Nationale Drehscheibe Ammoniak

Beurteilung von emissionsmindernden Massnahmen im Rahmen der Drehscheibe Ammoniak

# Massnahme 17 und 18
# Hochdruck- und Niederdruckvernebelungsanlagen

Version: 01

Datum: 15.06.2026

Autoren/-innen:

Stéphanie Vuille[1], Thomas Kupper[1], Michael Zähner[2], Markus Bucheli[3], Kilian Appert[4], Erich von Ah[5], Michel Fischler[6], Barbara Steiner[7], Annelies Uebersax[7]

[1]Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen

[2]Agroscope, Tänikon

[3]Berufsbildungszentrum Natur und Ernährung, Hohenrain

[4]Arenenberg, Salenstein

[5]Römerrain Landwirtschaftliche Beratung, Pfäffikon

[6]mf Landwirtschaft und Umwelt, Zürich

[7]Agrofutura, Brugg

## 1. Definition

Thema/Bezeichnung: Hochdruck- und Niederdruckvernebelungsanlagen zur Regulierung des Stallklimas bei hohen Temperaturen

Anwendungsbereich: Stall

Tierkategorie: alle, vor allem Rindvieh, Schweine und Geflügel (nur Hochdruckvernebelung)

Hersteller: diverse (z.B. Buri AG, B+M AG, Krieger AG, Globogal AG)

Kurzbeschreibung: System zur Vernebelung von Wasser oberhalb der Tiere in verschiedenen Bereichen der Ställe wie Laufflächen, Fressachse, Melkstand

## 2. Beschreibung des Systems

Vernebelungsanlagen verteilen Wasser in Form von Tröpfchen in Ställen, wodurch die Temperatur, Staub und das Aufkommen von Insekten reduziert werden.

Man unterscheidet zwischen Hoch- und Niederdruckvernebelungsanlagen. Hochdruckvernebelungsanlagen bringen das Wasser mit einer Pumpe auf einen Druck von 70 bar, wodurch sich Mikrotröpfchen (Grösse. 5 bis 10 µm) bilden, welche verdampfen, bevor sie am Boden ankommen. Die Verdunstung erfordert Energie, wodurch die Umgebungstemperatur sinkt. Laut Godyn et al. (2020) ist die Wassermenge, die für Hochdruckvernebelungsanlage benötigt wird, geringer als bei anderen Systemen. Niederdruckvernebelungsanlagen bilden grössere Tröpfchen, die bei einem Druck von rund 4 bar nur schwer verdampfen. Der Boden, die Einstreu und die Tiere werden oft feucht, was zu Hygieneproblemen führen

kann. Andererseits kann dadurch die Bildung einer Schmierschicht auf den Laufflächen verhindert werden (Zähner und Schrade, 2020). Laut Erfurt (2021) werden für eine Vernebelungsanlage (unklar ob Niederdruck- oder Hochdruckvernebelung) in einem Stall mit 100 Kühen und einer Aussentemperatur von 30°C zwischen 1500 und 2000 Liter Wasser pro Tag benötigt. Es ist auch mit Niederdruckvernebelungsanlagen möglich, feine Tröpfchen mittels angepasster Düsen zu erzeugen (Oppliger, 2007). Die Verdunstung ist grösser als bei einer konventionellen Niederdruckanlage, was eine grössere Absenkung der Temperatur ermöglicht. Es ist aber nicht auszuschliessen, dass mit solchen Systemen Tiere und Oberflächen im Stall benetzt werden. Abbildung 1 zeigt einen Vergleich der beiden Systeme bei Rindvieh.

Tabelle 1: Vergleich der Eigenschaften von Hoch- und Niederdruckvernebelungsanlagen bei Rindvieh. Quelle: UFA Revue https://www.ufarevue.ch/nutztiere/stallklima-hitzestress-verhindern (01.03.2023).

| **Hochdruckvernebelung** | **Niederdruckvernebelung** |
|---|---|
| Geringerer Wasserverbrauch, Düsen sind empfindlicher, Tiere bleiben trocken | Die Düsen sind bei Verunreinigungen der Luft oder des Wassers weniger empfindlich, hoher Wasserverbrauch, mehr Gülle, schmutzigere Tiere |
| Störungsanfälligere Anlage, die eine regelmässige Wartung erfordert | Geringerer Wartungs- und Unterhaltsaufwand |
| Kein Befeuchten von Laufflächen und Einstreu | Verhindert das Abtrocknen von Laufflächen; Befeuchten der Einstreu möglich, was die Entwicklung von Keimen in der Einstreu fördern kann |
| Senkt die Temperatur um bis zu 12°C | Geringere Temperatursenkung |
| Teurer, aber wirksam | Billiger, aber weniger effizient |

Bei Geflügel werden Hochdruckvernebelungsanlagen vor allem bei Mastpoulets und zum Teil auch bei festen Legehennenställen installiert. Bei Schweinen wird dieses System wegen Hitzestress immer mehr eingesetzt. Die Anlage wird je nach Volumenstrom und Gebäude mit dem Computer automatisch gesteuert. Der Kühleffekt einer Hochdruckvernebelungsanlage liegt zwischen 4 und 8°C je nach Lüftungssystem[1].

Zur Temperaturabsenkung aufgrund von Vernebelungsanlagen liegen unterschiedliche Angaben vor (nicht abschliessende Liste):

- In der wissenschaftlichen Literatur: frei gelüftete Rindviehställe: 1 bis 4°C in frei gelüftetem Rindviehstall während der heissen Tageszeit (Turner, 1998; Druck von 6.9 bzw. 11 bar; Turner, 1998 zitiert in Samer 2003); keine Temperaturreduktion, aber teilweise tieferer THI (Index für Temperatur und Luftfeuchtigkeit; D'Emilio et al., 2017); geschlossener Schweinestall: 1 bis 3 4°C
- In Fachzeitschriften: frei gelüftete Rindviehställe: bis zu 5°C (Erfurt, 2021), 5 bis 10°C[2]

Tendenziell werden in Fachzeitschriften höhere Zahlen zur Temperaturreduktion genannt als in wissenschaftlichen Publikationen.

Bei Hochdruckvernebelungsanlagen ist es möglich, dem Wasser Produkte zuzusetzen, um z.B. Gerüche zu neutralisieren.

[1] Dieser Abschnitt basiert auf einer mündlichen Mitteilung von David Stauffer, Globogal AG (06.09.2023)
[2] 'Mit Hochdruck gegen Hitze'; https://www.topagrar.com/dl/3/4/0/2/0/8/6/TR_024_027_06_17.pdf (11.01.2024)

## 3. Prinzip der Emissionsminderung

Bei den beiden Typen von Vernebelungsanlagen sind einer oder mehrere der folgenden vier Mechanismen wirksam:

1. Abkühlung im Stall (vor allem Hochdruckvernebelungsanlagen).
2. Durch Zuführung von Wasser wird Ammoniak im Wasserfilm an den feuchten Oberflächen gebunden[3].
3. Verdünnung und verbesserter Abfluss von Harn (Niederdruckvernebelungsanlagen).
4. pH Absenkung auf den verschmutzten Oberflächen (Niederdruckvernebelungsanlagen).

Bei Schweinen können Vernebelungsanlagen indirekt durch eine Veränderung des Stallklimas das Verhalten der Tiere beeinflussen, wodurch sich die Verschmutzung der Tiere und der Flächen in den Buchten vermindern lässt.

## 4. Hinweise zur Emissionsminderung (Messungen unter Praxisbedingungen)

Emissionsmessungen: verfügbar für Mastschweine: Jeppsson et al. (2021) haben eine signifikante Emissionsreduktion von 45% aufgrund des Einsatzes einer Schweinedusche gefunden im Zeitraum April bis Oktober. Eine Schweinedusche entspricht einer Niederdruckvernebelungsanlage (vgl. Anhang 2). Haeussermann et al. (2006) fanden für eine Hochdruckvernebelungsanlage eine Zunahme der Emissionen bei Temperaturen unter 14°C um 10 bis 14% und keinen Effekt bei Temperaturen über 14°C.

VERA-Prüferklärung: nicht verfügbar

Listung in Umweltverordnung, NL[4] oder Umweltbundesamt DK[5]: nicht vorhanden

Teil eines laufenden Messprogramms: nein

## 5. Nachweis der Emissionsreduktion (Messungen im Labor- oder Pilotmassstab) oder Einschätzung aufgrund von Wirkungsprinzipien

-

## 6. Umsetzungsempfehlungen oder Praxiserfahrungen

Die richtige Platzierung von Vernebelungsanlagen ist wichtig. Niederdruckvernebelungsanlagen müssen oberhalb einer Fläche platziert werden, welche vernässt werden darf. Der Standort muss in der Regel gedeckt sein und in ausreichender Höhe sowie an einem Ort mit guter Luftzirkulation liegen. Beide Typen von Vernebelungsanlagen können die Luftfeuchtigkeit und damit den Hitzestress auch erhöhen, welcher mit der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit zusammenhängt (Godyn et al. 2020): wenn keine ausreichende Durchlüftung vorliegt, erhöht sich die Luftfeuchtigkeit und dadurch nimmt der Hitzestress für die Tiere zu. Je kleiner das Luftvolumen ist, desto höher muss die Luftzirkulation sein. Um dies zu erreichen, können auch Ventilatoren installiert werden[6]. Hochdruckanlagen müssen das Wasser in die Richtung der Zuluftströmung abgeben, damit es nicht zu Verwirbelungen kommt.

---

[3] Brumisation bâtiment élevage et agricole | Lidit (02.03.2023)

[4] https://wetten.overheid.nl (13.01.2026). Früher Rav Liste; diese ist seit dem 01.01.2024 nicht mehr gültig. https://www.infomil.nl/onderwerpen/landbouw/ammoniak/rav-0/emissiefactoren-per/ (13.01.2026). Die Rav Liste wurde durch die Liste in Beilage V der Umweltverordnung ersetzt.

[5] https://eng.mst.dk/trade/agriculture/environmental-technologies-for-livestock-holdings/livestock-housing-system/ (13.07.2022)

[6] https://www.ufarevue.ch/nutztiere/stallklima-hitzestress-verhindern (29.06.2023)

Im Allgemeinen können Vernebelungsanlagen in den meisten Systemen für Nutztiere umgesetzt werden, und zwar in Innen- als auch in Aussenbereichen, soweit die Letzteren gedeckt sind (bei einer Niederdruckanlage ist eine Abdeckung nicht zwingend erforderlich). Im Winter müssen die Anlagen im Aussenbereich stillgelegt und entlüftet werden.

## 7. Angaben zum Betrieb des Systems

Vernebelungsanlagen sollen automatisiert betrieben werden. Temperatur und Luftfeuchtigkeit werden gemessen, wobei die Anlage startet, sobald kritische Werte erreicht sind. Vernebelungsanlagen laufen nicht kontinuierlich, sondern intermittierend während einiger Sekunden oder Minuten je nach den gegebenen Bedingungen.

In der Untersuchung von Jeppsson et al. (2021) betrug der Wasserverbrauch bei einer Schweinedusche, die bei 2.0 bis 2.5 bar betrieben wurde, während eines Umtriebs von Mastschweinen (ca. 90 Tage) in der warmen Jahreszeit 200 bis 460 Liter pro Tier. Dies entspricht 20 bis 35% des totalen Wasserverbrauchs der Produktion. Diese Menge dürfte sich auf Niederdruckvernebelungsanlagen übertragen lassen. In einer Pouletmasthalle (20'000 Tiere; ca. 1600 $m^2$) sind ca. 18 Liter Wasser erforderlich für ein Intervall von 20 Sek. mit Vernebelung (Williams Ischler et al. 2017[7]). In der Regel ist die erforderliche Wassermenge und deren Verfügbarkeit während der Zeit, in der Hitzestress auftreten kann, entscheidend für die Anwendbarkeit einer Vernebelungsanlage. Dies gilt auch für Hochdruckvernebelungsanlagen, die weniger Wasser verbrauchen.

## 8. Angaben zur Installation des Systems

Siehe Kap. 6.

## 9. Beurteilung der Emissionsreduktion aufgrund der vorliegenden Daten

Vernebelungsanlagen mindern den Hitzestress für die aufgeführten Tierkategorien. Bezüglich Ammoniak ist die Datenlage je nach Tierkategorie unterschiedlich:

- Bei Rindvieh sind keine fundierten Untersuchungen zur Wirksamkeit von Vernebelungsanlagen hinsichtlich Ammoniakemissionen verfügbar. Zähner et al. (2005) geben Sprühkühlung[8] als möglichen Ansatz zur Emissionsminderung in Rindviehställen an. Man kann davon ausgehen, dass bei Hochdruckvernebelungsanlagen die Temperatur im Stall und demzufolge auch die Ammoniakemissionen reduziert werden (Mechanismus 1 in Kap. 3). Bei einer Temperaturreduktion um ein Grad Celsius kann man mit einer Reduktion der Ammoniakemissionen von rund 2 bis 8% rechnen (Hempel et al. 2016, Pereira et al. 2012, Saha et al. 2014; Schrade et al. 2012). Je nach Dauer des Betriebs einer Vernebelungsanlage lässt sich auf das ganze Jahr bezogen eine Emissionsreduktion von geschätzt rund 2 bis 10% erreichen. Dies deshalb, weil in den drei Sommermonaten (25% Anteil der Zeit auf ein Jahr bezogen) rund 40% der Jahresemissionen anfallen (Schätzung basierend auf Schrade et al., 2012). Bei Niederdruckvernebelungsanlagen ist mit einer kleineren Reduktion der Temperatur und damit der Emissionen zu rechnen. Eine Temperaturreduktion aufgrund von Vernebelung liess sich nicht in allen Studien feststellen (z.B. D'Emilio et al., 2017).

  Die übrigen Mechanismen 2 bis 4 (2. Bindung Ammoniak, 3. Verdünnung, Abfluss Harn, 4. pH Absenkung an Oberflächen; Kap. 3) spielen bei einer Hochdruckvernebelungsanlage keine Rolle, weil die Mikrotröpfchen verdunsten und darin gelöster Ammoniak wieder gasförmig freigesetzt wird bzw. das Wasser die Böden nicht erreicht. Bei einer

[7] In dieser Studie wurde die Vernebelung zur Verbesserung der Luftqualität im Stall im Kontext von Arbeitssicherheit untersucht.

[8] Es ist nicht klar, ob damit Hoch- oder Niederdruckvernebelung gemeint ist.

Niederdruckvernebelungsanlage könnten dagegen die Mechanismen 2 bis 4 wirksam werden. Allerdings ist fraglich, ob die Wassermenge dafür ausreicht. Um eine Emissionsreduktion mittels Spülung von Spaltenböden zu erreichen, ist gemäss Van Dooren et al. (2022) eine Wassermenge von ca. 70 Liter Wasser pro Kuh und Tag notwendig. Dies liegt über den in verschiedenen Studien ausgewiesenen Wassermengen (Calegari et al., 2012; D'Emilio et al., 2017; D'Urso et al., 2021[9]) und ist sehr wahrscheinlich für den Betrieb einer Vernebelungsanlage zu hoch, weil die Tiere zu stark benetzt würden. Zu beachten ist auch, dass bei Befeuchtung einer abgetrockneten Oberfläche mit Mehremissionen zu rechnen ist (Lee et al., 2023), weil die mikrobiellen Prozesse, die zur Bildung von Ammoniak führen, wieder aktiviert werden.

Weitere Informationen zur Befeuchtung bzw. Spülung von Spaltenböden sind im Anhang 1 enthalten.

- Bei Mastschweinen ist das Potential zur Emissionsreduktion gemäss Untersuchung von Jeppsson et al. (2021) für eine Niederdruckvernebelungsanlage vielversprechend. Sie geben die Temperatur (Mechanismus 1; Kap. 3) und die Verdünnung von Harn mit Wasser (Mechanismus 3; Kap. 3) als wichtigste Faktoren an, welche direkt auf die Emissionen einwirken. Weiter bringt die Vernebelungsanlage die Tiere dazu, im Liegebereich und nicht auf den Spalten zu ruhen, was sie sonst bei hoher Stalltemperatur häufig tun. Somit wird die Verschmutzung der Tiere und des planbefestigten Liegebereichs reduziert. Ihre Erklärungen zur festgestellten Emissionsreduktion sind konsistent mit anderen Studien zum Verhalten der Schweine im Zusammenhang mit Vernebelungsanlagen (Aarnink et al. 1997, Huynh et al. 2005 und Wimmler et al. 2023). Das Verhalten von Rindvieh und Geflügel ändert sich mit einer Vernebelungsanlage nicht analog in Richtung Verminderung der verschmutzen Fläche. Die für Schweine festgestellte Emissionsreduktion lässt sich daher nicht auf andere Tierkategorien übertragen.

  Dieses System kann interessant sein, um Spitzenbelastungen von Ammoniak während Hitzeperioden zu vermeiden bei gleichzeitiger Verminderung der Verschmutzung der Buchten. Dabei wurden in den oben zitierten Studien Niederdruckvernebelungsanlagen eingesetzt. Die Verwendung von Hochdruckvernebelungsanlagen dürfte hinsichtlich Emissionsreduktion ebenfalls wirksam sein, sofern die Verschmutzung der Flächen aufgrund der Temperaturabsenkung reduziert wird. Eine Reduktion der mittleren Stalltemperatur (geschlossener Stall) von ca. 1 bis 2°C wurde für eine Hochdruckvernebelungsanlage gefunden, wobei die Temperaturreduktion bei hoher Stalltemperatur ca. 2 bis 3°C betrug (Haeussermann et al., 2007). In dieser Untersuchung wurde allerdings keine Emissionsreduktion für Ammoniak bei Temperaturen über 14°C festgestellt (Haeussermann et al., 2006). Die Autoren geben an, dass das Wasser nicht vollständig verdunstete und die Flächen befeuchtete, was zu erhöhter Verschmutzung führte (vgl. Anhang 2).

  Vernebelungsanlagen werden nur in Hitzeperioden eingesetzt. Emissionsmessungen liegen nur für Schweine während der warmen Jahreszeit vor. In der Übergangszeit und im Winter sind sie nicht in Betrieb. Über das ganze Jahr gemittelt ist der Effekt hinsichtlich Emissionsreduktion kleiner als die 45% Emissionsreduktion wie gemessen von Jeppsson et al (2021). Da die Emissionen in der warmen Jahreszeit deutlich höher liegen als im Winter (Berry et al. 2005), ist bei Schweinen mit einer wesentlichen Emissionsreduktion von geschätzt 10-20% zu rechnen. Dies unter der Voraussetzung, dass die Vernebelung

[9] D'Urso et al. (2021) erklären eine Differenz der Emissionshöhe zwischen zwei Messkampagnen von rund 20% mit dem Betrieb einer Niederdruckvernebelungsanlage (Wasserverbrauch: ca. 10 L pro Kuh und Tag). Die Daten sind aus den folgenden Gründen kritisch zu hinterfragen und wurden nicht für die Herleitung einer Emissionsreduktion verwendet: i) die Unsicherheit der angewendeten Messmethode ist deutlich grösser als 20%; ii) die Untersuchung erfolgte im Rahmen einer Case-Control in Time Studie; eine Aussage hinsichtlich Emissionsreduktion ist daher unsicher.

eine deutliche Reduktion der Verschmutzung der Tiere und der Oberflächen in den Buchten bewirkt.

Weitere Informationen zur Studie von Jeppsson et al. (2021) und zum Verhalten von Schweinen im Zusammenhang mit Vernebelungsanlagen sind im Anhang 2 aufgeführt.

- Bei Mastpoulets scheint der Einfluss der Vernebelungsanlagen weniger eindeutig zu sein. Um eine Emissionsreduktion erreichen zu können, müsste die Temperatur in den Ställen reduziert werden, ohne dass die Qualität der Einstreu negativ beeinflusst wird. Dies dürfte nur mittels Hochdruckvernebelungsanlagemöglich sein, da sie eine Temperaturreduktion bewirken und die Einstreu weniger beeinflussen. Hier wären jedoch zusätzliche Untersuchungen erforderlich (weitere Informationen in Anhang 3).

## 10. Tierwohl

Vernebelungsanlagen sind Systeme zur Reduktion des Hitzestresses. Schuller (2019) bezeichnet Hochdruckvernebelungsanlagen als das effizienteste System zur Reduktion der Temperatur. Godyn et al. (2020) geben an, dass eine Kombination von Vernebelungsanlagen und Ventilatoren das am weitesten verbreitete System zur Reduktion des Hitzestresses ist. Sie unterstreichen, dass in Schweineställen mit solchen Systemen ein hoher Verzehr beobachtet wurde, der hohe Leistungen sicherstellt oder zumindest negative Auswirkungen von Hitzeperioden auf die Produktion mindert. Dies wurde auch für Milchkühe festgestellt (Broucek et al., 2020; Frazzi et al., 2000). Jeppsson et al. (2021) beobachteten eine Emissionsreduktion und eine Verminderung der verschmutzten Flächen bei Mastscheinen. Damit bestehen allgemein Vorteile hinsichtlich Tierwohl. Zusätzlich scheinen beide Typen von Vernebelungsanlagen eine abweisende Wirkung auf Fliegen zu haben[10], was den Befall der betroffenen Tiere (vor allem Schweine und Kühe) reduziert, der im Sommer ebenfalls einen Stressfaktor darstellt.

## 11. Anmerkungen/Einschränkungen

-

## 12. Referenzen

Aarnink, A.J.A., Swierstra, D., van den Berg, A. J., Speelman, L. 1997. Effect of Type of Slatted Floor and Degree of Fouling of Solid Floor on Ammonia Emission Rates from Fattening Piggeries. Journal of Agricultural Engineering Research 66 (2), pp. 93–102.

Berry, N., Zeyer, K., Emmenegger, L., Keck, M. 2005. Emissionen von Staub (PM10) und Ammoniak (NH3) aus traditionellen und neuen Stallsystemen mit Untersuchungen im Bereich der Mastschweinehaltung. Ettenhausen: Agroscope FAT Tänikon. URL: Microsoft Word - esas_d.doc (empa.ch) (03.07.2023).

BLV. 2016. Fachinformation Tierschutz Stallklimawerte und ihre Messung in Schweinehaltungen. Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV.

Brink, M., Janssens, G.P.J., Delezie, E. 2022. How do moisture content, friability, and crust development of litter influence ammonia concentrations in broiler production? Livestock Science 265, p. 105109.

Broucek, J., Ryba, S., Dianova, M., Uhrincat, M., Soch, M., Sistkova, M., Mala, G., Novak, P. 2020. Effect of evaporative cooling and altitude on dairy cows milk efficiency in lowlands. International Journal of Biometeorology 64(3): pp. 433-444.

[10] Brumisation bâtiment élevage et agricole | Lidit (17.04.2023)

Calegari, F., Calamari, L., Frazzi, E. 2012. Misting and fan cooling of the rest area in a dairy barn. International Journal of Biometeorology 56(2), pp. 287-295.

D'Emilio, A., Porto, S.M.C., Cascone, G., Bella, M., Gulino, M. 2017. Mitigating heat stress of dairy cows bred in a free-stall barn by sprinkler systems coupled with forced ventilation. Journal of Agricultural Engineering 48(4), pp. 190-195.

D'Urso, P.R., Arcidiacono, C., Cascone, G. 2021. Environmental and animal-related parameters and the emissions of ammonia and methane from an open-sided free-stall barn in hot Mediterranean climate: a preliminary study. Agronomy 11(9), 13p.

Erfurt K. 2021. Eine kühle Brise gegen die Hitze. Bauernzeitung 02.07.2021 Eine kühle Brise im Stall hilft gegen die Hitze - bauernzeitung.ch | BauernZeitung (29.06.2023).

Frazzi, E., Calamari, L., Calegari, F., Stefanini, L. 2000. Behavior of dairy cows in response to different barn cooling systems. Transactions of the ASAE 43(2), pp. 387-394.

Godyn, D., Herbut, P., Angrecka, S., Corrêa V., Frederico M. 2020. Use of different cooling methods in pig facilities to alleviate the effects of heat stress-a review. Animals: an open access journal from MDPI 10 (9).

Haeussermann, A., Hartung, E., Jungbluth, T. 2006. NH3 emission from pig husbandry in relation to ventilation control and indoor air cooling. In: Aneja, V. P., Schlesinger, W. H., Knighton, R., Jennings, G., Niyogi, D., Gilliam, W., S. Duke, C., (eds.). June 5-8, 2006; Bolger Conference Center Potomac, Maryland, USA. p 657-774.

Haeussermann, A., Hartung, E., Jungbluth, T., Vranken, E., Aerts, J.M., Berckmans, D. 2007. Cooling effects and evaporation characteristics of fogging systems in an experimental piggery. Biosyst. Eng. 97(3): 395-405.

Jeppsson, K.-H., Olsson, A.-C., Nasirahmadi, A. 2021. Cooling growing/finishing pigs with showers in the slatted area: Effect on animal occupation area, pen fouling and ammonia emission. Livestock Science 243.

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. Atmospheric Environment 199, pp. 474-484.

Häni, C., Sintermann, J., Kupper, T., Jocher, M., Neftel, A. 2016. Ammonia emission after slurry application to grassland in Switzerland. Atmospheric Environment 125, pp. 92–99.

Hempel, S., Saha, C.K., Fiedler, M., Berg, W., Hansen, C., Amon, B., Amon, T. 2016. Non-linear temperature dependency of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy barn. Biosystems Engineering, 145, pp. 10–21.

Huis in ‘t Veld, J.W.H., Kroodsma, W., van Westereenen, S. 1993. Vermindering ammoniakemissie uit een ligboxenstal door spoelen van de roosters, Rapport 93-1, Wageningen: Wageningen Livestock Research, 23 p.

Huynh, T.T.T., Aarnink, A.J.A., Verstegen, M.W.A. 2005. Reactions of pigs to a hot environment. Livestock Environment 7. Proceedings of the Seventh International Symposium, Beijing, China, 18-20 May 2005, pp. 544-550. https://www.wur.nl/en/Publication-details.htm?publicationId=publication-way-333339383439Reactions of pigs to a hot environment - WUR (29.06.2023).

Huynh, T.T.T., Aarnink, A.J.A., Truong, C.T., Kemp, B., Verstegen, M.W.A. 2006. Effects of tropical climate and water cooling methods on growing pigs' responses. Livestock Science 104 (3), pp. 278–291.

Kroodsma, W., Huis in 't Veld, J.W.H., Scholtens, R. 1993. Ammonia emission and its reduction from cubicle houses by flushing. Livestock Production Science 35 (3), pp. 293–302.

Lee, M., Brandani, C.B., Bush, K.J., Ferguson, G.B., Willis, W., Campbell, T.N., Gouvea, V., Casey, K.D., Parker, D.B., Koziel, J.A., Brauer, D., Auvermann, B.W. 2023. The effect of water application on ammonia emissions from open-lot livestock-feeding surfaces. 2023 ASABE Annual International Meeting; St. Joseph, MI. ASABE. p 1.

Oppliger, F. 2007. Luft reinigen und abkühlen. Landfreund Nr. 7/2007, pp 2-4. Sonder_Seite_1-4 (buriag.ch) (04.12.2023).

Pereira, J., Misselbrook, T.H., Chadwick, D.R., Coutinho, J., Trindade, H. 2012. Effects of temperature and dairy cattle excreta characteristics on potential ammonia and greenhouse gas emissions from housing: A laboratory study. Biosystems Engineering 112(2), pp. 138–150.

Saha, C. K., Ammon, C., Berg, W., Fiedler, M., Loebsin, C., Sanftleben, P., Brunsch, R., Amon, T. 2014. Sesonal and diel variations of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy building and the associated factors influencing emissions. Science of the Total Environment, 468-469, pp. 53–62.

Samer, M. 2003. Physical alleviation for dairy cows. https://www.researchgate.net/publication/221705094_Physical_Alleviation_for_Dairy_Cows (11.01.2024)

Schrade, S., Zeyer, K., Gygax, L., Emmenegger, L., Hartung, E. Keck, M. 2012. Ammonia emissions and emission factors of naturally ventilated dairy housing with solid floors and an outdoor exercise area in Switzerland. Atmospheric Environment 47, pp. 183–194.

Schuller J. 2019. Der Nebel kühlt die Luft, der Stall bleibt aber trocken. Bauernzeitung 07.07.2019. Vernebelungsanlagen: Die Luft kühlen durch Verdunstung - bauernzeitung.ch | BauernZeitung (29.06.2023).

Snoek, D.J.W., Stigter, J.D., Ogink, N.W.M., Groot Koerkamp, P.W.G. 2014. Sensitivity analysis of mechanistic models for estimating ammonia emission from dairy cow urine puddles. Biosystems Engineering 121, pp. 12–24.

van Dooren, H.J.C., Blanken, K., Ogink, N.W.M. 2022. Reductie van ammoniakemissie door gebruik van water in melkveestallen : resultaten van emissiemetingen op Dairy Campus. Rapport 1304, Wageningen: Wageningen Livestock Research, 28 p.

Williams Ischer, S., Farnell, M.B., Tabler, G.T., Moreira, M., O'Shaughnessy, P.T., Nonnenmann, M. W. 2017. Evaluation of a sprinkler cooling system on inhalable dust and ammonia concentrations in broiler chicken production. Journal of Occupational and Environmental Hygiene 14 (1), pp. 40–48.

Wimmler, C., Leeb, C., Winckler, C., Knoll, M., Holinger, M. 2023. The long and short of showers: Effects of shower duration on behaviour, thermal comfort and soiling of organic growing-finishing pigs with access to outdoor runs. Applied Animal Behaviour Science 258. pp. 1–12.

Zähner, M., Keck, M., Hilty, R. 2005. Ammoniak-Emissionen von Rindviehställen. Minderung beim Bau und Management. FAT Berichte Nr. 641. Ettenhausen, Schweiz: Agroscope FAT Tänikon.

Zähner, M., Schrade, S. 2020. Laufflächen mit 3 % Quergefälle und Harnsammelrinne in Laufställen für Milchkühe. Bauen Rind 01.10 Agroscope Merkblatt Nr. 80 Agroscope Tänikon. URL: https://ira.agroscope.ch/de-CH/publication/43459 (04.02.2020).

## Anhang 1 – Hinweise zur Emissionsreduktion bei Rindvieh

Studien zum Effekt von Vernebelungsanlagen bei Rindvieh liegen nicht vor. Dagegen wurde in den Niederlanden der Einfluss der Applikation von Wasser auf die Böden in den 1990er Jahren untersucht (Huis in't Veld et al. 1993; Kroodsma et al. 1993). Eine aktuelle Studie wurde von Van Dooren et al. (2022) durchgeführt.

Die früheren Studien zeigten sehr unterschiedliche Resultate. Huis in't Veld et al. (1993) fanden beispielsweise eine Emissionsreduktion von 21 bis 73% bei einer Wassermenge zwischen 50 und 110 Liter pro Kuh und Tag für die Spülung des Bodens. Die Ergebnisse unterscheiden sich je nach eingesetzter Wassermenge, nach Dauer und Druck der Spülung und Zeitabstand dazwischen. Kroodsma et al. (1993) haben ihre Messungen in einer Klimakammer durchgeführt und ähnliche Ergebnisse gefunden. Diese beiden Studien bildeten die Grundlage für die Spülsysteme, die in der ursprünglichen Rav Liste[4] mit der Nummer A1.2 (BWL 2001.28.V1; aktuell: HA1.2; OW 1993.03.V1- OW 1994.08.V1) mit einem Emissionsfaktor von 10.2 kg $NH_3$ pro Tierplatz und Jahr aufgeführt sind.

Für Rindvieh können die Resultate von Van Dooren et al. (2022) Hinweise auf die Mechanismen 2 bis 4 (2. Bindung Ammoniak, 3. Verdünnung, Abfluss Harn, 4. pH Absenkung an Oberflächen; Kap. 3) bei Vorliegen von Vernebelungsanlagen auf die Böden geben. Sie haben den Effekt unterschiedlicher Methoden zur Spülung von Spaltenböden und der Verdünnung von Gülle im Versuchsstall des Dairy Campus der Universität Wageningen auf die Ammoniakemissionen untersucht: i) Spülen der Spaltenböden ausschliesslich mit Wasser zur Reinigung, ii) Spülen der Spaltenböden ausschliesslich mit Wasser in Kombination mit dem Betrieb eines Entmistungsschiebers einmal pro Stunde und iii) Zugabe von Wasser in der Vorgrube und Reinigung des Spaltenbodens mittels Betrieb eines Entmistungsschiebers einmal pro Stunde. Für Methoden i) und ii) wurde eine Spülleitung über die gesamte Länge des Fressgangs unter dem Fressgitter knapp über dem Spaltenboden montiert. An der Leitung waren sieben Düsen angebracht, die nahezu den gesamten Laufgang besprühten. Die Einstellungen der Anlage war wie folgt: Spüldauer 25 Sekunden alle 15 Minuten zwischen 6:00 Uhr und 22:00 Uhr; Spüldauer 20 Sekunden und einmal pro Stunde zwischen 22:00 Uhr und 6:00 Uhr. Im Mittel wurden 68 Liter pro Kuh und Tag für Methode i), 74 Liter pro Kuh und Tag für Methode ii) und 46 Liter pro Kuh und Tag für Methode iii) verbraucht. Für die Methoden i) und ii) entspricht dies einem Wasserverbrauch von ungefähr 10 Liter pro $m^2$ und Tag.

Die gemessene Emissionsreduktion betrug 37% für Methode i) und 40% für Methode ii). Bei Methode iii) wurde kein signifikanter Effekt gefunden. Die Verwendung eines Entmistungsschiebers zusätzlich zum Spülen (Methode ii) führte gegenüber ausschliesslichem Spülen mit Wasser (Methode i) zu keiner weiteren signifikanten Emissionsreduktion. Die Verwendung von Wasser veränderte die Güllezusammensetzung. Bei Behandlung mit Wasser lag der pH-Wert an der Oberfläche des Bodens zwischen 8.4 und 8.6 und damit tiefer als bei der Referenz (pH 8.7 bis 8.9). Demgegenüber wurde kein signifikanter Unterschied bei der Grösse der Harnpfützen beobachtet, welche eine wichtige Grösse bei emissionsarmen Böden darstellt (Snoek et al., 2014). Während der letzten Wochen der Messungen von van Dooren et al. (2022) hat die Aussentemperatur zugenommen. Die Reduktion der Ammoniakemissionen war dabei gleich hoch bzw. leicht höher. Die Messungen erstreckten sich über zwei Jahre, deckten jedoch nicht alle Jahreszeiten ab und konnten daher nicht zur Herleitung eines Emissionsfaktors für die Liste in Beilage V der Umweltverordnung verwendet werden. Van Dooren et al. (2022) betonen jedoch den positiven Effekt hinsichtlich Ammoniakemissionen mit dieser einfachen Methode. Zudem wird eine Verdünnung der Gülle erreicht, welche gemäss Häni et al. (2016) und Hafner et al. (2019) zu einer Emissionsreduktion bei der Ausbringung führt. Zu beachten sind dabei die erhöhte Güllemenge und das Transportvolumen, das sich verdoppeln kann.

Die Verdünnung von Harn auf Spaltenboden führt zu einer Emissionsreduktion wie van Dooren et al. (2022) gezeigt haben. Die Wirkung auf anderen Bodentypen ist unseres Erachtens unsicher. Den Effekt der Verdünnung auf Böden ohne Kot-Harn Trennung, wie z.B. planbefestigten Böden, erscheint als unwahrscheinlich, da der Harn nicht in die Güllegrube abfliessen kann. Soweit ein Abfluss stattfindet, z.B. auf Böden mit Kot-Harn Trennung wie Rillenböden oder geneigtem Boden mit Harnsammelrinne, ist ein positiver Effekt hinsichtlich Ammoniakemissionen wahrscheinlich.

Trotz fehlender zusätzlicher Wirkung des Entmistungsschiebers in der Studie von van Dooren et al. (2022), sollte dieser im Hinblick auf trockene Klauen regelmässig eingesetzt werden.

## Anhang 2 – Hinweise zur Emissionsreduktion bei Schweinen

Jeppsson et al. (2021) haben den Effekt einer Niederdruckvernebelungsanlage (Schweinedusche) hinsichtlich Verhalten und Verschmutzung von Mastschweinen sowie Ammoniakemissionen untersucht. Die Messungen wurden in einem Praxisstall während zwei aufeinanderfolgenden Sommerperioden durchgeführt. Die Messungen deckten einen ganzen Umtrieb ab (entweder von April bis Juli oder Juli bis Oktober). Daraus resultierten 4 Beobachtungen für jede der 4 Buchten, die je das Verfahren (mit Vernebelung) und die Kontrolle (ohne Vernebelung) beinhalteten. Die Vernebelungsanlage war auf einer Seite der Buchten installiert, die mit Spaltenboden ausgestattet war (Anteil Spalten: 31%). Ammoniakemissionen wurden mittels Tracer-Ratio Methode (mit $CO_2$ als Tracergas) bestimmt. Für das Verfahren mit Niederdruckvernebelung wurde eine Reduktion von 45% und damit eine signifikant niedrigere Emission im Vergleich zur Referenz gemessen. Je höher die Temperatur lag, desto eher wurde eine signifikante Differenz zwischen Verfahren und Referenz beobachtet. Bezüglich Temperatureffekt besteht bei Jeppsson et al. (2021) jedoch ein gewisser Widerspruch, denn die Vernebelungsanlage hatte weder auf die Temperatur noch auf die relative Luftfeuchtigkeit noch auf den THI (Index für Temperatur und Luftfeuchtigkeit) einen signifikanten Effekt.

Die Vernebelungsanlage bringt die Tiere gemäss Jeppsson et al. (2021) dazu, im Liegebereich und nicht auf den Spalten zu ruhen, was sie sonst bei hoher Stalltemperatur häufig tun. Somit wird die Verschmutzung des planbefestigten Liegebereichs reduziert. Huynh et al. (2006) haben eine Reduktion der Ausscheidungen im Liegebereich bei Verwendung einer Vernebelungsanlage in Buchten mit Auslauf beobachtet. Gemäss Jeppsson et al. (2021) bewirkt hauptsächlich die Verkleinerung der verschmutzten Fläche sowie die Verdünnung des Harns auf dem Boden die Emissionsreduktion. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von Aarnink et al. (1997) überein, die gezeigt haben, dass die Ammoniakemissionen pro zusätzlich verschmutzte Fläche von 0.1 $m^2$ pro Mastplatz um 27% zunehmen.

Wie verschiedene Studien gezeigt haben (z.B. Aarnink et al., 1997; Huynh et al., 2005, 2006), verändert sich das Verhalten der Schweine mit der Temperatur. Steigt diese an, neigen sie vermehrt dazu, sich auf perforierte oder verschmutzte Flächen zu legen. Dabei fallen dort vermehrt Ausscheidungen an, was zu erhöhter Verschmutzung der Tiere und der Flächen in den Buchten insgesamt führt. 13% der Schweine liegen im Winter auf den perforierten Flächen im Vergleich zu 25% im Sommer gemäss Aarnink et al. (1997). Huynh et al. (2005) geben an, dass Liegen auf perforierten oder verschmutzten Flächen nicht dem natürlichen Verhalten der Schweine entspricht.

Wimmler et al. (2023) haben den Effekt einer Vernebelungsanlage im Auslauf auf das Verhalten von Mastschweinen beobachtet. Die Resultate deuten auf eine erhöhte Widerstandsfähigkeit auf Hitzestress und verbessertes Wohlbefinden der Tiere bei Verwendung einer Vernebelungsanlage. Ein stündlicher Betrieb der Vernebelungsanlage während 30 Min. zwischen 11h00 und 16h00 hatte positive Auswirkungen auf die Verschmutzung der Buchten und der Tiere. Bei einer Dauer von 10 Min. je Stunde war der Effekt weniger ausgeprägt. Die Effekte waren jedoch sehr unterschiedlich, was die Interpretation der Resultate erschwert. Hinweise, dass die Vernebelungsanlage die Verschmutzung verstärkt, lagen jedoch nicht vor. Wimmler et al. (2023) geben auch ein Potential zur Emissionsreduktion von Ammoniak für die Ausläufe an.

Haeussermann et al. (2006) fanden für eine Hochdruckvernebelungsanlage eine Zunahme der Emissionen um 10 bis 14% bei Temperaturen unter 14°C und keinen Effekt bei Temperaturen über 14°C. Ihre Schlussfolgerungen sind allerdings unklar. Sie weisen auch auf ein Reduktionspotential hin, da aufgrund von unvollständiger Verdunstung des Wassers an kühlen, feuchten oder mässig warmen Tagen die Flächen feucht und daher zusätzlich

verschmutzt waren, was zu einer Emissionszunahme führe. Da bei Temperaturen über 14°C ebenfalls eine erhöhte Verschmutzung der Flächen, aber keine Zunahme der Emissionen vorlag, müsse dort eine Abnahme der Emissionen eingetreten sein. Zudem ist auch unklar, ob an Tagen mit Temperaturen unter 14°C eine Temperaturreduktion überhaupt erforderlich ist. Gemäss BLV (2016) sollte die Stalltemperatur in Haltungssystemen mit Einstreu (exklusive Tiefstreu) 9°C und in Vollspaltenbuchten 15°C nicht unterschreiten. Die Daten von Haeussermann et al. (2006) deuten wohl eher auf Effekte bei nicht optimalem Betrieb einer Hochdruckvernebelungsanlage. Weiter sind diese Resultate nur in einem Kongressbeitrag enthalten und wurden im Gegensatz zu den Daten zur Stalltemperatur der gleichen Studie nicht in einer peer review Zeitschrift publiziert, was ein Hinweis auf ungenügende Qualität der Emissionsdaten sein könnte.

## Anhang 3 – Hinweise zur Emissionsreduktion bei Geflügel

Für Mastpoulets haben Williams Ischer et al. (2017) keinen Einfluss von Vernebelungsanlagen auf die Konzentration von Ammoniak in der Stallluft feststellen können[7]. Die Messungen wurden im Winter durchgeführt, als keine hohen Temperaturen vorkamen. Brink et al (2022) haben bei Mastpoulets den Einfluss von Auflockern der Einstreu, Befeuchten und die Kombination von beidem auf Ammoniakkonzentrationen untersucht. Befeuchten erfolgte mittels regelmässigen Besprühens der Einstreu mit 1.5 oder 3.0 Liter Wasser ab dem 10. Lebenstag der Tiere. Weder die Methode zum Besprühen noch die Länge der Intervalle sind beschrieben. Das Auflockern der Einstreu hat die Konzentration von Ammoniak erhöht und das Besprühen reduziert. Die Differenzen waren allerdings nicht signifikant. Das Besprühen hatte jedoch das Auftreten von Fussballen- und Fersenläsionen signifikant verstärkt. Die Autoren erwähnen, dass die Krustenbildung, welche durch das Befeuchten gefördert wird, die Ammoniakemissionen reduziert.