frost, J.P. 1989. Effect of acidification with sulphuric acid on the volatilization of ammonia from cow and pig slurries. *J. Agric. Sci.* 113(3): 389-395.
- Stevens, R.J., Laughlin, R.J., Frost, J.P. 1992. Effects of separation, dilution, washing and acidification on ammonia volatilization from surface-applied cattle slurry. *J. Agric. Sci.* 119(3): 383-389.
- The Danish Ministry for the Environment. 2015. Environmental Technologies for Livestock Holdings. The Danish Ministry for the Environment, Environmental Protection Agency. Copenhagen, DK <http://eng.mst.dk/topics/agriculture/environmental-technologies-for-livestock-holdings/livestock-housing-system/> (04.02.2015).¹⁶

¹⁶ Vgl. auch Miljøministeriet Miljøstyrelsen. 2014. Miljøstyrelsens Teknologiliste.

- Toft, M. 2011. SyreN. English version. URL http://www.reusewaste.eu/events/kickoff/studytour/5b_SyreN_brochure_UK_version_July_2011.pdf (11.10.2016).
- Toft, M. 2016. Slurry acidification in practice. Folien präsentiert im Rahmen des internationalen Seminars zur Ansäuerung von Gülle Vejle DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency). URL: <http://eng.mst.dk/trade/agriculture/acidification/> (13.12.2017).
- UNECE. 2014. Guidance document for preventing and abating ammonia emissions from agricultural sources. Paper ECE/EB.AIR/120, February 7, 2014. Geneva, Switzerland: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).
- Van den Heuvel, R.N., Bakker, S.E., Jetten, M.S.M., Hefting, M.M. 2011. Decreased N₂O reduction by low soil pH causes high N₂O emissions in a riparian ecosystem. *Geobiology* 9(3): 294-300.
- VERA Secretariat. 2012. VERA Verification Statement. Technology: Technology: SyreN. 2920 Charlottenlund, DK: The International VERA Secretariat.
- Vestergaard, A. 2013. Resultater av forsøg med husdyrgødning – specielt forsurning. Presentation at Plantekongres 2013. Videncentret for landbrug, Denmark.
- Wang, K., Huang, D., Ying, H., Luo, H. 2014. Effects of acidification during storage on emissions of methane, ammonia, and hydrogen sulfide from digested pig slurry. *Biosyst. Eng.* 122: 23-30.
- Weslien, P., Klemmedtsson, A.K., Borjesson, G., Klemmedtsson, L. 2009. Strong pH influence on N₂O and CH₄ fluxes from forested organic soils. *Eur. J. Soil. Sci.* 60(3): 311-320.
- Zhang, G.-Q., Strøm, J.S., Hansen, A.G., Freudendal, A.J., Rasmussen, J.B. 2004. Emission af ammoniak og drivhusgasser fra naturligt ventilerede kvægstalde. Århus N: Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret, Byggeri og Teknik. URL: https://www.landbrugsinfo.dk/Diverse/KA/Sider/FT_KVA_021_nye_maalinger.pdf?download=true (04.02.2015).
- Zhang, G., Strøm, J.S., Li, B., Rom, H.B., Morsing, S., Dahl, P., Wang, C. 2005. Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings. *Biosyst. Eng.* 92(3): 355-364.

Anhang 1

Bericht zum internationalen Seminar zur Ansäuerung von Gülle

Vejele DK, 28., 29.09.2016 (Veranstalter: Danish Environmental Protection Agency)

1. Dänische Umweltgesetzgebung

Ab 1985 wurden verschiedene Massnahmenpläne zur Reduzierung von Verlusten von N umgesetzt (Dalgaard et al., 2014). Für die Reduktion der NH₃-Emissionen sind die folgenden Regelungen wichtig: die Nitrat-Richtlinie der EU, die „Industrial Emissions Directive, Environmental Impact Assessment Directive, Habitats Directive“ (Dodensig Pedersen, 2016). Die Regelungen betreffen die Tierhaltung (Stall, Weide), Hofdüngerbewirtschaftung (Lagerung, Ausbringung) und gelten für die Mehrzahl der Betriebe bzw. für die folgenden Mindestgrössen: ab 2 Kühen, 2 Sauen oder 5 Mastschweinen, 30 Stück Geflügel u.a. Für solche Betriebe bestehen die folgenden Regelungen:

- Hofdüngerlagerung fest: Abdeckung mit einer wasserdichten Folie
- Hofdüngerlagerung flüssig: Abdeckung mittels einem der folgenden Systeme:
 - Natürlicher schwimmender Abdeckung (z.B. Stroh)
 - Schwimmfolie
 - Zeltabdeckung
 - Als Alternative zu diesen Abdeckungen ist die Ansäuerung der Gülle anerkannt.
- Hofdüngerausbringung fest: Einarbeitung innerhalb von 6 Stunden auf nicht bewachsenem Boden
- Hofdüngerausbringung flüssig mittels einem der folgenden Systeme:
 - Schleppschlauchverteiler
 - Schleppschuh
 - Gölledrill
 - Auf Grasland und nicht bewachsenem Boden: Gölledrill vorgeschrieben oder Ansäuerung der Gülle und Ausbringung mittels Schleppschlauchverteiler

Betriebe mit mehr als 15 GVE¹⁷ benötigen eine Bewilligung, wenn sie ein System zur Tierhaltung starten, erweitern oder ändern. Die Anforderungen richten sich nach der Betriebsgrösse: 15 – 75 GVE, 75 – 250 GVE, > 250 GVE. Für grosse Einheiten wird eine Emissionsreduktion um 30 % gegenüber dem „best housing system“, d.h. demjenigen Stallsystem mit dem niedrigsten Emissionsniveau verlangt.

Die Techniken, welche diese Anforderungen erfüllen, sind auf der Technologielliste aufgeführt (vgl. The Danish Ministry for the Environment, 2015).

Hofdünger wird durch die gesetzliche Regulierung zu einer wertvollen Ressource. Dies wird durch die folgenden Regelungen erreicht:

- Jeder Betrieb erhält eine Quote von N, die er einsetzen darf. Diese liegt 15 % unter dem ökonomischen Optimum (Dalgaard et al., 2014).
- Für Gülle wird eine Ausnutzung des N von 75 % angerechnet. Der verbleibende Bedarf darf mit mineralischem N gedeckt werden (Ravnborg, 2016).

Diese Regelungen führen dazu, dass für die Betriebe ein Interesse haben an möglichst niedrigen Verlusten und einer hohen Verfügbarkeit des N in den Hofdüngern. In Kombination mit den Vorgaben bei den Bewilligungen ist dies ein wichtiger Grund für die relativ weite Verbreitung der Ansäuerung von Gülle. Die Regulierung in Dänemark hat zu einer markanten Abnahme der N-Verluste über die letzten 30 Jahre geführt (Dalgaard et al., 2014).

¹⁷ 1 GVE: eine Grossvieheinheit; sie entspricht einer Tierlebensmasse von 500 kg

2. Betriebsbesuche (Notizen in Stichworten)

2.1 Ansäuerung von Gülle im Stall, Betrieb mit Schweinezucht

- Beschreibung des Betriebs:
 - Standort: Grønlundgård, Mosevråvej 115, 7000 Fredericia
 - Bestand: 1300 Sauen
 - 4 Ställe; Vollspalten
 - Stroh als Material zur Beschäftigung der Tiere: Verbrauch von 1 t pro Tag
 - Gülleproduktion: 20'000 m³ pro Jahr
- Beschreibung der Anlage zur Ansäuerung von Gülle:
 - System Infarm A/S bzw. JH AGRO A/S wie beschrieben in Kap. 2.4.1.1
 - Alter der Anlage: 7 Jahre
 - Säuretank mit 24 m³ Inhalt
 - Fest-flüssig Separierung der Gülle ab Mischtank
 - Spülung mittels angesäuerter Dünggülle: 1 Mal pro Tag; Höhe der Gülle im Güllekel-ler bei Spülung: ca. 20 cm (ca. 1 cm Anstieg des Spiegels pro Tag).
- Erfahrungen/Bemerkungen des Betriebsleiters:
 - Luftqualität im Stall sehr gut (besser als vor Ansäuerung; „Schweinegeruch“ im Stall kaum wahrnehmbar); ein Tageszuwachs von 1000-1200 g deuten auf ein gutes Stallklima
 - Geruchsprobleme mit Nachbarn traten bisher nicht auf (Entfernung bis zur nächst gelegenen Liegenschaft: 300 m)
 - Pro Jahr: 1 bis 2 Störungen, die von der Servicefirma behoben werden. Der Betriebs-leiter selbst führt keine Arbeiten an der Anlage durch (Lagertank für die Säure, Mischtank).
 - Der Betriebsleiter ist mit der Anlage zufrieden.
 - Grund für die Installation der Anlage: Auflage aufgrund der gesetzlichen Vorgaben. 40 % der Kosten wurden vom Staat entschädigt. Die Anlage wurde von den Behörden bisher nicht kontrolliert.
- Bericht des vor Ort anwesenden Technikers der Stallbaufirma, welche den Service durchführt:
 - Der übliche Service umfasst pro Jahr 2 Kontrollen vor Ort.
 - Die Firma hat via TeamViewer ständig Zugriff auf die Anlagen, die sie installiert hat. Bei Störungsmeldungen führt die Firma selbst die Kontrollen und die Behebung der Störung durch oder wird vom Betriebsleiter aufgeboten. Letzterer behebt Störungen nicht selbst.
 - Störungen betreffen beispielsweise die pH Sonde, Pumpen oder Ventile.

2.2 Ansäuerung von Gülle im Stall, Betrieb mit Milchkühen

- Beschreibung des Betriebs:
 - Standort: Faarkrog Malkcenter, Skodborg Vamdrupvej 21, 6630 Rødding
 - Bestand: 400 Milchkühe (Holstein Frisian); Stalldurchschnitt: 11'000 kg Milch pro Laktation
 - Vollspalten
 - Strohhäcksel, Kalk für Strohmatten in Liegeboxen

- Beschreibung der Anlage zur Ansäuerung von Gülle:
 - System Infarm A/S bzw. JH AGRO A/S wie beschrieben in Kap. 2.4.1.1
 - Alter der Anlage: 8 Jahre
 - Säuretank mit ca. 20 m³ Inhalt
 - Spülung 1 Mal pro Tag
- Erfahrungen/Bemerkungen des Betriebsleiters:
 - Zufrieden mit der Anlage.
 - Pro Jahr: 1 bis 2 Störungen, die von der Servicefirma behoben wurden. Der Betriebsleiter selbst führt keine Arbeiten an der Anlage (Lagertank für die Säure, Mischtank).
 - Grund für die Installation der Anlage: Auflage aufgrund der gesetzlichen Vorgaben. 40 % der Kosten wurden vom Staat entschädigt.
 - Die Gülle weist eine günstigere, d.h. fliessfähigere Konsistenz auf¹⁸.
 - Zum Zeitpunkt des Besuchs fand ein Vorgang zur Ansäuerung der Gülle im Mischtank statt. Dabei liess sich keine erhöhte Geruchsbelastung feststellen.

¹⁸ In Bezug NH₃ könnte eine dünnflüssigere Konsistenz der Gülle zu einer teilweisen Kompensation der erreichten Emissionsminderung auf den Stufen Stall und Lager führen (verminderte oder keine Ausbildung einer Schwimmschicht, welche den Transfer von Ammoniak in die Umgebungsluft vermindert).

Anhang 2

Stellungnahme vom 26.04.2016 von Agroscope INH Tänikon (Margret Keck, Sabine Schrade, Beat Steiner) zum Bericht „Beurteilung der Ansäuerung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen in der Schweiz“ (Version vom 3.12.2015)

Hinweise zu Emissionsmessungen bei Rindvieh, die im Bericht von „Ansäuerung von Gülle“ zitiert sind:

Andersen (2013) Rindvieh

- CO₂-Bilanz-Methode als Ersatz für Luftvolumenstrom (birgt Unsicherheiten, Schätzgleichung geht zurück auf Pedersen et al., 2002).
- Untersuchung von Andersen (2013) in 4 Ställen, keine Referenz innerhalb der Messung.
- Probenahme erfolgt in Firsthöhe; Unsicherheit, was bei Querlüftung tatsächlich geschieht. Dieses Phänomen hatten wir in der Diss. von Sabine bei einem Betrieb, dass allein am First keine repräsentative Probenahme möglich ist, wenn Querlüftung erfolgt.
- Minderung wird in Relation zu dänischem Norm-Wert gesetzt.
- Wobei sehr viel parallel unterstellt wird:
 - Eine Temperaturkorrektur, eine Minderung um 25 % für die Spaltenbodenentmistung plus die Säure.
 - Die im Bericht ausgewiesenen 43 % ergeben sich durch 25 % Spaltenbodenentmistung plus der Rest durch die Säure.
 - ->Das bedeutet nach unserem Verständnis, dass zwei Massnahmen aufaddiert wurden. Eine vergleichende Messung liegt nicht vor. Nach unserer Einschätzung wurde auf diese Art bei der Minderungswirkung „sehr viel konstruiert und miteinander verrechnet“, ohne klare Bezugsbasis.
 - Eine weitere Gegenrechnung mit P und N aus Gülle liess grössere Emissionen erwarten. Diese Differenz wird einfach mit Denitrifizierung erklärt.
 - Die N-Ausscheidung pro Kuh und Jahr liegt zwischen 140 und 160 kg, und ist damit wesentlich höher als Werte in Agrammon CH.

Irritierend ist, dass im Bericht „Ansäuerung von Gülle“ bei Rindvieh rund 50 % Minderung in der Zusammenfassung erwähnt wird, obwohl nach unserem Verständnis der zugrunde gelegten Untersuchung höchstens die Hälfte davon ausgewiesen wird.

Zu planbefestigten Böden (hohe Verbreitung in der CH) liegen überhaupt keine Messdaten mit Ansäuerung vor.

Die Referenzwerte der Rindviehhaltung und CO₂-Methode stellen Einzelbetriebsdaten dar.

Zhang et al. (2005) setzte innerhalb desselben Betriebes Ansäuerung ein.

Die Emissionsraten waren neben der Temperatur abhängig von Bodenart und Entmistungsverfahren, die Versuche liefen nacheinander, was im Bereich der Fütterung lief, ist nicht ersichtlich. Die Daten könnten auch noch von der Windgeschwindigkeit, Milchwahstoffgehalt beeinflusst sein, was jedoch ignoriert wurde.

Die NH₃-Emissionen von planbefestigten Ställen waren niedriger als von perforierten.

Das Kuhgewicht wird mit 450 kg ausgewiesen (während bei allen anderen Betrieben 600 kg steht). Dieser Aspekt ist völlig unklar (Rasse, Jungvieh etc...). Das scheinen Annahmen zu sein, wenn überhaupt keine Variation der Lebendmasse vorkommt.

Ein Ansatz zum Stofffluss oder eine N-Bilanzierung fehlt.

Details der Messungen, die über den Stallbereich hinausgehen (Säuretank, Rührreinrichtungen, Pumpen) sind in keiner Weise ersichtlich.

Zhang et al. bringen keinerlei Aussage zu einer absoluten Minderung oder zu einer relativen Minderung.

Die quantitative Ebene erscheint für uns insgesamt fragwürdig.

Der Emissionsteil ist bisher bei Rindvieh sehr schwach.

Zudem bleibt die Frage, wie von Harald Menzi eingebracht, ob die Daten auf CH-Haltungssysteme (grosse Flächen, Laufhof....) übertragbar sind.

Weiter eine Experteneinschätzung von anderer Seite:

Link zum IBK-Bericht Güllebehandlung und Zusätze

<http://landwirtschaft.bodenseekonferenz.org/bausteine.net/file/showfile.aspx?downaid=9231&>

S. 6, 12-13

Link zum IBK-Schlussbericht

<http://www.bodenseekonferenz.org/bausteine.net/f/9777>

S. 13-14, 28-29

Zudem wurden bei der Schlussdiskussion der RAMIRAN-Tagung¹⁹ bezüglich der Entwicklungen Richtung Gülleansäuerung in DK auch Statements laut, welche diese kritisch hinterfragten.

¹⁹ 16th RAMIRAN International Conference. 8-10 September 2015, Hamburg Germany

Anhang 3

Anrechnung der Reduktion von Ammoniakemissionen bei Ansäuerung von Gülle im Stall für Emissionsrechnungen mittels Agrammon

Einleitung

Gemäss aktuellem Wissensstand gilt die Ansäuerung von Gülle als Technologie, welche zur Reduktion von Ammoniakemissionen beitragen kann²⁰. Bei Anwendung des Systems JH Forsuring NH4+ zur Ansäuerung von Gülle im Stall (aufgeführt in der Technologielliste des dänischen Umweltbundesamts²¹) werden im Rahmen der Anwendung des Modells Agrammon (www.agrammon.ch) die unten aufgeführten Werte zur Emissionsminderung vorgeschlagen.

Emissionsminderung

Stufe Stall²²:

- Rindvieh: 25 %
- Schweine: 30 %

Diese Werte gelten unter der Bedingung, dass der pH Wert der Gülle im Mischtank auf 5.5 abgesenkt wird, und die Kanäle im Stall mindestens einmal pro Tag mit angesäuerter Gülle gespült werden. Weiter müssen die Exkremente rasch in die angesäuerte Gülle befördert werden. Dies ist in der Regel unter den folgenden Voraussetzungen gegeben:

- Rindvieh: planbefestigter Boden mit häufigem Betrieb des Schiebers (mindestens alle 2 h) oder Vollspaltenboden in Stall und Laufhof.
- Schweine: System mit Teilspaltenboden, sofern die befestigten Flächen im Stall und im Auslauf sauber sind.

Stufe Lager: Rindvieh und Schweine: 50 %²³

Stufe Ausbringung: Rindvieh und Schweine: 50 %²³

Die Emissionsreduktion auf den Stufen Lager und Ausbringung gilt nur, wenn ausschliesslich im Stall angesäuerte Gülle unter den oben beschriebenen Bedingungen gelagert und ausgebracht wird. Bei einer Zumischung von nicht angesäuerter Gülle und andern Substraten oder Hilfsstoffen, muss im Einzelfall geprüft werden, inwiefern eine Emissionsminderung angerechnet werden kann.

²⁰ Fanguero D., Hjorth M., Gioelli F., 2015. Acidification of animal slurry- a review. J. Environ. Manage. 149, 46-56.

²¹ The Danish Ministry for the Environment. 2015. Environmental Technologies for Livestock Holdings. The Danish Ministry for the Environment, Environmental Protection Agency. Kopenhagen, DK
<http://eng.mst.dk/topics/agriculture/environmental-technologies-for-livestock-holdings/livestock-housing-system/> (03.06.2016).

²² Die angegebenen Werte entsprechen der Hälfte der Emissionsminderung gemäss The Danish Ministry for the Environment, 2015 (vgl. Fussnote 21). Damit wird berücksichtigt, dass sich die in der Schweiz üblichen Stallssysteme von denjenigen in Dänemark unterscheiden, was eine niedrigere Emissionsminderung zur Folge haben kann.

²³ Kupper, T. 2017. Beurteilung der Ansäuerung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen in der Schweiz – Aktueller Stand. Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen (<http://www.agrammon.ch/dokumente-zum-download/weitere-informationen/>)

Die Emissionsreduktion ist unter „zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall“, „zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager“ bzw. „zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Gülleausbringung“ einzugeben. Die Reduktion gilt zusätzlich zu andern emissionsmindernden Massnahmen wie Abdeckung des Güllelagers oder emissionsmindernde Ausbringung.

Bemerkungen (nicht abschliessende Auflistung)

- Aus Gründen der Arbeitssicherheit darf das Personal des Landwirtschaftsbetriebs keine Manipulationen mit der konzentrierten Säure und den entsprechenden Einrichtungen durchführen. Transport der Säure, Unterhalt der Anlage und Behebung von Störungen müssen vollständig durch ein spezialisiertes Unternehmen ausgeführt werden.
- Die Einhaltung von Massnahmen hinsichtlich Arbeitssicherheit (z.B. Umgang mit konzentrierter Schwefelsäure, Schwefelwasserstoff in der Stallluft) ist durch eine kompetente Stelle (z.B. agriss) sicherzustellen und zu kontrollieren.
- Ein Betrieb der Anlage entsprechend der Anleitung des Herstellers muss sichergestellt sein.
- Die Ansäuerung von Gülle soll andere emissionsmindernde Massnahmen in den Bereichen Fütterung, Stall/Laufhof, Hofdüngerlager und -ausbringung nicht ersetzen sondern ergänzen.
- Die Ausbringmenge von Gülle ist dem Schwefelbedarf der Kulturen entsprechend anzupassen. Dies bedeutet, dass die ausgebrachte Menge von angesäuerter Gülle auf rund 30 bis 50 m³ Gülle pro ha und Jahr begrenzt werden muss.
- Aufgrund des höheren Düngewerts von angesäuerter Gülle ist voraussichtlich eine Erhöhung des N-Ausnutzungsgrades in der Suisse-Bilanz anzurechnen.
- Bei Anwendung von angesäuerter Gülle sind zusätzliche Aufkalkungen des Bodens nötig, um ein Absinken des Boden pH-Werts zu vermeiden. Daher sollen auch Böden, auf die regelmässig angesäuerte Gülle ausgebracht wird, jährlich auf ihren pH-Wert analysiert werden. Auf sauren Böden (pH<5.8) ist die Anwendung von angesäuerter Gülle zu vermeiden.
- Die langfristigen Auswirkungen von angesäuerter Gülle auf die Pflanzenbestände von Naturwiesen sowie auf Bodenlebewesen sind bisher nicht oder nur teilweise untersucht worden.
- Weitere in dem in Fussnote²³ aufgeführten Bericht enthaltene Informationen sind zu berücksichtigen.
- Die emissionsmindernde Wirkung der Ansäuerung von Gülle sowie die oben aufgeführten Einschränkungen und offenen Fragen²³ erfordern weitergehende Abklärungen und Untersuchungen. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen können dazu führen, dass die angegebenen Werte zur Emissionsminderung und Empfehlungen angepasst werden.

Thomas Kupper, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL

Zollikofen, 18.11.2016