

---

# **Emissionen aus frei gelüfteten Ställen - Entwicklung von Messmethoden und Ergebnisse der Feldmessungen**

Dr. Friedhelm Schneider, Robert Eichelser, Dr. Stefan Nesper  
Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik,  
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft,  
Vöttinger Str. 36, 85354 Freising-Weihenstephan

## **Zusammenfassung**

Ziel des Vorhabens war die Erhebung von belastbaren Daten zu Emissionen moderner Rinder-, Schweine- und Geflügelställe zur Umsetzung des geltenden europäischen und deutschen Rechts im Spannungsfeld artgerechter, innovativer Tierhaltungsverfahren und Immissionsschutz. Dazu notwendig war die Entwicklung geeigneter Messverfahren für Volumenstrom, Staub, Ammoniak und Geruch und deren Praxistest an unterschiedlichen Stallsystemen. Hierzu wurden an 12 Ställen (4 Milchvieh, 1 Mastbullen, 3 Mastschweine, 3 Legehennen und 1 Mastputen) im Sommer, Winter und Frühjahr jeweils die Konzentrationen von über 20 unterschiedlichen Parametern erhoben (u. a. Staubmasse, Endotoxin, Keime, Partikelanzahl, Ammoniak, Methan, Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte). Eine Tracergasmethode zur kontinuierlichen Erfassung der Luftwechselrate an frei belüfteten Ställen wurde entwickelt und an drei Ställen (2 Milchvieh, 1 Mastbullen) erfolgreich eingesetzt. Die Methode eignet sich zur Erhebung von Emissionsraten an beliebigen Ställen mit freier Lüftung. Im Projekt ist es gelungen, bisher getrennt untersuchte Fragestellungen der Arbeitsmedizin, Tierhygiene und Umweltwirkung zu verknüpfen und für 12 Ställe Emissionsdaten zu erheben.

# **Emissions from Naturally Ventilated Livestock Houses – Development of Methods and Results of the Field Measurements**

Dr. Friedhelm Schneider, Robert Eichelser, Dr. Stefan Nesper  
Institute for Agricultural Engineering, Farm Buildings and Environmental Technology,  
Bavarian State Research Center for Agriculture,  
Voettinger Str. 36, 85354 Freising-Weihenstephan / Germany

## **Summary**

The purpose of the investigation was the registration of emission data for actual mainly naturally ventilated barns for cattle, pig and poultry. These data are necessary for the implementation of applicable European and German law in the area of conflicts caused by appropriated, innovative animal husbandry and emission control. To reach the aim it was necessary to develop suitable measurement techniques for ventilation rate, dust, ammonia and odour and their evaluation under field conditions for different housing systems. Therefore during summer, winter and autumn measurement campaigns have been carried out at 12 stables (4 dairy cows, 1 beef cattle, 3 fattening pigs, 3 laying hens, 1 turkey) to determine more than 20 parameters (e.g. dust, Endotoxin, germs, particle number concentration, ammonia, methane, air temperature, rel. air humidity). To determine ventilation rate of naturally ventilated stables continuously a tracer gas technique has been developed and tested at three cattle stables. This method is suitable for continuously measurements of the ventilation rate for different stables of different size and construction. As a further result of this project emission data for occupational and animal health, licensing procedures and environmental aspects have been compiled with standardized methods for 12 stables.

## 1 Einleitung

Zur Umsetzung des geltenden europäischen und deutschen Rechts im Spannungsfeld artgerechter, innovativer Tierhaltungsverfahren und des Immissionsschutzes fehlen Emissionsdaten für moderne Haltungssysteme. Grundlegend hierfür ist für unterschiedliche Tierarten und Haltungssysteme eine umfassende Quantifizierung der Emissionen von Ammoniak, klimarelevanter Treibhausgase wie Methan und Lachgas, Geruch und Staub (PM 10).

Für Emissionsmessungen in frei gelüfteten Ställen existieren keine einheitlichen Standards. Wichtige Parameter, die die Messung beeinflussen sind: Anzahl und Dauer der Messungen (Tag, Nacht, Sommer, Winter, Fütterung, Ruhephase), zeitliche Auflösung der Messwerterfassung (kontinuierlich oder integrativ), räumliche Verteilung der Probenahmestellen (Einzelmessung, Messspinne, mobil, stationär), Art und Empfindlichkeit der Messtechnik (z. B. für Ammoniak chemische Verfahren, Spektroskopie; oder für Staub direkte oder indirekte Messverfahren, online oder integrativ, mit oder ohne Trocknung der Probenluft). Daneben sind Alter und Anzahl der Tiere, Lüftungssystem, Art der Fütterung und Entmistung und der Betriebsleitereinfluss wichtige Parameter, die die Emissionen beeinflussen. Bei der kombinierten Erfassung verschiedener Gase und Stäube sind unterschiedliche Messkonzepte notwendig. Partikelemissionen müssen z. B. direkt im Stall gemessen werden. Das Absaugen von Probenluft durch Messgasleitungen für die Analytik der Stallluft, wie sie bei der Gasmessung angewandt wird, ist für die Staubmessung nicht realisierbar. Emissionsquellen sind im Stall nicht homogen verteilt. Während z. B. Methan abhängig von der Fütterung von den Rindern direkt abgegeben wird, emittiert Ammoniak aus dem Kot und Urin. Hierbei sind vor allem Menge und Beschaffenheit der verschmutzten Oberflächen sowie die Lufttemperatur relevant. Staubemissionen treten vor allem während der Fütterung oder Arbeitsabläufen auf und werden durch die Tieraktivität und Lüftung beeinflusst.

Ziel des Projektes war die Entwicklung von Messkonzepten für die kontinuierliche, zeitlich hochauflösende Erfassung gas- und partikelförmiger Emissionen (Ammoniak, Methan, Lachgas, Staub, Geruch) und des Volumenstroms an frei belüfteten Ställen sowie die Ermittlung von Emissionsraten an modernen Haltungssystemen der Rinder-, Schweine-, und Geflügelhaltung.

## 2 Material und Methoden

Bei der Auswahl der Messmethoden und Messkonzepte wurden bestehende Regelwerke und Empfehlungen berücksichtigt. Für die Emissionsmessung von Staub und die Anforderungen an Staubmessgeräte existieren unterschiedliche Regelwerke, die je nach Fragestellung zur Anwendung kommen (Arbeitsmedizin: DIN EN 481 [1], VDI 2265 [2], Umweltwirkung: DIN EN 12341 [3]). Für die Erfassung der Ammoniakkonzentration gibt es Empfehlungen z. B. des KTBL [4] und Erfahrungen aus eigenen bisherigen Untersuchungen am Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik. Eine umfassende Beschreibung gängiger Emissions- und Partikelmesstechniken ist im Rahmen der wissenschaftlichen Betreuung der bayerischen Pilotvorhaben für artgerechte Tierhaltung erfolgt und wird gesondert veröffentlicht. Probenahme und Durchführung der Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration durch Dynamische Olfaktometrie ist in der DIN EN 13725 [5] geregelt. Die arbeitsmedizinischen Untersuchungen zur Konzentration von Staub, Endoto-

xin und luftgetragenen Keimen wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut und der Poliklinik für Arbeits- und Umweltmedizin der LMU München und der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaft (LBG) Niederbayern/Oberpfalz und Schwaben, Augsburg durchgeführt.

Die Methoden und die Messgeräte, die in diesem Projekt eingesetzt wurden, werden im Folgenden beschrieben.

## 2.1 24-Stundenmessung, kontinuierlich

Für die 24-Stunden-Tagesgangmessung wurden zwei baugleiche Messboxen entwickelt. Jede Messbox beinhaltet ein Ammoniakmessgerät, ein Staubmessgerät und ein Streulichtphotometer. Jedes Messgerät verfügt über eine angepasste Probennahmesonde mit möglichst kurzen unverwinkelten Probenluftwegen. Stromversorgung, Pumpen und Datenloggersysteme sind in die Messbox integriert sowie ein Klimagerät zum Schutz vor Überhitzung oder Kondensation. Die Messwerte werden synchron mit einer Zeitauflösung von einer Minute geloggt. Zusätzlich wurden mit der selben Zeitauflösung Lufttemperatur, rel. Feuchte und Windgeschwindigkeit am Probenahmeort erfasst. Die Messungen erfolgten jeweils im Sommer, Winter und Frühjahr an 12 Ställen.

Die Messung der Ammoniakkonzentration erfolgte photoakustisch mit einem Gerät der Firma ppm-Messtechnik, Chieming, Modell MAC 2040. Die Probenluft wird über einen PTFE-Filter der Firma Schleicher und Schüll, Modell Rezist 30 mit 5 µm-Porenweite angesaugt und gelangt anschließend direkt über einen ca. 15 cm langen Schlauch in die Messzelle. Die Messgenauigkeit liegt bei  $\pm 5\%$  in einem Messbereich zwischen 0,5 und 100 ppm. Das Gerät verfügt über eine Wasserdampfkorrektur und wurde regelmäßig an einer Gasmischstation kalibriert.

Für die kontinuierliche Messung der Staubkonzentration wurde ein dreistufiger virtueller Impaktor der Firma Hund, Wetzlar, Modell Respicon TM verwendet. Es wurden simultan die einatembare (PM 100), thorakale (PM 10, entspricht Feinstaub nach einer Veröffentlichung des UBA [6]) und alveolengängige (PM 4) Staubfraktion gesammelt, bei einem Gesamtprobenluftstrom von 3,11 l/min. Zusätzlich wird die Dynamik der Partikelabscheidung jeder Größenfraktion streulichtphotometrisch erfasst. Die Partikelabscheidung erfolgte analog zu den anderen Staubmessungen auf fluorkohlenstoffbeschichteten Borsilikatglasfaserfiltern (37 mm, Fiberfilm, Firma Pall). Die Gravimetrie wurde von der LBG Baden-Württemberg durchgeführt. Die Dauer der Sammlung betrug 24 Stunden.

Das für die Messung der Partikelkonzentration verwendete Streulichtphotometer der Firma Grimm, Ainring, Modell 1.108 ist ein 2,5 kg leichtes, sehr handliches Gerät (24 cm x 12 cm x 6 cm). Es besitzt als Lichtquelle eine Halbleiter-Laserdiode, mit einer Wellenlänge von 780 nm und detektiert das Streulicht unter einem Winkel von 90°. Die Signalhöhe wird in 15 Kanäle klassifiziert. Die unteren Kanalgrenzen bzw. die entsprechenden optischen Latex-Äquivalentdurchmesser  $D_{50}$  (in µm) liegen bei 0,3 – 0,4 – 0,5 – 0,65 – 0,8 – 1,0 – 1,6 – 2,0 – 3,0 – 4,0 – 5,0 – 7,5 – 10 – 15 und 20. Sie gelten für einen Zählwirkungsgrad von 50 % mit monodispersen Polystyren-Latex-Aerosol. Das Gerät arbeitet mit einem Probenvolumenstrom von 1,2 l/min  $\pm 5\%$ . Simultan zu der Partikelmessung wurden mit externen Sensoren (Firma Grimm, Modell 1.154) Lufttemperatur, Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit erfasst.

Die im Rahmen dieses Projekts entwickelte Messbox ist in Abbildung 1 dargestellt.



Abb. 1: Messbox zur kontinuierlichen Erfassung der Staubmasse, Partikelkonzentration und Ammoniakkonzentration. Links: Messung in einem Geflügelstall. Rechts: Messung in einem Mastputenstall, mit Geräten zur Messung am Arbeitsplatz

## 2.2 Ereignisbezogene Messungen, diskontinuierlich

Eingebunden in die kontinuierliche 24-Stundenmessung waren verschieden kürzere, sogenannte ereignisbezogene Messungen für Staub, Endotoxin und luftgetragene Keime.

Die Bestimmung der Konzentrationen der einatembaren und alveolengängigen Staubfraktionen erfolgte gravimetrisch. Sämtliche Wägungen der unbeprobten und beprobten Filter wurden ebenfalls von der LBG Baden-Württemberg durchgeführt. Die Staubfraktionen wurden auf mit Fluorkohlenstoff beschichteten Borsilikatglasfaserfilter (37 mm, Fibrilm, Firma Pall) abgeschieden. Diese Filter absorbieren keine Luftfeuchtigkeit, was die gravimetrische Auswertung erheblich verbessert. Die Ansaugköpfe für einatembaren Staub (E-Fraktion) wurden mit 3,5 l/min, die für die alveolengängige Fraktion (A-Fraktion) mit 2,0 l/min Luftdurchsatz betrieben. Für die personenbezogenen Messungen waren die Ansaugköpfe auf Mundhöhe der Personen (Pumpen am Gürtel), für die stationären Messungen mitten im Stall (Höhe ca. 1,5 m) angebracht. Es wurde dabei darauf geachtet, dass die Messanordnung nicht in unmittelbarer Nähe von Lüftungsöffnungen stand. Wenn möglich, wurde immer ein Aufstellungsort im Stallgang gewählt. Die Dauer der Messung lag bei den stationären Messungen bei 8 Stunden und für die personengetragenen Messungen je nach Aufenthaltszeit im Stall zwischen wenigen Minuten (Geflügel) und mehreren Stunden (Milchvieh).

Die Staubsammlung für die Endotoxinbestimmung erfolgte auf bindemittelfreien Filtern (37 mm, Macherey-Nagel, 85/90 BF) für die Staubfraktionen der E- und A-Fraktion analog der oben beschriebenen Bedingungen. Eine Exposition fand über die Dauer von 8 Stunden während der Ruhephase in der Nacht statt. Eine zweite Exposition erfolgte tagsüber über die Dauer von einer Stunde während einer Fütterungsphase.

Die Endotoxinbestimmung erfolgte gemäß BIA-Arbeitsmappe 9450 (bzw. CEN 14031). Dazu werden die Filter in ein Quarzglas gegeben und die Endotoxine mit Limulus-Amöbozyten-Lysat (LAL) -Wasser (7 ml) unter Schütteln (1,5 h) extrahiert. Anschließend zentrifugiert man die Extrakte für 3 min bei 3000 U/min. Nach entsprechender Verdünnung (je nach erwarteter Konzentration 1:1, 1:10, 1:100) und Auftrag auf die Mikrotiterplatte erfolgt die Bestimmung mittels LAL. Es wird ein kinetischer Farbttest (Cambrex, Bio Science, Lot 3L3000) verwendet. Quantifiziert wird mit einer jeweils frisch erstellten Eichkurve (50/5/0,5/0,05/0,005 EU/ml) und das Ergebnis auf den gesamten Filter bezogen (EU/Filter). Aus diesen Daten kann bei bekanntem Luftdurchsatz ( $m^3$ ) die Endotoxinkon-

zentration in der Luft (EU/m<sup>3</sup>) berechnet werden. Zur Qualitätssicherung wird jeder Probe ein Endotoxin-Standard zugesetzt, der zwischen 50 % und 200 % wiedergefunden werden muss. Liegen Proben außerhalb dieses Bereiches, wird weiter verdünnt. Zusätzlich wird bei jeder Serie ein laborinterner Kontrollstandard mitgeführt.

Die Probenahme für die Bestimmung der luftgetragenen Keime (Bakterien, Schimmel und Hefen) erfolgte tagsüber. Das beprobte Luftvolumen betrug 20 l. Die Agarplatten (2 x Casoagar und 2 x Sabouraudagar) wurden gekühlt gelagert und transportiert und bei unterschiedlichen Temperaturen inkubiert. Die ausgezählten koloniebildenden Einheiten (KBE) werden auf das beaufschlagte Probenluftvolumen umgerechnet. Die Untersuchungen wurden ebenfalls an 12 Ställen im Sommer, Winter und Frühjahr durchgeführt.

### **2.3 Bestimmung der Luftwechselrate und kontinuierliche Messung von Ammoniak, Lachgas und Methan**

Die Erfassung der Luftwechselrate von frei belüfteten Ställen stellt messtechnisch hohe Anforderungen an die Versuchsdurchführung, Messtechnik und Datenerfassung. Verschiedene Methoden sind in der KTBL-Schrift 401 [4] beschrieben. Eine besondere Schwierigkeit ist die hohe Variabilität des Luftwechsels bei Außenklimaställen und die Tatsache, dass Lufteintritt und –austritt witterungsbedingt an den selben Öffnungen stattfinden. Aus diesem Grund wurde in diesem Projekt die Methode einer kontinuierlichen Tracergasfreisetzung (24 räumlich gleichverteilte Austrittsstellen über den gesamten Stallquerschnitt) und der kontinuierlichen Erfassung der Luftwechselrate (neun Messstellen im Stall zur simultanen Messung der Tracergaskonzentration) ausgewählt. Diese Methode ist, im Vergleich zur Abklingmethode, in der Lage, die zeitlichen und räumlichen Variabilitäten des Luftwechsels in einem Stall abzubilden. Weitere methodische Ansätze zur Volumenstrombestimmung an frei belüfteten Ställen sind von BREHME [7] beschrieben.

Als Tracergas wurde Kohlenmonoxid verwendet (Reinheit 2.0, Firma Linde). Die Dosierung in einem Regelbereich bis 500 l/min erfolgte über ein Durchflussmessgerät (Firma Krone) in 100 m<sup>3</sup> Stallluft/h. Die Kalibrierung der Durchflussmenge wurde für Kohlenmonoxid berechnet. Zur homogenen Tracergasverteilung wurde Stallluft zentral im Stall mit einem Ventilator über einen Grobstaubfilter in ein Lüftungssystem angesaugt. Unmittelbar nach dem Ventilator wurde das Tracergas injiziert. Die Volumenregelung des Ventilators erfolgte über einen nachgeschalteten kalibrierten Messventilator. Das Lüftungssystem besteht aus einem Einlass, einem Hauptverteiler, 8 Nebenverteilern und 24 definierten Auslässen. Die gasdichten Verteilerschläuche werden mittels gasdichten Reißverschlüssen aneinander gezippt und so individuell an den jeweiligen Stallgrundriss angepasst. Die 24 Auslässe sind mittels Laser-Perforation für einen Durchfluss von jeweils 250 l/h ausgelegt. Die Berechnung und Fertigung des Lüftungssystems erfolgte durch die Firma Airquell, Herzogenaurach. Zur Tracergaserfassung wurden neun Kohlenmonoxidsensoren Modell MK 174-2 (0-100 ppm) und Transmitter Modell EC24 (4 bis 20 mA Ausgang) der Firma GfG, Dortmund eingesetzt. Die Sensoren waren direkt im Stall montiert. Die Messwerterfassung erfolgte jede Minute an allen neun Messstellen. Die Signale wurden über Messkabel an einen PC in einem Messcontainer übermittelt.

Das System wurde aus Sicherheitsgründen so konzipiert, dass die Tracergaszuführung automatisch unterbrochen wird, wenn folgende Störungen auftreten: Stromausfall, Defekt eines CO-Sensors (Kabelbruch), CO-Konzentration im Stall über 25 ppm (MAK-Wert). Die Wiederinbetriebnahme muss manuell erfolgen.



Abb. 2: System für kontinuierliche homogene Tracergasverteilung. links: Gesamtansicht. rechts: Ausschnitt mit Hauptverteiler, Nebenverteiler und zwei senkrechten Auslässen

Für die simultane Schadgasmessung wurde ein Multigasanalysator Modell Innova 1312 (Firma Innova) und eine Messstellenumschaltung (eigene Entwicklung) eingesetzt. Die Probenahme der Stallluft erfolgte kontinuierlich an den neun Messorten für Kohlenmonoxid und wurde über eine beheizbare Messgasleitung in den Messcontainer geführt. Pro Messstelle wurden die Konzentrationen von Ammoniak, Lachgas, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Methan und Wasserdampf bestimmt. Ein Messzyklus dauerte drei Minuten pro Messort. Dies ergibt sich aus den für die Einzelmessung notwendigen Integrationszeiten und Spülvorgängen der Messzelle. Zur Steuerung und Datenerfassung wurden eigens entwickelte Software und das kommerzielle Softwarepaket Labtech-Notebook pro verwendet. Diese Tracergas-Messungen wurden jeweils über die Dauer von fünf Tagen an einem Mastbullenstall sowie an zwei Milchviehställen durchgeführt. Die kontinuierliche Gasmessung und die Erfassung der Meteorologie am Standort lief über mehrere Wochen.

Die 12 Ställe, an welchen die kontinuierlichen 24-Stundenmessungen und die diskontinuierlichen ereignisbezogenen Messungen durchgeführt wurden, sind von SCHNEIDER [8] ausführlich dokumentiert. Die Beschreibungen enthalten Angaben zur Konstruktion, Größe, Tierzahl, Lüftung, Entmistung, Fütterung sowie maßstäblichen Grund- und Aufrisse. Die drei Rinderbetriebe (Mastbullen, Milchvieh 1 und 2), an welchen die Luftwechselrate bestimmt wurde, sind in Tabelle 1 kurz beschrieben.

Tab. 1: Beschreibung der drei Betriebe, an welchen die Luftwechselrate bestimmt wurde und kontinuierliche Gasmessungen erfolgten

|            | <b>Mastbullen</b>                                               | <b>Milchvieh 1</b>                                            | <b>Milchvieh 2</b>                                 |
|------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Tierzahl   | 180, Fleckvieh                                                  | 103, Schwarzbunt                                              | 85, Fleckvieh                                      |
| Bauart     | Außenklima, Tretmist, Futtertisch zentral, Strohlager im Stall  | Außenklima, Liegeboxenlaufstall, Melkhaus integriert          | Außenklima, Liegeboxenlaufstall, Melkhaus separat  |
| L x B x H  | 60,2 x 20,1 x 7,5 m                                             | 54,4 x 26,4 x 10,2 m                                          | 45,6 x 29,0 x 10,6 m                               |
| Entmistung | Frontlader                                                      | Schieberentmistung                                            | perforierte Laufflächen                            |
| Lüftung    | Querlüftung, Windschutznetze, First offen                       | Querlüftung, Curtains klimagesteuert, First offen             | Querlüftung, Wandrolllos, manuell, First offen     |
| Fütterung  | Maissilage (Biertreber, Getreideschrot, Soja), Futtermischwagen | Teil-TMR-Vorlage mit Futtermischwagen, 2 Kraftfutterstationen | TMR-Vorlage mit Futtermischwagen, Gruppenfütterung |

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Ammoniak-, Staub- und Partikelemissionen aus kontinuierlichen 24-Stundenmessungen

In Tabelle 2 sind für die fünf Haltungsverfahren die mittleren Konzentrationen für Ammoniak, Staubmasse mit den dazugehörigen Standardabweichungen dargestellt sowie Werte für die Partikelgrößenverteilung. Die Angaben zur Partikelgrößenverteilung beziehen sich auf berechnete Werte der Gesamtpartikelkonzentration  $N_i$ , des Medianpartikeldurchmessers  $D_i$  und dessen Standardabweichung  $\sigma_{gi}$  unter Annahme zwei sich überlagernder log-Normalverteilungen (SCHNEIDER ET AL. [9]). Der Index steht für die entsprechende Größenfraktion: 1 = Akkumulations-Mode und 2 = Grobpartikel-Mode.

Tab. 2: Mittlere Konzentrationen und deren Standardabweichung für Ammoniak, Staubmasse, Partikelgrößenverteilung für fünf Tierarten (alle Messungen über 24 Stunden im Sommer, Winter und Frühjahr mit 1 Minute Zeitauflösung)

|                                |                   | Milchvieh   | Mast-bullen | Mast-schweine | Lege-hennen | Mast-puten  |
|--------------------------------|-------------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| <b>Anzahl</b> der Messobjekte  |                   | 4           | 1           | 3             | 3           | 1           |
| <b>Ammoniak</b>                | ppm               | 3,28 ± 0,74 | 2,33 ± 1,23 | 8,89 ± 2,23   | 6,76 ± 1,53 | 6,93 ± 3,36 |
| <b>Staubmasse</b>              | mg/m <sup>3</sup> |             |             |               |             |             |
| PM 100                         |                   | 0,28 ± 0,43 | 0,20 ± 0,13 | 0,79 ± 0,59   | 1,57 ± 1,28 | 0,59 ± 0,33 |
| PM 10                          |                   | 0,20 ± 0,32 | 0,09 ± 0,11 | 0,27 ± 0,26   | 0,79 ± 0,73 | 0,40 ± 0,18 |
| PM 4                           |                   | 0,12 ± 0,18 | 0,03 ± 0,02 | 0,05 ± 0,04   | 0,44 ± 0,48 | 0,18 ± 0,02 |
| <b>Größenverteilung</b>        |                   |             |             |               |             |             |
| Partikel $N_1$                 | cm <sup>-3</sup>  | 172         | 225         | 242           | 265         | 140         |
| Partikel $D_1 \pm \sigma_{g1}$ | µm                | 0,31 ± 1,40 | 0,30 ± 1,40 | 0,29 ± 1,45   | 0,32 ± 1,50 | 0,32 ± 1,50 |
| Partikel $N_2$                 | cm <sup>-3</sup>  | 1,18        | 1,00        | 6,83          | 26,3        | 57,0        |
| Partikel $D_2 \pm \sigma_{g2}$ | µm                | 1,05 ± 2,53 | 1,65 ± 2,25 | 2,55 ± 2,03   | 2,58 ± 1,82 | 1,65 ± 2,00 |

Die Ammoniakkonzentrationen sind in allen Haltungssystemen mit Werten zwischen 2 ppm und 9 ppm vergleichsweise gering. Eine Erklärung hierfür ist die gute Durchlüftung der Stallsysteme, die zu einer Verdünnung der Konzentration im Stall und einem gleichmäßigen Abtransport der Emissionen aus dem Stall führt (vgl. 2.3).

Die Staubmassen zeigen für alle Fraktionen bei den Mastbullen die niedrigsten und bei den Legehennen die höchsten Werte. Die PM 100- Fraktion (einatembare) variiert zwischen 0,20 mg/m<sup>3</sup> bei den Mastbullen und 1,57 mg/m<sup>3</sup> bei den Legehennen. Die PM 10 Fraktion (Feinstaub) liegt bei der Mastbullenhaltung bei 0,09 mg/m<sup>3</sup>, gefolgt von den Milchviehbetrieben, Mastschweinen, Mastputen und Legehennen mit 0,79 mg/m<sup>3</sup>. Die relativ hohe PM 10 Staubmasse bei den Milchviehbetrieben von 0,20 mg/m<sup>3</sup> wird durch eine einzige Messung verursacht. Ohne diese Messung liegt der Wert bei 0,10 mg/m<sup>3</sup> ± 0,10 und ist damit vergleichsweise ähnlich dem Wert der Mastbullen. Bei der PM 4 Fraktion (alveolengängig) sind die Werte mit Ausnahme der Legehennen gering (0,03 mg/m<sup>3</sup> bis 0,18 mg/m<sup>3</sup>). Letztere weisen Werte von 0,44 mg/m<sup>3</sup> auf. Die hohen Variationen innerhalb der Tierarten werden im Wesentlichen durch die unterschiedlichen Haltungssysteme und weniger durch jahreszeitliche Schwankungen verursacht.

Die berechneten Daten zur Partikelgrößenverteilung spiegeln die Ergebnisse der Staubmassenbestimmung wider. Auffallend sind beim Grobstaub die hohen Medianpartikeldurchmesser  $D_2$  bei den Mastschweinen und Legehennen, sowie die um ein Vielfaches höheren Partikelkonzentrationen  $N_2$ . Beim Akkumulations-Mode, der vor allem die Partikelkonzentration bis hinunter zu  $0,3\mu\text{m}$  widerspiegelt, sind die Unterschiede zwischen allen Tierarten erwartungsgemäß gering. Dies wird vor allem am Medianpartikeldurchmesser  $D_1$  deutlich ( $0,29\mu\text{m}$  bis  $0,32\mu\text{m}$ ).

Auf die Darstellung der Stallklimaparameter wird an dieser Stelle verzichtet. Die Werte dienen vor allem zur Interpretation der Messepisoden und der Charakterisierung der Bedingungen am Probenahmeort.

### 3.2 Staub-, Endotoxin- und Keimkonzentrationen aus ereignisbezogenen Messungen

In Tabelle 3 sind für die Haltungsverfahren Kenngrößen in Form von mittleren Konzentrationen und den dazugehörigen Standardabweichungen aufgelistet.

Tab. 3: Mittlere Konzentrationen und deren Standardabweichung für Staubmasse, Endotoxingehalte und luftgetragene Keime für fünf Tierarten (alle Messungen im Sommer, Winter und Frühjahr)

|                                            | Milchvieh         | Mast<br>bullen     | Mast-<br>schweine   | Lege<br>hennen      | Mast<br>puten            |
|--------------------------------------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|
| <b>Anzahl</b> der Messobjekte              | 4                 | 1                  | 3                   | 3                   | 1                        |
| <b>Staubmasse</b> $\text{mg}/\text{m}^3$   |                   |                    |                     |                     |                          |
| E-Fraktion <sup>1)</sup> <sub>ST</sub>     | $0,11 \pm 0,07$   | $0,30 \pm 0,09$    | $1,48 \pm 0,89$     | $2,82 \pm 2,32$     | $1,65 \pm 0,21$          |
| A-Fraktion <sup>1)</sup> <sub>ST</sub>     | $0,04 \pm 0,02$   | $0,04 \pm 0,01$    | $0,09 \pm 0,06$     | $0,28 \pm 0,22$     | $0,42 \pm 0,27$          |
| E-Fraktion <sup>2)</sup> <sub>PG</sub>     | $0,57 \pm 0,39$   | $1,96 \pm 0,53$    | $6,27 \pm 8,66$     | $5,54 \pm 5,40$     | $2,13 \pm 1,38$          |
| A-Fraktion <sup>2)</sup> <sub>PG</sub>     | $0,14 \pm 0,14$   | $0,35 \pm 0,34$    | $0,60 \pm 0,50$     | $0,93 \pm 0,49$     | $1,28 \pm 1,06$          |
| <b>Endotoxin</b> $\text{EU}/\text{m}^3$    |                   |                    |                     |                     |                          |
| E-Fraktion <sup>3)</sup> <sub>tags</sub>   | $64 \pm 68$       | $598 \pm 87$       | $2.036 \pm 2.476$   | $7.258 \pm 8.554$   | $5.579 \pm 3.957$        |
| E-Fraktion <sup>4)</sup> <sub>nachts</sub> | $14 \pm 15$       | $388 \pm 553$      | $965 \pm 1.411$     | $1.802 \pm 3.511$   | $1.221 \pm 1.065$        |
| A-Fraktion <sup>3)</sup> <sub>tags</sub>   | $65 \pm 148$      | $241 \pm 316$      | $774 \pm 1.668$     | $535 \pm 705$       | $1.172 \pm 1.331$        |
| A-Fraktion <sup>4)</sup> <sub>nachts</sub> | $3 \pm 3$         | $11 \pm 16$        | $43 \pm 76$         | $858 \pm 2.312$     | $384 \pm 215$            |
| <b>Keime</b> $\text{KBE}/\text{m}^3$       |                   |                    |                     |                     |                          |
| Bakterien <sub>gesamt</sub>                | $4.175 \pm 2.410$ | $11.163 \pm 5.252$ | $49.763 \pm 45.408$ | $23.089 \pm 12.639$ | $33.000 \pm \text{n.b.}$ |
| Schimmel <sub>gesamt</sub>                 | $1.561 \pm 3.137$ | $321 \pm 372$      | $2.138 \pm 3.372$   | $2.289 \pm 4.577$   | $4.267 \pm 5.237$        |

<sup>1)</sup> <sub>ST</sub> = stationäre Messung (8 h, tagsüber)

<sup>3)</sup> <sub>tags</sub> = während der Fütterung (2 h tagsüber)

<sup>2)</sup> <sub>PG</sub> = personengetragen während der Arbeitszeit

<sup>4)</sup> <sub>nachts</sub> = während der Ruhephase (8 h, nachts)

Die mittleren Konzentrationen für einatembaren Staub (E-Fraktion) variieren in der Stallluft zwischen  $0,11$  und  $2,82\text{ mg}/\text{m}^3$ , für alveolengängigen (A-Fraktion) zwischen  $0,04$  und  $0,42\text{ mg}/\text{m}^3$ . Bei personengetragenen Messungen erreichen die Werte in Abhängigkeit von Art und Dauer der Arbeitsabläufe ein Mehrfaches. Auffällig ist die sehr hohe alveolengängige Staubfraktion mit  $1,28\text{ mg}/\text{m}^3$  während der Arbeiten im Mastputenstall. Konzentrationen für die PM 10 Fraktion (Feinstaub) reichen von  $0,02$  bis  $2,27\text{ mg}/\text{m}^3$ .

Die mittleren Endotoxinkonzentrationen sind in den Milchviehställen mit  $64 \text{ EU/m}^3$  am niedrigsten und bei Legehennen am höchsten ( $7.258 \text{ EU/m}^3$ ), ca. ein Viertel der Endotoxinkonzentration entfällt auf den alveolengängigen Staub. Nachts sind die Endotoxinwerte vor allem in der E-Fraktion durch die geringere Tieraktivität erheblich geringer. Die extremen Schwankungsbreiten sind durch die großen Unterschiede innerhalb der Haltungssysteme und durch starke jahreszeitliche Schwankungen bedingt.

Die Konzentration luftgetragener Bakterien reichte von  $4.175 \text{ KBE/m}^3$  bis  $49.763 \text{ KBE/m}^3$  und korreliert gut mit den Endotoxinwerten. Schimmelpilzkonzentrationen liegen mit Ausnahme der Mastbullen, wo sie praktisch keine Rolle spielen, zwischen  $1.500$  und gut  $4.000 \text{ KBE/m}^3$ .

### 3.3 Luftwechselrate und kontinuierliche Messung von Ammoniak, Lachgas und Methan

Die Luftwechselrate lässt sich mit dem entwickelten Messaufbau und CO als Tracergas kontinuierlich und reproduzierbar erfassen. In Abbildung 3 ist beispielhaft der Verlauf der Luftwechselrate über eine Dauer von 48 bzw. 36 Stunden dargestellt.

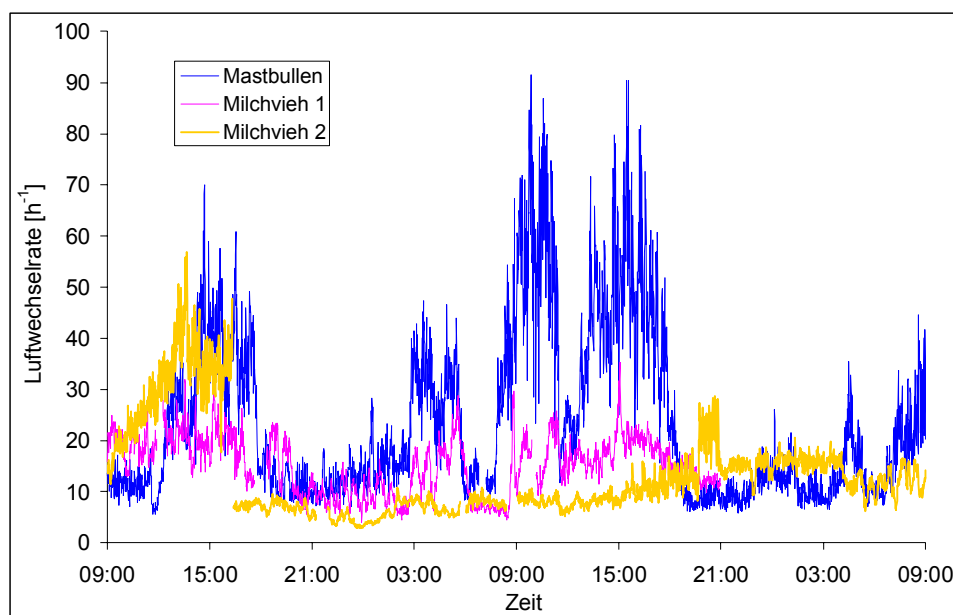


Abb.3 : Beispiel für zeitlichen Verlauf der Luftwechselrate in drei Stallsystemen (Ausschnitt aus Dauermessung), simultan gemessen an neun Messstellen mit 1 Minute Zeitauflösung

Die Ergebnisse verdeutlichen die hohe Variabilität der Messgrößen. Regelbarkeit der Öffnungsflächen und Anströmbedingungen wirken sich direkt auf die Höhe der Luftwechselrate aus. In Tabelle 4 sind für die drei Stallsysteme die mittleren Luftwechselraten und daraus berechneten Emissionsraten dargestellt. Die hier dargestellten Messungen erfolgten alle im Spätsommer bei relativ warmer Witterung (Tagesmitteltemperatur zwischen  $10$  und  $12^\circ\text{C}$ ) über die Dauer von fünf Tagen.

Tab. 4: Mittlere Luftwechselrate mit Minimal- bzw. Maximalwert, gemittelte Emissionsraten in mg/GV\*h mit Standardabweichung für Ammoniak, Lachgas und Methan für drei Rinderbetriebe

|                                |                 | <b>Mastbullen</b> | <b>Milchvieh 1</b> | <b>Milchvieh 2</b> |
|--------------------------------|-----------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| mittlere Luftwechselrate       | h <sup>-1</sup> | 22,9              | 15,4               | 15,3               |
| Min – Max                      |                 | 5,5 – 91,6        | 2,9 – 56,9         | 3,9 – 38,2         |
| Emissionsrate NH <sub>3</sub>  | mg/GV h         | 1.275 ± 877       | 1.887 ± 660        | 2.156 ± 1.048      |
| Emissionsrate N <sub>2</sub> O | mg/GV h         | 266 ± 222         | 691 ± 412          | 735 ± 288          |
| Emissionsrate CH <sub>4</sub>  | mg/GV h         | 16.509 ± 8.384    | 22.815 ± 10.594    | 19.917 ± 6.635     |

Die Ergebnisse veranschaulichen, dass die angewandte Tracergasmethode die Luftwechselrate in einem weiten Bereich erfasst und für Ställe unterschiedlicher Größe und Ausführung geeignet ist. Zusammen mit der kontinuierlichen Gasmessung an neun Messstellen im Stall lassen sich so Emissionsraten für gasförmige Stoffe berechnen. Trotz der im Vergleich zu vielen bisher veröffentlichten Arbeiten relativ langen Messdauer von fünf Tagen wirken sich besondere, unregelmäßig auftretende Arbeitsabläufe oder Wettersituationen, wie an den hohen Standardabweichungen gut zu erkennen ist, in erheblichem Maße auf die Messungen aus. Einige Beispiele hierfür waren langes Umpumpen von Gülle beim Betrieb Milchvieh 2, Abtransport von Mastbullen und Einstallung von Jungtieren, starke, langanhaltende Ostwinde beim Betrieb Milchvieh 1.

Untersuchungen von ZHANG ET AL. [15] zum Emissionsverhalten frei gelüfteter Ställe für Milchvieh zeigen für vergleichbare Haltungssysteme tendenziell etwas höhere Emissionsraten für Ammoniak (450 - 5.066 mg/GV h) und ähnliche für Methan (15.150 - 26.600 mg/GV h). Die Lachgasemissionen wurden geringer (0 - 340 mg/GV h) eingeschätzt.

## 4 Diskussion

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass bei der Ermittlung von Emissionsdaten die Sammelzeit und das verwendete Verfahren einen erheblichen Einfluss haben und ohne deren Kenntnis ein Vergleich von Messdaten nicht sinnvoll ist.

Die gemessenen Emissionen unterliegen alle starken Schwankungen. In den Rinderställen werden in der Regel die niedrigsten Konzentrationen gemessen, in den Geflügelställen die höchsten. Die Schweineställe liegen dazwischen. Für relevante Parameter (Jahreszeit, Tageszeit, Aktivitätsphasen, u.a.m.) konnten signifikante Einflüsse auf die Emissionen belegt und quantifiziert werden.

Selbst wenn die verwendeten Verfahren genannt sind, ist zu beachten, dass sich die Normen und Richtlinien in scheinbar identischen Punkten unterscheiden. Ein Beispiel ist die Berechnung der Sammeleffizienzen, die den einatembaren Staubfraktionen zugrunde liegt. Die E-Fraktion (einatembar) nach VDI 2265 [11] liegt um etwa 22 % über den Werten der PM 100 Fraktion (einatembar) nach EN 481 [12]. Wie die Ergebnisse der berechneten Partikelgrößenverteilung und der verschiedenen Staubmassenfraktionen in Tabelle 2 verdeutlichen, sind in der Tierhaltung die Verhältnisse der Staubmassenanteile unterschiedli-

cher Größenfraktionen zueinander nicht identisch. Somit birgt die Abschätzung der PM 10 Fraktion aus Messungen der PM 100 Fraktion ohne Kenntnis der Partikelgrößenverteilung, wie z. B. in TAKAI ET AL. [13] erfolgt, erhebliche Unsicherheiten. Die in diesem Projekt, durch den simultanen Betrieb unterschiedlicher Staub- und Gasmessgeräte gewonnenen Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse beim Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Methoden.

Die Umsetzung der Ansprüche eines weitgehenden Arbeitsschutzes und der Tiergerechtigkeit führen im Stall oftmals zu unterschiedlichen Resultaten. Gilt es bei der Arbeitsmedizin Emissionen zu vermeiden, führen Maßnahmen, die ein tiergerechtes Verhalten begünstigen (Scharrräume bei Geflügel, Stroheinstreu) zu erhöhten Staubbelastungen, wie im Rahmen dieses Projektes am Beispiel der Staubentstehung in zwei Legehennenbetrieben (SCHNEIDER ET AL. [14]) beschrieben wurde.

Die absoluten Werte der Emissionsraten (s. Tabelle 4) sind derzeit für eine Abschätzung der jährlichen Emissionsrate nur mit Einschränkungen zu verwenden. Zum einen sind die Messungen nicht während allen Jahreszeiten erfolgt, zum anderen wirken sich bei Messepisoden im Sommer jahreszeitlich spezifische Arbeiten im Stall und Güllelager stark auf das Emissionsverhalten der Ställe aus. Um Einflüsse der Meteorologie oder von Arbeitsabläufen gering zu halten, müssten die Messungen unter Umständen erheblich länger durchgeführt werden. Dies ist aber mit höheren Kosten verbunden. Als Alternative wird derzeit die Möglichkeit einer vereinfachten Volumenstromabschätzung geprüft, die auf Grundlage der in diesem Projekt gewonnenen meteorologischen Zeitreihen und Volumenstrommessungen erfolgt.

Im Projekt ist es gelungen, bisher getrennt untersuchte Fragestellungen der Arbeitsmedizin, Tierhygiene und Umweltwirkung zu verknüpfen und für 12 Ställe Emissionsdaten zu erheben. Eine Tracergas-Methode zur kontinuierlichen Erfassung der Luftwechselrate an frei belüfteten Ställen wurde entwickelt und an drei Ställen der Rinderhaltung erfolgreich eingesetzt. Die Methode eignet sich zur Erhebung von Emissionsraten an beliebigen Ställen mit freier Lüftung.

## Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 481 (1993): Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel, entspricht EN 481: Workplace atmospheres. Size fraction definitions for measurement of airborne particles, Beuth Verlag, Berlin
- [2] VDI (1980): VDI-Richtlinie 2265; VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4; Feststellen der Staubsituation am Arbeitsplatz zur gewerbehygienischen Beurteilung
- [3] DIN EN 12341 (1998): Luftbeschaffenheit - Ermittlung der PM 10-Fraktion von Schwebstaub - Referenzmethode und Feldprüfverfahren zum Nachweis der Gleichwertigkeit von Messverfahren und Referenzmessmethode; Air quality - Determination of the PM 10 fraction of suspended particulate matter - Reference method and field test procedure to demonstrate reference equivalence of measurement methods. Beuth Verlag Berlin
- [4] KTBL, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (Hrsg.) (2001): Messmethoden für Ammoniak-Emissionen. KTBL-Schrift 401, Darmstadt

- [5] KRdL, Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN – Normenausschuss (2003): Luftbeschaffenheit - Bestimmung der Geruchsstoffkonzentration mit dynamischer Olfaktometrie; Deutsche Fassung EN 13725:2003, Beuth Verlag, Berlin
- [6] UBA (2005): Hintergrundpapier zum Thema Staub/Feinstaub (PM). <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/feinstaub.pdf>
- [7] BREHME, G. (2000): Quantifizierung des Luftvolumenstromes in frei gelüfteten Rinderställen mit Hilfe der Kompartimentalisierungsmethode zur Bestimmung umweltrelevanter Emissionsmassenströme. Dissertation, Fakultät für Agrarwissenschaften, Uni Göttingen
- [8] SCHNEIDER, C. (2006): Messen und modellieren von Partikelemissionen aus der Tierhaltung. Diplomarbeit, FH Rüsselsheim
- [9] SCHNEIDER, F., S. NESER, A. GRONAUER, C. SCHNEIDER AND F. SABO (2006): Modelling Measured Particle Size Distributions in Stables - a new Approach to Specify Particulate Matter, accepted for: World Congress 2006, Bonn Agricultural Engineering for a better World
- [10] TA-Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002
- [11] VDI (1980): VDI 2265. VDI-Richtlinien; VDI-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 4; Feststellen der Staubsituation am Arbeitsplatz zur gewerbehygienischen Beurteilung
- [12] DIN EN 481 (1993): Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel, entspricht EN 481: Workplace atmospheres. Size fraction definitions for measurement of airborne particles, Beuth Verlag, Berlin
- [13] TAKAI H., S. PEDERSEN, J.O. JOHNSEN, J.H.M. METZ, P. W. P. GROOT KOERKAMP, G.H. UENK, V.R. PHILLIPS, M.R. HOLDEN, R.W. SNEATH, J.L. SHORT, R.P. WHITE, J. HARTUNG, J. SEEDORF, M. SCHRÖDER, K.-H. LINKERT AND C.M. WATHES (1998): Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70, 59-77
- [14] SCHNEIDER, F., R. EICHELSER, S. NESER, B. HAIDN, A. GRONAUER, R. SCHIERL UND U. EGGER (2005): Es liegt was in der Luft. *DGS Magazin* 26, S. 14-17
- [15] ZHANG, G., J.S. STRØM, B. LI, H.B. ROM, S. MORSING, P. DAHL UND C. WANG (2005): Emission of Ammonia and Other Contaminant Gases from Naturally Ventilated Dairy Cattle Buildings, *Biosystems Engineering* 92 (3), S. 355-364