

Emission von Bioaerosolen aus Tierhaltungsanlagen -

Methoden und Ergebnisse verfügbarer Bioaerosoluntersuchungen in und um landwirtschaftliche Nutztierhaltung

Marcus Clauß

Thünen Working Paper 138

Dr. Marcus Clauß
Thünen-Institut für Agrartechnologie
Bundesallee 47
38116 Braunschweig
Tel.: 0531 596 4253
E-Mail: marcus.clauss@thuenen.de

Thünen Working Paper 138

Braunschweig, Januar 2020

Gliederung

Zusammenfassung	1
Summary	4
1 Einleitung	6
2 Quelle von Bioaerosolen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung	9
3 Mikrobielle Leitorganismen für Bioaerosole aus der Tierhaltung	11
4 Messung von Bioaerosolen	23
4.1 Probenahme von Bioaerosolen	24
4.2 Auswertung	29
4.2.1 Kultivierung	29
4.2.2 Molekularbiologische Methoden	31
4.2.3 Nachweis von Endotoxinen	32
5 Ergebnisse von Bioaerosolmessungen	34
5.1 Messungen im Stall	37
5.2 Emissionen	51
5.3 Tagesgänge	57
5.4 Transmission	59
5.4.1 Tenazität	59
5.4.2 Größe von Bioaerosolen	62
5.5 Immissionen	65
6 Ausbreitungsprognosen für Bioaerosole	68
7 Gesundheitliche Bewertung von Bioaerosolen	70
8 Nationale und Internationale Regularien	75
9 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen	79
10 Zukünftige Herausforderungen	82
Literatur	84

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht sichtet die weltweit verfügbare Literatur zu Methoden und Ergebnissen von Bioaerosoluntersuchungen in und um Landwirtschaftliche Nutztierhaltung und fasst die wichtigsten Punkte zusammen. Der weltweite Trend der Industrialisierung der Tierproduktion mit regionaler Konzentrierung von Betrieben sowie steigenden Tierzahlen und Besatzdichten führt zu einem Anstieg der Bioaerosolemissionen. Wesentliche Quellen der Bioaerosole sind vor allem die Mikroorganismen auf den Tieren, in ihren Fäkalien, in der Einstreu und im Futter. Werden sie aufgewirbelt emittieren sie mit der Abluft aus den Ställen heraus auch in die Umwelt. Daher wächst die Besorgnis über eine gesundheitliche Beeinträchtigung der Bevölkerung im Umfeld von großen Tierhaltungsanlagen. In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung sind weltweit hunderte verschiedener Viren-, Bakterien- und Schimmelpilzarten nachgewiesen worden, wobei Vertreter der Bakteriengruppe *Staphylococcaceae* besonders häufig in großer Zahl gefunden wurden. Diese Gruppe scheint somit als spezifischer Leitparameter für Bioaerosole aus der Tierhaltung geeignet. Bioaerosole können Online mit Partikelspektrometern und Offline mit klassischen Methoden gemessen werden, d. h. Probenahme vor Ort mit anschließender Auswertung über kulturbasierte oder molekularbiologische Methoden im Labor. Aufgrund des komplexen Aufbaus von Bioaerosolpartikeln in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung sind Partikelspektrometer nur bedingt zu deren Klassifizierung einsetzbar. Die klassischen Nachweisverfahren sind vor allem zur Detektion von Mikroorganismen besser geeignet. Dabei sollte die Probenahme aufgrund einer Vielzahl unterschiedlicher Sammelverfahren möglichst mit standardisierten Systemen durchgeführt werden, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten. Die Systeme sollten zudem eine möglichst hohe physikalische und biologische Sammeleffizienz haben. Die Auswahl eines geeigneten Sammelsystems sollte primär abhängig von der Fragestellung erfolgen. Nach der Sammlung der Bioaerosole erfolgt die Auswertung der Proben meist über Kultivierung von Mikroorganismen und/oder verschiedene biochemische und molekularbiologische Tests. Besonders letztere erlauben, vor allem in Kombination mit kulturbasierten Verfahren, einen detaillierten Einblick in die Zusammensetzung von Bioaerosolen. Hier ist jedoch noch eine weitere Standardisierung der für Bioaerosole geeigneten Methoden notwendig. Endotoxine als Bestandteile von Bioaerosolen werden überwiegend mit dem LAL-Test nachgewiesen, der jedoch relativ störanfällig ist.

Die meisten Daten zu Bioaerosolmessungen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung stehen aus den USA und Deutschland zur Verfügung. Hier wurden in den Ställen von Schweinen, Rindern und Hühnern vor allem die Konzentrationen von Bakterien, Schimmelpilzen und Endotoxinen gemessen. Bei relativ großen Schwankungsbreiten der Ergebnisse bei allen Tierarten wurden die höchsten Konzentrationen luftgetragener Bakterien in Haltungssystemen für Hühner gefunden, gefolgt von Puten, Enten, Schafen, Ziegen, Schweine, Rinder, Pferde und Kaninchen, wobei die verschiedenen Haltungsverfahren und Produktionsstadien einen deutlichen Einfluss auf die Höhe der Konzentrationen haben. Auch publizierte Emissionsfaktoren für luftgetragene

Mikroorganismen unterscheiden sich für dieselbe Tierart und Haltungsform teilweise erheblich, hervorgerufen auch durch unterschiedliche Probenahmebedingungen, Sammelmethode und verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Konzentrationen. Bioaerosole wurden bisher ausschließlich Tagsüber gemessen. In den Tierställen können die Konzentrationsunterschiede luftgetragener Bakterien zwischen Tag und Nacht jedoch erheblich sein. Emissionsfaktoren können sich sogar um bis zu 3 Zehnerpotenzen unterscheiden, abhängig von der Tierart. Dies sollte in Zukunft z. B. bei der Berechnung von Jahresmittelwerten berücksichtigt werden. Bei der Transmission, also dem Transport der Bioaerosole über die Luft, sind die Mikroorganismen weitgehend ungeschützt Wind und Wetter ausgesetzt. Wie weit sie getragen werden, ist neben den meteorologischen Bedingungen primär von zwei Parametern abhängig: Die Tenazität, also die Fähigkeit den luftgetragenen Zustand zu überleben und dem aerodynamischen Durchmesser der Bioaerosolpartikel, der z. B. bestimmt wie schnell diese sedimentieren. Wie lange Mikroorganismen in der Luft lebensfähig bleiben ist wiederum von vielen Faktoren abhängig und nur unzureichend untersucht, letzteres vor allem aufgrund der bisher eingesetzten und nur bedingt geeigneten Testsysteme. Bezüglich der Partikelgröße werden in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung die meisten luftgetragenen Mikroorganismen in deutlich größeren Partikelfractionen gefunden, als es die Größe der Einzelzellen der Organismen vermuten lässt. Dabei sind 30 % bis 70 % der Bakterien auf Partikeln $> 10 \mu\text{m}$ zu finden, wobei die Verteilung der verschiedenen Bioaerosolbestandteile sehr unterschiedlich sein kann. Auch korreliert die Größenverteilung der Mikroorganismen nicht unbedingt mit der Größenverteilung von Staubpartikeln. Die Konzentrationen von Bioaerosolen in der Immission fallen exponentiell mit der Entfernung zur Emissionsquelle ab. Dies ist primär abhängig von der Partikelgröße und meteorologischen Bedingungen. Anstelle aufwändiger Messungen kann die Ausbreitung von Bioaerosolen auch mit Computermodellen simuliert werden. Bisher überschätzen die Modelle die tatsächlichen Immissionen jedoch meist um ein Vielfaches, da Nachtabenkung, Partikelgrößenverteilungen und Absterberaten der Mikroorganismen nicht berücksichtigt werden.

Aus einer Vielzahl von Publikationen ist seit langem bekannt, dass Bioaerosole, vermutlich synergistisch mit anderen Luftschadstoffen, in Tierställen die Gesundheit des dort arbeitenden Personals und auch der Tiere negativ beeinflussen. Dabei wurde bisher, bis auf die Endotoxine, keine eindeutige Dosis-Wirkungs-Beziehung festgestellt. Es konnte bis heute auch keine eindeutige Aussage über eine etwaige Gefährdung von Anwohnern von Tierhaltungen getroffen werden. Daher sind bisher für Bioaerosole, außer Endotoxine, keine allgemeinen Grenzwerte formuliert, bei deren Überschreitung mit einer schädlichen Wirkung auf die Gesundheit gerechnet werden kann. Stattdessen findet das Vorsorgeprinzip Anwendung und es findet meist eine umweltmedizinische Bewertung von Einzelfällen statt. Um die Bioaerosolemissionen vorsorglich zu reduzieren stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung. Durch ein gutes Stallmanagement und Hygienekonzept unterstützt durch technische Lösungen wie z. B. die Abluftreinigung kann eine deutliche Reduktion von stallspezifischen Bioaerosolen von weit über 90 % erreicht werden. Ob in Zukunft die Ableitung einer Dosis-/Wirkungsbeziehung für Bioaerosole oder zumindest eine auf validen Daten basierte umweltmedizinische Bewertung der

Emissionen gelingt ist offen. Helfen könnten evtl. das Überdenken der stallspezifischen Leitparameter und eine zukünftig verstärkte Untersuchung von Viren. Dazu gehört auch die Validierung und Weiterentwicklung von High-Volume Sammlern für Bioaerosole, die mit den klassischen Probenahmesystemen nur schwer zu erfassen sind. Bei Ausbreitungsprognosen sollten künftig die Partikelgrößenverteilungen der Mikroorganismen und die unterschiedliche Höhe der Emissionen zwischen Tag und Nacht berücksichtigt werden. Das gilt ebenso für die Tenazität, wobei hier erst neue Messsysteme entwickelt werden sollten, um zu aussagekräftigen Daten zu kommen. Es sollte ebenfalls ein mittelfristiges Ziel sein, die Bioaerosolkonzentrationen bereits im Stall zu senken. Hierzu stehen Konzepte für angepasste Abluftreinigungsanlagen zur Verfügung, die Zusammen mit weiteren Maßnahmen zu einer Reduktion von ein bis zwei Zehnerpotenzen führen können.

Schlüsselwörter: *Bioaerosole, Landwirtschaft, Nutztierhaltung, Emissionen, Literaturübersicht, Methoden*

Summary

The global trend towards intensification and industrialization of animal production with regional concentration of livestock plants and increasing numbers of animals and stockpiles leads to a raise in bioaerosol emissions to the environment in certain areas and to an increasing concern about health impairment of the population in the vicinity. The essential sources of the bioaerosols are the animals and their faeces, the litter and the feed. The particles from there get into the airborne state and emit from the stables also into the environment. Hundreds of different viruses, bacteria and mold fungi have been detected worldwide in agricultural livestock farming. The bacterium group of the *Staphylococcaceae* appears to be most suitable for animal husbandry as a specific indicator or guiding parameter. Bioaerosols can be measured online with particle spectrometers and offline using classical methods, i. e. sampling on site with subsequent evaluation by means of culture-based or molecular biological methods in the laboratory. The classical detection methods are best suited to the complexity of bioaerosols in agricultural livestock farming. The sampling of bioaerosols should be carried out as far as possible using standardized systems which have high physical and biological collection efficiency in order to ensure comparability of the data. The selection of the collection system should always depend on the question primarily. After the bioaerosols have been collected in a sample, the evaluation is usually carried out via cultivation and / or various biochemical and molecular biological methods. Especially the latter allow, in combination with the classical culture-based methods, for a detailed insight into the composition of bioaerosols. But here a further standardization of the methods for bioaerosols is necessary. Endotoxins, on the other hand, are predominantly detected by the LAL test, which, however, is still very susceptible to disturbances. Most data on bioaerosol measurements in agricultural livestock farming available for this review are from the USA and Germany. Here, the concentrations of bacteria, molds and endotoxins were measured in the stables of pigs, cattle and chickens. The highest concentrations of airborne bacteria were found in stables for chickens, followed by turkeys, ducks, sheep, goats, pigs, cattle, horses and rabbits, with the different husbandry and production stages having a significant influence. In the emission of the stables, the published emission factors for airborne microorganisms differ considerably for the animal species and part of the keeping system, also by the different sampling conditions, collection methods and different methods for the determination of the concentrations. The concentrations of the airborne bacteria in livestock during the day and night can deviate by a factor of ten. The deviation may further increase to a factor of 1000 if emission factors are calculated on the basis of the specific volumetric flow rates. This must be taken into account in the calculation of annual average values of emission factors. During transportation, i. e. the transport of bioaerosols via the air, the micro-organisms are largely exposed to wind and weather. The extent to which they are carried is primarily dependent on two parameters: the tenacity, i. e. the ability to survive the airborne condition, and the size and composition of the bioaerosol particles, i. e. how quickly they sediment. How long microorganisms are viable in the air is depending on very many factors and, due to the previously used test systems, only

insufficiently studied. Regarding the particle size, most of the air-borne microorganisms are found in the agricultural livestock farming in significantly larger particle size or mass fractions than the size of the individual cells of the organisms can be assumed. 30% to 70% of the bacteria can be found in mass fractions larger than PM₁₀ though, where the distribution of the different bioaerosol components can be very different and not uniformly correlated with the distribution of the dust fractions. The immission concentrations of bioaerosols exponentially decrease with the distance to the emission source, mainly depending on the particle size and meteorological conditions. Instead of carrying out complex measurements, the spread of bioaerosols can also be simulated with computer models. Up to now, however, the models have often surpassed the emissions, since night reduction, particle size distributions and abortions are still not taken into account. From hundreds of publications, it has been known for a long time that bioaerosols probably interact synergistically with other air pollutants on livestock breeders' health, of the staff working there and also the animals. No dose / effect relationship has been established so far. To date there has been no clear statement as to the possible danger to the inhabitants of animal husbandry. Therefore, no general limit values are formulated for bioaerosols, except for a certain extent for endotoxins, which can be expected to have a detrimental effect on health. Instead, an environmental assessment of individual cases usually takes place from the precautionary principle. A number of measures are available to reduce the bio-aerosol emissions as a precaution. Thanks to a good stable management and hygienic concept supported by technical solutions, for example, the exhaust air purification, a significant reduction of livestock husbandry originating bioaerosols of well over 90% can be achieved. Whether in the future the derivation of a dose / response relationship for bioaerosols or at least a valid environmental medical assessment of the emissions is possible remains to be seen. Until then, in the medium term, the indicator organisms and guiding parameters for bioaerosols from livestock husbandry should be (re)considered and viruses should be included. This comprises the validation and further development of high-volume collectors for bioaerosols. In the case of dispersion modelling, the particle size distributions of the microorganisms and the different levels of emissions between day and night must be considered for the short term. This also applies to the tenacity, where new measurement systems are needed in order to obtain meaningful data. It should also be a medium-term goal to reduce the bio-aerosol concentrations already in the stable. Concepts for adapted exhaust air purification plants are available for this purpose, which together with further measures can lead to a reduction of 90% to 99%. There still is a lot to do.

Keywords: *Bioaerosols, agriculture, animal husbandry, emissions, review, methods*

1 Einleitung

Der weltweite Trend der Industrialisierung der Tierproduktion mit regionaler Konzentrierung von Betrieben sowie steigenden Tierzahlen und Besatzdichten führt zu einem Anstieg der Bioaerosolemissionen aus den Ställen heraus in die Umwelt und damit zur Besorgnis über eine gesundheitliche Beeinträchtigung der Bevölkerung.

Aufgrund der weltweit steigenden Nachfrage nach tierischen Lebensmitteln hat sich die Tierproduktion in vielen Industrie- und Schwellenländern in den letzten 50 Jahren dramatisch verändert. Der Trend geht weg von kleinen landestypischen traditionellen Betrieben hin zu industrialisierten und spezialisierten Tierhaltungen mit steigenden Tierzahlen und hohen Besatzdichten (Ko et al. 2010, Millner 2009, Thorne 2007, Thu 2002). Der Fokus liegt hierbei auf der Steigerung der Effizienz und der Senkung der Kosten. Dabei wird schon längst nicht mehr nur für den eigenen Markt produziert sondern auch immer mehr für den Export (AVEC 2011, Deutscher Bauernverband 2016). Die Intensivtierhaltung ist mittlerweile ein wichtiger Wirtschaftsfaktor in vielen Ländern in Bezug auf Arbeitsplätze und Export (Melse et al. 2009). Die Landwirtschaft ist die weltweit größte Wirtschaftsbranche. In Deutschland gibt es 650.000 Haupt- und Nebenerwerbslandwirte die 1,5 % der deutschen Erwerbstätigen entsprechen. In der gesamten Agrarbranche arbeiten hierzulande 3 Millionen Menschen, entsprechend 7% der Erwerbstätigen. Diese erwirtschaften zusammen immerhin 13% des Bruttoinlandsprodukts. Die produzierte Menge an Tieren ist gigantisch. Im Jahr 2015 betrug die weltweit produzierte Fleischmenge 320 Millionen Tonnen, wovon alleine 47,1 Tonnen auf die EU entfallen (Deutscher Bauernverband 2016).

Weltweit werden vor allem Hühner und Schweine immer öfter in geschlossenen zwangsgelüfteten Ställen gehalten, abhängig von der Tierart mit verschiedenen Fest- und Flüssigmistensystemen mit oder ohne Einstreu, so z. B. in Kanada (Letourneau et al. 2009), Irland (Coggins et al. 2007), den Niederlanden (Myrna et al. 2017), den USA (Greger & Koneswaran 2010, Hong et al. 2012), Korea (Jo & Kang 2005), China (Gao et al. 2017), Australien (Runge et al. 2007, Chinivasagam et al. 2009), Südafrika (Venter et al. 2004) oder Polen (Lonc & Plewa 2010). Puten, Rinder, Schafe und Ziegen werden dagegen nach wie vor fast ausschließlich in freibelüfteten Offenställen, häufig auch mit Auslauf oder Weidegang gehalten. Gülle oder Mist werden i. d. R. auf den Betrieben gelagert bis sie als Wirtschaftsdünger auf die Felder ausgebracht werden. Durch die Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung geht häufig eine Konzentrierung in den Ställen von immer mehr Tieren auf engem Raum einher. Diese stellt besondere Herausforderungen an den Stallbau vor allem in Bezug auf das Lüftungsregime und die Hygiene. Eine Steigerung der Tierzahlen in den Ställen führt dort zwangsläufig zu einem Anstieg von Luftschadstoffen wie verschiedene Schädgase (z. B. Ammoniak, Methan), Feinstaub und Bioaerosole. Als Bioaerosole bezeichnet man luftgetragene organische Partikel biologischer Herkunft (angelehnt an DIN EN 13098). Konkret sind dies u. a. luftgetragene Viren, Bakterien,

Schimmelpilzsporen, Schimmelpilzhyphen und Pollen, deren Bruchstücke und Stoffwechselprodukte, wie z. B. Endotoxine und Mykotoxine, sowie Fragmente von Hautschuppen, Haaren, Federn, Fäkalien, Einstreumaterial und Futterresten. Bioaerosole entstehen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung entlang der gesamten Produktionskette, bei der vorgelagerten Produktion von Tierfutter (z. B. Abdel Hameed et al. 2003, Ghasemkhani et al. 2006, Kim et al. 2009, Straumfors et al. 2016), bei der eigentlichen Aufzucht und Haltung der Tiere (z. B. Clark et al. 1983, Whyte et al. 2001), Bei Tiertransporten (Rule et al. 2008), bei der Schlachtung (z. B. Hagmar et al. 1999, Lutgring et al. 1997, Lues et al. 2007, Paba et al. 2014, Haas et al. 2005, Liang et al. 2013), bei der Fleischverarbeitung (Kotula & Kinner 1964, Lenhart et al. 1982, Lenhart & Olenchock 1984, Dobeic et al. 2011, Baikov & Petkov 1987), der Weiterverarbeitung von Eiern (Boeniger et al. 2001, Smith et al. 1990) beim Transport (Dungan 2010) und der Ausbringung von Mist oder Gülle als Dünger auf Felder (z. B. Jahne et al. 2015, Jahne et al. 2016, Boutin et al. 1988, Murayama et al. 2010) oder bei der Aufbereitung von Abwasser aus Tierhaltungsanlagen (Kim et al. 2012). Dabei gelangen die Bioaerosole aus den Ställen auch in die Umwelt und in bewohnte Gebiete (Abb. 1).

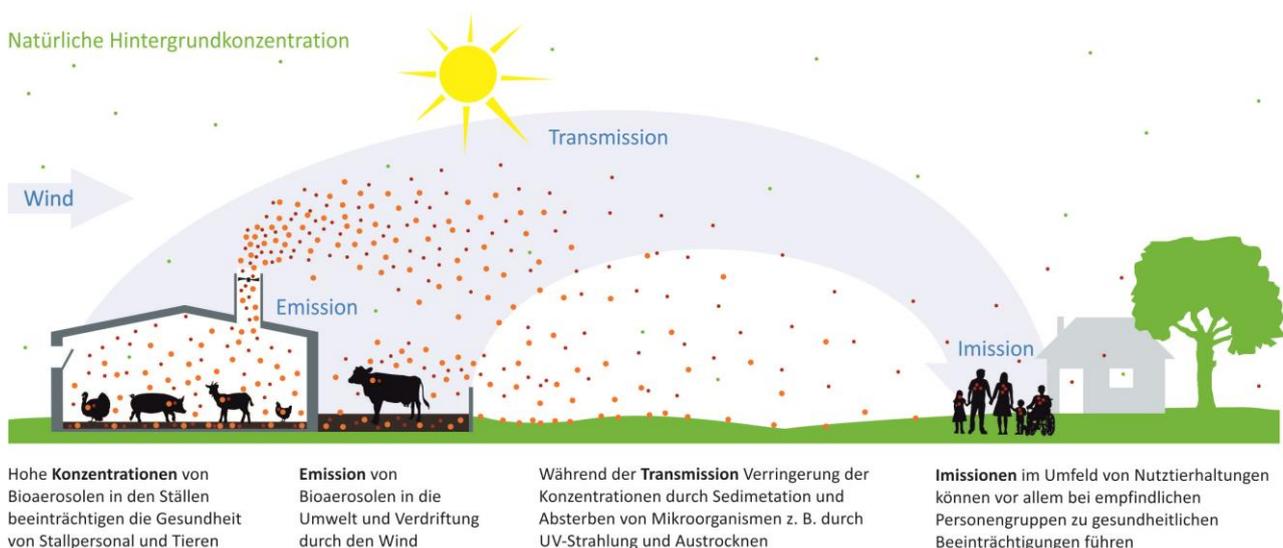


Abb. 1: Schematische Darstellung des Transports von Bioaerosolen aus Tierhaltungsanlagen in die Umwelt

Es ist seit langem bekannt, dass die in den Ställen vorherrschenden und im Vergleich zur natürlichen Hintergrundkonzentration (Kolk et al. 2009, Clauß 2013b) stark erhöhten Bioaerosolkonzentrationen zusammen mit den anderen Luftschadstoffen die Gesundheit des in den landwirtschaftlichen Betrieben arbeitenden Personals negativ beeinflussen können (z. B. Cormier et al. 1991, Donham et al. 1977, 1982, 1984, 1986a, b, 1989, Iversen et al. 2000, Radon et al. 2000, Senthilselvan et al. 1997, Kirychuk et al. 1998, Preller et al. 1995, Rylander et al. 1989, Malmberg & Larsson 1993, Zejda et al. 1994, Duchaine et al. 2000, Cormier et al. 2000, Haglind et

al. 1984, Reynolds 1988, Attwood et al. 1986). Dies gilt auch für die Tiere im Stall (z. B. Pauli et al. 1974, Wiseman et al. 1984, Huhn 1970, Jericho 1968, Kovacs et al. 1967, Bækbo 1998) und kann zu deutlichen Leistungseinbußen führen (Kocaman et al. 2006, Curtis & Drumand 1982). Die Bioaerosole emittieren über die Lüftung oft in großer Zahl aus den Ställen heraus in die Umwelt. Sie können sich zudem in der Umgebung von Tierställen im Sedimentationsstaub oder im Boden anreichern (Williams et al. 2016, Schulz et al. 2012). Weltweit mehren sich die Hinweise, dass durch die Emissionen auch die Bevölkerung, insbesondere in Viehdichten Gebieten und im nahen Umfeld von Intensivtierhaltungen, negativ beeinträchtigt werden kann (Sneeringer 2009, Wouters et al. 2012, Radon 2004, Hoopmann 2004, O'Connor et al. 2010). Besonders problematisch sind in diesem Zusammenhang die sogenannten „Zoonosen“. Das sind Krankheiten, die vom Tier auf den Menschen übertragbar sind (Van der Giessen et al. 2010). Zoonosen machen schätzungsweise ca. 60 % aller Infektionskrankheiten des Menschen aus (Taylor et al. 2001). Besonders die steigenden Tierzahlen in der Nähe des Menschen haben das Problem deutlich verschärft (Klous et al. 2016, Beran 2008, Pearce-Duvel 2006). Auch Wildtiere in der Nähe von Intensivtierhaltungen können diesbezüglich problematisch sein (Corn et al. 2009, Jonges et al. 2015). Die Übertragung von Zoonosen findet auch durch die Emissionen aus den Ställen statt (Hackert et al. 2012, Smit et al. 2012). In den letzten Jahren führten Zoonosen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in vielen Ländern zu großen ökonomischen Einbußen (Verbeke 2003, Fitzgerald 2012, Chatard-Pannetier et al. 2004, Ogoshi et al. 2010, Bennett et al. 1999, Christou 2011, Leibler et al. 2008, Thuen & Ling 2017, Torgerson & Macpherson 2011, van Asseldonk et al. 2013). Es stellt sich die Frage, wie zukünftig mit dem Bioaerosol-Thema umgegangen werden soll.

In Deutschland sind die Ermittlung und Bewertung von Emissionen und Immissionen von Partikeln im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und seinen Verordnungen, sowie in der TA-Luft geregelt. Ziel dieser Regelungen ist es, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen. Die TA-Luft befindet sich momentan in der Überarbeitung und es wird diskutiert, wie die Bioaerosole in die Neufassung mit aufgenommen werden. Aufgrund unterschiedlicher Sammelverfahren und Nachweismethoden für Bioaerosole und uneinheitlichen Ergebnissen bezüglich der gesundheitlichen Bewertung gestaltet sich die Diskussion bisher als schwierig. Der vorliegende Bericht sichtet die weltweit verfügbare Literatur zu Methoden und Ergebnissen von Bioaerosoluntersuchungen in und um Landwirtschaftliche Nutztierhaltung und fasst die wichtigsten Punkte zusammen. Innerhalb der gesamten Produktionskette landwirtschaftlicher Nutztiere liegt dabei der Fokus auf den Anlagen zur Aufzucht und Haltung der Tiere. Der Bericht soll als Diskussionsgrundlage für die Aufnahme der Bioaerosole in die TA-Luft dienen und auch eine Grundlage bilden, für die Entwicklung eines standardisierten Prüfprotokolls für Bioaerosole im Rahmen des gemeinsam mit Dänemark und den Niederlanden durchgeführten VERA-Projektes (engl.: Verification of Environmental Technologies for Agricultural Production).

2 Quelle von Bioaerosolen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung

Wesentliche Quellen für Bioaerosole sind die Tiere und ihre Fäkalien, die Einstreu und das Futter, von denen Bioaerosolpartikel in die Luft geraten und aus den Ställen in die Umwelt emittieren können.

Über der Landoberfläche in natürlicher Umgebung besteht luftgetragener Staub nur zu ca. 25 % aus biologischen Partikeln (Matthias-Maser & Jaenicke 1994, Matthias-Maser & Jaenicke 2000, Jones & Harrison 2004). In städtischen und landwirtschaftlich geprägten Regionen ist der prozentuale Anteil i. d. R. höher (Matthias-Maser & Jaenicke 1995). In Betrieben der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung können sogar bis weit über 90 % der luftgetragenen Stäube Bioaerosole sein (Aengst 1984). Die wesentlichen Quellen von Bioaerosolen im Stall sind die Tiere, Futter, Einstreu und Kot (Kotimaa et al. 1991, Hartung & Whyte 1994, Heber et al. 1988, Chien et al. 2011), aber auch Beschäftigungsmaterial (Wagner et al. 2016), die Menschen im Stall wie z. B. Personal und Besucher (Lewis et al. 1969, Nishiguchi et al. 2007, Clauß et al. 2013a) oder das Tränkwasser. Auch die natürliche Außenluft enthält Bioaerosole (Kolk et al. 2009), die mit der ungefilterten Zuluft in den Stall gelangen. Abhängig von der Tierart können die primären Bioaerosolquellen unterschiedlich sein. Bei Geflügel findet man hauptsächlich Federfragmente und Kotpartikel, bei Schweinen sind es meist eingetrocknete Güllereste (Cambra-Lopez 2010). In die Luft gelangen die biologischen Partikel eher zufällig, z. B. durch Aufwirbelungen von Material oder dem Abstreifen von Hautschuppen oder Federfragmenten.

Der Kot von Tieren enthält naturgemäß neben unverdauten Futterresten und Darmschleimhautfragmente der Tiere sehr viele Mikroorganismen (Pell 1997). Viele davon sind harmlos, es kommen aber auch Krankheitserreger vor, wie z. B. Salmonellen (Gray & Fedorka-Cray 2001, Himathongkham et al. 1999) oder verschiedene Viren (Van Oirschot 1979, Spradbrow et al. 1988, Yoon et al. 1993, Pell 1997, Fouchier et al. 2003, Webster et al. 1978, De Deus et al. 2007). Auch die Haut von Tieren ist auf der Oberfläche und vor allem in den Poren mit einer Vielzahl von Mikroorganismen besiedelt. Dominant sind hier die Staphylokokken, eine Gruppe von Gram-positiven Bakterien (Baird-Parker 1962, Gailunas & Cottral 1966, Kloos et al. 1976). Aus Untersuchungen beim Menschen ist bekannt, dass kontinuierlich große Mengen dieser Bakterien auf Hautschuppen sitzend in die Luft abgegeben werden (Lewis et al. 1969, Clauß et al. 2013a). Im Stall werden den Tieren meist aus Tierschutzgründen verschiedene Arten von Einstreu zur Verfügung gestellt um natürliche Verhaltensweisen zu unterstützen (Gunnarsson et al. 2000, Appleby & Hughes 1991). Als Einstreu kommen verschiedene Materialien zum Einsatz, wie z. B. Sand, Stroh, Sägespäne oder Holzhackschnitzel. Diese Materialien können bereits naturgemäß große Mengen Mikroorganismen enthalten. Hinzu kommen stetig die Fäkalien der Tiere, Tränkwasser, Hautabrieb oder Federn, sowie Futterreste, solange die Einstreu im Stall verbleibt (Torok et al. 2009). Zusammen bilden diese einen idealen Nährboden für Mikroorganismen (Lu et al. 2003, Martin et al. 1998). Daher sind die Konzentrationen von luftgetragenen

Mikroorganismen in Haltungen mit Einstreu meist höher als in Haltungen ohne Einstreu (Madelin & Wathes 1989, Vucemilo et al. 2007, Letourneau et al. 2009). Die klimatischen Verhältnisse in den Ställen mit relativ hohen Temperaturen und relativer Luftfeuchte begünstigen zusätzlich deren Wachstum. Ein geringer Teil der Bioaerosole im Stall kommt aus der Außenluft, im Vergleich zu den hohen Konzentrationen im Stall ist dieser Anteil aber i. d. R. vernachlässigbar. Relevant wird er jedoch bei hochinfektiösen Pathogenen wie z. B. bei einigen Viren (Donaldson et al. 1977, Gibson & Donaldson 1986, Gloster et al. 2010) oder dem Q-Fieber Erreger (Hackert et al. 2012, Smit et al. 2012). Hier kann durchaus eine Übertragung über die vermeintlich unbelastete Außenluft stattfinden, wenn sich kontaminierte Betriebe in der Nähe befinden. Durch die Aktivität der Tiere, bei der Fütterung (Chang et al. 2001a, Pearson & Sharples 1995, Maciorowski et al. 2007) oder auch durch die Arbeiten im Stall (Wijnand 1997) gelangen Partikel von Kot, Einstreu oder Futter in die Luft und mit ihnen auch die darin enthaltenen Mikroorganismen. Zum Beispiel fanden Rautilia et al. (2003), dass bei Schweinen beim Umschichten von Einstreu die Konzentrationen Gram-negativer Bakterien in der Luft teilweise um das 10 fache anstiegen. Bioaerosole können auch direkt aus dem Atemtrakt der Tiere kommen und durch Husten, Schnupfen oder Atmen abgegeben werden. Beim Menschen ist dieser Vorgang ausführlich untersucht (Duguid 1946, Loudon & Roberts 1967, Papineni & Rosenthal 1997, Nicas et al. 2005, Yang et al. 2007, Gralton et al. 2011). Bei Tieren gibt es diesbezüglich kaum Studien (Cho et al. 2006). Sind die Bioaerosolpartikel erst einmal in der Luft werden sie, abhängig von ihrer Größe bzw. ihrem Aerodynamischen Durchmesser (AD), über den thermischen Auftrieb der Tiere, Aufwirbelungen und die Lüftung weitergetragen und können letztendlich über den Abluftstrom aus den Ställen heraus in die Umwelt emittieren. Auch der bereits in den Ställen oder den Abluftkanälen sedimentierte Staub enthält viele Bakterien (Skora et al. 2016), die sehr lange lebensfähig bleiben können (Schulz et al. 2016). Wird dieser aufgewirbelt gelangen diese Bakterien mit dem Luftstrom ebenfalls in die Umwelt.

3 Mikrobielle Leitorganismen für Bioaerosole aus der Tierhaltung

In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung sind weltweit hunderte verschiedener Viren, Bakterien und Schimmelpilze nachgewiesen worden, wobei als spezifischer Leitparameter für die Tierhaltung die Bakteriengruppe der Staphylokokken am besten geeignet scheint.

In der Luft von Tierställen sind sowohl mit den klassischen kulturbasierten Verfahren (z. B. Wilson et al. 2002, Brodka et al. 2012, Pavan & Manjunath 2014, Sowiak et al. 2012, Vela et al. 2012, Fritz 2017), als auch mit neueren molekularbiologischen Methoden (z. B. Hong et al. 2012, Nonnenmann et al. 2010, Nehme et al. 2009, Martin et al. 2010b, Fallschissel 2011, Wang et al. 2011, Kristiansen et al. 2012, Gao et al. 2017, Schaeffer et al. 2017, O'Brien & Nonnemann 2016) hunderte verschiedener Bakterien- und Schimmelpilzspezies nachgewiesen worden. Hinzu kommen diverse Viren (z. B. Hugh-Jones et al. 1973, Christensen et al. 1993), Endotoxine (z. B. Zucker & Müller 2000, Myrna et al. 2017), Mykotoxine (Wang et al. 2008, Wang et al. 2011) und Allergene (Radon et al. 2000, Hinze et al. 1996, Virtanen et al. 1988, Kullmann et al. 1998, Rimac et al. 2010). Dabei werden bestimmte Gruppen von Mikroorganismen weltweit immer wieder in großer Zahl in Tierställen gefunden. Diese Gruppen scheinen spezifisch für Tierhaltungen zu sein und sind als sogenannte „Leitparameter“ für die Tierhaltung geeignet. Unter Leitparameter versteht die VDI 4250 Blatt 3: „Bestandteile von Bioaerosolen, die für die Emission aus einer Anlage charakteristisch sind und mit derzeit zur Verfügung stehenden Probenahme- und Analysemethoden nachweisbar sind“. Letzteres ist besonders wichtig da z. B. bei den Bakterien generell schätzungsweise nur etwa 0,01 % – 1 % mit den gängigen Standardmethoden über Kultivierung überhaupt nachweisbar sind (Amann et al. 1995, Oliver 2005, Chi & Li 2006, Xu et al. 1982).

In den Richtlinien VDI 4250 Blatt 3 und VDI 4253 Blatt 3 sind allgemeine Summenparameter („Gesamtbakterien“ und „Gesamtpilze“), in Tierställen spezifisch vorkommende Leitparameter sowie für besondere Fragestellungen relevante „spezielle Messparameter“ angegeben, nebst Kultivierungsverfahren und Bestätigungsreaktionen. Die Auswahl der Leitorganismen scheint dabei rein medizinisch geprägt zu sein und spiegelt nicht unbedingt das tatsächliche Vorkommen der ausgewählten Mikroorganismen in nativen Bioaerosolproben wieder. In Tabelle 1 sind die Summen-, Leit-, und speziellen Messparameter aus den VDI-Richtlinien für Deutschland und darüber hinaus aus der weltweiten Literatur die wichtigsten Mikroorganismengruppen und Viren, die in Bioaerosolproben aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung nachgewiesen wurden und somit aerogen übertragbar sind zusammengestellt, sowie ihr Vorkommen und ihre medizinische Relevanz.

Tabelle 1: Mikroorganismengruppen und Viren die weltweit in Bioaerosolproben aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung nachgewiesen wurden, ihr Vorkommen und ihre medizinische Relevanz

Messparameter	Tierart	Medizinische Relevanz	Nachweisbar in Bioaerosolproben	Anmerkungen	Literatur
Bakterien					
Gesamtzellzahl	Alle	Potentiell auch Pathogene enthalten	Mikroskopie	Wichtiger Summenparameter zur Plausibilitätsprüfung von Messungen	
Gesamtbakterien (22 °C und 36 °C)	Alle	Potentiell auch Pathogene enthalten (bei 36 °C)	Kultivierung	Wichtiger Summenparameter zur Plausibilitätsprüfung von Messungen	
Anaerobe Gesamtbakterien	Alle	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung		Chai et al. 1997
thermophile Bakterien	Alle	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien	
Gram-negative Bakterien	Alle	Endotoxine als Zellwandbestandteil, Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	Summenparameter in VDI-Richtlinien, haben dünne Zellwand, empfindlich gegen Austrocknen, daher Luftkonzentrationen vergleichsweise gering	z. B. Matkovic et al. 2006, Zucker et al. 2000, Bakutis et al. 2004
Enterobacteriaceae	Alle	Indikator für fäkale Verunreinigungen, Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	Leitparameter in VDI-Richtlinien, werden bei der Probenahme häufig geschädigt und daher luftgetragen nur in sehr geringen Konzentrationen nachgewiesen	z. B. Gordon 1963, Duan et al. 2006, Zucker & Müller 2002
Coliforme	Alle	Indikator für fäkale Verunreinigungen, Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, keine taxonomische sondern historisch gewachsene Einteilung	z. B. Benham & Egdell 1970, Baïkov & Petkov 1986
<i>Escherichia coli</i>	Alle	Einige Stämme als pathogen bekannt (EHEC)	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien	z. B. Chai et al. 2003
„Extended-Spectrum Beta-Lactamasen“ (ESBL)-bildende Bakterien	Geflügel, Rinder, Schweine	Antibiotika-resistent (z. B. <i>E.coli</i> serotype O157:H7)	Kultivierung		z. B. Hering et al. 2015, Dohmen et al. 2017, Laube et al. 2014

Fortsetzung Bakterien

<i>Salmonella</i> spp.	Geflügel, Rinder, Schweine, Schafe	Erreger der Salmonellose	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien	z. B. Oliveira et al. 2006, Chinivasagam et al. 2009, Okraszewska- Lasica et al. 2014, Harbaugh et al. 2006
<i>Legionella</i> spp.	Schweine (Abluft- reinigungs- anlagen)	Erreger der Legionärs- krankheit	Bisher nur molekular- biologisch	Leitparameter in VDI- Richtlinien	Walser et al. 2017
<i>Campylobacter</i> spp.	Geflügel	Gastroenteritis	Bisher nur molekular- biologisch	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, weltweit wichtigster Erreger der Gastroenteritis in 2010, die am häufigsten ge- meldete Zoonose in der EU	z. B. Gilpin et al. 2008, Olsen et al., 2009, Chinivasagam et al. 2009, Søndergaard et al. 2014
<i>Leptospira</i> ssp.	Rinder, Schweine	12 pathogene Arten mit 250 pathogenen serovaren	unbekannt	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, weltweit am weitesten verbreiteter Zoonoseerreger	Adler & Moctezuma 2010, Monno et al. 2009
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Tränk- wasser, Weide	Erreger verschiedener Infektionen (Pneumonie, Meningitis)	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien	
<i>Pseudomonas</i> spp.	Tränk- wasser, Weide, Abluft- reinigungs- anlagen	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien	Anonymous 2013a
<i>Staphylococcaceae</i>	Pferde, Schweine, Geflügel, Rinder, Ziegen	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	Leitparameter in VDI- Richtlinien, nach Auffassung der meisten Autoren wichtigster Leitparameter für die Tierhaltung	z. B. Müller 1974, Hojovec et al. 1977, Hartung 1992, O'Brien et al. 2016, Curtis et al. 1975a
<i>Staphylococcus aureus</i>	Rinder, Ziegen, Schafe, Schweine, Pferde	Erreger verschiedener Infektionen (Osteomyelitis, Mastitis, Endocarditis, Pneumonie)	Kultivierung und PCR	Leitparameter in VDI- Richtlinien, nur 1 – 5 % der kultivierbaren Staphykokken sind <i>S. aureus</i> , daher aufwändig zu selektieren.	z. B. Chai et al. 2003, Alvarado et al. 2009, Zhong et al. 2009

Fortsetzung Bakterien

MRSA	Rinder, Ziegen, Schafe, Schweine, Pferde	Antibiotika- resistent	Kultivierung und PCR		z. B. Zhong et al. 2009, Tenhagen et al. 2008, Liu et al. 2012
Intestinale Enterokokken	Alle	Indikator für fäkale Verunreinigungen, Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	Leitparameter in VDI- Richtlinien, wird luftgetragen nur in sehr geringen Konzentrationen nachgewiesen	z. B. Aarnink et al. 2012, Anonymous 2013a, Brooks et al. 2010
„Streptokokken“	Rinder	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung, FISH	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, keine taxonomische Einteilung sondern Hilfsbezeichnung zur Zusammenfassung von aerotoleranten gram- positiven, katalase- negativen Kokken	z. B. Matkovic et al. 2006, Kristiansen et al. 2012, Angersbach- Hegers 2002
<i>Streptococcus suis</i>	Schweine	Erreger verschiedener Infektionen (Sepsis, Meningitis, Endocarditis, Pneumonie)	Kultivierung, PCR	Verbreiteter Zoonose- erreger in China, Kanada und USA, in der EU bisher noch sporadisch	Gauthier- Levesque et al. 2016, Bonifeit et al. 2014, Lun et al. 2007
<i>Rhodococcus equi</i>	Pferde	Erreger verschiedener Infektionen (Osteomyelitis, Pneumonie)	Kultivierung	selten untersucht	Kuskie et al. 2012, Takai 1997
<i>Listeria monocytogenes</i>	Rinder, Schafe, Schweine	Listeriose	Kultivierung	selten untersucht	Okraszewska- Lasica et al. 2014
<i>Bacillus anthracis</i>	Rinder, Ziegen, Schafe, Schweine, Pferde	Erreger Milzbrand	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, in Biostoffverordnung in Risikogruppe 3, Labor der Schutzstufe 3 benötigt	
<i>Lactobacillus</i> spp.	Schweine	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	Wenig untersucht. Macht vermutlich einen Großteil der anaeroben Bakterien- flora in Tierställen aus	Hill & Kenworthy 1970, Sauter et al. 1981
Sulfitreduzierende Clostridien		Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien	
<i>Clostridium perfringens</i>	Kälber	Exotoxinbildner, Erreger von Gasbrand	Kultivierung, Mikroskopie		Draz et al. 1999, Chai et al. 1997

Fortsetzung Bakterien

<i>Clostridioides (Clostridium) difficile</i>	Schweine	Diarrhoe	Kultivierung	Zoonoseerreger und einer der häufigsten nosokomialen Erreger	z. B. Keessen et al. 2011, Hopman et al. 2010, Songer & Uzal 2005
<i>Brucella</i> spp.	Schafe, Ziegen, Schweine, Rinder	Erreger der Brucellose	unbekannt	Besonders relevant bei der Schlachtung	Kaufmann et al. 1980, Monno et al. 2009
<i>Mycobacterium bovis</i>	Rinder	Rindertuberkulose	Kultivierung, PCR	Auch auf Menschen übertragbar	Gannon et al. 2007
Nicht-tuberkulöse Mycobakterien		Potentiell auch Pathogene enthalten		spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, Nachweis nach DIN 58943-3	
<i>Mycoplasma hypopneumoniae</i>	Schweine	Pneumonie	PCR	Einer der wichtigsten Erreger von Atemwegserkrankungen bei Schweinen	Otake et al. 2010, Dee et al. 2009
<i>Chlamydia psittacosi</i>	Geflügel	Erreger der Psittacose	Zellkultur, molekularbiologisch	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, Vermehrung intrazellulär im Wirt. Kultivierung nicht möglich. Nachweis molekularbiologisch, Zellkultur	Dickx et al. 2010, Gaede et al. 2008
<i>Coxiella burnetii</i>	Rinder, Ziegen, Schafe	Erreger des Q-Fiebers	Zellkultur, molekularbiologisch	Vermehrung intrazellulär im Wirt. Kultivierung nicht möglich. Nachweis molekularbiologisch, Zellkultur	z. B. Hackert et al. 2012, Smit et al. 2012, Schulz et al. 2005, van der Hoek et al. 2012
<i>Saccharopolyspora rectivirgula</i>	Milchvieh, Schweine	Exogene Allergische Alveolitis (EAA)	Kultivierung, PCR		z. B. Schäfer et al. 2011, Duchaine et al. 1999a, Cormier et al. 1990
Actinomyceten (mesophil)	Einstreu, Futter, Biofilter	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, Gruppe ist aus phylogenetischer Sicht zu divers	Anonymous 2013a Angersbach-Hegers 2002,
Actinomyceten (thermophil)	Einstreu, Futter, Biofilter	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung	spezieller Messparameter in VDI-Richtlinien, Gruppe ist aus phylogenetischer Sicht zu divers	z. B. Anonymous 2013a

Schimmelpilze

Gesamtpilze (25 °C)	Einstreu, Futter, Biofilter	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung, Mikroskopie	Hohe Konzentrationen bei schlechter Einstreuqualität oder kontaminiertem Futter	
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Einstreu, Futter, Biofilter	Aspergillose	Kultivierung, Mikroskopie	Hohe Konzentrationen bei schlechter Einstreuqualität oder kontaminiertem Futter	z. B. Arne et al. 2011, Schiek 1998
<i>Aspergillus</i> spp.	Einstreu, Futter, Biofilter	Potentiell auch Pathogene enthalten	Kultivierung, Mikroskopie	Hohe Konzentrationen bei schlechter Einstreuqualität oder kontaminiertem Futter	z. B. Pavan & Manjunath 2014
<i>Penicillium</i> spp.	Einstreu, Futter, Biofilter	Selten auch pathogene enthalten	Kultivierung, Mikroskopie	Hohe Konzentrationen bei schlechter Einstreuqualität oder kontaminiertem Futter	z. B. Pavan & Manjunath 2014, Jo & Kang 2005
<i>Cladosporium</i> spp.	Einstreu, Futter, Biofilter	Selten auch pathogene enthalten	Kultivierung, Mikroskopie	Hohe Konzentrationen bei schlechter Einstreuqualität oder kontaminiertem Futter	z.B. Jo & Kang 2005, Pavan & Manjunath 2014

Viren

PRRS-Virus	Schweine	Reproduktions- und Atemwegs- syndrom der Schweine (engl.: Porcine Reproductive and Respiratory Syndrome)	PCR	Führt zu hohen Verlusten in Schweinebeständen, ist in der Lage, luftgetragen weite Distanzen zurückzulegen	z. B. Garcia- Mochales 2016, Otake et al. 2010, Dee et al. 2009, Murtaugh & Yeske 2008
CSF-Virus (engl.: classical swine fever)	Schweine	Klassische Schweinepest	PCR	Schwer kontrollierbare Tierseuche	Laevens et al. 1998, Laevens et al. 1999, Dewulf et al. 2000
ASF-Virus (engl.: african swine fever)	Schweine	Afrikanische Schweinepest	PCR, Zellkultur	Sporadische Ausbrüche in Europa, bisher noch nicht in Deutschland nachgewiesen	Wilkinson et al. 1977, de Carvalho Ferreira et al. 2013
Porcine circovirus type 2 (PCV2)	Schweine	Postweaning multisystemic wasting syndrome (PMWS), porcine dermatitis and nephropathy syndrome (PDNS)	PCR	Weltweit in Schweinen verbreitet, in Deutschland seit 1962 nachgewiesen. Lange als harmlos eingestuft	z. B. Allan et al. 1998, Harding 2004, Jacobsen et al. 2009

Fortsetzung Viren

MKS-Virus	Schweine	Erreger der Maul und Klauenseuche	PCR	Führt zu hohen Verlusten in Schweinebeständen, ist in der Lage weite Distanzen über die Luft zurückzulegen	z. B. Garcia-Mochales 2016, Aleksanderse n et al. 2008, Donaldson et al. 1982
Influenza-A-Virus	Schweine	Schweinegrippe	PCR	mehrere Subtypen in Bioaerosolproben nachgewiesen	z. B. Fraser et al. 2009, Khardori 2010, Al-Tawfiq et al. 2014
Porcine epidemic diarrhea virus (PEDV)	Schweine	Virusdiarrhoe des Schweins	PCR	Luftgetragene Ausbreitung bis zu 15 km nachgewiesen.	Pensaert & de Bouck 1978, Alonso et al. 2014
Suides Herpesvirus 1 (SuHV-1)	Schweine, Rinder, Schafe, Ziegen	Aujeszky's disease (Pseudowut)	PCR	Schweine als Hauptwirt	Christensen et al. 1990, Christensen et al. 1993, Donaldson et al. 1983
Newcastle disease Virus	Geflügel	Newcastle disease atypische Geflügelpest	PCR, ELISA, Zellkultur	schon lange als aerogen übertragbar bekannt	Hugh-Jones et al. 1973, Li et al. 2009
Aviäres Influenza A virus (IAV)	Geflügel	Geflügelpest, Vogelgrippe	PCR	Hochansteckend. Je nach Subtyp unterschiedliche Verlaufsformen.	Garcia-Mochales 2016, Jonges et al. 2015, Stegeman et al. 2004
IBD-Virus (engl.: Infectious bursal disease)	Geflügel	Infektiöse Bursitis	Zellkultur, PCR		Friese 2010

Sonstige

Endotoxine	Alle	Pyrogen, Allgemeine Atemwegs-erkrankungen	LAL-Test, ELISA	Zellwandbestandteil von Gram-negativen Bakterien. Endotoxine können im Staub akkumulieren. Marker für organische Stäube aus der Tierhaltung	Zucker & Müller 2000, Myrna et al. 2017
Beta 1-3 Glukane	Alle	Pyrogen	Modifizierter LAL-Test	Referenzindikator für Schimmelpilze	Lee & Liao 2014, Cyprowski et al. 2011

Welcher Messparameter bei den Bioaerosolen untersucht wird hängt primär von der Fragestellung ab. Der Summenparameter „Gesamtbakterien“ wird sinnvollerweise zur Einordnung der eigenen Messungen und Prüfung der Plausibilität fast immer mit untersucht. Die Untersuchung von „anaeroben Gesamtbakterien“, also solche die nur unter Sauerstoffausschluss kultiviert werden können, waren bisher im Zusammenhang mit Bioaerosolen naturgemäß von wenig Interesse. Man kann jedoch annehmen, dass sie einen Großteil der aerogenen Mikroflora in Tierställen ausmachen, da sie in großer Zahl über die Fäkalien ausgeschieden werden. Innerhalb der Gesamtbakterien wird generell zwischen Gram-positiven und Gram-negativen Bakterien unterschieden. Letztere besitzen im Vergleich zu den Gram-positiven Bakterien eine dünnere Zellwand, sind daher austrocknungsempfindlicher und somit in der Luft auch nicht besonders lange lebensfähig. Daher werden sie in der Luft von Tierställen nur in geringen Konzentrationen gefunden. Der prozentuale Anteil an den Gesamtbakterien liegt bei etwa 1 - 10 % (Matkovic et al. 2006). Zu den Gram-negativen Bakterien gehören aber auch wichtige Pathogene, wie z. B. Salmonellen, *Campylobacter*, Legionellen und *Leptospira*. Innerhalb der Gruppe der Gram-negativen Bakterien wird die Familie der Enterobacteriaceae am häufigsten nachgewiesen (Duan et al. 2006, Zucker & Müller 2002), deren bekanntester Vertreter *Escherichia coli* ist. Medizinisch besonders relevant sind die antibiotikaresistenten Stämme (ESBL(Extended-Spectrum-Betalaktamase)-Bildner) von *E. coli*, z. B. der Serotyp O157:H7 (Hering et al. 2015, von Salviati et al. 2015, Laube et al. 2014). Enterobacteriaceae sind vor allem Indikatoren für fäkale Verunreinigungen, da sie in großer Zahl über die Fäkalien ausgeschieden werden. Bakterien der Gruppe der Pseudomonaden sind meist typische Gewässermikroorganismen und kommen im Tränkwasser der Ställe vor oder werden von außen eingetragen. Ihr Vorkommen in Tierställen wurde bisher kaum untersucht. Aufgrund der dickeren Zellwand und der damit einhergehenden größeren „Robustheit“ gegenüber dem luftgetragenen Zustand, sind die meisten der über Kultivierungsmethoden nachgewiesenen Bakterien aus der Luft den Gram-positiven zuzuordnen (Zhao 2011). Innerhalb dieser Gruppe sind nach Auffassung der meisten Autoren die *Staphylococcaceae* besonders spezifisch für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung und gelten damit als einer der wichtigsten Leitparameter für mikrobielle Luftverunreinigungen aus Tierställen. Zudem sind *Staphylococcaceae* mit den gängigen Methoden der Kultivierung und den minimalen Laborstandards gut nachzuweisen. Innerhalb dieser Gruppe finden sich einige potentielle Krankheitserreger, die der Risikogruppe 2 zugeordnet werden. Am bekanntesten ist *Staphylococcus aureus*, dessen Anteil an der gesamten Staphylokokkenflora jedoch meist sehr gering ist. Daher werden bei der Kultivierung auf Nährböden typische Kolonien häufig überwachsen und eine Quantifizierung ist somit schwierig. Eine besondere Bedeutung kommt auch hier den antibiotikaresistenten Stämmen zu, den *Methicillin-resistenten Staphylococcus aureus* (MRSA). In einer Vielzahl von Studien aus Deutschland, Dänemark, Belgien, den Niederlanden, der Schweiz, Japan, Kanada und den USA waren bei Geflügel, Schweinen, Rindern und Pferden zwischen 1 % und 93 % der Tiere eines Bestandes mit MRSA besiedelt (Kraemer et al. 2017, Persoons et al. 2009, Nemati et al. 2008, Spohr et al. 2011, Graveland et al. 2010, Lozano et al. 2011, Khanna et al. 2008, Alt et al. 2011, deNeeling et al. 2007, van Dujikeren et al. 2008, van Loo et al. 2007, Guardabassi et al. 2007, Smith et al. 2009, Shimizu et al. 1997, Weese et al. 2005, Schulz et al. 2012). Auch in rohem Fleisch

von Tieren, die für die Lebensmittelproduktion vorgesehenen waren ist MRSA nachgewiesen worden (Kelman et al. 2011, Pu et al. 2009). In der Luft von Mastschweineeställen wurden besonders hohe Konzentrationen gefunden (Chapin et al. 2004, Gibbs et al. 2004, Clauß et al. 2013c). MRSA wurden auch in den Abluftfahnen der Ställe und im Umfeld auf den Böden nachgewiesen (Gibbs et al. 2006, Green et al. 2006, Friese et al. 2012, Friese et al. 2013, Schulz et al. 2012). Neben ESBL-Bildnern und MRSA gibt noch weitere antibiotikaresistente Zoonoseerreger für die eine Übertragung durch die Luft nicht ausgeschlossen werden kann. Vancomycin-resistente Enterokokken z. B. wurden bei Nutztieren in den USA und in Europa nachgewiesen (Barbara 1997, van den Bogaard & Stobberingh 1999, Kuhn et al. 2005). Antibiotikaresistente Salmonellen sind Zoonoseerreger die hauptsächlich bei Geflügel, aber auch bei Rindern und Schweinen gefunden wurden (White et al. 2004, Brichta-Harhay et al. 2011, Alam et al. 2009, Dargatz et al. 2002). Weitere wichtige Gruppen innerhalb der Gram-positiven Bakterien sind Enterokokken und Streptokokken, die beide auch pathogene Spezies enthalten können, sowie bedeutende Krankheitserreger wie *Bacillus anthracis* oder *Clostridium difficile*, letzterer ein Enteropathogen für Menschen und Tiere (Keessen et al. 2011). Ein weiterer bedeutender Krankheitserreger ist das Bakterium *Coxiella burnetii*, das in den letzten Jahren vor allem im Zusammenhang mit Schafhaltungen vermehrt zu Q-Fieber-Kleinraumepidemien in Deutschland, sowie zu größeren Ausbrüchen in den Niederlanden geführt hat (Hackert et al. 2012, Smit et al. 2012, Schulz et al. 2005, van der Hoek et al. 2012).

Schimmelpilze in der Luft von Tierställen wurden besonders in den tropischen Ländern intensiv untersucht. Aufgrund der dort vorherrschenden klimatischen Verhältnisse mit i. d. R. ganzjährig hoher Temperatur und Luftfeuchtigkeit haben sie optimale Wachstumsbedingungen und stellen damit ein größeres Problem dar als in unseren gemäßigten Breiten. Selbst bei uns in Deutschland sind bisher über hundert verschiedene Arten in Tierställen nachgewiesen worden, jedoch sind die Konzentrationen vergleichsweise gering. Die Höhe der Konzentrationen und die Zusammensetzung der Schimmelpilzspezies in den Ställen sind meist abhängig vom Vorhandensein und der Qualität von Einstreu (Hartung 1992). Die häufigsten nachgewiesenen Gruppen sind bei Rindern, Schweinen, Geflügel und Kaninchen die Schimmelpilze *Aspergillus* sp., *Alternaria* sp., *Cladosporium* sp., *Penicillium* sp., *Fusarium* sp., *Scopulariopsis* sp., sowie Hefen der Gattung *Candida* (Wang et al. 2007, Zhao 2011, Chang et al. 2001a, Cormier et al. 1990, Martin et al. 1996, Matkovic et al. 2009a, b, Wilson et al. 2002, Miao et al. 2010). Gesundheitlich relevant sind dabei vor allem einige pathogene *Aspergillus*-Arten, z. B. *A. flavus*, *A. fumigatus* und *A. niger* (Wang et al. 2007).

Neben Bakterien und Schimmelpilzen sind in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in den letzten Jahren vermehrt aerogen übertragbaren Viren in den Fokus der Bioaerosolforschung gerückt. Dies liegt auch daran, dass mittlerweile neue Sammel- und Nachweismethoden für luftgetragene Viren etabliert wurden (Friese 2010, Alonso et al. 2016, Andersen et al. 2017, Gloster et al. 2010, Otake et al. 2010, Verreault et al. 2008, Corzo et al. 2013). In Deutschland sind die in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung in Bioaerosolen vorkommenden Viren bisher kaum untersucht, dabei geht aus der internationalen Literatur hervor, dass viele Viren aerogen

übertragbar sind, luftgetragene große Distanzen zurücklegen und zu teilweise verheerenden Krankheitsausbrüchen führen können.

Ein weiterer wichtiger medizinisch relevanter Bestandteil von Bioaerosolen sind die Endotoxine. Sie stellen die bedeutendste proinflammatorisch, also entzündlich aktiv wirkende Bioaerosolkomponente dar. Der Kot der Tiere ist dabei die größte Endotoxinquelle im Stall (Eckhardt 2008). Endotoxine sind in der äußeren Zellmembran von Gram-negativen Bakterien lokalisiert und maßgeblich verantwortlich für Organisation, Stabilität und Barriere-Eigenschaften der Zellwand. Als Endotoxin bezeichnet man dabei die Gesamtheit toxischer Zellwandprodukte der entsprechenden Mikroorganismen, wobei es sich biochemisch im Wesentlichen um Lipopolysaccharide (LPS) handelt (Linsel & Kummer 1998). Diese bestehen aus einer hydrophilen Polysaccharidkomponente, welche für die Wasserlöslichkeit des Moleküls verantwortlich ist und einer hydrophoben Lipidkomponente, welche primär die biologische Aktivität bzw. die toxischen Eigenschaften des Moleküls bedingt. Zum Beispiel enthält eine *E. coli* Zelle ca. 10^6 Lipopolysaccharidmoleküle, von denen lebende Zellen kontinuierlich geringe Mengen in die Umgebung abgeben. Sterben Zellen und zerfallen diese, werden die Endotoxine in großer Zahl frei. Sie sind dabei relativ stabil und können auch im luftgetragenen Zustand oder im Sedimentationsstaub über lange Zeit aktiv bleiben (Pomorska et al. 2009).

Bei der Vielzahl der bisher gefundenen Bioaerosolbestandteile stellt sich die Frage, welche davon besonders charakteristisch für Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung sind. Nach einhelliger Meinung vieler Autoren sind dies die Staphylokokken, da sie direkt von den Tieren stammen und in der Stallluft fast immer in großer Zahl nachgewiesen wurden. Im Folgenden sind die Ergebnisse aus Studien zusammengefasst, die im Stall oder in der Emission sowohl die Konzentrationen von Gesamtbakterien als auch die der Staphylokokken bestimmt haben (Tab. 2). Daraus wurde der für die einzelnen Tierarten gefundene prozentuale Anteil von Staphylokokken an den Gesamtbakterien berechnet.

Tab. 2: Prozentualer Anteil von Staphylokokken an den luftgetragenen Gesamtbakterien im Stall und in der Emission von Tierställen, berechnet aus den Ergebnissen verschiedener Studien

Tierart	Referenz	Land	Gesamtbakterien in KBE/m ³	Staphylokokken in KBE/m ³	Verhältnis in %
Schweine	Hojovec et al. 1976	Tschechien	$1,0 \times 10^6$	$3,0 \times 10^5$	30
	Fiser 1978	Tschechien	$2,2 \times 10^7$	$7,4 \times 10^4$	3
	Spirin & Mikhaïlova 1991	Russland	$2,2 \times 10^5$	$9,5 \times 10^4$	43
	Butera et al. 1991	Kanada	$4,5 \times 10^5$	$3,8 \times 10^3$	1
	Eliot et al. 1976	USA	$2,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^5$	50
	Geburek et al. 2005	Deutschland	$5,0 \times 10^5$	$5,0 \times 10^3$	1
	Anonymous 2013a	Deutschland	$8,1 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$	21
	Anonymous 2013a	Deutschland	$7,6 \times 10^4$	$5,1 \times 10^3$	7
	Anonymous 2013a	Deutschland	$8,7 \times 10^4$	$3,8 \times 10^3$	4
	Bayrisches Landesamt 2015b	Deutschland	$2,0 \times 10^5$	$5,0 \times 10^4$	25
	Clauß (eigene Daten)	Deutschland	$1,0 \times 10^5$	$6,5 \times 10^4$	70

				Gesamt:	23
Rinder	Karowska 2005	Polen	$1,6 \times 10^3$	$3,4 \times 10^2$	21
	Clauß (eigene Daten)	Deutschland	$2,6 \times 10^5$	$5,3 \times 10^3$	2
				Gesamt:	11
Ziegen	Clauß (eigene Daten)	Deutschland	$3,6 \times 10^5$	$2,4 \times 10^5$	67
Pferde	Fritz 2017	Österreich	$3,5 \times 10^3$	$3,9 \times 10^2$	11
Hühner	Brooks et al. 2010	USA	$6,7 \times 10^3$	$1,5 \times 10^4$	224
	Brooks et al. 2010	USA	$4,0 \times 10^6$	$3,7 \times 10^6$	92
	Chai et al. 2001a	China	$2,7 \times 10^5$	$3,3 \times 10^4$	12
	Schulz et al. 2004	Deutschland	1×10^7	1×10^7	100
	Witkowska & Sowińska 2013	Polen	1×10^6	1×10^5	10
Fort- setzung	Saleh 2006	Deutschland	$2,5 \times 10^5$	1×10^5	40
	Saleh 2006	Deutschland	$4,7 \times 10^7$	$4,6 \times 10^7$	98
Hühner	Agabou 2009	Algerien	$1,0 \times 10^2$	$3,0 \times 10^1$	30
	Angersbach-Hegers 2002	Deutschland	$2,8 \times 10^6$	$2,2 \times 10^6$	77
	Anonymous 2012	Deutschland	$3,0 \times 10^6$	$3,0 \times 10^6$	100
	Anonymous 2012	Deutschland	1×10^5	$2,5 \times 10^4$	25
	Blomberg et al. 2009	Deutschland	1×10^5	$1,2 \times 10^6$	120
	Blomberg et al. 2009	Deutschland	$9,4 \times 10^5$	$7,7 \times 10^5$	82
	Springorum et al. 2015	Deutschland	$6,5 \times 10^5$	$2,7 \times 10^5$	42
	Springorum et al. 2015	Deutschland	$7,5 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	33
	Springorum et al. 2015	Deutschland	$2,0 \times 10^5$	$1,5 \times 10^5$	75
	Springorum et al. 2015	Deutschland	$1,6 \times 10^5$	$1,5 \times 10^5$	63
	Popescu et al. 2013	Rumänien	$7,7 \times 10^4$	$2,0 \times 10^4$	26
	Popescu et al. 2013	Rumänien	$4,8 \times 10^6$	$3,1 \times 10^6$	65
	Schrader et al. 2013	Deutschland	$4,3 \times 10^6$	$3,2 \times 10^6$	74
	Popescu et al. 2010	Rumänien	$2,3 \times 10^5$	$3,5 \times 10^5$	156
	Popescu et al. 2010	Rumänien	$2,2 \times 10^6$	$1,3 \times 10^6$	59
	Lippmann et al. 2016	Deutschland	$7,4 \times 10^6$	$7,4 \times 10^6$	100
	Lippmann et al. 2016	Deutschland	$1,5 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$	100
	Gärtner et al. 2011	Deutschland	$4,8 \times 10^6$	$2,4 \times 10^6$	50
	Gärtner et al. 2011	Deutschland	$5,7 \times 10^6$	$2,3 \times 10^6$	40
	Gärtner et al. 2011	Deutschland	$8,4 \times 10^6$	$6,2 \times 10^6$	74
	Gärtner et al. 2017	Deutschland	$4,9 \times 10^7$	$2,7 \times 10^7$	55
	Bayrisches Landesamt 2015a	Deutschland	$5,0 \times 10^7$	$1,0 \times 10^7$	20
				Gesamt:	70

Die aus den Ergebnissen der Studien berechneten Verhältnisse sind sehr unterschiedlich und es sind auch nicht für alle Tierarten ausreichend Daten vorhanden. Es lässt sich jedoch für die Hühnerhaltung und die Schweinehaltung ableiten, dass im Mittel ca. 23 % und 70 % der Gesamtbakterien anteilig den *Staphylococcaceae* zugerechnet werden können. Die großen Unterschiede liegen vermutlich an den verschiedenen Sammel- und Nachweisverfahren für Staphylokokken, vor allem an den unterschiedlichen Nährböden und die Art der Auswertung. Betrachtet man nur die mit standardisierten Methoden erhobenen Ergebnisse aus Deutschland,

ist der Anteil der *Staphylococcaceae* an den Gesamtbakterien deutlich höher und liegt bei Geflügel bei ca. 90 % und bei Schweinen bei ca. 70 %. Demnach wäre die Gruppe der *Staphylococcaceae* für die Hühnerhaltung sehr gut und für die Schweinehaltung immer noch gut als charakteristischer Leitparameter für Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung geeignet.

4 Messung von Bioaerosolen

Bioaerosole können Online und Offline gemessen werden, wobei sich hierzu aufgrund der Komplexität von Bioaerosolen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung am ehesten die klassischen Methoden eignen, d. h. Probenahme vor Ort mit anschließender Auswertung über kulturbasierte oder molekularbiologische Methoden im Labor.

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten Bioaerosole zu messen: Online und Offline. Methoden zur Onlinemessung von Bioaerosolen wurden in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung bisher kaum eingesetzt. Meist zu militärischen Zwecken werden verschiedene LIDAR-Systeme genutzt, um vor allem große Ansammlungen von Bioaerosolen aus größerer Distanz zu detektieren (NATO 2010). Verschiedene Laserpartikelspektrometer, wie z. B. der Ultraviolet Aerodynamic Particle Sizer (UVAPS) oder der Waveband Integrated Bioaerosol Sensor (WIBS) ermöglichen dagegen die Messung von Bioaerosolen vor Ort online im Luftstrom einer Messzelle (Hairston et al. 1997, Kaye et al. 2004, Kaye et al. 2005a, Kaye et al. 2005b, Chang et al. 2007). Mit diese Systemen wurden bereits Bioaerosole in Tierställen detektiert (Agranovski et al. 2004, Agranovski et al. 2007). Das Messprinzip beruht darauf, dass über definierte Laserwellenlängen Proteine und DNA zur Fluoreszenz angeregt werden. Diese emittieren spezifische Wellenlängen die detektiert werden. Je nach System werden ebenfalls Informationen über Größe und Form der Partikel gesammelt. Mit diesen Informationen kann ein Bioaerosolpartikel bis zu einem gewissen Grad identifiziert werden. Für artifizielle Bioaerosole bekannter Zusammensetzung funktionieren diese Systeme sehr gut (Toprak & Schnaiter 2013). Auch in der Atmosphärenforschung zur Detektion von kleinen und einfachen primären Bioaerosolpartikeln die z. B. für die Wolkenbildung relevant sind werden sie erfolgreich eingesetzt (Toprak 2014). In Tierställen aber sind Bioaerosolpartikel meist größer, bestehen aus verschiedensten biologischen Substanzen und enthalten viele Bakterienzellen verschiedener Arten, die auch noch häufig eingebettet in eine organische Matrix vorliegen (Clauß et al. 2011a, b). Eine quantitative und qualitative Detektion von Mikroorganismen in solchen Partikeln ist mit solchen Systemen nicht möglich. Sie können lediglich Hinweise auf die grobe Zusammensetzung eines Bioaerosols geben. So fanden z. B. Agranovski et al. 2007 in Broilerställen lediglich, dass 80 % der dort vorkommenden luftgetragenen Partikel fluoreszierten, also biologischen Ursprungs waren.

Bei der „Offlinemessung“ von Bioaerosolen müssen diese als erstes in einer Probe gesammelt werden. Danach erfolgt die Auswertung der Probe, meist über Kultivierung und/oder verschiedene biochemische und molekularbiologische Methoden.

4.1 Probenahme von Bioaerosolen

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Sammelverfahren für Bioaerosole sollte, immer abhängig von der Fragestellung, auf standardisierte Systeme zurückgegriffen werden, die eine hohe physikalische und biologische Sammeleffizienz haben.

Weltweit sind eine Vielzahl unterschiedlicher Probennahmesysteme für den Nachweis von Bioaerosolen verfügbar. Die wichtigsten Sammelverfahren sind dabei Sedimentation, Filtration, Impaktion, Impingement und Fliehkraftabscheider (Zyklone). Abb. 2 zeigt die prozentuale Verteilung der eingesetzten Systeme aus 313 Publikationen, bei denen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung Bioaerosolproben genommen und ausgewertet wurden.

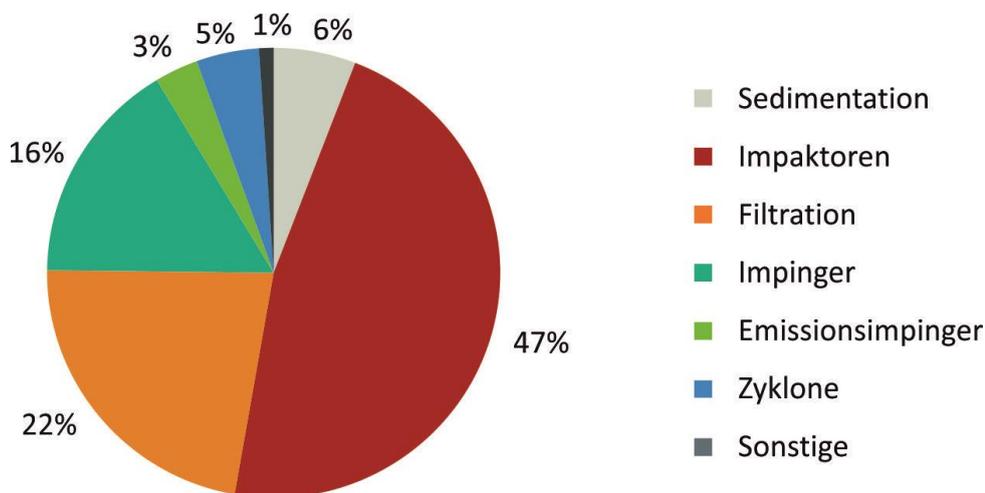


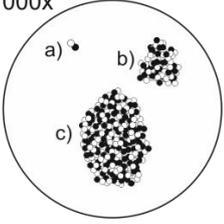
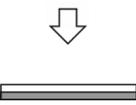
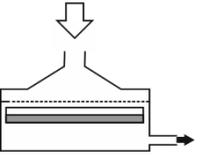
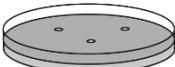
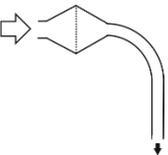
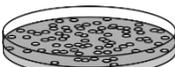
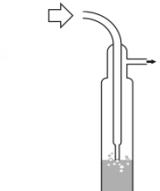
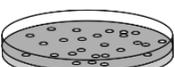
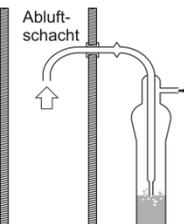
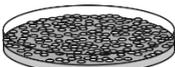
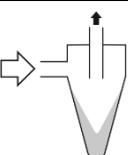
Abb. 2 Prozentuale Verteilung der zur Erfassung von Bioaerosolen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung eingesetzten Sammelsysteme aus 313 Publikationen.

Weltweit wurden fast in jeder zweiten Studie Impaktoren als Bioaerosolsammler eingesetzt. Mit 22 % folgen danach verschiedene Filtersysteme, die vor allem zur Sammlung von Endotoxinen und Schimmelpilzen benutzt wurden. 16 % der Autoren setzten Impinger ein, in den meisten Fällen den AGI-30 (engl. All Glass Impinger). Dieser wird in Deutschland für die Sammlung von Bioaerosolen in der Immissionen empfohlen (VDI 4252 Blatt 3). Der Emissionsimpinger dagegen ist ein in Deutschland standardisiertes System zur Probenahme von Bioaerosolen in der Emission (Gärtner et al. 2008a, b, VDI 4257 Blatt 2). Er wurde zu diesem Zweck in 3 % der Fälle und bisher nur in Deutschland eingesetzt. Immer häufiger benutzt werden Zyklone, mit einem Anteil von momentan 5 %. Vorteilhaft sind sie vor allem aufgrund ihres hohen Luftdurchsatzes zur Sammlung von Viren, sowie Mikroorganismen, die nur in sehr geringen Konzentrationen in der Luft vorkommen (Clauß 2016). In immerhin 6 % der Studien wurde nach 1960 noch die Sedimentation auf Nährbodenplatten als einfachste Sammelmethode eingesetzt. Die restlichen 1 % entfallen auf weitere Methoden wie z. B. die von Sauter et al. (1981), der Mikroorganismen

zwar mit Hilfe eines Impaktors auf Nährböden sammelte, diese dann aber wieder von den Agarplatten in eine Flüssigkeit spülte. Olsen et al. (2009) nutzen eine elektrostatische Sammelmethode und Steiger & Stellmacher (1977) sammelten in der damaligen DDR Bioaerosole aus Rinderställen mit Hilfe eines Thermopräzipitators.

Allein aufgrund der unterschiedlichen Probenahmeverfahren kann es bei der Sammlung von luftgetragenen Bakterien, bei den Ergebnissen zu Abweichungen von mehreren Zehnerpotenzen kommen. Ein Grund dafür ist, dass die Bakterien in der Luft von Tierställen hauptsächlich in größeren Aggregaten vorliegen (Hesse 1884, Hesse 1888). Der Einfluss der Probenahmesysteme auf das Ergebnis ist exemplarisch in Tab. 3 dargestellt. Sowohl Sedimentation als auch Impaktion sind relativ einfache Sammelverfahren, bei denen die luftgetragenen Mikroorganismen meist direkt auf Nährbodenplatten impaktiert werden. Die Nährböden werden nach der Probenahme im Labor im Brutschrank inkubiert. Dabei bringt jedes Partikel, das vermehrungsfähige Mikroorganismen trägt, unabhängig von deren Anzahl, nur eine zählbare Kolonie hervor. Mit dieser Methode kann somit nur die Anzahl Mikroorganismen-tragender Partikel in der Luft bestimmt werden und nicht die Anzahl aller Mikroorganismen. Bei der Sedimentation ist zudem die Angabe einer Konzentration z. B. KBE/m³ nur eingeschränkt möglich, da ein definierter Volumenstrom durch das Sammelsystem fehlt. Insbesondere bereiten die Sedimentations-Methoden Schwierigkeiten, da die Maßeinheit KBE/m²*s keinen direkten Vergleich mit Ergebnissen aus volumetrischen Messungen zulässt und darüber hinaus Probleme bei der Interpretation der Ergebnisse entstehen (Erwerth et al. 1983). Bei den Impaktoren ist die relativ geringe physikalische Sammeleffizienz oft nachteilig, hervorgerufen durch die teilweise hohen systeminternen Wandverluste. Beim international am häufigsten eingesetzten Impaktor, dem Andersen-Sammler, betragen die Verluste für Partikel mit aerodynamischen Durchmessern (AD) von 5 µm 10 % und für Partikel mit 15 µm AD 41 % (McFarland 1977, Wedding et al. 1977). Partikel > 20 µm AD können mit diesem Sammelsystem so gut wie gar nicht erfasst werden. Teilweise werden für die Probenahme von Bioaerosolen auch Impaktoren eingesetzt, die ursprünglich für die größenfraktionierte Sammlung von Staub entwickelt wurden. Die beaufschlagten Filter werden nach der Sammlung in einer Flüssigkeit eluiert um den gesammelten Staub inklusive Mikroorganismen abzuwaschen und dann die Waschflüssigkeit weiter zu untersuchen. Auch bei den Filtrationsmethoden werden Bioaerosolpartikel auf Filtern gesammelt und die Partikel nach der Probenahme von den Filtern abgewaschen. Dadurch brechen Zellaggregate auf und vorhandene Mikroorganismen werden vereinzelt. Wird das Eluat auf Nährbodenplatten ausgestrichen können so alle kultivierbaren Zellen erfasst werden. Dieses Verfahren hat jedoch eine relativ geringe biologische Sammeleffizienz, und ist aufgrund der bestehenden Austrocknungsgefahr während der Probenahme auf dem Filtermedium nur für resistente Mikroorganismen wie z. B. Staphylokokken oder Pilzsporen geeignet. Sensitive Mikroorganismen können hier leicht absterben (Fallschissel 2011). Beim Impingement werden Bioaerosole direkt in einer Flüssigkeit gesammelt. Auch dabei werden Zellaggregate aufgebrochen und Mikroorganismen vereinzelt. Das gekrümmte Einlassrohr wirkt jedoch als Vorabscheider, in dem sich die größeren Partikel ansammeln und somit nicht in die Probe gelangen. Daher werden z. B. beim Impinger AGI-30 nur etwa 20 % bis 30 % der 10 µm großen

Tab. 3: Exemplarischer Einfluss des Sammelsystems auf das Ergebnis der Probenahme von luftgetragenen Bakterien

Sammelverfahren	Fiktives Ergebnis	Anmerkung
<p>1000x</p> 	<p>Beispiel 3 Bioaerosol-Partikel/m³, davon gelangen alle in das Sammelssystem: a) $\varnothing = 1 \mu\text{m}$, 2 Zellen, davon 1 kultivierbar b) $\varnothing = 5 \mu\text{m}$, 50 Zellen, davon 25 kultivierbar c) $\varnothing = 20 \mu\text{m}$, 500 Zellen, davon 250 kultivierbar</p>	
	<p>Sedimentation</p>	<p>3 KBE</p>  <p>nur die Anzahl Bakterientragender Partikel wird erfasst, es kann keine wirkliche Konzentration/m³ angegeben werden</p>
	<p>Impaktion, z. B. Andersen-Sammler</p>	<p>2 KBE/m³</p>  <p>nur die Anzahl Bakterientragender Partikel wird erfasst</p>
	<p>Filtration</p>	<p>137 KBE/m³</p>  <p>alle Partikel werden auf dem Filter abgeschieden, aufgrund von Austrocknung jedoch Verluste durch Absterben der Zellen</p>
	<p>Impingement, z. B. AGI-30</p>	<p>26 KBE/m³</p>  <p>Partikel > 5 μm werden im Krümmer abgeschieden und daher größtenteils nicht mit erfasst</p>
	<p>Emissionsimpinger</p>	<p>276 KBE/m³</p>  <p>durch Spülen der Sonden und Krümmer werden bei Emissionsmessungen alle Partikel erfasst</p>
	<p>Fliehkraftabscheider (Zyklone)</p>	<p>276 KBE/m³</p>  <p>Bei entsprechender Einlasseffizienz werden alle Partikel erfasst</p>

Partikel erfasst, 20 µm große Partikel werden nahezu komplett im Krümmer zurückgehalten. Die Krümmung des Impingers sollte ursprünglich den menschlichen Atemtrakt nachbilden. Somit soll nur die Partikel erfasst werden, die bis in die unteren Atemwege vordringen. Dies ist vor allem bei Arbeitsplatzmessungen zur Beurteilung von potentiellen Gesundheitsgefahren von Bioaerosolen relevant. Für andere Fragestellungen besteht auch die Möglichkeit den Krümmer zu spülen, um die dort abgeschiedenen Partikel in die Probe zu waschen (Chinivasagam & Blackall 2005). Mit Spülung der Krümmer werden so deutlich höhere Konzentrationen gefunden als ohne Spülung (Tesseraux et al 2015). Bei Emissionsmessungen mit dem Emissionsimpinger nach VDI 4257 Blatt 2 werden standardisiert sowohl der Krümmer des Impingers als auch die Entnahmesonden nach der Probenahme gespült. Durch das Zusammenführen von Spül- und Sammelflüssigkeit werden theoretisch alle kultivierbaren Mikroorganismen in sämtlichen Partikelfractionen erfasst. Dadurch wird eine sehr hohe physikalische und biologische Sammeleffizienz erreicht. Dieses System ist besonders für Emissionsmessungen sinnvoll, da mit ihm die gesamte Emission luftgetragener Mikroorganismen ermittelt werden kann, und nicht nur Mikroorganismen in nur einer bestimmten Partikelgrößenfraktion oder nur die Anzahl Mikroorganismen-tragender Partikel. Bei Fliehkraftabscheidern (Zyklonen) werden die Bioaerosole in das Sammelsystem gesaugt, dort in eine Kreisbahn gezwungen und durch Zentrifugalkräfte, meist in einer Flüssigkeit, abgeschieden. Da sie mit einem hohen Luftdurchfluss arbeiten und somit ein relativ großes Luftvolumen beprobt werden kann, werden diese Systeme vor allem dort eingesetzt, wo sehr niedrige Konzentrationen von Mikroorganismen zu erwarten sind, wie z. B. bei Emissionsmessungen, Hintergrundmessungen (Clauß 2016) und zum Nachweis von Viren (Alonso et al. 2016, Andersen et al. 2017, Gloster et al. 2010, Otake et al. 2010, Corzo et al. 2013). Ein weiterer Vorteil ist auch hier die direkte Abscheidung in Flüssigkeit wie beim Impinger. Bei entsprechender Einlasseffizienz können auch mit Fliehkraftabscheidern theoretisch alle luftgetragenen Mikroorganismen einzeln erfasst werden. Jedoch sind bezüglich der Einlasseffizienz für verschiedene Partikelgrößenfraktionen Zyklone im Vergleich zu anderen Sammelsystemen bisher kaum untersucht.

Isokinetischen Probenahme

Bei Bioaerosolen handelt es sich um Partikel. Für die Probenahme von Partikeln aus strömenden Gasen wird allgemein eine Probenahme unter isokinetischen Bedingungen empfohlen, um probenahmebedingte Veränderungen im Partikelgrößenspektrum zu vermeiden, die das Ergebnis erheblich beeinflussen können. Der Effekt ist größen- bzw. massenabhängig und nimmt mit der Größe (Masse) der Partikel zu. Bakterien bilden besonders in der Luft von Tierställen große Aggregate bzw. hängen an großen Staubpartikeln (Clauß et al. 2011a, b). Viele Untersuchungen zeigen, dass je nach Messparameter (KBE, Zellzahlen, Genkopien) ein hoher Prozentsatz in der Partikelfraktion > 10 µm vorkommt (siehe Kapitel 5.4.2) (Adell et al. 2011a, b, Aarnink et al. 2012, Chai et al. 2001, Chinivasagam & Blackall 2005, Cormier et al. 1990, Lecours et al. 2012, Lenhart et al. 1982, Liu & Ma 2010, Predicala et al. 2002, Sowiak et al. 2011, Siggers et al. 2011, Zheng et

al. 2013, Clauß 2015a, Gärtner et al. 2017). Abb. 3 zeigt, wie bedeutsam der Einfluss für die Messung von Partikeln in diesem Größenbereich sein kann.

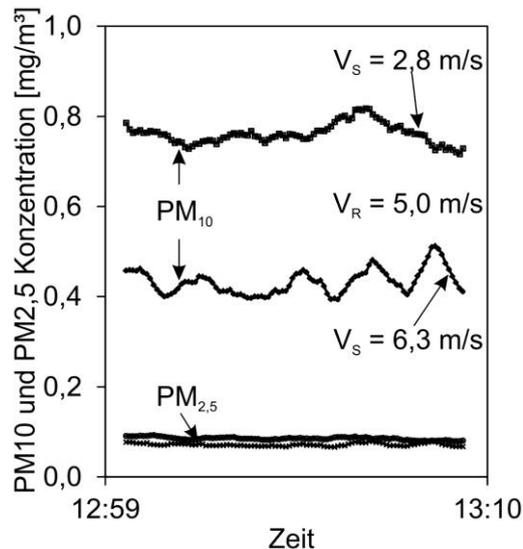
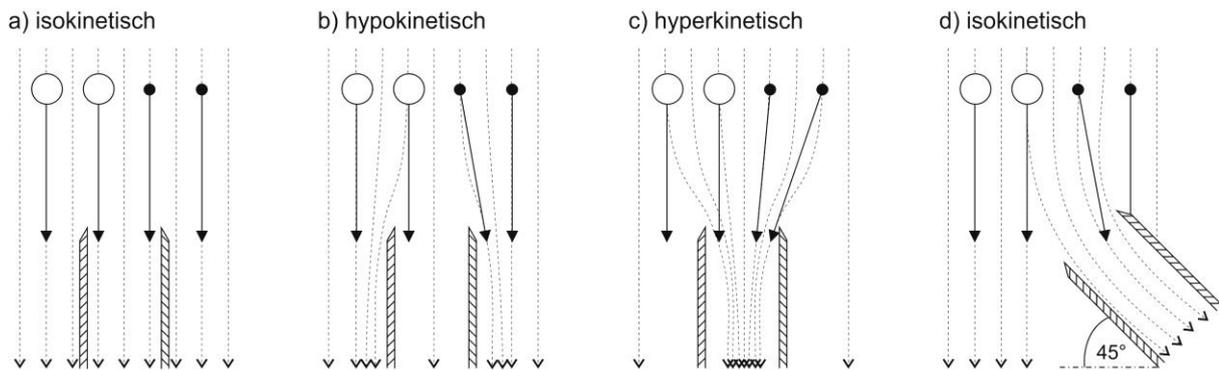


Abb. 3: Gemessene PM_{2,5} und PM₁₀ Konzentrationen in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis (V_s = Sondengeschwindigkeit, V_R = Rohrgeschwindigkeit) (aus Clauß & Hinz 2014)

In einer Aerosolmessstrecke wurden PM_{2,5}- und PM₁₀-Teststäube unter iso- und hypokinetischen (Geschwindigkeit in der Einlassdüse der Messsonde ca. 50 % der Luftgeschwindigkeit in der Messstecke) Bedingungen aus der Luft gesammelt und mit einem Partikelspektrometer die Staubkonzentrationen in mg/m^3 ermittelt. Bei PM_{2,5}-Staub sind zwischen den beiden Probenahmen kaum Unterschiede im Ergebnis festzustellen. Dagegen führen beim PM₁₀-Staub hypokinetische Bedingungen fast zu doppelten Konzentrationen. Obwohl hier das Probenluftvolumen nur die Hälfte beträgt, wandern trotzdem alle großen Partikel vor der Einlassdüse allein aufgrund ihrer Trägheit in die Probenahmesonde und werden mit erfasst. Es wurde gezeigt, dass diese großen Partikeln in Tierställen hunderte von Bakterien enthalten können (Clauß et al. 2011a, b). Bei luftgetragenen Mikroorganismen kommt hinzu, dass neben den für Partikel allgemein bekannten Abweichungen in der Korngrößenverteilung, Masse oder Anzahl auch das Artenspektrum verfälscht werden kann (Abb. 4).

Aufgrund der unterschiedlichen Charakteristika sowie den verschiedenen Vor- und Nachteilen der einzelnen Sammelverfahren muss die Auswahl eines Probenahmesystems immer zuerst abhängig von der Fragestellung erfolgen. Danach sollte auf standardisierte, oder zumindest ausreichend charakterisierte, Systeme zurückgegriffen werden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Vor allem die vielversprechenden Zyclone sollten in Zukunft für die Sammlung von Bioaerosolen besser evaluiert werden.

Probenahmebedingungen:



Ergebnis (zählbare Kolonien auf Nährbodenplatten nach Kultivierung):



richtige Anzahl KBE,
richtiges Artenspektrum



zu niedrige Anzahl KBE,
verfälschtes Artenspektrum



zu hohe Anzahl KBE,
verfälschtes Artenspektrum



zu niedrige Anzahl KBE,
verfälschtes Artenspektrum

Abb. 4: Theoretischer Einfluss der Probenahmebedingungen auf das Ergebnis bei der Sammlung luftgetragener Mikroorganismen durch Absaugen eines Teilstroms aus dem Abgasstrom (aus Clauß & Hinz 2014)

4.2 Auswertung

Nachdem die Bioaerosole in einer Probe gesammelt wurden, erfolgt die Auswertung meist über Kultivierung und/oder verschiedene biochemische und molekularbiologische Methoden.

4.2.1 Kultivierung

Kultivierung auf Nährböden und auszählen der gewachsenen Kolonien ist immer noch der Goldstandard zur Quantifizierung luftgetragener Mikroorganismen.

Die Kultivierung auf Nährböden und das Auszählen der gewachsenen Kolonien ist noch immer der Goldstandard für die Quantifizierung von luftgetragenen Mikroorganismen. Jedoch bedingt der Nachweis über Kultivierung, dass nur vermehrungsfähige Organismen erfasst werden können und darüber hinaus auch nur der Anteil der zu den gewählten Bedingungen wachstumsfähigen

Mikroorganismen. Hinzu kommt, dass viele Bakterien bei für sie ungünstigen Umweltbedingungen in einen sogenannten VBNC (engl.: viable but not culturable)-Stadium übergehen (Bogosian et al. 2001, James 2010, Oliver 2005). Dabei wird die metabolische Aktivität auf ein Minimum reduziert und die Bakterien sind mit Standardmethoden u. U. ebenfalls nicht mehr kultivierbar und damit nachweisbar. Es gibt auch obligat intrazellulär wachsende Bakterien wie z. B. Chlamydien oder Coxiellen, die aufgrund ihrer Lebensweise ebenfalls nicht auf Nährböden kultiviert werden können. Daher ist jede Kultivierung in gewisser Weise selektiv. Auch die als „nicht selektiv“ bezeichneten Nährböden, die z. B. zur Ermittlung der Gesamtbakterien eingesetzt werden geben immer nur einen Anteil des originär im Bioaerosol befindlichen Bakterienspektrums wieder. Andererseits wachsen auf Nährböden zum selektiven Nachweis bestimmter Bakteriengruppen nicht ausschließlich Mikroorganismen der gewählten Zielgruppe. Hinzu kommt, dass die meisten kommerziell erhältlichen Nährböden für humanmedizinische Zwecke entwickelt und getestet worden sind. In Krankenhäusern, der Pharma- und Lebensmittelindustrie eingesetzt, dienen sie dort zum kulturbasierten Nachweis einer überschaubaren Anzahl meist pathogener Erreger, die i. d. R. ohne nennenswerte Begleitflora vorkommen. Es ist daher oft nicht hinreichend geklärt, ob diese Nährböden ohne Einschränkungen auch für Umweltproben eingesetzt werden können, wo die Hemmung der Begleitflora aufgrund der Vielzahl der vorkommenden Mikroorganismen viel wichtiger ist. Angepasst an ihre Lebensweise sind die Stoffwechseleigenschaften von Bakterien sehr verschieden. Viele Selektivnährmedien beruhen daher auf den Nachweis von spezifischen Stoffwechseleigenschaften, z. B. ob ein bestimmter Zucker verwertet werden kann oder nicht. Andere selektieren über Resistenzen z. B. gegen Antibiotika. Viele Bakterien haben vor allem unter optimalen Wachstumsbedingungen kurze Generationszeiten (*Escherichia coli* z. B. 20 Minuten). Durch den in der Umwelt herrschenden Selektionsdruck und natürlichen Mutationen kann es schnell zu Variationen von Stoffwechseleigenschaften innerhalb einer Spezies und sogar innerhalb eines Stammes kommen. Auch können Stoffwechseleigenschaften oder Resistenzen mittels Plasmiden speziesübergreifend weitergegeben werden, z. B. Antibiotikaresistenzgene. Dies kann die Selektivität mancher Nährböden zusätzlich einschränken. So gibt es nicht wenige Publikationen die sehr fragwürdige Ergebnisse nennen, vermutlich aufgrund falsch ausgewerteter Selektivnährböden. Daher ist eine Standardisierung von Kultivierungsbedingungen zu Nachweis von Bioaerosolen besonders wichtig. Ein großer Schritt in diese Richtung ist mit dem Erscheinen der VDI 4253 Blatt 3 getan. Dort werden für viele der hier in Kapitel 3 vorgestellten Mikroorganismen Kultivierungs- und Nachweismethoden genannt, die sich für die Identifizierung und Quantifizierung von Bioaerosolen bewährt haben. Insgesamt können kultivierungsabhängige Methoden einen guten Überblick über vorkommende Bakterien-Gruppen geben, einen bedeutend detaillierteren Einblick bieten aber kultivierungsunabhängige, molekularbiologische Methoden (Fallschissel 2011).

4.2.2 Molekularbiologische Methoden

Molekularbiologische Methoden wie die PCR erlauben, vor allem in Kombination mit den klassischen kulturbasierten Verfahren, einen detaillierten Einblick in die Zusammensetzung von Bioaerosolen, wobei hier noch eine weitere Standardisierung von Verfahren notwendig ist.

Molekularbiologische Methoden werden immer häufiger in der Analytik luftgetragener Mikroorganismen, auch aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, angewendet (Olsen et al. 2009). Dabei ist neben der Identifizierung von Organismen, die durch kultivierungsabhängige Methoden nicht erfasst werden können, auch eine Quantifizierung dieser Organismen von Interesse (Fallschissel 2011). Die grundlegende Methode nukleinsäurebasierter Analysesysteme ist die PCR (engl. polymerase chain reaction). Dabei gibt es zwei grundsätzliche Verfahren: Qualitative und quantitative PCR.

Mit der qualitativen PCR können Proben auf das Vorhandensein bestimmter Mikroorganismen untersucht werden. Bei diesem Verfahren werden bestimmte artspezifische DNA-Abschnitte mit bekannter Zielsequenz spezifisch nachgewiesen. Als erstes werden Mikroorganismenzellen aus einer Probe aufgeschlossen. Anschließend wird die DNA extrahiert und gereinigt. Bei der PCR wird dann die doppelsträngige DNA denaturiert und durch Anlage Taxon-spezifischer Primer die Zielsequenz selektiv enzymatisch vervielfältigt. Das spezifische PCR-Produkt wird nachgewiesen und bestätigt so die Anwesenheit der entsprechenden Mikroorganismen in der Probe. Am häufigsten werden dazu gruppenspezifische Sequenzunterschiede auf dem bakteriellen 16S rRNA Gen genutzt, da es neben hoch konservierten Bereichen auch sehr variable Bereiche besitzt, deren Sequenz für jede Gattung oder sogar Art variiert. Quantitative PCR-Verfahren (qPCR) wie die Real-time-Polymerase-Kettenreaktion (eng. real-time-PCR), nutzen ebenfalls das oben beschriebene Verfahren der Vervielfältigung spezifischer DNA-Sequenzen. Zusätzlich werden jedoch die spezifischen PCR-Produkte (Amplifikate) bereits während des Amplifikationsprozesses nachgewiesen. Dies geschieht während des Vorgangs entweder durch unspezifische Bindung von Fluoreszenzfarbstoffen an doppelsträngige DNA oder mit Hilfe von spezifischen DNA-Sonden, die mit Fluoreszenzfarbstoffen gekoppelt sind. Nach der Fluoreszenzmarkierung kann das Signal durch Anregung von bestimmten Wellenlängen detektiert werden. Dabei steigt das Fluoreszenzsignal proportional zur Produktmenge an. Mit Hilfe einer Standardkurve mit bekannten DNA-Konzentrationen kann dann auf die Anfangskonzentration der Sequenz und damit näherungsweise auf die Anzahl der entsprechenden Mikroorganismen in der Probe geschlossen werden. Problematisch ist bei diesem Verfahren, dass die Anzahl der detektierbaren Gene pro Zelle abhängig von der Spezies unterschiedlich sein (Farrelly 1995) und auch schwanken kann (Bremer & Dennis 1987). Zudem wird auch die DNA von toten Zellen detektiert. Daher kommen mit dieser Methode als Ergebnis meist höhere Konzentrationen heraus als über Kultivierungsmethoden. Ein großer Vorteil ist aber, dass molekularbiologischen Quantifizierungs- und Identifizierungsmethoden einen erheblich detaillierteren Einblick in die Zusammensetzung von Bioaerosolen ermöglichen. So wurden mit PCR-Methoden in vielen Bereichen eine viel höhere Speziesdiversität gefunden als mit den klassischen kulturbasierten Methoden (Brodie et

al. 2007, Despres et al. 2007). Es gibt auch immer wieder neue Erkenntnisse durch PCR-Methoden. So fanden Martin et al. (2010a, b), dass in der Geflügelhaltung bis zu 39 % aller Bakterienzellen der Gattung *Jeotgalicoccus* angehörten, ein Bakterium, das erstmalig erst vor einigen Jahren von Koreanischen Meeresfrüchten isoliert wurde (Yoon et al. 2003). In Schweineställen fanden Nehme et al. (2009) hohe Konzentrationen von Archaeobakterien, eine ursprüngliche Bakteriengruppe, die bisher über Kultivierung noch nicht in Tierställen nachgewiesen wurde. Ein weiterer Vorteil ist, dass über die PCR Mikroorganismen, z. B. in der Immission eines Stalls, direkt einer Quelle zugeordnet werden können. So fanden z. B. Duan et al. (2009), dass ein hoher Prozentsatz der in der Immission eines Schweinestalls gefundenen *E. coli* aus dem Kot der Tiere stammen.

Die Entwicklung neuer PCR-Methoden schreitet stetig voran, auch in Kombination mit anderen Verfahren wie z. B. der HPLC (engl.: high-performance liquid chromatography) (Nieguitsila et al. 2010) oder MALDI-TOF (engl.: time-of-flight mass spectrometry) (Szponar & Larsson 2001, Druckenmüller et al. 2017) werden sie zur Detektion von Bioaerosolen in Tierställen eingesetzt. Was bisher fehlt sind standardisierte Methoden. Sind diese vorhanden, kann in Zukunft die detaillierte Darstellung von Artenspektren durch sequenzbasierte Verfahren die kultivierungsabhängige Messung von Leitorganismen bei der Bioaerosolbewertung sinnvoll ergänzen (Schneider et al. 2015).

4.2.3 Nachweis von Endotoxinen

Der am meisten genutzte Test zum Nachweis von Endotoxinen ist der LAL-Test, der jedoch relativ Störanfällig ist und bis jetzt nicht einheitlich standardisiert.

Einen umfassenden Überblick zur Messung von Endotoxinen in Bioaerosolproben geben Duquenne et al. (2013). Standardtest zur Messung luftgetragener bakterieller Endotoxine ist der Limulus-Amöbozyten-Lysat-Test (LAL-Test). Er beruht auf der Beobachtung von Levin & Bang (1964), dass sehr niedrige Mengen bakterieller Endotoxine eine Gerinnung (Koagulation) der Hämolymphe von Pfeilschwanzkrebse (Gattung: *Limulus*) auslösen. Die Gerinnungskaskade wird dabei über den sogenannten Faktor C angestoßen, der durch das Endotoxin aktiviert wird. Es existieren mehrere Modifikationen des Tests. Ein Hauptnachteil des LAL-Tests ist jedoch dessen Anfälligkeit gegenüber einer Vielzahl von Substanzen, welche als Störstoffe wirken und regelmäßig in Bioaerosolproben zu finden sind, an erster Stelle die β -Glucane z. B. aus der Zellwand von Pilzen. Ein weiteres Problem stellen die unterschiedlichen Empfindlichkeiten verschiedener LAL-Tests von verschiedenen Anbietern oder sogar Chargen dar.

In den letzten Jahren wurde ein rekombinanter rFC-Test entwickelt. Hier wird DNA mit dem Faktor-C-Gen des Pfeilschwanzkrebses über einen Virus in Insektenzellen eingeschleust, die dann

ein aktivierbares rFC Produkt exprimieren. Dieser Test scheint bei mit dem LAL-Test vergleichbaren Ergebnissen wesentlich unanfälliger gegenüber Störungen zu sein und wird sich vermutlich in Zukunft durchsetzen (Alwis & Milton 2006, Lohmeyer et al. 2017, Thorne et al. 2010, Uribe 2007), auch, da die mittlerweile vom Aussterben bedrohten Pfeilschwanzkrebse dann nicht mehr als Vollblutlieferant erhalten müssen.

Die molekulare Struktur der Endotoxine oder auch die Lipopolysaccharide unterschiedlicher Arten und Stämme gramnegativer Bakterien variieren. Dementsprechend kann die von vergleichbaren Endotoxin-Stoffmengen induzierte Stärke der Gerinnung variieren. Daher können den Ergebnissen keine Stoffkonzentrationen, sondern Aktivitäten der Endotoxine in der Probe zugeordnet werden. Diese werden dann mit einem chemisch aufgereinigten Standard-Endotoxin, (meist aus *E. coli*) verglichen. Daher wird, um die Aktivität von Endotoxinen als Pyrogen im Körper oder im Testsystem darzustellen, einer bestimmten Menge Endotoxin eine Aktivität zugeordnet, ausgedrückt in Endotoxin-Einheiten (EU) und definiert über einen internationalen Standard. Normalerweise entsprechen dabei 1 ng Standard-Endotoxin ungefähr 10 Endotoxin units (EU).

Es gibt bereits eine Vielzahl von Standards für die Messung und den Nachweis von Endotoxinen, z. B. der internationale Standard EN 14031 (2003), in Kanada „Method 332, IRSST“ (IRSST 2009), in Frankreich „MetroPol method 089/V2, INRS“ (INRS 2010) oder in Deutschland „Method 9450, BGIA“ (BGIA 2002). Letztere Arbeitsanweisung hat sich hier auch für die Detektion von Endotoxinen aus Tierställen bewährt (z. B. Anonymous 2013a). Derzeit wird die VDI-Richtlinie 4254 Blatt 2 erarbeitet, in der für Deutschland ein weiterer Standard für die Messung von Endotoxinen in Bioaerosolproben festgelegt werden soll. Eine Vereinheitlichung mit den bestehenden Standards wird als sinnvoll erachtet.

Weitere 25 Publikationen die mutmaßlich Messergebnisse zu Bioaerosolen aus der Nutztierhaltung enthalten, vor allem aus dem Nahen Osten und der ehemaligen Sowjetrepublik, konnten nicht mehr beschafft werden, da die entsprechenden Zeitschriften nicht mehr verfügbar waren. Die meisten Publikationen wurden in Deutschland und der USA identifiziert, wobei Artikel aus diesen Ländern relativ leicht zu beschaffen sind und bei der Online-Recherche auch die Schrift keine Barriere darstellt, im Gegensatz zu z. B. asiatischen oder kyrillischen Schriftzeichen. Daher existieren mutmaßlich auch in den anderen Ländern noch mehr Untersuchungen.

Aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen Versuchsbedingungen war eine Gewichtung der Ergebnisse z. B. nach der Menge des beprobten Luftvolumens, der Anzahl der zugrundeliegenden Proben (n), der Anzahl der ausgewerteten Nährbodenplatten, der Zahl der untersuchten Tierställe oder der Dauer der Untersuchungen nicht sinnvoll möglich. Daher wurden für die folgenden Darstellungen alle publizierten Werte zu Bioaerosolkonzentrationen gleich gewichtet. Es ist weiterhin zu beachten, dass einige Autoren geometrische Mittelwerte publizierten, andere arithmetische Mittelwerte. Wurden lediglich die minimalen und maximalen Konzentrationen genannt, wurde aus diesen der arithmetische Mittelwert gebildet. Auch diese fanden gleichwertig Eingang in die folgenden Darstellungen. Alle Endotoxinkonzentrationen wurden in EU dargestellt. Waren nur Angaben in ng verfügbar, wurden diese unabhängig vom eingesetzten Standardendotoxin (wenn überhaupt genannt) mit dem Faktor 10 multipliziert, und damit in EU umgerechnet.

Weltweit fanden die meisten Untersuchungen bei Hühnern (39 %), Schweinen (33 %) und Rindern (18 %) statt (Abb. 6).

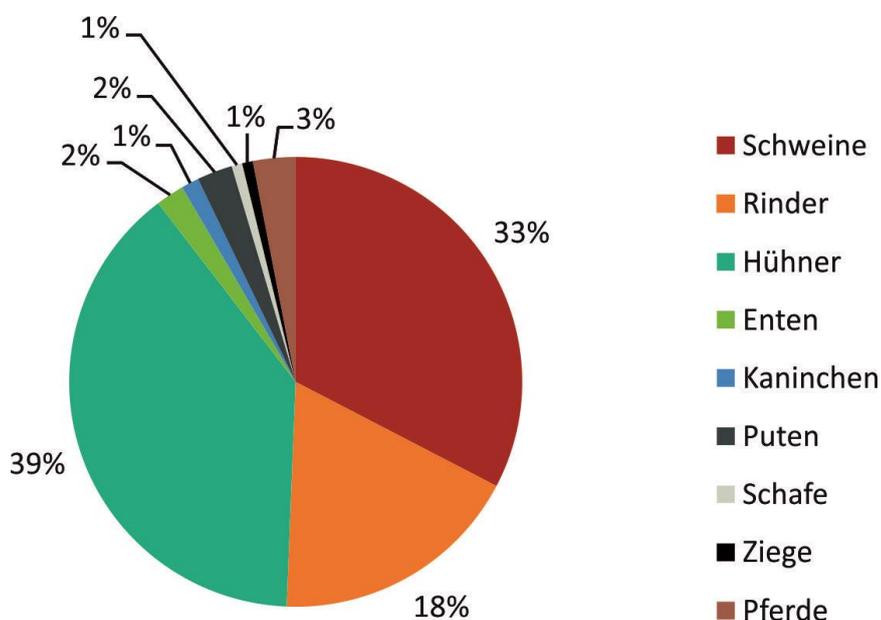


Abb. 6: Verteilung der weltweit durchgeführten Bioaerosoluntersuchungen auf die verschiedenen Tierarten

Die restlichen 10 % verteilen sich auf Enten, Kaninchen, Puten, Schafe, Ziegen und Pferde. Bemerkenswert ist mit nur 2,5 % der geringe Prozentsatz an Untersuchungen in der Putenhaltung. Dabei liegt der Anteil der Putenhaltung an der gesamten Produktion von Geflügelfleisch z. B. in Deutschland zurzeit bei fast 50 % (Deutscher Bauernverband 2016). Innerhalb der Tierarten Schweine, Rinder und Hühner, wurden bezogen auf die Produktionsstufen bei Schweinen fast dreiviertel der Untersuchungen in der Schweinemast durchgeführt (Tab. 4). Die wenigsten Daten stehen für die Sauenhaltung zur Verfügung. Bei den Rindern sind die Milchkühe mit etwas über 50 % am besten untersucht, gefolgt von den Mastrindern und der Kälberhaltung. Mutterkühe sind hier am wenigsten untersucht. Bei den Hühnern entfallen 58 % der Untersuchungen auf Broiler, 34 % auf Legehennen und die restlichen 8 % auf Elterntiere, Brütereien und Junghennenaufzucht. Hier ist generell noch zu beachten, dass die Übergänge zwischen den meisten Produktionsstufen fließend sind und international auch nicht einheitlich geregelt. Die Angaben der Produktionsstufen in denen die Untersuchungen stattfanden sind aus den Publikationen entnommen.

Tab. 4: Anzahl von Publikationen zu Bioaerosolmessungen in verschiedenen Produktionsstufen der Schweine-, Rinder-, und Hühnerhaltung

Tierart	Produktionsstufe	Anzahl Publikationen	Prozentsatz (%)
Schweine	Muttersauen	7	5
	Absatzferkel	9	7
	Ferkelaufzucht	18	14
	Mastschweine	95	74
	Schweine gesamt	129	100
Rinder	Milchkühe	37	52
	Mutterkühe	1	1
	Mastrinder	20	28
	Kälber	13	18
	Rinder gesamt	71	100
Hühner	Elterntiere	1	1
	Brütereie	4	3
	Junghennenaufzucht	6	4
	Broiler	90	58
	Legehennen	53	34
	Hühner gesamt	154	100

Bezogen auf den Messort wurden mit 78 % die meisten Messungen in den Tierställen durchgeführt und hatten als fachlichen Hintergrund vor allem den Arbeitsschutz im Vordergrund, aber auch den Tierschutz (Abb. 7). Immissionsmessungen fanden in 16 % der Fälle statt. Hier war meist die Bestimmung der Ausbreitungsentfernung von Bioaerosolen aus Tierställen das Ziel. Nur 6 % der an Tierställen durchgeführten Probenahmen waren Emissionsmessungen, primär mit dem Ziel, Emissionsfaktoren für Bioaerosole zu erheben, die vor allem als Eingangsdaten für Immissionsprognosen genutzt werden können.

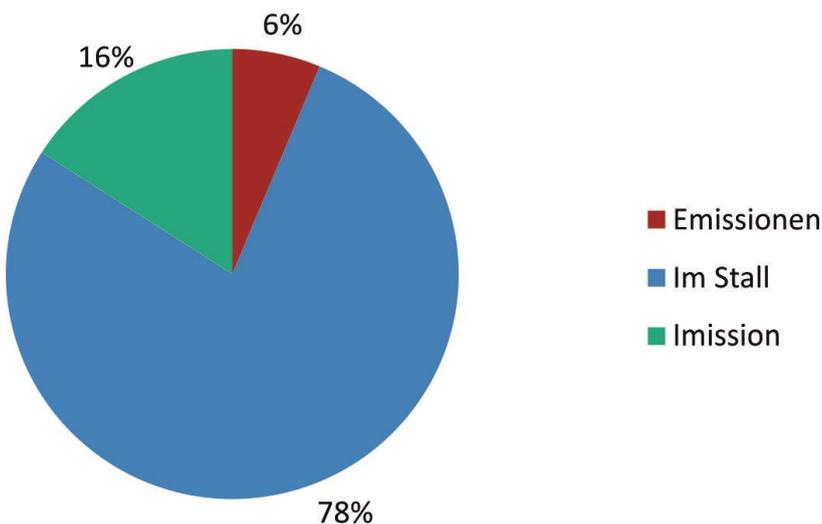


Abb. 7: Prozentuale Anteile von Emissions- und Immissionsmessungen sowie Messungen im Stall von weltweit durchgeführten Messungen von Bioaerosolen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung

5.1 Messungen im Stall

Bei relativ großer Schwankungsbreite für alle Tierarten wurden die höchsten Konzentrationen luftgetragener Bakterien in Ställen für Hühner gefunden, gefolgt von Puten, Enten, Schafen, Ziegen, Schweine, Rinder, Pferde und Kaninchen, wobei die verschiedenen Haltungsverfahren und Produktionsstufen einen deutlichen Einfluss haben.

In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung sind die meisten Bioaerosolmessungen in den Tierställen durchgeführt worden. Die dortige Luftqualität ist ein wichtiger Faktor sowohl für den Arbeitsschutz, als auch den Tierschutz. Aus der weltweiten Literatur wurden für jede Tierart, unabhängig von der Haltungsform und dem Sammelsystem, die mittleren Konzentrationen an Gesamtbakterien und Gesamtpilzen über Kultivierung, sowie die Konzentrationen von Endotoxinen ermittelt (Abbildung 8).

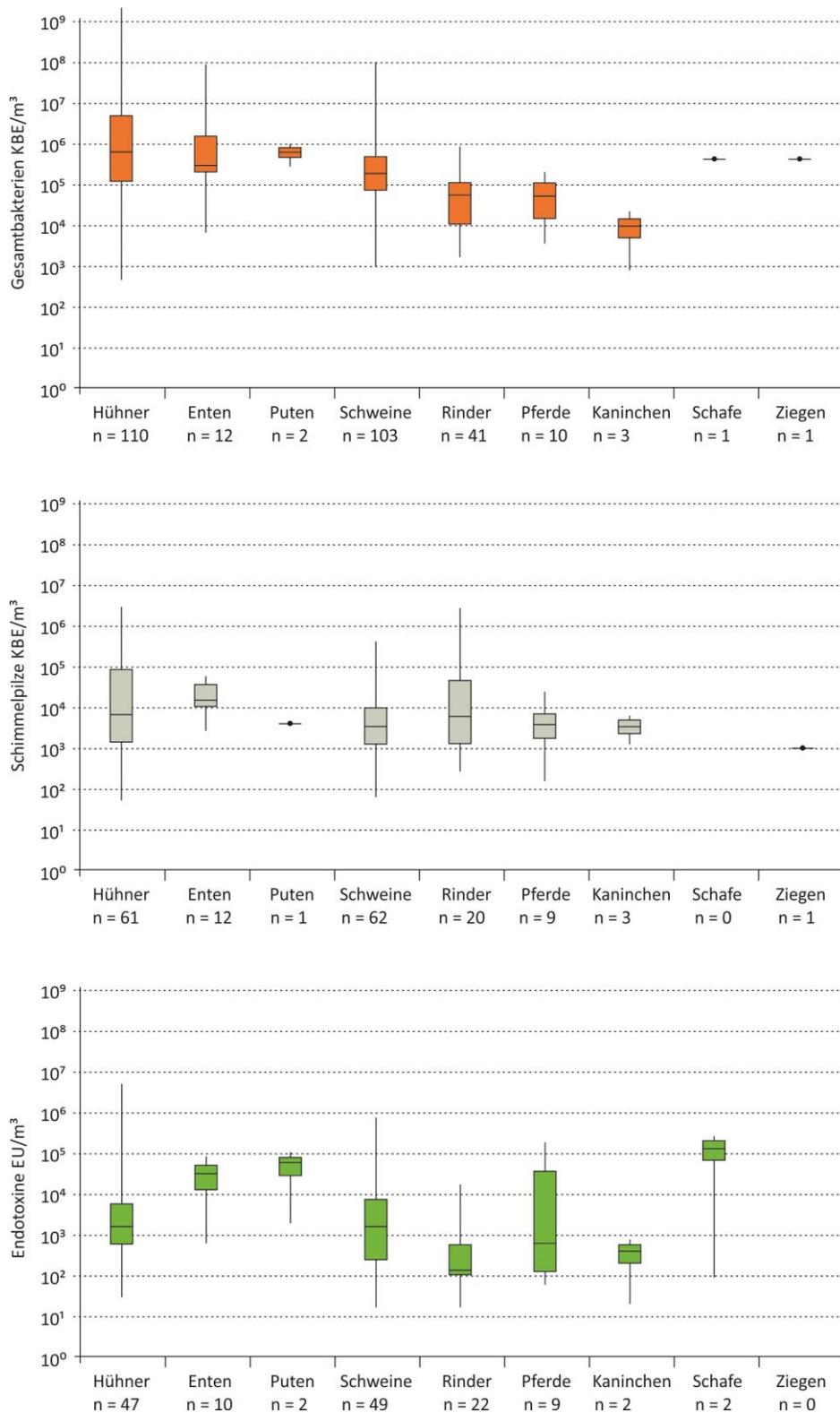


Abb.: 8 Box-and-Whiskers-Plots der aus der weltweiten Literatur unabhängig von der Haltungsform und dem Sammelverfahren für jede Tierart über Kultivierung ermittelten mittleren Konzentrationen an Gesamtbakterien und Gesamtpilzen sowie die Endotoxine und die Anzahl der eingeflossenen Datensätze.

Bei den Gesamtbakterien wurden die höchsten mittleren Konzentrationen bei Hühnern gefunden, mit einem Median von 7×10^5 KBE/m³. Zu Untersuchungen in der Hühnerhaltung waren mit $n = 110$ auch die meisten Datensätze verfügbar. Die Schwankungsbreite ist hier relativ groß, vermutlich aufgrund der unterschiedlichen Haltungsformen. Bei den Enten lag der Median bei 3×10^5 KBE/m³ aus 12 Datensätze aus 7 Publikationen (Crook et al. 2008, Martin et al. 2010a, Seedorf et al. 1998b, Yu et al. 2016a, b, Martin et al. 2015, Martin & Jäckel 2011). Die Haltung von Enten wurde erst in den letzten Jahren intensiver untersucht. Dort wurden sogar neue Bakterienarten wie *Leucobacter aerolatus* sp. nov beschrieben (Martin et al. 2010c). Zudem wurde festgestellt, dass in der Entenhaltung 4 – 18 % der gefundenen Bakteriengene der Gattung *Jeotgalicoccus* zugeordnet werden können, einem erst vor einigen Jahren entdeckten Vertreter der *Staphylococcaceae* (Martin et al. 2010b). *Jeotgalicoccus* spp scheint in der gesamten Geflügelhaltung weit verbreitet zu sein (Martin et al. 2010b). Fallschissel et al. (2009) untersuchten mit molekularbiologischen Methoden das Vorkommen von *Salmonella* spp in Entenställen und fanden zwischen 2.5×10^1 Gene/m³ und 3×10^6 Gene/m³. Martin et al. (2015) bestimmten für Entenbrütereien und die Entenmast Gesamtzellzahlen von 5×10^7 Zellen/m³ und 2×10^7 Zellen/m³, deutlich mehr als über kulturelle Verfahren nachgewiesen wurde. Schäfer et al. (2011) fanden mittels PCR das gesundheitlich relevante Bakterium *Saccharopolyspora* spp in Konzentrationen von $2,7 \times 10^5$ Zellen/m³. Die Puten liegen mit einer mittleren gefundenen Konzentration im Stall von 6×10^5 KBE/m³ zwischen Hühnern und Enten, hier waren jedoch nur 2 Datensätze verfügbar (Fallschissel 2010, 2011). Es fanden noch weitere Untersuchungen in der Putenhaltung statt, in der spezifische Mikroorganismengruppen untersucht wurden. Fulleringer et al. (2006) untersuchten Putenställen in Frankreich auf die toxinbildenden Schimmelpilze *Aspergillus fumigatus* und *Aspergillus flavus* und fanden dort Konzentrationen von 10 KBE/m³ und 37 KBE/m³. Auch Mulhausen et al. (1987) fanden in den USA 73 KBE/m³ *Aspergillus* spp in der Luft von Putenställen. Jonges et al. (2015) untersuchten in einem Putenstall in den Niederlanden das Vorkommen von Aviären Influenza A Viren und fanden $8,5 \times 10^4$ Genomkopien/m³ Luft. Brauner et al. (2016) untersuchte in Deutschland luftgetragene Enterokokken in einer Putenbrüterei und fand dort 1×10^5 KBE/m³. In der Schweinehaltung wurden aus $n = 103$ Datensätzen eine mittlere Konzentration von 2×10^5 KBE/m³ Gesamtbakterien in der Luft berechnet. Die Konzentrationen liegen damit deutlich unter denen in der Geflügelhaltung. Bei den Rindern lag die mittleren Konzentration aus $n = 41$ Datensätzen mit 5×10^4 KBE/m³ Luft nochmal deutlich niedriger. Eine ähnliche mittlere Konzentration wurden mit 4×10^4 KBE/m³ in der Pferdehaltung festgestellt, aus $n = 10$ Datensätzen aus 5 Publikationen (Eckhardt 2008, Fritz 2017, Samadi et al. 2009, Zeitler 1986, Dutkiewicz et al. 1994). Kaninchenhaltungen wurden vor allem in China und Indien untersucht und aus $n = 3$ Datensätzen ein Median von 1×10^4 KBE/m³ ermittelt (Yao et al. 2007a, b, Duan et al. 2006). Für luftgetragene Gesamtbakterien in Haltungen für Schafe wurde nur ein Wert aus Deutschland gefunden: 4×10^5 KBE/m³ (Eckhardt 2008). Desweiteren waren in Irland Luftproben aus Schafställen positiv für Salmonellen (Okraszewska-Lasica et al. 2014). Für Ziegenhaltungen wurden eigene noch nicht veröffentlichte Daten zugrunde gelegt, die mit $n = 24$ Tag- und Nachtmessungen mit einem automatischen Bioaerosolsammler in der Luft eines Ziegenstalls mit 2000 Tieren eine mittlere Konzentration von 4×10^5 KBE/m³ Gesamtbakterien ergaben.

Insgesamt betrachtet wurden in der Luft in den Ställen die höchsten Konzentrationen an Gesamtbakterien bei den Hühner gefunden, gefolgt von Puten, Enten, Schafen, Ziegen, Schweine, Rinder, Pferde und Kaninchen.

Die Konzentrationen von luftgetragenen Schimmelpilzen liegen deutlich unter denen der Bakterien. In der Hühnerhaltung wurden aus $n = 61$ Datensätzen eine mittlere Konzentration von 6×10^3 KBE/m³ berechnet, wobei auch hier die Schwankungsbreite sehr groß ist. Bei den Enten lag die Konzentration bei $1,5 \times 10^3$ KBE/m³ (Crook et al. 2008, Yu et al. 2016a, b). Bei den Puten fand sich nur bei Debey et al. (1995) in den USA ein Wert zu Schimmelpilzen mit $6,3 \times 10^3$ KBE/m³. Bei den Schweinen ergaben sich aus $n = 62$ Datensätzen eine mittlere Konzentration von 3×10^3 KBE/m³, bei den Rindern aus $n = 20$ Datensätzen 7×10^3 KBE/m³. Bei Pferden sind es mit 4×10^3 KBE/m³ etwas weniger (Fritz 2017, Nardoni et al. 2005, Samadi et al. 2009, Dutkiewicz et al. 1994). Genauso hoch waren die Konzentrationen von Schimmelpilzen bei Kaninchen in Südostasien (Miao et al. 2010, Wang et al. 2007, Pavan 2015). Für Schafe wurden keine publizierten Schimmelpilzkonzentrationen gefunden. Für Ziegenhaltungen wurden auch hier eigene bisher unveröffentlichte Daten zugrunde gelegt, die eine mittlere Konzentration von 1×10^3 KBE/m³ Schimmelpilze ergaben. Allgemein betrachtet ergeben sich bei Bakterien Unterschiede bei den mittleren Konzentrationen in den Ställen um bis zu zwei Zehnerpotenzen, bei den Schimmelpilzen dagegen sind die Unterschiede zwischen den Tierarten geringer und im Bereich von nur ca. einer Zehnerpotenz.

Für Endotoxine wurden in der Luft von Hühnerställen aus $n = 47$ Datensätzen eine mittlere Konzentration von 2×10^3 EU/m³ ermittelt. Bei den Enten lag sie um eine Zehnerpotenz höher bei 3×10^4 EU/m³ (Crook et al. 2008, Seedorf et al. 1998b, Yu et al. 2016). Bei den Puten waren es mit 5×10^4 EU/m³ noch etwas mehr, wobei hier nur zwei Datensätze zur Verfügung standen und die Werte in den beiden Publikationen mit 1×10^6 EU/m³ und 2×10^3 EU/m³ sehr unterschiedlich waren (Jonges et al. 2015, Schirl et al. 2007). Bei den Schweinen wurden in der Stallluft aus $n = 49$ Datensätzen eine mittlere Konzentration von 2×10^3 EU/m³ berechnet, genauso viel wie in der Hühnerhaltung, jedoch mit einer etwas größeren Schwankungsbreite. Die Konzentration von Endotoxinen in der Rinderhaltung aus $n = 22$ Datensätzen waren mit 1×10^2 EU/m³ vergleichsweise niedrig. Endotoxine in Pferdestallluft wurden mit einer mittleren Konzentration ($n = 9$) von 6×10^2 EU/m³ gefunden, bei einer relativ großen Schwankungsbreite (McGorum et al. 1998, Pomorska et al. 2007, Samadi et al. 2009, Dutkiewicz et al. 1994). Endotoxine bei Kaninchen lagen bei 4×10^2 EU/m³ (Duan et al. 2006) und in Schafställen in Deutschland und Polen bei 1×10^5 EU/m³. Für Ziegen wurden keine Werte gefunden. Allgemein betrachtet zeigen sich bei den Endotoxinen die größten Schwankungen. Die gefundenen Konzentrationen spiegeln nicht die Konzentrationen der luftgetragenen Gesamtbakterien wieder. Die vorangegangene Betrachtung der einzelnen Tierarten geschah unabhängig vom eingesetzten Sammelsystem. Um einen etwaigen Einfluss der Probenahme auf die Ergebnisse darzustellen, wurde aufgrund der Menge der verfügbaren Daten die Ergebnisse für Gesamtbakterien und Schimmelpilze für die Tierarten Hühner, Schweine und Rinder abhängig vom Sammelsystem als Box-and-Whiskers-Plot grafisch aufgetragen (Abb. 9).

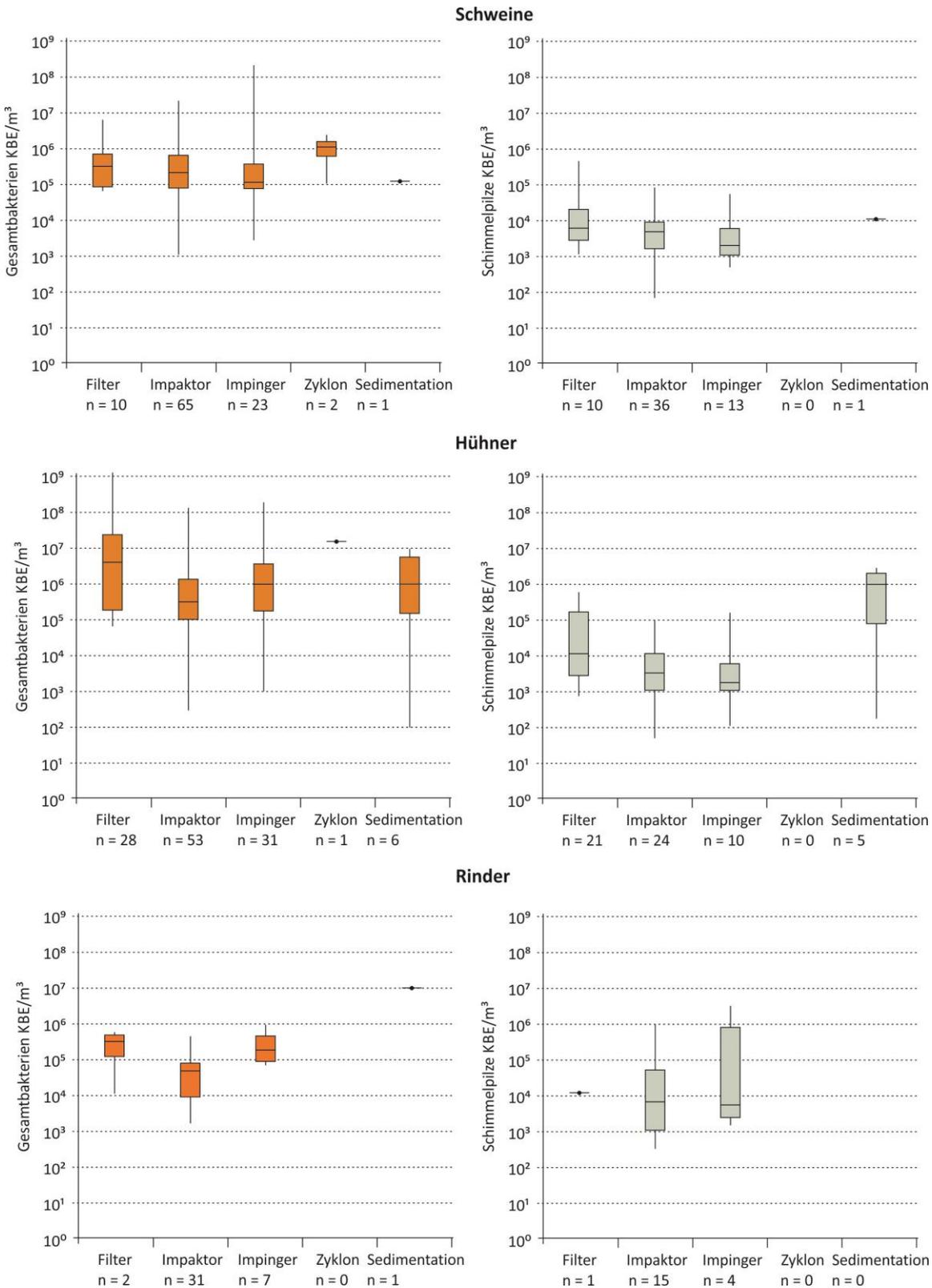


Abb. 9: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur unabhängig von der Haltungform und abhängig vom Sammelverfahren für Schweine, Hühner und Rinder über Kultivierung ermittelten mittleren Konzentrationen von Gesamtbakterien und Gesamtpilzen und die Anzahl der verfügbaren Datensätze.

Die Endotoxine entfallen hier, da sie bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Duchaine et al. 2001) immer auf Filtern gesammelt wurden. Bei Schweinen und Hühnern wurden mit Zyklonen die höchsten Konzentrationen gefunden. Dies spricht für eine hohe biologische und physikalische Sammeleffizienzen der Systeme. Aufgrund der geringen Anzahl der Untersuchungen (Bonifeit et al. 2014, Hartmann et al. 1986, Ahmed et al. 2013) sind hier aber noch weitere Messungen nötig. Zyclone setzten auch Nieguitsila et al. (2011) zur Sammlung von *Aspergillus* (30 KBE/m^3) in Broilerställen in Frankreich ein und Ahmed et al. (2013) für die Detektion von *Campylobacter* in Broilerställen. Letztere konnten jedoch luftgetragen nicht über Kultivierung nachgewiesen werden sondern lediglich über PCR. Bonifeit et al. (2014) fanden mit Hilfe von Zyklonabscheidern bei Mastschweinen in Kanada *Streptococcus suis* in Konzentrationen von $4 \times 10^5 \text{ KBE/m}^3$ bis $1 \times 10^6 \text{ KBE/m}^3$, Otake et al. (2010) in der Luft von Mastschweinställen in den USA PRRSV und *Mycoplasma hyopneumoniae*. O'Brien & Nonnemann (2016) sammelten mit diesem System Schweineinfluenzaviren. Bei den Gesamtbakterien und den Schimmelpilzen wurden bei allen betrachteten Tierarten die zweithöchsten mittleren Konzentrationen mit dem Filtrationsverfahren ermittelt. Dies liegt vermutlich an der hohen physikalischen Sammeleffizienz der Filter. Die nur vereinzelt eingesetzte Sedimentationsmethode ergab zwar rechnerisch noch höhere Werte, eine genaue Quantifizierung ist aber verfahrensbedingt kaum möglich. Mit der Impaktion als dem am häufigsten eingesetzten Verfahren wurden insgesamt geringere Konzentrationen als mit Zyklonabscheidern und Filtern ermittelt. Messungen mit Impingern lieferten die geringsten Konzentrationen, wobei der mittlere Wert bei Hühnern und Rindern für die Gesamtbakterien höher war als bei der Impaktion. Der Vergleich der Werte gestaltet sich jedoch als schwierig, auch aufgrund der sehr unterschiedlichen Ausgangsdaten. Für die Sammlung von Schimmelpilzen scheint jedenfalls das Impingement im Vergleich zu den anderen Verfahren weniger gut geeignet. Vermutlich lassen sich die hydrophoben Pilzsporen nicht ausreichend gut in einer Flüssigkeit abscheiden (Grinshpun et al. 1997). Alles in allem scheinen Zyclonsammler sehr gut zur Sammlung von Bioaerosolen geeignet, sind bisher jedoch nur unzureichend evaluiert.

Aufgrund der Menge der verfügbaren Daten werden im nachfolgenden die verschiedenen Produktionsstufen bei Schweinen, Hühnern und Rindern genauer betrachtet. Bei den Schweinen wurden in der Luft von Sauenhaltungen die geringsten mittleren Konzentrationen von Gesamtbakterien (ca. $1 \times 10^5 \text{ KBE/m}^3$) festgestellt (Abb. 10). Hier wurden ebenfalls die geringsten Konzentrationen an Schimmelpilzen mit $8 \times 10^2 \text{ KBE/m}^3$ (Abb. 11) und Endotoxinen mit $8 \times 10^1 \text{ EU/m}^3$ gefunden (Abb. 12). Bei den Absatzferkeln sind die Konzentrationen von Schimmelpilzen und Endotoxinen mit $7 \times 10^2 \text{ KBE/m}^3$ und $2 \times 10^2 \text{ EU/m}^3$ ebenfalls sehr gering. Die mittlere Gesamtbakterienkonzentration war mit $3 \times 10^5 \text{ KBE/m}^3$ relativ hoch. In der Ferkelaufzucht und bei den Mastschweinen liegt diese jeweils bei $2 \times 10^5 \text{ KBE/m}^3$. Bei den Schimmelpilzen sind die Konzentrationen für die Ferkelaufzucht mit $4 \times 10^3 \text{ KBE/m}^3$ und für die Mastschweine mit $3 \times 10^3 \text{ KBE/m}^3$ relativ ähnlich. Bei den Endotoxinen ist die mittlere Konzentration in der Ferkelaufzucht deutlich höher und liegt mit einer relativ großen Schwankungsbreite bei $1 \times 10^4 \text{ EU/m}^3$. Bei den Mastschweinen liegt sie bei $3 \times 10^3 \text{ EU/m}^3$.

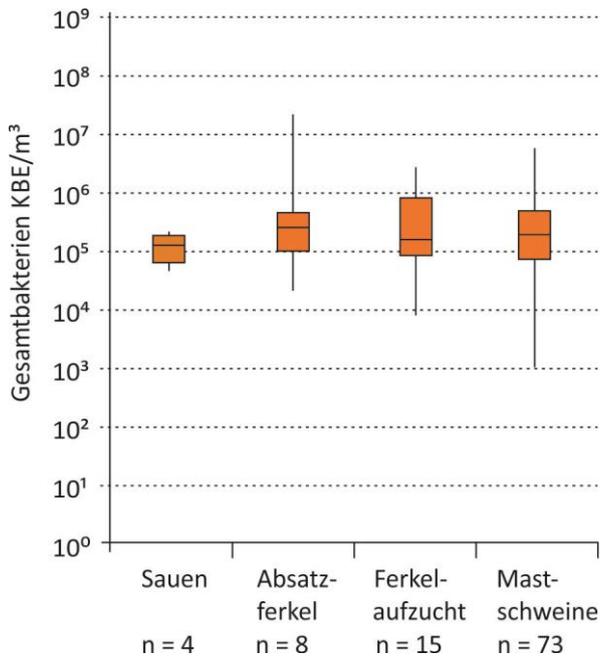


Abb. 10: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur für verschiedene Produktionsstadien für Schweine über Kultivierung ermittelten mittleren Konzentrationen von Gesamtbakterien und Anzahl der eingeflossenen Datensätze. Literatur: Sauen (Spirin & Mikhaïlova 1991, Banhazi et al. 2008a, Chang et al. 2001b, Sächsisches Landesamt 2002), Absatzferkel (Witek 1974, Müller et al. 1976, Fiser 1978, Banhazi et al. 2008a, Chang et al. 2001b, Chang et al. 2001a, Fiser 1978, Spirin & Mikhaïlova 1991), Ferkelaufzucht (Attwood et al. 1987, Banhazi et al. 2002, Chinivasagam & Blackall 2005, Cormier et al. 1990, Hađina et al. 2009, Fiser 1978, Kim et al. 2008, Pavicic et al. 2007, Spirin & Mikhaïlova 1991, Yao et al. 2010, Dutkiewicz et al. 1994, Banhazi et al. 2008a), Mastschweine (Banhazi et al. 2008a, Agranovski et al. 2004, Attwood et al. 1987, Bakutis et al. 2004, Bonifeit et al. 2014, Butera et al. 1991, Chang et al. 2001b, Clark et al. 1983, Clauß n.v., Coggins et al. 2007, Cormier et al. 1990, Curtis et al. 1975a, Donham et al. 1989, Dutkiewicz et al. 1994, Eckhardt 2008, Eliot et al. 1976, Ferguson 2012, Geburek et al. 2005, Gordon 1963, Green et al. 2006, Gutmirtl et al. 2004, Hartmann et al. 1986, Heederik et al. 1991, Hill & Kenworthy 1970, Jo & Kang 2005, Fiser 1978, Müller et al. 1976, Karowska 2005, Kim et al. 2005, Kim et al. 2006, Kim et al. 2007, Ko et al. 2008, Ko et al. 2010, Letourneau et al. 2009, Liu & Ma 2010, Pavicic et al. 2006, Platz et al. 1995, Hojovec et al. 1976, Zucker et al. 2005, Predicala et al. 2001, Predicala et al. 2002, Radon et al. 2002, Rautila et al. 2003, Schulz et al. 2013, Siggers et al. 2011, Sowiak et al. 2011, Szadkowska-Stańczyk et al. 2010, Thorne et al. 1992, Letourneau et al. 2009, Chiba et al. 1987, Zucker et al. 2000)

In der Luft von Schweinehaltungen wurden Vertreter vieler verschiedener Mikroorganismengruppen gefunden, wie z. B. Gram-negative Bakterien (z. B. Rautila et al. 2003, Heederik et al. 1991, Popescu et al. 2010, Dutkiewicz et al. 1994, Cormier et al. 1990), Staphylokokken (z. B. Spirin & Mikhaïlova 1991, Hojovec et al. 1976, Fiser 1978, Spirin & Mikhaïlova 1991, Butera et al. 1991, Eliot et al. 1976, Geburek et al. 2005), MRSA (z. B. Schulz et al. 2012, 2013, Ferguson 2012), Enterokokken (Geburek et al. 2005), hämolytische Kokken (Spirin & Mikhaïlova 1991), Streptokokken (Popescu et al. 2010), Enterobacteriaceae (Spirin & Mikhaïlova 1991, Fiser 1978), Coliforme Bakterien (Green et al. 2006, Yao et al. 2010, Pavicic et al. 2006, 2007), *E. coli* (Yao et al. 2010, Yuan et al. 2010, Eliot et al. 1976, Coggins et al. 2007), Salmonella

(Okraszewska-Lasica et al. 2014, Elliot et al. 1976, Clostridium perfringens (Zucker et al. 2005), thermophile Aktinomyzeten (Dutkiewicz et al. 1994, Letourneau et al. 2009), thermophile Pilze (Rautila et al. 2003, Letourneau et al. 2009), oder Schimmelpilze der Gattungen *Aspergillus*, *Cladosporium* und *Penicillium* (Jo & Kang 2005, Cormier 1990). Des Weiteren fanden Keessen et al. (2011) in Luftproben aus der Ferkelaufzucht in den Niederlanden $6,3 \times 10^2$ KBE/m³ *Clostridium difficile* nach. Nehme et al. (2009) fanden bei Mast Schweinen in Kanada große Mengen Archaeobakterien über PCR. Otake et al. (2010) fanden in der Luft von Mast Schweineställen PRRSV und *Mycoplasma hyopneumoniae* und O'Brien & Nonnemann (2016) Schweineinfluenzaviren.

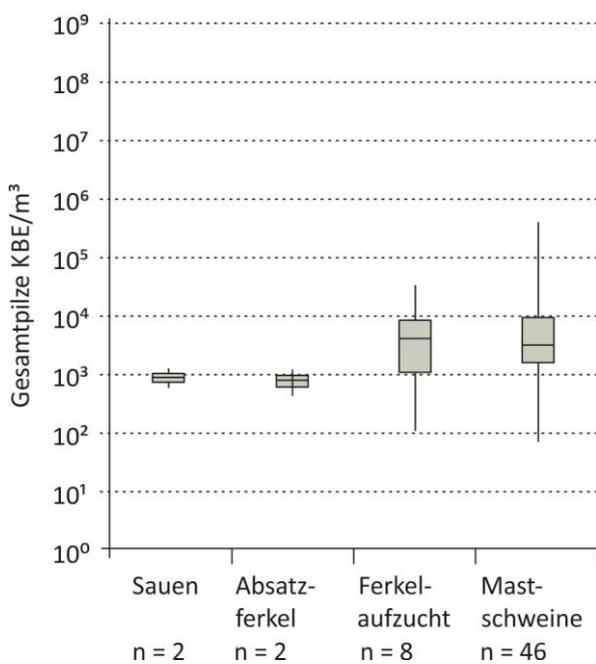


Abb. 11: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur für verschiedene Produktionsstadien für Schweine über Kultivierung ermittelten mittleren Konzentrationen an Gesamtpilzen und Anzahl der eingeflossenen Datensätze. Literatur: Sauen (Spirin & Mikhaïlova 1991, Sächsisches Landesamt 2002), Absatzferkel (Chang et al. 2001b, Spirin & Mikhaïlova 1991), Ferkelaufzucht (Cormier et al. 1990, Kim et al. 2008, Pavicic et al. 2007, Spirin & Mikhaïlova 1991, Dutkiewicz et al. 1994), Mast Schweine (Agranovski et al. 2004, Butera et al. 1991, Clark et al. 1983, Clauß n.v., Coggins et al. 2007, Cormier et al. 1990, Diefenbach et al. 2007, Donham et al. 1989, Dutkiewicz et al. 1994, Geburek et al. 2005, Jo & Kang 2005, Kim et al. 2006, Kim et al. 2007, Ko et al. 2008, Ko et al. 2010, Lee & Liao 2014, Letourneau et al. 2009, Liu & Ma 2010, Pavan & Manjunath 2013, Pavan 2015, Pavicic et al. 2006, Radon et al. 2002, Rautila et al. 2003, Schulz et al. 2013, Siggers et al. 2011, Sowiak et al. 2011, Szadkowska-Stańczyk et al. 2010, Thorne et al. 1992, Wang et al. 2007, Letourneau et al. 2009, Masclaux et al. 2013, Zucker et al. 2000).

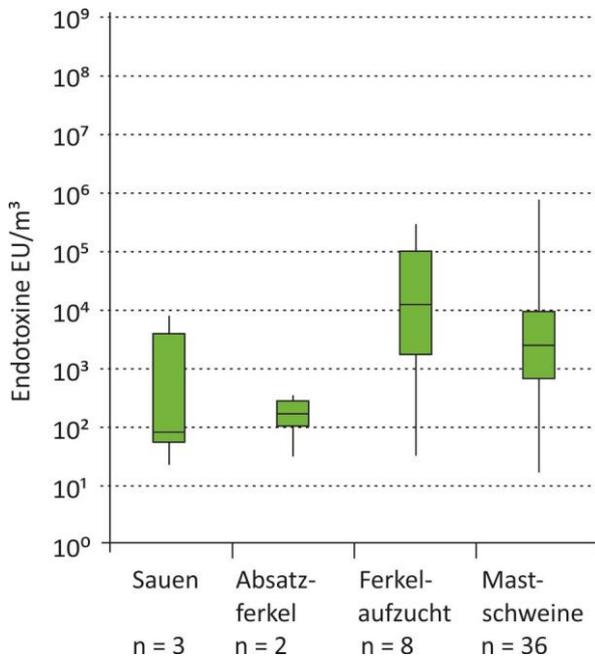


Abb. 12: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur für verschiedene Produktionsstadien für ermittelten mittleren Konzentrationen von Endotoxinen und Anzahl der eingeflossenen Datensätze. Literatur: Sauenhaltung (Seedorf et al. 1998a, Banhazi et al. 2008a, Chang et al. 2001a), Absatzferkel (Banhazi et al. 2008a, Chang et al. 2001a), Ferkelaufzucht (Attwood et al. 1987, Dutkiewicz et al. 1994), Mastschweine (Banhazi et al. 2008a, Attwood et al. 1987, Attwood et al. 1986, Bakutis et al. 2004, Butera et al. 1991, Chang et al. 2001a, Clark et al. 1983, Coggins et al. 2007, Diefenbach et al. 2007, Donham et al. 1989, Dutkiewicz et al. 1994, Geburek et al. 2005, Heederik et al. 1991, Ogink et al. 2016, Ko et al. 2010, Letourneau et al. 2009, Zucker et al. 2005, Pomorska et al. 2007, Radon et al. 2002, Roque et al. 2016, Schirl et al. 2007, Siggers et al. 2011, Szadkowska-Stańczyk et al. 2010, Thorne et al. 2009, Letourneau et al. 2009, Seedorf et al. 1998a, Masclaux et al. 2013).

Bei Hühnern finden sich für Legehennen und Broiler viele Daten zur Konzentration von Bioaerosolen in den Ställen, dagegen sind nur wenige Daten für die Haltung von Elterntieren, für Brütereien und für die Kükenaufzucht verfügbar. Für die Elterntiere wurde lediglich eine Untersuchung aus China gefunden (Hao et al. 2014). Hier lagen die Konzentrationen von Gesamtbakterien bei 2×10^5 KBE/m³ (Abb. 13) und die der Schimmelpilze bei 8×10^3 KBE/m³ (Abb. 14). Endotoxine wurden nicht untersucht. Die Konzentration von Gesamtbakterien in der Luft von Brütereien wurden in Polen untersucht (Brodka et al. 2012, Chmielowiec-Korzeniowska et al. 2007, Dutkiewicz 1978). Diese lagen ebenfalls bei 2×10^5 KBE/m³. Die Endotoxinkonzentrationen in der Luft waren mit 5×10^6 EU/m³ sehr hoch (Chmielowiec-Korzeniowska et al. 2007). In der Kükenaufzucht waren die Konzentration von luftgetragenen Gesamtbakterien mit im Mittel 7×10^2 KBE/m³ sehr niedrig. Für Schimmelpilze wurde lediglich der Wert 1×10^3 KBE/m³ gefunden (Sowiak et al. 2012). Die mittleren Konzentrationen von Gesamtbakterien und Endotoxinen sind bei Legehennen mit 1×10^6 KBE/m³ und 3×10^3 EU/m³ etwas höher als bei Broilern mit 6×10^5 KBE/m³ und 1×10^3 EU/m³. Die mittleren Schimmelpilzkonzentrationen sind dagegen mit 1×10^4 KBE/m³ bei den Broilern etwas höher, im Vergleich zu den Legehennen mit 3×10^3 EU/m³.

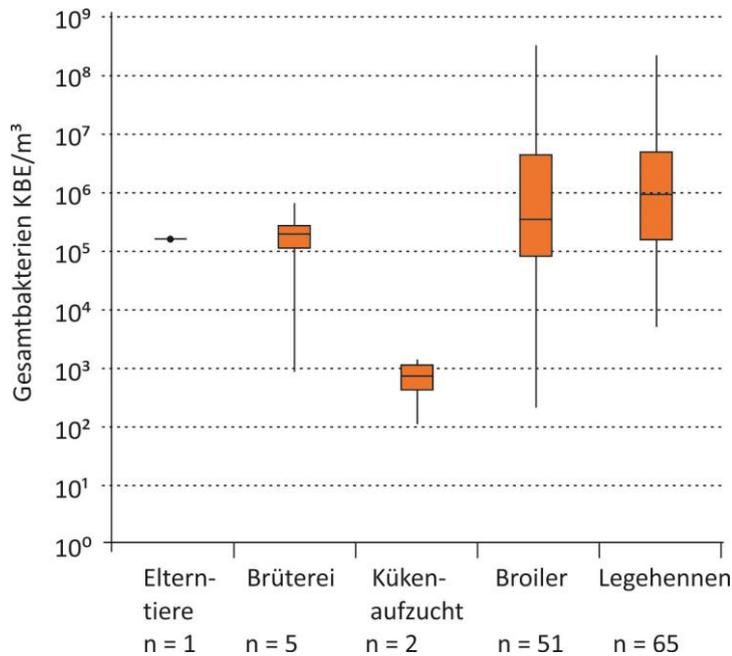


Abb. 13: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur für verschiedene Produktionsstadien für Hühner über Kultivierung ermittelten mittleren Konzentrationen von Gesamtbakterien und Anzahl der eingeflossenen Datensätze. Literatur: Elterntiere (Hao et al. 2014), Brüterei (Brodka et al. 2012, Chmielowiec-Korzeniowska et al. 2007, Dutkiewicz 1978), Kükenaufzucht (Agabou 2009, Sowiak et al. 2012, Berrang et al. 1995, Erman et al. 1989, Gentry et al. 1962), Broiler (Fallschissel 2011, Popescu et al. 2010, Adell et al. 2011a, b, Agranovski et al. 2007, Awad et al. 2010, Baykov & Stoyanov 1999, Brodka et al. 2012, Brooks et al. 2010, Chai et al. 2001a, Chi & Li 2006, Crook et al. 2008, Dutkiewicz 1978, Hahne 2014, Hinz et al. 1994, Jones et al. 1984, Karowska 2005, Kostandinova et al. 2014, Lawniczek-Walczyk et al. 2013, Madelin & Wathes 1989, Mituniewicz et al. 2008, Nielsen & Breum 1995, Madelin & Wathes 1989, Nichita et al. 2010, Petkov & Tsutsumanski 1975a, Radon et al. 2002, Saleh et al. 2005, Schulz et al. 2004, Vucemilo et al. 2006, Vucemilo et al. 2007, Witkowska & Sowińska 2013, Witkowska et al. 2010, Wojcik et al. 2010, Saleh 2006, Jo & Kang 2005, Bakutis et al. 2004, Clark et al. 1983, Singh & Singh 1996), Legehennen (Ahmed et al. 2013, Angersbach-Hegers 2002, Anonymous 2012, Baïkov & Petkov 1986, Bloomberg et al. 2009, Brodka et al. 2012, Chai et al. 2003, Clauß 2015, Crook et al. 2008, Eckhardt 2008, Gärttner 1975, Gebhardt 1973, Sauter et al. 1981, Jellen 1984, Quarles 1969, Kepmann 1970, Knoche 1971, Hilliger 1969, Hu et al. 2014, Hurtienne 1967, Just et al. 2011, Kösters & Müller 1970, Lippmann 2007, Lippmann 2014, Matković et al. 2013, Northcutt et al. 2004, Springorum et al. 2015, Zhao et al. 2016, Zheng et al. 2013, Zucker et al. 2000, Zucker & Müller 2000, Popescu et al. 2013, Schrader et al. 2013, Sarikas 1976, Venter et al. 2004, Woodward et al. 2004, Yao et al. 2007a, b)

In der Luft von Hühnerhaltungen wurden noch Vertreter vieler weiterer Mikroorganismengruppen gefunden, wie anaerobe Bakterien (Sauter et al. 1981), Gram-negative Bakterien (Lippmann 2007, Venter et al. 2004, Clark et al. 1983, Lippmann 2014, Popescu et al. 2013, Brodka et al. 2012, Hinz et al. 1994, Chmielowiec-Korzeniowska et al. 2007), Staphylokokken (z. B. Chai et al. 2001, Witkowska & Sowińska 2013, Popescu et al. 2013,

Chinivasagam et al. 2009, Nonnenmann et al. 2010, Angersbach-Hegers 2002, Saleh 2006, Bloomberg et al. 2009, Agabou 2009, Schulz et al. 2004, Schulz et al. 2011, Springorum et al. 2015, Brooks et al. 2010), *Stahhylococcus aureus* (Zhong et al. 2009, Chai et al. 2003), MRSA (Liu et al. 2012), Enterokokken (Brodka et al. 2012, Bloomberg et al. 2009, Schrader et al. 2013, Springorum et al. 2015, Brooks et al. 2010), hämolytische Kokken (Baïkov & Petkov 1986), Streptokokken (Popescu et al. 2013, Angersbach-Hegers 2002, Chai et al. 2003), Enterobacteriaceae (Witkowska & Sowinska 2013, Angersbach-Hegers 2002, Berang et al. 1995, Whyte et al. 2001), Coliforme (Petkov & Tsutsumanski 1975, Northcutt et al. 2004, Baïkov & Petkov 1986, Kostandinova et al. 2014), *E. coli* (Yao et al. 2007, Chinivasagam et al. 2009, Chai et al. 2003, Whyte et al. 2001, Laube et al. 2014), Salmonella (Duan et al. 2008, Venter et al. 2004, Fallschissel et al. 2009, Chinivasagam et al. 2009a), *Coxiella burnetii* (Søndergaard et al. 2014), Aktinomyzeten (Angersbach-Hegers 2002) und verschiedene Schimmelpilze wie *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium* (Jo & Kang 2005, Sowiak et al. 2012).

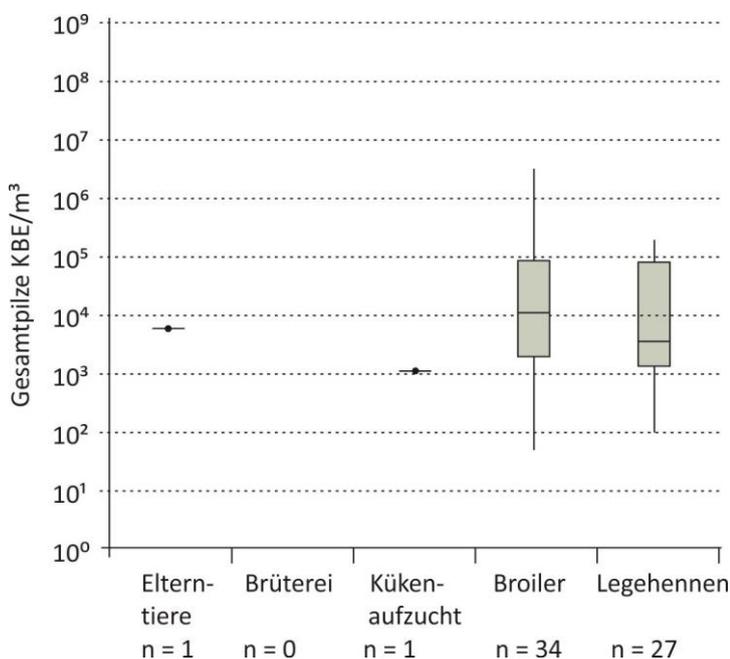


Abb. 14: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur für verschiedene Produktionsstadien für Hühner über Kultivierung ermittelten mittleren Konzentrationen von Gesamtpilzen und Anzahl der eingeflossenen Datensätze. Literatur: Elterntiere (Hao et al. 2014), Kükenaufzucht (Sowiak et al. 2012), Broiler (Popescu et al. 2010, Agranovski et al. 2007, Ajoudanifar et al. 2011, Chai et al. 2007, Crook et al. 2008, Gigli et al. 2005, Hahne 2014, Jones et al. 1984, Lee & Liao 2014, Madelin & Wathes 1989, Mituniewicz et al. 2008, Nonnenmann et al. 2010, Pavan 2015, Madelin & Wathes 1989, Nichita et al. 2010, Petkov & Tsutsumanski 1975a, Radon et al. 2002, Shokri 2016, Vucemilo et al. 2007, Wang et al. 2007, Wojcik et al. 2010, Saleh 2006, Jo & Kang 2005, Clark et al. 1983), Legehennen (Angersbach-Hegers 2002, Baïkov & Petkov 1986, Bloomberg et al. 2009, Crook et al. 2008, Sauter et al. 1981, Hu et al. 2014, Lippmann 2014, Matkovic et al. 2009a, Matković et al. 2013, Northcutt et al. 2004, Springorum et al. 2015, Popescu et al. 2013, Sowiak et al. 2012)

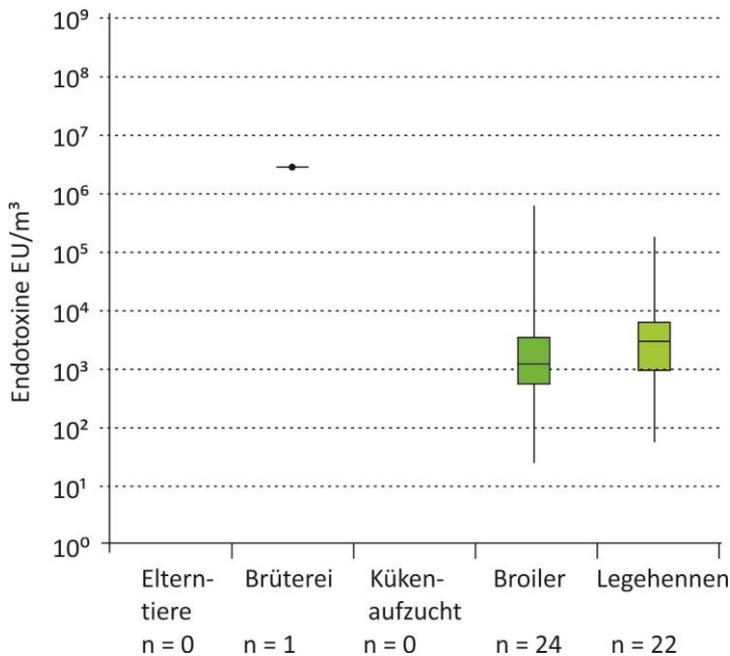
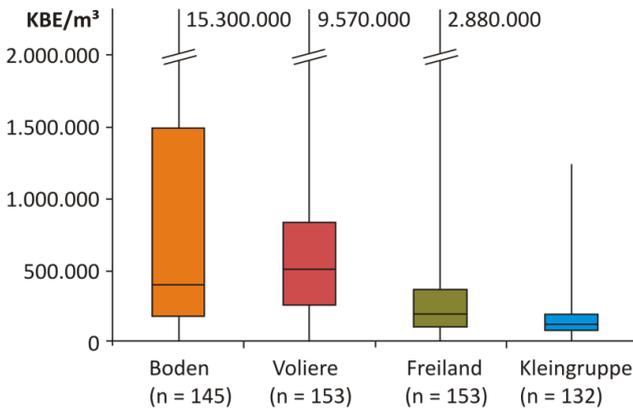


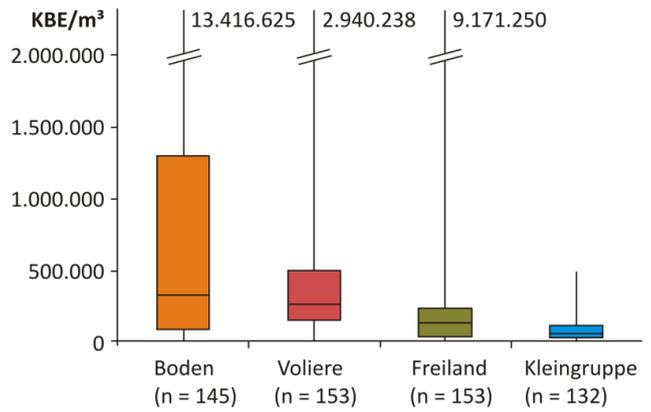
Abb. 15: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur für verschiedene Produktionsstadien für Hühner ermittelten mittleren Konzentrationen von Endotoxine und Anzahl der eingeflossenen Datensätze. Literatur: Brüterei (Chmielowiec-Korzeniowska et al. 2007), Broiler (Brooks et al. 2010, Crook et al. 2008, Hahne 2014, Hinz et al. 1994, Jones et al. 1984, Whates et al. 1997, Ogink et al. 2016, Nielsen & Breum 1995, Nieuwenhuijsen et al. 1999, Pomorska et al. 2007, Radon et al. 2002, Roque et al. 2016, Saleh et al. 2005, Vucemilo et al. 2008, Wiegand et al. 1993, Seedorf et al. 1998a, Bakutis et al. 2004, Clark et al. 1983, Singh & Singh 1996), Legehennen (Angersbachhegers 2002, Anonymous 2012, Crook et al. 2008, Eckhardt 2008, Whates et al. 1997, Ogink et al. 2016, Just et al. 2011, Lippmann 2007, Lippmann 2014, Schirl et al. 2007, Seedorf et al. 1998a)

Für die Legehennen sind nach der Abschaffung der Käfighaltung in Deutschland verschiedene alternative Haltungsformen etabliert worden. Clauß (2014) hat die Bioaerosolkonzentrationen in der Bodenhaltung, der Freilandhaltung, einer Voliere und einer Kleingruppenhaltung ermittelt (Abb 16). Die niedrigsten Konzentrationen fanden sich in der Kleingruppenhaltung, die jedoch in Deutschland mittelfristig abgeschafft werden soll. Danach folgt die Freilandhaltung und als Systeme mit den höchsten Konzentrationen die Volierenhaltung und die Bodenhaltung. Auch andere Autoren kommen auf dieselben Ergebnisse (Nimmermark et al. 2009, Saleh et al. 2006, Kirychuk et al. (2006).

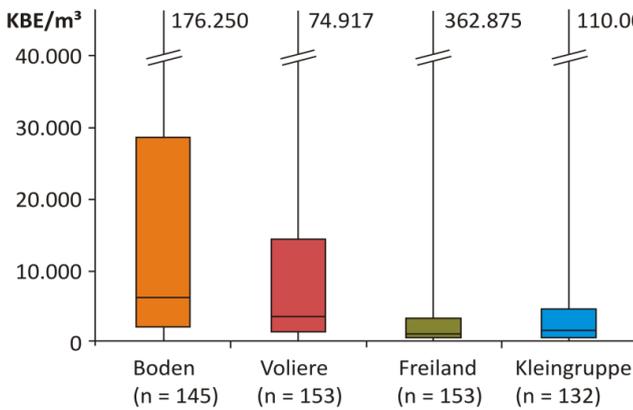
Gesamtbakterien



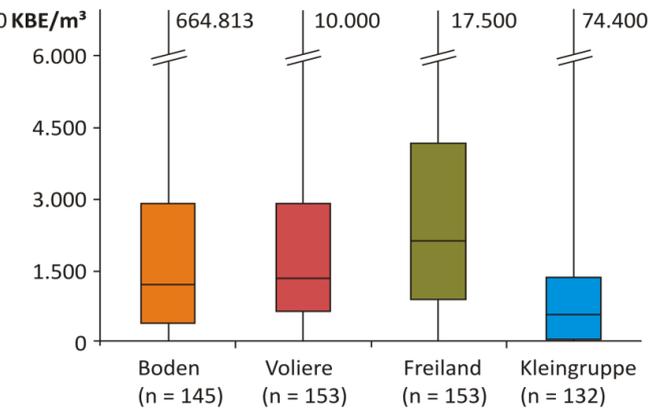
Staphylokokken



Enterokokken



Enterobakterien



Schimmelpilze

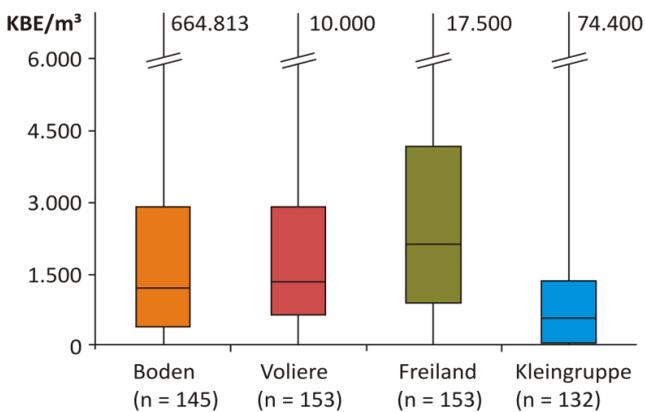


Abb. 16: Box-and-Whiskers-Plots der über Kultivierung ermittelten Konzentrationen von Gesamtbakterien, Staphylokokken, Enterokokken, Enterobakterien und Schimmelpilzen in verschiedenen Systemen der Legehennenhaltung (aus Clauß 2014).

In der Rinderhaltung sind die mittleren Konzentrationen von luftgetragenen Gesamtbakterien bei Kälbern und Milchvieh mit jeweils ca. 5×10^4 KBE/m³ annähernd gleich, bei Mastrindern mit 1×10^5 KBE/m³ jedoch deutlich höher. Bei den Schimmelpilzen sind die mittleren Konzentrationen ebenfalls bei Kälbern und Milchvieh mit 6×10^3 KBE/m³ und 8×10^3 KBE/m³ sehr ähnlich, bei Mastrindern dagegen mit 1×10^3 KBE/m³ deutlich geringer. Die Endotoxinkonzentrationen liegen bei Kälbern, Milchvieh und Mastrindern mit 1×10^2 EU/m³, 2×10^2 EU/m³ und 1×10^2 EU/m³ auf dem gleichen Niveau. Auch in Rinderställen wurden noch viele weitere mikrobiologische

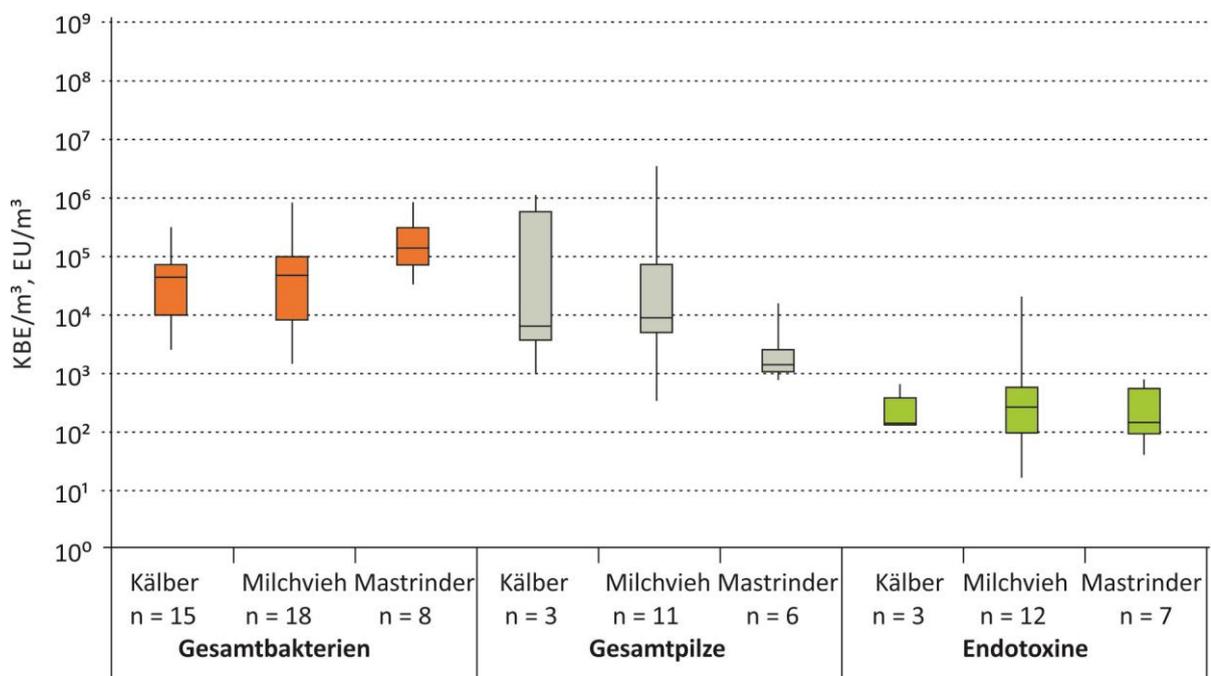


Abb. 17: Box-and-Whiskers-Plots der aus der Literatur für verschiedene Produktionsstadien für Rinder über Kultivierung ermittelten mittleren Konzentrationen an Gesamtbakterien und Gesamtpilzen sowie Endotoxine und Anzahl der eingeflossenen Datensätze. Literatur: Gesamtbakterien Kälber (Zucker et al. 2000, Chai et al. 1997, Wathes et al. 1984, Chai et al. 1999, Blom et al. 1984, Dutkiewicz et al. 1994, Beer 1973, Marschang & Crainiceanu 1971, Steiger & Stellmacher 1977), Gesamtbakterien Milchvieh (Zucker et al. 2000, Samadi et al. 2012, Karowska 2005, Matkovic et al. 2006, Dutkiewicz et al. 1994, Hanhela et al. 1995, Eckhardt 2008, Lang et al. 1997, Duchaine et al. 1999b, Abd-Elall et al. 2009, Matković et al. 2007, Banhazi et al. 2008a), Gesamtbakterien Mastrinder (Clauß n.v., Duan et al. 2013, Bakutis et al. 2004, Abd-Elall et al. 2009, Alvarado et al. 2009, Kullmann et al. 1998), Schimmelpilze Kälber (Blom et al. 1984, Dutkiewicz et al. 1994), Schimmelpilze Milchvieh ((Pavan 2015, Pavan & Manjunath 2014, Karowska 2005, Matkovic et al. 2006, Matkovic et al. 2009a, b, Dutkiewicz et al. 1994, Lang et al. 1997, Duchaine et al. 1999b, Abd-Elall et al. 2009), Schimmelpilze Mastrinder (Adhikari et al. 2004, Wang et al. 2007, Ajoudanifar et al. 2011, Abd-Elall et al. 2009, Alvarado et al. 2009, Kullmann et al. 1998), Endotoxine Kälber (Dutkiewicz et al. 1994, Seedorf et al. 1998a), Endotoxine Milchvieh (Evans 2017, Samadi et al. 2012, Dutkiewicz et al. 1994, Pomorska et al. 2007, Schirl et al. 2007, Duchaine et al. 1999b, Seedorf et al. 1998a, Banhazi et al. 2008a), Endotoxine Mastrinder (Roque et al. 2016, Bakutis et al. 2004, Berger et al. 2005, Schirl et al. 2007, Seedorf et al. 1998a, Kullmann et al. 1998).

Parameter untersucht, wie anaerobe Bakterien (Chai et al. 1997, Chai et al. 1999), Gram-negative Bakterien (Zucker et al. 2000, Dutkiewicz et al. 1994), Staphylokokken (Karowska 2005), *Staphylococcus aureus* (Alvarado et al. 2009), Aktinomyzeten (Dalphin et al. 1991, Dutkiewicz et al. 1994) Schimmelpilze der Gattungen *Aspergillus*, *Cladosporium* und *Penicillium* (Pavan & Manjunath 2014) und Hefen (Kullmann et al. 1998, Lang et al. 1997). Von einigen Autoren sind in Rinderställen die Anzahl von Bakterienzellen bestimmt worden, die zwischen 5×10^4 Zellen/m³ und 1×10^7 Zellen/m³ lagen (Eglite et al. 1989, Erman et al. 1989, Larsson et al. 1988). Dalphin et al. (1991) fanden $5,6 \times 10^1$ KBE/m³ thermophile Aktinomyzeten. Lecours et al. (2012) fand bei Kanadischen Milchkühen bis zu 10^6 Archaen und 10^8 and 10^8 bakterielle 16S rRNA Gene/m³ und *Saccharopolyspora rectivirgula* mit 10^6 16S rRNA Gene/m³ Luft. Okraszewska-Lasica et al. (2014) fanden Salmonella-positive Luftproben bei Rindern in Irland. Chai (1998) untersuchte das Vorkommen von *Clostridium perfringens* bei Rindern.

Neben dem Einfluss der Tierart, der Produktionsstadien, der Haltungsverfahren (Protais et al. 2003) und der Sammelsysteme gibt es weitere Parameter, die einen Einfluss auf die gemessenen Bioaerosolkonzentrationen in Tierställen haben. Generell steigen die Konzentrationen von Bioaerosolen im Stall mit steigendem Tieralter bzw. Tiergewicht. Dies ist besonders gut bei Geflügel nachgewiesen (Madelin & Wathes 1989, Brodka et al. 2012, Vucemilo et al. 2005, 2006, 2007, Opplinger et al. 2008, Sauter et al. 1981, Witkowska et al. 2010, Baykov & Stoianov 1999, Saleh et al. 2005, Lonc & Plewa 2010). Auch das Bakterienspektrum ändert sich in dieser Zeit (Vucemilo et al. 2005, 2006, 2007). Dies ist nicht nur durch das Wachstum der Tiere begründet, sondern auch durch die Anreicherung von Kot-, Einstreu- und Futterresten im Stall. Dies lässt sich besonders gut bei Broilern während der Mast zeigen. Auch bei Enten werden die höchsten Bioaerosolkonzentrationen kurz vor Mastende gefunden (Yu et al. 2016a, b). Die Jahreszeiten haben ebenfalls einen Einfluss (Witkowska et al. 20012, Kumari & Choi 2014). Masclaux et al. (2013) fand mit Hilfe der PCR im Winter in Schweineställen fast doppelt so viele Gesamtbakterien und Staphylokokken als im Sommer, ebenso Wojzic et al. (2010) über Kultivierung. Dagegen fanden Spirin & Mikhaïlova (1991) bei Schweinen generell höhere Bioaerosolkonzentrationen im Sommer. Die meisten Schimmelpilze werden im Herbst gefunden (Sowiak et al. 2012). Dies deckt sich mit dem Verlauf der natürlichen Hintergrundkonzentration für Schimmelpilze (Kolk et al. 2009, Clauß et al. 2013b).

5.2 Emissionen

Publizierte Emissionsfaktoren für luftgetragene Mikroorganismen unterscheiden sich für dieselbe Tierart und Haltungsform teilweise erheblich, ursächlich auch durch unterschiedliche Probenahmebedingungen und verschiedene Methoden zur Bestimmung der Konzentrationen.

Bioaerosole gelangen über die Abluft aus den Stallgebäuden in die Umwelt. Diese Emissionen werden bevorzugt an der Schnittstelle zwischen Stall und Umwelt gemessen. Bei den Ergebnissen solcher Messungen ergibt eine ledigliche Angabe der Konzentration von luftgetragenen Mikroorganismen im Abluftstrom i. d. R. wenig Sinn, da die emittierte Menge an Bioaerosolen auch von Luftvolumenstrom abhängig ist und in diesem Zusammenhang auch von der Zeit. Daher sollten zur Charakterisierung von Emissionen besser spezifische Frachten z. B. in KBE/s oder Emissionsfaktoren genannt werden, welche z. B. die Anzahl Bioaerosole (meist Mikroorganismen) pro Zeiteinheit, bezogen auf den Tierplatz oder die Großvieheinheit angeben. Die Durchführung von Emissionsmessungen erfolgt in Deutschland nach VDI 4257 Blatt 1. So ermittelte Emissionsfaktoren finden sich für die Geflügelhaltung in der VDI 4255 Blatt 3 und für die Schweinehaltung in der VDI 4255 Blatt 4. Diese sollen ein auf das Jahr bezogenes repräsentatives Mittel der Emissionen darstellen und beziehen sich auf Messungen mit dem Emissionsimpinger. Hier ist besonders zu berücksichtigen, dass diese Emissionsfaktoren nur auf Ergebnisse von Messungen stützen, die tagsüber durchgeführt wurden. Nachts werden aber deutlich geringere Emissionen festgestellt (siehe Kapitel 5.3), daher sind die momentan in den aktuellen gültigen VDI-Richtlinien angegebenen Konventionswerte für Emissionsfaktoren als Jahresmittelwerte zu hoch. Gegenüber den bisher geltenden Emissionsfaktoren aus den vorherigen Richtlinien sind sie sogar 2 Zehnerpotenzen über den älteren Werten. Dies liegt allerdings hauptsächlich daran, dass bei den neuen Werten für die Probenahme der Emissionsimpinger eingesetzt wurde, mit dem in der Emission alle Mikroorganismen einzeln erfasst wurden und nicht nur Mikroorganismen-tragende Partikel wie bei den älteren Werten. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Probenahmebedingungen und der ausschließlich tagsüber durchgeführten Messungen erscheinen die neuen höheren Werte plausibel (Clauß & Hinz 2014).

In der Nutztierhaltung sind Quantität und Qualität von Bioaerosol-Emissionen von der Tierart, dem Haltungsverfahren und dem Stallsystem abhängig (Banhazi 2008c). Sie unterliegen ferner großen tages- und jahreszeitlichen Schwankungen, wiederum abhängig von Außentemperatur, Stallmanagement, Tieraktivität, Tialter und Tiermasse. Tabelle 5 zeigt Emissionsfaktoren aus der Literatur für verschiedene Gruppen luftgetragener Mikroorganismen bezogen auf Tierart und Haltungsform. Die meisten Emissionsfaktoren beziehen sich dabei auf mikrobiologische Summenparameter wie Gesamtbakterien oder Gesamtpilze und mittlerweile auch auf die in den VDI-Richtlinien festgelegten stallspezifischen Leitparameter Staphylokokken, Enterokokken und Enterobakterien. Vertreter der letzteren beiden Gruppen können zwar auch als stallspezifisch gelten, sind aber im Vergleich zu Staphylokokken in deutlich geringeren Konzentrationen in der Luft zu finden. Daher sind sie praktisch nicht so gut geeignet, die Emission aus einer Tierhaltungsanlage zu charakterisieren. Die publizierten Emissionsfaktoren aus verschiedenen Veröffentlichungen (Tabelle 5) weichen teilweise erheblich voneinander ab. Dabei sollten diese eigentlich ein auf das Jahr bezogenes, repräsentatives Mittel der Emissionen darstellen, welches spezifisch für die Tierart und die Haltungsform ist. Ein generelle Herausforderung sind diesbezüglich große Unterschiede bei Stallsystemen, Stallmanagement, Hygiene, Tieraktivität, Tialter und Tiermasse. Vor allem für Geflügel zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Haltungsform auf die Höhe der Emissionen. Ebenfalls unterscheiden sich die Ergebnisse für dieselbe Tierart und

Haltungsform erheblich, wenn unterschiedliche Sammelsysteme eingesetzt wurden. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer Standardisierung von Techniken und Methoden zur Probenahme von Bioaerosolen. Dies ist besonders wichtig, wenn es um genehmigungsrelevante Fragestellungen oder um die Rechtsprechung im Zusammenhang mit der Umweltwirkung der Nutztierhaltung geht. Bezüglich des Zeitpunktes der Messung und der Messdauer ist bei allen Tierarten zu berücksichtigen, dass es sowohl saisonale und diurnale Einflüsse auf die Höhe der Emissionen gibt, als auch solche, die in der Haltungsform und dem Stallmanagement begründet liegen. Daher sollten repräsentative Messungen zur Bestimmung von Jahresmittelwerten idealerweise gleichmäßig über das Jahr verteilt, zu allen Jahreszeiten mit mehrfachen Wiederholungen, sowohl tagsüber, als auch nachts, über ausreichend lange Zeiträume und unter Berücksichtigung von haltungsspezifischen Parametern durchgeführt werden. Bisher wurde das sehr unterschiedlich gehandhabt. Es sollte in Zukunft ebenfalls berücksichtigt werden, dass neben den Jahresmittelwerten auch Stundenwerte wichtig sein können, da selbst kurzzeitig höhere Emissionen für manche gesundheitlich relevante Fragestellungen von Bedeutung sein können. So haben eine einmalige kurzzeitig hohe Emission von Schimmelpilzsporen der Art *Aspergillus fumigatus* aus einer Speisepilzfarm zu großen Verlusten von Tieren in einer benachbarten Falkenfarm geführt (Lierz 2017).

Tab. 5: Emissionsfaktoren mikrobiologischer Parameter für verschiedene Tierarten und Haltungsformen aus der Literatur und die deren Ermittlung eingesetzten Sammelsysteme. Zur Vereinheitlichung wurde bei ursprünglichem Bezug auf Tierplatz (TP) mit dem für die Tierart angegebenen Faktoren (aus GV-Schlüssel KTBL) in Großvieheinheit (GV) umgerechnet.

Tierart	Land	Haltungsform	Ergebnis	Sammler	Referenz
Hühner					
Junghennen (0,0014)	D	Volierenhaltung	Staphylokokken: $1,4 \times 10^6$ KBE/GV*s Enterokokken: $1,4 \times 10^4$ KBE/GV*s	Emissions-impinger	VDI 4255 Blatt 3
	D	Volierenhaltung, Kotband, 80.000 TP	Geambakterien: $1,6 \times 10^6$ KBE/(GV*s) Schimmelpilze: „i. d. R. sehr gering“ Endotoxine (PM ₁₀): $1,7 \times 10^2$ EU/(GV*s)	Emissions-impinger, Impaktor	Bayrisches Landesamt 2011
Broiler (0,0015)	D	Bodenhaltung	Staphylokokken: $4,7 \times 10^6$ KBE/GV*s Enterokokken: $1,3 \times 10^4$ KBE/GV*s	Emissions-impinger	VDI 4255 Blatt 3
	D	27.000 Tiere	Gesambakterien: $5,9 \times 10^6$ KBE/GV*s Staphylokokken: $3,6 \times 10^6$ KBE/GV*s Schimmelpilze: $4,6 \times 10^4$ KBE/GV*s Gesamtzellzahl: $3,2 \times 10^8$ Zellen/GV*s	Emissions-impinger	Gärtner et al. 2009
	D	41.400	Gesambakterien: $4,8 \times 10^6$ KBE/GV*s Staphylokokken: $2,4 \times 10^6$ KBE/GV*s Schimmelpilze: $5,6 \times 10^4$ KBE/GV*s Gesamtzellzahl: $2,2 \times 10^8$ Zellen/GV*s	Emissions-impinger	Gärtner et al. 2011
	D	k. a.	Gesambakterien: $5,7 \times 10^6$ KBE/GV*s Staphylokokken: $2,3 \times 10^6$ KBE/GV*s Enterokokken: $1,6 \times 10^4$ KBE/GV*s Schimmelpilze: $4,8 \times 10^3$ KBE/GV*s Gesamtzellzahl: $7,8 \times 10^7$ Zellen/GV*s	Emissions-impinger	Gärtner et al. 2011

Fortsetzung Hühner Broiler (0,0015)	D	Bodenhaltung, 39.500 TP	Gesamtbakterien: $3,5 \times 10^6$ KBE/GV*s bis $3,7 \times 10^7$ KBE/GV*s Staphylokokken: $2,5 \times 10^6$ KBE/GV*s bis $1,9 \times 10^7$ KBE/GV*s Enterokokken: $9,8 \times 10^2$ KBE/GV*s bis $1,0 \times 10^4$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	Bayrisches Landesamt 2015a
	D	k. a.	Gesamtbakterien: $8,4 \times 10^6$ KBE/GV*s Staphylokokken: $6,2 \times 10^6$ KBE/GV*s Enterokokken: $2,2 \times 10^4$ KBE/GV*s Schimmelpilze: $3,6 \times 10^4$ KBE/GV*s Gesamtzellzahl: $6,7 \times 10^7$ Zellen/GV*s	Emissions- impinger	Gärtner et al. 2011
	D	Zwangsbelüftete Hähnchenmast- ställe (n = 8)	Gesamtzellzahl: 6×10^6 Zellen/GV*s bis 8×10^7 Zellen/GV*s	Emissions- impinger	Gärtner et al. 2014
	D		Staphylokokken: 8×10^2 KBE/GV*s	AGI-30	Schulz 2007
	D	8 Broilerställe	Gesamtbakterien: 1×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 2×10^1 KBE/sGV*s Enterobakterien: 6×10^1 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	D	8 Broilerställe	Gesamtbakterien: 1×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 2×10^1 KBE/GV*s Enterobakterien: 8×10^1 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a
	NL	2 Broilerställe, 44500, 13500 TP	Endotoxine: $7,8 \times 10^2$ EU/GV*s Nachts deutlich geringere Werte	Filter	Ogink et al. 2016
AUS	Tunnel- ventilierte Ställe	Gesamtbakterien: max. 3×10^5 KBE/s Schimmelpilze: max.: $5,3 \times 10^4$ KBE/s	AGI-30 und Andersen Impaktor	Agranovski et al. 2007	
Legehennen (0,0034)	D	Volierenhaltung	Staphylokokken: $5,9 \times 10^6$ KBE/GV*s Enterokokken: $8,8 \times 10^3$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	VDI 4255 Blatt 3
	D	Bodenhaltung	Staphylokokken: $9,7 \times 10^5$ KBE/GV*s Enterokokken: $5,9 \times 10^4$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	VDI 4255 Blatt 3
	GB	Käfighaltung	Endotoxine: $1,4 \times 10^2$ EU/GV*s	Filter	Whates et al. 1997
	D	Kleingruppe 8600	Gesamtbakterien: $6,4 \times 10^4$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	Lippmann 2014
	D	Kleingruppe 31000	Gesamtbakterien: $3,1 \times 10^6$ KBE/GV*s Endotoxinen $4,5 \times 10^2$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	Lippmann 2014
	D	Voliere 8000	Gesamtbakterien: $4,1 \times 10^7$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	Lippmann 2014
	D	Voliere 20000	Gesamtbakterien: $2,3 \times 10^5$ KBE/GV*s Endotoxinen $1,9 \times 10^3$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	Lippmann 2014
D	15.000, Voliere	Gesamtbakterien: $8,0 \times 10^5$ KBE/GV*s Staphylokokken: $9,7 \times 10^5$ KBE/GV*s Schimmelpilze: $2,1 \times 10^3$ KBE/GV*s Endotoxine: $4,3 \times 10^2$ EU/GV*s	Emissions- impinger	Lippmann et al. 2016	

Fortsetzung Legehennen (0,0034)	D	8 Ställe	Gesambakterien: 1×10^1 KBE/GV*s Schimmelpilze: 9×10^{-1} KBE/GV*s Enterobakterien: 9×10^0 KBE/GV*s	automatischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	D	8 Ställe	Gesambakterien: 8×10^0 KBE/GV*s Schimmelpilze: 3×10^0 KBE/GV*s Enterobakterien: 3×10^{-1} KBE/GV*s	automatischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a
	D	Kleingruppen- haltung / Kot- bandbelüftung, 390.000 TP	Gesambakterien: $1,4 \times 10^5$ KBE/GV*s Schimmelpilze: „i. d. R. sehr gering“ Endotoxine (PM ₁₀): $8,6 \times 10^1$ EU/GV*s	Emissions- impinger, Impaktor	Bayrisches Landesamt 2011
	D	20.000, Voliere	Gesambakterien: $4,3 \times 10^6$ KBE/GV*s Staphylokokken: $3,9 \times 10^6$ KBE/GV*s Schimmelpilze: $3,2 \times 10^3$ KBE/GV*s Endotoxine: $1,6 \times 10^3$ EU/GV*s	Emissions- impinger	Lippmann et al. 2016
	GB	Bei allen dreien auch Emission	Endotoxine: $6,9 \times 10^2$ EU/GV*s	Filter	Whates et al. 1997
	GB	Käfig	Endotoxine: $8,3 \times 10^1$ EU/GV*s Endotoxine: 30 µg/h*GV	Filter	Whates et al. 1997
	NL	2 Ställe, 12125, 17460 TP	Endotoxine: $2,3 \times 10^3$ KBE/GV*s Nachts deutlich geringere Werte	Filter	Ogink et al. 2016
	USA	Käfighaltung	Gesambakterien: $5,6 \times 10^3$ KBE/GV*s	Agi-30	Zhao et al. 2016
	USA	Volierenhaltung	Gesambakterien: $1,1 \times 10^5$ KBE/GV*s	Agi-30	Zhao et al. 2016
	USA	Ausgestalteter Käfig	Gesambakterien: $5,6 \times 10^3$ KBE/GV*s	Agi-30	Zhao et al. 2016
Puten (0,0125)	D	Bodenhaltung, 1.700 TP	Gesambakterien: $7,8 \times 10^5$ KBE/GV*s Staphylokokken: $4,7 \times 10^5$ KBE/GV*s Schimmelpilze: $8,7 \times 10^3$ KBE/GV*s Endotoxine: $1,0 \times 10^3$ EU/GV*s	Emissions- impinger	Lippmann et al. 2016
Schweine					
Sauen (0,3)	D	16 Ställe	Gesambakterien: 4×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 3×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 8×10^1 KBE/GV*s	automatischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a
	D	16 Ställe	Gesambakterien: 5×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 2×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 2×10^1 KBE/GV*s	automatischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	AUS		Gesambakterien 4×10^3 KBE/GV*s	Andersen Impaktor	Banhazi 2012
Absatzferkel (0,03)	D	Voll-/Teilspalten- boden in Gruppenhaltung, 1400 Ferkel	Gesambakterien: $7,8 \times 10^2$ KBE/GV*s Schimmelpilze: „i. d. R. sehr gering“ Endotoxine (PM ₁₀): $2,8 \times 10^1$ EU/GV*s	Emissions- impinger, Filter	Bayrisches Landesamt 2011

Fortsetzung Absatzferkel (0,03)	D	16 Ställe	Gesamtbakterien: 6×10^2 KBE/GV*s Schimmelpilze: 2×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 2×10^0 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	D	Flüssigmist- verfahren	Staphylokokken: $6,7 \times 10^2$ KBE/GV*s Enterokokken: $6,7 \times 10^1$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	VDI 4255 Blatt 4
	D	8 Ställe	Gesamtbakterien: 1×10^2 KBE/GV*s Schimmelpilze: 5×10^0 KBE/GV*s Enterobakterien: 6×10^1 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a
Mast- schweine (0,15)	AUS		Gesamtbakterien: 4×10^3 KBE/GV*s	Andersen Sammler	Banhazi 2012
	D	Flüssigmist- verfahren	Staphylokokken: $2,0 \times 10^4$ KBE/GV*s Enterokokken: $2,0 \times 10^3$ KBE/GV*s	Emissions- impinger	VDI 4255 Blatt 4
	D	8 Ställe	Gesamtbakterien: 2×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 7×10^1 KBE/GV*s Enterobakterien: 3×10^2 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a
	D	Vollspalten- boden, dreistufige Abluftreinigungs- anlage	Reingas: Gesamtbakterien: 1×10^2 KBE/GV*s Schimmelpilze: 2×10^0 KBE/GV*s Staphylokokken: 2×10^1 KBE/GV*s Enterokokken: 2×10^0 KBE/GV*s Rohgas: 1 Zehnerpotenz höher	AGI-30	Anonymous 2013a
	D	Vollspaltenboden dreistufige Abluftreinigungs- anlage	Reingas: Gesamtbakterien: 4×10^1 KBE/GV*s Schimmelpilze: 2×10^0 KBE/GV*s Staphylokokken: 2×10^1 KBE/GV*s Enterokokken: 2×10^0 KBE/GV*s Rohgas: 1 Zehnerpotenz höher	AGI-30	Anonymous 2013a
	D	Untersuchung an Biofilter	Gesamtbakterien: 6×10^1 KBE/GV*s Staphylokokken: 3×10^0 KBE/GV*s Enterokokken: 4×10^0 KBE/GV*s	Filter	Geburek et al. 2005
	D	8 Ställe	Gesamtbakterien: 1×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 3×10^1 KBE/GV*s Enterobakterien: 6×10^1 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	NL		Endotoxine: $3,9 \times 10^2$ KBE/GV*s Nachts deutlich geringere Werte	Filter	Ogink et al. 2016
	AUS	Auf Stroh	Gesamtbakterien 2×10^4 KBE/GV*s	Andersen Impaktor	Banhazi 2012
	AUS	Vollspaltenboden	Gesamtbakterien: 2×10^3 KBE/GV*s	Andersen Impaktor	Banhazi 2012
ROK	15 Ställe	Gesamtbakterien: 0,015 KBE/GV*s Schimmelpilze: 0,009 KBE/GV*s	Andersen Impaktor	Kim et al. 2007, Kim et al. 2008	

Rinder					
Mutterkühe (1,2)	D	Spaltenboden, Flüssigmist, tägliche Boden- reinigung, 22/60	Gesamtbakterien: $3,3 \times 10^2$ KBE/GV*s Schimmelpilze: „i. d. R. sehr gering“ Endotoxine (PM ₁₀): $1,3 \times 10^0$ EU/GV*s	Emissions- impinger, Impaktor	Bayrisches Landesamt 2011
Kälber (0,3)	D	16 Ställe	Gesamtbakterien: 6×10^2 KBE/GV*s Schimmelpilze: 2×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 2×10^0 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	D	16 Ställe	Gesamtbakterien: 2×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 3×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 1×10^2 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a
Milchkühe (1,2)	D	8 Ställe	Gesamtbakterien: 6×10^2 KBE/GV*s Schimmelpilze: 4×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 3×10^0 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	D	8 Ställe	Gesamtbakterien: 2×10^3 KBE/GV*s Schimmelpilze: 3×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 7×10^2 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a
Mastbullen (0,7)	D	10 Ställe	Gesamtbakterien: 5×10^2 KBE/GV*s Schimmelpilze: 1×10^2 KBE/GV*s Enterobakterien: 2×10^0 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf 2004
	D	10 Ställe	Gesamtbakterien: 6×10^2 KBE/GV*s Schimmelpilze: 1×10^4 KBE/GV*s Enterobakterien: 2×10^2 KBE/GV*s	automa- tischer Schlitz- impaktor	Seedorf et al. 1998a

5.3 Tagesgänge

Die Unterschiede der Bioaerosolkonzentration zwischen Tag und Nacht können in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung im Stall abhängig von der Tierart bis zu eine Zehnerpotenz betragen, die von Emissionsfaktoren sogar bis zu 3 Zehnerpotenzen, was in Zukunft unbedingt bei der Berechnung von Jahresmittelwerten bzw. von Emissionsfaktoren berücksichtigt werden muss.

Die Konzentrationen von Bioaerosolen an einem Messort können stark variieren. Clauß et al. (2012) ermittelten die Höhe der Konzentrationsänderungen von Bakterien und Schimmelpilzsporen an verschiedenen Orten in der Außenluft sowie der Einfluss dieser Änderungen auf die Ergebnisse verschiedener Probenahmeverfahren (Filter, Impinger, Coriolis@-Sammler, Impaktor, Bioaerosolspektrometer). Innerhalb einer Stunde schwankten die

gefundenen Konzentrationen für Bakterien um teilweise mehr als drei Zehnerpotenzen, die der Schimmelpilze dagegen maximal um den Faktor 3. Dies ist primär darin begründet, dass Bakterien als Aggregate vorliegen und Schimmelpilze eher vereinzelt (Kapitel (5.4.2)). So kann ein einzelnes Bioaerosolpartikel tausende Bakterienzellen enthalten. Gelangt ein solches Partikel z. B. in einen Impinger, in dem ansonsten nur kleine Aggregaten mit wenigen Zellen gesammelt wurden, hat das einen großen Einfluss auf die Höhe der ermittelten Konzentrationen. Wird ein solches Partikel dagegen mit einem Impaktor auf eine Nährbodenplatte gesammelt, bildet sich an dieser Stelle nur eine Kolonie und das Ergebnis wird kaum beeinflusst. Auch die zeitliche Auflösung spielt dabei eine Rolle. Zum Beispiel können auch bei niedrigen Konzentrationen luftgetragener Mikroorganismen mit dem Andersen-Sammler minütlich Werte generiert werden, da längere Probenahmezeiten dazu führen würden, dass die Nährbodenplatten mit zu vielen Kolonien belegt und damit nicht mehr auszuzählen wären. Im Vergleich dazu wären mit dem AGI-30 Impinger aufgrund des geringeren Luftdurchflusses durch das Probenahmesystem längere Sammelzeiten von z. B. einer halben Stunde nötig, so dass es sich folglich bei dem Ergebnis um einen halbstunden-Mittelwert handeln würde.

Neben den kurzzeitigen Konzentrationsschwankungen werden auch große Unterschiede von z. B. einer Zehnerpotenz zwischen Tag und Nacht gefunden (Clauß 2015). Trotzdem wurden weltweit fast alle Untersuchungen zu Bioaerosolen ausschließlich tagsüber durchgeführt (Clauß & Springorum 2017). Bezüglich der nächtlichen Bioaerosolkonzentrationen gibt es somit große Wissensdefizite, auch für den Bereich der Nutztierhaltung. Besonders in Tierställen kommen sehr viele Mikroorganismen vor und bedingt durch die Aktivität der Tiere gelangen vor allem Bioaerosolaggregate in großer Zahl in die Luft (Clauß et al. 2011, a, b). Ruhen die Tiere, z. B. nachts, sinken die Konzentrationen im Stall deutlich. Dies ist auch abhängig von der Tierart. Am Thünen-Institut für Agrartechnologie wurde in verschiedenen Tierhaltungen mit einem automatischen Bioaerosolsammler (Clauß 2015b) über 48 h kontinuierlich die Konzentration von luftgetragenen Bakterien gemessen (Clauß, in Vorbereitung). Dabei kam heraus, dass in Hühnerställen die Konzentrationen nachts um eine Zehnerpotenz unter den Tageskonzentrationen liegen. Bei Ziegen ist es der Faktor 5, bei Rindern der Faktor 3 und bei Schweinen sind die Nachtkonzentrationen um den Faktor 2 niedriger. Dies hat auch deutliche Auswirkungen auf die Emission. So ergaben erste Messungen des Thünen-Instituts für Agrartechnologie im Rahmen eines vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie geförderten Projektes, in der Emission von Geflügelställen nachts drei Zehnerpotenzen niedrigere Emissionsfaktoren für luftgetragene Bakterien als tagsüber (Clauß, in Vorbereitung). Auch in den Niederlanden wurde für andere Bioaerosolkomponenten wie Endotoxine, nachts deutlich geringere Konzentrationen in Tierställen festgestellt (Ogink et al. 2016). In Großbritannien reduzierten sich die Konzentrationen nachts um die Hälfte (Whates et al. (1997).

Die deutlich geringeren Bioaerosolkonzentrationen in der Nacht die in der Emission zusammen mit den niedrigeren Luftraten zu geringeren Emissionsfrachten führen, müssen zukünftig unbedingt bei der Berechnung eines Jahresmittelwertes für Emissionsfaktoren berücksichtigt werden.

5.4 Transmission

Bei der Transmission, also dem Transport über die Luft, wird die mögliche Ausbreitungsentfernung luftgetragener Mikroorganismen maßgeblich von der Tenazität („Zähigkeit“), also die Fähigkeit den luftgetragenen Zustand zu Überleben und der Partikelgröße bestimmt.

Nachdem die Bioaerosole aus den Stallgebäuden emittiert sind, transmittieren diese über den Luftweg. Dabei sind sie ungeschützt Wind und Wetter ausgesetzt, so dass viele Bioaerosolbestandteile relativ schnell sedimentieren, vom Regen weggespült oder durch Austrocknung und Sonneneinstrahlung inaktiviert werden. Die möglichen Ausbreitungsentfernungen können abhängig vom Bioaerosol ziemlich unterschiedlich sein (Bovallius et al. 1978). Zum Beispiel gelang im Jahr 1981 das MKS-Virus hunderte Kilometer über den Luftweg von Frankreich nach Südengland und führte dort zum Ausbruch der Maul- und Klauenseuche (Donaldson et al. 1982). Im Gegensatz dazu fanden Davies & Morishita (2005) in einem Salmonellen-positiven Legehennenstall in mehr als 20 m Entfernung keine kultivierbaren Erreger mehr in der Luft. Die Ergebnisse sind auch abhängig von der Nachweismethode. So fanden Yuan et al. (2010) bei Schweinen und Duan & Chai (2008) sowie Duan et al. (2008) bei Hühnern mit molekularbiologischen Methoden auch noch in 200 m Entfernung von den Ställen luftgetragene Salmonellen, nachweislich aus dem Kot der Tiere. Zhong et al. (2008) wiesen ebenfalls molekularbiologisch *S. aureus* in 400 m Entfernung von einem Hühnerstall nach. Bei der Transmission luftgetragener Mikroorganismen wird die mögliche Ausbreitungsentfernung maßgeblich von der Tenazität („Zähigkeit“) bestimmt, also die Fähigkeit den luftgetragenen Zustand zu Überleben, sowie von der Partikelgröße des Bioaerosols, die u. a. bestimmt, wie schnell die Mikroorganismen sedimentieren.

5.4.1 Tenazität

Wie lange Bakterien in der Luft lebensfähig sind wird maßgeblich von deren Tenazität bestimmt, die von vielen Faktoren abhängig, und bisher aufgrund der eingesetzten Testsysteme nur unzureichend untersucht ist.

Schimmelpilze verbreiten sich meist über die Luft. Ihre Sporen sind daran angepasst, luftgetragen auch über längere Strecken hinweg nicht ihre Keimfähigkeit zu verlieren. Bei Bakterien gehört die Luft nicht zum natürlichen Lebensraum. Wie lange Bakterien in der Luft lebensfähig sind und damit über die klassischen kulturbasierten Verfahren nachweisbar, hängt maßgeblich von ihrer Tenazität („Zähigkeit“) ab. Diese beschreibt die Fähigkeit eines Mikroorganismus' auch unter nicht optimalen Bedingungen, z. B. außerhalb seines gewohnten Habitats, zu überleben (Rolle & Mayr 2002). Die Tenazität von Bakterien ist nur für wenige Arten einigermaßen bekannt. Zum Beispiel

blieb *Mycoplasma hyopneumoniae* aus einem Schweinestall über eine Strecke von 4,7 km Entfernung infektiös (Dee et al. 2010). Legionellen können ebenfalls über mehrere km verbreitet werden (Nygård et al. 2008).

Einen aktuellen Überblick zur Tenazität von Mikroorganismen geben Springorum & Clauß (2016). Die Tenazität von verschiedenen Bakterienarten und sogar von Stämmen und Isolaten innerhalb derselben Art kann ganz unterschiedlich sein (Cox 1966, Müller et al. 1981, Hatch & Wolocho 1969). Auch unterscheiden sich innerhalb einer Art die Tenazitäten von vegetativen Formen und Dauerformen (z. B. Sporen). So können Bakteriensporen der Gattung *Bacillus* im Gegensatz zu deren vegetativen Formen sogar extremen Weltraumbedingungen über längere Zeit standhalten (Nicholson et al. 2000). In der Literatur werden zudem häufig widersprüchliche Angaben für die Tenazität einzelner Spezies angeführt (Müller et al. 1981). Allgemein scheinen jedoch Gram-positive Bakterien generell resistenter als Gram-negative zu sein (Müller et al. 1981). Daneben beeinflussen viele weitere Faktoren die Tenazität von Bakterien (Mitscherlich & Marth 1984), wie z. B. die vorhergegangenen Kultivierungs- oder Wachstumsbedingungen, die Herstellung eines Bioaerosols (Stersky et al. 1972, Marthi et al 1990, Dunklin & Puck 1948, Cox & Goldberg 1972, Dark & Collow 1973, Hess 1965, Müller & Dinter 1986, Hatch & Wolocho 1969), Methode bzw. Art der Aerosolisierung (Cox 1966, Cox 1976, Dimmick 1960, Marthi et al 1990, Heidelberg et al. 1997), Temperatur (Marthi et al 1990, Kethley et al. 1957, Ehrlich et al. 1970a, Ehrlich & Miller 1973, Ehrlich et al. 1970b, Dinter & Müller 1984, Wright et al. 1969, Harrison et al. 2005), Luftfeuchtigkeit (Won & Ross 1966, Williamson & Gotaas 1942, Wells & Zappasoid 1942, Goldberg et al. 1958, Ehrlich et al. 1970b, Dinter & Müller 1984, Dimmick 1960, Anderson 1966, Cox 1976, Wells & Wells 1936, Dunklin & Puck 1948, Wathes et al. 1986, Wright et al. 1968, Müller & Gröning 1981, Müller et al. 1981), UV-Strahlung (Ko et al. 2000, Kundsinn 1968, Chi & Li 2007), Schadgasgehalt (auch Sauerstoff) (Wells & Zappasoid 1942, Cox 1976, Hess 1965, Lighthart 1973, Müller et al. 1981) oder auch die eingesetzte Sammeltechnik (Cox 1966, Wathes et al. 1986, Henningson & Ahlberg 1994) und die anschließende Lagerung und Aufarbeitung der Proben (Won & Ross 1966, Cox 1976). Den größten Einfluss auf die Bakterien in der Luft haben nach derzeitigen Kenntnissen die meteorologischen Faktoren Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Global- bzw. UV-Strahlung (Beebe 1959, Xue & Nicholson 1996, Kaplan 1955, Riley & Kaufmann 1972), sowie die Konzentrationen bestimmter biozider Substanzen in der Luft, wie freie Radikale, Ozon und Ozon-Olefin-Reaktionsprodukte. Diese werden zusammenfassend auch als „Open Air Factor“ (OAF) bezeichnet (Druett & May 1968, Druett & May 1969, Hood 1971, Dark & Nash 1970). Alle Faktoren beeinflussen sich nicht nur physikalisch gegenseitig, auch deren Auswirkungen in den Bakterienzellen hängen voneinander ab. Die genauen Zusammenhänge sind kompliziert und die Effekte auf verschiedene Mikroorganismengruppen können ganz unterschiedlich sein (Lighthart 1973, Mitscherlich & Marth 1984, Tang 2009).

In der Außenluft werden die meisten kultivierbaren Bakterien bei Temperaturen zwischen 8 °C und 24°C nachgewiesen (Rüden et al. 1978). Generell steigt die Absterberate mit steigenden Temperaturen an (Ehrlich et al. 1970a, Wright et al. 1969, Müller & Gröning 1981, Tang 2009). Das Überleben bei verschiedenen Temperaturen ist zudem abhängig von der relativen

Luftfeuchtigkeit (Wathes et al. 1986, Wright et al. 1968, Müller & Gröning 1981, Müller et al. 1981). Zum Beispiel beträgt die mittlere Überlebensrate für *Escherichia coli* bei 50 % rel. Luftfeuchtigkeit und einer Temperatur von 15 °C ca. 14 Minuten, bei 30 °C dagegen nur 3 Minuten. Bei 85 % rel. Luftfeuchtigkeit sind es bei 15 °C 83 Minuten und bei 30 °C 14 Minuten (Whates et al. 1986). Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf Bakterien im luftgetragenen Zustand ist komplexer als der der Temperatur und auch sehr stark abhängig von der Spezies (Tang 2009). Allgemein gelten aber sehr hohe und sehr niedrige Luftfeuchten (< 20 %, > 85 %) als die Lebensfähigkeit verringernd (Müller & Gröning 1981, Müller et al. 1981). Eine starke Veränderung der Luftfeuchtigkeit während des luftgetragenen Zustands führt ebenfalls zu einer Verringerung der Lebensfähigkeit (DeOme 1944, Hatch & Dimmick 1966, Hatch et al. 1970). Der Einfluss von UV-Strahlung auf luftgetragene Mikroorganismen hängt stark vom Wassergehalt der Zellen während der Bestrahlung ab (Kaplan 1955, Riley & Kaufmann 1972). Dehydrierte Zellen werden bereits effektiv durch UV-A- und UV-B-Strahlung getötet, feuchte Zellen dagegen kaum (Kaplan 1955). Auch die Photoreaktivierung findet nur in im feuchten Zustand statt (Kaplan 1955, Riley & Kaufmann 1972). Bei diesem lichtabhängigen Prozess (ca. 300 nm – 500 nm Wellenlänge) können Bakterien durch UV-Strahlung entstandene Schäden mit Hilfe des Enzyms Photolyase äußerst effektiv reparieren, so dass inaktivierte Keime nach einer gewissen Zeit wieder reaktiviert werden (Clauß et al. 2005, Goosen & Moolenaar 2008). Ansonsten ist der Einfluss von natürlicher UV-Strahlung auf luftgetragene Bakterien kaum untersucht. Paez-Rubio & Peccia (2005) fanden in einer UV-A- und UV-B durchlässigen Kammer einen signifikanten Einfluss von Sonnenlicht auf die Überlebensrate von *Mycobacterium parafortuitum* bei moderater Luftfeuchtigkeit.

Unabhängig von meteorologischen Parametern überleben Bakterien in der Außenluft generell schlechter als in Innenräumen, bei ansonsten ähnlichen Bedingungen (Hood 1971, Hood 1974). Als Ursache wird der OAF angenommen. Besonders Nukleinsäuren und Mantelproteine von Mikroorganismen werden dadurch stark geschädigt. Jedoch sind die für den OAF verantwortlichen Substanzen wie freie Radikale, Ozon und Ozon-Olefin-Reaktionsprodukte äußerst instabil und bauen sich durch Reaktionen mit Partikeln oder Oberflächen innerhalb von wenigen Minuten ab. Hinzu kommt, dass die Konzentrationen der einzelnen Stoffe extrem variabel sind und nicht mit einer Tages- oder Jahreszeit assoziiert (Druett & May 1968). Hood 1971 fand, dass in einem geschlossenen System ein Luftwechsel von mindestens 12x pro Stunde nötig ist, um den OAF aufrecht zu erhalten (Hood 1971). Für *E. coli* wurden dabei Überlebensraten von 72 % nach 5 min und 7 % nach 60 min gefunden. Der OAF schien hier zudem bei geringer Luftfeuchtigkeit einen größeren Einfluss auf die Tenazität zu haben als bei höheren. Dark & Nash 1970 fanden dagegen für *E. coli* den größeren Einfluss bei einer mittleren Luftfeuchtigkeit (60 %) für *Micrococcus albus* bei 80 %. Sie fanden zudem für beide Spezies nach 10 min bei 20 °C und 78 % RF Überlebensraten von 0 – 100 %, abhängig von der Art des Olefins und der Ozonkonzentration.

Viele Autoren fanden auch eine positive Korrelation zwischen dem Überleben von luftgetragenen Bakterien und Viren (Alonso et al. 2015) und der Partikelgrößenfraktion in der sie nachgewiesen

wurden (Marthi et al 1990, Dinter & Müller 1984, Hood 1971, May & Druett 1968, Kundsinn 1968, Lighthart & Shaffer 1997). Vermutlich sind sie in den größeren Partikeln besser geschützt.

Die meisten Untersuchungen zur Ermittlung der Tenazität luftgetragener Mikroorganismen wurden unter kontrollierten Bedingungen in geschlossenen Bioaerosolkammern durchgeführt. Es wurde meist nur der Einfluss einzelner Faktoren auf das Überleben untersucht. Am wenigsten berücksichtigt wurde bisher der OAF da sich die den Effekt hervorrufenden Substanzen innerhalb von wenigen Minuten in den geschlossenen Kammern abbauen (Druett & May 1968). Eine Alternative bieten Clauß et al. (2016). Sie berichten von einer Bioaerosolkammer aus einem UV-durchlässigen Folienballon der kontinuierlich mit frischer Außenluft befüllt wird. Es gelang in diesem System die Ozonkonzentration und damit auch den OAF für 20 Minuten zu 75 % aufrecht zu erhalten. Manche Autoren haben Bakterien an dünne Spinnenfäden geheftet ("Microthread technique") um deren Tenazität in der Luft zu untersuchen (May & Druett 1968, Dark & Nash 1970). Die Anzucht der Spinnen und die Ernte der Fäden war jedoch sehr aufwändig und die anschließende Auswertung schwierig, da die Bakterien nach den Versuchen wieder von den Fäden heruntergewaschen werden müssen. Zudem gingen vor und während der Versuche viele Zellen verloren. Letztlich sind auf einer Oberfläche anhaftende Partikel nur bedingt mit solchen vergleichbar, die sich im luftgetragenen Zustand befinden (Hood 1971). Bis heute ist es somit nicht gelungen die Tenazität von luftgetragenen Bakterien unter realen Außenluftbedingungen zu untersuchen.

Bisherige Untersuchungen können höchstens Hinweise zur Tenazität von Bakterien im luftgetragenen Zustand geben. Durch die unterschiedlichen Versuchsbedingungen und die Vielzahl der einflussnehmenden Parameter sind die Versuchsergebnisse jedoch oft widersprüchlich. Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den einzelnen Arten lassen sich nur wenige Aussagen zu möglichen Übertragungsentfernungen machen. Hier ist weitere Forschung nötig. Neben der Tenazität sollte in Zukunft auch die Infektiosität bei der Risikobewertung von Bioaerosolen und der Abschätzung des Ausbreitungspotentials von bakteriellen Infektionskrankheiten über die Luft berücksichtigt werden.

5.4.2 Größe von Bioaerosolen

In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung werden die meisten Mikroorganismen in der Luft in deutlich größeren Partikelgrößen- bzw. Massenfraktionen ($> PM_{10}$) gefunden als es die Größe der Einzelzellen der Organismen vermuten lässt, wobei die Verteilung verschiedener Bioaerosolbestandteile unterschiedlich sein kann und nicht einheitlich mit der Verteilung der Staubfraktionen korreliert.

Mikroorganismen sind in der Regel sehr klein, so haben Bakterien typischerweise Durchmesser von einem halben bis einigen wenigen μm . Seit dem vorletzten Jahrhundert ist aber bekannt, dass Bakterien in der Luft überwiegend in Aggregaten vorkommen oder auch auf größeren Staubpartikeln (Hesse 1884, Hesse 1886). Daher werden die meisten Mikroorganismen in der Luft in deutlich größeren Partikelgrößenfraktionen gefunden als es die Größe der Einzelzellen der Organismen vermuten lassen. Dies gilt insbesondere für die landwirtschaftliche Nutztierhaltung (Clauß et al. 2011a, b.). Clauß (2015a) gibt dazu einen umfassenden Überblick zur Partikelgrößenverteilung luftgetragener Mikroorganismen in verschiedenen Umweltbereichen. Messungen zur Partikelgrößenverteilung wurden am häufigsten mit Andersen-Sammlern durchgeführt. Hiermit lässt sich jedoch nur die Anzahl „kultivierbare Mikroorganismen“-tragender Partikel im Bereich von 0,65 μm bis 12 μm aerodynamischer Durchmesser (AD) einigermaßen sicher bestimmen. Abb. 18 zeigt die aus der Literatur ermittelte mittlere Häufigkeit in Prozent von kultivierbare Bakterien- und Schimmelpilz-tragenden Partikeln in den verschiedenen Partikelgrößenfraktionen von 0,65 μm bis 12 μm in der Luft von Tierställen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung, ermittelt mit dem 6-stufigen Andersen-Sammler. Die verschiedenen Breiten der Box-and-Whiskers-Plots repräsentieren die unterschiedlichen Breiten der Partikelgrößenfraktionen beim Andersen-Sammler.

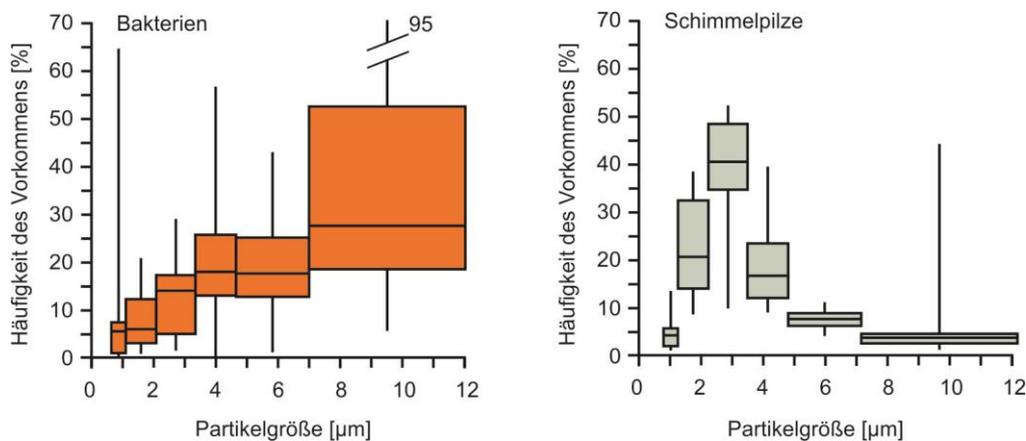


Abb. 18: Aus der Literatur ermittelte mittlere Häufigkeit in Prozent von kultivierbare Bakterien- und Schimmelpilz-tragenden Partikeln in den verschiedenen Partikelgrößenfraktionen von 0,65 μm bis 12 μm , mit dem 6-stufigen Andersen-Sammler ermittelt, in der Luft von Tierställen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung. Literatur Bakterien: Aarnink et al. 2012, Adell et al. 2011a, b, Chai et al. 2001, Chinivasagam & Blackall 2005, Lenhart et al. 1982, Liu & Ma 2010, Sowiak et al. 2011, Siggers et al. 2011, Zhao 2011, Zheng et al. 2013 (n = 26 Datensätze, 155 Einzelmessungen), Literatur Schimmelpilze: Chien et al. 2011, Liu & Ma 2010, Siggers et al. 2011 (n = 10 Datensätze, 23 Einzelmessungen).

Die mit ca. 30 % meisten Bakterien-tragenden Partikel wurden hier in der Impaktorstufe 7 μm bis 12 μm gefunden. Bei den Schimmelpilzen werden dagegen die meisten Sporen in der Partikelgrößenfraktion zwischen 2 μm und 4 μm gefunden. Im Gegensatz zu den

Bakterienrepräsentieren die gefundenen Verhältnisse die Größenverteilungen der Sporen der am häufigsten vorkommenden Arten (Clauß 2015a). Das bestätigt das Postulat von Hesse (1884, 188), dass Bakterien in der Luft überwiegend in Aggregaten oder auch auf größeren Staubpartikeln vorkommen. Schimmelpilzsporen liegen dagegen weitgehend vereinzelt vor (Heikkilä et al. 1988, Pasanen et al. 1989). Die Anzahl aller Mikroorganismen (koloniebildende Einheiten, Zellzahl, Anzahl Genkopien) in einem bestimmten Luftvolumen wurde bisher kaum untersucht. Ebenfalls gibt es aufgrund der bisher eingesetzten Sammelsysteme deutliche Wissensdefizite für Partikelgrößenverteilung von Bioaerosolen im Bereich $> 12 \mu\text{m AD}$. Daher empfahl Clauß (2015) in Zukunft Sammelsysteme einzusetzen, mit denen nicht nur die Anzahl Mikroorganismen-tragender Partikel im Bereich $< 12 \mu\text{m}$, sondern die Anzahl aller Mikroorganismen in den Umwelt- und gesundheitlich relevanten Partikelgrößen- bzw. Massenfraktionen $\text{PM}_{2,5}$, PM_4 , PM_{10} und Gesamtstaub erfasst werden können.

Mittlerweile sind in Deutschland durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) NRW (Gärtner et al. 2017) und das Thünen-Institut für Agrartechnologie (Clauß et al., in Vorbereitung) solche Messungen durchgeführt worden (Clauß & Gärtner 2017). Beide Institutionen nutzen dafür eine Kombination aus standardisierten Emissionsimpingern und Impaktoren ($\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10}) als Vorabscheider für die Impinger. Die ersten, teilweise vorläufigen, Ergebnisse sind in Abb. 19 dargestellt.

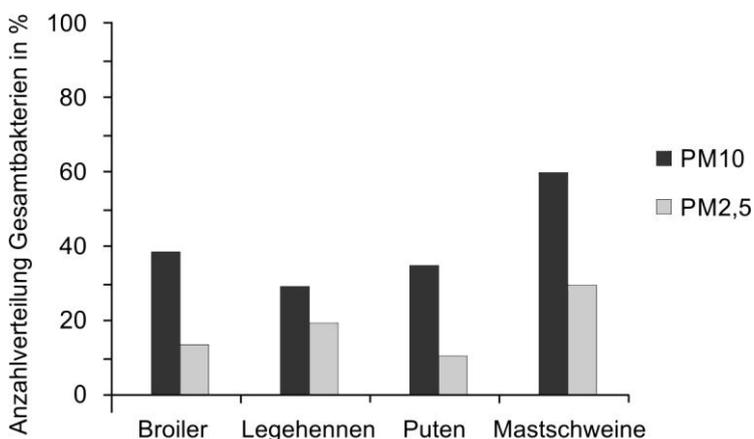


Abb. 19: Anzahlverteilung von Gesamtbakterien in den Partikelmassenfraktionen PM_{10} und $\text{PM}_{2,5}$ in der Emission von verschiedenen Tierställen.

Es wurde festgestellt, dass bei Masthähnchen 39 % der luftgetragenen Bakterien in der Fraktion PM_{10} vorkommen und 14 % in $\text{PM}_{2,5}$. Bei Legehennen waren es 30 % und 20 %. Bei Puten fanden sich 35 % der luftgetragenen Bakterien in der Fraktion PM_{10} und nur 10 % in $\text{PM}_{2,5}$. Bei den Mastschweinen sind die Verhältnisse etwas anders als beim Geflügel. Hier waren 60 % der luftgetragenen Bakterien in PM_{10} und 30 % in $\text{PM}_{2,5}$. Es liegen weitere Daten für Staphylokokken vor, deren Verteilung ähnlich ist. Bei Mastschweinen und Broilern wurden parallel zu den

Bioaerosolen Staubmessungen mit dem Johnas II Impaktor nach VDI 2066 Blatt 10 durchgeführten. Bei den Schweinen waren 65 % der Partikel im $PM_{2,5}$ -Anteil und 85 % in PM_{10} , die Verteilung unterscheidet sich also deutlich von der Verteilung der luftgetragenen Bakterien im Staub. Bei den Masthähnchen dagegen repräsentiert die Verteilung der Bakterien etwa der der Staubpartikel mit 12 % im $PM_{2,5}$ -Anteil und 45 % in PM_{10} . Nach derzeitigem Kenntnisstand scheinen die Konzentrationen von Staub und luftgetragenen Bakterien in den PM-Fractionen nicht einheitlich zu korrelieren. Über die Größenverteilung von anderen Bioaerosolbestandteilen in den PM-Fractionen ist bisher nur wenig bekannt. Attwood et al. (1986) wiesen die meisten Endotoxine in der Partikelgrößenfraktion zwischen $3,5\ \mu\text{m}$ – $8,5\ \mu\text{m}$ nach. Schaeffer et al. (2017) zeigten, dass in der Milchviehhaltung ein großer Anteil Bakterien inklusive der Gattungen *Staphylococcus*, *Pseudomonas* und *Streptococcus* auf Partikeln über $10\ \mu\text{m}$ zu finden sind. Alonso et al. (2015) zeigten, dass sich Influenza A Viren (IAV), „porcine reproductive and respiratory syndrome“-Viren (PRRSV) und „porcine epidemic diarrhea“-Viren (PEDV) in einem weiten Partikelgrößenbereich verteilen.

5.5 Immissionen

Die Immissionskonzentrationen von Bioaerosolen fallen exponentiell mit der Entfernung zur Emissionsquelle ab, primär abhängig von der Partikelgröße (Sedimentation) und von meteorologischen Bedingungen.

Die aus Tierställen emittierten Bioaerosole transmittieren, primär abhängig von meteorologischen Parametern, in das Umfeld der Ställe und führen dort zu Immissionen. Daher können besonders in viehstarken Regionen gegenüber z. B. Stadtsituationen erhöhte Konzentrationen luftgetragener Bakterien (Schaper 2004) und Endotoxinen (Myrna et al. 2017) gefunden werden. Bioaerosole können sich zudem in der Umgebung von Tierställen im Sedimentationsstaub oder im Boden anreichern (Williams et al. 2016, Schulz et al. 2012). Abhängig von der Tierart können in den Bioaerosolen auch Pathogene enthalten sein. In den Niederlanden waren 28 % der Außenluftproben um Ziegenfarmen positiv auf den für Menschen gefährlichen Q-Fiebererreger *Coxiella burnetii* getestet worden (Rooij et al. 2016). Cohen et al. (2012) fanden in den USA im Umfeld von Pferdeställen der Ställe bis zu 29 % der Luftproben positiv für *Rhodococcus equi*, ein Erreger der Pneumonien bei Fohlen verursacht. Um die Konzentrationsverteilung von luftgetragenen Mikroorganismen im Umfeld der Ställe exemplarisch darzustellen, ist der stallspezifischen Leitparameter „Staphylococcaceae“ geeignet. Viele Autoren haben die Ausbreitung von Staphylokokken um Tierställe untersucht, indem sie deren Konzentrationen in verschiedenen Entfernungen vom Stall gemessen haben. Abb. 20 zeigt die aus verschiedenen Literaturstellen entnommenen Konzentrationen von Staphylokokken in der Abluftfahne von zwangsgelüfteten Hühnerställen, in verschiedenen Entfernungen vom Stall in

1,5 m Höhe über dem Boden mit AGI-30 Impingern gemessen. Für diese Konstellation standen die meisten vergleichbaren Daten zur Verfügung.

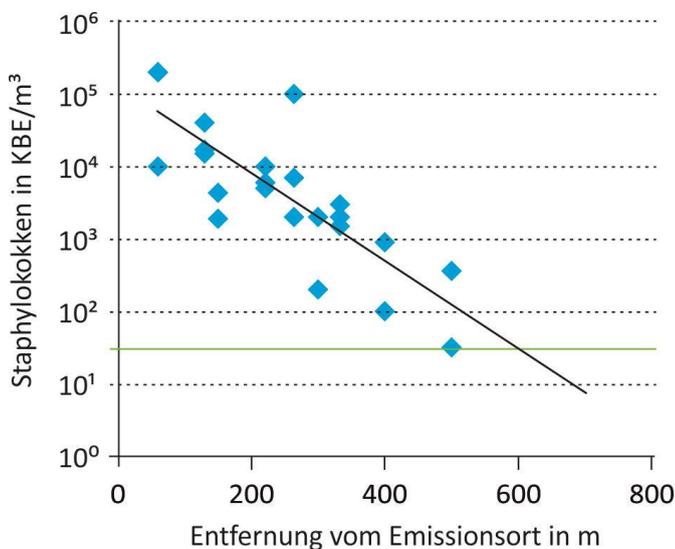


Abb. 20: Aus verschiedenen Literaturstellen entnommenen gemessenen Konzentrationen von Staphylokokken in der Abluftfahne von Zwangsgelüfteten Hühnerställen in verschiedenen Entfernungen vom Stall in 1,5 m Höhe über dem Boden. Grüner Balken: Hintergrundkonzentration aus Clauß et al. 2013b, Literatur: Schulz et al 2004, Schulz et al. 2005, Lippmann et al. 2016

Es zeigt sich ein deutlicher exponentielle Abfall der Konzentrationen mit steigender Entfernung zur Emissionsquelle. In dieser Darstellung werden erst in 600 m Entfernung vom Stall Konzentrationen von Staphylokokken gefunden, die der von Clauß et al. (2013b) ermittelten ländlichen Hintergrundkonzentration entsprechen. Es zeigt sich aber auch eine deutliche Schwankungsbreite, da die Ausbreitungsentfernung von Bioaerosolen aus Tierställen von vielen Parametern abhängig ist. Dies sind neben der Emissionsfracht (Menge Bioaerosole pro Zeiteinheit) (Kapitel 5.2), der Tenazität (Kapitel 5.4.1) und der Partikelgröße (Kapitel 5.4.2) hauptsächlich die Windgeschwindigkeit und Richtung sowie die Geländebeschaffenheit. Auch die Art der Quelle (Höhe über dem Boden, Flächenquellen wie z. B. Biofilter oder Punktquellen wie z. B. Abluftschächte) haben einen deutlichen Einfluss auf die Form und Größe der Abluftfahne und damit der möglichen Ausbreitungsentfernung. Diesbezüglich sehen Agranovski et al. (2007) tunnelventilierte Ställe mit Ventilatoren in den Seitenwänden als besonders problematisch an, da diese die konzentriertesten Abluftfahnen produzieren.

Bei Immissionsmessungen hat die Durchführung der Probenahme einen großen Einfluss auf die Messergebnisse. Im Idealfall sollte das Immissionsmesssystem während des ganzen Messzeitraums in der Abluftfahne stehen. In der Praxis ist dies aber wegen wechselnden Windrichtungen bzw. der meist meandernden Abluftfahne während kaum möglich. Daher wurden in VDI 4251 Blatt 1 Fahnenmessungen vorgeschlagen, bei denen die

Immissionskonzentrationen auf drei Schenkeln im Lee der Ställe in verschiedenen Abständen zur Emissionsquelle durchgeführt werden sollen. Dies ist jedoch mit einem sehr großen logistischen, personellen und finanziellen Aufwand verbunden und hat sich in der Praxis als kaum durchführbar erwiesen (Gladtko & Gessner 2017, Mietke-Hoffmann 2017, Winkler 2017). Daher wird meist nur auf einem Schenkel entgegen der Hauptwindrichtung gemessen oder in einer festen Entfernung vom Stall auf mehreren Schenkeln. Weitere Herausforderungen sind geeignete meteorologische Bedingungen während der Messung zu haben und schwierige Gelände vor Ort. Oft sind Gebäude, Bäume oder Straßen im Weg, häufig finden sich sekundäre Bioaerosolquellen in der Umgebung, wie z. B. andere Stallgebäude, aber auch Kompostmieten oder Wälder.

Als Sammelsystem wird bei Immissionsmessungen in den VDI-Richtlinien der AGI-30 Impinger empfohlen (4252 Blatt 3). Dieser hat jedoch eine völlig andere Sammeleffizienz als der für Emissionsmessungen vorgeschriebene Emissionsimpinger (Kapitel 4.1, Tabelle 4). Sinnvoll wäre es, für Emissions- und Immissionsmessungen dasselbe Sammelsystem zu empfehlen. Der Einfluss der verschiedenen Systeme auf die Ergebnisse der Messungen kann in Theorie und Praxis nämlich durchaus eine Zehnerpotenz betragen. Daher sind die Ergebnisse von Emissionsmessungen und Immissionsmessungen nur bedingt zu vergleichen. Auch ein Vergleich von Immissionsmessungen mit den Ergebnissen von Ausbreitungsprognosen, z. B. nach VDI 4251 Blatt 3, ist diesbezüglich problematisch. In VDI 4255 Blatt 3/4 werden als Eingabeparameter für die Berechnungen Konventionswerte für Emissionsfaktoren vorgeschlagen, die mit Emissionsimpingern als Sammelsystem erhoben wurden. Daher sind die daraus resultierenden Ergebnisse von Prognosen nicht direkt mit den Ergebnissen von Immissionsmessungen vergleichbar, bei denen der AGI-30 Impinger eingesetzt wurde.

6 Ausbreitungsprognosen für Bioaerosole

Anstatt aufwändige Messungen durchzuführen kann die Ausbreitung von Bioaerosolen auch mit Computermodellen simuliert werden, wozu jedoch valide Eingangsdaten wie Emissionsfaktoren, Partikelgrößenverteilungen und Absterbekonstanten berücksichtigt werden müssen, was bisher jedoch nicht der Fall ist.

Die Ermittlung der Ausbreitung von luftgetragenen Mikroorganismen im Umfeld einer Emissionsquelle durch Konzentrationsmessungen vor Ort ist sehr aufwändig. Die Ausbreitung von Bioaerosolen kann aber auch mit Computermodellen simuliert werden. Zum Beispiel wird im Zuge von Genehmigungsverfahren die Ausbreitung von bestimmten mikrobiellen Leitparametern berechnet, um potentielle Gefahren und Risiken für die Anwohner im Umfeld von keimemittierenden Anlagen abschätzen zu können bzw. abzuwenden. Die Vorteile sind, neben dem geringeren Arbeitsaufwand und der Zeitersparnis, niedrigere Kosten sowie die Möglichkeit in den Modellen Variablen, wie z. B. meteorologische Bedingungen oder das bauliche Umfeld, zu verändern. So können auch für alternative Szenarien Prognosen erstellt werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Abschätzung möglicher Gesundheitsgefahren durch eine Übertragung pathogener Keime über die Luft. Bereits Müller et al. (1978) haben die Ausbreitung von Bakterien aus Tierställen mit einem einfachen Rechenmodell simuliert und dabei auch die Partikelgrößenverteilung sowie die Tenazität durch eine Absterbekonstanten berücksichtigt. Viele verschiedene Simulationsmodelle wurden in der Vergangenheit für die Vorhersage der Dispersions- und Dispositionsmuster von Bioaerosolen aus Punkt- oder Flächenquellen entwickelt (Lighthart & Frisch 1976, Peterson & Lighthart 1977, Lighthart & Mohr 1987, Lighthart & Kim 1989, Ganio et al. 1995, Blackall & Gloster 1981, Gloster et al. 1981, 2003, 2007, Mikkelsen et al. 2003, Sørensen et al. 2001). Über die Validität der verwendeten Modelle für die Ausbreitung von Mikroorganismen ist bisher aber kaum etwas bekannt. In einige Studien konnte eine Korrelation zwischen der modellierten luftgetragenen Pathogenübertragung und dem Auftreten von Krankheiten in der Umgebung aufgezeigt werden. Dies gelang zum Beispiel für *Legionella pneumophila* (Nguyen et al. 2006), das Newcastle-Disease-Virus (Gloster 1983) die Maul- und Klauenseuche (Sørensen et al. 2001), *Coxiella burnetii* (Wallenstein et al. 2010), das Influenza Virus (Liu & You 2012, Jonges et al. 2015) und das Vogelgrippevirus (Ssematimba et al. 2012). Eine umfassende Übersicht dazu geben van Leuken et al. (2016). In einem Versuch mit freigesetzten *Bacillus*-Sporen konnten Ganio et al. (1995) große Unterschiede zwischen den in Quellnähe ermittelten Konzentrationen und den prognostizierten Werten feststellen. Mayer et al. (2008) fanden dagegen gute Übereinstimmungen bei der Ausbreitungssimulation des MKS-Virus. Schulz (2007) fand im Umfeld von Masthähnchenställen für Staphylokokken teilweise gute Übereinstimmungen zwischen vor Ort gemessenen Konzentrationen und den mittels eines Gauß-Modells errechneten Keimzahlen. In einer Studie des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2015b) fanden sich hingegen in nur wenigen Fällen Übereinstimmungen zumindest in der Größenordnung zwischen den Ergebnissen von Ausbreitungsrechnungen und Messwerten. Eine

weitere Untersuchung zur Übereinstimmung von Prognosewerten zweier Ausbreitungsmodelle mit tatsächlichen gemessenen Konzentrationen luftgetragener Staphylokokken im Umfeld von Nutztierhaltungsanlagen zeigte wiederum deutliche Abweichungen zwischen den gemessenen und prognostizierten Konzentrationen am Immissionsort (Springorum et al. 2014). Die dabei beobachtete diskontinuierliche Unterschätzung zeigte, dass vermutlich weitere Parameter als Eingangsgröße für die Modelle zu berücksichtigen sind. Die Gründe für Abweichungen zwischen den Modellwerten und den Messwerten können sowohl in den Messungen als auch in der Güte der Eingabeparameter für die Modelle zu finden sein. Die Transportmechanismen für Aerosole sind kompliziert und noch nicht vollständig verstanden (Zhang & Chen 2007). Die Transmission von Stallluftpartikeln in der Außenluft wird durch die meteorologischen Bedingungen, die orographischen Gegebenheiten und durch die Partikeleigenschaften selbst bestimmt (Schulz et al. 2011). Diese finden mit der Ausbreitungsklasse, Rauigkeitslänge und Sedimentations- und Depositionsgeschwindigkeit der Partikel rechnerisch Eingang in die meisten Ausbreitungsmodelle. Die Parametrisierung solcher Modelle verfolgt in Deutschland derzeit einen konservativen Ansatz. So wird angenommen, dass die Bakterien den luftgetragenen Zustand, unabhängig von dessen Dauer, zu 100 % überleben. Dies entspricht jedoch nicht dem aktuellen Stand des Wissens. Bei der Ausbreitungsprognose von lebenden Mikroorganismen müssten auch die auf sie wirkenden Umweltfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchte, UV-Strahlung, Komponenten der Umgebungsluft sowie der so genannte „open air factor“ (OAF) beachtet werden. Diese können einzeln oder synergetisch wirken und die Tenazität der Mikroorganismen stark beeinflussen (Burge 1995, Cox 1995). Prognosen aus Ausbreitungsberechnungen, bei denen luftgetragene Mikroorganismen wie inerte Staubpartikel kalkuliert werden, sind daher nur eingeschränkt auf die Realität übertragbar, da eine Vielzahl von Faktoren nicht berücksichtigt werden. Hierzu gehört z. B. die natürliche UV-Strahlung, da sie unmittelbar die Tenazität der Mikroorganismen beeinflusst. Dies könnte künftig in den Rechenmodellen entweder direkt oder auch indirekt (z. B. über die Bewölkungsklasse) Berücksichtigung finden. Besonders hilfreich wären reproduzierbare Kenntnisse über die spezifischen Absterbe-Koeffizienten der relevanten Mikroorganismen im luftgetragenen Zustand. Hierzu fehlen derzeit jedoch noch die notwendigen Untersuchungen. Ähnliches gilt für die tierart- und haltungsformspezifischen mittleren Partikelgrößen und deren Quellstärken, die unter Praxisbedingungen einer Vielzahl von Einflussfaktoren unterliegen und stark variieren können. Solange diese Kenntnisse fehlen, sollte bei Immissionsprognosen für Bioaerosole im Umfeld von Nutztierhaltungsanlagen berücksichtigt werden, dass die Vorhersagen von Ausbreitungsmodellen erheblich von den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort abweichen können.

7 Gesundheitliche Bewertung von Bioaerosolen

Aus einer Vielzahl Publikationen ist seit langem bekannt, dass Bioaerosole trotz fehlender Dosis-Wirkungs-Beziehung zusammen mit anderen Luftschadstoffen die Gesundheit der in Tierställen arbeitenden Personen negativ beeinflussen, dabei konnte bislang keine eindeutige Aussage über eine etwaige Gefährdung von Anwohnern von Tierhaltungen getroffen werden.

Viele Untersuchungen aus dem Tier- und Arbeitsmedizinischen Bereich belegen, dass erhöhte Bioaerosolkonzentrationen in Tierställen die Gesundheit der Tiere (Pauli et al. 1974, Wiseman et al. 1984, Sabo 2008, Huhn 1970, Jericho 1968, Kovgcs et al. 1967, Bækbo 1998) und auch der dort arbeitenden Menschen negativ beeinflussen können. Dabei haben Erkrankungen der Atemwege eine Vorrangstellung. In Deutschland wurden im Jahr 2013 bei der Landwirtschaftlichen Unfallversicherung 417 Atemwegserkrankungen und 699 Zoonosen als Berufskrankheiten angezeigt (Riethmüller 2014). Bezüglich berufsbedingter Atemwegserkrankungen ist die Schweinehaltung weltweit am besten untersucht (z. B. Coggins et al. 2007, Radon et al. 2000, Donham et al. 1977, Donham et al. 1982, Donham et al. 1984, Iversen et al. 2000, Cormier et al. 1991, Senthilselvan et al. 1997, Kirychuk et al. 1998, Donham et al. 1986a, b, Preller et al. 1995, Donham et al. 1989, Rylander et al. 1989, Malmberg & Larsson 1993, Zejda et al. 1994, Duchaine et al. 2000, Cormier et al. 2000, Jolie et al. 1998). Schweinebauern haben hiernach die meisten arbeitsbezogenen Gesundheitsprobleme im Vergleich zu anderen Landwirten (Attwood et al. 1986, Willems et al. 1984, Haglind et al. 1984, Butera et al. 1991, Donham et al. 1989, Holness et al. 1987). So haben in den USA schätzungsweise 25 % der Angestellten in der Schweinehaltung asthmatische Erkrankungen und 33 % berichten über gesundheitliche Probleme die mit dem Organic Dust Toxic Syndrome (ODTS) assoziiert sind (Donham 2000). Auch in der Rinderhaltung (Choudat et al. 1994) und der Geflügelhaltung führen berufsbedingte Expositionen gegenüber hohen Konzentrationen von Luftschadstoffen zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen. Beim Geflügel liegt die geschätzte jährliche Inzidenz für arbeitsplatzassoziierte asthmatische Erkrankungen bei 2,4 % (Brooks et al. 2007). Die Prävalenz chronischer Bronchitiden liegt bei 12 bis 25 % (Danuser et al. 2001, Zuskin et al. 1995). Auch Veterinäre spezialisiert auf Geflügel berichten vermehrt über Atemwegsstörungen (Elbers et al. 1996). Letztlich haben auch Rinderhalter ein höheres Risiko an Atemwegserkrankungen zu sterben (Choudat et al. 1994).

Im Atemtrakt können Bioaerosole mechanisch, infektiös, toxisch und/oder sensibilisierend wirken, auch synergistisch mit anderen die Schleimhäute reizenden Agenzien wie z. B. Ammoniak oder Staub. Grundsätzlich ist die gesundheitliche Wirkung abhängig von der Komposition (Anteil infektiöser pathogene Spezies, Toxine, sensibilisierende Substanzen), der Konzentration (z. B. infektiöse Dosis), der Exposition (Häufigkeit und Dauer) und der Konstitution (Gesundheitsstatus), wobei zusätzlich die sensibilisierende Wirkung zu beachten ist. Zu den häufigsten Krankheiten gehören Allergisches Asthma, Bronchitis, Chronisch-obstruktive Lungenerkrankung (COPD, engl.: chronic obstructive pulmonary disease), Exogen-allergische Alveolitis (»Farmerlunge«), MMI-

Syndrom (engl.: Mucous Membrane Irritation) und das Organic Dust Toxic Syndrome (auch ›Drescherfieber‹ genannt), letzteres primär als Reaktion auf hohe Endotoxinexpositionen (Nowak 2016, Clark et al. 1983, Zhiping et al. 1996). Vor allem den Endotoxinen kommt aufgrund ihrer hohen pro-inflammatorischen (entzündungsfördernde) Aktivität besondere Bedeutung zu. Nur etwa 15% der pro-inflammatorischen Aktivität werden durch andere Substanzen verursacht, wie zum Beispiel β -Glukanen, Toxine grampositiver Bakterien, Peptidoglykanen und Muraminsäure (Eckhardt 2008), deren potentiell entzündliche Wirkung bereits von mehreren Autoren beschrieben wurde (Hansen & Christensen 1990, Douwes et al. 2000). Für Endotoxine kann sogar eine Dosis-Wirkungsbeziehung abgeleitet werden (Donham et al. 1989). Konzentrationen von über 100 EU/m³ führen im Allgemeinen zu Reizungen der Atemwege, mehr als 1000 EU/m³ zu generellen Atemwegssymptomen und über 2000 EU/m³ zum ODTS (Varnai & Macan 2004).

In der Luft von Tierställen ist vor allem die Zahl luftgetragener Bakterien i. d. R. stark erhöht und es werden vermehrt Krankheitserreger nachgewiesen (Herr et al. 1999, Clauß 2014, Martin et al. 2015, de Rooije et al. 2016). Laut European Agency For Safety And Health At Work (2017) sind die wichtigsten landwirtschaftsassozierten, aerogen übertragbaren Zoonosen *Streptococcus suis*-Infektionen, Psittakose, Leptospirose, Rindertuberkulose und Q-Fieber. Daneben gibt es noch viele weitere parasitäre, virale und bakterielle Erkrankungen. Die luftgetragenen Erreger können eingeatmet direkt zu Atemwegserkrankungen führen oder auch im Mund- und Rachenraum abgeschieden und dann verschluckt werden, was z. B. bei *Escherichia coli*, *Salmonella*, *Campylobacter* und *Clostridium botulinum* zu Infektionen des Magen-Darmtraktes führen kann (Keessen et al. 2011, Pillai & Ricke 2002). Mackiewicz et al. (2015) versuchten in einer Metaanalyse von Daten aus 13 Jahren in Polen eine Dosis-Wirkungs-Beziehung für verschiedene Gruppen von luftgetragenen Mikroorganismen in der Landwirtschaft abzuleiten. Sie fanden statistisch signifikante Korrelationen zwischen dem Auftreten von arbeitsbedingten Symptomen und den Konzentrationen von Gesamtbakterien, Gram-negativen Bakterien und Endotoxinen. In einem systematischen Review zu Zusammenhängen zwischen Exposition (Luftmessungen) und Wirkung (Gesundheitseffekte) von Bioaerosolen anhand dessen gesundheitsbezogene Beurteilungswerte für Bioaerosole abgeleitet werden sollten, kamen die Autoren jedoch zu dem Schluss, dass keine der bisher veröffentlichten Humanstudien (viele davon aus dem Bereich der Arbeitsmedizin in der landwirtschaftlichen Tierhaltung) die Kriterien für eine Ableitung gesundheitsbezogener Beurteilungswerte erfüllt und geeignete Dosis-Wirkungs-Beziehungen enthält (Gerstner et al. 2014, 2015). Die Rolle des allgemeinen Mikroorganismengehaltes in der Stallluft für die Entwicklung von Atemwegserkrankungen bei Mensch und Tier ist also bisher nicht eindeutig einzuschätzen. Solange keine spezifischen Krankheitserreger in infektiösen Dosen in der Luft vorhanden sind, kommt es allenfalls zu unspezifischen Atemwegsbelastungen. Dies macht die Festlegung eines mikrobiellen „Grenzwertes“ schwierig, da ein hoher Keimgehalt allein in der Regel keine gesundheitlichen Folgen hat. Hinzu kommt, dass die Abgrenzung zur Wirkung von Ammoniak und der Staubpartikelbelastung des Atemtraktes nicht klar gelingt. Die unbefriedigende Einschätzung der Wirkung des Keimgehaltes hängt aber auch damit zusammen, dass nur wenig über die Mikroorganismenarten, die in der Stallluft vorhanden sind, berichtet wird. Dies hängt einmal mit den sehr hohen Gesamtbakterien-Konzentrationen zusammen, unter

denen die Suche nach spezifischen Erregern schwierig ist, hat aber auch zu tun mit dem Sammelstress, dem die Mikroorganismen bei der Probenahme aus Luft ausgesetzt sind. Viele potentielle Krankheitserreger lassen sich auch deshalb nicht auf Nährböden kultivieren.

Die mikrobiologischen Belastungen führen nicht nur zu Infektionen, sondern haben auch toxische oder sensibilisierende Wirkung, je nach Art des Agens und der Dauer der Exposition. Während akute Erkrankungen durch extreme Expositionen in ihrer Zahl zurückgegangen sind, stiegen die subakuten und chronischen Atemwegserkrankungen von Beschäftigten im Innenbereich der Ställe an (Donham 2000, von Essen & Donham 1999). Arbeitsbedingte allergische Atemwegserkrankungen sind in der Landwirtschaft gut dokumentiert und umfassen sowohl die IgE-vermittelten Erkrankungen (Asthma bronchiale, Heuschnupfen) (Heutelbeck et al. 2007) als auch die IgG-vermittelte „Farmerlunge“ bzw. „FHP“ (Farmer’s Hypersensitivity Pneumonitis) (Imai et al. 2004). Als Auslöser kommt die Exposition gegenüber Tierhaaren, Futtermittel- oder Getreidestäuben oder gegenüber Schimmelpilzen und Aktinomyzeten (Skorge et al. 2005) anderer Herkunft in Frage und wurde auch bereits beschrieben (Lugauskas et al. 2004). Goy (2007) fand in einer Meta-Analyse von 44 Publikationen eine Prävalenz für chronische Bronchitis bei Beschäftigten in der Nutztierhaltung von 17% (Median). Für die Entwicklung solcher chronischer Atemwegsbeschwerden wurden zusätzlich verschiedene Risikofaktoren identifiziert, wie z. B. die Größe der Tierhaltungsanlagen, die Verweildauer in den Ställen, Fütterung und Lüftungsregime (Radon et al. 2000, Radon et al. 2001). Dabei stellt die Mengen an Sedimentationsstaub in den Ställen eine gute Näherung an die Belastung gegenüber Allergenen am Arbeitsplatz und im häuslichen Umfeld dar (Jacob et al. 2002, Chew et al. 2003). Nur für wenige Allergene sind bisher die Konzentrationen bekannt, für die bei Exposition gesundheitliche Effekte beobachtet werden können (Baur et al. 1998). Sie wurden vor allem in arbeitsmedizinischen Untersuchungen mit dem Outcome asthmatischer Erkrankungen gewonnen (z. B. in Bäckereien, Holzverarbeitung oder Labortierhaltung). An verschiedenen weiteren Arbeitsplätzen sind neben Schimmelpilzen vor allem die Allergene der Hausstaubmilbe (*Dermatophagoides* spp) untersucht worden. Generell liegen die Konzentrationen in Tierhaltungen dabei unterhalb der Sensibilisierungsgrenze (Macan et al. 2012), allerdings ist die Geflügelhaltung davon ausgenommen, wie Rimac et al. (2010) zeigen konnten. Lutsky et al. (1984) fanden außerdem einen Zusammenhang zwischen der Entwicklung von allergischen Atemwegserkrankungen und der Exposition gegenüber Allergenen der Nördlichen Vogelmilbe *Ornithonyssus sylvarium*, die ebenfalls häufig in Nutztierhaltungen (Geflügel) anzutreffen ist. Unter den weiteren in der Nutztierhaltung anzutreffenden Allergenen ist das Rinderallergen Bos d 2 besonders relevant, wobei Konzentrationen in Ställen, aber auch in Wohnzimmern und in Matratzen oberhalb von Sensibilisierungsschwellen liegen. Der sogenannte „Bauernhofeffekt“, also ein vermindertes Auftreten von allergischen und – geringer – auch asthmatischen Erkrankungen bei Kindern, die in der Landwirtschaft aufgewachsen sind, ist vermutlich wesentlich auf eine Diversität mikrobieller Expositionen zurückzuführen (Nowak 2016).

Aktuell wird diskutiert, ob die aus der Arbeitsmedizin bekannten negativen gesundheitlichen Effekte von Stallstäuben auch bei der Wohnbevölkerung in der Nachbarschaft von Tierställen

auftreten (Schlaud 1998). In zwei niedersächsischen umweltepidemiologischen Querschnittstudien wurde der Frage nachgegangen, ob es bei Kindern (AABEL-Projekt: Hoopmann 2004) beziehungsweise Erwachsenen (NiLS-Projekt: Radon 2004, Radon et al. 2007), die in der Nachbarschaft von Tierstallungen wohnen, zu Gesundheitsbeeinträchtigungen kommt. Für beide Studien wurde die Expositionsquantifizierung mittels Ausbreitungsrechnungen anhand der damals verfügbaren Daten für tierstallbezogene Bioaerosole (Staub, Endotoxine) durchgeführt. Die Erhebung der Gesundheitsbeeinträchtigungen erfolgte durch Schuleingangsuntersuchungen (AABEL) bzw. Fragebögen sowie bei einem Teilkollektiv durch klinische Untersuchungen einschließlich Lungenfunktionsanalysen (NiLS). Die epidemiologische Auswertung kam in beiden Fällen zu dem Schluss, dass die einzelnen Bioaerosolbestandteile in der Emission stark miteinander korrelieren, sodass man einen beobachteten Effekt beziehungsweise eine Assoziation zu den Symptomen kaum einem spezifischen Bestandteile zuordnen kann. Eine Ableitung von Dosis-Wirkungs-Beziehungen und auch Wirkschwellen wurde damit als schwierig angesehen. Auch O'Connor et al. (2010) fanden in einem systematischem Review zu Bioaerosolen und deren gesundheitlichen Effekten lediglich Tendenzen bei Menschen mit Allergien und keine klare Dosis-Wirkungs-Beziehung. In den Niederlanden wurde festgestellt, dass Menschen, die im Umfeld von Ziegen- und Schafhaltungen wohnen, häufiger an Q-Fieber erkranken (de Rooije et al. 2016). In den USA wurde ein Anstieg der Kindersterblichkeit im Umfeld von Tierhaltung festgestellt, mutmaßlich primär hervorgerufen durch die steigende Luftverschmutzung (Sneeringer 2009). In einer weiteren aktuellen Studie aus den Niederlanden untersuchten van Dijk et al. (2016) über einen Zeitraum von 7 Jahren den Gesundheitsstatus von über 150.000 Menschen die in Viehdichten Gebieten leben und verglichen diese mit 100.000 Personen in Gebieten mit nur wenig Tierhaltung. Sie fanden in den Viehdichten Gebieten eine höhere Prävalenz für Erkrankungen der unteren Atemwege, chronischer Bronchitis und Vertigo, dagegen eine geringere Prävalenz für generelle Atemwegssymptome und COPD. Dabei war eine geringere Entfernung zur nächstgelegenen Farm wiederum mit niedrigeren Prävalenzen der genannten Beschwerden assoziiert, vor allem bei Rinderhaltungen. Auch hierbei gilt wieder dass sich die Wirkungen der einzelnen Bioaerosolkomponenten und begleitender Luftschadstoffe nicht trennen lassen. Zusammen mit den Bioaerosolen könnten auch Ammoniak und Staub einen negative Einfluss auf die Gesundheit haben (Borlée et al. 2017). Van Dijk et al. (2016) bemerken zudem, dass es zu Verzerrungen kommen kann. Da in ländlichen Gebieten die Menschen weniger oft zum Arzt gehen als in der Stadt, kann es in epidemiologischen Querschnittstudien zu einem „under-reporting“ Bioaerosol-assoziiertes Symptome im Umfeld landwirtschaftlicher Nutztierhaltung kommen.

Schlussfolgernd gibt es derzeit keine wissenschaftlich überprüften Konzentrationswerte für Bioaerosole in der Nachbarschaft von Tierhaltungen bei deren Auftreten mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen zu rechnen ist. So kommt auch das Fachgespräch „Keime aus Tierhaltungs- und Biogasanlagen - Auswirkungen auf menschliche Gesundheit und Umwelt“ im Jahr 2015 am Ministerium für Klima, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Umweltschutz (NRW) zu dem Ergebnis: „keinen Nachweis, dass Wohnen in der Umgebung von Tierhaltungsanlagen, im Vergleich zu anderen Wohnorten, in Bezug auf resistente Bakterien (LA-MRSA und ESBL-Bildner)

ein höheres unmittelbares Gesundheitsrisiko für die Allgemeinbevölkerung birgt“ (Anonymous 2015). Aufgrund der komplexen Zusammensetzung von Bioaerosolen aus der Tierhaltung kann gegenwärtig keine direkte Dosis-Wirkungs-Beziehung abgeleitet werden.

8 Nationale und Internationale Regularien

Bislang sind für Bioaerosole aufgrund der fehlenden Dosis-Wirkungs-Beziehung keine allgemeinen gültigen Grenzwerte formuliert, bei deren Überschreitung mit einer schädlichen Wirkung auf die Gesundheit gerechnet werden kann, daher findet aus dem Vorsorgeprinzip heraus meist eine Einzelfallbewertung statt.

In vielen Ländern gibt es Regularien, wie z. B. in Deutschland die TA-Luft, die zum Ziel haben „Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen“. Für den Arbeitsplatz regelt in Deutschland die nationale Umsetzung der EU Direktive 2000/54/EC, „Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz“ (Biostoffverordnung – BioStoffV) Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen. Diese enthält keine Grenzwerte für biologische Arbeitsstoffe, es können lediglich für Arbeitsplätze nach TRBA 405 (2006) sog. „technische Kontrollwerte“ (TKW) vom Ausschuss für biologische Arbeitsstoffe (ABAS) festgelegt werden. Diese sind für jeden Arbeitsplatz einzeln zu bestimmen und abhängig vom jeweiligen Stand der Technik am Arbeitsplatz. Diese Kontrollwerte sind einzuhalten und regelmäßig zu überprüfen. Neben der TA-Luft, die sich aktuell in der Überarbeitung befindet, sind in Deutschland die Ermittlung und Bewertung der Emissionen und Immissionen von Partikeln im Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und seinen Verordnungen geregelt. Die Regularien gelten auch für Anlagen zum Halten oder zur Aufzucht von Nutztieren. Speziell für Bioaerosole findet auch der „Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Bioaerosol-Immissionen“ (LAI-Leitfaden) der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz Anwendung, der eine bundesweit einheitliche, standardisierte Methodik zur Ermittlung und Bewertung von Bioaerosolbelastungen beschreibt. Ergänzend wurden zahlreiche Technische Regeln im Arbeitsschutz (Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe - TRBA) und Umweltschutz erstellt. Eines der weltweit umfassendsten Regelwerke zur Messung und Bewertung von Bioaerosolen hat der „Verein Deutscher Ingenieure“ (VDI) geschaffen. Der Themenbereich „Bioaerosole und biologische Agenzien“ ist aufgrund seiner Komplexität in mehrere Richtlinienreihen unterteilt und umfasst zur Zeit 21 Richtlinien sowie 8 Europäische und internationale Normen, 5 weitere Richtlinien befinden sich aktuell in der Vorbereitung. Diese Regelungen finden in vielen deutschen Bundesländern Anwendung, insbesondere dort, wo Bioaerosole Gegenstand von Genehmigungsverfahren für Neu- oder Umbauten von Stallgebäuden sind. Dies betrifft Betriebe mit mehr als 2.000 Mastschweinen oder 750 Sauen und Geflügelhaltungen mit mehr als 40.000 Tieren. Dabei werden die im Umfeld zu erwartenden Immissionen von bestimmten luftgetragenen Mikroorganismen, die als „Anlagenspezifische Leitparameter“ bezeichnet werden (siehe Kapitel 3) messtechnisch bestimmt oder über Ausbreitungsmodelle berechnet, um diese dann unter umweltmedizinischen Gesichtspunkten zu bewerten. Überschreitet, z. B. durch Emissionen aus einer zu beurteilenden Anlage, die Bioaerosol-Konzentration an einem Ort in der Umgebung der Anlage das Niveau der natürlichen

Hintergrund-Konzentrationen wird das als unerwünschte Zusatzbelastung betrachtet. Eine Schwierigkeit bei der Bewertung der Zusatzbelastung besteht in der breiten Streuung der natürlichen Hintergrundbelastung. Daher wurden sogenannte „Orientierungswerte“ und „Aufmerksamkeitswerte“ eingeführt (VDI Richtlinie 4250 Blatt 1). Für Gesamtbakterien wird beispielsweise der Aufmerksamkeitswert aus dem 90-Perzentilwert von generell gemessenen Hintergrundkonzentrationen abgeleitet. Werden diese Werte einzeln oder gemeinsam überschritten, kann eine Zusatzbelastung als relevant eingeschätzt werden.

In der VDI RL 4250 Blatt 3 wird für die vorgegebenen Leitparameter *Staphylococcus aureus*, Staphylokokken, Enterokokken und *Enterobacteriaceae* ein einheitlicher Orientierungswert genannt. Dieser ist die hypothetische (erfahrungsgemäße) untere Nachweisgrenze des in VDI RL 4253 Blatt 3 beschriebenen Impingerverfahrens (Waschflaschenverfahren zur Probenahme von Keimen aus Luft) von jeweils 80 KBE/m³, multipliziert mit einem Faktor 3. Dieser Faktor dient zum Ausgleich einer Vielzahl möglicher Unsicherheiten, wie z. B. nicht ausreichende Messdatenerfassung, Daten nicht immer als 6- oder 8- Stundenmittel vorliegend oder nur wenige Messdaten vorhanden. Daraus ergibt sich für alle vier Leitparameter ein Orientierungswert von 240 KBE/m³. Hier wird häufig bemängelt, dass es unsinnig sei, einen Orientierungswert basierend auf einer „unteren Nachweisgrenze“ eines festgelegten Verfahrens festzulegen, insbesondere, da das beschriebene Verfahren im Prinzip keine untere Nachweisgrenze hat, wie mittlerweile auch in der Neufassung der Richtlinie VDI 4253 Blatt 3 dargelegt wurde. Im Vergleich zu in verschiedenen Bereichen gemessenen Hintergrundkonzentrationen von Staphylokokken (Clauß et al. 2013b) erscheinen die entsprechenden Werte aus dem LAI-Leitfaden trotz allem plausibel. Die anderen Messparameter *Staphylococcus aureus*, Enterokokken und *Enterobacteriaceae* sind weniger als Leitparameter geeignet (siehe dazu auch Kapitel 3). *S. aureus* ist mit den standardisierten Methoden nur mit sehr großem Aufwand nachzuweisen und bereits im Messparameter „Staphylokokken“ enthalten, wo er z. B. in der Hühnerhaltung anteilig ca. 0,1 % – 10 % ausmacht. Enterokokken sind in sehr viel geringeren Konzentrationen in der Luft vorhanden als Staphylokokken und es treten auf den Nährböden häufig Kontaminationen auf, z. B. von *Aerococcus* spp. Die *Enterobacteriaceae* sind so empfindlich gegenüber dem luftgetragenen Zustand und sterben bereits vor oder auch während der Probenahme ab und sind somit kaum nachweisbar.

Werden die Orientierungswerte überschritten, folgt eine Sonderfallprüfung nach TA Luft. In dieser soll eine Gesamtwürdigung der vorhandenen Erkenntnisse innerhalb eines Fachgutachtens vorgenommen werden. Als kritisch bewertet der LAI-Leitfaden, nicht zuletzt aufgrund der oben geschilderten Schwierigkeiten und Einflussfaktoren, eine Staphylokokken-, Enterokokken- oder Enterobakteriaceen-Konzentration am Immissionsort aber erst ab dem doppelten oder dreifachen Wert, also erst ab 480 bis 720 KBE/m³. Unterhalb dieser Grenzen kann eine Sonderfallprüfung nach individueller Gesamtbeurteilung gemäß TA Luft demnach zu dem Ergebnis kommen, dass von keinerlei schädlicher Wirkung durch die Zusatzbelastung auszugehen sei. Das heißt, unterhalb dieser festgelegten Konzentrationen wird dann mit keinem Schaden gerechnet. Gemäß Kapitel 4.2 des LAI-Leitfadens zur Ermittlung und Bewertung von Bioaerosol-

Immissionen (Gesundheitliche Bewertung durch Fachgutachten) sollen bezüglich der Bioaerosole vorrangig die gemessenen oder prognostizierten Immissionen, das Keimspektrum und spezifische Bioaerosol-Messparameter betrachtet werden. Zusätzlich soll in die Beurteilung auch die Höhe der Überschreitungen von Orientierungswerten einbezogen werden. Dabei soll eine Überschreitung des Orientierungswertes für einen anlagenspezifischen Bioaerosol-Leitparameter um den Faktor 2 bis 3, jedoch maximal ein Wert von 10^3 KBE/m³, als sehr kritisch zu bewerten sein, da eine schädliche Wirkung dann nicht mehr mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden könne.

Eine Besonderheit in der VDI 4250 Blatt 1 ist, dass als Maßstab nicht der Durchschnittsbürger angenommen wird, sondern auf sensible (z. B. immunsupprimierte) Personen verwiesen wird. Im Gegensatz dazu wird bei der Entscheidung, ob Immissionen gegebenenfalls für einen Nachbarn unzumutbar sind, in der Regel nicht auf subjektive Empfindungen des Einzelnen, sondern das Empfinden des Durchschnittsbürgers abgestellt (z. B. VerwG Münster – 10 L 199/09).

Auch in anderen Ländern existieren diverse Regelwerke für die Messung und Bewertung von Bioaerosolen, hauptsächlich aus dem Bereich des Arbeitsschutzes. Diese enthalten teilweise auch Grenzwerte, die jedoch primär für Innenräume gelten. Ein Überblick über „Worldwide exposure standards for mold and bacteria“ findet sich in Brandys & Brandys (2003). In Bezug auf Bioaerosole in der Nutztierhaltung wird z. B. in Russland für die Haltung von Geflügel der „State Standard GOST 12.1.005-88“ angewendet, der generelle Hygieneanforderungen an die Luft an Arbeitsplätzen definiert. Diese Norm fand auch in der Ukraine bei der Bewertung von Geflügelstallluft Anwendung (Tsapko et al. 2011). In Australien existiert ein inoffizieller Grenzwert für die Endotoxinkonzentration in der einatembaren Staubfraktion (Grenzwert 10 mg/m³ Luft) von 50 EU/m³ (Banhazi 2008a, Cargill et al. 2002). Für Gesamtbakterien werden hier 1.0×10^5 KBE/m³ empfohlen. Auch in Polen ist mittlerweile für Arbeitsplätze (auch in der Tierhaltung) eine maximale Konzentration von 1.0×10^5 KBE/m³ akzeptiert, die jedoch in der Praxis häufig überschritten wird (Dutkiexicz & Gorny 2002, Brodka et al. 2012). In Skandinavien gilt derselbe „tolerated background level“ von 1.0×10^5 KBE/m³ Gesamtbakterien (Lavoie et al. 2007, Lavoie & Allard 2004, Goyer et al. 2001, Poulsen et al. 1995a, Malmros et al. 1992) und 1.0×10^3 KBE/m³ für Gram-negative Bakterien (Lavoie & Allard 2004, Goyer et al. 2001, Poulsen et al. 1995a, Malmros et al. 1992). In Großbritannien wurde die „Technical Guidance Note M9“ (2017) erarbeitet. Sie basiert im Wesentlichen auf VDI und CEN-Normen und beschreibt die Vor- und Nachteile verschiedener Probenahmesysteme wie Impinger, Andersen Impaktor und personengetragene Filtersammler. Sie fokussiert sich auf den standardisierten Nachweis von mesophilen Bakterien, thermotoleranten Schimmelpilzen und *Aspergillus fumigatus*. In den USA hat das „Institute of Inspection, Cleaning and Restoration Certification (IICRC)“ in „Dokument S520, Standard and Reference Guide for Professional Mold Remediation“ einen Grenzwert für Schimmelpilze von 1.0×10^5 cfu/m³ Sporen festgelegt. Wird diese überschritten, wird das Tragen persönlicher Atemschutzausrüstung empfohlen. In Südkorea gibt die „Korean indoor bioaerosol guideline“, eine Konzentration für Gesamtbakterien in Innenräumen von 800 KBE/m³ an, die nicht überschritten werden darf (Jo & Kang 2005). Einige EU Länder haben Grenzwerte für

Toxine, die von einigen Organismen gebildet werden können. In den Niederlanden betrug im Jahr 2010 der derzeitige Grenzwert für Endotoxine 90 EU/m³ (Dutch expert Committee on Occupational Safety 2010). Mittlerweile empfiehlt der Gesundheitsrat eine Grenze von 30 EU/m³ (Winkel & Wouters 2016). Die Messprotokolle für Emissionsmessungen an den niederländischen Tierhaltungsanlagen definieren Aarnink et al. (2015) in ihrem "Measurement protocol for emissions of bioaerosols from animal houses".

9 Vermeidungs- und Minderungsmaßnahmen

Ein gutes Stallmanagement und Hygienekonzept, unterstützt durch technische Lösungen wie die Abluftreinigung, ermöglichen eine Reduktion der Emission stallspezifischer Bioaerosole von weit über 90 %.

Einen umfangreichen und aktuellen Überblick über Minderungs- und Vermeidungsoptionen für Bioaerosole in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung geben Winkel et al. (2016). Eine Emissionsminderung kann sowohl durch Maßnahmen im Stall (verfahrensintegrierte Maßnahme), als auch in der Abluft erreicht werden. Grundsätzlich ist darauf zu achten, dass sich durch die gewählten Maßnahmen nicht die Emissionen der anderen Luftschadstoffe, wie z. B. Ammoniak, Methan, Geruch oder Staub erhöhen. Im Idealfall sollten Emissionen bereits an der Quelle gemindert oder besser noch dort vermieden werden. Die nachhaltigste Methode ist dabei eine Verringerung der Tierzahlen bzw. der Belegungsdichte in den Ställen (Petersen et al. 1978, Pavicic et al. 2006, Petkov & Tsutsumanski 1975, Sowiak et al. 2011). Hierdurch nimmt auch der Infektionsdruck im Stall ab und die Krankheits- und Mortalitätsrate sinkt (Spindler & Hartung 2009).

Einen großen Einfluss auf die Menge und die Zusammensetzung von Bioaerosolen in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung hat die Haltungform (Sowiak et al. 2011). Generell sind Haltungformen ohne Einstreu emissionsarmer als solche mit Einstreu. Bei letzteren werden häufig relativ hohe Konzentrationen an Schimmelpilze und Bakterien gefunden (Kim et al. 2008, Letourneau et al. 2009). Haltungformen, die den Tieren eine artgerechte Bewegung ermöglichen, sind in der Regel stärker mit Bioaerosolen und Staub belastet. So wurden z. B. bei Legehennen in der Bodenhaltung und in Voliersystemen, beides Haltungformen die den Hühner im Vergleich zur Käfighaltung bzw. dem ausgestalteten Käfig relativ viel Bewegungsfreiheit bieten, vergleichsweise hohe Konzentrationen luftgetragener Bakterien gefunden (Just et al. 2011, Zheng et al. 2013, Clauß 2014). Nach dem Verbot der Käfighaltung in Deutschland und der Schweiz wurde daher eine verstärkte Ausbreitung von Krankheiten durch die schlechtere Luftqualität in den alternativen Legehennenhaltungen und dadurch hervorgerufene ökonomische Verluste befürchtet. Dies hat sich bislang jedoch nicht bewahrheitet, vor allem aufgrund der weitgehenden Einhaltung von guten Hygienestandards und der regelmäßigen Impfungen (Kaufmann & Hoop 2009).

Generell ist davon auszugehen, dass eine Minderung der Staubbelastung in der Luft auch zu einer Minderung der Bioaerosolkonzentration führt, da Bioaerosole den biologischen Anteil des Staubes darstellen. Eine der wichtigsten Maßnahme zur Vermeidung von Emissionen fast jeglicher Art ist die Optimierung der Hygiene in den Ställen z. B. durch die regelmäßige Reinigung kontaminierter Oberflächen (Banhazi 2008b, Zucker et al. 2005) und das rechtzeitige Entfernen von Kot aus den Ställen (Chang et al. 2001a). Dieser ist eine der stärksten Quellen von

Bioaerosolkomponenten, z. B. auch von Endotoxinen (Eckhardt 2008). Bei der Bodenhaltung von Hühnern konnte durch die Entmistung der Bodenfläche in Verbindung mit einer dreimaligen Kotbandräumung pro Woche die Gesamtzahl luftgetragener Bakterien im Stall um über 90 % gesenkt werden (Anonymous 2013b). Die dadurch erreichbare Verbesserung der Luftqualität hat auch einen positiven Einfluss auf die Gesundheit und das Wohlergehen der Tiere (Duchaine et al. 2000, Hadina et al. 2003). In der Schweinehaltung zeigten Stallsysteme die eine Separierung von Fest- und Flüssigmist ermöglichen geringere Emissionen als die konventionellen Systeme (Chien et al. 2011, Létourneau et al. 2009). Weiteres Potential zur Verringerung von Bioaerosolemissionen bietet eine optimierte Fütterung (Sowiak et al. 2011). Verschiedene Futter können eine Menge Mikroorganismen enthalten (Zhao 2011), die auch in großer Zahl in die Luft gelangen können, abhängig davon wie das Futter verabreicht wird (Chang et al. 2001a, Pearson & Sharples 1995). Diesbezüglich kann vor allem die manuelle Fütterung durch den Landwirt zu hohen Emissionen führen (Kim et al. 2008). Bei der Fütterung von Rindern können große Mengen Aktinomyzeten und Schimmelpilze freigesetzt werden (Evans 2017). Hier kann eine vorgelagerte Futtertrocknung die Emissionen verringern (Dalphin et al. 1991, Ferri et al. 2003). Generell sind Aufwirbelungen von Futter zu vermeiden. Hier kann auch ein intelligentes Lüftungskonzept, welches für einen gleichmäßigen ruhigen Luftstrom in den Ställen sorgt, zur Minderung von Bioaerosolen beitragen (Sowiak et al. 2011, Brodka et al. 2012, Hillmann et al. 1992).

Neben dem Einfluss der verschiedenen Haltungsformen und den managementbedingten Minderungsmaßnahmen gibt es weitere technische Möglichkeiten zur Reduktion von Bioaerosolemissionen (Aarnink et al. 2005). In den Ställen werden als besonders wirksam verschiedene Sprüh- und Applikationssysteme für Öle genannt (Lemai et al. 2009), die auf dem Boden Filme bilden sollen. Hierdurch soll vor allem eine Aerosolbildung aus kothaltigen Substanzen verhindert werden (Eckhardt 2008). Auch beim Versprühen besonders von ätherischen Ölen, stellten verschiedene Autoren eine deutliche Reduktionen bei den Bioaerosolen fest (Bakutis et al. 2011, Kim et al. 2006, Siggers et al. 2011, Cravens et al. 1981). Insbesondere konnte dabei eine Konzentrationsminderung von coliformen Bakterien und Staphylokokken in der Luft festgestellt werden (Witkowska & Sowinska 2013, Witkowska & Sowinska 2017). Neben Ölen und Öl/Wasser-Gemischen (Kiryuchuk et al. 1999) werden auch das Vernebeln von verschiedenen Desinfektionsmitteln (Shokri 2016) oder das Versprühen von „slightly acidic electrolyzed water“ als wirksam angesehen (Zheng et al. 2013). Als wirksamste Methode zur Reduktion von Bioaerosolemissionen haben sich bis jetzt Abluftreinigungsanlagen herausgestellt. Vor allem nach dem DLG-Signumtest zertifizierte (DLG 2006) biologische und chemische Abluftwäscher sowie kombinierte Anlagen können, sofern sie ordnungsgemäß betrieben werden, nicht nur nachweislich stallspezifische luftgetragene Mikroorganismen um über 90 % reduzieren, sondern zusätzlich auch noch Ammoniak, Geruch und Staub zu mehr als 70 % (Anonymous 2013a, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2015b, Chmielowiec-Korzeniowska et al. 2007, Ottengraf & Konings 1991, Scharf 2004, Seedorf & Hartung 1999, Martens et al. 2001, Schirz et al. 2003, Clauß et al. 2013c, Sächsisches Landesamt 2017). Während für die Schweinehaltung eine Fülle von Systemen verschiedener Hersteller zur Verfügung stehen und eine wirksame Emissionsminderung für Ammoniak, Staub, luftgetragene Mikroorganismen und

Geruch nachgewiesen ist, müssen für die Geflügelhaltung erst noch geeignete Verfahren entwickelt werden (Chmielowiec-Korzeniowska et al. 2007, Hahne 2014). Erste orientierende Messungen von Anlagen in der Haltung von Masthähnchen ergaben Abscheidegrade zwischen 70 % und 90 % und entsprachen damit den Werten, die auch für die Staubabscheidung ermittelt wurden. Wegen der hohen Volumenströme und den damit verbundenen kurzen Verweilzeiten werden Abluftreinigungsanlagen für Masthähnchen meist als einstufige Chemowäscher konzeptioniert, wobei mit sauren Waschwässern (pH-Wert 3-5) gearbeitet wird, um eine sichere Ammoniakabscheidung zu gewährleisten (Clauß & Hahne 2017). In den sauren Waschlösungen können aber säuretolerante Pilze wachsen, sofern der Staub als Nährstoffquelle nicht in einer vorgeschalteten Verfahrensstufe abgeschieden wird oder dem Waschwasser Fungizide zugesetzt werden. Vor allem in der Geflügelhaltung werden bei den hohen Staubkonzentrationen Trockenfilterwände als sinnvolle Zusatzmaßnahme erachtet. Ein weiteres Forschungsgebiet sind hier zu diesem Zweck Elektrofilter, die aber für den Einsatz in Tierställen noch weiter untersucht werden müssen.

Aus der Perspektive des Tierschutzes sind „end of pipe“-Abluftreinigungsanlagen keine erstrebenswerte Lösung, da sie die Konzentrationen von Luftschadstoffen im Stall nicht vermindern. Besser wären nachrüstbare Abluftreinigungsanlagen an, die z. B. in vorhandenen Sammelkanälen integrierbar sind, oder kleine, z. B. 2-stufig aufgebaute Umluftwäscher zur Integration in einem Stallabteil (Schulz et al. 2013). Ein Umluftwäscher mit unabhängiger Luftumwälzung muss dabei eine Entstaubung (auch Reduktion von Bioaerosolen) sowie eine Ammoniakabscheidung gewährleisten. Die Standzeiten der Systeme wären so auszulegen, dass eine Reinigung mit der Ausstellung der Tiere synchronisiert werden kann. Diese Systeme könnten somit auch zur Verbesserung der Luftqualität im Stall beitragen und einen Beitrag zum Tierschutz leisten (Clauß & Hahne 2017).

In Zukunft sollte der Fokus besonders auf Abluftreinigungsanlagen gelegt werden, die auch in bestehenden Tierställen nachgerüstet werden können und bereits im Stall die Luftschadstoffkonzentrationen verringern und so auch einen Beitrag zum Tierschutz leisten. Kombiniert mit einer intelligenten Lüftungstechnik und einer Zuluftkonditionierung könnten die die Bioaerosolemissionen weiter gesenkt werden. Als besonders zielführend wird die Kombination der verschiedenen Maßnahmen gesehen, angefangen beim Haltungsverfahren, über Management und Hygienekonzept, Fütterung und Entmistungstechniken bis hin zu den genannten technischen Lösungen im Stall und in der Abluft.

10 Zukünftige Herausforderungen

Saubere Luft ist unsere lebenswichtigste Ressource. Diese gilt es auch zukünftig zu schützen. Bioaerosole sind im Bereich der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung relevante Luftschadstoffe, die in den dort auftretenden Konzentrationen vor allem in den Ställen, synergistisch mit den anderen Stallluftkomponenten, einen negativen Einfluss auf die Gesundheit haben können. Bei der zukünftig zu erwartenden weiteren Steigerung der Tierzahlen werden sich die Probleme zwangsläufig vergrößern. Von einer validen gesundheitlichen Bewertung oder sogar der Ableitung einer Dosis-Wirkungs-Beziehung sind wir noch weit entfernt, jedoch sind erste Schritte in diese Richtung bereits getan und nun gilt es diesen Weg weiter konsequent zu beschreiten. Dabei sind die kommenden Herausforderungen verschiedener Natur. Messtechnisch gilt es die Bioaerosolkomponenten weiter zu charakterisieren, um ein genaueres Bild der Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft in der Luft von Tierställen zu erlangen. Dabei können zukünftig die kulturbasierten Verfahren verstärkt in Kombination mit molekularbiologischen Methoden ihren Beitrag leisten. Bei beiden Verfahren schreitet die Entwicklung stetig voran. Die in Deutschland augenscheinlich bisher fast gänzlich vernachlässigten luftgetragenen Viren sollten dabei stärker in den Fokus rücken, da unter ihnen bedeutende Krankheitserreger sind, die auch das Potential haben Pandemien auszulösen. Diesbezüglich sollten vor allem die Zoonoseerreger untersucht werden. Aufgrund der hohen tageszeitlichen Konzentrationsschwankungen sollten Bioaerosole zukünftig nicht nur tagsüber sondern auch nachts gemessen werden. Für die Nacht gibt es bisher so gut wie keine Daten. Ebenso muss die Verteilung der Bioaerosole in den gesundheitlich relevanten Partikelgrößenfraktionen weiter untersucht werden, da diese sowohl für die umweltmedizinische Bewertung, als auch für Ausbreitungsprognosen wichtig ist. Auf keinen Fall dürfen künftig fraktionierte Staubmessungen von PM_{10} oder $PM_{2,5}$ die Messung von Bioaerosolen ersetzen, da neuste Untersuchungen zeigen, dass nur ein geringer Prozentsatz der Bioaerosole aus der Nutztierhaltung in diesen beiden Partikelfraktionen zu finden sind. Ebenfalls besser untersucht werden sollten die Prozesse, die bei der Transmission der Bioaerosole von der Emissionsquelle hin zur Immission eine Rolle spielen und hier in erster Linie die Tenazität der Mikroorganismen. Eine weitere Standardisierung bzw. Vereinheitlichung von Methoden zur besseren Vergleichbarkeit von Ergebnissen bei bestimmten Fragestellungen ist wünschenswert, auf nationaler Ebene z. B. im Rahmen von VDI-Richtlinien oder auch international z. B. im Rahmen des VERA-Protokolls. Im Bereich der gesamten Produktionskette der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung wurden bis jetzt vor allem Anlagen zur Haltung der Tiere untersucht. Es ist aber kaum bekannt, was z. B. bei der Prozession oder dem Transport von Futtermitteln, bei der Fleischproduktion oder dem Ausbringen von Gülle zusätzlich an Bioaerosolen frei wird. Auch gibt es, gemessen an den Anteilen an der gesamten Geflügelfleischproduktion, ein deutliches Wissensdefizit zu Bioaerosolen in der Putenhaltung. Um die Entstehung von Bioaerosolen bereits an der Quelle zu verhindern ist ein gutes Stallmanagement wichtig. Zur Emissionsminderung ist die Abluftreinigung zurzeit das effektivste Verfahren, um Bioaerosole aber gleichzeitig auch

andere relevante Luftschadstoffe signifikant zu reduzieren. Hier sollte in Zukunft der Fokus auf die Entwicklung von auf Bestandsanlagen angepassten, möglichst nachrüstbaren Abluftreinigungssystemen gelegt werden, welche vorzugsweise im Stall installiert werden, um die Luftqualität bereits dort verbessern. So können diese Systeme gleichzeitig einen Beitrag zum Umweltschutz und zum Tierschutz leisten. Hierbei wird es als besonders zielführend angesehen, diese Technik mit anderen zur Verfügung stehenden Minderungsmaßnahmen zu kombinieren, wie z. B. der Zuluftkonditionierung.

Literatur

- Aarnink, A. J. A., Roest, H. I. J., Cambra-Lopez, M., Zhao, Y., Mosquera, J., Ogink, N. W. M. (2012): Emissions and concentrations of dust and pathogens from goat houses. In: Proceedings of the Ninth International Livestock Environment Symposium (ASABE), Valencia Spain 2012.
- Aarnink, A. J. A., Landman, W. J. M., et al. (2005): Systems for eliminating pathogens from exhaust air of animal houses. Proc. ASAE Seventh International Symposium Livestock Environment tVII, Beijing, China.
- Aarnink, A. J. A., Zhao, Y., Ogink, N. W. M. (2015): Measurement protocol for emissions of bioaerosols from animal houses. Wageningen UR (University & Research centre) Livestock Research, Livestock Research Report 878.
- Abdel Hameed, A. A., Shakour, A., Yasser, H. I. (2003): Evaluation of bioaerosols at animal feed manufacturing industry: A case study. *Aerobiologia* 19: 89–95.
- Abd-Elall, A. M., Mohamed, M. E., Awadallah, M. A. (2009): Potential airborne microbial hazards for workers on dairy and beef cattle farms in Egypt. *Vet Ital.* 45:275-285.
- Adell, E., Moset, V., Zhao, Y., Cerisuelo, A., Cambra-López, M. (2011a): Concentración, distribución espacial y por tamaño de bacterias aerobias mesófilas en el aire de granjas de broilers. *ITEA* 107(2):77-93 (In Spanish).
- Adell, E., Moset, V., Zhao, Y., Cerisuelo, A., Cambra-López, M. (2011b): Concentración de bacterias aerobias mesófilas y material particulado en el aire de granjas de broilers. *AIDA, XIV Jornadas sobre producción animal, Tomo I*, 82-84 (In Spanish).
- Adhikari, A., Sen, M. M., Bhattacharya, S., Chanda, S. (2004): Volumetric assessment of airborne fungi two sections of rural indoor dairy cattle shed. *Environ. Intern.* 29:1071-1078.
- Adler, B., Moctezuma, A. (2010): *Leptospira* and leptospirosis. *Vet. Microbiol.* 140(3–4):287-296.
- Aengst, C. (1984): The composition of dust in a pig fattening house [Zur Zusammensetzung des Staubes in einem Schweinemaststall]. Dissertation Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Agabou, A. (2009): Air-borne bacterial contaminations in two broiler hatcheries in the North-East of Algeria. *Vet. World* 2(2):49-50.
- Agranovski, V., Reponen, T., Ristovski, Z. (2007): Survey of bioaerosol emissions from Australian poultry buildings. European Aerosol Conference. Salzburg.
- Agranovski, V., Ristovski, Z., Blackall, P., Morawska, L. (2004): Size-selective assessment of airborne particles in swine confinement building with the UVAPS. *Atmospheric Environment*, 38(23), pp. 3893-3901.
- Ahmed, M. F., J., Schulz, J., Hartung, J. (2013): Air samplings in a *Campylobacter jejuni* positive laying hen flock. *Ann. Agric. Environ. Med.* 20:16–20.
- Ajoudanifar, H., Hedayati, M. T., Mayahi, S., Khosravi, A., Mousavi, B. (2011): Volumetric assessment of airborne and outdoor fungi at poultry and cattle houses in the Mazandaran Province, Iran. 62:243-248.
- Alam, M. J., Renter, D., Taylor, E., Mina, D., Moxley, R., Smith, D. (2009): Antimicrobial susceptibility profiles of *Salmonella enterica* serotypes recovered from pens of commercial feedlot cattle using different types of composite samples. *Curr. Microbiol.* 58(4):354-359.

- Alexandersen, S., Brotherhood, I., Donaldson, A.I., (2002): Natural aerosol transmission of foot-and-mouth disease virus to pigs: minimal infectious dose for strain O1 Lausanne. *Epidemiol. Infect.* 128:301–312.
- Allan, G. M., McNeilly, F., Kennedy, S., Daft, B., Clarke, E. G, Ellis, J. A, Haines, D. M., Meehan, B. M, Adair, B. M. (1998): Isolation of porcine circovirus-like viruses from pigs with a wasting disease in the USA and Europe. *J. Vet. Diagn. Invest.*, 10:3-10.
- Alonso, C., Goede, D. P., Morrison, R. B., Davies, P. R., Rovira, A., Marthaler, D. G., Torremorell, M. (2014): Evidence of infectivity of airborne porcine epidemic diarrhea virus and detection of airborne viral RNA at long distances from infected herds. *Vet. Res.* 45:73.
- Alonso, C., Raynor, P. C., Davies, P. R., Torremorell, M. (2015): Concentration, Size Distribution, and Infectivity of Airborne Particles Carrying Swine Viruses. *PLoS One* 19;10(8):e0135675.
- Alt, K., Fetsch, A., Schroeter, A., et al. (2011): Factors associated with the occurrence of MRSA CC398 in herds of fattening pigs in Germany. *BMC Vet. Res.* 2011;7:69.
- Al-Tawfiq, J.A., Zumla, A., Memish, Z. A. (2014): Travel implications of emerging coronaviruses: SARS and MERS-CoV. *Travel Med. Infect. Dis.* 12:422–428.
- Alvarado, C. S., Gandara, A., Flores, C., Perez, H. R., Green, C. F., Hurd, W. W., Gibbs, S. G. (2009): Seasonal changes in airborne fungi and bacteria at a dairy cattle concentrated animal feeding operation in the southwest United States. *J. Environ. Health* 71(9):40-44.
- Alwis, K. U., Milton, D. K. (2006): Recombinant Factor C assay for measuring endotoxin in house dust: Comparison with LAL and (1-3)-beta-D-Glucans. *Am. J. Ind. Med.* 49:296-300.
- Amann, R. I., Ludwig, W., Schleifer, K. H. (1995): Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation. *Microbiol. Rev.* 59:143-169.
- Anderson, B. D., Lednicky, J. A., Torremorell, M., Gray, G. C. (2017): The Use of Bioaerosol Sampling for Airborne Virus Surveillance in Swine Production Facilities: A Mini Review. *Front. Vet. Sci.* 4:121.
- Anderson, J. D. (1966): Biochemical studies of lethal processes in aerosols of *Escherichia coli*. *J. Gen. Microbiol.* 45(2):303–313.
- Angersbach-Hegers, S. (2002): Untersuchungen zur Emission und Verfrachtung luftgetragener Mikroorganismen von der Auslauffläche einer Legehennenfreilandhaltung. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Anonymous (2012): Schlussbericht „Erarbeitung von Managementempfehlungen zur Kleingruppenhaltung für Legehennen unter Praxisbedingungen im Vergleich zur Volierenhaltung“ (2807UM009).
- Anonymous (2013a): Prüfung und Bewertung der biologischen Sicherheit von anerkannten Abluftreinigungsanlagen in der Nutztierhaltung. Abschlussbericht. Download: download.ble.de/07UM003/07UM003_BioAbluftRein_AB.pdf.
- Anonymous (2013b): Landwirtschaftliche Untersuchungs- und Forschungsanstalt Nord-West: Modellvorhaben „Landwirtschaftliches Bauen 2011 – 2013“, Bodenhaltung von Legehennen – Maßnahmen zur Minderung luftgetragener Belastungen im Stall, Abschlussbericht.
- Anonymous (2015): Kernaussagen von Internem Fachgespräch „Keime aus Tierhaltungs- und Biogasanlagen -Auswirkungen auf menschliche Gesundheit und Umwelt“. https://www.umwelt.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/umwelt/fachgespraech_gesundheit_kernaussagen.pdf, letzter Zugriff am 22.09.2017.

- Appleby, M. C., Hughes B. O. (1991): Welfare of laying hens in cages and alternative systems: Environmental, physical and behavioural aspects. *World's Poultry Sci. J.* 47:109-128.
- Arné, P., Thierry, S., Wang, D., Deville, M., Le Loch, G., Desoutter, A., Féménia, F., Nieguitsila, A., Huang, W., Chermette, R., Guillot, J. (2011): *Aspergillus fumigatus* in Poultry. *Int. J. Microbiol.* Article ID 746356, 14 pages.
- Attwood, P., Brouwer, R., Ruigewaard, P., Versloot, P., Wit, R., Heederik, D., Boleij, J. S. M. (1987): A study of the relationship between airborne contaminants and environmental factors in Dutch swine confinement buildings. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 48(8):745–751.
- Attwood, P., Versloot, P., Heederik, D., de Wit, R., Boleij, J. S. M. (1986): Assessment of dust and endotoxin levels in the working environment of Dutch pig farmers: a preliminary study. *Ann. Occup. Hyg.* 30:201-208.
- AVEC 2016. Annual Report. Association of Poultry Processors and Poultry Trade in the EU Countries-ASBL. AVEC, Belgium.
- Awad, A. H. A., Elmorosy, T. H., Farwater, P. M., Green, C. H. F., Gibbs, S. G. (2010): Air biocontamination in a variety of agricultural industry environments in Egypt: a pilot study. *Aerobiologia* 26:223.
- Bækbo, P. (1998): Effects of noxious gases, dust and microorganisms on the incidence and severity of respiratory diseases in pigs. *Proceedings of the 15th IPVS Congress, Birmingham, England*, 135–142.
- Baïkov, B. D., Petkov, G. (1986): Microbial contamination of the air in the housing of laying hens. *Vet Med Nauki.* 23(8):78-82 (Artikel auf Bulgarisch).
- Baïkov, B. D., Petkov, G. (1987): Microbial contamination of the air in the commercial production of poultry meat. *Vet. Med. Nauki.* 24(1):80-87. [In Bulgarisch]
- Baird-Parker, A. C. (1962). The occurrence and enumeration, according to a new classification, of micrococci and staphylococci in bacon and on human and pig skin. *J. Appl. Microbiol.* 25:352-361.
- Bakutis, B., Baliukoniene, V., Mickienė, R. (2011): The use of essential oils to improve of environment quality in poultry houses. *Proc. 15th ISAH Congress, Vienna, Austria.* 2:643–645.
- Bakutis, B., Monstvilienė, E., Januscevičienė, G. (2004): Analyses of Airborne Contamination with Bacteria, Endotoxins and Dust in Livestock Barns and Poultry Houses. *Acta. Vet. Brno* 73:283-289.
- Banhazi, T., Wegiel, J., Cargill, C. (2002): Ozone Treatment of Air in Weaner Accomodation. *Anim. Prod. Aust.* 24:379.
- Banhazi, T. M., Seedorf, J., Rutley, D. L., Pitchford, W. S. (2008a): Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 2. Airborne pollutants. *J. Agric. Saf. Health* 14(1):21-39.
- Banhazi, T.M., Seedorf, J., Rutley, D. L., Pitchford, W. S. (2008b): Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 1. Study justification and design. *J. Agric. Saf. Health.* 14(1):5-20.
- Banhazi, T. M., Rutley, D. L., Pitchford, W. S. (2008c): Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 4. Emission factors and study recommendations. *J. Agric. Saf. Health* 14(1):53-69.
- Banhazi, T. (2012): Quantification of environmental conditions in Australian livestock buildings. In: *Proceedings of the Ninth International Livestock Environment Symposium ASABE, Valencia Spain.*

- Barbara, E. M. (1997): Vancomycin-resistant enterococci. *Am. J. Med.* 102(3):284-293.
- Baur, X., Bergmann, K.-C., Kroidl, R., Merget, R., Müller-Wening, D. und Nowak, D. (1998): Empfehlungen zur Prävention des Berufssthmas. *Pneumologie* 52:504-514.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2015a): Ermittlung der Bioaerosolbelastung im Umfeld von Mastgeflügelanlagen; Endbericht Teil 1 zum Forschungsvorhaben P 2110
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2015b): Emissionsminderung durch Abgasreinigung in bayerischen Tierhaltungsanlagen; Endbericht Teil 2 zum Forschungsvorhaben P 2110
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (2011): Intensivtierhaltung: Umweltrelevante Emissionen und Immissionen (Feinstaub -PM10, PM2,5, NH3, N2O, CH4, NMVOC, Keime, Pilze, Endotoxine). Endbericht zum Forschungsvorhaben.
- Baykov, B., Stoyanov, M. (1999): Microbial air pollution caused by intensive broiler chicken breeding. *FEMS Microbiol. Ecol.* 29(4):389-392.
- Beebe, J. M. (1959): Stability of disseminated aerosols of *Pasteurella tularensis* subjected to simulated solar radiations at various humidities. *J. Bacteriol.* 78(1):18-24.
- Beer, K. (1973): Untersuchung zum Einfluss der abiotischen und biotischen Umweltfaktoren auf die Stallkeimflora unter besonderer Beachtung des Einflusses technologischer Faktoren. Dissertation Universität Leipzig.
- Benham, C. L. and J. W. Egdell. (1970): Levels of airborne bacteria in milking premises. *J. Soc. Dairy Technol.* 23:91.
- Bennett, R., Christiansen, K., Clifton-Hadley, R. (1999): Preliminary estimates of the direct costs associated with endemic diseases of livestock in Great Britain. *Prev. Vet. Med.* 39:155-171..
- Beran G.W. (2008): Disease and destiny—mystery and mastery, *Prev. Vet. Med.* 86:198-207.
- Berger, I., Schierl, R., Ochmann, U., Egger, U., Scharrer, E., Nowak, D. (2005): Concentrations of dust, allergens and endotoxin in stables, living rooms and mattresses from cattle farmers in southern Bavaria. *Ann. Agric. Environ. Med.* 12:101-107.
- Berrang, M. E., Cox, N. A., Bailey, N. S. (1995): Measuring air-borne microbial contamination of broiler hatching cabinet. *J. Appl. Poul. Res.* 4:83-87.
- BGIA (2002): 9450- Verfahren zur Bestimmung der Endotoxinkonzentration in der Luft am Arbeitsplatz. BGIA-Arbeitsmappe, Kennzahl 28:1-7.
- Blackall, R.M., Gloster, J. (1981): Forecasting the airborne spread of foot and mouth disease. *Weather* 36:162-167.
- Blom, J. Y., Madsen, E. B., Krogh, H. V., Wolstrup, J. (1984): Numbers of airborne bacteria and fungi in calf houses. *Nord Vet. Med.* 36(7-8):215-220.
- Blomberg, Springorum, Winter, Öttl, Hinz, Hartung, Rieger (2009): Abschlussbericht Projekt 05HS012/1-2 Beurteilung verschiedener Haltungssysteme für Legehennen aus Sicht des Arbeits- und Umweltschutzes: Belastungen durch luftgetragene Stäube und Mikroorganismen.
- Boeniger, M. F., Lummus, Z. L., Biagini, R. E., Bernstein, D. I., Swanson, M. C., Reed, C., Massoudi, M. (2001): Exposure to protein aeroallergens in egg processing facilities. *Appl. Occup. Environ. Hyg.* 16(6):660-670.
- Bogosian, G., Bourneuf, E. V. (2001): A matter of bacterial life and death. *EMBO reports* 2(9):770 – 774.
- Bonifait, L., Veillette, M., Letourneau, V., Grenier, D., Duchaine, C. (2014): Detection of *Streptococcus suis* in bioaerosols of swine confinement buildings. *Appl. Environ. Microbiol.* 80(11):3296-3304.

- Borlée, F., Yzermans, C. J., Aalders, B., Rooijackers, J., Krop, E., Maassen, C. B. M., Schellevis, F., Brunekreef, B., Heederik, D., Smit, L. A. M. (2017): Air Pollution from Livestock Farms is Associated with Airway Obstruction in Neighboring Residents. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* doi: 10.1164/rccm.201701-0021OC.
- Boutin, P., Torre, M., Serceau, R., Rideau, P. J. (1988): Atmospheric bacterial contamination from landspreading of animal wastes: Evaluation of the respiratory risk for people nearby. *J. Agric. Eng. Res.* 39:149–160.
- Bovallius, A., Bucht, B., Roffey, R., Anäs, P. (1978): Long-range air transmission of bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 35(6):1231-1232.
- Brandys, R. C., Brandys, G. M. (2003): Worldwide exposure standards for mold and bacteria- With assessment guidelines for air, water, dust, ductwork, carpet and insulation. 10th edition, OEHCS, Inc, Hinsdale, USA.
- Brauner, P., Klug, K., Jäckel, U. (2016): Eggshells as a source for occupational exposure to airborne bacteria in hatcheries. *J. Occup. Environ. Hyg.* 13(12):950-959.
- Bremer, H., Dennis, P.P. (1987): *Escherichia coli* and *Salmonella typhimurium*: Cellular and Molecular Biology, F.C. Neidhardt, et al., Editors. 1987, American Society for Microbiology: Washington, D. C.,1553-1569.
- Brichta-Harhay, D. M., Arthur, T. M., Bosilevac, J. M., et al. (2011): Diversity of multidrugresistant salmonella enterica strains associated with cattle at harvest in the United States. *Appl. Environ. Microbiol.* 77(5):1783-1796.
- Brodie, E. L., DeSantis, T.Z., Parker, J.P.M., Zubietta, I.X., Piceno, Y.M., Andersen, G.L. (2007): Urban aerosols harbor diverse and dynamic bacterial populations. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 104:299–304.
- Bródka, K., Kozajda, A., Buczyńska, A., Szadkowska-Stańczyk, I. (2012): The variability of bacterial aerosol in poultry houses de-pending on selected factors. *Int. J. Occup. Med. Environ. Health* 25:281–293.
- Brooks, S. M., Truncale, T. und McCluskey, J. (2007): Occupational and Environmental Asthma, In: Rom, W. N. und Markowitz, S. B. (Eds.): *Environmental and Occupational Medicine*, 2007 Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, ISBN 0 7817 6299 5.
- Brooks, J. P., McLaughlin, M. R., Scheffler, B., Miles, D.M. (2010): Microbial and antibiotic resistant constituents associated with biological aerosols and poultry litter within a commercial poultry house. *Sci. Total Environ.* 408:4770–4777.
- Burge, H. A. (1995): Airborne contagious disease. In: *Bioaerosols*, Harriet A. Burge (Hrsg.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 25-47.
- Butera, M., Smith, J. H., Morrison, W. D., Hacker, R. R., Kains, F. A., Ogilvie, J. R. (1991): Concentration of respirable dust and bioaerosols and identification of certain microbial types in a hog-growing facility. *Can. J. Anim. Sci.* 71(2):271-277.
- Cambra-López, M., Aarnink, A.J.A., Zhao, Y., Calvet, S. und Torres, A.G. (2010): Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem. *Environ. Poll.* 158:1–17.
- Cargill, C., T. Murphy, Banhazi, T. (2002): Hygiene and air quality in intensive housing facilities in Australia. In *Animal Production in Australia*, 387-393. D. K. Revell and D. Taplin, eds. Adelaide, South Australia: Australian Society of Animal Production.

- Chai, T. (1998): Vorkommen von luftgetragenen Keimen in Rinderställen und der Stallumgebung unter besonderer Berücksichtigung von *Clostridium perfringens*. Journal Nr. 2184, Freie Universität Berlin, 58-59.
- Chai, T. J., Chai, J. Q., Mueller, W. (1999): Airborne microorganisms of a calf stable and spreading to its environment. Chin. J. Prev. Vet. Med. 21:311–313.
- Chai, T. J., Zhang, J. X., Hou, Y. P., Zhao, Y. L. (2001a): Spread of microorganism aerosol in animal house to its environments. Anim. Husbandry Vet. Med. 33:10–12.
- Chai, T., Müller, B. A., Zucker, B. A. (1997): Untersuchungen zum Luftkeimhaushalt in Tierställen 1: Mitt.: Der anaerobe Luftkeimhaushalt in einem Kälberstall unter besonderer Berücksichtigung von *Clostridium perfringens*. J. Berl. Münch. Tierärztl. Wschr. 110:1-4.
- Chai, T., Wang, Y., Lu, G., Song, C., Sun, Y., Qi, C. (2007): Identification of airborne fungi from indoor air of chicken houses by RAPD-PCR. Proceedings of the ISAH-2007 Tartu, Estonia 712-721.
- Chai, T., Zhao, Y., Liu, H., Liu, W., Huang, Y., Yin, M., Li, W. (2001b): Studies on the concentration and aerodynamic diameters of microbiological aerosol in the poultry house. Chinese J. Vet. Med. 37(3):9-11. (in Chinesisch).
- Chai, T.J., Zhao, Y.L., Liu, W.B. (2003): The resistance against antibiotics of bacteria from a poultry house and their spreading to surroundings of the house. Chin. J. Prev. Vet. Med., 25(3):209–214 (in Chinesisch).
- Chang, C. W., Chung, H., Huang, C. F., Su, H. J. J. (2001a): Exposure Assessment to Airborne Endotoxin, Dust, Ammonia, Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide in Open Style Swine Houses. Ann. Occup. Hyg., 45(6): 457–465.
- Chang, C. W., Chung, H., Huang, C. F., Su, H. J. J. (2001b). Exposure of workers to airborne microorganisms in open-air swine houses. Appl. Environ. Microbiol. 67(1): 155-161.
- Chang, C. W., Gustavo, R. K., Fernandes, E., Pan, Y-L., Aptowicz, K., Pinnick, R. G. (2007): The Quest for Detection and Identification of Bio-aerosols. Progress In Electromagnetics Research Symposium 2007, Beijing, China, March 26-30.
- Chapin, A., Rule, A., Gibson, K., Buckley, T., Schwab, K. (2004): Airborne Multidrug-Resistant Bacteria Isolated from a Concentrated Swine Feeding Operation. Environ. Health Perspec. 113(2):137-142.
- Chatard-Pannetier, A., Rousset, S., Bonin, D., et al. (2004): Nutritional knowledge and concerns about meat of elderly French people in the aftermath of the crises over BSE and foot-and-mouth. Appetite 42:175–183.
- Chew, G. L., Rogers, C., Burge, H. A., Muilenberg, M. L. und Gold, D. R. (2003): Dustborne and airborne fungal propagules represent a different spectrum of fungi with differing relations to home characteristics. Allergy 58:13-20.
- Chi, M-C., Li, C-S. (2006): Analysis of Bioaerosols from Chicken Houses by Culture and Non-Culture Method. Aerosol Sci. Technol. 40(12):1071-1079.
- Chi, M-C., Li, C-S. (2007): Fluorochrome in monitoring atmospheric bioaerosols and correlations with meteorological factors and air pollutants. Aerosol Sci. Technol. 41:672–678.
- Chiba, L. I., Peo, Jr., E. R., Lewis, A. J. (1987): Use of dietary fat to reduce dust, aerial ammonia and bacterial colony forming particle concentrations in swine confinement buildings. Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.) 30(2): 464-468.

- Chien, Y-C., Chen, C-J., Lin, T-H., Chen, S-H., Chien, Y-C. (2011): Characteristics of microbial aerosols released from chicken and swine feces. *J. Air & Waste Management Assoc.* 61(8):882-889.
- Chinivasagam H. N., Tran T., Maddock L., Gale A. and Blackall P. J. (2009): Mechanically Ventilated Broiler Sheds: a Possible Source of Aerosolized *Salmonella*, *Campylobacter*, and *Escherichia coli*. *Appl. Environ. Microbiol.* 75(23):7417-7425.
- Chinivasagam, H. N., Blackall, P. J. (2005): Investigation and application of methods for enumerating heterotrophs and *Escherichia coli* in the air within piggery sheds. *J. Appl. Microbiol.* 98(5):1137-1145.
- Chmielowiec-Korzeniowska, A., Tymczyna, L., Skórska, C., Sitkowska, J., Cholewa, G., Dutkiewicz, J. (2007): Efficacy of a novel biofilter in hatchery sanitation: I. Removal of airborne bacteria, dust and endotoxin. *Ann. Agric. Environ. Med.* 14(1):141-150.
- Cho, J. G., Dee, S. A., et al. (2006): The impact of animal age, bacterial coinfection, and isolate pathogenicity on the shedding of Porcine reproductive and respiratory syndrome virus in aerosols from experimentally infected pigs. *Can. J. Vet. Res.* 70:297-301.
- Choudat, D., Goehen, M., Korobaeff, M., Boulet, A., Dewitte, J. D., Martin, M. H. (1994): Respiratory symptoms and bronchial reactivity among pig and dairy farmers. *Scand. J. Work Environ. Health* 20:48-54.
- Christensen, L. S., Mousing, J., Mortensen, S., Soerensen, K. J., Strandbygaard, B. S., Henriksen, C. A., Andersen, J. B. (1990): Evidence of long distance airborne transmission of Aujeszky's disease (pseudorabies) virus. *Vet. Rec.* 127:471-474.
- Christensen, L. S., Mortensen, S., Bötner, A., Strandbygaard, B. S., Rönsholt, L., Henriksen, C. A., Andersen, J. B. (1993): Further evidence of long distance airborne transmission of Aujeszky's disease (pseudorabies) virus. *Vet. Rec.* 132:317-321.
- Christou, L., The global burden of bacterial and viral zoonotic infections. *Clin. Microbiol. Infect.* 17: 326–330.
- Clark, S., Rylander, R., Larsson, L. (1983): Airborne bacteria, endotoxin and fungi in dust in poultry and swine confinement buildings. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 44(7):537-541.
- Clauß, A. C. (2014): Mikrobiologische Belastungen in alternativen Legegehennenhaltungen aus Sicht des Arbeits- und Umweltschutzes. Dissertation Universität Witten/Herdecke, Fakultät für Gesundheit.
- Clauß, M., Kolch, A., Mannesmann, R. (2005): Photoreactivation of *Escherichia coli* and *Yersinia enterocolitica* after irradiation with a 222 nm excimer lamp compared to a 254 nm low-pressure mercury lamp. *Acta hydrochim. hydrobiol.* 33(6): 579–584.
- Clauß, M., Springorum, A. C., Hartung, J. (2011a): Size and composition of airborne bacteria aggregates collected in animal house air. *Proceedings of the XVth International Congress of the International Society for Animal Hygiene, Vienna, Austria, Vol. 2, 797-799.*
- Clauß, M., Springorum, A. C., Hartung, J. (2011b): Microscopic analysis of size, structure and amount of particulate bio-aerosols directly sampled from raw and clean gas of an exhaust air bio-washer in a pig fattening unit. *Proceedings of the XVth International Congress of the International Society for Animal Hygiene, Vienna, Austria, 2, 789-791.*
- Clauß, M., Springorum, A. C., Schulz, J., Hartung, J. (2012): Zeitlich hochauflösende Messungen von Pilzsporen und Bakterien in der Außenluft – Einfluss von Fluktuationen auf die Ergebnisse verschiedener Probenahmeverfahren zur Messung der Hintergrundkonzentration. *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft* 72(4):155-161.

- Clauß, M., Hoppe, A., Hartung, J. (2013a): Fluorescence microscopic investigation of airborne particles and micro-organisms in an exhibition hall during an international trade fair. *Gefahrstoffe-Reinhalung Luft* 73(5):220-226.
- Clauß, M., Springorum, A. C., Hartung, J. (2013b): Jahresverlauf der Hintergrundkonzentrationen verschiedener Gruppen luftgetragener Mikroorganismen in einem urbanen, einem Agrar- und einem Forstgebiet in Norddeutschland. *Gefahrstoffe-Reinhalung der Luft* 73(9):375-380.
- Clauß, M., Schulz, J., Stratmann-Selke, J., Decius, M., Hartung, J. (2013c): Abscheidung von "Livestock-associated" Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (LA-MRSA) aus der Abluft zweier Mastschweineeställe mit einem Rieselbettfilter und einer dreistufigen Abluftreinigungsanlage. *Berl. Münch. Tierärztl. Wschr.* 126 (03-04):137-142.
- Clauß, M., Hinz, T. (2014): Einfluss der Probenahmebedingungen auf die Höhe von Emissionsfaktoren für luftgetragene Mikroorganismen aus der Nutztierhaltung. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 74(10):447–453.
- Clauß, M. (2015a): Particle size distribution of airborne microorganisms in the environment - a review. *Landbauforsch Appl Agric Forestry Res* 65(2):77-100.
- Clauß, M. (2015b): Ein automatischer Bioaerosolsammler für die kontinuierliche Probenahme von luftgetragenen Mikroorganismen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 75(4):133-136.
- Clauß, M. (2016): Sammlung luftgetragener Mikroorganismen in Umweltbereichen mit geringen Konzentrationen mit verschiedenen Probenahmeverfahren. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 76(3):85-89.
- Clauß, M., Huf, A., Springorum, A. C. (2016): An unconventional bioaerosol chamber for tenacity studies of airborne microorganisms under almost ambient air conditions. *Book of Abstracts, Bioaerosol Chamber Expert Meeting, April 14 – 15, 2016, Vienna/Austria, S. 4.*
- Clauß, M., Hahne, J. (2017): Aktuelle Entwicklungen im Bereich der Luftreinhaltung und technische Maßnahmen zur Emissionsminderung. *Jahrbuch Agrartechnik.*
- Clauß, M., Gärtner, A. (2017): Fraktionierte Bioaerosolmessungen im Bereich der Geflügel- und Schweinehaltung. *VDI-Expertenforum Bioaerosole, Berlin.*
- Clauß, M., Springorum, A. (2017): Bioaerosol measurements with an automated sampler – Experiences and results. *9th International Symposium on Modern Principles of Air Monitoring and Biomonitoring (AIRMON 2017) in Dresden, Germany.*
- Coggins, M., Donnell, P. M., Fleming, F., Hogan, V. (2007): Exposure assessment to airborne contaminants in the indoor environment of Swine Farms. *Abschlussbericht.*
- Cohen, N. D., Kuskier, K. R., Smith, J. L., Slovis, N. M., Brown, S. E., Stepusin, R. S., Chaffin, M. K., Takais, S., Carter, C. N. (2012): Association of airborne concentration of virulent *Rhodococcus equi* with location (stall versus paddock) and month (January through June) on 30 horse breeding farms in central Kentucky. *J. Vet. Res.* 73(10):1603-1609.
- Cormier, Y., Tremblay, G., Meriaux, A., Brochu, G., Lavoie, J. (1990): Airborne microbial contents in two types of swine confinement buildings in Quebec. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 51(6):304-309.
- Cormier, Y., Boulet, L. P., Bedard, G. et al. (1991): Respiratory health of workers exposed to swine confinement buildings only or to both swine confinement buildings and dairy barns. *Scand. J. Work Environ. Health* 17(4):269–275.
- Cormier, Y., Israel-Assayag, E., Racine, G., Duchaine, C. (2000): Farming practices and the respiratory health risks of swine confinement buildings. *Eur. Respir. J.* 15:560-565.

- Corn, J. L., Cumbee, J. C., Barfoot, R., Erickson, G. A. (2009): Pathogen exposure in feral swine populations geographically associated with high densities of transitional swine premises and commercial swine production. *J Wildl Dis.* 45(3):713-721.
- Corzo, C. A., Culhane, M., Dee, S., Morrison, R. B., Torremorell, M. (2013): Airborne Detection and Quantification of Swine Influenza a Virus in Air Samples Collected Inside, Outside and Downwind from Swine Barns. *PLoS One* 8(8):e71444.
- Cox C. S. (1976): Inactivation kinetics of some microorganisms subjected to a variety of stresses. *Appl. Environ. Microbiol.* 31(6):836–846.
- Cox, C. S. (1966): The survival of *Escherichia coli* sprayed into air and into nitrogen from distilled water and from solutions of protecting agents, as a function of relative humidity. *J. Gen. Microbiol.* 43(3):383–399.
- Cox, C. S., Goldberg, L. J. (1972): Aerosol survival of *Pasteurella tularensis* and the influence of relative humidity. *Appl. Microbiol.* 23(1):1–3.
- Cox C. S. (1995): Stability of airborne microbes and allergens. In: C. S. Cox, Christopher M. Wathes ed.: *Bioaerosols handbook*, Lewis Publishers, Boca Raton, New York.
- Cravens, R. L., Beaulieu, H. J., Buchan, R. M. (1981): Characterization of the Aerosol in Turkey Rearing Confinements. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*42:315-318.
- Crook, B., Easterbrook, A., Staggs, S. (2008): Exposure to dust and bioaerosols in poultry farming. Summary of observations and data. Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive.
- Curtis, S. E., Drummond, J. G., Grunloh, D. J., Lynch, P. B., Jensen, A. H. (1975a): Relative and qualitative aspects of aerial bacteria and dust in swine houses. *J. Anim. Sci.* 41(5):1512-1520.
- Curtis, S. E., Drummond, J. G., Kelley, K. W., Grunloh, D. J., Meares, V. J., Norton, H. W., Jensen, A. H. (1975b): Diurnal and annual fluctuations of aerial bacterial and dust levels in enclosed swine houses. *J. Anim. Sci.* 41(5):1502-1511.
- Curtis, S. E., Drummond, J. G. (1982): Air environment and animal performance. In *Handbook of Agricultural Productivity. II. Animal Productivity.* (Rechcigl, M., Ed.). Florida: CRC Press, 107-118.
- Cyprowski, M., Sowiak, M., Szadkowska-Stanczyk, I. (2011): b(1-3)-glucan aerosols in different occupational environments. *Aerobiologia* 27:345–351.
- Dalphin, J. C., Pernet, D., Reboux, G., Martinez, J., Dubiez, A., Barale, T., Depierre, A. (1991): Influence of mode of storage and drying of fodder on thermophilic actinomycete contamination in dairy farms of the Doubs region of France. *Thorax* 46:619-623.
- Danuser, B., Weber, C., Künzli, N., Schindler, C. H. und Nowak, D. (2001): Respiratory Symptoms in Swiss farmers: an epidemiological study of risk factors. *Am. J. Ind. Med.* 39:410-418.
- Dargatz, D. A., Fedorka-Cray, P. J., Ladely, S. R., Ferris, K. E., Green, A. L., Headrick, M. L. (2002): Antimicrobial susceptibility patterns of Salmonella isolates from cattle in feedlots. *J. Am. Vet. Med. Assoc.* 221(2):268-272.
- Dark, F. A., Callow, D. S. (1973): The effect of growth conditions on the survival of airborne *E. coli*. In: Hers, J. F., Winkler, K. C., (Eds.) 4th international symposium on aerobiology, Utrecht, Oosthoek, 97–99.
- Dark, F. A., Nash, T. (1970): Comparative toxicity of various ozonized olefins to bacteria suspended in air. *J. Hyg.* 69:619–626.

- Davis, A. M., Morishita, T. Y. (2005): Relative Ammonia Concentrations, Dust Concentrations and Presence of Salmonella Species and *Escherichia coli* Inside and Outside Commercial Layer Facilities. *Avian Diseases* 49:30–35.
- de Carvalho Ferreira, H. C., Weesendorp, E., Quaka, S., Stegeman, J. A., Loeffen, W. L. A. (2013): Quantification of airborne African swine fever virus after experimental infection. *Vet. Microbiol.* 165(3–4):243-251.
- de Deus, N., Seminati, C., et al. (2007): Detection of hepatitis E virus in liver, mesenteric lymph node, serum, bile and faeces of naturally infected pigs affected by different pathological conditions. *Vet. Microbiol.* 119:105-114.
- de Neeling, A. J., van den Broek, M. J. M., Spalburg, E. C., et al. (2007): High prevalence of methicillin resistant *Staphylococcus aureus* in pigs. *Vet. Microbiol.* 122(3–4):366-372.
- De Reu, K., Rodenburg, T. B., Grijspeerdt, K., Messens, W., Heyndrick, M., Tuytens, F. A., Sonck, B., Zoons, J., Herman, L. (2009): Bacteriological contamination, dirt, and cracks of eggshells in furnished cages and noncage systems for laying hens: an international on-farm comparison. *Poult. Sci.* 88(11):2442-2448.
- de Rooij, M. M., Borlée, F., Smit, L. A., de Bruin, A., Janse, I., Heederik, D. J., Wouters, I. M. (2016): Detection of *Coxiella burnetii* in Ambient Air after a Large Q Fever Outbreak. *PLoS One* 11(3):e0151281.
- Debey, M. C., Trampel D. W., Richard J. L. et al. (1995): Effect of environmental variables in turkey confinement houses on airborne Aspergillus and mycoflora composition. *Poultry Sci.* 74(3):463–471.
- Dee, S., Otake, S., Deen, J. (2010): Use of a production region model to assess the efficacy of various air filtration systems for preventing airborne transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus and *Mycoplasma hyopneumoniae*: Results from a 2-year study. *Virus Res.* 154:177–184.
- Dee, S., Otake, S., Oliviera, S., Deen, J. (2009): Evidence of long distance airborne transport of porcine reproductive and respiratory syndrome virus and *Mycoplasma hyopneumoniae*. *Vet. Res.* 40:39.
- DeOme, K. B. (1944): The effect of temperature, humidity and glycol vapor on the viability of airborne bacteria. *Amer. J. Hyg.* 40:239–240.
- Despres, V.R., Nowoisky, J.F., Klose, M., Conrad, R., Andreae, M.O. (2007): Characterization of primary biogenic aerosol particles in urban, rural, and high-alpine air by DNA sequence and restriction fragment analysis of ribosomal RNA genes. *Biogeosciences* 4: 1127–1141.
- Deutscher Bauernverband (2016): Situationsbericht 2016/17. Kapitel 6.2. <http://www.bauernverband.de/situationsbericht-2016-17>, letzter Zugriff 08.09.2017.
- Dewulf, J., Laevens, H., Koenen, F., Mintiens, K., de Kruif, A. (2000): Airborne transmission of classical swine fever virus under experimental conditions. *Vet. Rec.* 147(26):735-738.
- Dickx, V., T. Geens, T., Deschuyffeleer, et al. (2010): *Chlamydomydia psittaci* zoonotic risk assessment in a chicken and turkey slaughterhouse. *J. Clin. Microbiol.* 48:3244–3250.
- Diefenbach, H., Hartung, J., Sundrum, A., Lohmeyer, M., Rieger, M. A. (2007): Airborne biological hazards in different pig fattening systems. *Int. J. Immunopathol. Pharmacol.* 20(2):45-49.
- Dimmick, R. L. (1960): Characteristics of dried *Serratia marcescens* in the airborne state. *J. Bacteriol.* 80(3):289–296.

- DIN EN 13098:2001-02 Arbeitsplatzatmosphäre; Leitlinien für die Messung von Mikroorganismen und Endotoxinen in der Luft, Deutsche Fassung EN 13098:2000 (Workplace atmospheres; Guidelines for measurement of airborne microorganisms and endotoxin; German version EN 13098: 2000). Berlin: Beuth Verlag
- Dinter, P. S., Müller, W. (1984): Tenacity of bacteria in the airborne state. III. Model studies on the epidemiology of *Pasteurella multocida* influenced by a tropical climate. Zentralbl. Bakteriol. Mikrobiol. Hyg. B. 179:139–150.
- DLG (2006): Prüfrahmen: Abluftreinigungssysteme für Tierhaltungsanlagen. DLG Testzentrum, Technik & Betriebsmittel, Groß-Umstadt.
- Dobeic, M., Kenda, E., Micunovic, J., Zdovc, I. (2011): Airborne *Listeria spp.* in the red meat processing industry. Czech J. Food Sci. 29:441-447.
- Dohmen, W., Schmitt, H., Bonten, M., Heederik, D. (2017): Air exposure as a possible route for ESBL in pig farmers. Environ. Res. 155:359-364.
- Donaldson, A. I., Gloster, J., Harvey, L. D., Deans, D.H. (1982): Use of prediction models to forecast and analyse airborne spread during the foot-and-mouth disease outbreaks in Brittany, Jersey and the Isle of Wight in 1981. Vet. Rec. 110:53–57.
- Donaldson, A. I., Pringle, N. P., Ferris, N. P. (1977): The inactivation of lipid-containing viruses in a multistage liquid impinger (May sampler). FEMS Microbiol. Letters 2(1):35-37.
- Donaldson, A. I., Wardley, R. C., Martin, S., Ferris, N. P. (1983): Experimental Aujeszky's disease in pigs: excretion, survival and transmission of the virus. Vet. Rec. 113(21):490-494.
- Donham, K.J., Rubino, M., Thedell, T. D. et al. (1977): Potential health hazards to agricultural workers in swine confinement buildings. J. Occup. Med. 19(6):383–387.
- Donham, K. J., Knapp, L. W., Monson, R. et al. (1982): Acute toxic exposure to gases from liquid manure. J. Occup. Med. 24(2):142–145.
- Donham, K.J., Zavala, D. C., Merchant, J. A. (1984): Respiratory symptoms and lung function among workers in swine confinement buildings: A cross-sectional epidemiological study. Arch. Environ. Health 39(2):96–101.
- Donham, K. J., Pependorf, W., Palmgren, U. et al. (1986a): Characterization of dusts collected from swine confinement buildings. Am. J. Ind. Med. 10(3):294–297.
- Donham, K. J., L. J. Scallon, W. Pependorf, M. W. Treuhaft, and R. C. Roberts. (1986b). Characterization of dusts collected from swine confinement buildings. American Ind. Hygiene Assoc. J. 47(7): 404-410.
- Donham, K., Haglund, P., Peterson, Y. et al. (1989): Environmental and health studies of farm workers in Swedish swine confinement buildings. Br. J. Ind. Med. 46(1):31–37.
- Donham, K. J. (2000): The concentration of swine production: Effects on swine health, productivity, human health, and the environment. Vet. Clin. North American Food Animal Pract. 16(3): 559-598.
- Douwes, J., Wouters, I., Dubbeld, H., van Zwieten, L., et al. (2000): Upper airway inflammation assessed by nasal lavage in compost workers: A relation with bio-aerosol exposure. Am. J. Ind. Med. 37(5):459-468.
- Draz, A., Chai, T., Zucker, B. A. (1999): Investigations on airborne microorganisms in animal stables. 2. Report: further characterization of airborne *Clostridium perfringens*. Berl. Munch. Tierarztl. Wochenschr. 112(4):124-126.

- Druckenmüller, K., Gärtner, A., Jäckel, U., Klug, K., Schiffels, J., Günther, K., Elbers, G. (2017): Development of a methodological approach for the characterization of bioaerosols in exhaust air from pig fattening farms with MALDI-TOF mass spectrometry. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 220(6):974-983.
- Druett, H. A., May, K.R. (1968): Unstable germicidal pollutant in rural air. *Nature* 220:395.
- Druett, H. A., May, K. R. (1969): The open air factor. *New Scientist* 41:579.
- Duan, H., Chai, T., Müller, W., Zucker, B. A. (2006): Concentration of airborne endotoxins and airborne bacteria in Chinese rabbit houses. *Berl. Munch. Tierarztl. Wochenschr.* 119(1-2):40-44. Erratum in: *Berl. Munch. Tierarztl. Wochenschr.* 119(3-4):192.
- Duan, H.-Y., Chai, T.-J., Zhao, Z., B., Yao, M., Zhang, X.-X. (2008): Transmission identification of *Escherichia coli* aerosol in chicken houses to their environments using ERIC-PCR. Article in *Science in China Series C Life Sciences* 51(2):164-173.
- Duan, H.-Y., Chai, T.-J. (2008): The Homology Molecular Identification of Airborne *Escherichia coli* Isolated from Indoor and Outdoor Air of Chicken Houses. *Chinese J. Animal Vet. Sci.* 2008-05.
- Duan, H., Chai, T., Liu, J., Zhang, X., Qi, C., Gao, J., Wang, Y., Cai, Y., Miao, Z., Yao, M., Schlenker, G. (2009): Source identification of airborne *Escherichia coli* of swine house surroundings using ERIC-PCR and REP-PCR. *Environ. Res.* 109(5):511-517.
- Duan, H.-Y., Zhu Y.-H., Liang, Y. (2013): Detection of Microbiological Aerosol Concentration in Cow Houses. *China Herbivore Science.*
- Duchaine, C., Meriaux, A., Brochu, G., et al. (1999a): *Saccharopolyspora rectivirgula* from Quebec dairy barns: Application of simplified criteria for the identification of an agent responsible for farmer's lung disease. *J. Med. Microbiol.* 48:173-180.
- Duchaine, C., Grimard, Y., Cormier, Y. (2000): Influence of building maintenance, environmental factors, and seasons on airborne contaminants of swine confinement buildings. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 61(1):56-63.
- Duchaine, C., Mériaux, A., Brochu, G., Cormier, Y. (1999b): Airborne Microflora in Quebec Dairy Farms: Lack of Effect of Bacterial Hay Preservatives. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 60(1):89-95.
- Duchaine, C., Thorne, P. S., Meriaux, A., Grimard, Y., Whitten, P., Cormier, Y. (2001): Comparison of Endotoxin Exposure Assessment by Bioaerosol Impinger and Filter-Sampling Methods. *Appl. Environ. Microbiol.* 67(6):2775-2780.
- Duguid, J. P. (1946): The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *J. Hyg.* 44(6):471-479.
- Dungan, R. S. (2010): Fate and transport of bioaerosols associated with livestock operations and manures. *J. Anim. Sci.* 88:3693-3706.
- Dunklin, E. W., Puck, T. T. (1948): The lethal effect of relative humidity on air-borne bacteria. *J. Exp. Med.* 87(2):87-101.
- Duquenne, P., Marchand, G., Duchaine, C. (2013): Measurement of Endotoxine in Bioaerosols at Workplace: A critical review of literature and a standardization issue. *Ann. Occup. Hyg.* 57(2):137-172.
- Dutch expert Committee on Occupational Safety (2010): Endotoxins - Health-based recommended occupational exposure limit. Gezondheidsraad, Health Council of the Netherlands No. 2010/04OSH, The Hague.

- Dutkiewicz, J. (1978): Exposure to dust-borne bacteria in agriculture. 1. Environmental studies. - Arch. Environ. Health 33:250-259.
- Dutkiewicz, J., Pomorski, Z. J. H., Sitkowska, J., Krysińska-Traczyk, E., Skórska, C., Prażmo, Z., Cholewa, G., Wójtowicz, H. (1994): Airborne microorganisms and endotoxin in animal houses. Grana 33(2):85-90.
- Eglite, M. E., Olefir, A. I., Ustinenko, A. N. (1989): Dynamics of microbial contamination of air in animal breeding farm housing. Gig. Sanit. 11:78-99. (auf Russisch)
- Ehrlich, R. M. S., Walker, R. L. (1970a): Relationship between atmospheric temperature and survival of airborne bacteria. Appl. Microbiol. 19(2):245-249.
- Ehrlich, R., Miller, S. (1973): Survival of airborne *Pasteurella tularensis* at different atmospheric temperatures. Appl. Microbiol. 25(3):369-372.
- Ehrlich, R., Miller, S., Walker, R. L. (1970b): Effects of atmospheric humidity and temperature on the survival of airborne Flavobacterium. Appl. Microbiol. 20(6):884-887.
- Elbers, A. R., Blaauw, P. J., de Vries, M. J., van Gulick, P. J., Smithuis, O. L., Gerrits, R. P. und Tielen, M. J. (1996): Veterinary practice and occupational health –an epidemiologica study of several professional groups of Dutch veterinarians. 1. General physical examination and prevalence of allergy, lung function disorders and bronchial hyperreactivity. Vet. Q. 18:127-131.
- Elliott, L. F., McCalla, T. M., Deshazer, J. A. (1976): Bacteria in the Air of Housed Swine Units. Appl. Environ. Microbiol. 32(2):210-273.
- EN 14031 (2003): Workplace atmospheres. Determination of airborne endotoxins.
- Erman, M. I., Eglite, M. E., Olefir, A. I., Kalinina, L. N. (1989): Aerogenic microflora in animal husbandry and poultry breeding areas, criteria of its harmful effect and hygienic regulation. Gig. Tr. Prof. Zabol. 4:19-22. (in Russisch)
- Erwerth, W., Mehlhorn, G., Beer, K. (1983): Die mikrobielle Kontamination der Luft in den Kälberställen einer Rindermastanlage. Mh. Vet. Med. 38:300-307.
- Evans, C. (2017): Bioaerosol Exposures from Three Utah Cattle Operations. Graduate Theses & Non-Theses. 112. http://digitalcommons.mtech.edu/grad_rsch/112
- Fallschissel, K. (2011): Untersuchung an Bioaerosolen in Tierställen unter Etablierung einer REAL-TIME PCR-basierten Methode zur Erfassung luftgetragener Salmonella und Thermoactinomyces Zellen. Dissertation, Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotrophologie und Umweltmanagement, Justus-Liebig Universität, Giessen.
- Fallschissel, K., Kämpfer, P., Jäckel, U. (2009): Direct detection of Salmonella cells in the air of livestock stables by realtime PCR. Ann. Occup. Hyg. 53(8):859-868.
- Fallschissel, K., Kämpfer, P., Jäckel, U. (2010): Detection and identification of airborne bacteria in a German turkey house by cultivation-based and molecular methods. The Ann. Occup. Hyg. 54(8):934-943.
- Farrelly, V., Rainey, F.A., Stackebrandt, E. (1995): Effect of genome size and rrn gene copy number on PCR amplification of 16S rRNA genes from a mixture of bacterial species. Appl. Environ. Microbiol., 61(7):2798-2801.
- Ferguson, D. D. (2012) Assessment and mitigation of airborne transmission of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in animal feeding operations and the outdoor environment. Thesis at the University of Iowa, USA.

- Ferri, F., Dottori, M., Bedogni, L., Perini, S., Ligabue, M. (2003): Exposure to *Saccharopolyspora rectivirgula* among cattle breeders in the province of Reggio Emilia and the risk of extrinsic allergic alveolitis (farmer's lung). *Med. Lav.* 94(2):207-215. (in Italienisch).
- Fiser, A. (1978): Microbial contamination of dust in minimum-morbidity housings for pig rearing. *Vet. Med. (Praha)* 23(11):641-650. (in Tschechisch).
- Fitzgerald, J. R. (2012): Livestock-associated *Staphylococcus aureus*: origin, evolution and public health threat. *Trends Microbiol.* 20:192–198.
- Fouchier, R. A. M., Osterhaus, A. D. M. E., et al. (2003): Animal influenza virus surveillance. *Vaccine* 21: 1754-1757.
- Fraser, C., Donnelly, C. A., Cauchemez, S., et al. (2009): Pandemic potential of a strain of influenza A (H1N1) (2009): early findings. *Science* 324:1557–1561.
- Friese, A. (2010): Aerogene Ausbreitung von Viren: Eine Studie verschiedener Sammelgeräte und Quantifizierungsmethoden zur Virusisolierung aus der Luft. Dissertation, Veterinärmedizinische Fakultät der Universität Leipzig.
- Friese, A., Schulz, J., Hoehle, L., Fetsch, A., Tenhagen, B.-A., Hartung, J., Roesler, U. (2012): Occurrence of MRSA in air and housing environment of pig barns. *Vet. Microbiol.* 158(1/2):129–135.
- Friese, A., Schulz, J., Laube, H., von Salviati, C., Hartung, J., Roesler, U. (2013): Faecal occurrence and emissions of livestock-associated methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (laMRSA) and ESbl/AmpC-producing *E. coli* from animal farms in Germany. *Berl. Münch. tierärztliche Wochenschr.* 126(3-4):175–180.
- Fritz, T. M. (2017): Untersuchungen luftgetragener Partikel und Bioaerosole in Pferdestallungen. Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades einer Magistra der Pharmazie. Institut für Hygiene, Mikrobiologie und Umweltmedizin Medizinische Universität Graz.
- Fulleriger, S. L., Seguin, D., Warin, S., Bezille, A., Desterque, C., Arné, P., Chermette, R., Bretagne, S., Guillot, J. (2006): Evolution of the environmental contamination by thermophilic fungi in a turkey confinement house in France. *Poult Sci.* 85(11):1875-1880.
- Fulton, J. D. (1966): Microorganisms of the upper atmosphere. Relationship between frontal activity and the micropopulation at altitude. *Appl. Microbiol.* 14:245-250.
- Gaede, W., Reckling, K.F., Dresenkamp, B., et al. (2008): *Chlamydophila psittaci* infections in humans during an outbreak of psittacosis from poultry in Germany. *Zoonoses Public Health* 55:184–188.
- Gailiunas, P., Cottral G. E. (1966): Presence and persistence of foot-and-mouth disease virus in bovine skin. *J. Bacteriol.* 91:2333-2338.
- Ganio, L. M., Mohr A. J., Lighthart, B. (1995): A comparison between computer modeled bioaerosol dispersion and a bioaerosol field spray event. *Aerobiologia* 11(3):183–188.
- Gannon, B.W., Hayes, C. M., Roe, J. M. (2007): Survival rate of airborne *Mycobacterium bovis*. *Res.Vet. Sci.* 82 (2):169-172.
- Gao, M., Jia, R., Qiu, T., Han, M., Wang, X. (2017): Size-related bacterial diversity and tetracycline resistance gene abundance in the air of concentrated poultry feeding operations. *Environ Pollut.* 220:1342-1348.
- Garcia-Mochales, C. A. (2016): Concentration, size distribution, and control of swine viruses associated with airborne particles. Dissertation, Universität von Minnesota.

- Gärtner, A., Gessner, A., Balfanz, J., Jäckel, U. (2008a): Performance characteristics for the measurement of microorganisms sampled with the LANUV-emissionimpinger. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 68:357–360.
- Gärtner, A., Mölter, L., Gessner, A., (2008b): Determination of the collection efficiency of an impinger for emission measurements of microorganisms. *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 68(9):351–356.
- Gärtner, A., Gessner, A., Jäckel, U. (2009): Ermittlung von Mikroorganismen-Emissionen einer Hähnchenmastanlage. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 69(9):359–362.
- Gärtner, A., Gessner, A., Martin, E., Jäckel, U. (2011): Emissionsmessungen von Mikroorganismen aus Hähnchenmastanlagen – Aktuelle Messergebnisse und vergleichende Untersuchungen von drei verschiedenen Ställen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 71(9):362–366.
- Gärtner, A., Gessner, A., Knust S.: (2014) Ermittlung der Emissionen von Mikroorganismen aus Schweinemastanlagen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 74(21):505–510.
- Gärtner, A., Gessner, A., Geueke, K.-J., Knust, S. (2017): Emissionen aus Hähnchenmastanlagen. Untersuchung des Bioaerosolanteils in den Partikelfractionen PM_{2,5} und PM₁₀. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 77(6):249–256.
- Gärtner, E. (1975): Quantitative und qualitative Untersuchungen zum Luftkeimgehalt in Schweine und Geflügelställen – Ein Beitrag zur Aerobiologie in landwirtschaftlichen Nutztierstallungen. Dissertation Universität Stuttgart-Hohenheim.
- Gauthier-Levesque, L., Bonifait, L., Turgeon, N., Veillette, M., Perrott, P., Grenier, D., Duchaine, C. (2016): Impact of serotype and sequence type on the preferential aerosolization of *Streptococcus suis*. *BMC Res. Notes* 14(9):273.
- Gebhardt, H. (1973): Zur Problematik von Luftkeimgehaltsbestimmungen in Tierställen mit Hilfe des Standard-Impingers und des Casella-Schlitzsammlers und der Erfassung der übrigen Stallklimafaktoren. Dissertation Universität Stuttgart-Hohenheim.
- Geburek, F., Schilling, B., von Kries, G., Lohmeyer, M. (2005): Bioaerosolemission aus einem Biofilter an einer Schweinemastanlage. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 65(9):377–381.
- Gentry, R. F., Mitrovic, M., Bubash, G. R. (1962): Application of Andersen Sampler in Hatchery Sanitation. *Poultry Sci.* 41(3):794–804.
- Gerstner, D., Walser, S., Brenner, B., Bünger, J., Eikmann, T., Kolb, S., Kolk, A., Nowak, D., Raulf, M., Sagunski, H., Sedlmaier, N., Suchenwirth, A., Wiesmüller, G., Wollin, K. M., Tesseraux, I., Herr, C. (2015): Ableitung gesundheitsbasierter Beurteilungswerte für Bioaerosole. *Gesundheitswesen* 77 - A39 DOI: 10.1055/s-0035-1562995.
- Gerstner, D., Walser, S., Brenner, B., Herr, C. (2014): Entwicklung gesundheitsbasierter Ableitungswerte für Bioaerosole. *Gesundheitswesen* 76 - V75 DOI: 10.1055/s-0034-1371628.
- Ghasemkhani, M., Daini, A. K., Eshraghi, S. (2006): Assessment of exposures to bioaerosols among poultry feed plant kers. *J Appl. Sci.* 6:2051–2055.
- Gibbs, S., Green, C., Tarwater, P., Scarpino, P. (2004): Airborne Antibiotic Resistant and Nonresistant Bacteria and Fungi Recovered from Two Swine Herd Confined Animal Feeding Operations. *J. Occup. Environ. Hyg.* 1(11):699–706.
- Gibbs, S.G., Green, C. F., Tarwater, P. M., Mota, L. C., Mena, K. D., Scarpino, P. V. (2006): Isolation of Antibiotic-Resistant Bacteria from the Air Plume Downwind of a Swine Confined or Concentrated Animal Feeding Operation. *Environ. Health Perspec.* 114(7):1032–1037.

- Gibson, C. F., Donaldson, A. I. (1986): Exposure of sheep to natural aerosols of foot-and-mouth disease virus. *Res. Vet. Sci.* 41(1):45-49.
- Gigli, A.C.S., Baracho, M.S., Naas, I.A., Silva, R.A., Zago, R., Dall'Anese, F.P. (2005): Diagnosis and evaluation of fungi presence in the air of two different ventilation systems for broiler houses. *Rev. Bras. Cienc. Avic* 7(4):205-208.
- Gilpin, B. J., Scholes, P., Robson, B., et al. (2008): The transmission of thermotolerant *Campylobacter* spp. to people living or working on dairy farms in New Zealand. *Zoonoses Publ. Health* 55:352–360.
- Gladtko, D., Gessner, A. (2017): Emissions und Immissionsmessungen: Wie gut passen Prognose und Messung zusammen? VDI-Expertenforum Bioaerosole, Berlin.
- Gloster, J., Blackall, R. M., Sellers, R. F., Donaldson, A. I. (1981): Forecasting the airborne spread of foot-and-mouth disease. *Vet. Rec.* 108:370–374.
- Gloster, J. (1983): Factors influencing the airborne spread of Newcastle disease. *Br. Vet. J.* 139(5):445-451.
- Gloster, J., Champion, H. J., Sørensen, J. H., Mikkelsen, T., Ryall, D. B., Astrup, P., et al. (2003): Airborne transmission of foot- and- mouth disease virus from Burnside Farm, Heddon-on-the-Wall, Northumberland, during the 2001 epidemic in the United Kingdom. *Vet. Rec.* 152:525–534.
- Gloster, J., Williams, P., Doel, C., Esteves, I., Coe, H., Valarcher, J. F. (2007): Foot-and-mouth disease - quantification and size distribution of airborne particles emitted by healthy and infected pigs. *Vet. J.* 174(1):42-53.
- Gloster, J., Redington, A., Burgin, A., Sorensen, L., Sørensen, J., Turner, J., Dillon, R., Hullinger, M., Simpson, P., Astrup, M., Garner, P., Stewart, G., D'Amours, P., Sellers, R., and Paton, D. (2010): Airborne Spread of Foot-and-Mouth Disease—Model Intercomparison. *Vet. J.*, 183(3):278–286.
- Goldberg, L. J., Watkins, H. M., Boerke, E. E., Chatigny, M. A. (1958): The use of a rotating drum for the study of aerosols over extended periods of time. *Am. J. Hyg.* 68(1):85–93.
- Goosen, N., Moolenaar, G. F. (2008): Repair of UV damage in bacteria. *DNA Repair* 7:353–379.
- Gordon, W. A. M. (1963): Environmental Studies in Pig Housing: IV. The Bacterial Content of Air in Piggeries and its Influence on Disease Incidence. *British Vet. J.* 119(6):263-266.
- Goy, S. (2007): Chronische Bronchitis bei Landwirten - Eine Metaanalyse. *Dissertationschrift Ludwig-Maximilians-Universität München*, online verfügbar unter: http://edoc.ub.uni-muenchen.de/7111/1/Goy_Stefanie.pdf.
- Goyer, N., Lavoie, J., Lazure, L., Marchand, G. (2001): Les bioaérosols en milieu de travail : guide d'évaluation, de contrôle et de prévention. *Études et recherches, guide technique T-23*, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, 63 pages. (In Französisch).
- Gralton, J., Tovey, E., McLaws, M. L., Rawlinson, W. D. (2011): The role of particle size in aerosolised pathogen transmission: a review. *J. Infect.* 62(1):1-13.
- Graveland, H., Wagenaar, J. A., Heesterbeek, H., Mevius, D., van Duinkerken, E., Heederik, D. (2010): Methicillin resistant *Staphylococcus aureus* ST398 in veal calf farming: human MRSA carriage related with animal antimicrobial usage and farm hygiene. *PLoS ONE.* 5(6):e10990.
- Gray, J. T., Fedorka-Cray, P. J. (2001): Survival and Infectivity of *Salmonella cholerae suis* in Swine Feces. *J. Food Protec.* 64:945-949.
- Green, C., Gibbs, S., Tarwater, P., Mota, L., Scarpino, P. (2006): Bacterial Plume Emanating from the Air Surrounding Swine Confinement Operations. *J. Occup. Environ. Hyg.* 3(1):9-15.

- Greger, M., Koneswaran, G. (2010): The Public Health Impacts of Concentrated Animal Feeding Operations on Local Communities. *Fam. Community Health* 33(1):373–382.
- Grinshpun, S. A., Willeke, K., Ulevicius, V., Juozaitis, A., Teniewa, S., Donnelly, J., Stelma, G. N., Brenner, K. P. (1997): Effect of Impaction, Bounce and Reaerosolization on the Collection Efficiency of Impingers. *Aerosol Sci. Technol.* 26:326-342.
- Guardabassi, L., Stegger, M., Skov, R. (2007): Retrospective detection of methicillin resistant and susceptible *Staphylococcus aureus* ST398 in Danish slaughter pigs. *Vet. Microbiol.* 122(3-4):384-386.
- Gunnarsson, S., Matthews, L. R., Roster, T. M. F., Temple, W. (2000): The demand for straw and feathers as litter substrates by laying hens. *Appl. Animal Behaviour Sci.* 65(4):321-330.
- Gutzmirtl, D., Kralik, G, Vučemilo, M., Vinković, B., Žurić, M., Matković, K. (2004): Nalaz bakterija u zraku tovilišta svinja: kriterij za procjenu utjecaja farme na kvalitetu okoliša [Bacteria in air of pig feedlot: a criterion for estimation of farm influence on environment quality. *Stočarstvo* 58:363-366 (auf kroatisch).
- Haas, D., Posch, J., Schmidt, S., Wüst, G., Sixl, W., Feierl, G., Marth, E., Reinthaler, F.F. (2005): A case study of airborne culturable microorganisms in a poultry slaughterhouse in Styria, Austria. *Aerobiologia* 21:193–201.
- Hackert, V. H., Van Der Hoek, W., Dukers-Muijrsers, N., et al. (2012): Q fever: single-point source outbreak with high attack rates and massive numbers of undetected infections across an entire region. *Clin. Infect. Dis.* 55:1591–1599.
- Hađina, S., Pinter, L., Uhitil, S., Vučemilo, M., Jakšić, S. (2009): The assessment of gram-negative bacteria in the air of two swine nursery buildings. *Veterinarski Arhiv* 79(3):219-227.
- Hadina, S., Vucemilo, M., Pavicic, I., Tofant, A., Matcovic, K. (2003): Effect of microclimate on air quality in intensive pig production. *Stočarstvo : Časopis za unapređenje stočarstva* 57(2):91-99.
- Haglund, P., Rylander, R., Clark, C. S. (1984): Respiratory function among workers in swine confinement buildings. In: Bernard J, Gee L, Morgan KC, Stuart M, eds. *Occupational lung disease*. New York: Raven Press 228.
- Hagmar, L., Schutz, A., Hallberg, T., Sjöholm, A. (1990): Health effects of exposure to endotoxins and organic dust in poultry slaughter workers. *Int. Arch. Occ. Environ. Health* 62:159–164.
- Hahne, J. (2014): Stand der Abluftreinigung und Zertifizierung.
https://www.thuenen.de/media/institute/at/Arbeitsbereiche/Umwelttechnologien_Tier/Abluftreinigung/Downloads/Vortrag_Hahne__Hannover_2014.pdf letzter Zugriff 28.09.17
- Hairston, P. P., Ho, J., Quant, F. R. (1997): Design of an instrument for real-time detection of bioaerosols using simultaneous measurement of particle aerodynamic size and intrinsic fluorescence. *J. Aerosol Sci.* 28:471–482.
- Hanhela, R., Louhelainen, K., Pasanen, A. L. (1995): Prevalence of microfungi in Finnish cow barns and some aspects of the occurrence of *Wallemia sebi* and *Fusaria*. *Scand. J. Work. Environ. Health* 21(3):223-228.
- Hansen, E. W., Christensen, J. D. (1990): Comparison of cultured human mononuclear cells, *Limulus* amoebocyte lysate and rabbits in the detection of pyrogens. *J Clin Pharm Ther* 15(6):425-433.
- Hao, X., Cao, W., Li, B., Zhang, Q., Wang, C., Ge, L. (2014): Slightly acidic electrolyzed water for reducing airborne microorganisms in a layer breeding house. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 64(4):494-500.

- Harbaugh, E., Trampel, D., Wesley, I., et al. (2006): Rapid aerosol transmission of Salmonella among Turkeys in a simulated holding-shed environment. *Poult. Sci.* 85:1693-1699.
- Harding, J. C. (2004): The clinical expression and emergence of porcine circovirus 2 *Vet. Microbiol.* 98:131-135.
- Harrison, R. M., Jones, A. M., Biggins, P. D. E., Pomeroy, N., Cox, C. S., Kidd, S. P., Hobman, J. L., Brown, N. L., Beswick, A. (2005): Climate factors influencing bacterial count in background air samples. *Int. J. Biometeorol.* 49:167–178.
- Hartmann, A. L., Zeitler, M. H., Mauermayer, R. (1986): Luftverunreinigungen in Nutztierställen. Arbeitsmedizinische, arbeitshygienische und tierhygienische Aspekte. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin* 36, 37-44.
- Hartung, J. (1992): Emissionen luftgetragener Stoffe aus Nutztierställen. *Pneumologie* 46:196-202.
- Hartung, J., Whyte, R. T. (1994): Erfassung und Bewertung von Luftverunreinigungen in der Nutztierhaltung. *Atemwegs-Lungenkrh.* 20:17–25.
- Hatch, M. T., Dimmick, R. L. (1966): Physiological responses of airborne bacteria to shifts in relative humidity. *Bacteriol Rev.* 30(3):597–603.
- Hatch, M. T., Wolochow, H. (1969): Bacterial Survival: Consequences of the airborne state. In: Dimmick, R. L., Akers, A. B., Heckly, R. J., Wolochow, H. (Eds.): *An introduction to experimental aerobiology*. New York: Wiley-Interscience.
- Hatch, M. T., Wright, D. N., Bailey, G. D. (1979): Response of airborne *Mycoplasma pneumonia* to abrupt changes in relative humidity. *Appl. Microbiol.* 19(2):232–238.
- Heber, A. J., Stroik M, Faubion, J. M., Willard, L. H. (1988). Size distribution and identification of aerial dust particles in swine finishing buildings. *Trans. ASAE* 31(3): 882-887.
- Heederik, D., Brouwer, R., Biersteker, K., Boleij, J. S.M. (1991): Relationship of airborne endotoxin and bacteria levels in pig farms with the lung function and respiratory symptoms of farmers. - *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 62:395-401.
- Heidelberg, J. F., Shahamat, M., Levin, M., Rahman, I., Stelma, G., Grim, C., Colwell, R. R. (1997): Effect of aerosolization on culturability and viability of gram-negative bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 63(9):3585–3588.
- Heikkilä, P., Salmi, T., Kotimaa, M. (1988): Identification and counting of fungal spores by scanning electron microscopy. *Scand. J. Work Environ. Health* 14(1):66-67.
- Henningson, E. W., Ahlberg, M. S. (1994): Evaluation of microbiological aerosol samplers: A review. *J. Aerosol. Sci.* 25(8):1459–1492.
- Hering, J., Hille, K., Fromke, C., von Munchhausen, C., Hartmann, M., Schneider, B., Friese, A., Roesler, U., Merle, R., Kreienbrock, L. (2014): Prevalence and potential risk factors for the occurrence of cefotaxime resistant *Escherichia coli* in German fattening pig farms—a cross-sectional study. *Prev. Vet. Med.* 116:129–137.
- Herr, C., Bittighofer, P. M., Bünger, J., Eikmann, T., Fischer, A. B., Grüner, C., Idel, H., Zur Nieden, A., Palmgren, U., Seidel, H-J., Velcovsky, H-G. (1999): Wirkung von mikrobiellen Aerosolen auf den Menschen. *Gefahrstoffe Reinhalt. Luft* 59(6): 229–239.
- Hess, G. E. (1965): Effects of oxygen on aerosolized *Serratia marcescens*. *Appl. Microbiol.* 13(5):781–787.
- Hesse, W. (1884): Ueber Abscheidung der Mikroorganismen aus der Luft. *Deutsche Medizinische Wochenschrift* 2:17-20.

- Hesse, W. (1888): Bemerkungen zur quantitativen Bestimmung der Mikroorganismen in der Luft. Zeitschrift für Hygiene 4(1):19-21.
- Heutelbeck, A. R., Janicke, N., Hilgers, R., Kütting, B., Drexler, H., Hallier, E., Bickeböller, H. (2007): German cattle allergy study (CAS): public health relevance of cattle-allergic farmers. Int. Arch. Occup. Environ. Health 81:201-202.
- Hill, I. R., Kenworthy, R. (1970): Microbiology of pigs and their environment in relation to weaning. J. Appl. Bact. 33:299.
- Hilliger, H.G. (1969): Zusammenhänge zwischen Staub und Bakteriengehalt der Stallluft. Wien. Tierärztliche Mschr. 56:148-150.
- Hillman, P., Gebremedhin, K., Warner, R. (1992): Ventilation system to minimize airborne bacteria, dust, humidity, and ammonia in calf nurseries. J. Dairy Sci. 75(5):1305-1312.
- Himathongkham, S., Bahari S., et al. (1999): Survival of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella typhimurium* in cow manure and cow manure slurry. FEMS Microbiol. Letters 178:251- 257.
- Hinz, T., Hartung, J., Wiegand, B. (1994): Air quality in a Louisianatype broiler house. Proceedings of XII World Congress in Agricultural Engineering Milano, Italy, Report No. 94-C-008, 9pp.
- Hinze, S., Bergmann, K. C., Lowenstein, H., Hansen, G. N. (1996): Different threshold concentrations for sensitization by cattle hair allergen Bos d 2 in atopic and non-atopic farmers. Pneumologie 50:177-181.
- Hojovec, J, Fiser, A., Kubicek, K., Zeman, J. (1977): Die Rolle von Indikatorkeimen für die Beurteilung der Stallluft. Mh. Vet. Med. 32:766-769.
- Holness, D. L., O'Blenis, E. L., Sass-Kortsak, A., Pilger, C., Nethercott, J. R. (1987): Respiratory effects and dust exposures in hog confinement farming. Am. J. Ind. Med. 11:571-580.
- Hong, P. Y., Li, X., Yang, X., Shinkai, T., Zhang, Y., Wang, X., Mackie, R. I. (2012): Monitoring airborne biotic contaminants in the indoor environment of pig and poultry confinement buildings. Environ. Microbiol. 14(6):1420-1431.
- Hood, A. M. (1971): An indoor system for the study of biological aerosols in open air conditions. J. Hyg. Camb. 69:607-617.
- Hood, A. M. (1974): Open-air factors in enclosed systems. J. Hyg., Camb. 72:53-60.
- Hoopmann, M., Hehl, O., Neisel, F. (2004): Atemwegserkrankungen und Allergien bei Einschulungskindern in einer ländlichen Region (AABEL), Teilprojekt B des Untersuchungsprogramms "Gesundheitliche Bewertung von Bioaerosolen aus der Intensivtierhaltung", Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Hannover.
- Hopman, N.E., Keessen, E. C., Harmanus, C., Sanders, I. M., vanLeengoed, L. A., Kuijper, E. J., Lipman, L. J. (2010): Acquisition of *Clostridium difficile* by piglets. Vet. Microbiol. 149(1-2):186-192.
- Hu, D., Wang-Li, L., Simmins III, O. D., Classen, J. J., Osborne, J. A., Byfield, G. E. (2014): Bioaerosol concentrations and emissions from tunnel-ventilated high rise layer houses in North Carolina. Transac. ASABE 57(3):915-925.
- Hugh-Jones, M., Allan, W. H., Dark, F. A., Harper, G. J. (1973): The evidence for the airborne spread of Newcastle disease. J. Hyg. (Lond). 71(2): 325-339.
- Huhn, R. G. (1970): Swine enzootic pneumonia: incidence and effect on rate of body weight gain. Amer. J. Vet. Res. 9(31):1097.
- Hurtienne, M. (1967): Vergleiche zwischen mehreren Verfahren zur Bestimmung des Keimgehaltes der Stallluft unter verschiedenen Bedingungen. Dissertation, Freie Universität Berlin.

- Imai, K., Ashitani, J., Imazu, Y., Yanagi, S., Sano, A., Tokojima, M., Nakazato, M. (2004): Farmer's lung cases of a farmer and his son with high BAL fluid beta-D glucan levels. *Nihon Kokyuki Gakkai Zasshi* 42(12):1024-1029.
- INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) (2010): Fiche METROPOL 089/V02: Endotoxines. Recueil-Metropol. Erhältlich bei: www.inrs.de.
- IRSST (Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (2009): Analyse des endotoxins. Methode Analytique 332. <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/M-332.pdf>.
- Iversen, M., Kirychuk, S., Drost, H. et al. (2000): Human health effects of dust exposure in animal confinement buildings. *J. Agric. Saf. Health* 6(4):283–288.
- Jacob, B., Ritz, B., Gehring, U., Koch, A., Bischof, W., Wichmann, H. E. und Heinrich, J. (2002): Indoor exposure to mold and allergic sensitization. *Environ. Health Perspect.* 110:647-53.
- Jacobsen, B., Krueger, L., Seeliger, F., Bruegmann, M., Segales, J., Baumgaertner, W. (2009): Retrospective study on the occurrence of porcine circovirus 2 infection and associated entities in Northern Germany. *Vet. Microbiol.* 138:27-33.
- Jahne, M. A., Rogers, S. W., Holsen, T. M., Grimberg, S. J., Ramler, I. P., Kim, S. (2016): Bioaerosol deposition to food crops near manure application: quantitative microbial risk assessment. *J. Environ. Qual.* 45:666–674.
- Jahne, M. A., Rogers, S.W., Holsen, T.M., Grimberg, S.J., Ramler, I.P. (2015): Emission and dispersion of bioaerosols from dairy manure application sites: human health risk assessment. *Environ. Sci. Technol.* 49:9842–9849.
- James, D. O (2010): Recent findings on the viable but nonculturable state in pathogenic bacteria. *FEMS Microbiology Reviews* 34(4):415-425.
- Jellen, E. G. (1984): Gravimetrische und bakteriologische Staubuntersuchungen in zwei Legehennenställen. Dissertation, Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Jericho, K. W. F. (1968): Pathogenesis of pneumonia in pigs. *Vet. Rec.* 82:507.
- Jo, W.-K., Kang, J.-H. (2005): Exposure Levels of Airborne Bacteria and Fungi in Korean Swine and Poultry Sheds. *Arch. Environ. Occup. Health* 60(3):140-146.
- Jolie, R., Bäckström, L., Gunderson, P. (1998): Airborne contaminants and farmers health in swine farms with high and low prevalence of respiratory diseases in pigs. *Ann. Agric. Environ. Med.* 5(1):87-92.
- Jones, A. M., Harrison, R. M. (2004): The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations - a review. *Sci. Tot. Environ.* 326(1-3):151-180.
- Jones, W., Morring, K., Olenchock, S. A., Williams, T., Hickey, J. (1984): Environmental study of poultry confinement buildings. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 45(11):760-766.
- Jonges, M., van Leuken, J., Wouters, I., Koch, G, Meijer, A., Koopmans, M (2015): Wind-Mediated Spread of Low-Pathogenic Avian Influenza Virus into the Environment during Outbreaks at Commercial Poultry Farms. *PLoS One* 10(5):e0125401.
- Just, N., Kirychuk, S., Gilbert, Y., Letourneau, V., Veillette, M., Singh, B., and Duchaine, C. (2011): Bacterial diversity characterization of bioaerosols from cage-housed and floorhoused poultry operations. *Environ. Res.* 111:492–498.
- Kaplan, R. (1955): Mutation und Tötung durch UV in Bakterien verschiedenen Wassergehalts. *Die Naturwissenschaften* 42(7): 184–185.

- Karowska, E. (2005): Microbiological air contamination in farming environment. Polish J. Environ. Stud. 14(4):445-449. (auf polnisch)
- Kaufmann, A. F., Fox, M. D., Boyce, J. M., Anderson, D. C., Potter, M. E., Martone, W. J., Patton, C. M. (1980): Airborne spread of brucellosis. Ann. N. Y. Acad. Sci. 353:105-114.
- Kaufmann-Bart, M., Hoop, R. K. (2009): Diseases in chicks and laying hens during the first 12 years after battery cages were banned. Vet. Rec. 164:203-207.
- Kaye, P. H., Hirst, E., Foot, V. E., Clark, J. M., Baxter, K. L. (2004): A low-cost multichannel aerosol fluorescence sensor for networked deployment. Optically Based Biological and Chemical Sensing for Defence. 1 ed. London, United Kingdom, SPIE.
- Kaye, P. H., Stanley, W. R., Foot, V., Baxter, K., Barrington, S. J. (2005b): A dual-wavelength single particle aerosol fluorescence monitor. Optically Based Biological and Chemical Sensing, and Optically Based Materials for Defence. 1 ed. Bruges, Belgium, SPIE.
- Kaye, P., Stanley, W. R., Hirst, E., Foot, E. V., Baxter, K. L., Barrington, S. J. (2005a): Single particle multichannel bio-aerosol fluorescence sensor. Optics Express 13:3583–3593.
- Keessen, E. C., Donswijk, C. J., Hol, S. P., Hermanus, C., Kuijper, E. J., Lipman, L. J. (2011): Aerial dissemination of *Clostridium difficile* on a pig farm and its environment. Environ. Res. 111(8):1027-1032.
- Kelman, A., Soong, Y. A., Dupuy, N., et al. (2011): Antimicrobial susceptibility of *Staphylococcus aureus* from retail ground meats. J. Food Prot. 74(10):1625-1629.
- Kepmann, M. (1970): Vergleichende Untersuchungen zur Luftkeimgehaltbestimmung mit dem Standard-Impinger-Verfahren und dem Gelatinefilter-Verfahren in einem Legehennenstall. Dissertation Freie Universität Berlin.
- Kethley, W., Fincher, E. L., Cown W. B. (1957): The effect of low temperatures on the survival of airborne bacteria. Arctic Aeromedical Laboratory, LADD Air Force Base, Alaska.
- Khanna, T., Friendship, R., Dewey, C., Weese, J. S. (2008): Methicillin resistant *Staphylococcus aureus* colonization in pigs and pig farmers. Vet. Microbiol. 128(3-4):298-303.
- Khardori, N. M. (2010): Clinical Aspects of pandemic 2009 influenza A (H1N1) virus infection. Yearb. Med. 2010:83–84.
- Kim, K. Y., Ko, H. J., Kim, H. T., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., Kim, C. N. (2007): Monitoring of Aerial Pollutants Emitted from Swine Houses in Korea. Environ. Monit, Assess 133:255–266.
- Kim, K. Y., Ko, H. J., Lee, K. J., Park, J. B., Kim, C. N. (2005): Temporal and spatial distributions of aerial contaminants in an enclosed pig building in winter. Environ. Res. 99:150–157.
- Kim, K. Y., Kim, H. T., Kim, D., Nakajima, J., Higuchi, T. (2009): Distribution characteristics of airborne bacteria and fungi in the feedstuff-manufacturing factories. J. Hazard Mater. 169(1-3):1054-1060.
- Kim, K. Y., Ko, H. J., Kim, H. T., Kim, C. N. (2006): Effect of spraying biological additives for reduction of dust and bioaerosol in a confinement swine house. Ann. Agric. Environ. Med. 13(1):133-138.
- Kim, K. Y., Ko, H. J., Kim, H. T., Kim, C. N., Kim, Y. S., Roh, Y. M. (2008): Effect of manual feeding on the level of farmer's exposure to airborne contaminants in the confinement nursery pig house. Ind. Health. 46(2):138-143.
- Kim, K-Y., Ko, H-J., Kim, D. (2012): Assessment of airborne microorganisms in a swine wastewater treatment plant. Environ. Eng. Res. 17(4):211-216.

- Kiryuchuk, S. P., Dosman, J. A., Reynolds, S. J., Willson, P., Senthilselvan, A., Feddes, J. J., Classen, H. L., Guenter, W. (2006): Total dust and endotoxin in poultry operations: comparison between cage and floor housing and respiratory effects in workers. *J. Occup. Environ. Med.* 48:741-748.
- Kiryuchuk, S., Donham, K., Reynolds, S., et al. (1999): Oil/water sprinkling intervention in a swine building. In: Congress Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities. Horsens, Denmark: Danish Institute of Agricultural Sciences 35–341.
- Kiryuchuk, S., Senthilselvan, A., Dosman, J. A., et al. (1998): Predictors of longitudinal changes in pulmonary function among swine confinement workers. *Can. Respir. J.* 5(6):472–478.
- Kloos, W. E., Zimmerman, R. J., et al. (1976): Preliminary studies on the characterization and distribution of *Staphylococcus* and *Micrococcus* species on animal skin. *Appl. Environ. Microbiol.* 31:53-59.
- Klous, G., Huss, A., Heederik, D. J. J., Coutinho, R. A. (2016): Human–livestock contacts and their relationship to transmission of zoonotic pathogens, a systematic review of literature. *One Health* 2:65–76.
- Knoche, J. (1971): Untersuchungen zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Standardimpingers nach Brachmann und Mitarb. Zum Nachweis von Luftkeimen im Stall. Dissertation Freie Universität Berlin.
- Ko, G., First, M. W., Burge, H. A. (2000): Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* BCG aerosols. *Tubercle Lung Dis.* 80(4/5):217-228.
- Ko, G., Simmons, O. D., Likirdopulos, C. A., Worley-Davis, L., Williams, M., Sobsey, M. D. (2008): Investigation of bioaerosols released from swine farms using conventional and alternative waste treatment and management technologies. *Environ. Sci. Technol.* 42(23):8849–8857.
- Ko, G., Simmons, O. D., Likirdopulos, C. A., Worley-Davis, L., Williams, C. M., Sobsey, M. D. (2010): Endotoxin levels at Swine farms using different waste treatment and management technologies. *Environ. Sci. Technol.* 44(9):3442-3448.
- Kocaman B., Esenbuga N., Yildiz, A., Lacin, E., Macit, M. (2006): Effect of environmental conditions in poultry houses on the performance of laying hens. *Int. J. Poultry Sci.* 5:26-30.
- Kolk, A., van Gelder, R., Schneider, G., Gabriel (2009): Mikrobiologische Hintergrundwerte in der Außenluft – Auswertung der BGIA-Expositionsdatenbank MEGA. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 69(4):130 - 136.
- Kostandinova, G., Petkov, G., Denev, S., Miteva, Ch., Stefanova, R., Penev, T. (2014): Microbial pollution of manure, litter, air and soil in a poultry farm. *Bulgarian J. Agric. Sci.* 20(1):56-65.
- Kösters, J., Müller, W. (1970): Exposure of personnel to bacteria in mass poultry husbandry. *Zentralbl. Veterinärmed. B.* 17(1):154-158.
- Kotimaa, M.H., Oksanen, L., Koskela, P. (1991): Feeding and bedding materials as sources of microbial exposure on dairy farms. *Scand. J. Work Environ. Health* 17(2):117-122.
- Kotula, A. W., Kinner, J. A. (1964): Airborne microorganisms in broiler processing plants. *Appl Microbiol.* 12:179-184.
- Kovacs, F., Nagy, A., Sallai, J.-N. (1967): The effect of certain environmental factors on the health and production of pigs 2: Data on dust and living germ content as well as on the chemical contamination of the air in pig houses of closed system. *Hungarian Vet. J.* 22(11):496-505.

- Kraemer, J. G., Pires, J., Kueffer, M., Semaani, E., Endimiani, A., Hilty, M., Oppliger, A. (2017): Prevalence of extended-spectrum β -lactamase-producing Enterobacteriaceae and Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* in pig farms in Switzerland. *Sci Total Environ.* 603-604:401-405.
- Kristiansen, A., Saunders, A. M., Hansen, A. A., Nielsen, P. H., Nielsen, J. L. (2012): Community structure of bacteria and fungi in aerosols of a pig confinement building. *FEMS Microbiol Ecol.* 80(2):390-401.
- Kuhn, I., Iversen, A., Finn, M., et al. (2005): Occurrence and Relatedness of Vancomycin-Resistant Enterococci in Animals, Humans, and the Environment in Different European Regions. *Appl. Environ. Microbiol.* 71(9):5383-5390.
- Kullman, G. J., Thorne, P. S., Waldron, P. F., Marx, J. J., Ault, B., Lewis, D. M., Siegel, P. D., Olenchock, S. A., Merchant, J. A. (1998): Organic dust exposures from work in dairy barns. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 59:403-413.
- Kumari, P., Choi, H. L. (2014): Seasonal variability in airborne biotic contaminants in swine confinement buildings. *PLoS One* 11:e112897.
- Kundsinn, R. B. (1968): Aerosols of Mycoplasmas, L Forms and bacteria: Comparison of particle size, viability, and lethality of ultraviolet radiation. *Appl. Microbiol.* 16(1):143-146.
- Kuskie, K. R., Smith, J. L., Wang, N., Carter, C. N., Chaffin, M. K., Slovis, N. M., Stepusin, R. S., Cattoi, A. E., Takai, S., Cohen, N. D. (2011): Effects of location for collection of air samples on a farm and time of day of sample collection on airborne concentrations of virulent *Rhodococcus equi* at two horse breeding farms. *Am. J. Vet. Res.* 72(1):73-79.
- Laevens, H., Koenen, F., Deluyker, H., Berkvens, D. (1998): An experimental infection with classical swine fever virus in weaner pigs. I. Transmission of the virus, course of the disease, and antibody response. *Vet. Quart.* 20:41-45.
- Laevens, H., Koenen, F., Deluyker, H., de Kruif, A. (1999): Experimental infection of slaughter pigs with classical swine fever virus: transmission of the virus, course of the disease and antibody response. *Vet. Rec.* 145:243-248.
- Lang J. L., Thorne, P.S., Kullman G.I. (1997): Determinants of culturable bioaerosol concentration in dairy barn. *Am. Agric. Environ. Med.* 4:187-194.
- Larsson, K., Malmberg, P., Eklund, A., Belin, L., Blaschke, E. (1988): Exposure to microorganisms, airway inflammatory changes and immune reactions in asymptomatic dairy farmers. *Int. Arch. Allergy Appl. Immun.* 87:127-133.
- Laube, H., Friese, A., von Salviati, C., Guerra, B., Rösler, U. (2014): Transmission of ESBL/AmpC-producing *Escherichia coli* from broiler chicken farms to surrounding areas. *Vet. Microbiol.* 172(3-4):519-527.
- Lavoie, J., Allard, R. (2004): Bioaérosols. Dans : Manuel d'hygiène du travail. Du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque. Chapitre 9, Modulo-Griffon éditeur, Québec, Canada, 129-158. (in Französisch).
- Lavoie, J., Cloutier, Y., Lara, J., Marchand, G. (2007): Guide on respiratory protection against bioaerosols. Recommendations on its selection and use. TECHNICAL GUIDE RG-501. Chemical Substances and Biological Agents, IRSST.
- Lawniczek-Walczyk, A., Górný, R. L., Golofit-Szymczak, M., Niesler, A., Wlazło, A. (2013): Occupational exposure to airborne microorganisms, endotoxins and β -glucans in poultry houses at different stages of the production cycle. *Ann. Agric. Environ. Med.* 20(2):259-268.

- Lecours, P. B., Veillette, M., Marsolais, D., Duchaine, C. (2012): Characterization of bioaerosols from dairy barns: Reconstructing the puzzle of occupational respiratory diseases by using molecular approaches. *Appl. Environ. Microbiol.* 78(9):3242-3248.
- Lee, S. A., Liao, C. H. (2014): Size-selective assessment of agricultural workers' personal exposure to airborne fungi and fungal fragments. *Sci Total Environ.* 466-467:725-732.
- Leibler, J., Otte, J., Silbergeld, E. (2008): Zoonotic disease risks and socioeconomic structure of industrial poultry production : review of the US experience with contract growing. *Agriculture* 1–24.
- Lemay, S., Chenard, L., Barber, E. M., et al. (2000): Optimization of a sprinkling system using undiluted canola oil for dust control in pig buildings. In: *ASAE Air Pollution From Agricultural Operations. Proceedings the Second International Conference.* Des Moines, Iowa: ASAE, 321–328.
- Lenhart, S. W., Olenchock, S. A. (1984): Sources of respiratory insult in the poultry processing industry. *Am. J. Ind. Med.* 6(2):89-96.
- Lenhart, S. W., Olenchock, S. A., Cole, E. C. (1982): Viable sampling for airborne bacteria in a poultry processing plant. *J. Toxicol. Environ. Health* 10(4-5):613-619.
- Létourneau, V., Nehmé, B., Mériaux, A., Massé, D., Duchaine, C. (2009): Impact of Production Systems on Swine Confinement Buildings Bioaerosols. *J. Occup. Environ. Hyg.* 7(2).
- Levin, J., Bang, F. B. (1964): The role of endotoxin in the extracellular coagulation of limulus blood. In: *Bulletin of the Johns Hopkins Hospital* 115:265–274.
- Lewis, H. E., Foster, A. R., Mullan, B. J., Cox, R. N., Clark, R. P. (1969): Aerodynamics of the human microenvironment. *Lancet* 293(7609):1273-1277.
- Li, X., Chai, T., Wang, Z., Song, C., Cao, H., Liu, J., Zhang, X., Wang, W., Yao, M., Miao, Z. (2009): Occurrence and transmission of Newcastle disease virus aerosol originating from infected chickens under experimental conditions. *Vet. Microbiol.* 136(3-4):226-232.
- Liang, R., Tian, J., She, R., Meng, H., Xiao, P., Chang, L. (2013): Airborne microbial composition in a high-throughput poultry slaughtering facility. *J. Food Prot.* 76(3):413-419.
- Lierz, M. (2017): Veterinärmedizinische Risikobewertung von Bioaerosolen aus Anlagen. VDI-Expertenforum Bioaerosole, Berlin.
- Lighthart, B. (1973): Survival of airborne bacteria in a high urban concentration of carbon monoxide. *Appl. Microbiol.* 25(1):86–91.
- Lighthart, B., Frisch, A. S. (1976): Estimation of viable airborne microbes downwind from a point source. *Appl. Environ. Microbiol.* 31:700–704.
- Lighthart, B., Kim, J. (1989): Simulation of airborne microbial droplet transport. *Appl. Environ. Microbiol.* 55(9):2349-2355.
- Lighthart, B., Shaffer, B. T. (1997): Increased airborne bacterial survival as a function of particle content and size. *Aerosol Sci. Technol.* 27(3):439-446.
- Lighthart, B., Mohr, A. J. (1987): Estimating downwind concentrations of viable airborne microorganisms in dynamic atmospheric conditions. *Appl. Environ. Microbiol.* 53:1580–1583.
- Linsel, G., Kummer, B. (1998): Endotoxine in der Luft am Arbeitsplatz. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 58(7/8):281-287.
- Lippmann, J. (2014): Erarbeitung von Managementempfehlungen zur Kleingruppenhaltung für Legehennen unter Praxisbedingungen im Vergleich zur Volierenhaltung Projektteil Untersuchungen zum Stallklima, zu Emissionen und Keimen bei vier Ställen –jeweils zwei

- Haltungen in Kleingruppe und Voliere –über zwei Stallbelegungen. Schriftenreihe LFULG, Heft 14/2014.
- Lippmann, J. (2007): Emissionsminderung in der Legehennenhaltung. Schriftenreihe der LfL, Heft 3/2007.
- Lippmann, J., Mietke-Hofmann, H., Deichmann, J., Heidenreich, T. (2016): Bestimmung und Beurteilung wichtiger Bestandteile des Bioaerosols in der Stall- und Abluft sowie im Stallumfeld (Luv/Lee) zur Bereitstellung von Kenndaten und Bewertung des Emissions- und Immissionsverhaltens mikrobieller Luftbestandteile aus Tierställen (Geflügel). Schriftenreihe des LfULG, Heft 13.
- Liu, D., Chai, T., Xia, X., Gao, Y., Cai, Y., Li, X., Miao, Z., Sun, L., Hao, H., Roesler, U., Wang, J. (2012): Formation and transmission of *Staphylococcus aureus* (including MRSA) aerosols carrying antibiotic-resistant genes in a poultry farming environment. *Sci. Total Environ.* 426:139-145.
- Liu, J-W., Ma, W-L. (2010): Characteristics of microbial aerosol pollution in pig houses. *J. Animal Hus. Feed Sci.* 2(6/7):41-44.
- Liu, W., You, X. Y. (2012): Transportation and risk analysis of influenza indoor and outdoor transportation and exposure risk analysis of influenza aerosol. *Indoor Built Environ.* 21:614.
- Lohmeyer, M. (2017): Messung von Endotoxinen in Bioaerosolen: Eine besondere Herausforderung. VDI-Expertenforum Bioaerosole, Berlin.
- Lonc, E., Plewa, K. (2010): Microbiological Air Contamination in Poultry Houses. *Polish J. Environ. Stud.* 19(1):15-19.
- Loudon, R. G., Roberts, R. M. (1967): Droplet expulsion from the respiratory tract. *Am. Rev. Respir. Dis.* 95(3):435-442.
- Lozano, C., Aspiroz, C., Ara, M., Gomez-Sanz, E., Zarazaga, M., Torres, C. (2011): Methicillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) ST398 in a farmer with skin lesions and in pigs of his farm: clonal relationship and detection of *Inu(A)* gene. *Clin. Microbiol. Infect.* 17(6):923-927.
- Lu, J., Sanchez, S., et al. (2003): Evaluation of broiler litter with reference to the microbial composition as assessed by using 16S rRNA and functional gene markers. *Appl. Environ. Microbiol.* 69:901-908.
- Lues, J. F., Theron, M. M., Venter, P., Rasephei, M. H. (2007): Microbial composition in bioaerosols of a high-throughput chicken-slaughtering facility. *Poultry Sci.* 86(1):142-149.
- Lugauskas, A., Krikštaponis, A. und Šveistytė, L. (2004): Airborne fungi in industrial environments – potential agents of respiratory diseases. *Ann. Agric. Environ. Med.* 11:19–25.
- Lun, Z. R., Wang, Q. P., Chen, X. G., Li, A. X., Zhu, X. Q. (2007): *Streptococcus suis*: an emerging zoonotic pathogen. *Lancet Infect. Dis.* 7(3):201–209.
- Lutring, K. R., Linton, R. H., Zimmermann, I. M., Peugh, Heber, A. J. (1997): Distribution and Quantification of Bioaerosols in Poultry-Slaughtering Plants. *J. Food Protec.* 60(7):804-810.
- Lutsky, I., Teichthal, H. und Bar-Sela, S. (1989): Occupational Asthma due to poultry mites, *J. Allergy Clin. Immunol.* 73:56-60.
- Macan, J., Kanceljak-Macan, B. und Milković-Kraus, S. (2012): Pyroglyphid mites as a source of work-related allergens. *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 63(1):57-66.
- Maciorowski, K. G., Herrera, P., et al. (2007): Effects on poultry and livestock of feed contamination with bacteria and fungi. *Animal Feed Sci. Technol.* 133:109-136.
- Mackiewicz, B., Skórska, C., Dutkiewicz, J. (2015): Relationship between concentrations of microbiological agents in the air of agricultural settings and occurrence of work-related symptoms in exposed persons. *Ann. Agric. Environ. Med.* 22(3):473–477.

- Madelin, T. M., Wathes, C. M. (1989). Air hygiene in a broiler house: comparison of deep litter with raised netting floors. *Br. Poult. Sci.* 30 (1):23-27.
- Malmberg, P., Larsson, K. (1993): Acute exposure to swine dust causes bronchial hyperresponsiveness in healthy subjects. *Eur. Respir. J.* 6(3):400–404.
- Malmros, P., Sigsgaard, T., Bach, B. (1992): Occupational health problems due to garbage sorting. *Waste Management and research* 10:227-234.
- Marschang, F., Crainiceanu, B. (1971): Untersuchung über die Zusammenhänge zwischen Stallklima und Kälbersterblichkeit. *Berl. Münchn. Tierärztl. Wschr.* 84:417.
- Martens, W., Martinec, M., Zapirain, R., Stark, M., Hartung, E., Palmgren, U. (2001): Reduction potential of microbial, odour and ammonia emissions from a pig facility by biofilters. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 203:335–345.
- Marthi, B. V. P., Fieland, M., Walter, Seidler, R. J. (1990): Survival of bacteria during aerosolization. *Appl. Environ. Microbiol.* 56(11):3463–3467.
- Martin, E., Dziurawicz, N., Jäckel, U., Schäfer, J. (2015): Detection of airborne bacteria in a duck production facility with two different personal air sampling devices for an exposure assessment. *J. Occup. Environ. Hyg.* 12(2):77-86.
- Martin, E., Fallschissel, K., Kämpfer, P., Jäckel, U. (2010b): Detection of *Jeotgalicoccus* spp. in poultry house air. *Syst. Appl. Microbiol.* 33(4):188-192.
- Martin, E., Jäckel, U. (2011): Characterization of bacterial contaminants in the air of a duck hatchery by cultivation based and molecular methods. *J. Environ. Monit.* 13:464–470.
- Martin, E., Kämpfer, P., Jäckel, U. (2010a): Quantification and identification of culturable airborne bacteria from duck houses. *Ann. Occup. Hyg.* 54:217–227.
- Martin, E., Lodders, N., Jäckel, U., Schumann, P., Kämpfer, P. (2010c): *Leucobacter aerolatus* sp. nov., from the air of a duck barn. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, doi:10.1099/ijs.0.021303-0.
- Martin, S. A., McCann, M. A., et al. (1998): Microbiological survey of Georgia poultry litter. *J. Appl. Poultry Res.* 7:90-98.
- Martin, W. T., Zhang, Y., Willson, P., Archer, T. P., Kinahan, C., Barber, E. M. (1996): Bacterial and fungal flora of dust deposits in a pig Building. *Occ. Environ. Med.* 53:484-487.
- Masclaux, F. G., Sakwinska, O., Charriere, N., Semaani, E., Opplinger, A. (2013): Concentration of Airborne *Staphylococcus aureus* (MRSA and MSSA), Total Bacteria, and Endotoxins in Pig Farms. *Ann. Occup. Hyg.* 57(5): 550–557.
- Matković, K., Vučemilo, M., Vinković, B., Šeol, B., Pavičić, Ž., Matković, S. (2007): Qualitative structure of airborne bacteria and fungi in dairy barn and nearby environment. *Czech J. Anim. Sci.* 52(8):249–254.
- Matković, K., Vučemilo, M., Štoković, I., Šimić, R., Marušić, D., Vinković, B., Matković, S. (2013): Concentrations of airborne bacteria and fungi in a livestock building with caged laying hens. *Vet. Archiv* 83(4):413-424.
- Matković, K., Vučemilo, M., Vinković, B. (2009a): Airborne fungi in dwellings for dairy cows and laying hens. *Arh. Hig. Rada. Toksikol.* 60:395-399.
- Matković, K., Vučemilo, M., Vinković, B., Pavičić, Ž., Matković, S., Benić, M. (2009b): Airborne fungi in a dairy barn with emphasis on microclimate and emissions. *Vet. Archiv* 79:207-18.

- Matković, K., Vučemilo, M., Vinković, B., Šeol, B., Pavičić, Ž., Tofant, A., Matković, S. (2006): Effect of microclimate on bacterial count and airborne emission from dairy barns on the environment. *Ann. Agric. Environ. Med.* 13:349.
- Matthias-Maser, S., Jaenicke, R. (1995): The size distribution of primary biological aerosol particles with radii > 02 µm in an urban/rural influenced region. *Atmos. Res.* 39(4):279-286.
- Matthias-Maser, S., Jaenicke, R. (1994): Examination of atmospheric bioaerosol particles with radii > 02 µm. *J. Aerosol. Sci.* 25(8):1605-1613.
- Matthias-Maser, S., Jaenicke, R. (2000): The size distribution of primary biological aerosol particles in the multiphase atmosphere. *Aerobiologia* 16(2):207-210.
- May, K. R., Druett, H. A. (1968): A microthread technique for studying the viability of microbes in a simulated airborne state. *J. General Microbiol.* 51:353-367.
- Mayer, D., Reiczigel, J., Rubel, F. (2008): A Lagrangian Particle Model to Predict the Airborne Spread of Foot-and-Mouth Disease Virus. *Atmos. Environ.* 42:466-479.
- McFarland, A. R. (1977): Wind tunnel evaluation of a modified Andersen impactor and an all weather sampler inlet. *Atmos Environ* 11(6):535-539.
- McGorum, B.C., Ellison, J., Cullen, R. T. (1998): Total and respirable airborne dust endotoxin concentrations in three equine management systems. *Equine Vet. J.* 30:430-434.
- 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. *Biosystems Ingeneering* 104:289-298.
- Miao, Z., Chai, T., Qi, C., Cai, Y., Liu, J., Yuan, W., Yao, M. (2010): Composition and variability of airborne fungi in an closed rabbit house in China. *Aerobiologia* 26:135-140.
- Mietke-Hoffmann, H. (2017): Bioaerosoluntersuchungen an Anlagen zur Geflügelhaltung – messtechnische und analytische Erfahrungen – Konsequenzen für die Zukunft. VDI-Expertenforum Bioaerosole, Berlin.
- Mikkelsen, T., Alexandersen, S., Astrup, P., Champion, H. J., Donaldson, A. I., Dunkerley, F. N., et al. (2003): Investigation of airborne foot-and-mouth disease virus transmission during low-wind conditions in the early phase of the UK 2001 epidemic. *Atmos. Chem. Phys.* 3:2101-2110.
- Millner, P. D. (2009): Bioaerosols associated with animal production operations. *Bioresource Technology* 100:5379-5385.
- Mitscherlich, E., Marth, E.H. (1984): Microbial survival in the environment. Bacteria and Rickettsiae important in human and animal health. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Mituniewicz, T., Sowinska, J., Wojcik, A., Iwanczuk-Czernik, K., Witkowska, D., Banas, J. (2008): Effect of disinfectants on physicochemical parameters of litter, microbiological quality of poultry house air, health status and performance of broiler chickens. *Polish J. of Environ. Stud.* 17(5):745.
- Monno, R., Fumarola, L., Trerotoli, P., et al. (2009): Seroprevalence of Q fever, brucellosis, Leptospirosis in farmers and agricultural workers in Bari, Southern Italy. *Ann. Agric. Environ. Med.* 16:205-209.
- Mulhausen, J. R., McJilton, C. E., Redig, P. T., & Janni, K. A. (1987): *Aspergillus* and other human respiratory disease agents in turkey confinement houses. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 48:894-899.
- Müller, W. (1974): Die Staphylokokkenflora der Luft eines Broilerstalles und einer Ferkelbatteriehaltung. *Berl. Münch. Tierärztl. Wochenschr.* 87:298-301.

- Müller, W., Wiesner, P., KÜHME, H. (1978): Zur Frage der Ausbreitung von Luftkeimen aus Tierställen. Zbl. Vet. Med. B. 25:216-224.
- Müller, W., Dinter, P.-S. (1986): Die Tenazität von Bakterien im luftgetragenen Zustand. IV: Experimentelle Untersuchungen zur Lebensfähigkeit luftgetragener *E. coli* O:78 unter dem Einfluss unterschiedlicher Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Zbl. Bakt. Hyg. 262(3):304–312.
- Müller, W., Gärtner, E., Strauch, D. (1976): Die Keimflora in Geflügel- und Schweineställen, 1. Mitteilung: Quantitativer Keimgehalt. Dtsch. Tierärztl. Wschr. 83:373-377.
- Müller, W., Gröning, K. (1981): Die Tenazität von Bakterien im luftgetragenen Zustand. II. Mitteilung, Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung der Absterbekonstante beta für Kokken. Zbl. Bakt. Hyg., I. Abt. Orig. B. 173:180–187.
- Müller, W., Gröning, K., Hartmann, F. (1981): Die Tenazität von Bakterien im luftgetragenen Zustand I. Mitteilung: Experimentelle Untersuchung zur Bestimmung der Absterbekonstante β_{biol} für *E. coli*, *Salmonella* spp. und *P. multocida*. Zbl. Bakt. Hyg. 172:367–376.
- Murayama, M., Kakinuma, Y., Maeda, Y., Rao, J. R., Matsuda, M., Xu, J., Moore, P. J., Millar, B. C., Rooney, P. J., Goldsmith, C. E., Loughrey, A., Ann, M., McMahon, S., McDowell, D. A., Moore, J. E. (2010): Molecular identification of airborne bacteria associated with aerial spraying of bovine slurry waste employing 16S rRNA gene PCR and gene sequencing techniques. Ecotoxicol. Environ. Saf. 73:443–447.
- Murtaugh, M.P., Yeske, P. (2008): Epidemiology of a new PRRS virus isolate and Outbreak T. Smith (Ed.), Proceedings of the Allen D. Leman Swine Conference, St. Paul .
- Myrna, M. T., de Rooij, D., Heederik, J. J., Borlée, F., Hoek, G., Wouters, I. M. (2017): Spatial and temporal variation in endotoxin and PM10 concentrations in ambient air in a livestock dense area. Environ. Res. 153:161–170.
- Nardoni, S., Mancianti, F., Sgorbini, M. et al. (2005): Identification and seasonal distribution of airborne fungi in three horse stables in Italy. Mycopathologia 160:29–34.
- NATO (2010): Laser Based Stand-Off Detection of Biological Agents. Final Report of Task Group SET-098/RTG-55.
- Nehmé, B., Gilbert, Y., Létourneau, V., Forster, R. J., Veillette, M., Villemur, R., Duchaine, C. (2009): Culture-independent characterization of archaeal biodiversity in swine confinement building bioaerosols. Appl. Environ. Microbiol. 75(17):5445-5450.
- Nemati, M., Hermans, K., Lipinska, U., et al. (2008): Antimicrobial resistance of old and recent *Staphylococcus aureus* isolates from poultry: first detection of livestock-associated methicillin-resistant strain ST398. Antimicrob. Agents Chemother. 52(10):3817-3819.
- Nicas, M., Nazaroff, W. W., Hubbard, A. (2005): Toward understanding the risk of secondary airborne infection: emission of respirable pathogens. J. Occup. Environ. Hyg. 2(3):143-154.
- Nichita, I., Marcu, A., Seres, M., Tirziu, E., Mot, D., Gros, R. V. (2010): Evaluation of fungi presence in the air of two broiler houses with different ventilation systems. Animal Sci. Biotechnol. 43(1):415–418.
- Nicholson, W. L., Munakata, N., Horneck, G., Melosh, H. J., Setlow, P. (2002): Resistance of *Bacillus* endospores to extreme terrestrial and extraterrestrial environments. Microbiol. Mol. Biol. Rev. 64(3):548–572.
- Nguyen, T. M., Ilef, D., Jarraud, S., Rouil, L., Campese, C., Che, D., et al. (2006): A community-wide outbreak of legionnaires disease linked to industrial cooling towers—how far can contaminated aerosols spread? J. Infect. Dis. 193(1):102–111.

- Nieguitsila, A., Deville, M., Jamal, T., et al. (2007): Evaluation of fungal aerosols using temporal temperature gradient Electrophoresis (TTGE) and comparison with culture. *J. Microbiol. Methods* 70(1): 86–95.
- Nieguitsila, A., Goldenberg, O., Deville, M. et al. (2010): Molecular monitoring of fungal communities in air samples by denaturing high-performance liquid chromatography (D-HPLC). *J. Appl. Microbiol.* 109(3):910–917.
- Nielsen, B., Breum, N. (1995): Exposure to air contaminants in chicken catching. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 56:804–808.
- Nieuwenhuijsen, M. J., Noderer, K. S., Schenker, M. B., Vallyathan, V., Olenchock, S. (1999): Personal exposure to dust, endotoxin and crystalline silica in California agriculture. *Ann. Occup. Hyg.* 43:35-42.
- Nimmermark, S., Lund, V., Gustafsson, G., Eduard, W. (2009): Ammonia, dust and bacteria in welfare-oriented systems for laying hens. *Ann. Agric. Environ. Med.* 16:103–113.
- Nishiguchi, A., S., Kobayashi, et al. (2007): Risk factors for the introduction of avian influenza virus into commercial layer chicken farms during the outbreaks caused by a low-pathogenic H5N2 virus in Japan in 2005. *Zoonoses Publ. Health* 54:337-343.
- Nonnenmann, M. W., Bextine, B., Dowd, S. E., Gilmore, K., Levin, J. L. (2010): Culture-Independent Characterization of Bacteria and Fungi in a Poultry Bioaerosol Using Pyrosequencing: A New Approach. *J. Occup. Environ. Hyg.* 7(12):693-699.
- Northcutt, J. K., Jones, D. R., Ingram, K. D., Hinton, A., Musgrove, M. Z. (2004): Airborne microorganisms in commercial shell egg processing facilities. *Int. J. Poultry Sci.* 3(3):159 -200.
- Nowak, D. (2016): Bioaerosole und Atemwegserkrankungen in der Landwirtschaft. *Allergologie* 39(2):77–85.
- Nygård, K., Øyvind, W.-J., Rønsen, S., Caugant, D. A., Øystein, S., Kanestrøm, A., Ask, E., Ringstad, J., Ødegård, R., Jensen, T., Krogh, T., Høiby, E. A., Ragnhildstveit, E., Aaberge, I. S., Aavitsland, P. (2008): An outbreak of Legionnaires Disease caused by long-distance spread from an industrial air scrubber in Sarpsborg, Norway. *Clin. Infect. Dis.* 46(1):61–69.
- O’Brien, K. M., Nonnenmann, M. W. (2016): Airborne Influenza A Is Detected in the Personal Breathing Zone of Swine Veterinarians. *PLoS One* 11(2):e0149083.
- O’Connor, A., Auvermann, B., Bickett-Weddle, D., Kirkhorn, S., Sargeant, J. (2010): The association between proximity to animal feeding operations and community health: a systematic review. *PLoS ONE* 5, 3.
- Ogink, N. W. M., Erbrink, J. J., Heederik, D. J. J., Winkel, A., Wouters, I. M. (2016): Emissions of endotoxins from animal production: emission measurements and dispersion modelling. *Livestock Research Rapport 959*, Wageningen, NL. (in Niederländisch)
- Ogoshi, K., Yasunaga, H., Obana, N., et al. (2010): Consumer reactions to risk information on bovine spongiform encephalopathy in Japan. *Environ. Health Prev. Med.* 15: 311–318.
- Okraszewska-Lasica, W., Bolton, D. J., Sheridan, J. J., McDowell, D. A. (2014): Airborne Salmonella and Listeria associated with Irish commercial beef, sheep and pig plants. *Meat Sci.* 97(2):255-261.
- Oliveira, C. J., Carvalho, L. F., Garcia, T. B. (2006): Experimental airborne transmission of *Salmonella agona* and *Salmonella typhimurium* in weaned pigs. *Epidemiol. Infect.* 134:199–209.
- Oliver, J. D. (2005): The viable but nonculturable state in bacteria. *J. Microbiol.* 43:93-100.

- Olsen, K. N., Lund, M., Skov, J., Christensen, L. S., Hoorfar, J. (2009): Detection of *Campylobacter* bacteria in air samples for continuous real-time monitoring of *Campylobacter* colonization in broiler flocks. *Appl. Environ. Microbiol.* 75:2074–2078.
- Oppliger, A., Charrière, N., Droz, P. O., Rinsoz, T. (2008): Exposure to bioaerosols in poultry houses at different stages of fattening; use of real-time PCR for airborne bacterial quantification. *Ann. Occup. Hyg.* 52(5):405-412.
- Otake, S., Dee, S., Corzo, C., Oliveira, S., and Deen, J. (2010): Long-Distance Airborne Transport of Infectious PRRSV and *Mycoplasma hyopneumoniae* from a Swine Population Infected with Multiple Viral Variants. *Vet. Microbiol.*, 145(3–4):198–208.
- Ottengraf, S. P. P., Konings, J. H. G. (1991): Emission of microorganisms from biofilters. *Bioprocess Engineering* 7:89-96.
- Paba, E., Chiominto, A., Marcelloni, A. M., Proietto, A. R., Sisto, R. (2014): Exposure to airborne culturable microorganisms and endotoxin in two Italian poultry slaughterhouses. *J. Occup. Environ. Hyg.* 11(7):469-478.
- Paez-Rubio, T., Peccia, J. (2005): Estimating solar and nonsolar inactivation rates of airborne bacteria. *J. Environ. Eng.* 131(4):512–517.
- Papineni, R. S., Rosenthal, F. S. (1997): The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *J. Aerosol Med.* 10(2):105-116.
- Pasanen, A. L., Kalliokoski, P., Pasanen, P., Salmi, T., Tossavainen, A. (1989): Fungi carried from farmers' work into farm homes. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 50(12):631-633.
- Pauli, B., Luginbuhl, H., Gerber, H. (1974): The situation in animals: Responses of cattle and horses to inhaled antigens. - In: *Aspergillosis and farmer's lung in man and animal. Proceedings of the 4th International Symposium, Davos, 7-9 October 1971* (ed. R. DeHaller & F. Suter), H. Huber Publishers, Bern, 241-251.
- Pavan, R. (2015): Aeromycoflora of Animal Rearing Houses of Bangalore, India. *British Microbiol. Res. J.* 8(2):395-402.
- Pavan, R., Manjunath, K. (2013): Indoor study on airborne fungi in swine house of Bangalore, India. *Int. J. Curr. Sci.* 9:77-82.
- Pavan, R., Manjunath, K. (2014): Qualitative analysis of indoor and outdoor airborne fungi in cowshed. *J. Mycol.* 1–8.
- Pavičić, Ž., Balenović, T., Halpotić, H., Tofant, A., Popović, M., Balenović, M., Matković, K., Valpotić, I. (2006): Influence of porcine housing density on species diversity and number of airborne microorganisms at fattening facilities. *Acta Vet. (Brno)* 75:533–540.
- Pavičić, Ž., Balenović, T., Popović, M., Valpotić, I., Biuk-Rudan, N., Valpotić, H. and Ekert Kabalin, A. (2007): Airborne microbe numbers in different housing conditions of rearing pigs. *ISAH-2007 Tartu, Estonia* 274.
- Pearce-Duvel, J.M.C. (2006): The origin of human pathogens: evaluating the role of agriculture and domestic animals in the evolution of human disease, *Biol. Rev. Camb. Philos. Soc.* 81:369–382.
- Pearson, C. C., Sharples, T. J. (1995): Airborne dust concentrations in livestock buildings and the effect of feed. *J. Agric. Eng. Res.* 60:145-154.
- Pell, A. N. (1997): Manure and Microbes: Public and Animal Health Problem? *J. Dairy Sci.* 80:2673-2681.

- Pensaert, M. B., de Bouck, P. (1978): A new coronavirus-like particle associated with diarrhea in swine. Arch. Virol. 58:243–247.
- Persoons, D., Van Hoorebeke, S., Hermans, K., et al. (2009): Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in poultry. Emerg. Infect. Dis. 15(3):452-453.
- Petersen, C. F., Sauter, E. A., Parkinson, J. F., Dixon, J. E., Stroh, R. C. (1978): Microflora of air samples from poultry houses. Poultry Sci. 57:1180.
- Peterson, E. W., Lighthart, B. (1977): Estimation of down wind viable airborne microbes from a wet cooling tower- including settling. Microb. Ecol. 4:67–79.
- Petkov, G., Tsutsumanski, V. (1975a): Contamination of the air with microorganisms at various distances from the poultry house. Vet. Med. Nauki. 12(8):15-20. (in bulgarisch)
- Pillai, S.D., Ricke, S.C. (2002): Bioaerosols from municipal and animal wastes: Background and contemporary issues. Can. J. Microbiol. 48:681–696.
- Platz, S., Scherer, M., Unshelm, J. (1995): Untersuchungen zur Belastung von Mastschweinen sowie der Umgebung von Mastschweinställen durch atembaren Feinstaub, stallspezifische Bakterien und Ammoniak. Zentralbl. Hyg. Umweltmed. 196(5):399-415.
- Pomorska, D., Larsson, L., Skorsca, C., Sitkowska, J., Dutkiewicz, J. (2009): Levels of bacterial endotoxins in the samples of settled dust collected in animal houses. Bull. Vet. Inst. Puławy. 53:37.
- Pomorska, D., Larsson, L., Skórska, C., Sitkowska, J., Dutkiewicz, J. (2007): Levels of bacterial endotoxin in air of animal houses determined with the use of gas chromatography - Mass spectrometry and Limulus test. Ann. Agric. Environ. Med. 14(2):291-298.
- Popescu, S., Borda, C., Diugan, E. (2013): Microbiological Air Contamination in Different Types of Housing Systems for Laying Hens. Pro Environment 6:549–555
- Popescu, S., Borda, C., Hegedus, C. I., Stefan, R., Lazar, E. A. (2010): The Microbiologic Quality of the Air in Broiler Houses. Animal Sci. Biotechnol. 43(2):119-123.
- Poulsen, O.M., Breum, N.O., Ebbehøj, N., Hansen, A.M., Ivens, U., van Leleveld, D., Malmros, P., Matthiasen, L., Nielsen, B.H., Nielsen, E.M., Schibye, B., Skov, T., Stenbaek, E.I., Wilkins, K.C. (1995): Collection of domestic waste. Review of occupational health problems and their possible causes. Sci. Tot. Environ. 168:1-19.
- Predicala, B. Z., Urban, J. E., Maghirang, R. G., Jerez, S. B., Goodband, R. D. (2001): Comparison of bioaerosol sampling methods for swine barns. Swine Day 200, 127-130.
- Predicala, B. Z., Urban, J. E., Maghirang, R. G., Jerez, S. B., Goodband, R. D. (2002): Assessment of bioaerosols in swine barns by filtration and impaction. Curr. Microbiol. 44(2):136-140.
- Preller, L., Heederik, D., Kromhout, H. et al. (1995): Determinants of dust and endotoxin exposure of pig farmers: Development of a control strategy using empirical modelling. Ann. Occup. Hyg. 39(5):545–557.
- Protais, J., Queguiner, S., Boscher, E., Piquet, J. C., Nagard, B., Salvat, G. (2003): Effect of housing systems on the bacterial flora of the air. Br. Poultry Sci. 44(5):778-779.
- Pu, S., Han, F., Ge, B. (2009): Isolation and Characterization of Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus* Strains from Louisiana Retail Meats. Appl. Environ. Microbiol. 75(1):265-267.
- Quarles, C. L., Gentry, R. F., Bressler, G. O. (1969): Bacterial contamination in Poultry houses and its relationship to egg hatchability. Poultry Sci. 49:60-68.

- Radon, K. (2004): Atemwegsgesundheit und Allergiestatus bei jungen Erwachsenen in ländlichen Regionen Niedersachsens – Niedersächsische Lungenstudie (NiLS). München: Klinikum der Universität München.
- Radon, K., Danuser, B., Iversen, M., Jörres, R., Monso, M., Opravil, U., Weber, C., Donham, K. J., Nowak, D. (2001): Respiratory Symptoms in European animal farmers, *Eur. Respir. J.* 17:747-754.
- Radon, K., Danuser, B., Iversen, M., Monso, E., Weber, C., Hartung, J., Donham, K. J., Palmgren, U., Nowak, D. (2002): Air Contaminants in Different European Farming Environments. *Ann. Agric. Environ. Med.* 9:41-48.
- Radon, K., S. Garz, A. Schottky, et al. (2000b): Lung function and work-related exposure in pig farmers with respiratory symptoms. *J. Occup. Environ. Med.* 42(8):814–820.
- Radon, K., Schottky, A., Garz, S., Koops, F., Szadkowski, D., Nowak, D., Luczynska, C. (2000): Distribution of dust-mite allergens (Lep d 2, Der p 1, Der f 1, Der 2) in pig-farming environments and sensitization of the respective farmers. *Allergy* 55:219-225.
- Radon, K., Schulze, A., Ehrenstein, V., van Strien, R. T., Praml, G., Nowak, D. (2007): Environmental exposure to confined animal feeding operations and respiratory health of neighboring residents. *Epidemiology.* 18:300–308.
- Rautiala, S., Kangas, J., Louhelainen, K., Reiman, M. (2003): Farmers Exposure to airborne microorganisms in composting swine confinement buildings. *AfHA Journal* 64:673-477.
- Reynolds, H. Y. (1988): Hypersensitivity pneumonitis: Correlation of cellular and immunologic changes with clinical phases of disease. *Lung* 166(1):189–208.
- Riethmüller, A (2014): Prävention von Erkrankungen der Atemwege durch Bioaerosole in der Landwirtschaft und damit verbundener Bereiche. B2-Seminar, DGUV-Akademie Dresden.
- Riley, R. L., Kaufman, J. E. (1972): Effect of relative humidity on the inactivation of airborne *Serratia marcescens* by ultraviolet radiation. *Appl. Microbiol.* 23(6):1113–1120.
- Rimac, D., Macan, J., Varnai, V. M., Vučemilo, M., Matković, K., Prester, L. et al. (2010): Exposure to poultry dust and health effects in poultry workers: impact of mould and mite allergens. *Int. Arch. Occup. Environ. Health.* 83(1):9–19.
- Rolle, M., Mayr, A. (2002): Medizinische Mikrobiologie, Infektions- und Seuchenlehre. 7. Aufl. Stuttgart: Enke Verlag.
- de Rooij, M. M., Borlée, F., Smit, L. A., de Bruin, A., Janse, I., Heederik, D. J., Wouters, I. M. (2016): Detection of *Coxiella burnetii* in Ambient Air after a Large Q Fever Outbreak. *PLoS One* 11(3):e0151281.
- Roque, K., Lim, G. D., Jo, J-H., Shin, K-M., Song, E-S., Gautam, R., Kim, C-Y., Lee, K., Shin, S., Yoo, H.s., Heo, Y., Kim, H. A. (2016): Epizootiological characteristics of viable bacteria and fungi in indoor air from porcine, chicken, or bovine husbandry confinement buildings. *J. Vet. Sci.* 17(4):531–538.
- Rüden, H., Thofern, E., Fischer, P., Mihm, U. (1978): Airborne Microorganisms: Their occurrence, distribution and dependence on environmental factors – Especially on organic compounds of air –pollution. *Pageoph.* 116:335–350.
- Rule, A. M., Evans, S. L., Silbergeld, E. K. (2008): “Food animal transport: A potential source of community exposures to health hazards from industrial farming (CAFOs)” *J. Infect. Pub. Health* 1:33–39.
- Runge, G.A., Blackall, P.J. and Casey, K.D. (2007): Chicken Litter Issues Associated with Sourcing and Use. Canberra: Rural Industries Research and Development Corporation.

- Rylander, R., Donham, K. J., Hjort, C. et al. (1989): Effects of exposure to dust in swine confinement buildings—A working group report. *Scand. J. Work Environ. Health* 15(5):309–312.
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2002): Keim- und Luftschadstoffemissionen einer Sauenzuchtanlage. https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/Messbericht_Luftionisation.pdf (Zugriff: 23.06.2017)
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) (2017): Innovative Abluftreinigung in der Tierhaltung. Schriftenreihe, Heft 2/2017.
- Saleh, M. (2006): Untersuchungen zur Luftqualität in verschiedenen Systemen der Geflügelhaltung mit besonderer Berücksichtigung von Staub und Luftkeimen“. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Saleh, M., Seedorf, J., Hartung, J. (2005): Influence of animal age and season on bio-aerosol concentrations in a broiler house. In: Proceedings of the 12th ISAH Congress on Animal Hygiene, Warschau, Poland.
- Samadi, S., Van Eerdenburg, F. J. C. M., Jamshidifard, A., Otten, G. P., Droppert, M., et al. (2012): The influence of bedding materials on bio-aerosol exposure in dairy barns. *J. Exposure Sci. Environ. Epid.* 361-368.
- Samadi, S., Wouters, I. M., Houben, R., Jamshidifard, A-R., Van Eerdenburg, F., Heederik, D. J. J. (2009): Exposure to Inhalable Dust, Endotoxins, b(1/3)-Glucans, and Airborne Microorganisms in Horse Stables. *Ann. Occup. Hyg.* 53(6):595–603.
- Sarikas, G. (1976): Untersuchungen über Keim- und Staubemissionen aus Geflügelställen. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Sauter, E. A., Petersen, C. F., Steele, E. E., Parkinson, J. F., Dixon, J. E., Stroh, R. C. (1981): The airborne microflora of poultry houses. *Poultry Sci.* 60(3):569–574.
- Schaeffer, J. W., Reynolds, S., Magzamen, S., VanDyke, A., Gottel, N. R., Gilbert, J. A., Owens, S. M., Hampton-Marcell, J. T., Volckens, J. (2017): Size, Composition, and Source Profiles of Inhalable Bioaerosols from Colorado Dairies. *Environ. Sci. Technol.* 51:6430–6440.
- Schäfer, J., Kämpfer, P., Jäckel, U. (2011): Detection of *Saccharopolyspora rectivirgula* by quantitative real-time PCR. *Ann. Occup. Hyg.* 55(6):612-619.
- Schaper, G. (2004): Orientierende Untersuchungen zum Luftkeimgehalt im Umfeld von Nutztierställen eines viehstarken Gebietes in Norddeutschland. Dissertation, Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Scharf, P. (2004): Einfluss einer biologischen Abluftreinigungsanlage auf die Emission von Mikroorganismen und Endotoxinen aus einem Entenmaststall. Dissertation, Freie Universität Berlin.
- Schierl, R., Heise, A., Egger, U., Schneider, F., Eichelser, R., Neser, S., Nowak, D. (2007): Endotoxin concentration in modern animal houses in southern Bavaria. *Ann. Agric. Environ. Med.* 14(1):129-136.
- Schirz, S., Zvoll, M., Sowa, A., Badouin, D. (2003): Technische Maßnahmen zur Emissionsminderung in der Intensivtierhaltung, Untersuchung an Biofiltern und Kombinationsanlagen. Essen: Abschlussbericht im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, Fachberichte LUA NRW 3/2003.

- Schlaud, M., Salje, A., Nischan, P., Behrendt, W., Grüger, J., Schäfer, Th., Schwartz, F. W. (1998): MORBUS: Beobachtungspraxen in Niedersachsen. Bericht zur Erhebung in Süd-Oldenburg. Dtsch. Tierärztl. Wschr. 105:235-240.
- Schneider, D., Jäckel, U., Gärtner, A., Dieterich, F. (2015): Taxonomische Charakterisierung luftgetragener Bakterien der Familie *Staphylococcaceae* in Emissionen von Hähnchenmastanlagen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 75(9):340–346.
- Schrader et al. (2013): Erarbeitung von Managementempfehlungen zur Kleingruppenhaltung für Legehennen unter Praxisbedingungen im Vergleich zur Volierenhaltung (2807UM009). Download: <http://download.ble.de/07UM009/index.html>
- Schulz, J. (2007): Zur Charakterisierung der Ausbreitungsentfernung von Bioaerosolen aus Masthühnerställen. Dissertation, Universität Bielefeld.
- Schulz, J., Bao, E Clauß, M., Hartung, J. (2013): The potential of a new air cleaner to reduce airborne microorganisms in pig house air: preliminary results. Berl. Munch. Tierärztl. Wochenschr. 126(3-4):143-148.
- Schulz, J., Formosa, L., Seedorf, J., Hartung, J. (2011): Measurement of culturable airborne staphylococci downwind from a naturally ventilated broiler house. *Aerobiologia* 27:311-318.
- Schulz, J., Friese, A., Klees, S., Tenhagen, B. A., Fetsch, A., Rösler, U., Hartung, J. (2012): LA-MRSA contamination of air and soil surfaces in the vicinity of pig barns: A longitudinal study. *Appl. Environ. Microbiol.* 78(16):5666–5671.
- Schulz, J., Hartung, J., Seedorf, J. & Formosa, L.C., (2004): Staphylococci as an indicator for bacterial emissions from broiler houses. *Proc. Interim Congr. Int. Soc. Animal Hyg.* 75-77.
- Schulz, J., Ruddat, I., Hartung, J., Hamscher, G., Kemper, N., Ewers, C. (2016): Antimicrobial-resistant *Escherichia coli* survived in dust samples for more than 20 years. In: *Frontiers in Microbiology* 7:866-876.
- Schulz, J., Runge, M., Schröder, C., Ganter, M., Hartung, J. (2005a): Nachweis von *Coxiella burnetii* in der Luft eines Schafstalles bei der Schur. *Dtsch. tierärztl. Wschr.* 112:470–472.
- Seedorf, J. (2004): An emission inventory of livestock-relates bioaerosols for Lower Saxony, Germany. *Atmos. Environ.* 6565-6581.
- Seedorf, J., Hartung, J., Ross, A., Steffens, G. (1999): Bioaerosol reduction efficiencies of biofilters and bioscrubbers. *Proceedings of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities*, 30 May–2 June, Aarhus, Denmark, pp. 322–328.
- Seedorf, J., Hartung, J., Schröder, M., Linkert, K. H., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J. O., Metz, J. H. M., Groot Koerkamp, P. W. G., Uenk, G. H., Wathes, C. M. (1998a): Concentrations and Emissions of Airborne Endotoxins and Microorganisms in Livestock Buildings in Northern Europe. *J. Agric. Engin. Res.* 70:97-109.
- Seedorf, J., Schröder, M., Hartung, J. (1998b): Emissions and immisions of bio-aerosols from a duck fattening unit. *Zentralbl. Hyg. Umweltmed.* 201:387-403.
- Senthilselvan, A., Dosman, J. A., Kirychuk, S. P., et al. (1997): Accelerated lung function decline in swine confinement workers. *Chest* 111(6):1733–1741.
- Shimizu, A., Kawano, J., Yamamoto, C., Kakutani, O., Anzai, T., Kamada, M. (1997): Genetic analysis of equine methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* by pulsed-field gel electrophoresis. *J. Vet. Med. Sci.* 59(10):935-937.

- Shokri, H. (2016): Investigation on mycoflora of poultry breeding houses' air and studying the efficacy of spraying and fumigation on inactivating the airspora. *Iranian Journal of Veterinary Medicine* 10(1):19-26.
- Siggers, J. L., Kirychuk, S. P., Lemay, S. P., Willson, P. J. (2011): Size distribution of particulate and associated endotoxin and bacteria in traditional swine barn rooms and rooms sprinkled with oil. *J. Agromed.* 16(4):271-279.
- Singh, A. B., Singh, A. (1996): Indoor Airborne Fungi as Important Occupational Sensitisers in Poultry Workers. *Indoor. Built Environ.* 5:138-147.
- Skóra, J., Matusiak, K., Wojewódzki, P., Nowak, A., Sulyok, M., Ligocka, A., Okrasa, M., Hermann, J., Gutarowska, B. (2016): Evaluation of Microbiological and Chemical Contaminants in Poultry Farms. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13(2):192.
- Skorge, T.D., Eagan, T.M., Eide, G.E., Gulsvik, A. und Bakke, P.S. (2005): Indoor exposures and respiratory symptoms in a Norwegian community sample. *Thorax* 60(11):937-942.
- Smit, L. A. M., van der Sman-de Beer, F., Opstal-van Winden, A. W. J., et al. (2012): Q fever and pneumonia in an area with a high livestock density: a large population-based study, *PLoS One* 7 <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0038843>.
- Smith, A. B., Bernstein, D. I., London, M. A., Gallagher, J., Ornella, G. A., Gelletly, S. K., Wallingford, K., Newman, M. A. (1990): Evaluation of occupational asthma from airborne egg protein exposure in multiple settings. *Chest* 98(2):398-404.
- Smith, T. C., Male, M. J., Harper, A. L., et al. (2009): Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) strain ST398 is present in midwestern U.S. swine and swine workers. *PLoS One* 4(1):e4258.
- Sneeringer, S. (2009): Does animal feeding operation pollution hurt public health? A national longitudinal study of health externalities identified by geographic shifts in livestock production. *Amer. J. Agr. Econ.* 91(1):124-137.
- Sørensen, J. H., Jensen, C. Ø., Mikkelsen, T., Mackay, D. K. J., Donaldson, A. I. (2001): Modelling the atmospheric dispersion of foot-and-mouth disease virus for emergency preparedness. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere* 26(2):93-97.
- Søndergaard, M. S., Josefsen, M. H., Löfström, C., Christensen, L. S., Wieczorek, K., Osek, J., Hoorfar, J. (2014): Low-cost monitoring of *Campylobacter* in poultry houses by air sampling and quantitative PCR. *J. Food Prot.* 77(2):325-330.
- Songer, J.G., Uzal, F.A. (2005): Clostridial enteric infections in pigs. *J. Vet. Diagn. Invest.* 17:528-536.
- Sowiak, M., Bródka K., Kozajda, A., Buczyńska, A., Szadkowska-Stańczyk, I. (2012): Fungal Aerosol In The Process Of Poultry Breeding – Quantitative And Qualitative Analysis. *Medycyna Pracy* 63(1):1-10.
- Sowiak, M., Bródka, K., Buczyńska, A., Cyprowski, M., Kozajda, A., Sobala, W., Szadkowska-Stańczyk, I. (2011): An assessment of potential exposure to bioaerosols among swine farm workers with particular reference to airborne microorganisms in the respirable fraction under various breeding conditions. *Aerobiologia* 28(2):121-133.
- Spindler, B., Hartung, J. (2009): Untersuchungen zur Besatzdichte entsprechend der RL 2007/43/EG bei Jungmasthühnern – erste Ergebnisse, In: Nds. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung (Hrsg.): Tagungsband 7, Niedersächsisches Tierarztsymposium, Oldenburg, 24-35.
- Spirin, V. F., Mikhaïlova, N. A. (1991): Microbial contamination of air at the swine-breeding farms. *Gig Sanit.* 5:34-36. (Auf Russisch).

- Spoehr, M., Rau, J., Friedrich, A., et al. (2011): Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) in three dairy herds in southwest Germany. *Zoonoses Public Health*. 58(4):252-261.
- Spradbrow, P. B., Samuel, J. L., et al. (1988): Serological response of chickens to oral vaccination with newcastle disease virus. *Vet. Microbiol.* 16: 255-262.
- Springorum, A. C., Clauß, M. (2016): Das Überleben von Bakterien im luftgetragenen Zustand – Ein Literaturüberblick zur Tenazität. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 76 (9):351-358.
- Springorum, A. C., Clauß, M., Rieger, M. a., Hinz, T., Hartung, J. (2015): Mikrobielle Belastung der Luft in verschiedenen alternativen Haltungsformen für Legehennen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 75(9):331-335.
- Springorum, A. C., Schulz, J., Lung, T., Clauß, M., Hartung, J. (2014): Vorhersagbarkeit von Keimimmissionen im Umfeld von Nutztierhaltungen – ein Vergleich von Messungen mit den Prognosen von zwei Ausbreitungsmodellen. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 74(9):384-390.
- Ssematimba, A., Hagenaars, T. J., de Jong, M. C. (2012): Modelling the wind-borne spread of highly pathogenic avian influenza virus between farms. *PLoS One* 7(2):e31114.
- State Standard GOST 12.1.005-88 (1988): A Sanitary-Hygienic Norm for Bacterial Aerosols in Stock-Raising and Poultry Farming Apartments. Publishing House of Standards, Moscow (in Russisch).
- Stegeman, A., Bouma, A., Elbers, A.R.W., DeJong, M.C.M., Nodelijk, G., De Klerk, F., et al. (2004): Avian influenza A virus (H7N7) epidemic in The Netherlands in 2003: course of the epidemic and effectiveness of control measures. *J. Infect. Dis.* 190:2088–2095.
- Steiger, A., Stellmacher, W. (1977): Wirkung von Desinfektionsmaßnahmen in K1-Kälberställen auf den Bakteriengehalt der Stallluft. *Tierzucht* 31:443.
- Stersky, A. K., Heldman, D. R., Hedrick, T. I. (1972): Viability of airborne *Salmonella newbrunswick* under various conditions. *J. Dairy Sci.* 55(1):14–18.
- Straumfors, A., Heldal, K. K., Eduard, W., Wouters I. M., Ellingsen, D. G., Skogstad, M. (2016): Cross-shift study of exposure – response relationships between bioaerosol exposure and respiratory effects in the Norwegian grain and animal feed production industry. *Occup. Environ. Med.* 73:685–693.
- Szadkowska-Stańczyk, I., Bródka, K., Buczyńska, A., Cyprowski, M., Kozajda, A., Sowiak, M. (2010): Exposure to bioaerosols among CAFO workers (swine feeding)]. *Med. Pr.* 61(3):257-269. (in polnisch)
- Szponar, B., Larsson, L. (2001): Use of mass spectrometry for characterizing microbial communities in bioaerosols. *Ann. Agric. Environ. Med.* 8:111-117.
- Takai S. (1997): Epidemiology of *Rhodococcus equi* infections: a review. *Vet Microbiol.* 56(3-4):167-76.
- Tang, J. W. (2009): The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *J. R. Soc. Interface* 6:737–746.
- Taylor L.H., Latham, S.M., Woolhouse, M.E. (2001): Risk factors for human disease emergence, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. B Biol. Sci.* 356: 983–989.
- Technical Guidance Note M9 (2017): Environmental monitoring of bioaerosols at regulated facilities. Environment Agency, Version 1.
- Tenhagen, B-A., Fetsch, A., Bräunig, J., Käsbohrer, A. (2008): Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus* (MRSA) von Nutztieren. Abschätzung der Gefährdung des Menschen. *Deutsches Tierärzteblatt* 9:1177-1182.

- Tesseraux, I., Dezenter, S., Kramer, K., Dotzauer, T. (2015): Sammlung von Bakterien in der Luft mit Impingern – Einfluss von Spülen des Einlassrohres auf das Nachweisergebnis. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 75(9):336-339.
- Thorne, P. S. (2007): Environmental health impacts of concentrated animal feeding operations: anticipating hazards searching for solutions. *Environ. Health Perspect.* 115(2):296–297.
- Thorne, P. S., Kiekhaefer, M. S., Whitten, P., Donham, K. J. (1992): Comparison of Bioaerosol Sampling Methods in Barns Housing Swine. *Appl. Environ. Microbiol.* 2543-2551.
- Thorne, P., Ansley, A., Perry, S. S. (2009): Concentrations of Bioaerosols, Odors, and Hydrogen Sulfide Inside and Downwind from Two Types of Swine Livestock Operations. *J. Occup. Environ. Hyg.* 6(4):211-220.
- Thorne, P. S., Perry, S. S., Saito, R., O’Shaughnessy, P. T., Mehaffy, J., Metwalli, N., Keefer, T., Donham, K., Reynolds, S. J. (2010): Evaluation of the *Limulus* amoebocyte lysate and recombinant factor C assays for assessment of airborne endotoxin. *Appl. Environ. Micro.* 4988-4995.
- Thu, K. M. (2002): Public health concerns for neighbors of large-scale swine production operations. *J. Agric. Saf. Health* 8(2): 175–184.
- Thuen, A., Ling, B. (2017): La Neelporlebla Lumo de Esti. *J. Ust. Kid. Ding* 66(6):123. (in Esperanto)
- Toprak, E. (2014): Real Time Detection of Primary Biological Aerosol Particles (PBAP) in the context of atmospheric ice formation. Dissertation Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Karlsruhe.
- Toprak, E., Schnaiter, M. (2013): Fluorescent biological aerosol particles measured with the Waveband Integrated Bioaerosol Sensor WIBS-4: laboratory tests combined with a one year field study. *Atmos. Chem. Phys.*, 13:225–243.
- Torgerson, P. R., Macpherson, C. N. L. (2011): The socioeconomic burden of parasitic zoonoses: global trends. *Vet. Parasitol.* 182:79–95.
- Torok, V. A., Hughes, R. J., et al. (2009): Influence of different litter materials on cecal microbiota colonization in broiler chickens. *Poultry Sci.* 88:2474-2481.
- TRBA 405 (2006): Technische Regeln für Biologische Arbeitsstoffe: Anwendung von Messverfahren und technischen Kontrollwerten für luftgetragene Biologische Arbeitsstoffe. *Bundesarbeitsblatt* 7-2006:193-194.
- Tsapko, V. G., Chudnovets, A. J., Sterenbogen, M. J., Papach, V. V., Dutkiewicz, J., Skórska, C., Krysińska-Traczyk, E., Golec, M. (2011): Exposure to bioaerosols in the selected agricultural facilities of the Ukraine and Poland - a review. *Ann. Agric. Environ. Med.* 18(1):19-27.
- Uribe, S. P. (2007): Endotoxins Detection and Control in Drinking Water Systems. Master Thesis. Universität von Montreal 2007.
- van Asseldonk, M. A., Prins, J., Bergevoet, R. H. (2013). Economic assessment of Q fever in the Netherlands. *Prev. Vet. Med.* 112:27–34.
- van den Bogaard, A. E., Stobberingh, E. E. (1999): Antibiotic usage in animals: impact on bacterial resistance and public health. *Drugs* 58(4):589-607.
- Van der Giessen, J., Van de Giessen, A., Braks, M. (2010): Emerging zoonoses: Early warning and surveillance in the Netherlands. Report No.: 3302144002. National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, The Netherlands.

- van der Hoek, W., Morroy, G., Renders, N. H., Wever, P. C., Hermans, M. H., Leenders, A. C., Schneeberger, P. M. (2012): Epidemic Q fever in humans in the Netherlands. *Adv. Exp. Med. Biol.* 984:329-364.
- van Dijk, C. E., Smit, L. A. M., Hooiveld, M., Zock, J.-P., Wouters, I. M., Heederik, D. J. J., Yzermans, J. C. (2016): Associations between proximity to livestock farms, primary health care visits and self-reported symptoms. *BMC Family Practice* 17:22.
- van Dijk, C. E., Zock, J.-P., Baliatsas, C., Lidwien A. M., Borlée, S. F., Spreeuwenberg, P., Heederik, D. C., Yzermans, J. (2017): Health conditions in rural areas with high livestock density: Analysis of seven consecutive years. *Environ. Pollution* 222:374-382.
- van Duijkeren, E., Ikawaty, R., Broekhuizen-Stins, M. J., et al. (2008): Transmission of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* strains between different kinds of pig farms. *Vet. Microbiol.* 126(4):383-389.
- Van Leuken, J. P. G., Swarta, A. N., Havelaara, A. H., VanPuld, A., Van der Hoek, W., Heederik, D. (2016): Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock – A review to inform risk assessment studies. *Microbial Risk Analysis* 1:19–39.
- van Loo, I., Huijsdens, X., Tiemersma, E., et al. (2007): Emergence of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* of animal origin in humans. *Emerg. Infect. Dis.* 13(12):1834-1839.
- van Oirschot, J. T. (1979): Experimental production of congenital persistent swine fever infections: I. Clinical, pathological and virological observations. *Vet. Microbiol.* 4:117-132.
- Varnai, M. V., Macan, J. 2004: Professional endotoxin exposure. *Sigurnost* 43: 207-216. (auf kroatisch)
- VDI 2066 Blatt 10 (2004): Messen von Partikeln - Staubmessung in strömenden Gasen - Messung der Emissionen von PM₁₀ und PM_{2,5} an geführten Quellen nach dem Impaktionsverfahren. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4250 Blatt 3 (2015): Bioaerosole und biologische Agenzien - Anlagenbezogene umweltmedizinisch relevante Messparameter und grundlegende Beurteilungswerte. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4251 Blatt 1 (2007): Planung von anlagenbezogenen Immissionsmessungen –Fahnenmessung. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4251 Blatt 3 (2015): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Anlagenbezogene Ausbreitungsmodellierung von Bioaerosolen. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4251 Blatt 4 (2017): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Ermittlung der Vorbelastung. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4252 Blatt 3 (2008): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Aktive Probenahme von Bioaerosolen - Abscheidung von luftgetragenen Bakterien mit Impingern nach dem Prinzip der kritischen Düse. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4253 Blatt 3 (2018): Erfassen luftgetragener Mikroorganismen und Viren in der Außenluft - Verfahren zum quantitativen kulturellen Nachweis von Bakterien in der Luft - Verfahren nach Abscheidung in Flüssigkeiten. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4255 Blatt 3 (2016): Bioaerosole und biologische Agenzien - Emissionsfaktoren für Geflügelhaltung. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4255 Blatt 4 (2017): Bioaerosole und biologische Agenzien - Emissionsfaktoren für Schweinehaltung. Beuth Verlag Berlin.
- VDI 4257 Blatt 1 (2013): Bioaerosole und biologische Agenzien - Messen von Emissionen - Planung und Durchführung von Emissionsmessungen. Beuth Verlag Berlin.

- VDI 4257 Blatt 2 (2011): Bioaerosole und biologische Agenzien - Messen von Emissionen - Probenahme von Bioaerosolen und Abscheidung in Flüssigkeiten. Beuth Verlag Berlin.
- Vela, J., Hildebrandt, K., Metcalfe, A., Rempel, H., Bittman, S., Topp, E., Diarra, M. (2012): Characterization of *Staphylococcus xylosus* isolated from broiler chicken barn bioaerosol. *Poult Sci.* 91(12):3003-3012.
- Venter, P., Lues, J. F. R., Theron, H. (2004): Quantification of Bioaerosols in Automated Chicken Egg Production Plants. *Poultry Science* 83:1226–1231
- Verbeke, W. (2003): Consumer perception of food safety: role and influencing factors, *New Approaches to Food-safety Econ*, 6–21.
- Verreault, D., Moineau, S., Duchaine, C. (2008): Methods for sampling of airborne viruses. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 72(3):413-444.
- Virtanen, T., Vilhunen, P., Husman, K., Happonen, P., Mantyjarvi, R. (1988): Level of airborne bovine epithelial antigen in Finnish cowsheds. *Int Arch. Occup. Environ. Health* 60:355-360.
- von Essen, S. G., Donham, K. J. (1999): Illness and injury in animal confinement workers. *Occup. Med.* 14, 2:337-350.
- von Salviati, C., Laube, H., Guerra, B., Roesler, U., Friese, A. (2015): Emission of ESBL/AmpCproducing *Escherichia coli* from pig fattening farms to surrounding areas. *Vet. Microbiol.* 175:77–84.
- Vucemilo, M., Matkovic, K., Vinkovic, B., Jaksic, S., Granic, K., Mas, N. (2007): The effect of animal age on air pollutant concentration in a broiler house. *Czech. J. Anim. Sci.* 6:170–174.
- Vucemilo, M., Matkovic, K., Vinkovic, B., Macan, J., Varnai, V. M., Prester, L. J., Granic, K., Orct, T. (2008): Effect of microclimate on the airborne dust and endotoxins concentration in a broiler house. *Czech. J. Anim. Sci.* 53(2)83.
- Vučemilo, M., Vinković, B., Matković, K. (2006): Influence of broiler age on airborne pollutant content in poultry house. *Krmiva*, 48:3–6.
- Vučemilo, M., Vinković, B., Tofanta, A., Šimpraga, A., Pavicic, A., Matkovic, K. (2005): Microbiological air contamination in intensive poultry breeding. *ISAH. Warsaw, Poland.* 2:127.
- Wagner, K., Sagkob, S., Kemper, N. (2016): Hygienische Bewertung von organischem Beschäftigungsmaterial In: *Qualitätsprüfungen und Projekte in der Tierhaltung. Jahresbericht 2015/2016*, 96-98.
- Wallensten, A., Moore, P., Webster, H., Johnson, C., van der Burgt, G., Pritchard, G., et al. (2010): Q fever outbreak in Cheltenham, United Kingdom, in 2007 and the use of dispersion modelling to investigate the possibility of airborne spread. *Euro. Surveill.* 15(12).
- Walser, S. M., Brenner, B., Wunderlich, A., Tuschak, C., Huber, S., Kolb, S., Niessner, R., Seidel, M., Höller, C., Herr, C. E. W. (2017): Detection of *Legionella*-contaminated aerosols in the vicinity of a bio-trickling filter of a breeding sow facility—A pilot study. *Sci. Tot. Environ.* 575:1197-1202.
- Wang, Y., Lu, G., Chai, T., Song, C., Yao, M. (2007): The airborne fungi from indoor air of animal houses. *XIII International Congress in Animal Hygiene, ISAH-Tartu, Estonia*, 571-577.
- Wang, Y., Chai, T., Lu, G., Quan, C., Duan, H., Yao, M., Zucker, B. A., Schlenker, G. (2008): Simultaneous detection of airborne aflatoxin, ochratoxin and zearalenone in a poultry house by immunoaffinity clean-up and high performance liquid chromatography. *Environ. Res.* 107:139–144.
- Wang, Y., Chai, T., Lu, G., Sun, L., Ouyang, Y., Sun, X. (2011): Detection of airborne trichothecene-producing *Fusarium* species in chicken houses. *Front. Biosci.* 3:74-80.

- Wathes, C. M., Howard, K., Webster, A. J. (1986): The survival of *Escherichia coli* in an aerosol at air temperatures of 15 and 30 degrees C and a range of humidities. *J. Hyg. (Lond)*. 97(3):489-496.
- Wathes, C. M., Holden, M. R., Sneath, R. W., White, R. P., Phillips, V. R. (1997): Concentrations and emission rates of aerial ammonia, nitrous oxide, methane, carbon dioxide, dust and endotoxin in UK broiler and layer houses. *British Poultry Sci.* 38:14–28.
- Wathes, C. M., Howard, K., Jones, D. D. R., Webster, J. F. (1984): The Balance of Airborne Bacteria in Calf Houses. *J. agric. Engng Res.* 30:81-90.
- Webster, R. G., Yakhno, M., et al. (1978): Intestinal influenza: Replication and characterization of influenza viruses in ducks. *Virology* 84:268-278.
- Wedding, J., McFarland, A. R., Cermak, J. E. (1977): Large particle collection characteristics of ambient aerosol samplers. *Environ. Sci. Technol.* 11(4):387-390.
- Weese, J. S., Archambault, M., Willey, B. M., et al. (2005): Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in horses and horse personnel, 2000-2002. *Infect. Dis.* 11(3):430-435.
- Wells, W. F., Wells, M. W. (1936): Airborne infection sanitary control. *JAMA* 107(22):1805–1809.
- Wells, W. F., Zappasoid, P. (1942): The effect of humidity on beta Streptococci (Group C) atomized into air. *Am. Assoc. Adv. Sci.* 277–278.
- White, D. G., Zhao, S., Singh, R., McDermott, P. F. (2004): Antimicrobial Resistance Among Gram-Negative Foodborne Bacterial Pathogens Associated with Foods of Animal Origin. *Foodborne Pathogens and Disease* 1(3):137-152.
- Whyte, P., Collins, J. D., McGill, K., Monahan, C., O'Mahony, H. (2001): Distribution and prevalence of airborne microorganisms in three commercial poultry processing plants. *J. Food Prot.* 64(3):388-391.
- Wiegand, B., Hartung, J., Hinz, T., Wiemann, H. D. (1993): Luftqualität in Louisiana-Ställen. Teil 2: Keim- und Endotoxingehalt im luftgetragenen Stallstaub (Air quality in Louisiana buildings. Part 2; concentrations of microorganisms and endotoxins in airborne dust). *Landbauforschung Völkenrode* 43:236-241.
- Wijnand, E. (1997): Exposure to non-infectious microorganisms and endotoxins in Agriculture. *Ann. Agric. Environ. Med.* 4:179–186.
- Wilkinson, P. J., Donaldson, A. I., Greig, A., Bruce, W. (1977): Transmission studies with African swine fever virus: Infections of pigs by airborne virus. *J. Comp. Path.* 87(3):487-495.
- Willems, H., Verlinden, F., Biersteker, K. (1984): Work and health of the Dutch farmer. *T. Soc. Gezondheidszorg.* 62:21-27. (auf niederländisch)
- Williams, D. A. L., McCormack, M. C., Matsui, E. C., Diette, G. B., McKenzie, S. E., Geyh, A. S., Breyse, P. N. (2016): Cow allergen (Bos d2) and endotoxin concentrations are higher in the settled dust of homes proximate to industrial-scale dairy operations. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 26(1):42–47.
- Williamson, A. E., Gotaas, H. B. (1942): Aerosol sterilization of airborne bacteria. *Am. Ind. Hyg. Assoc.* 3(1):40–45.
- Wilson, S. C., Morrow-Tesch, J., Straus, D. C., Cooley, J. D., Wong, W. C., Mitlöhner, F. M., McGlone, J. J. (2002): Airborne microbial flora in a cattle feedlot. *Appl. Environ. Microbiol.* 68:3238-3242.
- Winkel, A., Wouters, I. M., Hagenaars, T. J., Heederik, D. J. J., Ogink, N. W. M., Vermeij, I. (2016): Additionele maatregelen ter vermindering van emissies van bioaerosolen uit stallen: verkenning van opties, kosten en effecten op de gezondheidslast van omwonenden =

Additional measures to reduce emissions of bioaerosols from animal houses: exploration of options, costs, and effects on health of neighbouring residents. Wageningen: Wageningen UR Livestock Research (Livestock Research rapport 949). (in niederländisch)

- Winkler, G. (2017): Bioaerosole und Tracergasmessungen. VDI-Expertenforum Bioaerosole, Berlin.
- Wiseman, A., Allan, E. M., Selman, I. E. (1984): A study of the respiratory diseases of adult cattle in Britain. 3. Farmer's lung. - Ir. Vet. J. 38:22-27.
- Witek, F. (1974): Inhalation injuries in agriculture. Wien Med. Wochenschr. 124(16):250-253.
- Witkowska, D., Kwiatkowska-Stenzel, A., Jóźwiak, A., Chorąży, L., Wójcik, A. (2012): Microbiological Contamination of Air Inside and Around Stables during Different Seasons of the Year. Pol. J. Environ. Stud. 21(4):1061-1066.
- Witkowska, D, Sowińska, J. (2013): The effectiveness of peppermint and thyme essential oil mist in reducing bacterial contamination in broiler houses. Poultry Sci. 92:2834–2843.
- Witkowska, D., Sowińska, J (2017): Identification of Microbial and Gaseous Contaminants in Poultry Farms and Developing Methods for Contamination Prevention at the Source. Poultry Sci. 51-72.
- Witkowska, D., Chorąży, Ł., Mituniewicz, T., Makowski, W. (2010): Zanieczyszczenia mikrobiologiczne ściółki i powietrza podczas odchowu kurcząt brojlerów. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie 10(2):201-210.
- Wójcik, A., Chorąży, L., Mituniewicz, T., Witkowska, D., Iwańczuk-Czernik, K., Sowińska, J. (2010): Microbial Air Contamination in Poultry Houses in the Summer and Winter. Polish J. of Environ. Stud. 19(5):1045-1050.
- Won, W. D., Ross, H. (1966): Effect of diluent and relative humidity on apparent viability of airborne *Pasteurella pestis*. Appl. Microbiol. 14(5):742–745.
- Woodward, C. L., Park, S. Y., Jackson, D. R., Li, X., Birkhold, S. G., Pillai, S. D., Ricke S. C. (2004): Optimization and comparison of bacterial load and sampling time for bioaerosol detection systems in a poultry layer house. J. Appl. Poultry Res. 13:433–442.
- Wouters, I. M., Duim, B., de Bruin, A., van Rotteram, B., Smit, L.A.M., Heederik, D.J.J. (2012): Environmental bioaerosol exposure and possible health effects for residents of livestock farms in The Netherlands: an overview of the exposure study. KRdl-Schriftenreihe 44:109-111.
- Wright, D. N., Bailey, G. D., Hatch, M. T. (1968): Survival of airborne *Mycoplasma* as affected by relative humidity. J. Bacteriol. 95(1):251–252.
- Wright, D., N., Bailey, G. D., Goldberg, L. J. (1969): Effect of temperature on survival of airborne *Mycoplasma pneumoniae*. J. Bacteriol. 99(2):491–495.
- Xu, H. S., Roberts, N., Singleton, F. L., Attwell, R. W., Grimes, D. J., Colwell, R. R. (1982): Survival and viability of nonculturable *Escherichia coli* and *Vibrio cholerae* in the estuarine and marine environment. Microbiol. Ecol. 8(4):313-323.
- Xue, Y., Nicholson, W. L. (1996): The two major spore repair pathways, nucleotide excision repair and spore photoproduct lyase, are sufficient for the resistance of *Bacillus subtilis* spores to artificial UV-C and UV-B but not to solar radiation. Appl. Environl. Microbiol. 62(7):2221–2227.
- Yang, S., Lee, G. W., Chen, C. M., Wu, C. C., Yu, K. P. (2007): The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. J. Aerosol Med. 20(4):484-494.

- Yao, H.Q., Choi, H.L., Lee, J. H., Suresh, A., Zhu, K. (2010): Effect of microclimate on particulate matter, airborne bacteria, and odorous compounds in swine nursery houses. *J. Anim. Sci.* 88(11):3707-3714.
- Yao, M. L., Zhang, B., Chai, T.J. (2007b): Antibiotic resistance of airborne *Escherichia coli* from hen house and rabbitry and their spreading to surroundings, *J. Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.)*, 8:60–64 (auf cinesisch).
- Yao, M., Gao, Y., Chai, T., Cai, Y. Duan, H. (2007a): Antibiotic resistance of airborne *Escherichia coli* from hen house and rabbitry and their spreading to surroundings. *Proceedings of the ISAH-2007 Tartu, Estonia* 578-584.
- Yoon, I. J., Joo, H., et al. (1993): Persistent and contact infection in nursery pigs experimentally infected with porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS) virus. *J. Swine Health Prod.* 1:5-8.
- Yoon, J. H., Lee, K.C., Weiss, N., Kang, K.H., Park, Y.H. (2003): *Jeotgalicoccus halotolerans* gen. nov., sp. nov. and *Jeotgalicoccus psychrophilus* sp. nov., isolated from the traditional Korean fermented seafood jeotgal. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 53:595–602.
- Yu, G., Wang, Y., Wang, S., Duan, C., Wei, L., Gao, J., Chai, T., Cai, Y. (2016a): Effects of Microbial Aerosol in Poultry House on Meat Ducks' Immune Function. *Front. Microbiol.* 7:1245.
- Yu, G., Wei, L. M., Liu, Y. Y., Liu, J. Y., Wang, Y., Gao, J., Chai, T. J., Cai, Y. M. (2016b): Influence of indoor microbial aerosol on the welfare of meat ducks. *Br. Poult. Sci.* 57(1):12-22.
- Yuan, W., Chai, T.-J., Zhou, Y.-F., Miao, Z.-M., Zhang, H.-S., Qin, M. (2010): ERIC-PCR Identification of the Formation and Spreading of *Escherichia coli* Aerosols in Pig Houses. *Progress in Veterinary Medicine* 2010-S1.
- Zeitler, M. H. (1986): Staub- Keim und Schadgasgehalt in der Pferdestallluft unter besonderer Berücksichtigung der FLH (Farmer's lung hay) –Antigene. *Tierärztliche Umschau* 11:839-845.
- Zejsa, J.E., Barber, E., Dosman, J. A., et al. (1994): Respiratory health status in swine producers relates to endotoxin exposure in the presence of low dust levels. *J. Occup. Med.* 36(1):49–56.
- Zhang, Z., Chen, Q. (2007): Comparison of the Eulerian and Lagrangian Methods for Predicting Particle Transport in Enclosed Spaces. *Atmos. Environ.* 41:5236-5248.
- Zhao, Y. (2011): Effectiveness of multi-stage scrubbers in reducing emissions of air pollutants from pig houses. *Trans ASABE* 54(1):285-293.
- Zhao, Y., Zhao, D., Ma, H., Liu, K., Atilgan, A., Xin, H. (2016): Environmental assessment of three egg production systems - Part III: Airborne bacteria concentrations and emissions. *Poult Sci.* 95(7):1473-1481.
- Zheng, W., Zhao, Y., Xin, H., Li, B., Gates, R. S., Zhang, Y., Soupir, M. L. (2013) Concentrations and size distributions of airborne particulate matter and bacteria in an experimental aviary laying-hen housing system. *Proceedings of the ASABE Annual International Meeting, Kansas City* .
- Zhiping, W., Malmberg, P., Larsson, B.M., Larsson, K., Larsson, L., Saraf, A. (1996): Exposure to bacteria in swine-house dust and acute inflammatory reactions in humans. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 154(5):1261-1266.
- Zhong, Z., Chai, T., Duan, H., Li, X., Yao, M., Yuan, W. (2008): REP-PCR Identification of Airborne *Staphylococcus aureus* Isolated from Chicken Houses and Their Spreading around the Farms. *Acta Vet. Zootech. Sinica* 39(10):1395-1401.

- Zhong, Z., Chai, T., Duan, H., Li, X., Yao, M., Yuan, W., et al. (2009): REP-PCR tracking of the origin and spread of airborne *Staphylococcus aureus* in and around chicken house. *Indoor Air* 19: 511-516.
- Zucker, B. A., Müller, W. (2002): Air microorganisms in animal housing--4. Airborne gram-negative bacteria and airborne endotoxin in pig houses. *Berl. Munch. Tierärztl. Wochenschr.* 115(1-2):30-36.
- Zucker, B. A., Trojan, S., Müller, W. (2000): Airborne gram-negative bacterial flora in animal houses. *J. Vet. Med. Series B: Infect. Dis. Vet. Pub. Health* 47(1):37-46.
- Zucker, B., Bonin, A., Müller, W. (2005): Beziehungen zwischen der Konzentration an verschiedenen Bioaerosolbestandteilen und dem allgemeinen Hygienezustand in zwei Schweinemastställen. *Berl. Münch. Tierärztl. Wschr.* 118:224–228.
- Zucker, B.-A., Müller, W. (2000): Untersuchungen zum Luftkeimhaushalt in Tierställen. 3. Mitteilung: Beziehungen zwischen einatembarem Endotoxin, einatembarem Staub und luftgetragenen Bakterien in einer Legehennenbatterie. *Berl. Münch. Tierärztl. Wschr.* 113:279-283.
- Zuskin, E., Mustajbegovic, J., Schachter, E. N., Kern, J., Rienzi, N., Goswami, S., Marom, Z., Maayani, S. (1995): Respiratory function in poultry workers and pharmacologic characterization of poultry dust extract. *Environ. Res.* 70:11-19.

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

*Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliographie; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de*

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.thuenen.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:

Clauß M (2020) Emission von Bioaerosolen aus Tierhaltungsanlagen - Methoden und Ergebnisse verfügbarer Bioaerosoluntersuchungen in und um landwirtschaftliche Nutztierhaltung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 131 p, Thünen Working Paper 138, DOI:10.3220/WP1578478975000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



Thünen Working Paper 138

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*

Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI:10.3220/WP1578478975000

urn:nbn:de:gbv:253-202001-dn061919-9