Berner
Fachhochschule

Abluftwäscher zur Reduktion von Ammoniakemissionen aus Schweine- und Geflügelställen

Literaturstudie, Umfragen und Fallstudie

Air scrubbers to reduce ammonia emissions from housings for pigs and poultry

Literature review, survey and case study

Bericht auf Deutsch mit Zusammenfassung auf Englisch
Report in German with summary in English

Thomas Kupper, Stéphanie Vuille, Alex Valach

Berner Fachhochschule Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen

2. Dezember 2022

Inhalt

Zusammenfassung ... 4
Summary ... 5
1. Ausgangslage und Zielsetzung ... 6
2. Datengrundlage/-quellen und methodisches Vorgehen ... 7
3. Resultate und Diskussion ... 7
3.1 Grundlagen der Abluftreinigung ... 7
3.1.1 Definitionen und Begriffe ... 7
3.1.2 Biowäscher, Chemowäscher ... 7
3.1.3 Biofilter ... 8
3.1.4 Wasserwäscher ... 8
3.1.5 Mehrstufige Wäscher ... 9
3.2 Biowäscher ... 9
3.2.1 Einleitung ... 9
3.2.2 Abscheideleistung von Biowäschern für Ammoniak ... 10
3.2.3 Abschlämmwasser: Eigenschaften und Anfall ... 12
3.2.4 Bildung von Lachgas und Stickoxiden (NO_x) ... 13
3.3 Chemowäscher ... 13
3.3.1 Einleitung ... 13
3.3.2 Abscheideleistung von Chemowäschern für Ammoniak ... 14
3.3.3 Abschlämmwasser: Eigenschaften und Anfall ... 15
3.4 Kombiwäscher ... 16
3.5 Behandlung, Lagerung und Verwendung des Abschlämmwassers ... 16
3.5.1 Regelungen und Angaben aus der Literatur ... 16
3.5.2 Anrechnung der Nährstoffe im Abschlämmwasser für die Düngung ... 18
3.5.3 Schätzung des Potentials zur Rückgewinnung von Stickstoff durch die Verwertung von Abschlämmwasser ... 18
3.6 Informationen aus Umfragen in der Schweiz ... 19
3.7 Eignung von Abluftreinigungsanlagen für BTS, BTS+RAUS Ställe ... 21
3.8 Abbildung der Abluftreinigung im Modell Agrammon ... 22
3.8.1 Erfassung der Abluft von Ställen durch Abluftwäscher ... 22
3.8.1.1 Geflügel ... 22
3.8.1.2 Schweine ... 23
3.8.2 Abscheideraten ... 23
3.8.3 Berechnung der Emissionen von Abschlämmwasser ... 23
3.8.4 Vorschlag für eine Revision der Implementierung der Abluftreinigung im Modell Agrammon ... 23
3.8.5 Fallstudie eines Betriebs mit einem Projekt zum Bau eines Legehennenstalls ... 26
3.8.5.1 Vorgehen bei der Emissionsrechnung ... 26
3.8.5.2 Resultate der Emissionsrechnung ... 29
4. Ausblick und Schlussfolgerungen ... 30
5. Verdankungen ... 33
6. Literaturverzeichnis ... 33

Anhang 1 39
Schätzung der Emissionsreduktion der Ausbringung von Abschlämmwasser basierend auf dem Modell ALFAM2 39
Anhang 2 41
Anhang 3 48
Anhang 4 54
Anhang 5 59
Anwendung von Abluftwäschern bei BTS Ställen 59
Anhang 6 61
Schwefeldüngung 61

Hinweis: Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamts für Umwelt verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Zusammenfassung

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist, die Datenlage (i) zur Abscheideleistung von Ammoniak von Abluftwäschern (Bio- und Chemowäscher), (ii) zur Bildung von Lachgas bei Biowäschern und (iii) zur Zusammensetzung von Abschlämmwasser (insbesondere N-Gehalt) zu dokumentieren und ein Vorschlag zur verbesserten Abbildung von Abluftwäschern im Modell Agrammon inkl. des Stickstoffs im Abschlämmwasser zu erarbeiten. Dazu wurden Daten aus der Literatur (50 Studien und 25 DLG Prüfberichte von Abluftreinigungsanlagen) gesichtet.

Die Abscheideraten für Ammoniak betragen im Mittel rund 80% und 85% für Biowäscher bzw. Chemowäscher. Für Biowäscher wurden häufig mehr als 70% Abscheideleistung gemessen, wogegen Chemowäscher den Wert von 90% oft nicht erreichten. In den Studien wurden im Mittel um rund 5 bis 10 Prozentpunkte tiefere Abscheideleistungen im Vergleich zu den Daten der DLG Prüfberichte gefunden. Die Streuung der Abscheideleitungen ist gross. Niedrige Abscheideraten von Ammoniak dürften überwiegend auf einen nicht ordnungsgemässen Betrieb der Anlagen zurückzuführen sein. Die Daten aus der Literatur und aus Umfragen legen nahe, dass in der Schweiz ein Potential hinsichtlich Verbesserung der Abscheideraten von Luftwäschern für Ammoniak besteht. Eine automatisierte Steuerung der Wäscher, klare Kriterien für die Steuerung sowie eine Überwachung durch die Behörden scheinen eine hohe Reinigungsleistung der Anlagen gewährleisten zu können.

Bei der Verwendung von Biowäschern und auch Biofiltern wurden oft erhöhte Lachgasemissionen gemessen. Da Anlagen zur Abluftreinigung in der Schweiz mehrheitlich Geruch reduzieren müssen, ist eine biologische Stufe erforderlich, was ein Risiko von Lachgasemissionen zur Folge hat. Die bestmögliche Option zur Reduktion von Geruch und Ammoniakemissionen ohne Bildung von Treibhausgasemissionen dürften mehrstufige Chemowäscher oder Kombiwäscher (Chemowäscher + Biowäscher) sein.

Der im Abschlämmwasser enthaltene Stickstoff ist nicht vernachlässigbar, wird aber heute in der Düngung kaum eingerechnet. Der Gehalt liegt zwischen 1 bis 30 kg N pro m^3. Bei 80% Abscheideleistung beträgt die Rückgewinnung pro Tierplatz und Jahr rund 0.06, 0.03 und 1.5 kg N für Legehennen, Mastpoulets bzw. Mastschweine. Das geschätzte Potential des Stickstoffs im Abschlämmwasser entspricht insgesamt 1.4% der gesamtschweizerisch von der Landwirtschaft in Form von mineralischen Düngern eingesetzten N-Menge. Aufgrund der Verwendung von Schwefelsäure wird die Ausbringmenge durch den Schwefelbedarf der Kulturen limitiert. Die aktuelle Situation bezüglich Verfügbarkeit von mineralischen N-Düngern und die Anforderungen im Zusammenhang mit dem Absenkpfad Nährstoffe könnte die Wahrnehmung und damit das Potential zur Umsetzung der Abluftreinigung verbessern.

Bei BTS Ställen für Geflügel mit Zugang zu einem Aussenklimabereich besteht bei Unterdrucklüftung ein Unterdruck und somit kann die Abluft einem Luftwäscher zugeführt werden. Die Öffnungen zum Aussenklimabereich an sich stehen nicht im Widerspruch zu Betrieb und ausreichender Abscheideleistung für Ammoniak (>70%) einer Abluftreinigungsanlage in Bezug auf die durch die Abluftreinigungsanlage geführte Abluft. Es gibt in der Schweiz wenige Labelställe für Schweine, die mit Abluftreinigung ausgerüstet sind. Ein positiver Effekt hinsichtlich Emissionsreduktion von Ammoniak erscheint als wahrscheinlich.

Für das Modell Agrammon wird vorgeschlagen, die aktuell in Agrammon hinterlegten fixen Abscheideraten (Biowäscher: 70%, Chemowäscher: 90%) durch individuelle Werte für die einzelnen Wäschertypen zu ersetzen. Für die Einrechnung des N-Flusses im Abschlämmwasser und der bei Lagerung und Ausbringung anfallenden Emissionen sollte ein separater Pfad bzw. N-Fluss implementiert werden. Zur Absicherung der verbesserten Modellrechnung in Agrammon sind Analysedaten von Abschlämmwasser und Emissionsmessungen erforderlich.

Summary

The aim of this project is to report the current knowledge (i) on the ammonia removal performance of exhaust air scrubbers (biotrickling filters and acid scrubbers), (ii) on the formation of nitrous oxide in biotrickling filters and (iii) on the composition of discharge water (especially N-content) and to propose improved parameters to model exhaust air scrubbers in the Agrammon model which include nitrogen in the discharge water. For this purpose, data from the literature (50 studies and 25 DLG test reports of exhaust air cleaning systems) were reviewed.

The removal rates for ammonia are on average about 80% and 85% for bioscrubbers and chemical scrubbers, respectively. For biotrickling filters, often more than 70% removal efficiency was measured, whereas acid scrubbers often did not reach 90%. In the studies, the ammonia emission reduction was found to be on average about 5 to 10% lower than the data in the DLG test reports. The variation of the removal rates is large. Low removal rates for ammonia are likely due to inappropriate operation of the air scrubbers. The data from the literature and from surveys suggest that there is a potential for improvement in the ammonia emission reduction of air scrubbers in Switzerland. An automated control system with clear operational criteria and official supervision of exhaust air scrubbers seem to ensure a high removal rate for ammonia.

Increased nitrous oxide emissions have often been measured when using biotrickling filters and biofilters. Since the majority of air scrubbers in Switzerland were initially installed for odor reduction, a biological stage is required, which enhances a risk of nitrous oxide emissions. The best possible option for reducing odor and ammonia emissions whilst avoiding greenhouse gas emissions might be multi-stage acid scrubbers or combined scrubbers (air scrubbers + biotrickling filters).

Furthermore, the nitrogen accumulated in the discharge water is not negligible. However, it is hardly considered as a fertilizer. The content ranges from 1 to as much as 30 kg N per m^3. At 80% removal efficiency, the recovery per animal place and year is about 0.06, 0.03 and 1.5 kg N for laying hens, broilers, and fattening pigs, respectively. The estimated potential of nitrogen in the discharge water corresponds to a total of 1.4% of the amount of N used by agriculture in the form of mineral fertilizers throughout Switzerland. Due to the use of sulfuric acid, the application rate is limited by the sulfur requirements of the crops. The current situation regarding the availability of mineral N fertilizers, as well as the requirements related to the nutrient reduction pathway could improve the perception of and thus the potential for the implementation of exhaust air purification.

Regarding BTS stables for poultry with an adjacent roofed exterior area that operate with a negative pressure, the transfer of exhaust air into an air scrubber can be maintained. The openings to the adjacent roofed exterior area do not conflict with a sufficient removal rate for ammonia. There are already several label barns for pigs in Switzerland, which are equipped with an air scrubber. Therefore, a positive effect in terms of ammonia emission reduction with air scrubbers in this housing system seems plausible.

For the Agrammon model, it is proposed to replace the fixed removal rates currently implemented (i.e., biotrickling filters: 70%, acid scrubbers: 90%) with values for the individual scrubber types. A separate pathway or N-flux should be implemented to account for the N-flux in the discharge water and the emissions generated during its storage and application. To validate the improved model calculation in Agrammon, analytical data of discharge water and emission measurements are required.

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Im Rahmen des Göteborg-Protokolls der UNECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung ist die Schweiz verpflichtet, regelmässig über den aktuellen Stand der Ammoniakemissionen zu berichten. Die Berechnung der Emissionen erfolgt mit dem Modell Agrammon. Es handelt sich um ein Tier 3 Stofffluss Modell. Im Rahmen der Emissionsrechnungen für die Erstellung der Inventare ist dafür zu sorgen, dass die von den verschiedenen Ländern verwendeten Modelle hinsichtlich der verwendeten Parameter auf validen wissenschaftlichen Grundlagen sowie auf dem aktuellen Wissensstand basieren und konsistent sind. Zudem wird insbesondere Agrammon vermehrt für einzelbetriebliche Anwendungen verwendet, z.B. im Rahmen von Baubewilligungen. In diesem Kontext erhöhen sich die Anforderungen an die Modellgrundlagen, da die Betroffenen eine möglichst kleine Abweichung zwischen den Resultaten der Modellrechnungen und der Realität erwarten.

Im Zusammenhang mit Bestrebungen zur Emissionsminderung ausgehend von Verpflichtungen aufgrund von gesetzlichen oder vertraglichen Zielvereinbarungen und im Rahmen von Bewilligungsverfahren nehmen Anlagen zur Abluftreinigung bei Schweine- und Geflügelställen an Bedeutung zu. Dabei stehen zwei Themen im Vordergrund: (i) Abscheideleistung von Ammoniak für alle Wäschertypen und Bildung von Lachgas bei Systemen mit einer biologischen Reinigungsstufe sowie (ii) Transfer von Stickstoff in das Abschlämmwasser, dessen Nährstoffgehalt sowie Verwendung. Thema (i) ist im Kontext mit den Verpflichtungen der Landwirtschaft hinsichtlich Emissionsreduktion Ammoniak (BAFU, BLW, 2016) und Treibhausgasen (Schweizerischer Bundesrat. 2021) relevant. Der Prozess zur Berechnung des mit dem Abschlämmwasser abgeschiedenen Stickstoffs (Thema ii) ist im Modell Agrammon nicht korrekt abgebildet. Die Emissionen auf den Stufen Lagerung und Ausbringung werden damit in vielen Fällen überschätzt (vgl. dazu Kap. 3.8.4). Der Stickstoff im Abschlämmwasser lässt sich vermutlich emissionsarm ausbringen und wäre damit eine wertvolle, gut berechenbare Stickstoffquelle für den Pflanzenbau. Die Verbreitung von Luftwäschern könnte gefördert werden, wenn der Nutzen des Abschlämmwassers besser kommuniziert würde. Wobei dies wiederum im Kontext Absenkpfad Stickstoff sowie einer in Zukunft möglichen Verknappung von mineralischen Stickstoffdüngern im Zusammenhang mit einer Reduktion des Ausstosses von Treibhausgasen an Bedeutung gewinnen könnte.

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist daher, (i) die Datenlage zur Abscheideleistung von Ammoniak von Abluftwäschern, (ii) zur Bildung von Lachgas bei Biowäschern und (iii) zur Zusammensetzung von Abschlämmwasser (insbesondere N-Gehalt) aufzuarbeiten und zu dokumentieren. Weiter soll (iv) ein Vorschlag ausgearbeitet werden, um Abluftwäscher im Modell Agrammon inkl. den Verbleib des Stickstoffs im Abschlämmwasser adäquat abbilden zu können. Der resultierende Prozess zur Berechnung der Emissionen von Abluftwäschern und von Abschlämmwasser ist ein Vorschlag, der von der Begleitgruppe Agrammon vor der Implementierung in Agrammon genehmigt werden muss.

Der Bericht ist wie folgt strukturiert: Kapitel (Kap.) 2 beschreibt die Datengrundlage und das methodische Vorgehen. Der Teil Resultate und Diskussion ist in 8 Unterkapitel unterteilt: Kap. 3.1 gibt eine kurze Einführung in die Abluftreinigung mit Definitionen und Erläuterung sowie einer kurzen Beschreibung der verschiedenen Wäschertypen. In den Kap. 3.2 bis 3.4 werden die Daten aus der Literatur bezüglich Abscheideleistung von Bio-, Chemo- und Kombiwäschern für Ammoniak sowie zu den Eigenschaften des Abschlämmwassers vorgestellt. Kap. 3.5 gibt eine Übersicht zu Behandlung, Lagerung und Verwendung des Abschlämmwassers einschliesslich einer Empfehlung zur Anrechnung der darin enthaltenen Nährstoffe für die Düngung (Kap. 3.5.2) sowie einer Abschätzung des Potentials zur Rückgewinnung von Stickstoff durch die Verwertung von Abschlämmwasser (Kap. 3.5.3). Kap. 3.6 enthält eine Bestandesaufnahme (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) zur Verbreitung von Abluftreinigungsanlagen in der Schweiz, zur Abscheideleistung und zur

Verwendung des Abschlämmwassers aufgrund von Interviews mit Personen von landwirtschaftlichen Betrieben, Behörden und Firmen. Kap. 3.7 diskutiert die Eignung von Abluftreinigungsanlagen für BTS, BTS+RAUS Ställe für Geflügel bzw. Schweine. In Kap. 3.8 wird die aktuelle Abbildung der Abluftreinigung im Modell Agrammon beschrieben und ein Vorschlag einer verbesserten Implementierung inklusive des Verbleibs von Stickstoff im Abschlämmwasser vorgestellt. Dieser Teil wird mit einer Fallstudie ergänzt. Die vorliegende Studie fokussiert auf Ammoniak und schliesst die beiden weiteren Themen der Abluftreinigung, Abscheidung von Geruch und Partikeln, nicht ein.

2. Datengrundlage/-quellen und methodisches Vorgehen

Informationen zur Datenlage zur Abscheideleistung von Ammoniak von Luftwäschern (i), zur Bildung von Lachgas bei Biowäschern (ii) und zur Zusammensetzung von Abschlämmwasser, insbesondere N-Gehalt, (iii) basierte auf einer Literaturrecherche in Web of Science (50 Artikel), DLG-Prüfberichten, Prüfgebiet Innenwirtschaft, Unterkategorie Abluftreinigung[1] (25 Prüfberichte). Ergänzend dazu wurden Daten aufgrund von Betriebsbesichtigungen und Befragungen von Experten gesammelt (5 Datensätze). Weiter wurde eine Umfrage des Cercl'Air von 2018 einbezogen.

3. Resultate und Diskussion

3.1 Grundlagen der Abluftreinigung

3.1.1 Definitionen und Begriffe

Anlagen zur Abluftreinigung in der Landwirtschaft bestehen aus einem Reaktor, der entweder aus inerten Füllkörpern (Biowäscher, Chemowäscher) oder organischem Material wie Holzschnitzel oder Wurzelholz (Biofilter) besteht. Die Füllkörper haben in der Regel eine grosse spezifische Oberfläche (Mosquera et al., 2014). Im Englischen sind für Biowäscher die Begriffe Biotrickling filter und Bioscrubber gebräuchlich, welche synonym verwendet werden (Mosquera et al., 2014). Van der Heyden et al. (2015) bezeichnen Bioscrubber als eine Einheit mit Füllkörpern und zusätzlich einem Bioreaktor zwecks Aufbaus der Mikroorganismen, die meist mit Belebtschlamm einer ARA angeimpft werden. Dieser Typ ist in der Tierhaltung jedoch nicht gebräuchlich. Wasserwäscher sind Einheiten zur Staubentfernung, die vor Chemowäschern, Biowäschern oder Biofiltern angeordnet werden. Weiter gibt es mehrstufige Wäscher, welche die oben aufgeführten Elemente Chemowäscher, Biowäscher, Biofilter und Wasserwäscher kombinieren.

3.1.2 Biowäscher, Chemowäscher

Die Abscheidung von Ammoniak erfolgt entweder durch Abbau der im Waschwasser verteilten oder an den Füllkörpern anhaftenden Mikroorganismen (Biowäscher) oder durch Sorption des in der Flüssigkeit enthaltenen NH_3 (Chemowäscher). Um die Füllkörper feucht zu halten und damit die biologischen Prozesse bzw. die Sorption von NH_3 sicherzustellen, werden diese mit Wasser berieselt. Bei den Wäschern wird ein Teil des eingesetzten Wassers kontinuierlich im Kreislauf geführt, während ein anderer Teil entfernt (Abschlämmwasser) und durch Frischwasser ersetzt wird. Die Abluft aus dem Stall wird entweder horizontal (Querstrom) oder aufwärts (Gegenstrom) durch die Füllkörper geleitet (Abbildung 1 aus Mosquera et al., 2014).

[1] https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests/suche-nach-pruefberichten/?unterkategorie=95&page=1&pruefgebiet=3

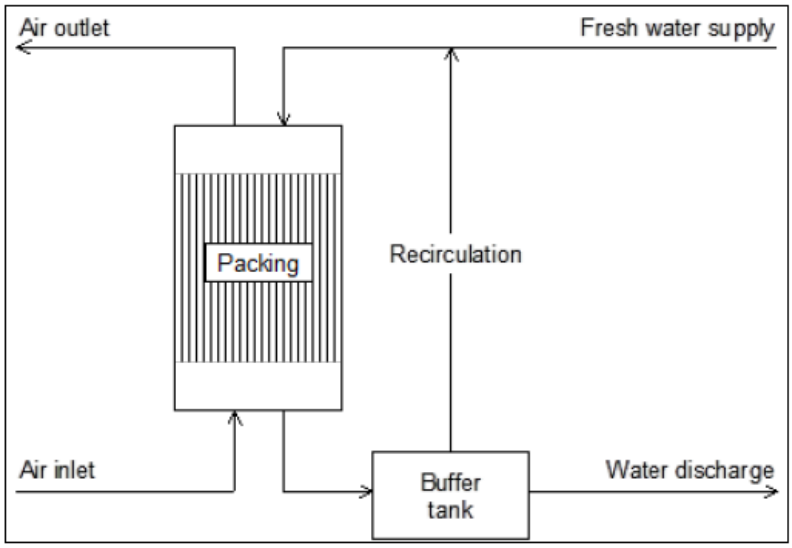

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Abluftwäschern (Chemowäscher, Biowäscher; Quelle: Mosquera et al., 2014).

3.1.3 Biofilter

In einem Biofilter (engl. biofilter, bio-filter) wird die Abluft durch ein Filterbett aus organischem Material wie z.B. Holzschnitzel, Wurzelholz geleitet. Das Material muss feucht gehalten werden, damit die zu entfernenden Moleküle vom Wasserfilm auf dem Material aufgenommen und durch Mikroorganismen abgebaut werden. Um Verdunstungsverluste auszugleichen und die Funktion zu gewährleisten, muss die Abluft entweder vorbefeuchtet werden, z.B. durch einen Wäscher, und/oder der Filter muss durch kontrollierte intermittierende Bewässerung befeuchtet werden. Biofilter werden hauptsächlich zur Geruchsbeseitigung bei Stallsystemen ohne Einstreumaterial eingesetzt. Sie können auch zur Staubabscheidung verwendet werden, wenn auf der Zuluftseite grob strukturiertes Filtermaterial verwendet wird, das nicht zum Verstopfen neigt. Biofilter als alleinige Prozessstufe können auch zur Elimination von Ammoniak geeignet sein, wobei die Abscheideleistung im Vergleich zu Wäschern geringer ist (Mosquera et al., 2014). Hahne und Pfeifer (2017) haben bei einem Biofilter eine Reduktion der Ammoniakemissionen von 88% gefunden (vgl. DLG Bericht 6380)[2]. Die Abscheideleistung von Biofiltern ist stark eingeschränkt, wenn das Füllmaterial aufgrund von mangelhaftem Unterhalt abgebaut wird. Dies kann zu Kurzschlüssen/präferenziellen Fliesswegen für die Abluft im Filtermaterial führen, welche die aktive Oberfläche und somit die Wirkung reduziert (Guingand, Eglin, 2016). Die Abscheideleistung kann sogar negativ werden, wenn die Befeuchtung des Trägermaterials unzureichend ist, sich dadurch Ammonium und Nitrit an den Oberflächen akkumuliert und zu einem späteren Zeitpunkt ausgestrippt wird (Melse, Hol, 2012; Van der Heyden et al., 2015).

3.1.4 Wasserwäscher

Wasserwäscher werden meist chemischen oder biologischen Wäschern vorgeschaltet zwecks Staubabscheidung. Füllkörper sind nicht immer Bestandteil dieses Wäschertyps. Da das Waschwasser keine Säuren oder Mikroorganismen enthält, ist die Abscheidung von NH_3 gering (Mosquera et al., 2014).

[2] Dieser Biofilter verfügt über eine automatisierte Steuerung basierend auf einer pH-Regulierung des Waschwassers und einer leitfähigkeitsgesteuerten Abschlämmung sowie über eine überschüssige Befeuchtung und ein Wechsel des Biofiltermaterials alle 6 Monate. Diese Grössen gewährleisten eine hohe Ammoniakabscheidung. Herkömmliche Biofilter ohne diese Ausstattung und ohne regelmässigen Filtermaterialwechsel sind zur Ammoniakabscheidung nicht geeignet (pers. Mitteilung J. Hahne, Thünen-Institut für Agrartechnologie).

3.1.5 Mehrstufige Wäscher

Mehrstufige Wäscher oder sogenannte Kombiwäscher weisen mehrere Stufen der oben beschriebenen Wäschertypen nacheinander geschaltet auf. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für einen dreistufigen Wäscher. Die erste Stufe ist ein reiner Wasserwäscher zur Entfernung von Staub, wobei zur Staubentfernung auch Filter beschrieben wurden (Hahne, 2010; Strohmaier, 2020). Die zweite Stufe besteht aus einem Chemowäscher zur Abscheidung von Ammoniak und die dritte aus einer biologischen Behandlungsstufe zur Geruchsentfernung. Jede Stufe verfügt über ein separates Wasserauffangbecken für die Rezirkulation. Mehrstufige Wäscher können wie folgt konzipiert sein:

- Chemowäscher + Biofilter
- Chemowäscher + Biowäscher
- Wasserwäscher + Chemowäscher
- Wasserwäscher + Biofilter
- Wasserwäscher + Chemowäscher + Biofilter
- Wasserwäscher + Biowäscher

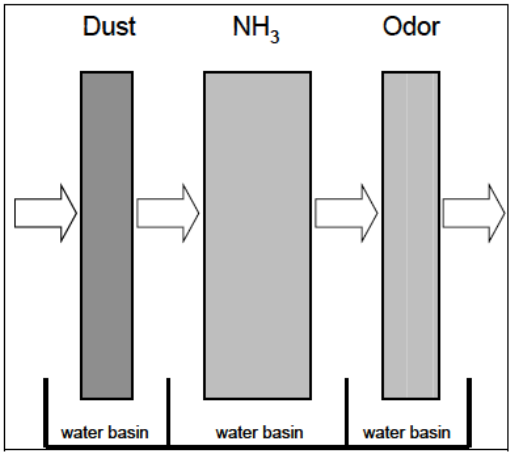

Abbildung 2: Schematische Darstellung eines mehrstufigen Wäschers (Quelle: Mosquera et al., 2014).

Van der Heyden et al. (2015) haben festgestellt, dass die Abscheideleistung bei mehrstufigen Wäschern weniger variiert als bei andern Wäschertypen (vgl. auch Energie und Umwelt (uwe) 2021). Ungünstige Verhältnisse in einer Stufe können durch eine andere Stufe kompensiert werden. Waschwasser aus der biologischen Stufe lässt sich in der chemischen Stufe rezyklieren, ohne dass die Abscheideleistung beeinträchtigt wird.

In den folgenden Kapiteln zur Abscheideleistung werden mehrstufige Wäscher, welche eine Stufe bestehend aus Biowäscher oder Chemowäscher enthalten, den Typen Biowäscher bzw. Chemowäscher zugeordnet[3]. Unter 'Kombiwäscher' (Kap. 3.4) sind diejenigen Wäschertypen aufgeführt, die je eine Stufe des Typs Biowäscher und Chemowäscher enthalten.

3.2 Biowäscher

3.2.1 Einleitung

In Biowäschern wird das im Waschwasser gebundene Ammonium zu Nitrit und anschliessend zu Nitrat oxidiert (Nitrifizierung; Van der Heyden et a., 2015). Diese Prozesse basieren auf Ammoniakoxidierern (engl. Ammonia oxidizing bacteria, AOB; auch Nitritbakterien genannt) wie Nitrosomonas oder Nitrospira und auf Nitritoxidierer (engl. Nitrite-oxidizing bacteria, NOB, auch Nitratbakterien genannt) wie Nitrobacter oder Nitrospina, die Nitrit zu Nitrat oxidieren (Kristiansen et al., 2011). Die Mikroorganismen sind im Waschwasser

[3] Beispiele: Wasserwäscher + Chemowäscher + Biofilter= Chemowäscher; Wasserwäscher + Biowäscher= Biowäscher.

gelöst oder im Biofilm auf den Füllkörpern enthalten. Das Waschwasser wird rezykliert, um den Verbrauch von Frischwasser zu begrenzen. Zur Stabilisierung des Prozesses werden der pH-Wert des Waschwassers und die elektrische Leitfähigkeit (EL) kontinuierlich gemessen. Zur Stabilisierung des pH-Werts in einem Bereich zwischen rund 6.5 bis 7.5 wird 96% Schwefelsäure und 33% Natronlauge eingesetzt. Die EL ist ein geeigneter Proxy für die Summe an Ammoniak, Nitrit und Nitrat (Dumont et al., 2020c, Lagadec et al., 2021; Melse, Ploegaert, 2011; Melse et al., 2012a; Pongkua et al., 2020). Dumont et al. (2020a,b) und Pongkua et al. (2020) geben basierend auf Melse et al. (2012a) die folgende Beziehung zwischen EL und N im Waschwasser an: $\sum([NH_4^+] + [NO_2^-] + [NO_3^-]) = 0.22$ EL (± 20%, $R^2 = 0{,}945$). Die Messung der EL erfolgt entweder im Waschwasserspeicher oder im Abschlämmwasser. Eine Messung der NH_3-Konzentration ist damit für die Steuerung nicht notwendig. Für die N-Konzentration im Waschwasser gelten Obergrenzen, um eine Hemmung der Mikroorganismen zu verhindern (z.B. 3.2 g N L^{-1} gültig in NL und Flandern; Van der Heyden et al., 2015), was eine regelmässige Abschlämmung eines Teils des Waschwassers und einen entsprechenden Ersatz mit Frischwasser erfordert. Dies führt zu einem höheren Frischwasserverbrauch von Biowäschern im Vergleich zu Chemowäschern (Van der Heyden et al., 2015). Wenn die vorgegebenen Parameter EL, pH-Wert und N-Gehalt des Waschwassers innerhalb des vorgeschriebenen Bereichs liegen (EL: siehe Fussnote[4]; pH: 6.5 and 7.5, N: ≤3.2 g N L^{-1}), ist ein Betrieb mit den erforderlichen Abscheideleistungen gewährleistet. Umgekehrt bedeutet ein Nichteinhalten der Parameter nicht automatisch, dass die gewünschte Abscheideleistung nicht erreicht wird (Van der Heyden et a., 2019). In der Praxis werden allerdings die erforderlichen Abscheideleistungen oft nicht eingehalten (Melse, Ogink, 2005; Van der Heyden et a., 2019). Zudem besteht bei Biowäschern ein Risiko der Produktion von Lachgas (Van der Heyden et al., 2015; vgl. Kap. 3.2.4).

3.2.2 Abscheideleistung von Biowäschern für Ammoniak

Die mittlere Abscheideleistung von Biowäschern liegt gemäss Angaben aus der Literatur bei rund 80% (Tabelle 1). Dabei geben die DLG Berichte höhere Werte an (Differenz: rund 10 Prozentpunkte). Mehrstufige Anlagen weisen im Mittel leicht höhere Abscheideraten auf. Damit werden die geforderten Abscheideraten von 70% gemäss KOLAS (2013) oder der Gesetzgebung der Niederlande (Melse, Ogink (2005) erreicht. In der Praxis ist dies aber nicht immer der Fall wegen unzureichender Prozesskontrolle und -führung durch die Betreiber (Hahne et al., 2016; Melse, Ogink, 2005). Tabelle 1 zeigt auch eine grosse Streuung der Abscheideraten.

Tabelle 1: Zusammenfassung von Werten aus der Literatur für die Abscheideleistung von Biowäschern für Ammoniak in Prozent

Tierkategorie	Durchschnitt von Mittelwerten [%]	Median von Mittelwerten [%]	Anzahl Beobachtungen (Mittelwerte)	Durchschnitt Sommer/Winter [%]	Min/Max von allen Werten [%]
Geflügel*	81	84	4 insgesamt (1 DLG Bericht)	78/84	54/93
Schweine**	78 DLG Ber.: 87 Studien: 75	80 DLG Ber.: 89 Studien: 78	34 insgesamt (9 DLG Berichte)	90/89	5/100

* Quellen: DLG Bericht 6397, Studien: Melse, Ogink (2005), Melse et al. (2012b), Van der Heyden et al. (2015)

**Quellen: DLG Berichte 6284, 6243, 6220, 6178, 5955, 5954, 5879, 5702, Studien: Dumont (2018), Hahne, Vorlop (2004), Lagadec et al. (2015), Liu et al. (2017a,b), Melse, Ogink (2005), Van der Heyden (2015, 2016, 2019). Ebenfalls eingeschlossen ist der DLG Bericht 6380, wobei es sich hier um einen Biofilter handelt (Hahne, Pfeifer (2017).

[4] Um den Wert 3.2 g N L^{-1} einzuhalten, ist ein Wert für die EL von <16 mS cm^{-1} erforderlich (Van der Heyden et al., 2015). Melse, Ploegaert (2011) fanden ausreichende Abscheideraten bei einer EL von bis zu 25 mS cm^{-1}. Gemäss Pongkua et al. (2020) nimmt die N-Abscheidung ins Waschwasser bei Werten >25 mS cm^{-1} stark ab.

Shi et al. (2022) geben eine mittlere Abscheiderate für Biowäscher von 79.5% an mit einem Bereich zwischen Minimum und Maximum von 35.0–99.0%. Lagadec et al. (2015) haben bei einer Untersuchung von 31 Wäschern eine Abscheiderate von 47% gefunden (Min./Max: 17%/70%), was deutlich unter den Mittelwerten von Tabelle 1 liegt und nahelegt, dass in der Praxis die mögliche Abscheideleistung oft nicht erreicht wird. Hahne (2019, 2022) fand dagegen eine mittlere Abscheideleistung von 93% bzw. 92.4% bei 133 bzw. 154 Mastschweinebetrieben. Nur ein Betrieb erreichte weniger als 70% Mindestascheidung (Hahne (2022). In Hahne (2019) wurde der Schwellenwert von 70% von allen Anlagen eingehalten. In der Studie von Van der Heyden et al. (2019) war die Abscheideleistung im ersten Monat des Betriebs von zwei Anlagen 11% bzw. 24%. Erst nach zwei Monaten wurde 70% Abscheideleistung erreicht, was auf eine langsame Etablierung der mikrobiellen Prozesse hinweist. Hahne und Vorlop (2004) fanden eine Abscheideleistung von 61%. Mit zunehmender Sättigung der Lösung mit Ammonium nahm die Abscheideleistung bis 24% ab. Van der Heyden et al. (2019) fanden negative Abscheideraten. Dies kam vor, wenn der Biowäscher bei Reparaturarbeiten ausgeschaltet war, die Luft jedoch weiterhin durchströmte. Dabei wurde Ammoniak aus der an den Füllkörpern anhaftenden Lösung ausgestrippt.

Gemäss Dumont (2018; basierend auf Van der Heyden et al., 2015, 2016; Melse, Mosquera, 2013) wird die Nitrifizierung bei N-Gehalten des Waschwassers im Bereich von 3-4 g N L^{-1} gehemmt und damit die Abscheideleistung reduziert. Die Entfernung von Nitrit und Nitrat aus dem Waschwasser erfordert eine ausreichende Abschlämmrate (Pongkua et al., 2020). Diese sollte gemäss Hahne (2022) mindestens 0.44 m^3 pro Mastschweineplatz und Jahr betragen. Niedrige Abscheideraten werden weiter durch eine unzureichende Berieselung der Füllkörper verursacht, wodurch Ammoniak unbehandelt in die Abluft entweicht. Der Abbau von NH_3 wird aufgrund von Akkumulation von Ammonium und Nitrit auf den Füllkörpern reduziert (Van der Heyden et al., 2015). Zudem hat die Anreicherung von Staubpartikeln einen grossen Einfluss auf die Funktion der Mikroorganismen und damit auf die Emissionsminderung (Guingand, 2014), welche zunimmt bei abnehmender Strömungsgeschwindigkeit, Ammoniumkonzentration, Temperatur und pH-Wert des Waschwassers sowie bei zunehmender Ammoniakkonzentration in der Zuluft, wobei die Strömungsgeschwindigkeit den grössten Einfluss hat (Lagadec et al., 2015). Weiter hat auch die Ammoniakkonzentration in der Zuluft eine grosse Bedeutung (bessere Abscheideleistung bei hoher Konzentration von NH_3 in der Luft eingangs Wäscher). Gemäss Lagadec et al. (2015) ist die Abscheiderate in Mastställen grösser als in Ställen für Absetzferkel oder Zuchtschweinen. Generell ist es schwierig, eine hohe Effizienz der Biowäscher bei stark variierenden Eingangskonzentrationen von NH_3 sicherzustellen. Dies ist in unterschiedlichen Phasen der Mast bei Rein-Raus Systemen (z.B. bei der Pouletsmast) der Fall. DLG geprüfte Biowäscher für Mastpoulets sind nicht vorhanden. Ein Biowäscher ist DLG zertifiziert für Legehennen und Junghennen. Biowäscher zur Abluftreinigung von Mastpouletställen sind in der Literatur beschrieben (Melse, Ogink, 2005; Melse et al., 2012b).

Lagadec et al. (2021) erarbeiteten ein Tool (TARA; Excel basiert) zur Planung der Dimensionierung von Biowäschern. Dieses Tool ermöglicht weiter die Berechnung des Wasserverbrauchs im Hinblick auf die Optimierung der Abscheiderate von Ammoniak und die Berechnung der Emissionen von Ammoniak und Lachgas, sowie die Stickstoffmengen im Abschlämmwasser. Pongkua et al. (2020) publizierten ein Tool, welches die Anreicherung von Stickstoff im Waschwasser und den Wasserbedarf entsprechend der Abschlämmrate simuliert basierend auf der elektrischen Leitfähigkeit des Waschwassers. Es dient damit auch als Grundlage für den ordnungsgemässen Betrieb des Wäschers.

3.2.3 Abschlämmwasser: Eigenschaften und Anfall

Die Menge von Abschlämmwasser von Biowäschern beträgt für Geflügel rund 0.03 m^3 pro Tierplatz und Jahr und für Mastschweine rund 0.7 m^3 pro Tierplatz und Jahr (Tabelle 2). Hahne (2022) gibt eine mittlere Abschlämmung von 0.57 m^3 pro Mastschweineplatz und Jahr an (132 Betriebe). Diese Mengen sind rund 10 Mal höher als diejenigen für Abschlämmwasser von Chemowäschern (Dumont, 2018; Melse, Ogink, 2005). Der pH-Wert liegt in einem Bereich von rund 6.5-7.5, der N-Gehalt beträgt etwa 1 bis 6 g N L^{-1}. Hahne et al. (2016) geben einen pH-Wert von 6.3-7.4 und einen Stickstoffgehalt von 3 bis 4 g N L^{-1} für Abschlämmwasser von Biowäschern an. Der Stickstoffgehalt gemäss Melse, Ogink (2005) beträgt 2 g N L^{-1}. Lagadec et al. (2015) geben für eine Monitoring Studie von 30 Anlagen deutlich höhere mittlere Werte für das Waschwasser an (N total: 8.9 g N L^{-1}; Ammonium: 4.7 g N L^{-1}; Nitrit: + 4.2 Nitrat: g N L^{-1}). Dumont et al. (2020a) fanden im Abschlämmwasser von Biowäschern von 6 Betrieben (Schweine) Gehalte vom totalen N von rund 2 bis 9 g N L^{-1}; Ammonium: 1-4.5 g N L^{-1}; Nitrit + Nitrat: 1-7 g N L^{-1}). Diese Werte sind teilweise grösser als diejenigen in Tabelle 2. Zum Vergleich beträgt die Obergrenze für Waschwasser 3.2 g N L^{-1} in den Niederlanden und Flandern (Van der Heyden et al., 2015). Die Daten von Guingand (2014) zeigen, dass die N-Gehalte im Abschlämmwasser stark von der Häufigkeit der Abschlämmung abhängen und ob vollständige oder teilweise Abschlämmung praktiziert wird.

Tabelle 2: Zusammenfassung von Werten aus der Literatur für Abschlämmwasser von Biowäschern; angegeben sind Mittelwerte (MW) oder der Bereich häufiger Werte. Werte in Klammern: Anzahl Beobachtungen.

Tier-kategorie	Menge (MW) (m^3 pro Tierplatz und Jahr)	pH Bereich	N-Gehalt Bereich (g N L^{-1})	Gehalt NH_4-N Bereich (g N L^{-1})	Gehalt NO_2-N Bereich (g N L^{-1})
Geflügel*	0.03 (2)	6.5-6.8 (2)	1.1-1.4 (2)	0.5-1.8 (2)	0.1-1 (2)
Schweine**	0.7 (5)	6.6-7.6 (20)/(17)	2.2-5.7 (5)	1.4-3.9 (6)	1.0-1.9 (6)

* Quellen: DLG Bericht 6397: Legehennen, Junghennen; Studien: Melse, Ogink (2005), Melse et al. (2011; 2012b): Mastpoulets)

**Quellen: DLG Berichte 6380, 6284, 6243, 6220, 6178, 5955, 5954, 5879, 5702, Studien: Dumont (2018), Hahne, Vorlop (2004), Melse, Ogink (2005), Lagadec et al. (2015), Liu et al. (2017a,b), Melse et al. (2012a), Van der Heyden et al. (2016, 2019). Die angegebenen Werte stimmen gut mit den Angaben eines Herstellers überein: 0.6 m^3 Abschlämmwasser pro Tierplatz und Jahr, pH-Wert 6.5-7.2, N-Gehalt von 3.5 g N L^{-1} bei einer elektrischen Leitfähigkeit des Waschwassers von 20 mS cm^{-1} (mündl. Mitteilung Maurice Ortmans, Inno+ BV, 03.08.2022).

Das Verhältnis von Ammonium zu Nitrit beträgt etwa 1-1.5:1. Im Abschlämmwasser kann auch Nitrat in niedrigen Konzentrationen vorhanden sein (in der Regel <0.1 g N L^{-1}). In der Regel sind die Nitritgehalte deutlich höher als diejenigen von Nitrat (Dumont et al., 2020a; Ottosen et al., 2011). Van der Heyden et al. (2016) beobachteten dagegen Nitratgehalte von 2.3-2.9 g N L^{-1} bei Gehalten von Gesamtstickstoff zwischen 4.2 und 5.4 g N L^{-1}. Die Nitratgehalte waren ähnlich hoch wie diejenigen von Ammonium bei Nitritwerten von <0.16 g N L^{-1}. Dies ist auf Nitrifizierung des Waschwassers vor dessen Rezirkulation zurückzuführen. Ottosen et al. (2011) haben bei einem Biowäscher ebenfalls Phasen beobachtet, in welchen die Nitratgehalte deutlich über denjenigen von Nitrit lagen. Gemäss Dumont et al. (2020a) sollte das Verhältnis Ammonium : Nitrit+Nitrat 1:1 betragen. Die Konzentration von Ammonium kann aber auch doppelt so hoch sein wie diejenige von Nitrit+Nitrat. Umgekehrt kann auch die Konzentration der Summe von Nitrit und Nitrat deutlich über derjenigen von Ammonium liegen (Dumont et al., 2020a).

Der TS-Gehalt ist mit rund 1-10 g L^{-1} niedrig. Im Mittel beträgt die elektrische Leitfähigkeit von Biowäschern bei Schweinen zwischen 17 und 20 mS cm^{-1} und bei Geflügel zwischen 14 und 19 mS cm^{-1} (Daten zu TS, Nitrat, elektr. Leitfähigkeit nicht aufgeführt in Tabelle 2).

3.2.4 Bildung von Lachgas und Stickoxiden (NO_x)

Bei Biowäschern ist die Bildung von Lachgas (N_2O) aufgrund der Prozesse während Nitrifizierung und Denitrifizierung möglich (Dumont, 2018; Melse, Mosquera, 2014). Zwecks Reduktion des Wasserverbrauchs von Biowäschern haben Hersteller eine Denitrifikationsstufe integriert. Melse und Mosquera (2014) haben drei solcher Anlagen auf Abscheidung von Ammoniak und Produktion von N_2O untersucht. Die NH_3-Abscheideleistung betrug 71 bis 86% bei gleichzeitiger Lachgasproduktion zwischen 17 und 66% der N-Fracht in der Zuluft des Wäschers. Wunderlin et al. (2012) geben die folgenden Bedingungen an, unter welchen eine erhöhte Produktion von N_2O zu erwarten ist: niedrige Konzentration von gelöstem Sauerstoff, Akkumulation von Nitrit, rasch wechselnde Bedingungen und ein niedriges Verhältnis von leicht abbaubarem Kohlenstoff zu Stickstoff. Bei niedrigen pH-Werten und steigenden Nitrit-Konzentrationen in einem Biofilter ist gemäss Hahne und Pfeifer (2017) mit zunehmenden Emissionen Stickoxiden und N_2O rechnen. Dumont (2018) empfiehlt einen Schwellenwert von <3% Umwandlung des NH_3 eingangs Biowäscher zu N_2O, was zu einer Produktion von max. 1.9% zusätzlicher THG Äquivalente führen würde. Aufgrund der hohen Produktion von N_2O empfiehlt Dumont (2018) auf eine Denitrifikationsstufe bei Biowäschern zu verzichten.

Hahne (2022) gibt eine mittlere Konzentration von Stickoxiden (NO_x) von 0.35 ppm im Reingas an (Bereich: 0 bis 6 ppm; 133 Anlagen von Mastschweinebetrieben; davon 3 Anlagen mit mehr als 2 ppm NO_x im Reingas). Erhöhte Konzentrationen von NO_x treten bei hoher Nitritbelastung des Waschwassers auf. Bei pH-Werten <6 ist das Risiko einer Freisetzung von NO_x erhöht (Hahne, 2022). Die Freisetzung von NO_x nimmt deutlich zu, wenn der Gehalt 3-4 g N L^{-1} übersteigt. In der Regel lässt sich diese ausreichend begrenzen, wenn die elektrische Leitfähigkeit im Waschwasser nicht höher liegt als 20 mS cm^{-1} (pers. Mitteilung J. Hahne, Thünen-Institut für Agrartechnologie).

3.3 Chemowäscher

3.3.1 Einleitung

Das Grundprinzip von Chemowäschern basiert auf einer Filterwand bestehend aus vertikal oder horizontal angeordneten Füllkörpern, die permanent mit saurem Waschwasser berieselt werden, durch welche die Stallabluft geleitet wird. Gasförmiges Ammoniak in der Abluft kommt so in Kontakt mit der sauren Lösung und wird im Waschwasser als Ammonium gebunden. Die Ansäuerung der Lösung erfolgt meist mit 96% Schwefelsäure. Die Ammoniumsulfatkonzentration wird meist auf 150 g L^{-1} begrenzt, was 30 g N L^{-1} und 40% der maximalen Löslichkeit von Ammoniumsulfat entspricht. Die Konzentration in der Lösung wird üblicherweise mittels Messung der elektrischen Leitfähigkeit gesteuert. Ein N-Gehalt von 3 g N L^{-1} entspricht etwa einer elektrischen Leitfähigkeit von 15 mS cm^{-1}. Die Filter werden meist mit einem Tropfenabscheider kombiniert, um den Austrag von Ammonium-haltigen Aerosolen zu vermeiden (Mosquera et al., 2014).

Aufgrund des niedrigen pH-Werts der Waschlösung finden keine mikrobiellen Prozesse statt. Daher bleibt der Geruch in der Abluft unbeeinflusst. Verschiedene Wäscher weisen daher mehrere Stufen auf, um zusätzlich Geruchsstoffe abscheiden zu können. Das anfallende Abschlämmwasser weist wesentliche Gehalte an Ammoniumsulfat und soll in einem separaten Behälter gelagert werden. Dieser kann auch zur Aufnahme des bei der Stallreinigung anfallenden Waschwassers verwendet werden. Die Anlagen unterscheiden sich bezüglich pH-Wert (pH <3.0 bis 4.0) und elektrischer Leitfähigkeit (rund 80 bis 200 mS cm^{-1}) des Waschwassers (Mosquera et al., 2014).

3.3.2 Abscheideleistung von Chemowäschern für Ammoniak

Die Literaturrecherche zeigte eine mittlere Abscheideleistung von 85% für die Geflügel und 83% für die Schweine (Tabelle 3). Die DLG listet insgesamt 7 Chemowäscher für die Geflügelhaltung[5]. Vier davon haben eine mittlere Abscheideleistung von mind. 90%; und drei davon erreichen weniger als 90% Abscheidung von Ammoniak (Anhang 4, Tabelle 16). Messresultate aus der Literatur zeigen teilweise ebenfalls Abscheideraten von mindestens 90%. Diese Daten sind grösstenteils älteren Datums, d.h. aus den 1990er Jahren (Daten zusammengestellt von Melse, Ogink, 2005; Wood, van Heyst, 2016). Eine neuere Studie aus Holland hat mittlere Abscheideraten von drei Anlagen von rund 75% gemessen. Keine der drei Anlagen hat mindestens 90% Abscheiderate erreicht (Mosquera et al., 2011). Dasselbe gilt für einen chemischen Wäscher untersucht von Melse et al. (2012b). Strohmaier et al. (2020) untersuchten die Emissionsreduktion eines Chemowäschers mit zwei Typen von nachgeschalteten Biofiltern während drei Messtagen in einem Mastpouletsstall. Die erreichte Reduktion der Ammoniakkonzentration im Reingas gegenüber der Zuluft für die Kombination Chemowäscher-Wurzelholz betrug 71% und für die Kombination Chemowäscher-wabenförmige Papierpads 68%. In einem analogen Versuch fand Strohmaier (2020) für die Kombination Staubfilter-Chemowäscher-wabenförmige Papierpads 85.7% Emissionsreduktion. Die Studie von Hahne (2010) zeigt einen Abscheidegrad von 72% für einen mehrstufigen Chemowäscher.

Ursachen von tiefen Abscheideraten sind unregelmässige Berieselung der Füllkörper (Guignand, Eglin, 2016) oder nicht ausreichende oder zu starke Absenkung des pH-Werts des Waschwassers (Ashtari et al., 2016; Van der Heyden et al., 2016). Das dänische Umweltministerium[6] gibt Abscheideraten zwischen 87% und 91% für chemische Wäscher für die Schweinehaltung an. Shi et al. (2022) rapportieren eine mittlere Abscheiderate für Chemowäscher von 85.8% (Bereich zwischen Minimum und Maximum: 65.0 – 99.0%).

Tabelle 3: Zusammenfassung von Werten aus der Literatur für die Abscheideleistung von Chemowäschern für Ammoniak in Prozent.

Tierart	Durchschnitt von Mittelwerten [%]	Median Mittelwerte [%]	Anzahl Beobachtungen (Mittelwerte)	Durchschnitt Sommer/Winter [%]	Min/Max von allen Werten [%]	Durchschnitt von Min/Max [%]
Geflügel*	85 DLG: 86 Studien: 84	90	14 (davon 7 DLG Bericht)	87/89	30/100	67/97
Schweine**	83 DLG: 86 Studien: 80	88	18 (davon 7 DLG Berichte)	83/82	-23/100	74/93

*Quellen: DLG Berichte 6942, 6406, 6344, 6271, 6260, 6212, 5952; Studien: Aarnink et al. (2007), Melse, Ogink (2005), Melse et al. (2012b), Van der Heyden (2015)

**Quellen: DLG Berichte 7226, 6224, 6051, 6050, 5957, 5880; Studien: Cao et al. (2022), Dumont (2018), Guingand, Eglin (2016), Melse, Ogink (2005), Van der Heyden (2015, 2016), Verdoes, Zonderland (1999)

Der Chemowäscher Typ LAVAMATIC basiert auf einem anderen Prinzip, als beschrieben in Kap. 3.3.1 bzw. als die DLG geprüften Wäscher. Anstelle der Berieselung einer Filterwand oder Füllkörpern mit einer sauren Lösung, wird der Abluftstrom durch eine rotierende Waschtrommel geleitet. Diese nimmt die saure Lösung aus dem unten-liegenden Wasserbecken auf und benetzt die in der Waschtrommel angebrachten Füllkörper. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt gemäss Hersteller beim im Vergleich zum Betrieb von Umwälzpumpen

[5] https://www.dlg.org/de/landwirtschaft/tests/suche-nach-pruefberichten/?unterkategorie=95&page=1&pruefgebiet=3&locale=de

[6] https://eng.mst.dk/trade/agriculture/environmental-technologies-for-livestock-holdings/air-cleaning/

niedrigeren Energieverbrauch. Die Abscheideleistung beträgt 75% gemäss Gutachten[7]. die Herstellerfirma gibt einen Abscheidegrad von >80% an[8].

Mostafa et al (2017) untersuchten einen chemischen Wäscher zur Reduktion der Ammoniakkonzentration im Stall. Dabei wurde die Abluft aus dem Wäscher im Stall zirkuliert. Die Reduktion der Konzentration betrug 38 bis 63%. Mostafa et al (2020) saugten die Abluft des Kanals eines Versuchsstalls (Mastschweine) durch einen chemischen Wäscher (Pilotanlage, Verwendung von Schwefelsäure, Lösung mit pH 3.0). Dabei wurde eine Reduktion von 80 bis 87% erreicht. Moore et al. (2018) testeten einen einfachen, selbst konstruierten zweistufigen Wäscher basierend auf einer Kammer ausgerüstet mit einfachen Lamellen aus Holz, angeordnet in einem Winkel von 45° zum horizontalen Luftstrom, die mit Wasser (1. Stufe) und der sauren Lösung befeuchtet wurden. Zusätzlich zu den aktuell verwendeten starken (flüssigen) Säuren wie Schwefelsäure verwendeten sie Lösungen von Salzen wie Aluminium- und Eisensulfat, Kalium- und Natriumhydrogensulfat. Die Lösungen basierend auf Salzen erreichten eine ähnliche Reduktion des Ammoniaks wie die Säuren im Bereich zwischen 70 und 90%. Die Verwendung der Salze soll den Betrieb des Wäschers durch manuelle Nachdosierung der Salze anstelle einer Steuerung basierend auf dem pH-Wert der Lösung stark vereinfachen und dessen Kosten senken.

Bildung von Lachgas tritt in Chemowäschern nicht auf (Dumont, 2018; Van der Heyden et al., 2016), wobei dies im Widerspruch zu sein scheint basierend auf Van der Heyden et al. (2015), welche für einzelne Studien für Chemowäscher Lachgasproduktion angeben. Eine mögliche Erklärung könnte die limitierte Genauigkeit der Messung von Lachgas sein. Zwecks Vermeidung der Produktion von Lachgas empfiehlt Dumont (2018) die Installation von Chemowäschern (Begründung: keine Bildung von Lachgas). De Vries und Melse (2017) fanden im Rahmen einer Ökobilanz, welche Klimaerwärmung, Versauerung terrestrischer Ökosysteme, Eutrophierung mariner Ökosysteme, Feinstaubemissionen und Verbrauch fossiler Brennstoffe beinhaltete, eine Reduktion der negativen Auswirkungen in allen einbezogenen Bereichen, und war damit den anderen untersuchten Wäschertypen Biowäscher mit Nitrifizierung sowie mit Nitrifizierung/Denitrifizierung überlegen.

3.3.3 Abschlämmwasser: Eigenschaften und Anfall

Die Menge von Abschlämmwasser von Chemowäschern liegt bei rund 3 Litern pro Tierplatz und Jahr für Geflügel (Mastpoulets und Legehennen), wobei Mastpoulets tiefere Werte aufweisen als Legehennen. Bei Schweinen (Mastschweine) beträgt die Menge 80 Liter pro Tierplatz und Jahr (Tabelle 4). Der pH-Wert von Abschlämmwasser liegt meist unter pH 4 bzw. zwischen 3 und 4 (Hahne et al. 2016), wobei es je nach Ländern Unterschiede gibt (<5 NL, <4 FR, 2 bis 2.5 DK; Mosquera et al., 2014). Die NH_4-N Werte schwanken über einen weiten Bereich von <1 g N L^{-1} bis rund 50 g N L^{-1}, liegen jedoch mehrheitlich in einem Bereich von 3 – 19 N g L^{-1}. Hahne et al. (2016) gehen von Ammonium-N Gehalten von 25-50 g N L^{-1} aus. Die Untersuchungen von Mosquera et al. (2011) zeigen, dass N praktisch nur als Ammonium vorliegt, d.h. $N_{tot} \approx$ TAN (engl.: Total Ammoniacal Nitrogen= $NH_{3(gelöst)} + NH_4^+$).

Bei Verwendung von Schwefelsäure ist eine minimale Abschlämmrate erforderlich, um die Ausfällung von Ammoniumsulfat zu vermeiden. Die Ammoniumsulfat Konzentration wird auf ca. 150 g L^{-1} gehalten, was einer elektrischen Leitfähigkeit von 250 mS cm^{-1} entspricht. Hadlocon et al. (2015) geben für eine Pilotanlage einen höheren Gehalt von 22 – 36% Ammoniumsulfat an. Bei Verwendung von Schwefelsäure beträgt der Gehalt des Waschwassers

[7] Sachverständigengutachten im Auftrag von Reventa GmbH & Co. KG F. Müller vom 21.01.2016; erhalten von D. Stauffer, Globogal AG

[8] https://www.reventa.de/de/produkte/alle-produkte/abluftsysteme/abluftreinigung/lavamatic-abluftwaescher/

an Schwefel 29 - 57 g S L^{-1} (Hahne et al., 2016). Die TS-Gehalte variieren über einen weiten Bereich von rund 2 g L^{-1} bis 250 g L^{-1}, wobei die Werte meist bei 100 - 200 g L^{-1} liegen (vgl. auch Melse et al., 2011). Trotz des hohen TS-Gehalts ist dieses Abschlämmwasser pumpfähig (mündl. Mitteilung, D. Stauffer, Globogal AG).

Tabelle 4: Zusammenfassung von Werten aus der Literatur für Abschlämmwasser von Chemowäschern; angegeben sind Mittelwerte (MW) oder der Bereich häufiger Werte. Werte in Klammern: Anzahl Beobachtungen.

Tier-kategorie	Menge (MW) (m^3 pro Tierplatz und Jahr)	pH, Bereich	Gehalt NH_4-N, Bereich (g N L^{-1})
Geflügel*	0.003 (9)	3.3-4.5 (10)	3-19 (5)
Schweine**	0.08 (6)	2.3-4 (10)	18-32 (4)

* Quellen: DLG Berichte 6942, 6406, 6344, 6271, 6260, 6212, 5952; Studien: Melse, Ogink (2005), Melse et al. (2012b), Van der Heyden (2015, 2016)
**Quellen: DLG Berichte 7226, 6224, 6051, 6050, 5957, 5880; Studien: Dumont (2018), Melse, Ogink (2005), Van der Heyden (2016), Verdoes, Zonderland (1999). Angaben eines Herstellers: 30-49 Liter Abschlämmwasser pro Tierplatz und Jahr, N-Gehalt von 38-58 g N L^{-1} bei einer elektrischen Leitfähigkeit des Waschwassers von 170 bis 250 mS cm^{-1} (mündl. Mitteilung Maurice Ortmans, Inno+ BV, 03.08.2022)

3.4 Kombiwäscher

Tabelle 5 fasst die Daten zur Abscheideleistung von Kombiwäschern für Ammoniak zusammen. Für Schweine entspricht die Abscheiderate ungefähr derjenigen von Chemowäschern, für Geflügel liegt sie tiefer. Bezüglich Eigenschaften des Abschlämmwassers kann man vermutlich die Angaben aus Kap. 3.3.3 übernehmen.

Tabelle 5: Zusammenfassung von Werten aus der Literatur für die Abscheideleistung von Kombiwäschern (=Wäschertypen mit je einer Stufe vom Typ Biowäscher und Chemowäscher) in Prozent.

Tierkategorie	Durchschnitt von Mittelwerten [%]	Median von Mittelwerten [%]	Anzahl Beobachtungen
Geflügel*	53	53	1
Schweine**	83	84	6

* Quelle: Melse et al. (2011); **Quellen: Melse et al. (2011), Van der Heyden (2015, 2016), Zhao et al. (2011)

3.5 Behandlung, Lagerung und Verwendung des Abschlämmwassers

3.5.1 Regelungen und Angaben aus der Literatur

Die Aspekte Rezyklierung von Stickstoff und Düngerwert des Abschlämmwassers standen im Zusammenhang mit Abluftreinigung bisher eher im Hintergrund. In einzelnen Studien (Hadlocon et al., 2014, 2015) sind der Düngerwert und die Wirtschaftlichkeit des Systems Schwerpunkte der Untersuchungen. Martin et al. (2018) untersuchten den Ertrag und die N-Aufnahme bei Ausbringung von verschiedenen Typen von Abschlämmwasser auf Grasland. Dasjenige basierend auf Schwefelsäure zeigte vergleichbare Erträge und N-Aufnahme wie Ammoniumnitrat.

Gemäss BAFU, BLW (2021, 2011), KOLAS (2013) kann Waschwasser aus Biowäschern ins Güllelager überführt werden, wenn die Menge an pflanzenverfügbarem Stickstoff im Waschwasser bekannt ist und bei der Verwendung der Gülle entsprechend berücksichtigt wird (Berücksichtigung in der Suisse-Bilanz als zugeführter Dünger; Einhaltung der geltenden Düngungsempfehlungen). Andernfalls sei das Abwasser separat zu lagern und als Dünger zu verwerten oder ordnungsgemäss als Industrieabwasser zu entsorgen. Gemäss Landesumweltamt Brandenburg ist ammoniakhaltiges Wasser aus Abluftreinigungsanlagen separat von der Gülle zu lagern, um Stickstoffverluste zu vermindern (Landesumweltamt Brandenburg, 2005).

Es entspricht dem Stand der Technik, Abschlämmwasser für die Stickstoffdüngung zu verwenden. Dabei ist der zusätzlich anfallende pflanzenverfügbare Stickstoff anhand der Herstellerangaben oder durch N-Analysen und Volumenmessungen zu ermitteln. Dieser Stickstoff ist in der Nährstoffbilanz zu berücksichtigen. Eine entsprechende Anpassung der Wegleitung Suisse-Bilanz ist vorgesehen. Abschlämmwasser aus Biowäschern und Chemowäschern benötigen für die Abgabe als Dünger eine Bewilligung des BLW. Die Verwendung von Abschlämmwasser setzt eine Ausbringtechnik voraus, welche eine Düngung gemäss Pflanzenbedarf gewährleistet (BAFU, BLW, 2021; KOLAS, 2013).

Nitrit und Nitrat unterliegen bei der gemeinsamen Lagerung mit Gülle Denitrifikation und werden innerhalb weniger Tage abgebaut, wie Laborversuche von Hahne et al. (2016) zeigten. Bei Denitrifikation des oxidierten Stickstoffs in Gülle kann es zur Bildung von Lachgas kommen. Versuchsergebnisse zur Mischung von Waschwasser mit Gülle mit dementsprechenden Untersuchungen zur Freisetzung von Lachgas liegen jedoch nicht vor. Um Lachgasbildung vorsorglich zu vermeiden, wäre eine getrennte Lagerung und Ausbringung des Waschwassers notwendig. Aufgrund des geringen Gehalts organischer Stoffe im Waschwasser gehen Hahne et al. (2016) von geringer Denitrifikation bei getrennter Lagerung aus.

Bei Chemowäschern wird Ammonium nicht nitrifiziert. Das anfallende Waschwasser enthält Ammoniumsulfat mit einem N-Gehalt von 4 - 5%. Es darf nicht zusammen mit der Gülle gelagert werden, weil dabei Schwefelwasserstoff gebildet wird, sondern erfordert eine separate Lagerung (DLG Prüfbericht 6212; KOLAS, 2013; Hahne et al., 2016). Gemäss DLG Prüfbericht 6212 gilt Abschlämmwasser als Ammoniumsulfat und damit als wassergefährdende Flüssigkeit. Nach Cercl'Air (2011) kann eine Ammoniumsulfatlösung aus Chemowäschern allenfalls unmittelbar vor dem Ausbringen in einem Aussenbehälter mit der auszubringenden Gülle vermischt werden (vgl. auch DLG Prüfbericht 6212). Allerdings sind in diesem Fall die sicherheitstechnischen Anforderungen zu befolgen.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob Abschlämmwasser von Chemowäschern im Hinblick auf Emissionsminderung nicht eher separat ausgebracht werden sollte. Trotz des tiefen pH-Werts, beeinflusst Abschlämmwasser den pH-Wert der Gülle kaum, da im Abschlämmwasser kaum mehr freie Protonen vorliegen dürften (mündl. Mitteilung: C. Trindler, HAFL): Gemischt mit Gülle geht daher Ammoniak vermutlich ähnlich wie bei Gülle verloren. Die separate Ausbringung 1:1 verdünnt mit Wasser wird praktiziert und ist möglich (mündl. Mitteilung, D. Stauffer, Globogal AG). Damit dürfte eine Emissionsminderung von rund 70% im Vergleich zu Gülle möglich sein aufgrund des tiefen pH-Werts (Schätzung basierend auf Modell ALFAM2, Hafner et al., 2019). Allerdings kann der Gehalt an NH_4^+ hoch sein, was eine Begrenzung der Ausbringmenge erfordert (vgl. Berechnungen mit AFLAM2 in Anhang 1). Je nach Behandlung des Abschlämmwassers (z.B. Zumischen von Waschwasser der Stallreinigung) könnte der pH-Wert auch in den neutralen bis alkalischen Bereich ansteigen (vgl. Kap. 3.8.4). Weiter ist zu beachten, dass Stickstoff und Schwefel in einem Verhältnis von ca. 1:1 vorliegen. Die Ausbringmenge wird damit durch den Schwefelbedarf der Kulturen limitiert. Dies bedeutet, dass bei einer Gabe von ca. 30 kg Stickstoff der Schwefelbedarf der meisten Kulturen bereits gedeckt ist. Höhere Ausbringmengen oder mehrere Gaben von Abschlämmwasser von Chemowäschern würden dadurch zu einer Überversorgung und aufgrund der guten Wasserlöslichkeit des Schwefels zu dessen Auswaschung führen (weitere Informationen zum Eintrag von Schwefel in den Boden: Anhang 6).

Bei Biofiltern muss die Hackschnitzelschicht alle 12 Monate ausgewechselt werden, weil das Material verrottet und dadurch seine Struktur und Wirkung verliert, und weil bei feucht gehaltenen Biofiltern Stickstoff akkumuliert. Dies kann zur Produktion von Lachgas führen. Das Material weist einen Gehalt an Gesamtstickstoff von rund 10 – 20 g N pro kg auf (Hahne et al., 2016), wovon mehr als die Hälfte in mineralischer Form (Ammonium und Nitrat) vorliegt.

3.5.2 Anrechnung der Nährstoffe im Abschlämmwasser für die Düngung

Gemäss Kap. 3.2.3 und Tabelle 2 sowie 3.3.3 und Tabelle 4 kann man von den folgenden mittleren N-Gehalten von Abschlämmwasser ausgehen:

- Biowäscher: 1 kg N pro m^3 (Geflügel), 3 kg N pro m^3 (Schweine)
- Chemowäscher: 10 kg N pro m^3 (Geflügel), 30 kg N pro m^3 (Schweine)

Bei Biowäschern liegt der Stickstoff etwa je zur Hälfte als Ammonium und Nitrit+Nitrat vor. Spuren von organischem N können ebenfalls vorhanden sein (Dumont et al., 2020c). Bei Chemowäschern liegt der gesamte Stickstoff als Ammonium vor bzw. die Gehalte von Nitrit und Nitrat sind vernachlässigbar klein (Mosquera et al. (2011). Man kann damit den N im Abschlämmwasser von beiden Wäschertypen inkl. demjenigen von Kombiwäschern dem löslichen Stickstoff ($N_{lös}$) im Sinne der GRUD (Richner et al., 2017) gleichsetzen.

Für eine Anrechnung der Nährstoffmengen im Abschlämmwasser für die Düngung stehen die folgenden drei Optionen im Vordergrund:

1. Berechnung der N-Menge im Abschlämmwasser basierend auf der Abschlämmrate[9] und den oben aufgeführten Gehalten.
2. N-Gehalt entsprechend der elektrischen Leitfähigkeit des Abschlämmwassers:
   Biowäscher: N = 0.22*EL (N in g N L^{-1}, EL in mS cm^{-1}; Dumont et al., 2020a)
   Chemowäscher: N = 0.183*EL (N in g N L^{-1}, EL in mS cm^{-1}; basierend auf Daten von Mosquera et al., 2011[10]) und Wasserverbrauch des Wäschers.
3. N-Gehalt gemäss einzelbetrieblichen Analysewerten des Abschlämmwassers und Wasserverbrauch des Wäschers oder aufgrund der Deklaration des Lieferanten.

Bei allen Wäschertypen ist zusätzlich Schwefel aufgrund der Verwendung von 96% Schwefelsäure zu berücksichtigen (vgl. auch Anhang 6): Chemowäscher: ca. 1 kg S pro kg N oder rund 30 kg S pro m^3 Abschlämmwasser. Bei Biowäschern ist der Gehalt aufgrund der kleinen Verwendungsmenge von Schwefelsäure niedrig (geschätzt: rund 1 kg S pro m^3). Aufgrund des ebenfalls tiefen N-Gehalts von ca. 1 bis 3 kg N pro m^3 liegen rund 0.3 bis 1 kg S pro kg N vor. Damit sollte Schwefel auch bei Abschlämmwasser von Biowäschern bei der Düngung eingerechnet werden. Die Genauigkeit der N-Menge im Abschlämmwasser nimmt von Option 1 zu Option 3 zu. Da für eine gute Betriebsführung eines Wäschers das Vorliegen von Werten zur elektrischen Leitfähigkeit zwingende Voraussetzung ist, sollten nur die Optionen 2 und 3 für einzelbetriebliche Rechnungen (z.B. Einrechnung der Nährstofffrachten in der Suisse-Bilanz) verwendet werden.

3.5.3 Schätzung des Potentials zur Rückgewinnung von Stickstoff durch die Verwertung von Abschlämmwasser

Die wichtigsten Tierkategorien, bei welchen Abluftreinigung möglich ist, sind Legehennen, Mastpoulets und Mastschweine. Pro Tierplatz und Jahr entstehen bei den für Legehennen, Mastpoulets und Mastschweinen häufigsten Stallsystemen, welche für die Abluftreinigung geeignet sind (zwangsgelüftete Ställe), rund 0.07, 0.04 und 1.8 kg NH_3-N Emissionen. Bei einer angenommenen Abscheideleistung von 80% lassen sich pro Tierplatz und Jahr rund 0.06, 0.03 und 1.5 kg N (Legehennen, Mastpoulets bzw. Mastschweine) rückgewinnen. Die Wirksamkeit des N dürfte derjenigen von Mineraldünger vergleichbar sein (Kap. 3.5.2). Unter der Annahme, dass ab Beständen von 10'000 Tieren für Legehennen und Mastpoulets

[9] Die Erfassung des Frischwasserverbrauchs des Wäschers (Wasseruhr) ist ungeeignet, da der Wasserverbrauch in der Regel bei Biowäschern um einen Faktor von 2 bis 3 über der Abschlämmrate liegt aufgrund von Verdunstung und Austrag von Aerosolen (pers. Mitteilung J. Hahne, Thünen-Institut für Agrartechnologie).
[10] Stimmt rel. gut überein mit Fussnote** in Tabelle 4; mündl. Mitt. Maurice Ortmans, Inno+ BV, 03.08.2022

sowie 500 Mastschweinen Abluftreinigung umsetzbar ist[11], liesse sich dieses System auf 90, 227 und 333 Betrieben (Stand 2019) mit Legehennen, Mastpoulets bzw. Mastschweinen installieren (Tabelle 6). Die gesamten Ammoniakemissionen aus den Ställen dieser Betriebe beträgt rund 750 t NH_3-N, was 1.8% der gesamtschweizerischen Ammoniakemissionen entspricht. Bei einer Abscheideleistung von 80% liessen sich rund 600 t N rückgewinnen. Dies entspricht 1.4% der gesamtschweizerisch von der Landwirtschaft in Form von mineralischen Düngern eingesetzten N-Menge (für 2020). Diese ist in ca. 2'200 t Ammonsalpeter enthalten und hat einen monetären Wert von 0.97 Mio. CHF bzw. 1.8 Mio. CHF basierend auf Düngerpreisen von 2019 bzw. 2022.

Tabelle 6: Anzahl Betriebe mit mindestens 10'000 Legehennen oder Mastpoulets oder 500 Mastschweinen (Grundlage: BFS, 2020), auf welchen Abluftreinigung gemäss Annahme umsetzbar ist, sowie der Tierbestand insgesamt auf diesen Betrieben. Emissionen aus dem Stall in kg NH_3-N, kg N im Abschlämmwasser, entsprechende Menge N als Ammonsalpeter und dessen Düngerwert in CHF. Die Zahlen beziehen sich auf das Total der Betriebe / Tiere aufgeführt in der 2. Spalte.

Tierkategorie	Anzahl Betr./Tiere*	Emissionen Stall	N in Abschlämmwasser	Ammonsalpeter	Düngerwert
		t N	t N	t Dünger	Mio. CHF
Legehennen	90 / 1'412'255	101	81	3012	0.13 / 0.25
Mastpoulets	227 / 3'519'746	152	122	451	0.20 / 0.37
Mastschweine	333 /267'046	493	394	1'461	0.64 / 1.19
Total Betriebe	650	747**	597***	2'213	0.97 / 1.80#

* Betr.= Betriebe; Anteil Tiere am Gesamtbestand: Legehennen: 42%; Mastpoulets: 50%; Mastschweine: 36%
** entspricht 1.8% der landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von 41'300 t NH_3-N der Schweiz für 2020
*** entspricht 1.4% des Gesamtverbrauchs von mineralischen N-Düngern (43'028 t N) der Schweiz für 2020
# angenommener Preis: links: 43.70 CHF pro 100 kg Ammonsalpeter (Stand: 2019) / rechts: 81.50 CHF pro 100 kg (Stand: 2022) (Landor, 2019, 2022).

3.6 Informationen aus Umfragen in der Schweiz

Insgesamt wurden fünf Betriebe mit einer Anlage zur Abluftreinigung (3 Biowäscher, 2 Kombiwäscher mit einer chemischen und einer nachgeschalteten biologischen Stufe) befragt (im Folgenden verwendete Abkürzungen: B1, B2, B3, B4, B5). Weiter wurden 2 Personen von kantonalen Vollzugsbehörden (Abkürzungen: PkVB1, PkVB2) zu ihren Erfahrungen im Zusammenhang mit Anlagen zur Abluftreinigung und ein Lohnunternehmer, der Abschlämmwasser als Dünger verkauft, befragt.

Die Resultate der Befragungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Kenntnis der Anzahl Anlagen zur Abluftreinigung ist aktuell unvollständig. In einer Umfrage des Cercl'Air aus dem Jahr 2018 in 18 Kantonen resultierten 141 Anlagen für Schweine und 9 für Geflügel, wovon nur 26 (Schweine) und 8 (Geflügel) auf die Abscheidung von Ammoniak ausgelegt waren (Anteil am Total insgesamt: 24%). Der weitaus grösste Anteil der Anlagen waren Biowäscher (rund drei Viertel aller Anlagen). Dies weist darauf hin, dass die Anlagen mehrheitlich wegen Geruchsproblemen installiert wurden, und dass, soweit eine Reduktion von Ammoniakemissionen erforderlich ist, ebenfalls der Geruch reduziert werden muss, was die Befragung von PkVB1,2 bestätigt. Gemäss PkVB2 gibt es seit 2019 auch Anlagen, die ausschliesslich wegen Vermeidung einer Überschreitung von Critical Loads installiert werden. Aktuell in Betrieb stehende Biowäscher sind oft nicht pH gesteuert (PkVB1,2). Die Abschlämmung erfolgt manuell (was im Gegensatz zu der Beschreibung von Biowäschern in Kap. 3.2.1 steht). Bei solchen Anlagen lässt sich die Wirkung nicht zuverlässig gewährleisten. Sie sind als Neuanlage im Kanton

[11] Diese Annahmen sind eher konservativ gewählt. Abluftreinigungsanlagen kommen auch bei kleineren Beständen vor (vgl. Kap. 3.6.5.1). Weiter gibt es Anlagen bei Zuchtschweinen, die hier nicht berücksichtigt werden.

Luzern nicht mehr zugelassen[12]. Der Kanton Luzern verlangt ein elektronisches Betriebstagebuch (EBTB; Energie und Umwelt (uwe) 2021).

- Die Abscheideraten von Abluftreinigungsanlagen bezüglich Ammoniak werden in der Schweiz aktuell teilweise überprüft. Vorliegende Daten sind in der Regel nicht öffentlich zugänglich, weshalb nur wenige zusätzliche Informationen zu Abscheideraten der Anlagen im Praxisbetrieb vorliegen. In einem Kanton liegen 38 Messwerte (29 Biowäscher, 1 Chemowäscher, 8 Biofilter) von 23 Anlagen (18 Biowäscher, 1 Chemowäscher, 4 Biofilter) vor (PkVB2). Sie weisen im Mittel eine Abscheiderate von 51% auf (Bereich: 2% bis 90%). 24% der Messwerte erreichten eine Abscheiderate von mindestens 70%. 2 Anlagen, wovon 1 Biowäscher (2 Messungen) und 1 Chemowäscher (1 Messung) mindestens 70% Abscheidung von NH_3 bei sämtlichen Messungen erreichten. Ältere Daten zu Abscheideleistungen von Biofiltern und Biowäschern sind in Brunner (2010) verfügbar[13]. Die gefundenen Abscheideraten von 14 Betrieben liegen im Mittel zwischen rund 55% und 95%. Biofilter, die nicht zur Abscheidung von NH_3 ausgelegt sind, wiesen teilweise hohe Abscheideraten von bis zu über 70% auf.
- PkVB1 gibt an, dass dieses Jahr sowohl Abnahmemessungen nach Inbetriebnahme (Art. 13 Abs. 2 LRV) als auch die Betriebskontrolle alle 3 Jahre (Art. 13 Abs. 3c LRV) gestartet wurden. Nach bestandener Abnahmemessung können anstelle einer Messung zwecks periodischer Betriebskontrolle auch die Aufzeichnungen des elektronischen Betriebstagebuches (EBTB) und des manuellen Betriebstagebuches in Form eines Berichts eingereicht werden, sofern kein Anlass zu einer erneuten Messung gegeben ist. PkVB2 gibt an, dass bei sämtlichen Luftwäschern eine Abnahmemessung nach Inbetriebnahme (Art. 13 Abs. 2 LRV) durchgeführt wird. Bei Anlagen, die zwecks Abscheidung von Ammoniak erstellt wurden, steht eine Betriebskontrolle gemäss LRV alle 3 Jahre zur Diskussion bzw. wird angestrebt. Überlegungen hinsichtlich EBTB anstelle von Messungen wurden gemäss PkVB2 noch nicht gemacht.
- Aufgrund der noch nicht flächendeckenden Betriebskontrolle der Anlagen, ist nicht klar, ob die Anlagen so betrieben werden, dass die möglichen Abscheideleistungen in der Praxis erreicht werden. Brunner (2010) erwähnt knappe Dimensionierung der Anlagen, zu geringe Ventilatorenleistung und zu geringe Abschlämmraten bei Biowäschern als häufigste Ursachen, welche die Ammoniakabscheidung begrenzen. Dies stimmt mit Energie und Umwelt (uwe, 2021) überein. PkVB2 geht von einem mehrheitlich guten Unterhalt und Betrieb der Anlagen aus. Gemäss PkVB1 sollen die Betreiber der Anlagen mittels EBTB zu einer bestmöglichen Betriebsführung der Anlagen motiviert werden. Das EBTB ermöglichen zudem die sachgerechte Ausübung der kantonalen Kontrollfunktion auch hinsichtlich den angestrebten Reduktionszielen.
- Bei Chemowäschern bzw. Kombiwäschern mit einer chemischen Stufe wird das Abschlämmwasser teilweise separat (vgl. Fischler et al., 2018), teilweise zusammen mit der Gülle gelagert. Die Ausbringung erfolgt dementsprechend gemischt mit Gülle oder separat. Gemäss PkVB1 wird Abschlämmwasser von Biowäschern zusammen mit der Gülle gelagert. Dabei wird in der Baubewilligung eine ausreichende Lagerkapazität und eine Deklaration der Verwendung des Abschlämmwassers verlangt. PkVB2 geht von überwiegender Lagerung zusammen mit Gülle aus (dabei handelt es sich fast ausschliesslich um Biowäscher). Inwieweit die Nährstoffe im Abschlämmwasser angerechnet werden, konnten PkVB1,2 nicht mit Sicherheit beantworten.

[12] Merkblatt Übersicht und Detailinfo «Abluftreinigung in der Tierhaltung» von Energie und Umwelt (uwe), Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement, Kanton Luzern. URL: https://uwe.lu.ch/-/media/UWE/Dokumente/Themen/Luft/Uebersicht_Detailinfo_Waescher.pdf?la=de-CH (16.08.2022)

[13] Diese Daten sind in der vorliegenden Zusammenstellung von Daten in den Kap. 3.2.2 und 3.3.2 nicht eingeschlossen.

- Die Motivation der befragten Betriebe B1,2,3,4,5 die eine Anlage zur Abluftreinigung installiert haben, ist unterschiedlich. Teilweise wurde diese aufgrund von Auflagen zur Abscheidung von Geruch installiert. Teilweise bestand aber auch ein sehr hohes eigenes Interesse, vor allem bezüglich des Geruchs (vgl. auch Rentsch, 2022). In drei Fällen war aber auch die Reduktion von Ammoniakemissionen ein Grund für die Installation des Wäschers. Einer der befragten Betriebe hat einen Biowäscher für einen Labelstall mit Auslauf installiert. Der Aufwand zum Betrieb der Anlage wurde überwiegend als unproblematisch betrachtet. Soweit eine automatische Steuerung vorhanden war, kann man von einer guten Abscheideleistung ausgehen. In einem Fall beurteilte ein Betriebsleiter den Service des Verkäufers hinsichtlich Steuerung bzw. Kalibrierung der Messgeräte kritisch. Die vorhandene automatische Steuerung wurde zur Regulierung der Abschlämmung nicht genutzt, sondern diese manuell durchgeführt. Zwei Betriebe mit einem Biowäscher hatten sehr niedrige Abschlämmraten (Abschlämmung manuell wenige Male pro Jahr), die eine niedrige Abscheiderate für Ammoniak vermuten lassen. Beide Befragte gaben an, dass die Geruchsminderung gewährleistet sei, welche auch von Anwohnern bestätigt werde. Sobald eine Einschränkung der Geruchsminderung eintritt, wird diese von den Betriebsleitern erkannt und veranlasst diese zu einer raschen Intervention (z.B. Reinigung der Füllkörper, Spülung der Düsen).
- Auf drei Betrieben lagen keine Messdaten zur Abscheideleistung und zu den Gehalten des Abschlämmwassers vor. B1,2,4 rechnen Nährstoffe im Abschlämmwasser in der Suisse-Bilanz nicht ein. Eine Dosierung der Ausbringmengen nach Schwefel erfolgt nicht gemäss den Aussagen aller befragten Personen. Teilweise gab es auch Indizien, wonach zusätzliche Informationen seitens des Herstellers oder Verkäufers nützlich sein könnten, um eine optimale Abscheideleistung sicherzustellen. Die Kosten von Anschaffung und Betrieb der Anlage waren bei allen Betrieben ein Thema. Insgesamt scheinen die Betriebe aber mit der Investition zufrieden zu sein.
- Ein Lohnunternehmer verkauft seit einigen Jahren Ammoniumsulfat-Lösung (ASL): Menge pro Jahr: ca. 1000 t; Gehalt: 39% ASL mit einem Gehalt von 8% Stickstoff und 8.5% Schwefel (S) bei einer Dichte von 1.2 kg pro Liter, die von 3 Abluftreinigungsanlagen (Chemowäscher) stammt. Die Lieferung an die Abnehmer erfolgt über zwei Wege: i) Zugabe von ASL in aussenliegende Güllelager. Der Problematik der Gefährdung von Menschen und Tieren im Zusammenhang mit der Bildung von Schwefelwasserstoff wird damit Rechnung getragen. ii) Direkte Ausbringung streifenförmig mittels speziell entwickelter Geräte. Die Ausbringmenge beträgt rund 80 kg N. Eine Dosierung nach Schwefelbedarf der Kulturen wird nicht praktiziert. Bei direkter Ausbringung wird die ASL mittels Zugabe von Ammoniak auf pH 7 - 8 neutralisiert, um die Pflanzenverträglichkeit zu verbessern.

3.7 Eignung von Abluftreinigungsanlagen für BTS, BTS+RAUS Ställe

Bei BTS Ställen für Geflügel mit Zugang zu einem Aussenklimabereich besteht bei Unterdrucklüftung ein Unterdruck und somit kann die Abluft einem Luftwäscher zugeführt werden. Inwieweit die Luft über die Öffnungen zum Aussenklimabereich entweicht, ist nicht bekannt. Die Öffnungen zum Aussenklimabereich an sich stehen jedoch nicht im Widerspruch zu Betrieb und ausreichender Abscheideleistung für Ammoniak (>70%) einer Abluftreinigungsanlage in Bezug auf die durch die Abluftreinigungsanlage geführte Abluft. Verluste von Ammoniak durch Öffnungen zum Aussenklimabereich werden insgesamt als eher klein eingeschätzt. Für Mastpoulets ist der Zugang zum Wintergarten an den ersten 21 Lebenstagen fakultativ, d.h. in der Praxis dürften die Öffnungen zum Wintergarten nicht über den ganzen Umtrieb geöffnet sein.

In der Schweiz sind diverse Luftwäscher für BTS Geflügelställe in Betrieb. Teilweise liegen auch Kontrollmessungen vor, die eine Abscheideleistung von >70% für Ammoniak gezeigt haben. Man kann davon ausgehen, dass sämtliche von der DLG für Mastpoulets oder Legehennen zertifizierten Anlagen für BTS Geflügelställe einsetzbar und die in der Prüfung nachgewiesene Abscheideleistung erbringen können. Aussagen, welche die Eignung von Abluftreinigungsanalgen für BTS Geflügelställe in Frage stellen, müssen als klar widerlegt betrachtet werden.

Bei BTS+RAUS Ställen für Schweine ist die Datenlage weniger eindeutig. Es gibt in der Schweiz wenige Labelställe für Schweine, die mit Abluftreinigung ausgerüstet sind. Die umgesetzten Lösungen unterscheiden sich stark, so dass allgemeingültige Aussagen nicht möglich sind. Ein positiver Effekt hinsichtlich Emissionsreduktion von Ammoniak erscheint jedoch als wahrscheinlich.

Detailliertere Ausführungen zu Abluftreinigungsanlagen für BTS bzw. BTS/RAUS Ställen für Geflügel und Schweine sind in Anhang 5 enthalten

3.8 Abbildung der Abluftreinigung im Modell Agrammon

3.8.1 Erfassung der Abluft von Ställen durch Abluftwäscher

3.8.1.1 Geflügel

Bei grösseren Ställen, z.B. mehr als 2'000 Legehennen (ca. 500 Betriebe), welche mehr als 80% des Gesamtbestands dieser Tierkategorie ausmachen, kann man von einem System mit Zwangslüftung ausgehen, was Voraussetzung für die Installation einer Anlage zur Abluftreinigung ist. Mehr als 90% des Bestands aller Geflügelkategorien mit Ausnahme der Zuchttiere zur Bruteierproduktion werden aktuell nach BTS-Standards gehalten (BLW, 2020). BTS beinhaltet einen Aussenklimabereich. Im Modell Agrammon wird die Stufe Stall bei Geflügel als ein System behandelt unabhängig vom Vorhandensein eines Aussenklimabereichs. Die dort anfallenden Emissionen werden von einem Abluftwäscher nicht erfasst. Basierend auf den Untersuchungen von Gebhardt-Henrich und Fröhlich (2011) und Gebhardt-Henrich et al. (2014) lässt sich die durchschnittliche Aufenthaltsdauer einer Legehenne im Aussenklimabereich auf ca. 1 h pro Tag schätzen. Dies entspricht 5% der Dauer eines Tages. Da Legehennen den Kot zu einem grossen Teil während dem Fressen im Bereich des Kotbands absetzen (mündliche Mitteilung Sabine Gebhardt, Zentrum für tiergerechte Haltung, Geflügel und Kaninchen, Bundesamt für Veterinärwesen, 3052 Zollikofen), dürfte der Anteil des Kots, der im Aussenklimabereich abgesetzt wird, deutlich weniger als 5% des gesamten Kotanfalls betragen. Bei Mastpoulets beobachteten Hoffman et al. (2013) durchschnittlich 5 bis 10% der Tiere zwischen dem 22. und 35. Masttag im Aussenklimabereich (dieser war für die Tiere zwischen 8 h und 17 h zugänglich). Dies deutet ebenfalls auf einen geringen Kotanfall im Aussenklimabereich. Man kann deshalb davon ausgehen, dass die Emissionen eines BTS-Geflügelstalls (d.h. mit Aussenklimabereich) zum grössten Teil im Innenbereich anfallen, und vom Modell Agrammon somit aus fachlicher Sicht vertretbar abgebildet werden.

Inwieweit sich die Abluft eines Stalls mit Aussenklimabereich von einem Abluftwäscher erfassen lässt, oder ob die Abscheideleistung aufgrund der Öffnungen zum Aussenbereich eingeschränkt ist, wird kontrovers diskutiert. Gemäss Hahne et al. (2016) ist Abluftreinigung grundsätzlich nur in zwangsbelüfteten Ställen möglich. Anlagen zur Abluftreinigung wurden jedoch sowohl in der Schweiz als auch in Deutschland in Ställen mit Aussenklimabereich (Geflügel) eingerichtet und sind in Betrieb (vgl. Anhang 5). Bei Lüftungssystemen mit Unterdruck kann man davon ausgehen, dass die Abluft grösstenteils durch den Wäscher geleitet wird. Inwieweit zusätzlich im Aussenklimabereich freigesetztes Ammoniak ebenfalls vom Wäscher erfasst wird, spielt eine untergeordnete Rolle, da der Anteil der im

Aussenklimabereich anfallenden Emissionen wie oben ausgeführt vermutlich klein ist. Die vereinfachende Annahme des Modells Agrammon, Innenbereich und Aussenklimabereich als ein System zu betrachten, dessen Abluft von einem Wäscher vollständig erfasst wird, erscheint als gerechtfertigt und erfordert im Modell keine Änderung.

3.8.1.2 Schweine

Bei Schweinen ist davon auszugehen, dass Anlagen zur Abluftreinigung nur für geschlossene, zwangsbelüftete Ställe funktionieren (Hahne et al., 2016). Allerdings gibt es in der Schweiz auch Labelställe mit Auslauf, welche mit Abluftreinigung ausgerüstet sind (vgl. Anhang 5). Zur Abscheideleistung sind allerdings keine Messdaten verfügbar. Grundsätzlich ist eine gewisse Emissionsreduktion zu erwarten, wenn ein Teil der Emissionen erfasst wird oder die Luft oberhalb der Güllekanäle angesaugt wird, wie es beispielsweise beim System Lely Sphere[14] der Fall ist.

3.8.2 Abscheideraten

Agrammon stützt sich bei der hinterlegten Abscheiderate von 70% bzw. 90% für Bio- und Chemowäscher auf den Leitfaden der UNECE (Bittman et al., 2014), welcher sich seinerseits u.a. auf Melse und Ogink (2005) beruft. Basierend auf den Informationen von Kap. 3.2.2 und 3.3.2 scheinen diese Abscheideraten für Ammoniak möglich zu sein, die 90% Abscheidung für Chemowäscher werden nicht von jeder Anlage erreicht. Je nach Fabrikat werden unterschiedlich hohe Abscheideraten erreicht. Daher widerspiegeln die fixen Werte für die Abscheideraten die Realität nicht adäquat. Es sollte geprüft werden, ob diese durch individuelle Werte für einzelne Fabrikate ersetzt werden kann.

3.8.3 Berechnung der Emissionen von Abschlämmwasser

Grundsätzlich gelangt im Stoffflussmodell der durch emissionsmindernde Techniken eingesparte Stickstoff in nachfolgende Emissionsstufen und unterliegt dort der Freisetzung als Ammoniak unter Verwendung der auf der jeweiligen Stufe gültigen Emissionsrate.

Im Modell wird aktuell für Biowäscher der auf der Stufe Stall abgeschiedene Stickstoff aus dem Fluss entfernt. Dies basiert auf der Annahme, dass das im Waschwasser aufgefangene Ammoniak vollständig zu elementarem Stickstoff denitrifiziert wird. Dies trifft so nicht zu, wie die Angaben aus der Literatur zeigen (Tabelle 2). Im Modell gelangt bei Verwendung von Chemowäschern der auf der Stufe Stall abgeschiedene und im Abschlämmwasser enthaltene Stickstoff ausgangs Stufe Stall in den N-Fluss der Vollgülle bei Schweinen oder des Mists bei Geflügel. Für den Stickstoff im Abschlämmwasser kommt dadurch die gleiche Emissionsrate auf den Stufen Lagerung und Ausbringung wie für Vollgülle oder Mist zur Anwendung. Da mit Abschlämmwasser ein neuer stickstoffhaltiger Stoffstrom generiert wird, der sich von den Eigenschaften her von Gülle und Mist unterscheidet, weicht die in Agrammon abgebildete Berechnung von dem in der Realität vorliegenden Prozess ab.

3.8.4 Vorschlag für eine Revision der Implementierung der Abluftreinigung im Modell Agrammon

Für Abschlämmwasser liegen derzeit keine Messwerte vor als Grundlage zur Festlegung von Emissionsraten auf den Stufen Lagerung und Ausbringung. Es wird daher

[14] https://www.lely.com/de/losungen/kuhkomfort/sphere/
Aktuell werden zu diesem Punkt Überlegungen in Deutschland angestellt. Eine Option ist beispielsweise, den Aussenklimakontakt zeitlich zu begrenzen (z.B. mit schließbaren Jalousien) und somit im geschlossenen Zustand über x Stunden am Tag eine Abluftreinigung sicher durchführen zu können. Bei dauerhaftem Aussenklimakontakt mit großen Austauschöffnungen wird die Abluftreinigung aus meiner Sicht nicht sinnvoll einsetzbar sein (pers. Mitteilung J. Hahne, Thünen-Institut für Agrartechnologie).

vorgeschlagen, ein Vorgehen basierend auf den Eigenschaften von Abschlämmwasser, grundlegenden Mechanismen und Annahmen zu implementieren. Tabelle 7 zeigt die Eigenschaften von Abschlämmwasser im Vergleich zu Gülle und Mist. Aufgrund der Unterschiede von Konsistenz und pH-Wert erscheinen deutlich tiefere Emissionsraten für Abschlämmwasser im Vergleich zu Gülle und Mist als sehr wahrscheinlich. Wenn Abschlämmwasser Gülle zugemischt wird, kann man davon ausgehen, dass der im Abschlämmwasser vorliegende Stickstoff die gleiche Emissionsrate aufweist wie Gülle. Wenn Lagerung und Ausbringung von Abschlämmwasser separat erfolgen, wird vorgeschlagen, im Modell zusätzlich einen separaten Pfad für die Lagerung und Ausbringung von Abschlämmwasser hinzuzufügen (Abbildung 3).

Tabelle 7: Vergleich der Eigenschaften des Abschlämmwassers mit denjenigen von Gülle und Mist als Grundlage zur Herleitung der Emissionen von Abschlämmwasser.

Gehalte, Eigenschaften	Abschlämm-wasser*	Gülle**		Mist***		Kot##	Mist###	
		Rindvieh	Schweine	Rindvieh	Schweine	Legehennen		Poulets
TS (g L^{-1})	~2 / 100	45	25	190	270	350	500	650
TAN (g L^{-1})	~ 2 / 10	1.1	2.3	0.7	2.6	6.3	7.0	10
pH-Wert	~ 6.8 / 3.5	7.2 (6.0-80)	7.5 (6.5-8.2)	8.4 (7.4-8.9)	8.2 (6.7-8.8)	7.9 (6.4-9.2)		8.6 (7.9-8.6)
Konsistenz	Pumpbar	Pumpbar faserig	Pumpbar flüssig	Fest, faserig		Stich-fest	Fest, krümelig	
Partikelgrösse	klein	gross	mittel	-	-	-	-	-
Viskosität	hoch	niedrig	mittel	-	-	-	-	-
ER Lagerung#	Nicht bekannt	6	8	30	50	25	25	10
ER Ausbringung#		50	35	80	60	40	40	40

*vgl. Werte für unverdünntes Abschlämmwasser; links Biowäscher (B), rechts Chemowäscher (C); Bereiche für TS: B: 1-6; C: 50-200; TAN; B: 0.2-10; C: 1-50 (bei Biowäschern beträgt der Anteil von Ammonium rund 50%; unter Berücksichtigung des Gehalts von Nitrit und Nitrat ist der totale Gehalt von N rund doppelt so hoch wie derjenige von TAN); pH: B: 6.3-7.5; C: 2.8-6.8

**Quellen: für TS und TAN: Richner et al. (2017), Werte für Gülle bei 1:1 Verdünnung mit Wasser; Rindvieh: Werte für Milchkühe, Schweine: Werte für Mastschweine; für pH-Werte: Kupper et al. (2020) für Gülle; Rindvieh, Webb et al. (2012) für Mist

#Emissionsraten in Modell Agrammon gemäss Kupper (2021) ohne Einrechnung der Emissionsreduktion durch emissionsmindernde Techniken; Gülle: in g NH_3-N pro m^2 und Tag; Mist: Prozent TAN.

##Systeme mit Kotbandentmistung

###Systeme mit Bodenhaltung

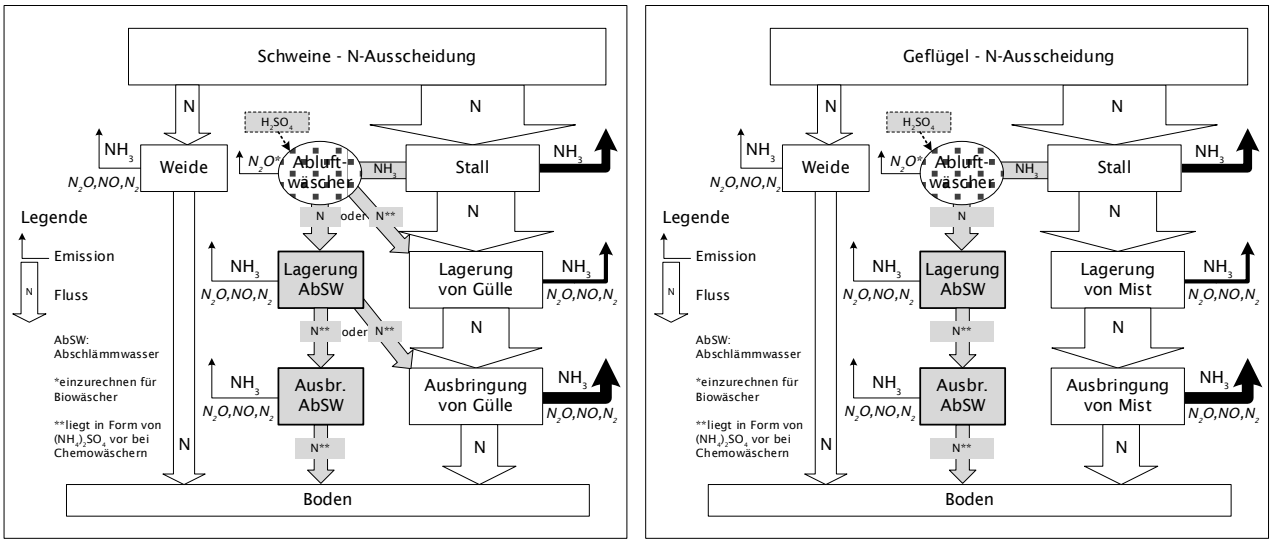

Abbildung 3: Berücksichtigung von Abschlämmwasser (AbSW) von Abluftwäschern mit separatem Pfad (grau hinterlegt) im Modell Agrammon dargestellt für Schweine (links) und Geflügel (rechts).

Es wird das folgende Vorgehen zur Festlegung der Emissionsraten und Berechnung der Emissionen vorgeschlagen, solange keine spezifischen Messwerte vorliegen:

1. Stufe Lagerung:
   - Bei Lagerung des Abschlämmwassers gemischt mit Gülle: keine separate Anrechnung der Emissionen des Abschlämmwassers. Begründung:
     - Abschlämmwasser von Biowäschern: der mittlere Gehalt von Ammonium von Abschlämmwasser liegt in einem ähnlichen Bereich wie der TAN-Gehalt von 1:1 verdünnter Schweinegülle (vgl. Richner et al., 2017; im Mittel liegt eine 1:1 Verdünnung von Schweinegülle vor; vgl. Kupper et al., 2022). Bei Vorliegen von unverdünnter Schweinegülle: der Anfall von Abschlämmwasser (0.7 m^3 pro Tierplatz und Jahr; Tabelle 2) entspricht beinahe der Hälfte des Gülleanfalls bei Mastschweinen (1.6 m^3 pro Tierplatz und Jahr; Richner et al., 2017). Durch die starke Gülleverdünnung dürfte die Bildung einer natürlichen Schwimmschicht weitgehend ausbleiben, wodurch eine Emissionsreduktion aufgrund von Verdünnung der Gülle (vgl. Kupper et al., 2020) weitgehend kompensiert werden dürfte. Man kann daher die in Agrammon implementierte Emissionsrate von Schweinegülle ohne Korrektur übernehmen.
     - Abschlämmwasser von Chemowäschern[15]: trotz des tiefen pH-Werts beeinflusst Abschlämmwasser aufgrund seiner kleinen Menge im Verhältnis zum Gülleanfall pH-Wert, Gehalt von TS und TAN der Gülle kaum (vgl. Kap. 3.5.1). Die Emissionsrate für die Lagerung von Schweinegülle dürfte durch die Zugabe von Abschlämmwasser kaum beeinflusst werden.
   - Bei separater Lagerung des Abschlämmwassers (Schweine und Geflügel): Verwendung des Emissionsfaktors von Schweinegülle «Baseline emissions tank» von 0.24 g NH^3 m^{-2} Tag^{-1} ohne Emissionsreduktion für Biowäscher und 70% Emissionsreduktion wegen Ansäuerung (Chemowäscher) gemäss Kupper et al. (2020).
     Begründung: bei Abschlämmwasser von Biowäschern liegt der mittlere Gehalt von Ammonium in einem ähnlichen Bereich wie der TAN-Gehalt von 1:1 verdünnter Schweinegülle (vgl. Richner et al., 2017); daher kann man den Emissionsfaktor für die Lagerung von Schweinegülle ohne Korrektur wie oben aufgeführt anwenden. Der niedrige pH-Wert des Abschlämmwassers von Chemowäschern (Tabelle 4) rechtfertigt eine Emissionsreduktion wie vorliegend für Gülle (Kupper et al., 2020). Falls das Abschlämmwasser von Chemowäschern stark verdünnt wird (z.B. aufgrund gemeinsamer Lagerung des Abschlämmwassers mit Wasser aus der Reinigung der Ställe) und so eine Absenkung des pH-Werts nicht eintritt, sollte auf die Einrechnung einer Emissionsreduktion durch Ansäuerung verzichtet werden.
     Anrechnung einer Emissionsreduktion durch Abdeckung wie für Gülle gemäss Kupper (2021). Multiplikation des bestimmten Emissionsfaktors mit der Oberfläche des Lagerbehälters analog zum Vorgehen der aktuellen Berechnung im Modell Agrammon.
2. Stufe Ausbringung: Multiplikation des TAN-Flusses gemäss Ziff. 3 in Tabelle 9 mit der Emissionsrate gemäss ALFAM2 Modell (Hafner et al., 2019), angegeben unter «Cumulative emission at 72 h (%)» (vgl. Anhang 1). Wahl der Eingabeparameter:
   - Bei separater Ausbringung des Abschlämmwassers: Verwendung von TS- und TAN-Gehalten des Abschlämmwassers inkl. Einrechnung der Verdünnung mit Wasser. Für Chemowäscher: Anrechnung einer Ansäuerung in ALFAM2 unter «Acidification» auf pH 6.0 bei pH-Wert des Abschlämmwassers von pH≤6.0 und auf pH 6.4 bei pH-Wert

[15] Abschlämmwasser von Chemowäschern erfordert eine separate Lagerung (DLG Prüfbericht 6212; KOLAS, 2013; Hahne et al., 2016; vgl. Kap. 3.5.1). Da in der Praxis die Lagerung gemischt mit Gülle vorkommt, wird für diese (eigentlich nicht zulässige) Option dennoch einen Weg für eine verbesserte Emissionsrechnung vorgeschlagen.

des Abschlämmwassers von pH >6.0 (Anhang 1, Tabelle 11). Anrechnung der Emissionsreduktion durch Verwendung von emissionsmindernden Ausbringtechniken unter «Application method» in ALFAM2 (Abschlämmwasser sollte grundsätzlich nur mit emissionsmindernden Techniken ausgebracht werden, auch wegen deren besseren Verteilgenauigkeit gegenüber dem Breitverteiler). Falls das Abschlämmwasser stark verdünnt wird (z.B. mit Waschwasser aus der Reinigung der Ställe) und eine Erhöhung des pH-Werts eintritt, sollte auf die Einrechnung einer Emissionsreduktion durch Ansäuerung verzichtet werden durch Anwählen von «No» bei «Acidification» in ALFAM2 (Anhang 1, Tabelle 12).

- Bei gemeinsamer Lagerung des Abschlämmwassers mit Gülle oder Mischung des Abschlämmwassers mit Gülle vor der Ausbringung, sollte mit der gleichen Emissionsrate gerechnet werden, wie für die jeweilige Gülle mit Anrechnung einer Emissionsreduktion durch Verwendung von emissionsmindernden Ausbringtechniken, soweit diese angewendet werden (vgl. Anhang 1, Tabelle 13). Begründung: bereits bei einem Anteil von 1% Gülle im Abschlämmwasser wird der pH-Wert in den neutralen bis alkalischen Bereich ansteigen. Der Effekt der pH-Absenkung geht damit verloren.

Bei Biowäschern können Verluste von N_2O, NO_x und N_2 entstehen (Melse et al., 2012a). Daher kann man nicht davon ausgehen, dass der gesamte abgeschiedene Stickstoff dem N-Fluss im Waschwasser enthalten ist. Dies zeigen auch Bilanzen, welche neben der Quantifizierung der gasförmigen Verluste die N-Flüsse im Waschwasser und allenfalls die Akkumulation von N im Filtermaterial einschliessen. Van der Heyden et al. (2019) bestimmten bei zwei Biowäschern eine Wiederfindungsrate von 92% und 66% mittels N-Bilanz. Die Differenz erklärten sie mit Verlust als N_2 infolge Denitrifizierung. Melse et al. (2012a) fanden 86% des abgeschiedenen NH_3 im Waschwasser als Ammonium und Nitrat. Die N_2O Verluste betrugen 5% des abgeschiedenen NH_3, womit die Wiederfindung in der Bilanz 91% betrug. Melse und Mosquera (2014) geben eine Wiederfindungsrate bei drei Biowäschern mit Denitrifizierung (1 Schweine, 2 Geflügel) von rund 70% an bei einer N_2O Produktion von rund 35% des NH_3-N in der Zuluft. In Melse und Ploegaert (2011) betrug die Wiederfindungsrate eines Biowäschers (Schweine) 75%. In den DLG Berichten[16] sind höhere Wiederfindungsraten zwischen 80 und >100% angegeben.

Es wird daher vorgeschlagen, den basierend auf der Abscheiderate berechneten N-Fluss im Abschlämmwasser von Biowäschern um 20% zu reduzieren. Weiter wird vorgeschlagen, Emissionen von N_2O für die Abluftreinigung mittels Biowäscher einzurechnen. Vorschlag: 3% Umwandlung des NH_3 eingangs Biowäscher zu N_2O entsprechend Schwellenwert von Dumont (2018). Im Übrigen kann die Berechnung gleich durchgeführt werden wie oben beschrieben. Eine Korrektur für die Ansäuerung wie beim Chemowäscher soll nicht eingerechnet werden.

Die unter Pkt. 1 und 2 getroffenen Annahmen sollten wenn möglich mittels Analysedaten des Abschlämmwassers und Emissionsmessungen der Lagerung und Ausbringung von Abschlämmwasser überprüft werden.

3.8.5 Fallstudie eines Betriebs mit einem Projekt zum Bau eines Legehennenstalls

3.8.5.1 Vorgehen bei der Emissionsrechnung

Im Rahmen einer Fallstudie eines Betriebs mit einem Projekt zum Bau eines Legehennenstalls wurde die Emission des Betriebs vor und nach Realisierung des Projekts gerechnet. Der Betrieb hält Milchkühe plus Aufzuchtrinder. Das Bauprojekt beinhaltet den Bau eines Legehennenstalls mit 6000 Plätzen. Um die erforderliche Emissionsreduktion von 20% zu

[16] Berichte Nr. 6380, 6284, 6243, 6220, 6178, 5955, 5954, 5879,

erreichen, wurden die folgenden Massnahmen umgesetzt: Abbau des Milchkuhbestands um 11 Tiere und Aufhebung eines Stalls, Abbau der Aufzuchttiere, Abdeckung der beiden offenen Güllesilos, emissionsmindernde Technik bei der Ausbringung von Gülle, Erhöhung des Anteils von eingearbeitetem Mist nach Ausbringung, Verzicht auf die Zufuhr von mineralischem N und Recyclingdünger. Der Legehennenstall wird mit einem Chemowäscher Typ LAVAMATIC Geflügelmast ausgerüstet. Die Lagerung des Abschlämmwassers (AbSW) und das bei der Reinigung des Legehennenstalls anfallende Waschwasser (Menge pro Jahr 6.5 m^3 bzw. 7 m^3) erfolgt gemeinsam in einem Lager mit fester Abdeckung. Der Geflügelmist wird gedeckt gelagert. Die wichtigsten Kenndaten des Betriebs vor und nach der Umsetzung des Bauprojekts sind in Anhang 2 und Anhang 3 aufgeführt.

Die separate Berechnung der Emissionen von Lagerung und Ausbringung des Abschlämmwassers wie vorgeschlagen in Kap. 3.8.4 und dargestellt in Abbildung 3 wurde wie folgt durchgeführt:

- Erstellung des Datensatzes Legehennen L1 gemäss Angaben von Anhang 3 mit Einrechnung der Emissionsreduktion mittels Chemowäscher. Die Emissionsreduktion aufgrund des Chemowäschers wird mittels Eingabe von «75%» unter «Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall» eingerechnet. Die Emissionen auf den Stufen Weide und Stall werden für die Emissionsrechnung des Gesamtbetriebs nach Umsetzung des Bauprojekts eingerechnet.
- Erstellung des Datensatzes Legehennen L2 ohne Einrechnung der Emissionsreduktion mittels Chemowäscher. Einrechnung der Emissionen auf den Stufen Lagerung und Ausbringung von Mist für die Emissionsrechnung des Gesamtbetriebs nach Umsetzung des Bauprojekts. Begründung: die ausgangs Stalles verbleibende N- bzw. TAN-Fracht entspricht derjenigen Fracht, welche auch mit Abluftreinigung anfällt und in die N/TAN-Kaskade eingangs Hofdüngerlager gelangt. Die im Wäscher abgeschiedene N-Fracht gelangt ins Abschlämmwasser.
- Die Einrechnung der Emissionen aus dem in das Abschlämmwasser abgeschiedenen N erfolgt gemäss Tabelle 9 sowie Pkt. 1, 2 von Kap. 3.8.4. Für die Gehalte von TS und TAN werden die Werte aus der Tabelle 16 (Anhang 4) vom Typ Chemowäscher Typ LAVAMATIC Geflügelmast übernommen (TS: 200 g L^{-1}; TAN bzw. NH_4-N: 40 g L^{-1}) mit einer 1:1 Verdünnung. Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Eigenschaften des Abschlämmwassers wird mit und ohne Absenkung des pH-Werts während Lagerung und Ausbringung gerechnet (vgl. Anhang 1).
- Aufaddieren der Emissionen von Rindvieh, des Datensatzes Legehennen, L1 Stufen Weide und Stall, des Datensatzes Legehennen L2, Stufen Lagerung und Ausbringung von Hofdüngern sowie der Emissionen des Abschlämmwassers.

Tabelle 8: Wichtigste Kenndaten des Betriebs vor und nach der Umsetzung des Bauprojekts. Detaillierte Daten verwendet für die Emissionsrechnungen sind in Anhang 2 vor und Anhang 3 nach dem Bauprojekt aufgeführt.

Tiere	Vor Bauprojekt		Nach Bauprojekt	
	Anz.		Anz.	
Milchkühe	45	2 Ställe: Anbindestall mit Produktion von Vollgülle / Gülle und Mist	30	1 Stall: Anbindestall mit Produktion von Vollgülle
Aufzuchtrinder	12	4 Ställe: Bis 1-jährig: in Laufstall mit Tiefstreu, älter als 1 Jahr: Anbindestall mit Produktion von Gülle und Mist	9	4 Ställe: Bis 1-jährig: in Laufstall mit Tiefstreu, älter als 1 Jahr: Anbindestall mit Produktion von Gülle und Mist
		Alle Tiere: planbefestigter Laufhof, Halbtagesweide		
Legehennen	20	Bodenhaltung, Auslauf auf Weide	6000	Stall mit Kotbandentmistung ohne Kotbandtrocknung, Auslauf auf Weide, Abluftreinigung mit Chemowäscher, 75% Abscheidegrad, Lagerung Abschlämmwasser (AbSW) und Waschwasser in Behälter mit 6.5 m³ Volumen, Ausbringung AbSW 1:1 verdünnt mit Schleppschlauch
Lager/Ausbringung	Vor Bauprojekt		Nach Bauprojekt	
	Anz.		Anz.	
Güllelager	7	Volumen: 1896 m³, davon 1170 m³ ungedeckt, 726 m³ mit fester Abdeckung		Volumen: 1896 m³, davon 1170 m³ mit Zeltdach/Betonhohldecke, 726 m³ mit fester Abdeckung
Lagerung Mist		Offenes Lager		100% gedeckte Lagerung Mist
Ausbringung Gülle		50% Breitverteiler, 50% Schleppschlauch		50% Schleppschlauch, 50% Schleppschuh
Ausbringung Mist		100% nicht eingearbeitet		Je 35% eingearbeitet innerhalb von 1 Tag, 3 Tagen; 30% nicht eingearbeitet
Mineraldünger		1196 kg Ammonsalpeter (27% N) pro Jahr		keine
Recyclingdünger		700 m³ flüssiges Gärgut		keine

Tabelle 9: Berechnung der Emissionen von Lagerung und Ausbringung des Abschlämmwassers

Ziff	TAN-Fluss, Emissionsrate	Berechnung	Bemerkung
1	TAN Fluss in Lagerung Abschlämmwasser	Differenz zwischen Emission Stall gerechnet ohne Abluftreinigung mit Chemowäscher und Emission Stall gerechnet mit Abluftreinigung	
2	Emissionsrate Lagerung Abschlämmwasser	Berechnung gemäss Pkt. 1 Kap. 3.8.4	Lager gedeckt
3	TAN Fluss in Ausbringung Abschlämmwasser	Fluss gemäss Ziffer 1 dieser Tabelle minus Emission aus Lager	
4	Emissionsrate Ausbringung Abschlämmwasser	Berechnung gemäss Pkt. 2, Kap. 3.8.4	1:1 verdünnt; Ausbringung mit Schleppschlauch

3.8.5.2 Resultate der Emissionsrechnung

Der Abbau des Rindviehbestandes führt zu einer Reduktion von rund 30% bei den Emissionen des Rindviehs. Dieser bewirkt rund die Hälfte der erreichten Emissionsreduktion für diese Tierkategorie. Die Abdeckung der beiden offenen Güllelager führt zu einer Verminderung der Emissionen aus dem Lager von 70%. Diese Massnahme und die Umstellung auf ausschliesslich emissionsmindernde Gülleausbringtechniken sowie die vermehrte Einarbeitung von Mist bewirkt den Rest der Emissionsminderung von Rindvieh. Nach der Umsetzung des Bauprojekts betragen die Emissionen des Rindviehs 898 kg NH_3-N pro Jahr (Spalte 2 von Tabelle 10) Die im Rahmen des Bauprojekts erreichte Emissionsreduktion beträgt für Rindvieh 949 kg NH_3-N pro Jahr oder 51% der Emissionen des Rindviehs von vor der Umsetzung des Bauprojekts.

Der Neubau des Legehennenstalls führt zu Emissionen von 1018 kg NH_3-N pro Jahr (Spalte 4 von Tabelle 10) unter Annahme des pH-Werts des Abschlämmwassers von 6.0 oder weniger. Die Verminderung der Gesamtemission des Betriebs nach Realisierung des Bauprojekts, d.h. inkl. den Stall mit 6000 Legehennen und Umsetzung von emissionsmindernden Massnahmen, beträgt 533 kg NH_3-N pro Jahr, was einer Reduktion von 22% im Vergleich zum Betrieb vor dem Bauprojekt entspricht (Spalte 7 von Tabelle 10). Die Installation einer Abluftreinigung führt zu einer Einsparung von 305 kg NH_3-N pro Jahr oder rund 23% der Gesamtemissionen der Legehennen.

Wird unterstellt, dass der pH-Wert des Abschlämmwassers 6.4 übersteigt, fällt die Emissionsreduktion niedriger aus (d.h. 481 kg NH_3-N pro Jahr). Dies entspricht einer Reduktion von 20% im Vergleich zum Betrieb vor dem Bauprojekt (Spalte 8 von Tabelle 10). Die Emissionen aus dem Abschlämmwasser sind mit 19 kg NH_3-N pro Jahr (pH-Wert des Abschlämmwassers unter 6.0) bzw. mit 70 kg NH_3-N pro Jahr (pH-Wert des Abschlämmwassers höher als 6.4) gegenüber den übrigen Emissionen der Legehennen (999 kg NH_3-N pro Jahr) sehr klein.

Ein Chemowäscher mit 90% Abscheidegrad gegenüber dem verwendeten Typ mit 75% Abscheidegrad würde die Emissionen zusätzlich um 61 kg NH_3-N pro Jahr reduzieren und zu einer Emissionsminderung gegenüber dem Ausgangszustand von 24% (anstatt 22%) führen. Interessanterweise würde der Einbau einer Kotbandentmistung mit Kotbandtrocknung keine weitere Emissionsreduktion bewirken. Die Emissionen wären im Gegenteil sogar leicht höher. Dies ist dadurch zu erklären, dass der mit der Kotbandtrocknung eingesparte N im Mist verbleibt. Dieser Teil des Stickstoffs unterliegt grösseren Emission während Lagerung und Ausbringung im Vergleich zur gleichen N-Menge, die im Abschlämmwasser enthalten ist. Die Minderemission auf den Stufen Lagerung und Ausbringung des Systems ohne Kotbandtrocknung übersteigt die Emissionsreduktion, welche die Kotbandtrocknung auf der Stufe Stall bewirkt.

Tabelle 10 zeigt ebenfalls die Emissionen mit Chemowäscher ohne separate Anrechnung des Abschlämmwassers (Spalte 3). Sie liegen um 91 kg NH_3-N pro Jahr höher, als berechnet mit dem in Kap. 3.8.4 beschriebenen Ansatz (vgl. Spalte 7). Die insgesamt für den Betrieb erreichte Emissionsminderung würde so 18% betragen (Spalte 6).

Der Nährstoffgehalt des Abschlämmwassers bestimmt die Ausbringmenge. Limitierend wird die Schwefelfracht (Kap. 3.5.1). Es ist zu empfehlen, mehrere Analysen des Abschlämmwassers vor der ersten Ausbringung durchzuführen. Die gesamte auf dem Betrieb mit dem Abschlämmwasser anfallende N-Menge beträgt 300 - 400 kg pro Jahr und sollte entsprechend dem Pflanzenbedarf der Kulturen ausgebracht werden.

Tabelle 10: Emissionen des Betriebs vor und nach der Umsetzung des Bauprojekts in kg NH_3-N pro Jahr. Kursiv gedruckt die Emissionen, welche mittels Modell Agrammon standardmässig gerechnet werden (d.h. ohne separate Berechnung der Emissionen von Lagerung und Ausbringung des Abschlämmwassers).

	1	2	*3*	4	5	*6*	7	8
Emissionsstufen	Emissionen vor dem Bauprojekt	Emissionen nach dem Bauprojekt Rindvieh	*Emissionen nach dem Bauprojekt Legehennen total ohne separate Anrechnung Abschlämmwasser*	Emissionen nach dem Bauprojekt Legehennen total mit separater Anrechnung Abschlämmwasser (pH<6.0)	Emissionen nach dem Bauprojekt Legehennen total mit separater Anrechnung Abschlämmwasser (pH>6.4)	*Emissionen nach dem Bauprojekt Rindvieh und Legehennen total ohne separate Anrechnung Abschlämmwasser*	Emissionen nach dem Bauprojekt Legehennen total bei pH-Wert Abschlämmwasser <6.0)	Emissionen nach dem Bauprojekt Legehennen total bei pH-Wert Abschlämmwasser >6.4)
Weide	53	37	*186*	186	186	*223*	223	223
Stall und Laufhof	262	172	*108*	108	108	*280*	280	280
Lagerung	788	229	*157*	136	137	*386*	366	366
Flüssig	687	206	*0*	0.03	0.3	*206*	206	206
Fest	102	23	*157*	136	136	*180*	160	160
Ausbringung	750	460	*659*	588	639	*1118*	1048	1099
Flüssig	653	445	*0*	19	70	*445*	464	515
Fest	97	15	*659*	569	569	*673*	584	584
Total Tierproduktion	1854	898	*1109*	1018	1070	*2007*	1916	1967
Mineraldünger	6.1	0	*0*	0	0	*0*	0	0
Recyclingdünger	588	0	*0*	0	0	*0*	0	0
Total Pflanzenbau	594	0	*0*	0	0	*0*	0	0
Total Betrieb	2448	898	*1109*	1018	1070	*2007*	1916	1967
Emissionsreduktion gegenüber vor Bauprojekt (in %)		-	-	-	-	*18%*	22%	20%

4. Ausblick und Schlussfolgerungen

Daten aus der Literatur (50 Studien und 25 DLG Prüfberichte von Abluftreinigungsanlagen) haben gezeigt, dass fixe Abscheideleistungen von Ammoniak für Bio- bzw. Chemowäscher von 70% bzw. 90% gemäss UNECE Leitfaden (Bittman et al., 2014) und implementiert im Modell Agrammon (Kupper, 2021) mit den gemessenen Werten zu wenig gut übereinstimmen. Die Abscheideraten gemäss Literatur betragen im Mittel rund 80% und 85% für Bio- bzw. Chemowäscher. In den Studien wurden im Vergleich zu den Daten in den DLG Prüfberichten um rund 5 bis 10 Prozentpunkte tiefere Abscheideleistungen gefunden. Für Biowäscher wurden häufig mehr als 70% Abscheideleistung gemessen, wogegen Chemowäscher einen Wert von 90% oft nicht erreichten. Die Streuung der Abscheideleitungen ist gross. Eine niedrige Abscheidung von Ammoniak dürfte überwiegend auf einen nicht ordnungsgemässen Betrieb der Anlagen zurückzuführen sein.

In der Literatur sind die unzureichenden Reinigungsleistungen sowohl für Biowäscher (Hahne et al., 2016; Lagadec et al., 2015; Melse, Ogink, 2005) als auch für Chemowäscher ein wichtiges Thema (Guignand, Eglin, 2016; Van der Heyden et al., 2016). Ältere Daten aus der Schweiz (Brunner, 2010) und Informationen aus den Umfragen lassen auch für die Schweiz nicht optimale Abscheideleistungen vermuten. Hahne (2022) fand dagegen sehr hohe Reinigungsleistungen für Biowäscher von 133 Betrieben mit Mastschweinen. Eine automatisierte Steuerung der Wäscher, klare Kriterien für die Steuerung (mindestens 90% der

Werte im EBTB für den pH-Wert des Waschwassers zwischen 6.0 und 7.5, sowie max. 20 mS cm^{-1}; eine minimale Abschlämmrate von 0.44 m^3 pro Mastplatz und Jahr) sowie eine Überwachung durch die Behörden (Hahne, 2022) scheinen eine hohe Reinigungsleistung der Anlagen gewährleisten zu können.

Ein Zusammenhang zwischen befriedigender Geruchsminderung, die vermutlich von den meisten Anlagen in der Schweiz erreicht wird, und genügender Abscheideleistung für NH_3 besteht nicht. Es ist möglich, eine befriedigende Geruchsminderung bei einer geringen Ammoniakabscheidung zu gewährleisten. Bei pH-Wert deutlich unter 6.0 und elektrischer Leitfähigkeit erheblich über 20 mS cm^{-1} nimmt auch die Geruchsminderung ab. Bei niedrigem pH-Wert nimmt auch die Konzentration von NO_x in der Abluft zu, welche ebenfalls zum Eintrag von reaktivem Stickstoff in die Umgebung der Betriebe beitragen. Bei manueller Abschlämmung wenige Male pro Jahr, wie sie in der Praxis in der Schweiz vorkommt, lässt sich keine Reinigungsleistung von 70% für NH_3 erreichen (pers. Mitteilung J. Hahne, Thünen-Institut für Agrartechnologie).

Bei der Verwendung von Biowäschern und auch Biofiltern (Dumont, 2018; Dumont et al., 2014) besteht ein Risiko von erhöhter Lachgasproduktion. Gemäss einer Umfrage des Cercl'Air aus dem Jahr 2018 (vgl. Kap. 3.6) werden Anlagen zur Abluftreinigung mehrheitlich wegen Geruchsproblemen installiert, was den Einbau einer biologischen Stufe voraussetzt. Dies impliziert das Risiko von Lachgasemissionen. Die bestmögliche Option zur Lösung dieses Zielkonflikts, d.h. Notwendigkeit zur Reduktion von Geruch ↔ Risiko von erhöhter Lachgasproduktion dürften mehrstufige Chemowäscher (Chemowäscher + Biofilter, Wasserwäscher + Chemowäscher + Biofilter) oder Kombiwäscher (Chemowäscher + Biowäscher) sein. Man kann davon ausgehen, dass die mögliche Bildung von Lachgas in der biologischen Stufe durch die vorgängige Abscheidung von Stickstoff in der chemischen Stufe limitiert wird.

Der Stickstoff im Abschlämmwasser wird aktuell in der Düngung nicht ausreichend berücksichtigt. Wie Kap. 3.5.3 gezeigt hat, ist die im Abschlämmwasser enthaltene N-Menge nicht vernachlässigbar. Dabei ist zu beachten, dass die Ausbringmenge durch den Schwefelbedarf der Kulturen limitiert wird. Die aktuelle Situation bezüglich Verfügbarkeit von mineralischen N-Düngern und den Anforderungen im Zusammenhang mit dem Absenkpfad Nährstoffe könnte die Wahrnehmung und damit das Potential der Abluftreinigung verbessern. Zumindest liegt damit eine sofort umsetzbare Technik vor, welche pro Einheit N kostenmässig in einem ähnlichen Bereich liegen durfte wie aktuell diskutierte Techniken zur Hofdüngeraufbereitung (vgl. Künzler, Weyermann, 2022).

Inwieweit Bau und Betrieb Abluftreinigungsanlagen umsetzbar sind, wird in der Literatur unterschiedlich beurteilt. Gemäss Melse et al. (2009) zählen Chemowäscher wegen der hohen Investitions- und Betriebskosten sowie des hohen Energie- und Säureverbrauchs nicht zu den Best Available Technique (BAT) gemäss EU. Bittman et al. (2014) dagegen bezeichnen die Abluftreinigung als Kategorie 1 (Massnahme Kategorie 1: erprobt in der Praxis und umsetzbar). In Giner-Santonja et al. (2017) sind Bio, Chemo- und kombinierte Wäscher als BAT aufgeführt. Gemäss Hahne et al. (2016) ist ein wirtschaftlicher Betrieb für Abluftreinigungsanlagen für die Geflügelhaltung nicht möglich, weil die erforderliche Technik noch nicht das gleiche Niveau und eine entsprechende Betriebssicherheit erreicht habe, wie in der Schweinehaltung, wobei die erforderlichen Abscheideleistungen für NH_3 auch bei Geflügel erfüllt seien. Es ist zu beachten, dass aktuell 8 DLG geprüfte Anlagen für Geflügel verfügbar sind (davon 1 Bio und 7 Chemowäscher; 5 für Mastpoulets, 2 für Legehennen, 1 für Jung- und Legehennen). Eine Anlage für die Schweinehaltung mit Einstreu wurde ebenfalls von DLG geprüft.

Die Anlagen sind ausgelegt auf eine Luftrate, die zum Ende einer Mastperiode bei Umgebungstemperaturen von mehr als 26°C erforderlich ist. Im Jahresmittel reicht eine Luftrate von 45 – 50% dieses Maximums aus. Es wird diskutiert, die Lüftungssteuerung so anzupassen, dass nicht zwingend 100% der maximalen Belastung, sondern z.B. nur 80% gereinigt werden. Bei einer Spitzenbelastung und damit Überschreitung eines Volumenstromes von 80% der Auslegungsluftrate würde 20% der Abluftmenge ungereinigt abgeleitet. Möglich wäre auch, mittels Konditionierung der Zuluft sommerliche Spitzen zu brechen. Dadurch liessen sich die Anlagen kleiner dimensionieren und damit kostengünstiger bauen und betreiben, wobei dennoch 80 bis 90% der Emissionen erfasst würden (Hahne et al., 2016).

In Deutschland der TA Luft[17] gilt für grosse Tierbestände (Geflügel: mit ≥40'000 Tierplätzen) und bei Ställen mit Zwangslüftung eine Pflicht zur Abluftreinigung mit mindestens 70% Emissionsreduktion. Für kleinere Bestände (15'000 bis <40'000 Tierplätze) ist eine Behandlung von Teilströmen wie oben diskutiert möglich: Behandlung von mindestens 60% des maximal auftretenden Volumenstroms bzw. Luftrate mit einer Emissionsminderung von 70%. Bei geringeren Anteilen Teilstrombehandlung ist eine Emissionsreduktion von insgesamt mindestens 40% erforderlich, wobei andere emissionsmindernde Techniken in Kombination mit Abluftreinigung angewendet werden können (vgl. auch Hahne, 2021).

Es gibt in der Schweiz diverse BTS Ställe für Geflügel sowie einige Labelställe für Schweine, die über eine Abluftreinigung verfügen. Umsetzbarkeit und Abscheideleistungen für Ammoniak von mindestens 70% für Abluftreinigungsanlagen für Geflügelställe sind ausreichend dokumentiert (Anhang 5). Bei Schweinen lässt die unterschiedliche Umsetzung von Abluftreinigungsanlagen bei Labelställen mit Mehrflächenbucht und Auslauf keine allgemeingültige Aussage der Abscheideleistung zu. Ein positiver Effekt hinsichtlich Emissionsreduktion von Ammoniak bei Labelställen für Schweine erscheint als wahrscheinlich.

Die Emissionsrechnung für Luftwäscher ist aktuell im Modell Agrammon nicht adäquat abgebildet. Für den im Abschlämmwasser gebundenen Stickstoff können aus fachlicher Sicht nicht die gleichen Emissionsraten auf den Stufen Lagerung und Ausbringung angewendet werden wie für Mist oder Gülle. Die Differenz der Gesamtemissionen im Vergleich zu einer Berechnung wie aktuell im Modell Agrammon implementiert ist zwar relativ klein (rund 10%), kann jedoch bei einzelbetrieblichen Berechnungen relevant sein. Das Modell Agrammon sollte entsprechend dem in Kap. 3.8.4 beschriebenen Ansatz revidiert werden. Bis zur nächsten Revision des Modells lässt sich der im vorliegenden Bericht beschriebene Berechnungsweg ausserhalb von Agrammon anwenden. Die unterschiedlichen Abscheideraten der verschiedenen Wäschertypen sollten individuell angerechnet werden und die aktuell in Agrammon hinterlegten fixen Werte (Biowäscher 70%, Chemowäscher 90% Abscheidegrad) ersetzen. Der beschriebene Prozess zur Berechnung der Emissionen von Abschlämmwasser (Kap. 3.8.4) muss von der Begleitgruppe Agrammon genehmigt werden.

Die Unsicherheiten betreffend pH-Wert und Nährstoffgehalt des Abschlämmwassers je nach Wäschertyp und Behandlung (z.B. Mischung mit Waschwasser aus der Stallreinigung oder mit Gülle) erfordert Analysedaten, um zuverlässige Schätzungen der Emissionen durchführen zu können. Für verbesserte Modellrechnungen sind auch Emissionsmessungen erforderlich. Im Zusammenhang mit Anlagen zur Abluftreinigung bezieht sich dies auf die Emissionen aus dem Stall und der Ausbringung des Abschlämmwassers.

[17] Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_18082021_IGI25025005.htm (29.09.2022)

5. Verdankungen

Diese Studie wurde vom Bundesamt für Bundesamt für Umwelt (BAFU) finanziert. Wir bedanken uns bestens bei den fünf Betriebsleitern, dem Lohnunternehmen und den Experten/-innen von kantonalen Vollzugsbehörden, die sich für Interviews, Befragungen und Gegenlesen des Berichts bereit erklärt hatten, sowie insbesondere bei Dr. J. Hahne, Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig, für persönliche Mitteilungen, Hinweise auf Studien, Gegenlesen des Berichts und Anmerkungen.

6. Literaturverzeichnis

Aarnink, A., van Hattum, T., Hol, A., Zhao, Y. 2007. Reduction of fine dust emission by combi-scrubber of Big Dutchman, Report 66. Lelystad, the Netherlands, Animal Sicences Group of Wageningen UR, Wageningen, NL.

Aarnink, A.J.A., Landman, W.J.M., Melse, R.W., Zhao, Y., Ploegaert, J.P.M., Huynh, T.T.T. 2011. Scrubber capabilities to remove airborne microorganisms and other aerial pollutants from the exhaust air of animal houses. Trans. ASABE 54(5): 1921-1930.

Landor, 2019. Düngerpreisliste Strecken-/Lagergeschäft. Stufe 2 / 2019, gültig vom 4. Februar bis 30. April 2019.

Landor, 2022. Düngerpreisliste Strecken-/Lagergeschäft. Stufe 1 / 2022, gültig vom 1. Dezember 2021 bis 31. Januar 2022 oder bis auf Widerruf.

Ashtari, A.K., Majd, A.M.S., Riskowski, G.L., Mukhtar, S., Zhao, L.Y. 2016. Removing ammonia from air with a constant pH, slightly acidic water spray wet scrubber using recycled scrubbing solution. Front. Env. Sci. Eng. 10(6): 10.

Bittman, S., Dedina, M., Howard, C.M., Oenema, O., Sutton, M.A. 2014. Options for ammonia mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen. Centre for Ecology and Hydrology, Edinburgh, UK.

BAFU, BLW. 2011. Baulicher Umweltschutz in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Umwelt-Vollzug Nr. 1101. Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU, BLW. 2021. Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft 2012. Teilrevidierte Ausgabe 2021. Umwelt-Vollzug Nr. 1225. Bundesamt für Umwelt, Bern.

BAFU, BLW. 2016. Umweltziele Landwirtschaft. Statusbericht 2016. Umwelt-Wissen Nr. 1633. Bern: Bundesamt für Umwelt (BAFU) und Bundesamt für Landwirtschaft (BLW).

BFS. 2020. Datenauszug der Landwirtschaftlichen Betriebszählung 2019. Pers. Mitteilung. M. Bencheikh, Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel.

BLW. 2021. Agrarbericht 2020. Bern: Bundesamt für Landwirtschaft BLW.

Brunner, K. 2010. Abluftreinigungsverfahren zur Minderung von Ammoniak- und Geruchsemissionen aus Intensivtierställen – Erfahrungen in der Schweiz und Perspektiven. Bericht vom 25. März 2008, aktualisiert 12. Juli 2010. CH-9008 St.Gallen: KBO GmbH, Oekologie + Managementsysteme.

Cao, T.T., Zheng, Y.H., Zhang, Y., Wang, Y., Cong, Q.X., Wang, Y.H., Dong, H.M. 2022. Pilot study on gaseous pollution removal efficiency of acid scrubbing in a broiler house. Agric. Ecosyst. Environ. 335: 8.

Cercl'Air. 2011. Abluftreinigungsanlagen bei Tierhaltungsanlagen. Technische Informationen zum Vollzug Luftreinhaltung. Empfehlung Nr. 21-D. https://cerclair.ch/assets/pdf/21D_2011-05-19_D_Abluftreinigung_bei_Tierhaltungsanlagen.pdf (28.07.2022).

Departement für Bau und Umwelt, Amt für Umwelt, 2020. Massnahmenplan Lufthygiene Kanton Thurgau 2021–2030. Aktualisierung 2020. URL:

https://umwelt.tg.ch/public/upload/assets/109233/Massnahmenplan%20Luft_2020.pdf (15.08.2020).

De Vries, J.W., Melse, R.W. 2017. Comparing environmental impact of air scrubbers for ammonia abatement at pig houses: A life cycle assessment. Biosyst. Eng. 161: 53-61.

Dumont, É. 2018. Impact of the treatment of NH_3 emissions from pig farms on greenhouse gas emissions. Quantitative assessment from the literature data. New Biotechnol. 46: 31-37.

Dumont, E., Hamon, L., Lagadec, S., Landrain, P., Landrain, B., Andrès, Y. 2014. NH_3 biofiltration of piggery air. J. Environ. Manage. 140: 26-32.

Dumont, E., Lagadec, S., Landrain, P., Landrain, B., Andres, Y. 2014. N_2O generation resulting from piggery air biofiltration. Chem. Eng. J. 248: 337-341.

Dumont, É., Lagadec, S., Guingand, N., Loyon, L., Amrane, A., Couroussé, V., Couvert, A. 2020a. Ammonia removal using biotrickling filters: part A: determination of the ionic nitrogen concentration of water using electrical conductivity measurement. ChemEngineering 4(3): 49.

Dumont, E., Lagadec, S., Guingand, N., Loyon, L., Amrane, A., Couvert, A. 2020b. Lavage d'air en porcheries : contrôle du fonctionnement par mesure de conductivité. J. Rech. Porc. 52: 347-348.

Dumont, É., Lagadec, S., Guingand, N., Loyon, L., Amrane, A., Couvert, A. 2020c. Ammonia removal using biotrickling filters: part B: determination of the nitrogen accumulation in the scrubbing liquid at a livestock facility using electrical conductivity measurement. ChemEngineering 4(3).

Dumont, E., Poser, M., Peu, P., Couvert, A. 2020d. Biotrickling filters for the removal of gaseous ammonia emissions from livestock facilities. Theoretical prediction of removal efficiency and experimental validation. Chem. Eng. J. 402: 126188.

Energie und Umwelt (uwe) 2021. Bau-, Umwelt- und Wirtschaftsdepartement, Energie und Umwelt, uwe, Kanton Luzern. URL: https://uwe.lu.ch/-/media/UWE/Dokumente/Themen/Luft/Abluftreinigung_in_der_Tierhaltung.pdf (16.08.2022).

Fischler, M., Jenni, S., Uebersax, A. 2018. Mit Chemowäscher gegen Ammoniak. Bauernzeitung 107(47): 25.

Gebhardt-Henrich, S.G., Fröhlich, E.K.F. 2011. Auslaufnutzung von Legehennen in verschiedenen Herdengrössen in stationären Ställen. SGZ: 145-153.

Gebhardt-Henrich, S.G., Toscano, M.J., Frohlich, E.K.F. 2014. Use of outdoor ranges by laying hens in different sized flocks. Appl. Anim. Behav. Sci. 155: 74-81.

Giner-Santonja, G., Georgitzikis, K., Scalet, B.M., Montobbio, P., Roudier, S. and Delagado Sancho, L. 2017. Best available techniques (BAT) reference document for the intensive rearing of poultry or pigs. EUR 28674 EN. Seville, ES.

Guingand, N. 2014. Influence de la fréquence de vidange des eaux de lavage sur l'efficacité d'unités de lavage d'air sur les émissions d'ammoniac, d'odeurs et de poussières dans le cas de porcheries d'engraissement. Journées Recherche Porcine 46: 193-198.

Guingand, N., Eglin, T. 2016. Impact d'une combinaison lavage-biofiltration sur la réduction des émissions d'odeurs et d'ammoniac en porcherie. J. Rech. Porc. 48: 197-198.

Hadlocon, L.S., Zhao, L.Y., Manuzon, R.B., Elbatawi, I.E. 2014. An acid spray scrubber for recovery of ammonia emissions from a deep-pit swine facility. Trans. ASABE 57(3): 949-960.

Hadlocon, L.J.S., Manuzon, R.B., Zhao, L.Y. 2015. Development and evaluation of a full-scale spray scrubber for ammonia recovery and production of nitrogen fertilizer at poultry facilities. Environ. Technol. 36(4): 405-416.

Hafner, S.D., Pacholski, A., Bittman, S., Carozzi, M., Chantigny, M., Genermont, S., Häni, C., Hansen, M.N., Huijsmans, J., Kupper, T., Misselbrook, T., Neftel, A., Nyord, T., Sommer,

S.G. 2019. A flexible semi-empirical model for estimating ammonia volatilization from field-applied slurry. Atmos. Environ. 199: 474-484.

Hahne, J. 2010. Multistage exhaust air treatment for poultry farming. Landtechnik 65(5): 334-337.

Hahne, J. 2021. Verschärfung der Anforderungen an die Reduzierung von Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung. Jahrbuch Agrartechnik 2020 32, 2020.

Hahne, J. 2022. Bewertung der Wirksamkeit von Biotrickling-Filtern zur Abluftreinigung in der Mastschweinehaltung. Gefahrstoffe 82(05-06): 148-154.

Hahne, J. 2019. Monitoring of biologically working trickling filters at pig fattening stables. Landtechnik 74(6): 145–155.

Hahne, J., Arends, F., Beverborg, R., Niehoff, A.-L., Bönsch, S., Hortmann-Scholten, A. 2016. Aktuelle Entwicklung Kosten-Nutzenanalyse und Vollzugsempfehlungen für den Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Tierhaltung. Forschungskennzahl 31559 UBA-FB-002370. Berlin, Germany: Umweltbundesamt.

Hahne, J., Pfeifer, T. 2017. Ammonia separation in novel bio filters. Landtechnik 72(2): 76–89.

Hahne, J., Vorlop, K.-D. 2004. Waste air scrubbers useful in reducing ammonia emissions from piggeries. Landtechnik 59(3): 106-107.

Hoffmann, C., Grub, A., Albiker, D., Zweifel, R. 2013. Masthybridlinien: Benutzung des Aussenklimabereichs, Einstreuqualität und Gefieder. Agrarforschung 4(7-8): 352-355.

KOLAS. 2013. Themenblatt Abluftreinigung für zwangsgelüftete Stallanlagen. Konferenz der Landwirtschaftsämter der Schweiz (KOLAS) und Bundesamt für Landwirtschaft (BLW). http://www.blw.admin.ch/themen/00364/01408/index.html?lang=de (13.03.2015). .

Kristiansen, A., Pedersen, K.H., Nielsen, P.H., Nielsen, L.P., Nielsen, J.L., Schrarmm, A. 2011. Bacterial community structure of a full-scale biofilter treating pig house exhaust air. Syst. Appl. Microbiol. 34(5): 344-352.

Künzler, R., Weyermann, I. 2022. Projekt Absenkpfad Nährstoffverluste IGAS – SBV – SALS. Schlussbericht v2.0. URL: https://www.igas-cisa.ch/wp-content/uploads/2022/05/bericht-absenkpfadnahrstoffe-final-v2.pdf (15.08.2020).

Kupper, T. 2021. Technische Parameter Modell Agrammon (Stand 2021) (http://www.agrammon.ch/dokumente-zum-download/). Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen.

Kupper, T., Häni, C., Bretscher, D., Zaucker, F. 2022. Ammoniakemissionen der schweizerischen Landwirtschaft 1990 bis 2020 URL: http://www.agrammon.ch/dokumente-zum-download/. Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen.

Kupper, T., Häni, C., Neftel, A., Kincaid, C., Bühler, M., Amon, B., VanderZaag, A.C. 2020. Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - a review. Agr. Ecosyst. Environ. 300(106963): 1-18.

Lagadec, S., Bellec, F., Masson, L., Dappelo, C., Landrain, P., Guingand, N. 2015. Enquête sur 31 laveurs d'air de porcherie en Bretagne, clés d'amélioration de l'efficacité sur l'abattement de l'ammoniac. J. Rech. Porc. 47: 177-182.

Lagadec, S., Dumont, E., Guingand, N., Loyon, L., Le Devehat, P., Amrane, A., Couvert, A. 2021. Mise au point de l'outil TARA pour dimensionner et optimiser le fonctionnement d'un laveur d'air. J. Rech. Porc. 53: 347-352.

Landesumweltamt Brandenburg. 2005. Biologische Abluftreinigungsanlagen Erfahrungsbericht zu den Anwendungsmöglichkeiten. Fachbeiträge des Landesumweltamtes, Titelreihe – Heft-Nr. 95. Potsdam: Landesumweltamt Brandenburg (LUA) Referat Umweltinformation /Öffentlichkeitsarbeit (S5), Potsdam, D.

Liu, F., Fiencke, C., Guo, J., Rieth, R., Cuhls, C., Dong, R., Pfeiffer, E.-M. 2017a. Bioscrubber treatment of exhaust air from intensive pig production: Case study in northern Germany at mild climate condition. Eng. Life Sci. 17(4): 458-466.

Liu, F., Fiencke, C., Guo, J.B., Rieth, R., Dong, R.J., Pfeiffer, E.M. 2017b. Performance evaluation and optimization of field-scale bioscrubbers for intensive pig house exhaust air treatment in northern Germany. Sci. Total Environ. 579: 694-701.

Martin, J.W., Moore, P.A., Li, H., Ashworth, A.J., Miles, D.M. 2018. Effects of land-applied ammonia scrubber solutions on yield, nitrogen uptake, soil test phosphorus, and phosphorus runoff. J. Environ. Qual. 47(2): 263-269.

Melse, R.W., Hol, J.M.G. 2012. Measures to reduce fine dust emission from poultry houses: biofiltration of exhaust air of a manure drying system at a barn for laying hens (in Dutch). Report 498. 30.

Melse, R.W., Hol, J.M.G., Mosquera, J., Nijeboer, G.M., Winkel, A., Huis in 't Veld, J.W.H., Van Hattum, T.G., Kwikkel, R.K., Dousma, F., Ogink, N.W.M. 2011. Measurement program on experimental multi-pollutant air scrubbers at animal houses. Report 380: 76.

Melse, R.W., Mol, G. 2004. Odour and ammonia removal from pig house exhaust air using a biotrickling filter. Water Sci Technol 50(4): 275-282.

Melse, R.W., Mosquera, J. 2014. Nitrous oxide (N_2O) emissions from biotrickling filters used for ammonia removal at livestock facilities. Water Sci. Technol. 69(5): 994-1003.

Melse, R.W., Ogink, N.W.M. 2005. Air scrubbing techniques for ammonia and odor reduction at livestock operations: Review of on-farm research in the Netherlands. Trans. ASAE 48(6): 2303-2313.

Melse, R.W., Ogink, N.W.M., Rulkens, W.H. 2009. Overview of European and Netherlands' regulations on airborne emissions from intensive livestock production with a focus on the application of air scrubbers. Biosyst. Eng. 104(3): 289-298.

Melse, R.W., Ploegaert, J. 2011. Discharge water control by electrical conductivity measurement at a bioscrubber (in Dutch). Report 435. Wageningen UR Livestock Research.

Melse, R.W., Ploegaert, J.P.M., Ogink, N.W.M. 2012a. Biotrickling filter for the treatment of exhaust air from a pig rearing building: Ammonia removal performance and its fluctuations. Biosyst. Eng. 113(3): 242-252.

Melse, R.W., van Hattum, T.G., Huis in ’t Veld, J.W.H., Gerrits, F.A. 2012b. Measurements on two air scrubbing systems on broiler houses with heat exchanger for inlet ventilation air (in Dutch with English summary). Report 503. Wageningen, The Netherlands: Livestock Research, Wageningen UR.

Melse, R.W., Hofschreuder, P., Ogink, N.W.M. 2012c. Removal of particulate matter (PM10) by air scrubbers at livestock facilities: results of an on-farm monitoring program. Trans. ASABE 55(2): 689-698.

Moore, P.A., Li, H., Burns, R., Miles, D., Maguire, R., Ogejo, J., Reiter, M.S., Buser, M.D., Trabue, S. 2018. Development and testing of the ARS air scrubber: a device for reducing ammonia emissions from animal rearing facilities. Front. Sust. Food Sys. 2: 23.

Mostafa, E., Hoelscher, R., Diekmann, B., Ghaly, A.E., Buescher, W. 2017. Evaluation of two indoor air pollution abatement techniques in forced-ventilation fattening pig barns. Atmos. Pollut. Res. 8(3): 428-438.

Mostafa, E., Selders, A., Gates, R.S., Buescher, W. 2020. Pig barns ammonia and greenhouse gas emission mitigation by slurry aeration and acid scrubber. Environ. Sci. Pollut. Res. 27(9): 9444-9453.

Mosquera, J., Edouard, N., Guiziou, F., Melse, R.W., Riis, A.L., Sommer, S.G., Brusselman, E. 2014. Decision document on the revision of the VERA protocol on air cleaning technologies. Rapport 767. Wageningen, NL: Livestock Research Wageningen UR.

Mosquera, J., Hol, J.M.G., Melse, R.W., Winkel, A., Nijeboer, G.M., Ploegaert, J.P.M., Ogink, N.W.M., Aarnink, A.J.A. 2011. Dust emission from animal houses: Air scrubbing

techniques (in Dutch with English summary). Report 295. Lelystad: Wagenin-gen UR Livestock Research.

Olfs, H.-W., Fuchs, M., Ortseifen, U., von Schintling-Horny, L., von Chappuis, A., Zerulla, W., Erdle, K. 2012. DLG-Merkblatt 373: Schwefel-Düngung effizient gestalten. DLG, Frankfurt/Main.

Ottosen, L.D.M., Juhler, S., Guldberg, L.B., Feilberg, A., Revsbech, N.P., Nielsen, L.P. 2011. Regulation of ammonia oxidation in biotrickling airfilters with high ammonium load. Chem. Eng. J. 167(1): 198-205.

Pongkua, W., Thiravetyan, P., Dumont, E. 2020. New tool for the determination of the nitrogen accumulation rate in the washing liquid of a biotrickling filter treating ammonia emissions. Chem. Eng. J. 397.

Rentsch, D. 2022. Luft waschen: teuer aber effektiv. die grüne 9: 56-61.

Richner, W., Flisch, R., Mayer, J., Schlegel, P., Zähner, M., Menzi, H., 2017. 4/ Eigenschaften und Anwendung von Düngern, in: Richner, W., Sinaj, S. (Eds.), Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz / GRUD 2017. Agrarforschung Schweiz 8 (6) Spezialpublikation, pp. 4/1-4/23.

Scherer, J. 2018. Mehr Tiere, aber sauberere Luft. Bauernzeitung 107(51): 12.

Schweizerischer Bundesrat. 2021. Langfristige Klimastrategie der Schweiz. URL: https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050/klimastrategie-2050.html (10.08.2022).

Shi, S.L., Tong, B.X., Wang, X.F., Luo, W.H., Tan, M.X., Wang, H.L., Hou, Y. 2022. Recovery of nitrogen and phosphorus from livestock slurry with treatment technologies: A meta-analysis. Waste Manage. 144: 313-323.

Sinaj, S., Charles, R., Baux, A., Dupuis, B., Hiltbrunner, J., Levy, L., Pellet, D., Blanchet, G., Jeangros, B., 2017. 8/ Düngung von Ackerkulturen, in: Richner, W., Sinaj, S. (Eds.), Grundlagen für die Düngung landwirtschaftlicher Kulturen in der Schweiz / GRUD 2017. Agrarforschung Schweiz 8 (6) Spezialpublikation, pp. 8/1-8/46.

Spoelstra, J., Leal, K.A., Senger, N.D., Schiff, S.L., Post, R. 2021. Isotopic characterization of sulfate in a shallow aquifer impacted by agricultural fertilizer. Groundwater 59(5): 658-670.

Strohmaier, C. 2020. Exhaust air treatment systems for the mitigation of dust, ammonia and odour from poultry housing. Landwirtschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität.

Strohmaier, C., Krommweh, M.S., Büscher, W. 2020. Suitability of different filling materials for a biofilter at a broiler fattening facility in terms of ammonia and odour reduction. Atmosphere 11(1).

Theobald, M.R., Vivanco, M.G., Aas, W., Andersson, C., Ciarelli, G., Couvidat, F., Cuvelier, K., Manders, A., Mircea, M., Pay, M.T., Tsyro, S., Adani, M., Bergström, R., Bessagnet, B., Briganti, G., Cappelletti, A., D'Isidoro, M., Fagerli, H., Mar, K., Otero, N., Raffort, V., Roustan, Y., Schaap, M., Wind, P., Colette, A. 2019. An evaluation of European nitrogen and sulfur wet deposition and their trends estimated by six chemistry transport models for the period 1990–2010. Atmos. Chem. Phys. 19(1): 379-405.

Van der Heyden, C., Demeyer, P., Volcke, E.I.P. 2015. Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: State-of-the-art and perspectives. Biosyst. Eng. 134: 74-93.

Van der Heyden, C., Brusselman, E., Volcke, E.I.P., Demeyer, P. 2016. Continuous measurements of ammonia, nitrous oxide and methane from air scrubbers at pig housing facilities. J. Environ. Manage. 181: 163-171.

Van der Heyden, C., Volcke, E.I.P., Brusselman, E., Demeyer, P. 2019. Comparative 1-year performance study of two full-scale biotrickling filters for ammonia removal including nitrous oxide emission monitoring. Biosyst. Eng. 188: 178-189.

Van der Heyden, C., Vanthillo, B., Pieters, J.G., Demeyer, P., Volcke, E.I.P. 2016. Mechanistic modeling of pollutant removal, temperature, and evaporation in chemical air scrubbers. Chem. Eng. Technol. 39(10): 1785-1796.

Webb, J., Sommer, S.G., Kupper, T., Groenestein, C.M., Hutchings, N., Eurich-Menden, B., Rodhe, L., Misselbrook, T., Amon, B., 2012. Emissions of ammonia, nitrous oxide and methane during the management of solid manures. A review, in: Lichtfouse, E. (Ed.), Agroecology and Strategies for Climate Change. Springer-Verlag GmbH, Heidelberg, Germany, pp. 67-108.

Wood, D.J., Van Heyst, B.J. 2016. A review of ammonia and particulate matter control strategies for poultry housing. Trans. ASABE 59(1): 329-344.

Wunderlin, P., Mohn, J., Joss, A., Emmenegger, L., Siegrist, H. 2012. Mechanisms of N_2O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. Water Res 46(4): 1027-1037.

Zhao, Y., Aarnink, A.J.A., de Jong, M.C.M., Ogink, N.W.M., Koerkamp, P. 2011. Effectiveness of multi-stage scrubbers in reducing emissions of air pollutants from pig houses. Trans. ASABE 54(1): 285-293.

Anhang 1

Schätzung der Emissionsreduktion der Ausbringung von Abschlämmwasser basierend auf dem Modell ALFAM2

Tabelle 11: Schätzung der Emissionen bei der Ausbringung von Abschlämmwasser (Annahme: Abschlämmwasser 1:1 verdünnt; pH-Wert <6.0)

Input variable	Value
Slurry application (t/ha)	1.5
TAN concentration (kg/t)	20
Application method	Trailing hose
Slurry dry matter (%)	10
Air temperature (°C)	12
Wind speed (m/s)	1.5
Rainfall rate (mm/h)	0
Incorporation	None
Incorporation time (h)	
Acidification?	Yes, pH 6.0
Duration of emission (h)	72

Output variable	Value
Applied TAN (kg/ha)	30.0
Cumulative emission at 72 h (kg/ha)	1.8
Cumulative emission at 72 h (%)	5.9

Messages

Tabelle 12: Schätzung der Emissionen bei der Ausbringung von Abschlämmwasser (Annahme: Abschlämmwasser 1:1 verdünnt; pH-Wert >6.4)

Input variable	Value
Slurry application (t/ha)	1.5
TAN concentration (kg/t)	20
Application method	Trailing hose
Slurry dry matter (%)	10
Air temperature (°C)	12
Wind speed (m/s)	1.5
Rainfall rate (mm/h)	0
Incorporation	None
Incorporation time (h)	
Acidification?	No
Duration of emission (h)	72

Output variable	Value
Applied TAN (kg/ha)	30.0
Cumulative emission at 72 h (kg/ha)	6.5
Cumulative emission at 72 h (%)	21.7

Messages

Um die ausgebrachte TAN-Menge auf rund 30 kg N pro ha zu begrenzen, wurde die Ausbringmenge auf 1.5 t pro ha begrenzt. Bei einer Verdünnung von 1:10, kann die Ausbringmenge auf 7.2 t pro ha erhöht werden (bei N-Menge pro ha von rund 30 kg N); der pH Wert dürfte ansteigen, die Emission aufgrund des tieferen TS-Gehalts aber kaum ansteigen.

Tabelle 13: Schätzung der Emissionen bei der Ausbringung von Rindviehgülle 1:1 verdünnt zum vergleich mit den Werten des Abschlämmwassers

Input variable	Value
Slurry application (t/ha)	25
TAN concentration (kg/t)	1.05
Application method	Trailing hose
Slurry dry matter (%)	4.5
Air temperature (°C)	12
Wind speed (m/s)	1.5
Rainfall rate (mm/h)	0
Incorporation	None
Incorporation time (h)	
Acidification?	No
Duration of emission (h)	72

Output variable	Value
Applied TAN (kg/ha)	28.8
Cumulative emission at 72 h (kg/ha)	4.4
Cumulative emission at 72 h (%)	16.6

Messages

Resultate des ALFAM2 Modells (Hafner et al., 2019)

Anhang 2

Daten des Betriebs vor Realisierung des Bauprojekts

	XX3002_XXXXX_XXXX_XXXXXX_vor_27.1.2021_TK		
	thomas.kupper@bfh.ch		
	AGRAMMON 6.1.4 Einzelbetriebsmodell - Single		
	04.02.2022 22:50:05		
Stall Milchkühe	Durchschnittliche Milchleistung pro Kuh	9100.000	kg/Jahr
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Sommer Heu erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Sommer Maissilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Sommer Maiswürfel erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Maissilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Grassilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Maiswürfel erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Kartoffeln erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Futterrüben erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Durchschnittliche Kraftfuttermenge pro Kuh und Tag im Sommer	0.000	kg/Tag
Stall Milchkühe	Durchschnittliche Kraftfuttermenge pro Kuh und Tag im Winter	0.000	kg/Tag
Stall Milchkühe	Tierkategorie	dairy_cows	-
Stall Milchkühe	Anzahl Tiere	34.000	-
Stall Milchkühe	Anzahl Tierplätze im Stall	34.000	-
Stall Milchkühe	N Ausscheidung	100.000	kg N/Jahr
Stall Milchkühe	TAN Anteil der N Ausscheidung	66.520	%
Stall Milchkühe	Aufstallung	Tied_Housing_Slurry	-
Stall Milchkühe	Emissionsmindernde Massnahmen bei Laufställen	none	-
Stall Milchkühe	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Milchkühe	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	80.000	Tage/Jahr
Stall Milchkühe	Laufhof	available_rough-age_is_not_sup-plied_in_the_exer-cise_yard	-
Stall Milchkühe	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Milchkühe	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Milchkühe	Jährliche Weidetage	210.000	Tage/Jahr
Stall Milchkühe	Tägliche Weidestunden	9.000	Stunden/Tag
Stall Milchkühe (3183)	Durchschnittliche Milchleistung pro Kuh	7700.000	kg/Jahr
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Sommer Heu erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Sommer Maissilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Sommer Maiswürfel erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Winter Maissilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Winter Grassilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Winter Maiswürfel erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Winter Kartoffeln erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Anteil der Tiere, die im Winter Futterrüben erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Durchschnittliche Kraftfuttermenge pro Kuh und Tag im Sommer	0.000	kg/Tag
Stall Milchkühe (3183)	Durchschnittliche Kraftfuttermenge pro Kuh und Tag im Winter	0.000	kg/Tag
Stall Milchkühe (3183)	Tierkategorie	dairy_cows	-
Stall Milchkühe (3183)	Anzahl Tiere	11.000	-

Stall Milchkühe (3183)	Anzahl Tierplätze im Stall	15.000	-
Stall Milchkühe (3183)	N Ausscheidung	100.000	kg N/Jahr
Stall Milchkühe (3183)	TAN Anteil der N Ausscheidung	66.520	%
Stall Milchkühe (3183)	Aufstallung	Tied_Housing_Slurry_Plus_Solid_Manure	-
Stall Milchkühe (3183)	Emissionsmindernde Massnahmen bei Laufställen	none	-
Stall Milchkühe (3183)	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	75.000	Tage/Jahr
Stall Milchkühe (3183)	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Milchkühe (3183)	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Milchkühe (3183)	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Milchkühe (3183)	Jährliche Weidetage	210.000	Tage/Jahr
Stall Milchkühe (3183)	Tägliche Weidestunden	7.000	Stunden/Tag
Stall Tränker	Tierkategorie	fattening_calves	-
Stall Tränker	Anzahl Tiere	6.000	-
Stall Tränker	Anzahl Tierplätze im Stall	8.000	-
Stall Tränker	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Stall Tränker	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Tränker	Aufstallung	Loose_Housing_Deep_Litter	-
Stall Tränker	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-
Stall Tränker	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Tränker	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	0.000	Tage/Jahr
Stall Tränker	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Tränker	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Tränker	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Tränker	Jährliche Weidetage	0.000	Tage/Jahr
Stall Tränker	Tägliche Weidestunden	0.000	Stunden/Tag
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Tierkategorie	heifers_1st_yr	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Anzahl Tiere	2.000	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Anzahl Tierplätze im Stall	2.000	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Aufstallung	Loose_Housing_Deep_Litter	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	80.000	Tage/Jahr

Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Jährliche Weidetage	100.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Tägliche Weidestunden	9.000	Stunden/Tag
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Tierkategorie	heifers_2nd_yr	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Anzahl Tiere	1.000	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Anzahl Tierplätze im Stall	1.000	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Aufstallung	Tied_Housing_Slurry_Plus_Solid_Manure	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	75.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Jährliche Weidetage	210.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Tägliche Weidestunden	7.000	Stunden/Tag
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Tierkategorie	heifers_3rd_yr	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Anzahl Tiere	3.000	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Anzahl Tierplätze im Stall	3.000	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Aufstallung	Tied_Housing_Slurry_Plus_Solid_Manure	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-

Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	77.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Laufhof	available_rough-age_is_not_sup-plied_in_the_exer-cise_yard	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Jährliche Weidetage	210.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Tägliche Weidestunden	8.000	Stunden/Tag
Legehennen	Tierkategorie	layers	-
Legehennen	Anzahl Tiere	20.000	-
Legehennen	Anzahl Tierplätze im Stall	20.000	-
Legehennen	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Legehennen	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Legehennen	Haben die Tiere Zugang zu einer Weide?	yes	-
Legehennen	Aufstallung	deep_litter	-
Legehennen	Entmistungsintervall bei Kotbandentmistung	no_manure_belt	-
Legehennen	Tränkesystem	bell_drinkers	-
Legehennen	Abluftreinigung	none	-
Legehennen	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	Anteil von direkt ohne Lagerung ausgebrachtem Geflü-gelmist	0.000	%
	Anteil von gedeckt gelagertem Kot oder Mist aus der Geflügelhaltung	0.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Geflügel-mist (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	Anteil von direkt ohne Lagerung ausgebrachtem Mist von Rindvieh	0.000	%
	Anteil von gedeckt gelagertem Mist von Rindvieh	0.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Mist Rindvieh (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	Anteil von direkt ohne Lagerung ausgebrachtem Schweinemist	0.000	%
	Anteil von gedeckt gelagertem Schweinemist	0.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Schwei-nemist (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G5; Sammler	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G5; Sammler	Enthält Rindergülle	yes	-
G5; Sammler	Enthält Schweinegülle	no	-
G5; Sammler	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllela-ger (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G5; Sammler	Volumen des Güllelagers	84.000	m3
G5; Sammler	Tiefe des Güllelagers	1.400	m
G5; Sammler	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G3; Grube klein	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G3; Grube klein	Enthält Rindergülle	yes	-
G3; Grube klein	Enthält Schweinegülle	no	-

G3; Grube klein	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G3; Grube klein	Volumen des Güllelagers	147.000	m3
G3; Grube klein	Tiefe des Güllelagers	1.400	m
G3; Grube klein	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G6; Grube oben (3183)	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G6; Grube oben (3183)	Enthält Rindergülle	yes	-
G6; Grube oben (3183)	Enthält Schweinegülle	no	-
G6; Grube oben (3183)	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G6; Grube oben (3183)	Volumen des Güllelagers	51.000	m3
G6; Grube oben (3183)	Tiefe des Güllelagers	1.200	m
G6; Grube oben (3183)	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G7; Grube unten (3183)	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G7; Grube unten (3183)	Enthält Rindergülle	yes	-
G7; Grube unten (3183)	Enthält Schweinegülle	no	-
G7; Grube unten (3183)	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G7; Grube unten (3183)	Volumen des Güllelagers	62.000	m3
G7; Grube unten (3183)	Tiefe des Güllelagers	1.200	m
G7; Grube unten (3183)	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G2; Grube gross	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G2; Grube gross	Enthält Rindergülle	yes	-
G2; Grube gross	Enthält Schweinegülle	no	-
G2; Grube gross	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G2; Grube gross	Volumen des Güllelagers	382.000	m3
G2; Grube gross	Tiefe des Güllelagers	2.900	m
G2; Grube gross	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G4; Silo	Abdeckung des Güllelagers	uncovered	-
G4; Silo	Enthält Rindergülle	yes	-
G4; Silo	Enthält Schweinegülle	no	-
G4; Silo	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G4; Silo	Volumen des Güllelagers	650.000	m3
G4; Silo	Tiefe des Güllelagers	4.500	m
G4; Silo	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G1; Silo	Abdeckung des Güllelagers	uncovered	-
G1; Silo	Enthält Rindergülle	yes	-
G1; Silo	Enthält Schweinegülle	no	-
G1; Silo	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G1; Silo	Volumen des Güllelagers	520.000	m3
G1; Silo	Tiefe des Güllelagers	4.000	m
G1; Silo	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
	Anteil Gülleausbringung mit Prallteller/Werfer	50.000	%
	Anteil Gülleausbringung mit Schleppschlauch	50.000	%
	Anteil Gülleausbringung mit Schleppschuh	0.000	%
	Anteil Gülleausbringung mit Gülledrill	0.000	%
	Anteil Gülleausbringung mittels tiefer Injektion	0.000	%

	Gülleverdünnung (Liter Wasser pro Liter unverdünnter Gülle)	0.800	1:x
	Mittlere Ausbringungsmenge pro Gabe	25.000	m3/ha
	Anteil Gülleausbringung am Abend nach 18:00 Uhr	0.000	%
	Bringen Sie Gülle an für die Jahreszeit besonders warmen Tagen aus?	sometimes	-
	Ausbringung von Gülle im Sommer (Juni, Juli, August): Anteil in Prozent	50.000	%
	Ausbringung von Gülle von September bis und mit Mai: Anteil in Prozent	50.000	%
	Anteil Gärgülle	0.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Gülleausbringung (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 1 Stunde: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 4 Stunden: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 8 Stunden: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 1 Tag: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 3 Tagen: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von mehr als 3 Tagen: Anteil in Prozent	0.000	%
	Keine Einarbeitung von Mist: Anteil in Prozent	100.000	%
	Ausbringung von Mist im Sommer (Juni, Juli, August): Anteil in Prozent	50.000	%
	Ausbringung von Mist von September bis und mit Mai: Anteil in Prozent	50.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Mistausbringung (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	pH-Wert des Bodens	unknown	-
	Ammonsalpeter: Verbrauch	1196.296	kg /Jahr
	Ammonsalpeter: N-Gehalt (siehe Spalte Hilfe)	27.000	%
	Kalk-Ammonsalpeter: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Kalk-Ammonsalpeter: N-Gehalt	20.000	%
	Ammoniumsulfat: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Ammoniumsulfat: N-Gehalt	21.000	%
	Harnstoff: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Harnstoff: N-Gehalt	46.000	%
	Sulfamid: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Sulfamid: N-Gehalt	30.000	%
	Kalksalpeter: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Kalksalpeter: N-Gehalt	15.500	%
	Kalkstickstoff: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Kalkstickstoff: N-Gehalt	20.000	%
	Entec 26% + 13S: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Entec 26% + 13S: N-Gehalt	26.000	%
	NP-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	NP-Dünger: N-Gehalt	15.000	%
	NK-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	NK-Dünger: N-Gehalt	11.500	%
	NPK-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	NPK-Dünger: N-Gehalt	12.500	%

	Entec als NP, NPK, mit/ohne Mg, S oder Spurenelemente: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Entec als NP, NPK, mit/ohne Mg, S oder Spurenelemente: N-Gehalt	18.500	%
	Anderer mineralischer N-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Anderer mineralischer N-Dünger: N-Gehalt	0.000	%
	Kompost (in t Frischsubstanz pro Jahr)	0.000	t/Jahr
	Festes Gärgut von gewerblich-industriellen Anlagen (in t Frischsubstanz pro Jahr)	0.000	t/Jahr
b	Flüssiges Gärgut von gewerblich-industriellen Anlagen	700.000	m3/Jahr

Anhang 3

Daten des Betriebs nach Realisierung des Bauprojekts

	XX3002_XXXXX_XXXX_XXXXXX nach_27.1.2021_ohne Kotbandbel.RV _LH_TK Abschlw rev Güllellager_ausbr Legehennen ohne Ablr		
	thomas.kupper@bfh.ch		
	AGRAMMON 6.1.4 Einzelbetriebsmodell - Single		
	05.02.2022 00:52:41		
Stall Milchkühe	Durchschnittliche Milchleistung pro Kuh	9100.000	kg/Jahr
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Sommer Heu erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Sommer Maissilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Sommer Maiswürfel erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Maissilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Grassilage erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Maiswürfel erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Kartoffeln erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Anteil der Tiere, die im Winter Futterrüben erhalten	0.000	%
Stall Milchkühe	Durchschnittliche Kraftfuttermenge pro Kuh und Tag im Sommer	0.000	kg/Tag
Stall Milchkühe	Durchschnittliche Kraftfuttermenge pro Kuh und Tag im Winter	0.000	kg/Tag
Stall Milchkühe	Tierkategorie	dairy_cows	-
Stall Milchkühe	Anzahl Tiere	30.000	-
Stall Milchkühe	Anzahl Tierplätze im Stall	30.000	-
Stall Milchkühe	N Ausscheidung	100.000	kg N/Jahr
Stall Milchkühe	TAN Anteil der N Ausscheidung	66.520	%
Stall Milchkühe	Aufstallung	Tied_Housing_Slurry	-
Stall Milchkühe	Emissionsmindernde Massnahmen bei Laufställen	none	-
Stall Milchkühe	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Milchkühe	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	80.000	Tage/Jahr
Stall Milchkühe	Laufhof	available_rough-age_is_not_sup-plied_in_the_exer-cise_yard	-
Stall Milchkühe	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Milchkühe	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Milchkühe	Jährliche Weidetage	210.000	Tage/Jahr
Stall Milchkühe	Tägliche Weidestunden	9.000	Stunden/Tag
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Tierkategorie	heifers_3rd_yr	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Anzahl Tiere	2.000	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Anzahl Tierplätze im Stall	2.000	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Aufstallung	Tied_Hous-ing_Slurry_Plus_Solid_M anure	-

Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	77.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Jährliche Weidetage	210.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder >2-jährig	Tägliche Weidestunden	8.000	Stunden/Tag
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Tierkategorie	heifers_2nd_yr	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Anzahl Tiere	1.000	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Anzahl Tierplätze im Stall	1.000	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Aufstallung	Tied_Housing_Slurry_Plus_Solid_Manure	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	75.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Jährliche Weidetage	210.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder 1- bis 2-jährig	Tägliche Weidestunden	7.000	Stunden/Tag
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Tierkategorie	heifers_1st_yr	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Anzahl Tiere	2.000	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Anzahl Tierplätze im Stall	2.000	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr

Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Aufstallung	Loose_Housing_Deep_Litter	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	80.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Jährliche Weidetage	100.000	Tage/Jahr
Stall Aufzuchtrinder unter 1-jährig	Tägliche Weidestunden	9.000	Stunden/Tag
Stall Tränker	Tierkategorie	fattening_calves	-
Stall Tränker	Anzahl Tiere	4.000	-
Stall Tränker	Anzahl Tierplätze im Stall	4.000	-
Stall Tränker	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Stall Tränker	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Stall Tränker	Aufstallung	Loose_Housing_Deep_Litter	-
Stall Tränker	Emissionsmindernde Massnahme bei Laufställen	none	-
Stall Tränker	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Tränker	Jährliche Zutrittsdauer zum Laufhof	0.000	Tage/Jahr
Stall Tränker	Laufhof	available_roughage_is_not_supplied_in_the_exercise_yard	-
Stall Tränker	Laufhoftyp	solid_floor	-
Stall Tränker	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Laufhof (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
Stall Tränker	Jährliche Weidetage	0.000	Tage/Jahr
Stall Tränker	Tägliche Weidestunden	0.000	Stunden/Tag
Legehennen	Tierkategorie	layers	-
Legehennen	Anzahl Tiere	6000.000	-
Legehennen	Anzahl Tierplätze im Stall	6000.000	-
Legehennen	N Ausscheidung	Standard	kg N/Jahr
Legehennen	TAN Anteil der N Ausscheidung	Standard	%
Legehennen	Haben die Tiere Zugang zu einer Weide?	yes	-
Legehennen	Aufstallung	manure_belt_without_manure_belt_drying_system	-
Legehennen	Entmistungsintervall bei Kotbandentmistung	more_than_4_times_a_month	-
Legehennen	Tränkesystem	drinking_nipples	-
Legehennen	Abluftreinigung	none	-
Legehennen	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Stall (siehe Spalte Hilfe)	75.000	%

	Anteil von direkt ohne Lagerung ausgebrachtem Geflügelmist	0.000	%
	Anteil von gedeckt gelagertem Kot oder Mist aus der Geflügelhaltung	100.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Geflügelmist (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	Anteil von direkt ohne Lagerung ausgebrachtem Mist von Rindvieh	0.000	%
	Anteil von gedeckt gelagertem Mist von Rindvieh	0.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Mist Rindvieh (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	Anteil von direkt ohne Lagerung ausgebrachtem Schweinemist	0.000	%
	Anteil von gedeckt gelagertem Schweinemist	0.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Schweinemist (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G1; Silo	Abdeckung des Güllelagers	uncovered	-
G1; Silo	Enthält Rindergülle	yes	-
G1; Silo	Enthält Schweinegülle	no	-
G1; Silo	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	80.000	%
G1; Silo	Volumen des Güllelagers	520.000	m3
G1; Silo	Tiefe des Güllelagers	4.000	m
G1; Silo	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G5; Sammler	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G5; Sammler	Enthält Rindergülle	yes	-
G5; Sammler	Enthält Schweinegülle	no	-
G5; Sammler	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G5; Sammler	Volumen des Güllelagers	84.000	m3
G5; Sammler	Tiefe des Güllelagers	1.400	m
G5; Sammler	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G6; Grube oben (3183)	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G6; Grube oben (3183)	Enthält Rindergülle	yes	-
G6; Grube oben (3183)	Enthält Schweinegülle	no	-
G6; Grube oben (3183)	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G6; Grube oben (3183)	Volumen des Güllelagers	51.000	m3
G6; Grube oben (3183)	Tiefe des Güllelagers	1.200	m
G6; Grube oben (3183)	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G4; Silo	Abdeckung des Güllelagers	uncovered	-
G4; Silo	Enthält Rindergülle	yes	-
G4; Silo	Enthält Schweinegülle	no	-
G4; Silo	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	80.000	%
G4; Silo	Volumen des Güllelagers	650.000	m3
G4; Silo	Tiefe des Güllelagers	4.500	m
G4; Silo	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G3; Grube klein	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G3; Grube klein	Enthält Rindergülle	yes	-
G3; Grube klein	Enthält Schweinegülle	no	-

G3; Grube klein	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G3; Grube klein	Volumen des Güllelagers	147.000	m3
G3; Grube klein	Tiefe des Güllelagers	1.400	m
G3; Grube klein	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G7; Grube unten (3183)	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G7; Grube unten (3183)	Enthält Rindergülle	yes	-
G7; Grube unten (3183)	Enthält Schweinegülle	no	-
G7; Grube unten (3183)	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G7; Grube unten (3183)	Volumen des Güllelagers	62.000	m3
G7; Grube unten (3183)	Tiefe des Güllelagers	1.200	m
G7; Grube unten (3183)	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
G2; Grube gross	Abdeckung des Güllelagers	solid_cover	-
G2; Grube gross	Enthält Rindergülle	yes	-
G2; Grube gross	Enthält Schweinegülle	no	-
G2; Grube gross	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Güllelager (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
G2; Grube gross	Volumen des Güllelagers	382.000	m3
G2; Grube gross	Tiefe des Güllelagers	2.900	m
G2; Grube gross	Häufigkeit Aufrühren des Güllelagers	7_to_12_times_per_year	-
	Anteil Gülleausbringung mit Prallteller/Werfer	0.000	%
	Anteil Gülleausbringung mit Schleppschlauch	50.000	%
	Anteil Gülleausbringung mit Schleppschuh	50.000	%
	Anteil Gülleausbringung mit Gülledrill	0.000	%
	Anteil Gülleausbringung mittels tiefer Injektion	0.000	%
	Gülleverdünnung (Liter Wasser pro Liter unverdünnter Gülle)	0.800	1:x
	Mittlere Ausbringungsmenge pro Gabe	25.000	m3/ha
	Anteil Gülleausbringung am Abend nach 18:00 Uhr	0.000	%
	Bringen Sie Gülle an für die Jahreszeit besonders warmen Tagen aus?	sometimes	-
	Ausbringung von Gülle im Sommer (Juni, Juli, August): Anteil in Prozent	50.000	%
	Ausbringung von Gülle von September bis und mit Mai: Anteil in Prozent	50.000	%
	Anteil Gärgülle	0.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Gülleausbringung (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 1 Stunde: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 4 Stunden: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 8 Stunden: Anteil in Prozent	0.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 1 Tag: Anteil in Prozent	35.000	%
	Mist eingearbeitet innerhalb von 3 Tagen: Anteil in Prozent	35.000	%

	Mist eingearbeitet innerhalb von mehr als 3 Tagen: Anteil in Prozent	0.000	%
	Keine Einarbeitung von Mist: Anteil in Prozent	30.000	%
	Ausbringung von Mist im Sommer (Juni, Juli, August): Anteil in Prozent	50.000	%
	Ausbringung von Mist von September bis und mit Mai: Anteil in Prozent	50.000	%
	Zusätzliche emissionsmindernde Massnahme Mistausbringung (siehe Spalte Hilfe)	0.000	%
	pH-Wert des Bodens	unknown	-
	Ammonsalpeter: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Ammonsalpeter: N-Gehalt (siehe Spalte Hilfe)	27.000	%
	Kalk-Ammonsalpeter: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Kalk-Ammonsalpeter: N-Gehalt	20.000	%
	Ammoniumsulfat: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Ammoniumsulfat: N-Gehalt	21.000	%
	Harnstoff: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Harnstoff: N-Gehalt	46.000	%
	Sulfamid: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Sulfamid: N-Gehalt	30.000	%
	Kalksalpeter: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Kalksalpeter: N-Gehalt	15.500	%
	Kalkstickstoff: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Kalkstickstoff: N-Gehalt	20.000	%
	Entec 26% + 13S: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Entec 26% + 13S: N-Gehalt	26.000	%
	NP-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	NP-Dünger: N-Gehalt	15.000	%
	NK-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	NK-Dünger: N-Gehalt	11.500	%
	NPK-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	NPK-Dünger: N-Gehalt	12.500	%
	Entec als NP, NPK, mit/ohne Mg, S oder Spurenelemente: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Entec als NP, NPK, mit/ohne Mg, S oder Spurenelemente: N-Gehalt	18.500	%
	Anderer mineralischer N-Dünger: Verbrauch	0.000	kg /Jahr
	Anderer mineralischer N-Dünger: N-Gehalt	0.000	%
	Kompost (in t Frischsubstanz pro Jahr)	0.000	t/Jahr
	Festes Gärgut von gewerblich-industriellen Anlagen (in t Frischsubstanz pro Jahr)	0.000	t/Jahr
	Flüssiges Gärgut von gewerblich-industriellen Anlagen	0.000	m3/Jahr

Anhang 4

Tabelle 14: Abscheideleistung von Biowäschern für die Geflügelhaltung und Schweinehaltung

Bezeichnung des Wäschers	Tierkategorien	Abscheide-leistung Mittel %	Abscheideleis-tung (Min./Max.) %	Abscheideleistung (Sommer/Winter) in %	Quelle
Biologischer Abluftwäscher „Pura aer I“	Legehennen			77.7/83.9	DLG Prüfbericht 6397
Biologischer Abluftwäscher	Hähnchen-schwermast	83			Van Middelkoop (1995), reviewed in Melse et al. (2005)
Biological air scrubber with denitrification	Hähnchen-schwermast	85			Melse et al. (2012b)
Biological + denitrification	Geflügel	85	76/93		Melse and Mosquera (2014); Melse et al. (2012b); Melse et al. (2012c); reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Biological + denitrification	Geflügel	71	54/92		Melse and Mosquera (2014); Mosquera et al. (2012b); Melse et al. (2012c); reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Biofilter	Geflügel	47	-60/93		Melse and Hol (2012); reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Hagola Biofilter, Abluftreinigungssystem HAGOLA NH360	Einstreulose Schweinemast		88/-	88/91	DLG Prüfbericht 6380
System RIMU; 1-stufiger	Einstreulose Schweinemast		70/-	93/87	DLG Prüfbericht 6284
KWB Air Systems BV; 3-stufig; physikalisch biologisch	Einstreulose Schweinemast	87	74/-	83/92	DLG Prüfbericht 6243
I.U.S. GmbH, Zweistufige	Einstreulose Schweinemast	82			DLG Prüfbericht 6220
Uniqfill Air b.v., Biologischer Rieselbettreaktor BioCombie; 1-stüfig	Einstreulose Schweinemast		80/-	92/92	DLG Prüfbericht 6178
SKOV, Dreistufige Abluftreinigungsanlage BIO Flex 3-step	Einstreulose Schweinemast	89			DLG Prüfbericht 5955
SKOV, Zweistufige Abluftreinigungsanlage BIO Flex 2-step	Einstreulose Schweinemast	85		86/84	DLG Prüfbericht 5954
Devriecom, Biologic Clean Air Kombiwäscher BCA 70/90; 1-stufig	Einstreulose Schweinemast	80	70/-		DLG Prüfbericht 5879
Dorset Milieutechniek, Abluftreinigungsanlage "Dorset-Rieselbettfilter"	Einstreulose Schweinemast	90	70/-	98/-	DLG Prüfbericht 5702

Bezeichnung des Wäschers	Tierkategorien	Abscheide-leistung Mittel %	Abscheideleis-tung (Min./Max.) %	Abscheideleistung (Sommer/Winter) in %	Quelle
	Schweinemast	65	11/94		Scholtens et al. (1988); reviewed in Melse et al. (2005)
	Schweinemast	78 65 90	33/100 5/98 26/99		Van de Sande-Schellekens and Backus (1993a); Uenk et al. (1993a); reviewed in Melse et al. (2005)
	Schweinemast	79	44	94	Melse and Mol (2004); reviewed in Melse et al. (2005)
Biological	Schweinemast	76 78 79 82 -	50/85 46/92 41/92 42/92 53/74		Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Biological + denitrifica-tion	Schweinemast	86	56/99		Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Biological (untreated) Leca	Schweinemast	66			Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Biofilter	Schweinemast	72 - 15 36 40	9/99 -40/36 -26/83 -9/81 7/83		Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Combined water stage + bio + bio	Schweinemast	86	75/97		Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Combined 3 stüfig bio-logisch	Schweinemast	97 79			Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Biologisch Biologisch + water cur-tain	Schweinemast	85 62	-/- 52/73		Van der Heyden et al. (2016)
3-stufig 2-stufig	Schweinemast	50 70	-40/92 -17/99		Van der Heyden et al. (2019)
	Schweinemast	70	10/99		Dumont (2018)
Waste air scrubber	Schweinemast	61			Hahne and Vorlop (2004)
	Schweinemast	46	17/70		Lagadec et al. (2015)
	Schweinemast	79	35/100		Liu et al. (2017)
Three fieldscale bioscrubbber	Schweinemast	86 80 77			Liu et al. (2017)

Tabelle 15: Abscheideleistung von Chemowäschern für die Geflügelhaltung und Schweinehaltung

Bezeichnung des Wäschers	Tierkategorien	Abscheide-leistung Mittel %	Abscheideleis-tung (Min./Max.) %	Abscheideleistung (Sommer/Winter) in %	Quelle
1-stufiger Chemowäscher mit Tropfenabscheider ASA-S1	Hähnchen-schwermast	78	77/-	77/78	DLG Prüfbericht 6942
Chemischer Abluftwäscher PURA aer II	Legehennen, Junghennen	91	70/-	92/91	DLG Prüfbericht 6406
1-stufiger Chemowäscher mit Tropfenabscheider Inn+ Pollo-L	Legehennen	79	77/-	75/86	DLG Prüfbericht 6344
I.U.S. GmbH 1-stufige Abluftreinigungsanlage mit Tropfenabscheider	Hähnchen-schwermast	94	87.5	94/94	DLG Prüfbericht 6271
1-stufiger Chemowäscher mit Tropfenabscheider Inn+ Pollo-M	Hähnchen-schwermast	90	89/-	89/91	DLG Prüfbericht 6260
2-stufige Abluftreinigungsanlage EMMI	Hähnchen-schwermast	94		94/94	DLG Prüfbericht 6212
Abluftreinigungssystem MagixX-B; 1-stufig	Geflügelkurz-mast	75			DLG Prüfbericht 5952
	Geflügel	90	40/99		Hol and Satter (1998); reviewed in Melse et al. (2005)
	Geflügel	95	76/100		Hol et al. (1999); reviewed in Melse et al. (2005)
Chemical scrubber with moderate acid dosing (pH < 7)	Geflügel	69			Melse et al. (2012)
Chemical	Geflügel	90 98 77 69	40/99 96/100 30/99 48/85		Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
Zweistufige Abluftreinigungsanlage PURO Big Dutchman; chemisch-biologisch	einstreulose Schweinehaltung	80	84/77		DLG Prüfbericht 7226
Magix X-Pig, Big Duthcman; chemisch + biofilter	einstreulose Schweinehaltung	84	81/86	73/-	DLG Prüfbericht 7226
Reventa KunststoffverarbeitungsGmbH & Co. KG, Abluftreinigungsanlage „Abluftwäscher Rohreinbau“	einstreulose Schweinehaltung	87		84/-	DLG Prüfbericht 7226
Big Dutchman, Abluftreinigungsanlage HelixX	einstreulose Schweinehaltung	87		84/-	DLG Prüfbericht 7226
Big Dutchman, Abluftreinigungsanlage HelixX	einstreulose Schweinehaltung	86			DLG Prüfbericht 7226
Uniqfill Air b.v., Abluftreinigungsanlage „Chemowäscher (+)“; 2-stufig, nasschemisch	einstreulose Schweinehaltung	80		80/-	DLG Prüfbericht 7226
	Schweinehaltung	91	77/97		Vrielink et al. (1997); reviewed in Melse et al. (2005)

Bezeichnung des Wäschers	Tierkategorien	Abscheide-leistung Mittel %	Abscheideleis-tung (Min./Max.) %	Abscheideleistung (Sommer/Winter) in %	Quelle
	Schweinehal-tung	98	96/100		Wever and Groot Koerkamp (1999); reviewed in Melse et al. (2005)
	Schweinehal-tung	99	90/100		Verdoes and Zon-derland (1999)
	Schweinehal-tung	88	87/89		Reviewed in Van der Heyden et al. (2015)
	Schweinehal-tung	45*	-23/70		Van der Heyden et al. (2016)
	Schweinehal-tung	95	90/99		Dumont (2018)
water scrubber + wet acid scrubber + biofil-ter	Schweinehal-tung	79 31			Guingand and Eglin (2016)

*pH Abweichung zwischen 3.19 und 6.80

Tabelle 16: Kenndaten von Anlagen zur Abluftreinigung von Geflügelställen. Angabe der Gehalte des Abschlämmwassers (AbSW) als Bereich oder Mittelwert und in Klammern: Minimum, Maximum

Bezeichnung des Wäschers	Tierkategorien	AbSW pH	AbSW NH_4-N (g L^{-1})	AbSW TS (g L^{-1})	Abscheideleistung (Winter/Sommer) in %	Quelle
2-stufige Abluftreinigungsanlage EMMI	Hähnchenschwermast	3.1-3.6	0.038-1.2	-	94.4 / 94.4	DLG Prüfbericht 6212
1-stufiger Chemowäscher mit Tropfenabscheider Inn+ Pollo-M	Hähnchenschwermast	≤3.3	-	-	91.6 / 89.9	DLG Prüfbericht 6260
I.U.S. GmbH 1-stufige Abluftreinigungsanlage mit Tropfenabscheider	Hähnchenschwermast	≤4.0	0.4-4.4*** 9.2-19.95# 0-12.2#	-	94.3 / 94.9£	DLG Prüfbericht 6271
1-stufiger Chemowäscher mit Tropfenabscheider Inn+ Pollo-L	Legehennen (Voliere)	≤3.3	10.6-34.7##	-	85.5 / 74.9	DLG Prüfbericht 6344
Chemischer Abluftwäscher PURA aer II	Legehennen, Junghennen	3.5-4.0*	24** 4.25-7.1*** 9.2-19.95#	-	91.5 / 92.2	DLG Prüfbericht 6406
1-stufiger Chemowäscher mit Tropfenabscheider ASA-S1	Legehennen (Voliere)	3.0-3.5	0.17-6.95*** 1.0-27.2#	-	78.8 / 77.9-	DLG Prüfbericht 6942
Abluftreinigungssystem MagixX-B	Geflügelkurzmast (<35 Tage)	3.0-3.3	-	-	74.9	DLG Prüfbericht 5952
Chemischer Abluftwäscher	Mastpoulets	5.8 (4.4-6.8)££	1.2 (0.02-2.2)	5.7 (1.7-13.3)	69###	Melse et al. (2012)
Chemischer Abluftwäscher	6 Betriebe: 3 Mastpoulets, 1 Junghennen, 2 Mastschweine	2.8 (1.5-6.4)	25 (7.4-50)$	139 (52-253)$	75	Mosquera et al. (2011)
LAVAMATIC Geflügelmast	Geflügellangmast ≤42 Tage	≤3.0*	35.2 / 45.9$$	175 / 201$$	75$$	Gutachten

*Sollwert

**Richtwert

*** gemessen im Winter

gemessen im Sommer

Schwankung um bis zu einen Faktor 2 zwischen aufeinanderfolgenden Proben im Abstand von einer Woche

6 Messtage verteilt über alle Jahreszeiten

$ Ca. 25 Einzelanalysen Abschlämmwasser; keine systematischen Unterschiede betr. pH, NH4, TS

$$ mit Einstreue Getreidestroh oder Holzspänen mit TS-Gehalt >70%

$$$ 2 Einzelanalysen Abschlämmwasser gemäss Gutachten basierend auf einer Messkampagne der LUFA Nord-West von rund 10 Tagen Dauer im September 2015

£Einsatz eines Biozids zur Hemmung des Pilzwachstums auf dem Tropfenabscheider nötig

££ Kombiwäscher; pH Regulierung funktionierte nicht

Anhang 5

Anwendung von Abluftwäschern bei BTS Ställen

BTS Ställe (BTS: Besonders Tierfreundliche Stallhaltung) für Geflügel mit Aussenklimabereich:

- Eigene telefonische Befragung und Emailaustausch vom Jahr 2014 und 2015 bei Betrieb im Kanton Luzern: Biowäscher von der Firma Dorset (www.dorset.nu) seit 2007 (Legehennen) bzw. seit 2008 Junghennen in Betrieb. Legehennen und Junghennen: BTS (mit Wintergarten); Legehennen zusätzlich RAUS mit Weide
- Betrieb(e) in Deutschland sind mit Abluftreinigungsanlagen ausgerüstet (mündl. Mitteilung Maurice Ortmans, Inno+ BV, 03.08.2022).
- Betrieb Beat Weltert vom Leidenberg, vorgestellt in der Bauernzeitung (Scherrer, 2018).
  https://www.bauernzeitung.ch/artikel/tiere/neuer-mastpouletstall-bei-beat-weltert-in-grosswangen-lu-364172
  https://youtu.be/sa1ODeLhxKc
- Bei Geflügel kann die Zuluftführung über den Aussenklimabereich erfolgen. Bei BTS Ställen mit Zugang zu einem Wintergarten[18] besteht bei Unterdrucklüftung ein Unterdruck und somit kann die Abluft einem Luftwäscher zugeführt werden. Die Lüftung ist so zu steuern, dass ein permanenter Unterdruck gewährleistet wird (- 5 bis -10 Pa). Inwieweit Luft über die Öffnungen zum Aussenklimabereich entweicht, ist nicht bekannt. Die Öffnungen zum Aussenklimabereich an sich stehen jedoch nicht im Widerspruch zum Betrieb eines Luftwäschers mit ausreichender Abscheideleistung für Ammoniak (>70%) in Bezug auf die durch die Abluftreinigungsanlage geführte Abluft. Bei ordnungsgemässem Anlagenbetrieb und Einhaltung des maximalen Volumenstromes für den Abluftwäscher, besteht keine Einschränkung der Abscheideleistung. Die Verluste von Ammoniak durch Öffnungen zum Aussenklimabereich sind nicht bekannt, werden insgesamt aber als eher klein eingeschätzt. 3 Betriebe mit einem BTS Stall für Mastpoulets und 2 Betriebe mit einem BTS Stall für Legehennen sind mit einem Chemowäscher ausgerüstet (mündl. Mitteilung, Stallbaufirma Schweiz, 27.10.2022). Für 2 Betriebe liegt ein Messnachweis einer Stallbaufirma für je einen Chemowäscher für einen Stall für Mastpoulets (Inno+ Pollo M) und für Legehennenställe (Inno+ Pollo L) vor mit einer Abscheideleistung von 92% (Mastpoulets 15. Masttag) und 75% (Mastpoulets 33. Masttag) sowie 73% (Legehennen).

Ställe für Schweine mit Auslauf:

- Gutsbetrieb Stiftung Bächtelen, Wabern BE
- Mehrere Betriebe (<5). Bei Schweinen: Ansaugung Abluft unterhalb Spalten, zusätzlich Ansaugung entlang Dachtraufe in Kombination mit Sonnenschutznetz, Einfriedung 1 m um den Auslauf (Informationen von PkVB2).
  Bewilligungspflichtige Neubauten von Schweineställen mit über 40 GVE und mit Mastpouletställen über 20 GVE sind mit Abluftreinigungsanlagen auszustatten (Departement für Bau und Umwelt, Amt für Umwelt, 2020)[19]. Dies gilt auch für BTS Ställe.
- Einer der befragten Betriebe hat einen Biowäscher für einen Labelstall mit Auslauf für Mastschweine (1000 Mastplätze) installiert. Die Angaben des Betriebsleiters sowie eine Begehung vor Ort im Oktober 2022 deuten darauf hin, dass die Abluft des gesamten Stalls inklusive des Auslaufs weitestgehend durch den Wäscher geleitet werden (praktisch kein Geruch in der Umgebung des Stalls wahrnehmbar). Die Anordnung des

[18] Die Dimensionen der Auslauföffnungen zum Wintergarten sind ca. 120 cm breit x 55 cm hoch. In einem konkreten Fall eines Pouletsmaststalls von einem Grundriss von 34.4 m x 18.2 m; Grundriss des Wintergartens von 34.4 m x 3.7 m liegen 7 solcher Öffnungen vor.

[19] vgl. Referenz im Literaturverzeichnis, Seite 30ff

Auslaufs zwischen den beiden Ställen und die weitgehende Abschirmung auf den Seiten gegen die Hauptwindrichtung schränken den Luftaustausch mit der Umgebung ein (Abbildung 4,Abbildung 5). Der Innenbereich des Labelstalls weist einen Kanal mit perforiertem Boden auf, der Auslauf hat einen Vollspaltenboden. Die Zuluftführung zum Stall erfolgt durch die Türen zum Auslauf und Lüftungsklappen. Die Tiere setzen die Ausscheidungen geschätzt je zur Hälfte im Auslauf und im Innenbereich des Stalls ab. Damit dürfte ein grosser Teil der Abluft von den emittierenden Flächen dem Wäscher zugeführt werden können. Die Die Abnahmekontrolle des Wäschers hatte den Zielwert von 70% Abscheideleistung übertroffen. Aus diesen Angaben lässt sich schliessen, dass mit dem vorliegenden System ein hoher Abscheidgrad für Ammoniak erreicht werden kann.

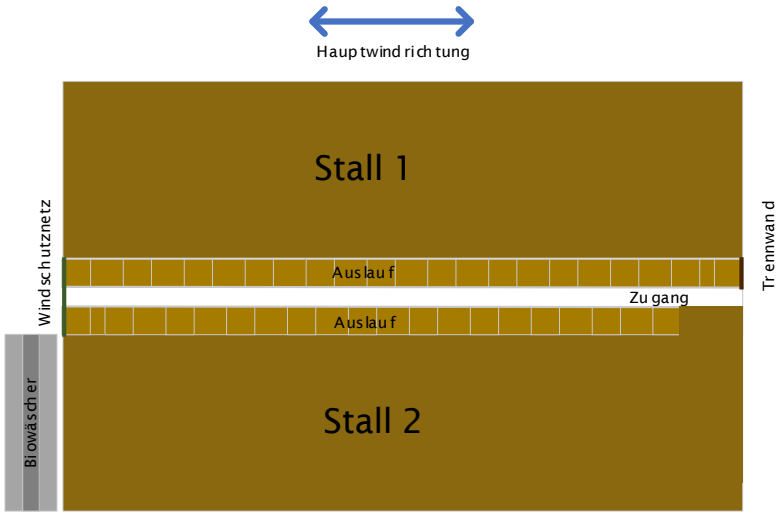

Abbildung 4: Anordnung der Ställe und der Ausläufe des Betriebs mit Labelstall mit Auslauf für Mastschweine (1000 Mastplätze) mit Biowäscher aus der Vogelperspektive.

Abbildung 5: Betrieb mit Labelstall mit Auslauf für Mastschweine (1000 Mastplätze) mit Biowäscher: Abschirmung gegen die Hauptwindrichtung auf beiden Seiten des Auslaufs. Bild links auf der linken Seite ist der Biowäscher sichtbar.

Abbildung 6: Betrieb mit Labelstall mit Auslauf für Mastschweine (1000 Mastplätze) mit Biowäscher: Ausläufe. Türen zum Auslauf, Lüftungsklappen zwischen den Fenstern für Zuluftführung zum Stall.

Anhang 6

Schwefeldüngung

Im Boden liegt Schwefel (S) zum grössten Teil in organisch gebundener Form vor.

Je nach Humusgehalt des Bodens beträgt die Menge Schwefel von Ackerland zwischen 1000 und 1400 kg S pro ha und von Grasland bis zu 2000 kg S pro ha. Schwefel wird von den Pflanzen ausschliesslich als Sulfat (SO_4^{2-}) aus der Bodenlösung aufgenommen. Die Schwefelversorgung hängt somit von der mikrobiell bedingten Mineralisation im Boden ab. Sulfat ist ähnlich wie Nitrat im Boden mobil, weshalb mit Verlagerung und Auswaschung von Sulfat ins Grundwasser gerechnet werden muss, wenn keine Aufnahme durch die Pflanzen erfolgt. In Kanada liess sich Sulfat, welches nach der Anwendung von Mineraldüngern ausgewaschen wurde, in Grundwasser nachweisen (Spoelstra et al., 2021)[20]. Bezüglich Bodenvorrat, Mobilisierung, Pflanzenaufnahme und Verlagerung im Boden verhalten sich Stickstoff und Schwefel somit ähnlich.

Nach Bikarbonat ist Sulfat bezüglich Konzentration in Süsswasser das zweitwichtigste Anion (Spoelstra et al., 2021)[20] Sulfat ist in der Verordnung des EDI über Trinkwasser sowie Wasser in öffentlich zugänglichen Bädern und Duschanlagen (TBDV)[21] nicht geregelt. In der Richtlinie der EU-über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch[22] ist Sulfat als Indikatorparameter mit einem Wert von 250 mg SO_4^{2-} pro Liter aufgeführt. Kanada hat einen Richtwert von 500 mg SO_4^{2-} pro Liter (Spoelstra et al., 2021)[20].

Der Schwefel-Bedarf der Kulturen wird in der Schweiz aktuell hauptsächlich durch Ernterückstände, Hof- und Recyclingdünger sowie Mineraldünger gedeckt. Der Gehalt von Gülle oder Mist beträgt rund 0.3 bis 0.4 kg pro m^3. In der Zeit vor den 1980er Jahren wurden grosse Mengen von Schwefel aufgrund der Verbrennung von fossilen Brennstoffen via atmosphärische Deposition in die Böden eingetragen. Die Frachten betrugen rund 30 bis 50 kg S pro ha und Jahr und teilweise bis 100 kg S pro ha und Jahr (Sinaj et al., 2017)[20]. Aufgrund von Massnahmen auf der Emissionsseite sind diese Einträge europaweit stark zurückgegangen und liegen heute bei wenigen kg S pro ha und Jahr (Theobald et al., 2019)[20]. Daher besteht heute vermehrt ein Bedarf zur Deckung des Schwefelbedarfs der Kulturen. Eine Vorratsdüngung von Schwefel ist aufgrund der Mobilität von Sulfat im Boden nicht angezeigt, sondern hat in Form von gezielten Gaben nach den Regeln der mineralischen N-Düngung zu erfolgen (Olfs, et a., 2012; Sinaj et al., 2017)[20].

[20] Vgl. Referenz im Literaturverzeichnis, Seite 30ff
[21] https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/153/de (31.08.2022)
[22] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020L2184&from=DE (31.08.2022)