



Berner Fachhochschule

Hochschule für Agrar-, Forst-
und Lebensmittelwissenschaften

Beurteilung der Ozonung von Gülle als Massnahme zur Reduktion von Ammoniakemissionen

Im Auftrag des Bundesamts für Landwirtschaft, 3003 Bern

Thomas Kupper, Harald Menzi

Berner Fachhochschule

Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften

9. April 2013

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Beschreibung des Systems	3
2.1	Ozonung	3
2.2	Projekt Ozonung Gülle ProConseil	4
3	Literaturübersicht	5
3.1	Behandlung von Gülle	5
3.2	Anwendung in der Abwasserreinigung	6
4	Interpretation basierend auf der Literatur und Schlussfolgerungen.....	6
4.1	Auswirkungen der Ozonung von Gülle	6
4.2	Wirksamkeit der Ozonung hinsichtlich die Minderung von Ammoniakemissionen	7
4.3	Vorläufige Bewertung des vorliegenden Projekts	7
5	Vorschlag für das weitere Vorgehen.....	8
6	Literatur	9
7	Anhang	10

1 Einleitung

Im Rahmen des Ressourcenprogramms können Massnahmen zur Minderung von Ammoniakemissionen finanziell unterstützt werden. Gemäss KOLAS-Arbeitsgruppe Ammoniak (2012) ist eine Unterstützung nur möglich, wenn eine wissenschaftlich belegte Wirkung vorliegt. Technologien, denen eine emissionsmindernde Wirkung nach dem aktuellen Stand der Kenntnisse zugeschrieben wird, sind im Leitfaden über Techniken zur Vermeidung und Verringerung von Ammoniakemissionen der UNECE aufgelistet (UNECE, 2007). Als wirksam gelten Techniken der Kategorien 1 oder 2:

- Techniken der Kategorie 1: Gut erforschte, als praktikabel betrachtete Techniken, für deren emissionsmindernde Wirkung zumindest auf experimenteller Ebene quantitative Daten vorliegen.
- Techniken der Kategorie 2: Erfolgversprechende Techniken, die jedoch bislang nicht ausreichend erforscht wurden, oder für die es immer schwierig sein wird, die emissionsmindernde Wirkung zu quantifizieren. Das bedeutet aber nicht, dass sie je nach lokalen Gegebenheiten nicht als Teil einer Strategie zur Ammoniakminderung eingesetzt werden können.

Soweit eine Massnahme in diesem Dokument nicht als Technik der Kategorie 1 oder 2 aufgeführt ist, oder andere wissenschaftliche Studien fehlen, sind weitere Abklärungen hinsichtlich Emissionsminderung nötig.

Im Rahmen des Ressourcenprogramms wurde ein Projekt zur Emissionsminderung mittels Behandlung von Rindergülle durch Ozonung eingereicht¹ (im folgenden „Projekt Ozonung Gülle ProConseil“ genannt). Die Ozonung wurde für die Anwendung in der Abwasserreinigung (Reduktion der Menge von Überschussschlamm; z.B. Chu et al., 2009; von stabilisiertem Schlamm, z.B. Carballa et al., 2009; zur Elimination von Mikroverunreinigungen im gereinigten Abwasser; z.B. Abegglen, Siegrist, 2012) und zur Reduktion des Geruchs von Schweinegülle (Bildsoe et al., 2012, Lyngbye et al., 2008; Wu et al., 1999) untersucht. Versuchsergebnisse hinsichtlich des Einflusses auf Ammoniakemissionen aus Gülle sind nur vereinzelt verfügbar (Bildsoe et al., 2012, Lyngbye et al., 2008). Aufgrund dieser Ausgangslage (d.h. nur wenige Studien verfügbar; nicht Technik der Kategorie 1 oder 2 gemäss UNECE, 2007) sind weitere Abklärungen nötig. Das Vorgehen richtet sich nach dem Dokument der HAFL vom 15.2.2013 und umfasst die Schritte 1 und 2: „Erste Prüfung“ sowie „Vertiefte Prüfung“ basierend auf Fachliteratur und Expertenbefragung. Die Beurteilung basiert auf den Angaben des Projekts Ozonung Gülle ProConseil sowie auf Unterlagen, die von der Firma geliefert wurden, welche das System auf dem Betrieb des Projekts Ozonung Gülle ProConseil installiert hat.

2 Beschreibung des Systems

2.1 Ozonung

Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel. Es zerstört die Zellwände, bewirkt die Lösung der organischen Stoffe und die Mineralisierung der gelösten organischen Stoffe (Chu et al., 2009). Daraus folgt eine verbesserte Verfügbarkeit der organischen Substanz für weitere Abbauprozesse und eine Reduktion der Partikelgrösse der Feststoffe in der Lösung (verschiedene Autoren zitiert in Chu et al., 2009). Diese Prozesse bewirken unter anderem eine Geruchsminderung von Gülle (Bildsoe et al., 2012, Wu et al., 1999), die Reduktion der Menge von Überschussschlamm im Bereich der Abwasserreinigung (Chu et al., 2009) und der Abbau von Mikroverunreinigungen² im gereinigten Abwasser (Abegglen, Siegrist, 2012).

¹ Projet individuel : Fixation de l'ammoniac dans le lisier bovin par injection d'ozone, S. Teuscher, ProConseil ; 09.11.2012

² Mikroverunreinigungen: verschiedene (komplexe) organische Verbindungen, welche schädliche Auswirkungen auf Organismen haben können, wie Rückstände von Medikamenten, Kosmetikprodukten, div. Chemikalien

2.2 Projekt Ozonung Gülle ProConseil

Im vorliegenden Projekt ist eine Anlage zur Ozonung von Gülle in einem Boxenlaufstall für 125 Milchkühe installiert (Abbildung 1). Im Stall fällt ausschliesslich Vollgülle an (pro Tag: 7 m³ Vollgülle, 3 m³ Reinigungswasser). Die Einspeisung des Ozons erfolgt in eine Vorgrube, die unterhalb des Spaltenbodens der Fressachse liegt. Die Vorgrube wird durch die Exkremente, welche im Bereich des Spaltenbodens anfallen, sowie durch Faltenschieber der 3 Laufgänge (in Abbildung 1 sind nur 2 Laufgänge dargestellt; Betrieb der Faltenschieber: 5-6 Mal pro Tag) via einen Querkanal befüllt. Das Volumen der Vorgrube beträgt 300 m³, die Tiefe der Gülle rund 0.5 m. Die Gülle wird in ein Rohr gepumpt, in welches ein Ozon-Luftgemisch zugegeben wird. Die Dosiermenge Ozon ist nicht bekannt, der Ozongehalt im Ozon-Luftgemisch beträgt 3.1 g/m³. Die behandelte Gülle wird am gegenüberliegenden Ende der Vorgrube zurück in die Grube geführt. Dadurch wird die frische Gülle ans vordere Ende in den Bereich des Ansaugrohrs geführt, wodurch eine Behandlung der gesamten Gülle im Behälter gewährleistet sein sollte. Dieser Vorgang wird einmal pro Woche während einer Stunde durchgeführt. Ozon wird aus Umgebungsluft erzeugt.

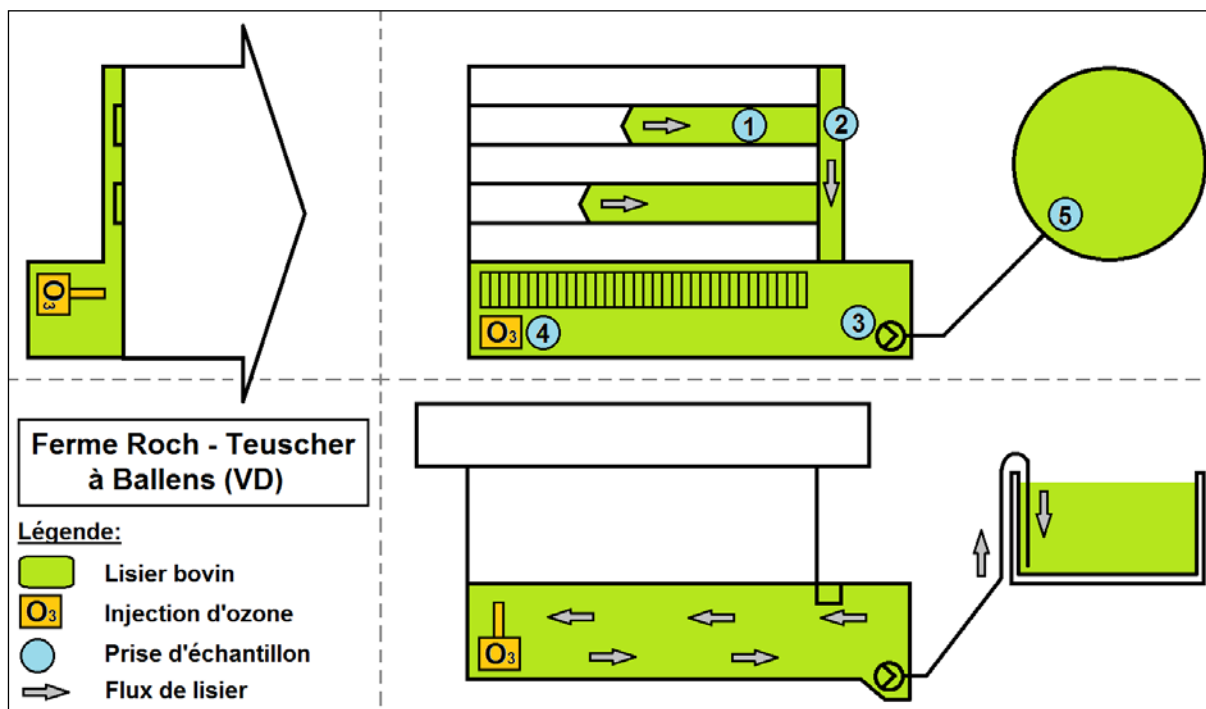


Abbildung 1: Schema der installierten Anlage (Quelle. Projet individuel : Fixation de l'ammoniac dans le lisier bovin par injection d'ozone, S. Teuscher, ProConseil ; 09.11.2012)

Gemäss Projekt Ozonung Gülle ProConseil basiert die Wirksamkeit des Prozesses auf der folgenden chemischen Reaktion:



Dabei handelt es sich um die Umwandlung von Ammoniak in Ammoniumnitrat unter Einwirkung von Ozon. Diese Reaktion wurde in der Literatur beschrieben (von Nagy-Ilosva, 1894).

Gemäss Unterlagen der Firma, welche das System installiert hat (vgl. Abbildung 1), wird die Gülle zusätzlich mittels eines elektrochemischen Prozesses behandelt („Power Pack“; vgl. Beilage). Das Power Pack ist bei der Zuleitung des Frischwassers (Spülwasser und Trinkwasser), in der Vorgrube und im Lagerbehälter installiert. Es ist ständig in Betrieb. Der Hersteller be-

schreibt den Prozess nicht weiter und verweist auf eine Publikation über diese Technik (Aider et al., 2012).

Das Projekt Ozonung Gülle ProConseil hat zum Ziel, die Ammoniakemissionen auf den Stufen Stall, Lagerung und der Ausbringung der Gülle zu reduzieren durch Umwandlung von Ammoniak in Ammoniumnitrat und eine bessere Wirksamkeit des Stickstoffs der ausgebrachten Gülle zu erreichen.

Die folgende Literaturübersicht und die Schlussfolgerungen beschränken sich auf die Ozonung.

3 Literaturübersicht

3.1 Behandlung von Gülle

Bei der Literaturrecherche nach Ozonung von Gülle und Ammoniakemissionen resultierten zwei Treffer: Bildsoe et al. (2012) und Lyngbye et al. (2008).

Lyngbye et al. (2008) untersuchten die Auswirkungen der Ozonung von Gülle auf den Geruch und die Ammoniakemissionen aus einem Versuchsstall (=Abteil mit 16 Mastschweinen). Die Gülle wurde unter den Spalten gesammelt (Tiefe der Gülle: ca. 40 cm) und in eine Einrichtung zur Ozonung gepumpt. Dabei erfolgte eine Fraktionierung in eine feste und eine flüssige Phase. Die flüssige Phase wurde nochmals mit Ozon behandelt und anschliessend in den Stall zurück gepumpt. Die Behandlungsdauer betrug rund 3 h. Die Menge Ozon pro Güllemenge wurde nicht angegeben. Der pH des Gemischs aus der mit Ozon behandelten flüssigen Phase und den frischen Exkrementen lag leicht über demjenigen des Referenzstalls (=gleiches Stallabteil ohne Behandlung der Gülle). Die NH_3 Emissionen lagen tiefer im Vergleich zur Referenz. Der Unterschied war statistisch nicht signifikant. Die Resultate sind allerdings hinsichtlich des Effekts der Ozonung nur begrenzt aussagekräftig, da die Gülle im Stall nach der Ozonung einen wesentlich tieferen Gehalt an TS und Ammonium (NH_4^+) aufwies, der vor allem auf die Abtrennung der Festphase zurückzuführen war.

Bildsoe et al. (2012) untersuchten den Effekt der Ozonung auf die Emission von Schwefelwasserstoff (H_2S) und Ammoniak (NH_3) aus Schweinegülle in einem Versuchsreaktor unter Laborbedingungen. Ozon wurde während 8 bis 80 Minuten Gülle unter ständigem Rühren zudosiert. Die Ozonmengen betragen 20 bis 200 mg Ozon pro Liter Gülle. Die Dauer der Behandlung war abhängig von der Ozonmenge (z.B. 20 mg Ozon pro Liter Gülle: 8 Minuten Behandlung, 200 mg Ozon pro Liter Gülle: 80 Minuten Behandlung), um eine ausreichende Reaktion des Ozons mit der Gülle zu erreichen. Die Kontrolle bestand aus Gülle ohne Zugabe von Ozon, die während 8, 32 und 80 Minuten gerührt wurden, was der Referenz zur Ozonmenge von 20, 80 und 200 mg Ozon pro Liter Gülle entsprach. Die Emissionen von H_2S und NH_3 wurden anschliessend im Headspace des Versuchsreaktors gemessen. Der pH Wert und der TAN^3 Gehalt in der Gülle blieben unverändert. Dennoch nahmen die NH_3 Emissionen mit zunehmender Behandlungsdauer und zunehmender Ozondosierung zu. Dies traf auch auf die Kontrolle zu aufgrund der Durchmischung der Gülle. Allerdings lagen alle Varianten mit Ozonung über den Kontrollen. Der Widerspruch zwischen unverändertem pH Wert (gemessen in einer Mischprobe der gesamten Gülleprobe) und Zunahme der NH_3 Emission wurde mit dem an der Gülleoberfläche erhöhten pH Wert erklärt. Dieser Schluss basierte auf Modellrechnungen und nicht auf Messresultaten. Die Autoren folgerten aus den Untersuchungen, dass bei niedriger Ozondosierung (20 mg Ozon pro Liter Gülle) eine ausreichende Geruchsminderung der Gülle erreicht werden kann, ohne die Emissionen von Ammoniak übermässig zu erhöhen. Bei hoher Dosierung finde eine Erhöhung der NH_3 Emissionen statt.

Weiter sind Resultate zum Verlauf des pH Werts und des Ammoniumgehalts in der Gülle vorhanden. So fanden beispielsweise Wu et al. (1998) einen im Vergleich zur Kontrolle unverän-

³ TAN = engl. Total Ammoniacal Nitrogen = Summe von NH_4^+ und NH_3 (Ammonium und Ammonak)

erten Gehalt von Ammonium bei der Behandlung von Schweinegülle mit Ozon (1 g Ozon pro Liter Gülle).

3.2 Anwendung in der Abwasserreinigung

Manterola et al. (2008) untersuchten den Einfluss der Ozonung von Rücklaufschlamm auf den Abbau der organischen Stoffe und der Stickstoffverbindungen. Die Dosierung von Ozon betrug 10 – 35 mg Ozon pro g Schlamm Trockensubstanz (TS; bei einem TS Gehalt von 4.18 g/L entspricht dies 42 – 146 mg Ozon pro Liter). Die Zunahme von Nitrat im Schlamm war gering. Dagegen stieg der Gehalt an Ammonium bei Mengen >20 mg Ozon/g Schlamm TS stark an. Diese Studie liefert demnach keine Hinweise auf eine effektive Oxidierung von Ammonium. In Überschussschlamm liegen die Konzentrationen von Ammonium und Nitrat in der Grössenordnung von mg/L (Gülle: g/L) und das Verhältnis von Ammonium : Nitrat beträgt rund 1:10, wogegen in Gülle der gelöste Stickstoff fast ausschliesslich aus Ammonium besteht.

Garcia-Orozco et al. (2011) dosierten 15 bis 25 mg Ozon pro Liter Rohabwasser (Ammoniumgehalt: ca. 10-20 mg/L). Dabei wurde eine hohe Oxidierung von Ammonium und organischem Stickstoff erreicht mit Nitrat als Produkt. Aufgrund der hohen Konzentration von Sauerstoff (4 mg/L) wurde keine Denitrifikation erwartet.

Deleris et al. (2002; zit. in Chu et al., 2009) beobachteten eine Abnahme des pH Werts von 6.2 auf 3.0 bei einer Dosierung von 500 mg Ozon pro g Schlamm TS. Chu et al. (2009) zitiert verschiedene Studien, welche eine Abnahme der Partikelgrösse infolge der Ozonung von Schlamm feststellten. In der Studie von Goel et al. (2004) nahm die Viskosität von anaerob stabilisiertem Schlamm zu.

4 Interpretation basierend auf der Literatur und Schlussfolgerungen

4.1 Auswirkungen der Ozonung von Gülle

Man kann davon ausgehen, dass die Ozonung von Gülle folgende Auswirkungen hat:

- Die Umwandlung von Ammoniak in der Gülle zu Ammoniumnitrat findet bei ausreichender Ozonmenge statt. Die Wirksamkeit dieses Prozesses dürfte allerdings limitiert sein, da neben Ammoniak eine grosse Menge von organischen Stoffen mit Ozon reagiert und damit für die Oxidation von Ammoniak nicht zur Verfügung steht. Die Zugabe von Ozon dürfte einerseits die direkte Umwandlung von NH_3 zu Ammoniumnitrat bewirken und andererseits in Kombination mit der zugeführten Umgebungsluft Ammoniak nitrifizieren.
- Der Abbau von organischer Substanz führt
 - zur Reduktion des Trockensubstanzgehalts der Gülle. In Kombination mit der Verminderung der Partikelgrösse dürfte die Viskosität der Gülle abnehmen.
 - zur Mineralisierung von organisch gebundenem Stickstoff und dessen Umwandlung zu TAN.

Es ist allerdings zu erwarten, dass die oben beschriebenen Prozesse nur begrenzt ablaufen, da die Häufigkeit der Behandlung bzw. die zugeführte Ozonmenge niedrig sind. Inwieweit zudem das Risiko der Bildung von Lachgas (N_2O) besteht, ist schwierig abzuschätzen. Je nach Konzentration von gelöstem Sauerstoff in der Gülle kann N_2O bei Nitrifizierung und Denitrifizierung entstehen (Béline et al., 2001)

4.2 Wirksamkeit der Ozonung hinsichtlich die Minderung von Ammoniakemissionen

Die Umwandlung von Ammoniak in der Gülle zu Ammoniumnitrat bewirkt eine Minderung von Ammoniakemissionen. Die Reduktion dürfte allerdings für die vorliegende Anwendung gering sein. In einem Stall beschränkt sich diese auf die Emissionen aus der Vorgrube unter den Spalten. Diese machen im Durchschnitt 25-40 % der Emissionen aus einem Laufstall aus (Monteny, 2000). Der überwiegende Teil der Emissionen (60-75 %) entsteht auf den Böden und Spalten bzw. vor dem Transfer der Exkremente in eine Vorgrube. Im vorliegenden Stall dürfte der Anteil der Böden an den gesamten Stallemissionen sogar mehr als 80 % betragen, wie Modellrechnungen basierend auf Monteny (2000) zeigen (vgl. Anhang).

Inwieweit Ammoniumnitrat in der Gülle stabil bleibt, ist nicht bekannt. Da diese Verbindung eine sehr hohe Wasserlöslichkeit⁴ aufweist, ist eine Dissoziation vom Ammoniumnitrat in Ammonium und Nitrat zu erwarten ($\text{NH}_4\text{NO}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$). Diese dürfte spätestens im Güllelager eintreten. Damit kann sich in der Gülle wieder ein Gleichgewicht zwischen Ammonium und Ammoniak einstellen, womit Ammoniak gasförmig in die Luft entweichen kann. Die angestrebte Stabilisierung des TAN würde damit zumindest teilweise aufgehoben. Zudem ist mit der Mineralisierung von organisch gebundenem Stickstoff und dessen Umwandlung in TAN zu rechnen. Damit kann der emissionsmindernde Effekt der Bildung von Ammoniumnitrat kompensiert werden.

Die vorliegenden Studien (Lyngbye et al., 2008; Bildsoe et al., 2012) liefern keine Hinweise, dass Ammoniakemissionen mittels Ozonung von Gülle reduziert werden können. Die Untersuchungen des Projekts Ozonung Gülle ProConseil sind nicht geeignet, um eine Emissionsminderung nachzuweisen. Es ist zu erwarten, dass an den verschiedenen Probenahmestellen (Exkremente direkt ab Schieber, Querkanal, Vorgrube, Lagerbehälter) die Gülle eine unterschiedliche Zusammensetzung aufweist aufgrund eines unterschiedlichen Verhältnisses von Harn und Kot und/oder unterschiedlich weit abgelaufener Freisetzung von Ammoniak. Zudem sind solche Untersuchungen ohne Wiederholungen nicht genügend aussagekräftig.

Die Verminderung des Gehalts an Trockensubstanz und die verminderte Viskosität der Gülle dürften Auswirkungen auf die potentiellen Emissionen haben. Im Lager dürfte dies zu einer verminderten Bildung einer Schwimmschicht führen, was das Emissionsrisiko erhöht. Bei der Ausbringung fördert die tiefere Viskosität das Eindringen der Gülle in den Boden, womit das Potential hinsichtlich Emissionen vermindert wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aufgrund theoretischer Überlegungen eine abschliessende Aussage zur Ozonung hinsichtlich Emissionsminderung von Ammoniak aus Gülle nicht möglich ist. Resultate von vorliegenden Studien deuten eher darauf hin, dass die Freisetzung von NH_3 zunehmen kann.

4.3 Vorläufige Bewertung des vorliegenden Projekts

Die Ozonung von Gülle für einen Betrieb wie vorgeschlagen im Projekt Ozonung Gülle ProConseil bringt mit grosser Wahrscheinlichkeit keine oder nur sehr geringe Vorteile hinsichtlich Ammoniakemissionen aus dem Stall. Auf den Stufen Lager und Ausbringungen ist die Wirkung schwer einzuschätzen. Es sind Mechanismen vorhanden, die sowohl eine hinsichtlich der Emissionen mindernde als auch fördernde Wirkung haben können. Ob mit der angewendeten Technik zudem eine Verbesserung der Stickstoffeffizienz erreicht werden kann, ist ebenfalls unklar.

Die Ozonung als alleinige Massnahme zur Geruchsminderung von Gülle wird in Dänemark nicht weiter verfolgt. Ozonung erfolgt nur in Kombination mit Separierung und Ansäuerung von Gülle. Das System, wie im Projekt Ozonung Gülle ProConseil installiert, wurde zudem von Danish Pig

⁴ z.B. 150 g/100 ml (bei 20°C): Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Ammonia_nitrate

Production untersucht. Ein Effekt hinsichtlich Emissionsminderung wurde nicht gefunden (Mündliche Mitteilung, Kristoffer E.N Jonassen, Danish Pig Production, DK-1609 Copenhagen, Denmark).

Basierend auf den verfügbaren Informationen erscheint das Potential zur Reduktion von Ammoniakemissionen gemäss Projekt Ozonung Gülle ProConseil bzw. auf der Grundlage des verwendeten System als gering, und es ist fraglich, ob es sich lohnt, diesen Ansatz weiter zu verfolgen.

5 Vorschlag für das weitere Vorgehen

Weitergehende Untersuchungen zum vorliegenden Projekt Ozonung Gülle ProConseil müssten zwingend die Stufen Stall, Lager und Ausbringung einschliessen. Da das eingereichte Projekt auf einer Kombination von Technologien basiert (Ozonung; elektrochemischer Prozess⁵), welche hinsichtlich Emissionsminderung von Ammoniak bisher nur ansatzweise bzw. gar nicht untersucht wurden, wären eingehende Untersuchungen erforderlich. Es ist von Kosten in der Grössenordnung von mehreren 10 bis 100 kFr und einer Projektdauer von mindestens einem halben bis einem Jahr zu rechnen. Falls zusätzlich Untersuchungen zur Stickstoffeffizienz durchgeführt werden sollen, sind Topfversuche und allenfalls mehrjährige Feldversuche erforderlich.

Es wird vorgeschlagen, dass potentielle Interessenten von solchen Untersuchungen (Firmen, kantonale Stellen, Bundesämter) den Bedarf basierend auf dem vorliegenden Bericht abklären. Wenn Bedarf/Interesse vorhanden ist, können detailliertere Angaben hinsichtlich Untersuchungen erarbeitet werden.

⁵ Dieser Aspekt wurde im vorliegenden Bericht nicht behandelt.

6 Literatur

- Abegglen, C., Siegrist, H., 2012. Mikroverunreinigungen aus kommunalem Abwasser. Verfahren zur weitergehenden Elimination auf Kläranlagen. Bundesamt für Umwelt, Bern, Umwelt-Wissen Nr. 1214. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, p. 210.
- Aider, M., Gnatko, E., Benali, M., Plutakhin, G., Kastyuchik, A., 2012. Electro-activated aqueous solutions: Theory and application in the food industry and biotechnology. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 15, 38-49.
- Aland, A., Lidfors, L., Ekesbo, I., 2002. Diurnal distribution of dairy cow defecation and urination. *Applied Animal Behaviour Science* 78, 43-54.
- Béline, F., Martinez, J., Marol, C., Guiraud, G., 2001. Application of the N-15 technique to determine the contributions of nitrification and denitrification to the flux of nitrous oxide from aerated pig slurry. *Water Research* 35, 2774-2778.
- Bildsoe, P., Adamsen, A.P.S., Feilberg, A., 2012. Effect of low-dose liquid ozonation on gaseous emissions from pig slurry. *Biosystems Engineering* 113, 86-93.
- Carballa, M., Omil, F., Lema, J.M., 2009. Influence of different pretreatments on anaerobically digested sludge characteristics: suitability for final disposal. *Water Air and Soil Pollution* 199, 311-321.
- Chu, L.B., Yan, S.T., Xing, X.H., Sun, X.L., Jurcik, B., 2009. Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment method for minimization of excess sludge production. *Water Research* 43, 1811-1822.
- Garcia-Orozco, J.H., Vargas-Martinez, A., Ayala-Arnez, M.A., 2011. Pre-ozonation in the activated sludge process: fate of nitrogen species. *Water Science and Technology* 63, 2513-2519.
- Deleris, S., Geaugey, V., Camacho, P., Debellefontaine, H., Paul, E., 2002. Minimization of sludge production in biological processes: an alternative solution for the problem of sludge disposal. *Water Science and Technology* 46 (10), 63-70.
- Goel, R., Komatsu, K., Yasui, H., Harada, H., 2004. Process performance and change in sludge characteristics during anaerobic digestion of sewage sludge with ozonation. *Water Science and Technology* 49, 105-113.
- KOLAS-Arbeitsgruppe Ammoniak. 2012. Checkliste für die Grobbeurteilung von einzelbetrieblichen Projekten
- L yngbye, M., Jonassen, C., Rasmussen, D.K., Christophersen, C., 2008. Ozone treatment of slurry from finishers in climate chambers (Report No. 0801). Denmark: Danish Pig Production, Copenhagen, DK.
- Manterola, G., Uriarte, I., Sancho, L., 2008. The effect of operational parameters of the process of sludge ozonation on the solubilisation of organic and nitrogenous compounds. *Water Research* 42, 3191-3197.
- Monteny, G.J., 2000. Modelling of ammonia emissions from dairy cow houses. PhD Thesis. Wageningen University, Wageningen NL, p. 156.
- UNECE, 2007. Guidance document on control techniques for preventing and abating emissions of ammonia. United Nations Economic and Social Council, Geneva, Switzerland, p. 35.
- von Nagy-Ilosva, L.I., 1894. Von den bei der Aufeinanderwirkung von Ozon und Ammoniak sich bildenden Nebenprodukten. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* 27, 3500-3503.
- Wu, J.J., Park, S.H., Hengemuehle, S.M., Yokoyama, M.T., Person, H.L., Masten, S.J. 1998. The effect of storage and ozonation on the physical, chemical, and biological characteristics of swine manure slurries. *Ozone-Sci Eng* 20(1): 35-50.

7 Anhang

Schätzung der Herkunft der Emissionen aus dem Laufstall Roch/Teuscher

Basierend auf dem Model Snelstal (Monteny, 2000). Werte gewählt gemäss mündlicher Mitteilung G.J. Monteny, 05.05.2010

Model parameters*	
Animals	
Number of animals	50
Urea concentration (g N/L)	4
Manure composition (g N/L)	2
Days	365
Floor	
Surface per animal (m ²)**	6
Temp (°C)	10
pH	9.4
Wind speed (m/sec)	0.15
Slurry pit	
Surface per animal (m ²)***	3
Temp (°C)	10
pH	8.4
Wind speed (m/sec)	0.05
Results	
Floor (g NH ₃ /h)	47.9
Pit (g NH ₃ /h)	9.4
Total (g NH ₃ /h)	57.7

* Monteny (2000)

** Fläche geschätzt nach Ethoprogrammverordnung, Anhang 5 (Anforderungen des RAUS-Programms betreffend den Laufhof und die Weide sowie betreffend die Dokumentation und die Kontrolle): Werte für Kühe zwischen 5.6 m² und 12 m² je nachdem, ob Laufhof dauernd oder nur zeitweise zugänglich und Tiere behornt oder nicht behornt.

*** Fläche Vorgube unter Fütterungsbereich: grob geschätzt basierend auf Skizze Projekt Ozonung Gülle ProConseil.