

Aus dem Institut für Tierhygiene und Öffentliches Veterinärwesen
der Veterinärmedizinischen Fakultät
der Universität Leipzig

**Reduzierung der Keim- und Staubbelastung der Stallluft in der
Schweinehaltung mit UVC-kombinierter Umluftfiltration**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doctor medicinae veterinariae (Dr. med. vet.)
durch die Veterinärmedizinische Fakultät
der Universität Leipzig

eingereicht von
Lisa Eisenlöffel
aus Riesa

Leipzig, 2022

Mit Genehmigung der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Dekan: Prof. Dr. Dr. Thomas Vahlenkamp

Betreuer: Prof. Dr. Uwe Truyen

Gutachter: Prof. Dr. Uwe Truyen, Institut für Tierhygiene und Öffentliches
Veterinärwesen, Veterinärmedizinische Fakultät der Universität Leipzig

PD Dr. Jochen Schulz, Institut für Tierhygiene, Tierschutz und
Nutztierethologie (ITTN), Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover

Tag der Verteidigung: 19. Oktober 2021

Widmung

Meiner Familie
und
meinem geliebten Partner Andreas,
sowie meinen beiden felligen Gefährten Abbie und Louis
gewidmet

Inhaltsverzeichnis

6 Summary	53
Literaturverzeichnis	55
Danksagung	76

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ACH	Air changes per hour
APP	<i>Actinobacillus pleuropneumoniae</i>
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
CO ₂	Kohlendioxid
CPY-2	Canines Parvovirus Typ 2
d	Tag(e)
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAV	Equines Arteritis Virus
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
EN	Europäische Norm
ELISA	Enzyme-linked Immunosorbent Assay
EPA	Efficient Particulate Air
et al.	und andere
h	Stunde(n)
HEPA	High-Efficiency Particulate Air
IMISE	Institut für Medizinische Informatik, Statistik und Epidemiologie
ISO	Internationale Organisation für Normung
KbE	Kolonie-bildende Einheit
LDV	Lactatdehydrogenase-erhöhendes-Virus
LED	Light emitting diode
MERV	Minimum Efficiency Rating Value
min	Minute(n)
MRSA	Methicillin-resistente <i>Staphylococcus aureus</i>

Abkürzungsverzeichnis

NH ₃	Ammoniak
nm	Nanometer
OIE	Weltorganisation für Tiergesundheit
PCR	Polymerase-Kettenreaktion
PM	Particulate Matter
ppm	Parts per million
PPV	Porcines Parvovirus
PRRSV	Porcine reproductive and respiratory syndrome virus, Virus des seuchenhaften Spätaborts der Schweine
RH	relative humidity
rLF	relative Luftfeuchtigkeit
RNA	Ribonucleic Acid
s	Sekunde(n)
<i>S. aureus</i>	<i>Staphylococcus aureus</i>
SchHaltHygV	Schweinehaltungshygieneverordnung
SMEDI	Stillbirth, Mumification, Embryonal death, Infertility
spp.	mehrere Spezies
SSS	Seuchenhafter Spätabort der Schweine
TierSchNutzV	Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
ULPA	Ultra Low Particulate Air
UV	Ultraviolett
UVC-Modul	Umluftfilter-UVC-Modul
WHO	World Health Organization

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Transportmechanismen bei der Partikelabscheidung an Fasern (CAESAR 2013).	13
Abbildung 2: Darstellung von Partikeln der Größen PM_{10} , $PM_{2,5}$ und PM_1 (CAESAR 2013).	17

Vorwort

Dies ist eine publikationsbasierte Dissertation, die sich aus der folgenden wissenschaftlichen Veröffentlichung zusammensetzt:

Titel: Impact of UVC-sustained recirculating air filtration on airborne bacteria and dust in a pig facility.

Autoren: Lisa Eisenlöffel, Tobias Reutter, Matthias Horn, Simon Schlegel, Uwe Truyen, Stephanie Speck

Veröffentlicht in: PLoS ONE 2019. 14 (11): e0225047.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047>

Teilergebnisse meiner Arbeit wurden von mir auf folgender internationaler Veranstaltung präsentiert:

19. Internationaler Kongress der International Society for Animal Hygiene (ISAH), Wroclaw, Polen, 08.-12.09.2019, Vortrag mit dem Titel "Impact of UVC-combined indoor air-filtration on air-borne bacteria and lung health".

1 Einleitung

Im November 2020 betrug der Schweinebestand in Deutschland laut dem Statistischen Bundesamt ca. 26,0 Millionen Schweine, verteilt auf über 20.500 Betriebe (ANONYM 2020). Mit 5,2 Millionen Tonnen produziertem Schweinefleisch im Jahr ist Deutschland der größte Schweinefleischerzeuger Europas und zählt neben China und den USA zu den größten Schweinefleischproduzenten weltweit (ANONYM 2019). Aufgrund steigender Antibiotikaresistenzen wird von der Gesellschaft die Erzeugung gesundheitlich unbedenklicher Lebensmittel gefordert, welche frei von pathogenen Mikroorganismen, chemischen Rückständen und Kontaminanten sind. Auch die Aspekte Tierwohl und Tierschutz nehmen in Nutztierhaltungen einen immer größeren gesellschaftspolitischen Stellenwert ein, der die Politik zum Handeln zwingt. Die Einführung eines staatlichen Tierwohlkennzeichens in der Mitte des Jahres 2020 sei hierfür genannt. Dieses freiwillige Tierwohllabel des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) auf von Schweinen stammenden Lebensmitteln soll anzeigen, dass der Landwirt die gesetzlichen Mindestanforderungen zur Haltung nicht nur eingehalten, sondern diese sogar übertroffen hat. Um den Medikamenteneinsatz, vor allem den Antibiotikaeinsatz, in der Nutztierhaltung zu reduzieren, sind präventive Biosicherheitsmaßnahmen und ein striktes Hygienemanagement von Nöten. Der Begriff Biosicherheit umfasst alle Maßnahmen, die den Eintrag von Krankheitserregern in einen Bestand und die Ausbreitung von Krankheitserregern innerhalb eines Bestandes verhindern, sowie den Infektionsdruck senken. Dazu zählen bauliche, als auch betriebsorganisatorische Maßnahmen. Die gesetzliche Grundlage zur Einhaltung dieser Maßnahmen bildet die Schweinehaltungshygieneverordnung (SchHaltHygV), die allerdings eine mögliche Eintragsquelle von Infektionserregern außer Acht lässt: die Luft (ANONYM 2014). Bakterien, als auch Viren können an Staub gebunden mehrere Kilometer weit aerogen verbreitet werden (OTAKE et al. 2010). Um den aerogenen Erregereintrag zu reduzieren, können Filtertechniken, wie Zulufffiltration oder Umlufffiltration, zum Einsatz kommen. In einer Studie von WENKE et al. (2018) zeigte der Einsatz von Umlufffiltern in einem Schweine-Mastbestand positive Effekte auf die Lungengesundheit der Tiere. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend, war es Gegenstand dieser Arbeit die positiven Effekte der Umlufffiltration mit der keimtötenden Wirkung von UVC-Strahlen zu kombinieren, und somit den Keimgehalt der Stallluft zu reduzieren. Der erste Teil der Studie bestand aus einem Laborversuch, bei dem die Reduktionsraten von vier für die Schweinezucht relevanten Pathogenen in einem Filterprüfstand mit unterschiedlichen Testdurchläufen (mit und ohne Filtereinsatz, mit und ohne UVC-Strahlung) ermittelt und miteinander verglichen wurden. Der zweite Teil der Studie umfasste den *in situ*-Einsatz der zuvor im Labor getesteten Umlufffilter-UVC-Strecke in einem Instituts-eigenen Versuchsstall. In einem von zwei baugleichen und zugangs- sowie lüftungstechnisch voneinander getrennten Stallabteilen wurde ein Umlufffilter-

UVC-Modul (UVC-Modul) eingebaut. Das zweite Stallabteil fungierte als Referenzstall. Bis zu elf Schweine wurden pro Stallabteil eingestallt. Es wurden wöchentlich Messungen zu Stallklimaparametern, als auch zum bakteriellen Luftkeimgehalt und zum Staubgehalt der Stallluft in beiden Stallabteilen durchgeführt und miteinander verglichen. Zur statistischen Auswertung wurden Werteverhältnisse (Ratios) der Staub- und Bakterienmengen in Stall 1 (mit UVC-Modul) und Stall 2 (Referenzstall) berechnet. Werte <1 bedeuteten eine Reduktion der Staub- bzw. Bakterienmenge der Luft des Stalls mit dem UVC-Modul (Stall 1). Nullhypothesen von unveränderten mittleren Bakterien- bzw. Staubmengen wurden mittels t-Test (Signifikanzniveau von 5 %) geprüft. Zusätzlich wurden 95 %ige Konfidenzintervalle für die geschätzten Stichprobenmittelwerte berechnet. Im Zuge der Schlachtieruntersuchung wurde am Ende jeder Mastperiode die Lungengesundheit der Tiere beurteilt.

2 Literaturübersicht

2.1 Ausgewählte Pathogene in der Schweinehaltung

Für den Laborversuch wurden je zwei für die Schweinezucht relevante Viren und Bakterien zur Überprüfung der Reduktionsraten im Filterprüfstand ausgewählt. Wir wählten PRRSV aufgrund der hohen wirtschaftlichen Verluste, die durch dieses Virus in der Schweineindustrie verursacht werden. Außerdem konnte die Wirksamkeit des Einsatzes von Luftfilter-Systemen zur Reduktion von PRRSV bereits experimentell in mehreren Studien nachgewiesen werden. PPV zählt neben PRRSV weltweit zur häufigsten Ursache von Reproduktionsstörungen beim Schwein und wurde daher als weiteres Virus in unserem Laborversuch verwendet. APP ist ein an Schweine adaptiertes Bakterium, welches vorwiegend über Aerosole übertragen wird. Hohe wirtschaftliche Verluste, die durch schwere Lungen- und Bauchfellentzündungen verursacht werden, führen dazu, dass APP zu den weltweit bedeutendsten Infektionserregern der intensiven Schweinehaltung gerechnet wird. *S. aureus* wurde als Vertreter der grampositiven Bakterien ausgewählt, da diese ca. 80 % des mikrobiellen Keimspektrums der Stallluft einnehmen. Außerdem konnte man MRSA in Luftproben aus Schweineställen in hohen Mengen isolieren. MRSA liegen an Staub gebunden in der Luft vor und können sich somit über den Luftweg verbreiten.

2.1.1 Viren

2.1.1.1 Porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV)

Das Virus des Seuchenhaften Spätaborts des Schweines (SSS) bzw. das porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV) ist ein Virus aus der Familie der *Arteriviridae*, der Subfamilie *Variarterivirinae* und der Gattung *Betaarterivirus* (HEINRITZI 2006b). Es zeichnet sich durch seinen Tropismus zu Makrophagen aus, führt zu persistierenden Infektionen mit atypischen Immunreaktionen im Tierkörper und ähnelt daher mit seinen Eigenschaften dem Lactatdehydrogenase-erhöhenden Virus bei Mäusen (LDV), dem Equinen Arteritis Virus (EAV) und dem Simian hämorrhagischen Fiebervirus, die alle der gleichen Familie entstammen (MEULENBERG et al. 1993). Das Virus tritt bei Schweinen aller Altersklassen auf und äußert sich neben therapieresistenten Atemwegssymptomen bei Absetzern und Mastschweinen in Form von Fruchtbarkeitsstörungen bei Sauen, wie z.B. durch Umrauschen, Spätaborte, mumifizierte Feten oder der Geburt lebensschwacher Ferkel (BUTLER et al. 2014, HARDING et al. 2017).

Es liegen unterschiedliche Virusspezies von PRRS-Viren in der Gattung *Betaarterivirus* vor: das *Betaarterivirus suid 1* der Subgattung *Eurpobartevirus*, das *Betaarterivirus suid 2* der Subgattung *Ampobartevirus* und *Betaarterivirus chinrav* der Subgattung *Chibartevirus*. Das *Betaarterivirus suid 1* ist eher in Europa verbreitet, das *Betaarterivirus suid 2* vorwiegend in

Nordamerika (RAEV et al. 2020). Das *Betaarterivirus chinrav* ist ein hochpathogener Stamm, der in ganz Asien verbreitet ist und sich aus dem *Betaarterivirus suid 2* in den 2000er Jahren entwickelte (AN et al. 2007). Die ursprüngliche Einteilung von PRRS-Viren in Genotypen wurde abgeschafft. Erste Ausbrüche von PRRSV beobachtete man in den 1980er Jahren in den USA (KEFFABER 1989). Bereits kurze Zeit später (1990) führte das Virus auch in Deutschland zu Infektionen. Seither ist die Mehrzahl der deutschen Sauenbestände von diesem Virus durchseucht (Heinritzi 2006b). Infektionen durch PRRSV verursachen weltweit jährlich hohe wirtschaftliche Verluste, in den USA allein bis über 664 Millionen US\$, daher zählt es zu den bedeutendsten Viruserkrankungen in der Schweineproduktion (HOLTKAMP et al. 2013, LUNNEY et al. 2010, NEUMANN et al. 2005, PLAGEMANN 2003). Einbrüche in der Reproduktionsleistung, verminderte Größen- und Gewichtszunahmen der Ferkel- und Mastschweine, sekundäre Infektionskrankheiten und hohe Therapiekosten tragen zur finanziellen Schädigung der Schweinebetriebe bei (BROCKMEIER et al. 2002, CHO und DEE 2006, VOGLMAYR 2006, ZIMMERMAN et al. 2019).

Das ca. 50-65 nm große, behüllte RNA-Virus ist nach Verlassen des Tierkörpers nicht besonders widerstandsfähig. In ungereinigten Ställen kann es jedoch über mehrere Wochen infektiös bleiben (HEINRITZI 2006b). Haupteintragsquellen in PRRSV-naive Bestände sind zum einen der Zukauf infizierter Tiere und zum anderen die Belegung der Sauen mit Sperma infizierter Eber (HEINRITZI 2006b, SWENSON et al. 1994). Weiterhin konnte das Virus in Körpersekreten und -exkreten wie Speichel, Urin, Blut und Milch der Sauen nachgewiesen werden (WAGSTROM et al. 2001, WILLS et al. 1997). Da das Virus vorwiegend von Schweinen, die in engem Kontakt zueinanderstehen, übertragen wird, stellt eine hohe Bestandsdichte ein besonders großes Risiko für eine rasche Verbreitung innerhalb des Bestandes dar (ALBINA 1997). Eine zweite und nicht zu vernachlässigende Möglichkeit der Verbreitung ist der Luftweg (KRISTENSEN et al. 2004, OTAKE et al. 2002a, PITKIN et al. 2009, TORREMORELL et al. 1997). OTAKE et al. (2010) konnten eine Übertragungsstrecke von 9,1 km nachweisen. Besonders im Winter bei kalten Temperaturen und einem geringen UV-Index herrschen optimale Bedingungen für das Virus in der Umwelt zu überleben und weiterverbreitet zu werden (ALBINA 1997). In Regionen mit einer hohen Schweinedichte besteht ein zusätzlich großes Risiko der gegenseitigen Übertragung zwischen Betrieben über die Luft (MORTENSEN et al. 2002). OTAKE et al. wiesen eine indirekte Übertragung von PRRSV über Stallkleidung (z.B. Gummistiefel), Insekten und über Transportfahrzeuge nach (DEE et al. 2004, OTAKE et al. 2002b, OTAKE et al. 2003).

Die Durchführung einer Impfprophylaxe in Schweinebeständen gilt als Hauptmaßnahme zum Schutz vor PRRSV (HEINRITZI et al. 2006c, MURTAUGH und GENZOW 2011). Der PRRS-Schutz der Sau über das Kolostrum vererbt bereits in der 2. bis 3. Lebenswoche, sodass Ferkel in der Zeit danach (im Flatdeck) besonders anfällig für Infektionen sind. Eine Impfung

eine Woche vor dem Absetzen der Ferkel wird daher empfohlen. Derzeit sind nur Lebensimpfstoffe für Ferkel und Mastschweine zugelassen. Lediglich bei Sauen können auch Totimpfstoffe zum Einsatz kommen. Vor allem in PRRS-positiven Beständen sollte die Impfdecke über Impfungen der Sauen und der Ferkel schnellstmöglich geschlossen werden (HEINRITZI et al. 2006c). Zusätzlich müssen strikte Hygiene- und Biosicherheitsmaßnahmen eingehalten werden, da es keinen Goldstandard für ein Bekämpfungsschema gibt. Laut DESROSIERS (2011) gilt PRRSV als Hauptgrund, dass bisherige Biosicherheitsmaßnahmen in Schweinebetrieben überprüft, bewertet und verbessert wurden. Denn obwohl PRRSV seit beinahe 30 Jahren in Schweinebeständen existiert und zahlreiche Publikationen zu diesem Virus veröffentlicht wurden, bleiben insbesondere die zellularen und molekularen Mechanismen des Virus und deren Einflüsse auf das Immunsystem der Tiere ungeklärt, sodass eine Eradikation des Virus bisher nicht möglich war (BUTLER et al. 2014, MURTAUGH et al. 2002). Reinfektionen kommen vor allem durch aerogene Erregerübertragung wiederholt vor (MORTENSEN et al. 2002). Der Einsatz von Luftfiltration als vielversprechende Maßnahme zur Verringerung des Erregereintrags war Bestandteil mehrerer Studien (DEE et al. 2005, DEE et al. 2006, DEE et al. 2010, DEE et al. 2012, PITKIN et al. 2009, SPRONK et al. 2010). Gleichzeitig verdeutlichen diese Studien die Bedeutung der aerogenen Verbreitung des Virus und die Wichtigkeit, Schweinebestände gegen aerogen übertragbare Krankheiten mit geeigneten Biosicherheitsmaßnahmen zu schützen.

2.1.1.2 Ungulate parvovirus 1 (Porcines Parvovirus, PPV)

Parvoviren sind kleine, einzelsträngige, unbehüllte und sehr widerstandsfähige DNA-Viren der Familie der *Parvoviridae*, Subfamilie *Parvovirinae*. Taxonomisch wurde das Porcine Parvovirus (PPV) kürzlich in *Ungulate protoparvovirus 1* umbenannt (STRECK und TRUYEN 2020). Neben PRRSV zählt PPV weltweit zur häufigsten Ursache von Reproduktionsstörungen beim Schwein (MENGELING et al. 2000, TRUYEN und STRECK 2019). Aber nicht nur bei Schweinen führen Parvoviren zu schweren Infektionen. Das humane Parvovirus B19 verursacht Ringelröteln, die bei Kindern durch starke Hautausschläge und Anämie gekennzeichnet sind oder sich bei Erwachsenen als Gelenkserkrankung manifestieren. Bei Schwangeren kann Parvovirus B19 Spontanaborte induzieren (HEEGAARD und BROWN 2002). Bei Hunden verursacht das Canine Parvovirus Typ 2 (CPV-2) insbesondere bei Welpen schwere blutige Durchfälle oder Herzmuskelentzündungen, die nicht selten zum Tod des Tieres führen (MIRANDA und THOMPSON 2016). Untersuchungen zeigten, dass Parvovirus-zugehörige Sequenzen in über 100 Tierarten gefunden werden konnten, sodass das Wirtsspektrum nahezu das gesamte Tierreich umfasst (FRANCOIS et al. 2016).

Bei Schweinen löst PPV das SMEDI-Syndrom aus, welches folgende klinischen Erscheinungsbilder beschreibt: Stillbirth (Totgeburt), Mummification (Mummifikation), Embryonic

death (embryonaler Tod), Infertility (Unfruchtbarkeit) (HEINRITZI 2006b, STRECK und TRUYEN 2020). Parvoviren bevorzugen es sich in schnell teilenden Zellen zu replizieren, sodass sie einen Tropismus zu embryonalen und fetalen Zellen aufweisen (RHODE 1973). Bisher konnte nicht genau geklärt werden, wie es dem Virus gelingt die Plazentaschranke zu überwinden und zum Fötus zu gelangen. Das Einschleusen des Virus auf bzw. in maternalen Makrophagen wird vermutet (MENGELING et al. 2000). Die Schwere der Erkrankung und deren klinisches Bild ist abhängig von der Pathogenität des Erregers und zu welchem Zeitpunkt der Trächtigkeit die Muttersau infiziert wird. Infektionen vor dem 70. Trächtigkeitstag führen zum Tod des Fötus, Infektionen danach werden überstanden und die geborenen Ferkel weisen Antikörper gegen PPV aus (BACHMANN et al. 1975, JOHNSON und COLLINGS 1971, JOO et al. 1976, JOO und JOHNSON 1977, MENGELING 1978, STRECK und TRUYEN 2020). Ob es zur Mumifikation der Feten oder zum Tod des Embryos mit anschließender Resorption im Mutterleib kommt, ist vom Zeitpunkt der Kalkeinlagerung in das Skelett um den 35. Trächtigkeitstag abhängig (HEINRITZI 2006b). Bei adulten Schweinen kann eine Infektion unbemerkt ohne klinische Anzeichen auftreten (MENGELING und CUTLIP 1975).

Parvoviren gelten als sehr stabil gegenüber Umwelteinflüssen und können daher lang außerhalb des Wirtes überleben (HEINRITZI 2006b, STRECK und TRUYEN 2020). So kann das Virus über mehrere Monate hinweg im Stall, auf kontaminierten Instrumenten, auf Stallkleidung und in Ebersperma infektiös bleiben und so zu einem Verschleppen des Virus führen (CARTWRIGHT und HUCK 1967, GRADIL et al. 1990, STRECK und TRUYEN 2020). Gegenüber pH-Werten zwischen 3,0 und 10,0, sowie gegenüber trockener Hitze (bis zu 90 °C) ist PPV sehr widerstandsfähig. Eine erfolgreiche Inaktivierung des Virus im Rahmen der Reinigung und Desinfektion ist nur mittels 0,3 %igem Natriumhypochlorit oder mit 7,5 %iger Natronlauge möglich (ETERPI et al. 2009, HEINRITZI et al. 2006b, STRECK und TRUYEN 2020).

Therapiemöglichkeiten gibt es bei einer PPV-Infektion nicht. Jeder Ferkel-produzierende Betrieb sollte vorsorglich impfen. Dafür stehen Monovakzine als auch Parvovirose-Rotlauf-Kombinationsvakzine zur Verfügung (RITZMANN et al. 2000). Eine Impfung der Jungtiere sollte allerdings erst nach sechs Monaten durchgeführt werden, da bis zu diesem Zeitpunkt maternale Antikörper den Impferfolg beeinträchtigen und sogar verhindern können (ALT und WITTE 1985, WRATHALL et al. 1987).

2.1.2 Bakterien

2.1.2.1 *Actinobacillus pleuropneumoniae* (APP)

Bei APP handelt es sich um ein gramnegatives, fakultativ anaerobes, kokkoides Stäbchenbakterium der Gattung *Actinobacillus* innerhalb der Familie *Pasteurellaceae*. APP ist an Schweine adaptiert und wird meist über Aerosole übertragen (EWERS und WIELER 2015). Es verursacht schwere Lungen- und Brustfellentzündungen und führt zu hohen wirtschaftlichen Verlusten, die sich aufgrund der Mortalität, einem verminderten Größenzuwachs und den Therapiekosten ergeben (DESROSIERS 1986, ROHRBACH et al. 1993, STRAW et al. 1990). Daher zählt APP weltweit zu den bedeutendsten Infektionserregern in der intensiven Schweinehaltung (EWERS und WIELER 2015). 1957 beschrieben PATTISON et al. das Bakterium erstmals als Auslöser von Pleuropneumonien. Die erste Bezeichnung des Keims *Hämophilus pleuropneumoniae* wurde später, aufgrund starker Ähnlichkeiten des Erregers zu *Actinobacillus lignieresii*, in *Actinobacillus pleuropneumoniae* geändert (POHL et al. 1983). APP lässt sich aufgrund verschiedener Kapselantigene in 18 Serotypen einteilen, die sich in ihrer Pathogenität stark unterscheiden (HEINRITZI 2006a). So gelten Stämme der Serotypen 1, 5, 9, 10 und 11 als virulenter als andere Serotypen. In Europa sind insbesondere die Serovare 2, 3, 4, 5, 7 und 9 vertreten. Die Übertragung des Erregers findet nicht nur durch direkten Kontakt statt, sondern auch aerogen. Tragweiten über kurze Distanzen von wenigen Metern bis hin zu Entfernungen von 400-500 m wurden abhängig von der Windbeschaffenheit beschrieben (DESROSIERS und MOORE 1998, JOBERT et al. 2000, KRISTENSEN et al. 2004, LARSEN 1998, TORREMORELL et al. 1997). Chronisch infizierte Tiere stellen das Hauptreservoir der Erkrankung dar, daher ist ein rechtzeitiges Erkennen und Selektieren dieser Tiere zur Senkung des Infektionsdrucks absolut notwendig (EWERS und WIELER 2015). Auch die Haltungsbedingungen (z.B. hohe Belegdichte, unzureichendes Hygienemanagement) und das Stallklima haben einen Einfluss auf die Schwere der Erkrankung, auf die Morbidität und Mortalität infolge der APP-Infektion (GOTTSCHALK und BROES 2019). Maternale Antikörper schützen die Ferkel nur bis zur 10. Lebenswoche vor einer Infektion, daher sind vor allem Schweine ab dem 3. Lebensmonat bis hin zur Endmast sehr empfänglich für die Erkrankung (HEINRITZI 2006a). APP führt je nach Virulenz und Immunität des Tieres zu perakuten, akuten, chronischen und subklinischen Krankheitsverläufen. Neben perakuten und akuten Verläufen, die hohes Fieber (bis zu 42°C), starke respiratorische Symptome, Störungen des Allgemeinbefindens und den Tod binnen 12-24 Stunden zur Folge haben, treten bei chronischen Verläufen kaum typische Symptome auf. Intermittierender Husten, leichtes Fieber, eine geringgradige Dyspnoe nach Bewegung, sowie Wachstumseinbußen können Anzeichen für ein chronisches Infektionsgeschehen mit APP sein (HEINRITZI 2006a). Latent infizierte Tiere können nach einer Belastung akut erkranken (HEINRITZI 2006a, ZIMMERMANN und PLONAIT 2004).

Hauptverantwortlich für die pathologischen Mechanismen sind die Exotoxine APX I, II, III und IV, die mit ihren hämolysierenden und zytotoxischen Eigenschaften die Funktionsfähigkeit lungenständiger Makrophagen und neutrophiler Granulozyten herabsetzen und die typischen Symptome der Porcinen Pleuropneumonie auslösen (HEINRITZI 2006a, KAMP et al. 1997). Schweinebetriebe können sich durch Impfmaßnahmen prophylaktisch schützen. Es gibt zugelassene Impfstoffe für einzelne Serotypen, aber auch eine Subunit-Vakzine, die alle vier APX-Toxine, sowie ein Membranprotein enthält und somit vor allen 18 Serotypen schützt (HEINRITZI 2006a).

2.1.2.2 Methicillin-resistente *Staphylococcus aureus* (MRSA)

Bei *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) handelt es sich um ca. 1 µm große, fakultativ pathogene, grampositive Kokkenbakterien, die ubiquitär und als natürliche Kommensalflora auf Haut- und Schleimhautoberflächen vorkommen (GOULD und CHAMBERLAINE 1995). *S. aureus* kann bei einer bakteriellen Dysbalance zu lokalen als auch systemischen, eitrigen Entzündungen führen. Aufgrund der Fähigkeit zur Enterotoxinbildung kann es Lebensmittelvergiftungen auslösen (BINTSIS 2017). Eine besondere medizinische Bedeutung kommt den Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA) zu, die als sogenannte „Krankenhauskeime“ zu schweren therapieresistenten Wundinfektionen und Septikämien führen können (LAKHUNDI und ZHANG 2018). MRSA tragen Gene, wie das *mecA*-, *mecC*- oder *blaZ*-Gen, welche es unmöglich machen, dass β-Lactam-Antibiotika wirken können. Bereits zwei Jahre nach der Entdeckung des Penicillins durch FLEMING (1929), traten nach vermehrtem Einsatz erste Resistenzen auf (KIRBY 1944). Bis heute wird aktiv daran geforscht neue Behandlungsmethoden gegen MRSA zu finden (KARAMAN et al. 2020).

Auch in der Veterinärmedizin nimmt die Bedeutung von MRSA als zoonotischer Erreger zu. Zahlreiche Studien belegen, dass insbesondere der tierassoziierte MRSA-Stamm ST398, der bei Schweinen, Geflügel und Rindern vorkommt, auf Menschen übertragen werden kann (GRAVELAND et al. 2010, LEWIS et al. 2008, VAN DUIJKEREN et al. 2016, VAN LOO et al. 2007, VOSS et al. 2005). Die Stallluft stellt einen wichtigen Übertragungsweg dar. Neben Streptokokken, machen Staphylokokken, die an Staubpartikel gebunden vorliegen, ca. 80 % des Luftkeimgehaltes der Stallluft aus (SEEDORF 2000). In Schweineställen konnte MRSA in Größenordnungen von 447 KbE/m³ Stallluft (MADSEN et al. 2018) bis hin zu 10⁴ KbE/m³ Stallluft (WENKE et al. 2018) nachgewiesen werden. FRIESE et al. (2012) stellten außerdem einen schwach positiven Zusammenhang zwischen einer hohen Staubkonzentration der Stallluft und der Anzahl der Schweine, bei denen MRSA in der Beprobung der nasalen Schleimhaut nachgewiesen werden konnte, her. Die Keime werden von den Tieren über die Körperoberfläche oder den Kot abgegeben und an Staubpartikel gebunden über die Luft transportiert (ZHAO et al. 2016). Nach Inhalation infektiöser Partikel besiedelt MRSA

hauptsächlich die Nasenschleimhaut (MADSEN et al. 2018, VAN BELKUM et al. 2009). Je nach Größe der Staubpartikel können MRSA-Partikel tief in die Atemwege vordringen und dort bei Menschen und Tieren, vor allem in bereits immungeschwächten Organismen, Pneumonien auslösen (KHANNA et al. 2008, WITTE und MIELKE 2007).

2.2 UVC-Strahlung

2.2.1 Allgemeines

UV-Strahlen gehören zur kurzwelligen Strahlung, die für den Menschen gerade noch als sichtbares, violettes Licht empfunden wird. Der Bereich der elektromagnetischen Strahlung ist für den Menschen bereits nicht mehr sichtbar. Dieser Bereich wird als UV-Strahlung bezeichnet und umfasst Wellenlängen von 100-400 nm (ANONYM 2013). Die World Health Organization (WHO) unterteilt UV-Strahlen anhand ihrer Wellenlängen in UVA- (315-400 nm), UVB- (280-315 nm) und UVC-Strahlen (100-280 nm) (ANONYM 2016). Letztere ist die kurzwelligste, aber auch die energiereichste Strahlung. Sie löst eine photochemische Reaktion aus, die zur Schädigung mikrobieller DNS führt (ANONYM 2013). Die Wirkungsweise beruht auf der Dimerisierung von Nukleinbasen. Insbesondere Pyrimidine sind anfällig gegenüber einer Schädigung durch UVC-Strahlen, sodass primär Thymin von der Dimerisierung betroffen ist. Purine besitzen eine 10-fach höhere Resistenz gegenüber den photochemischen Umbauprozessen und sind daher widerstandsfähiger gegenüber einer Schädigung durch UVC-Strahlen (BINTSIS et al. 2000). Somit werden Transkriptionsprozesse, die zur Replikation der Mikroorganismen notwendig sind, gestört und die Keime sterben ab (BEUKERS und BERENDS 1960, HOCKBERGER 2000). Den größten keimschädigenden Effekt stellte man im Wellenlängen-Bereich von 253,7 nm fest (EHRISMANN und NOETHLING 1932).

Aufgrund ihrer keimtötenden Wirkung nutzt man UVC-Strahlen in mehreren Bereichen zur Desinfektion, wie z.B. zur Oberflächendesinfektion in der Lebensmittelindustrie oder zur Aufbereitung von Wasser (CORRÊA et al. 2020, GAYÁN et al. 2014, HIJNEN et al. 2006, LABAS et al. 2009, WONG et al. 1998). Da es zu einem nahezu unmittelbaren Wirkungseintritt des keimschädigenden Effekts kommt, nutzt man UVC-Strahlen auch zur Desinfektion von Luft (KOWALSKI und BAHNFLETH 2004, LÓPEZ-MALO und PALOU 2005).

Als Strahlenquelle werden meist Niederdruck- bzw. Mitteldruck-Quecksilber-Lampen verwendet (BEGGS et al. 2006, BUCHELI-WITSCHERL et al. 2010, LIU et al. 2019). Allerdings emittieren Niederdruck-Lampen einen besonders hohen Anteil der Strahlen mit einer Wellenlänge von 253,7 nm und daher gelten sie als wirkungsvollste Strahlenquelle (DREILING 2008). Es gibt verschiedene Verfahren zur Erzeugung von UVC-Strahlung. Die Quecksilberdampfentladung ist bis heute eine effiziente Methode, bei der die

UVC-Ausstoßleistung maßgeblich vom Gas-Innendruckverhältnis in der Quarz-Glas-Röhre abhängt. In Anbetracht der Schwierigkeit benutzte UVC-Röhren mit gefährlichem und gesundheitsschädlichem Quecksilber entsorgen zu müssen, wurden bereits LEDs getestet, die weniger gesundheitsschädlich und weitaus umweltfreundlicher sind (MATHEBULA et al. 2018, RYAN et al. 2010).

Es gibt mehrere Faktoren, die die Effizienz der keimschädigenden Wirkung der UVC-Strahlen maßgeblich beeinflussen. Zum einen ist der mutagene Effekt der UVC-Strahlen auf Mikroorganismen von der Dosis D (in J/m^2) abhängig, die sich aus der Strahlungs-Intensität I (in W/m^2) und der Einwirkzeit T (in s) zusammensetzt (RILEY und KAUFMAN 1972). Diese Dosis-Wirkungs-Beziehung wird durch das Bunsen-Roscoe- bzw. Reziprozitätsgesetz beschrieben. Es zeigt, dass trotz abnehmender Strahlungsintensität, durch Wegbewegen der Keime von der Strahlungsquelle, die benötigte Dosis für einen keimschädigenden Effekt dennoch erreicht werden kann, indem die Einwirkzeit verlängert werden muss (CUTLER und ZIMMERMAN 2011). Auch die Wellenlänge der ausgesandten Strahlung ist ein entscheidender Faktor. GATES (1930) war der erste Wissenschaftler, der mittels einer Quecksilberdampf Lampe bei 260 nm einen Peak der bakteriziden Wirkung sah. Damit kam er dem heute geltenden Wirkungsmaximum bei einer Wellenlänge von 253,7 nm bereits sehr nahe (REED 2010).

DUCLAUX (1885a, 1885b, 1885c) stellte bereits in den Anfängen der Forschung mit UV-Strahlung eine unterschiedlich starke Anfälligkeit der Mikroorganismen fest. Er schlussfolgerte, dass für eine gleich starke Inaktivierung verschiedener Mikroorganismen unterschiedlich hohe Strahlendosen benötigt werden. Im Laufe der Zeit beobachtete man die stärkste Anfälligkeit von Mikroorganismen auf UVC-Strahlen bei gramnegativen Bakterien, gefolgt von grampositiven Bakterien, Hefen, Bakteriensporen, Schimmelpilzen, Viren und Protozoen (HIJNEN et al. 2006, LÓPEZ-MALO und PALOU 2005).

Zur erfolgreichen Inaktivierung von Mikroorganismen, die sich an Staubpartikeln gebunden in der Luft befinden, ist die relative Luftfeuchtigkeit (rLF) ein weiterer Faktor, der berücksichtigt werden sollte. Es herrschen allerdings kontroverse Meinungen, inwiefern sich die rLF tatsächlich auf die keimschädigende Wirkung der UVC-Strahlen auswirkt. Einerseits berichten einige Autoren von einer erhöhten Resistenz gegenüber UVC-Strahlen bei einer steigenden rLF (LIDWELL und LOWBURY 1950, PECCIA et al. 2001, RILEY und KAUFMAN 1972). Andere Autoren hingegen stellten sogar eine erhöhte Anfälligkeit der Mikroorganismen bei erhöhter rLF fest (RENTSCHLER und NAGY 1942). Ein allgemeiner Konsens besteht darin, dass der Zusammenhang zwischen der rLF und der UVC-Effizienz stark von der Art der Mikroorganismen abhängig ist (KOWALSKI 2001).

2.2.2 Luftdesinfektion mit UVC-Strahlung

Bereits seit Ende des 19. Jahrhunderts ist man sich der keimhemmenden Wirkung der von der Sonne freigesetzten Strahlen, den UV-Strahlen, bewusst. DOWNES und BLUNT (1877a, 1877b, 1878) waren die Ersten, die beobachteten, dass bakterielles Wachstum unter Sonneneinstrahlung verhindert werden konnte. Die Grundsteine des Einsatzes von UV-Strahlung wurden somit gelegt. Es folgten Jahrzehnte der Forschung, die das Wissen um die desinfizierende Wirkung der UV-Strahlen ausbaute. Die ersten Studien zum Einsatz von UVC-Strahlen zur Luftdesinfektion liefen in den 1930er bis 1950er Jahren (REED 2010). WELLS war einer der Ersten, der bewies, dass Krankheiten über das Einatmen luftgetragener infektiöser Tröpfchen verbreitet werden und man jene Tröpfchen mit UVC-Strahlen inaktivieren konnte (WELLS 1934, WELLS und FAIR 1935). Dieses Wissen kam zwischen 1937 und 1941 unmittelbar während einer Masern-Epidemie in Philadelphia zum Einsatz: WELLS et al. (1942) verringerten durch den Einbau von UVC-Modulen an den Decken von Schulen die Ansteckungsrate im Gebäude. In den 1940er Jahren war es vor allem LUCKIESH (1946), der Beweise zur Wirksamkeit von UVC-Strahlen lieferte, sowie Entwürfe und Richtlinien zum Einsatz von UVC-Strahlung zur Desinfektion der Luft niederschrieb. Er experimentierte mit UVC-Strahlen im oberen Deckenbereich von Räumen und stellte einen Zusammenhang zwischen der Luftdesinfektion und der Raumbelüftung fest. RILEY et al. bauten in den 1960er und 70er Jahren die bereits ermittelten Fakten aus. In einer Studie wurden Meerschweinchen der Luft ausgesetzt, die aus einer Tuberkulose-Krankenstation stammte. Zum einen konnte in dieser Studie bewiesen werden, dass Tuberkulose über die Luft verbreitet werden kann. Zum anderen zeigte sich, dass die infizierte Luft, die durch einen mit UVC-Strahlen versetzten Lüftungskanal geleitet wurde zu keiner Infektion bei den Meerschweinchen führte. Die Kontrollgruppe hingegen, deren Luftkanal nicht mit UVC-Strahlen versetzt wurde, infizierte sich (RILEY et al. 1959, RILEY et al. 1962). Außerdem beobachteten sie im Zuge ihrer Studien, dass eine Durchmischung der Deckenluft und der Bodenluft unbedingt erforderlich ist, um eine Desinfektion der Luft zu erreichen und, dass kalte Luft zu einer höheren Luftwechselrate führt als warme Luft (RILEY et al. 1971).

In den darauffolgenden Jahren geriet die UVC-Technologie zum Zweck der Desinfektion der Luft in Vergessenheit. Das lag unter anderem daran, dass der Erfolg, den WELLS (1942) im Kampf gegen die Masern erzielte, in keiner weiteren Studie reproduziert werden konnte. Etwa zur gleichen Zeit entwickelte man außerdem Antibiotika wie Streptomycin, die zur Therapie der Tuberkulose eingesetzt wurden; bei viralen Erkrankungen setzte man auf eine Immunisierung durch Impfungen (DREILING 2008, REED 2010). Erst mit einem erneuten Aufblühen von Tuberkulose-Fällen in den USA 1985 und dem Auftreten von multiresistenten Erregern lebte die Forschung rund um die UVC-Technologie wieder auf und hält bis heute an (MPHAPHLELE et al. 2015, REED 2010, XU et al. 2003).

Mittlerweile werden UVC-Lüftungsmodule an Orten eingesetzt, an denen sich viele Menschen gleichzeitig begegnen und folglich ein starker Infektionsdruck herrscht, wie beispielsweise in Krankenhäusern, Obdachlosenheimen, Gefängnissen und Arztpraxen. Insbesondere die Antibiotika-Resistenzlage krankenhausspezifischer Keime führte zur Wiederkehr der altbekannten Technik (ESCOMBE et al. 2009, KOWALSKI und BAHNFLETH 2000, MENZIES et al. 2003, RITTER et al. 2007). Kombiniert mit Luftfiltration gilt UVC-Strahlung heute als die effektivste und wirtschaftlichste Methode, um Luft zu desinfizieren (KOWALSKI 2009).

Zum jetzigen Zeitpunkt mangelt es an Studien zum Einsatz von UVC-Anlagen in der Nutztierhaltung. Lediglich SCHULZ et al. (2013) testeten den Einbau eines Luftwäschers mit anschließender UVC-Einheit in einem Schweine-Mastbetrieb. Sie erzielten eine signifikante Reduktion der aerob mesophilen Gesamtkeimzahl, Methicillin-resistenter *Staphylococcus aureus* und der mesophilen aerotoleranten grampositiven Kokken. Sie demonstrierten damit, dass UVC-Strahlung fähig ist den Keimdruck der Stallluft zu verringern. Weitere Feldstudien zum Einsatz von UVC-Technologien zur Luftdesinfektion in der Nutztierhaltung werden benötigt, um diese Methode als Ergänzung des Biosicherheitsmanagements zu etablieren.

2.3 Luftfiltration

2.3.1 Grundlagen der Filtration

Luft wird durch den Einfluss von Schadstoffen, Schwebstoffen (z.B. Pollen), Feinstaub und Abgasen, aber auch durch Bakterien und Viren belastet, wodurch die Gesundheit von Mensch und Tier beeinträchtigt werden kann (TRAN et al. 2020). Da eine gereinigte und unbelastete Luft die Gesundheit positiv beeinflusst und zum Wohlbefinden beiträgt, kommen Luftfilter in vielen Bereichen zum Einsatz. Zur Reinigung der Luft werden unter anderem Partikelabscheider, wie Zykclone, Luftwäscher oder Elektrofilter, genutzt. In der Raumlufttechnik und in industriellen Gebäudeanlagen, als auch in der Forschung und im Gesundheitswesen (OP-Säle in Krankenhäusern) kommen vor allem Faser- bzw. Membranfilter als Zuluft-, Abluft- oder Umluftfilter zum Einsatz.

Die Leistungsfähigkeit eines Filters Partikel aus Gasströmen abzuscheiden, wird vom Fraktionsabscheide- bzw. Trenngrad bestimmt. Dieser definiert sich als das Verhältnis der Partikelanzahl einer bestimmten Partikelgröße, die im Filter abgeschieden wurde, bezogen auf die gesamte Anzahl an Partikeln dieser Größe vor Filtereintritt (CAESAR 2013). Dabei werden die Partikel entweder auf der Oberfläche abgeschieden ohne in den Filter vorzudringen (Oberflächenfiltration) oder sie durchdringen den Filter, treffen auf eine Faser und lagern sich ab (Tiefenfiltration) (CAESAR 2013). Die Abscheidung von Partikeln im Filtermaterial beruht auf verschiedenen physikalischen und mechanischen Effekten, die zusammen auftreten und

sich überlagern können. Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Transportmechanismen eines Partikels im Zuge des Abscheideprozesses.

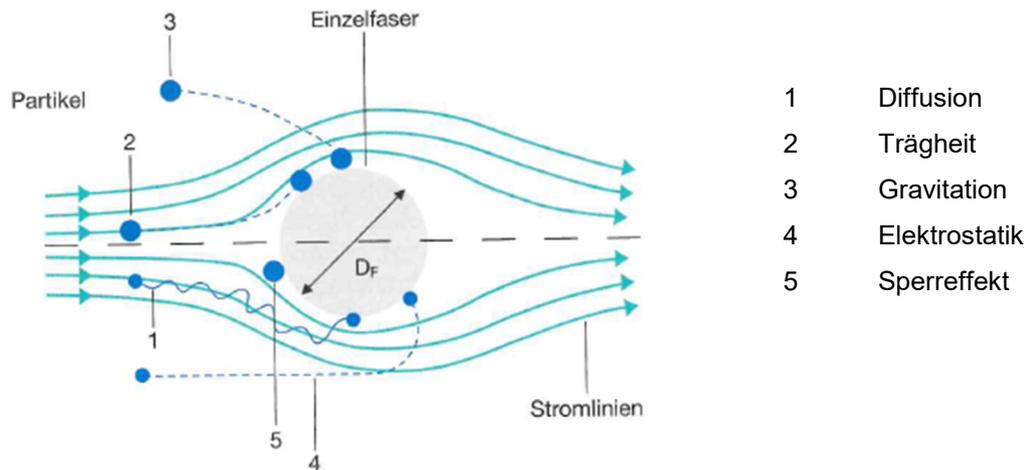


Abbildung 1: Transportmechanismen bei der Partikelabscheidung an Fasern (CAESAR 2013).

2.3.2 Filterklassen

Die Wahl der richtigen Filterklasse hängt von der Anwendung und den zu erreichenden Partikelkonzentrationen ab. Die Partikelfilterklasse gibt an, mit welcher Effizienz unerwünschte Partikel eines bestimmten Durchmessers aus dem Luftstrom aufgehalten und abgeschieden werden. Es existieren weltweit verschiedene Normen zur Klassifizierung und Bewertung von Luftfiltern. In standardisierten Laborprüfverfahren werden verschiedenste Luftfilter über Tests mit Prüfaerosolen und Prüfstäuben eingestuft. Jede Nation verfährt dabei anders, sodass eine Vergleichbarkeit der Filterklassen zwischen verschiedenen Nationen schwer ist (CAESAR 2013). In den USA werden Luftfilter beispielsweise nach dem ANSI/ASHRAE-Standard 52.2 (2007) bewertet und in Minimum Efficiency Rating Value (MERV)-Klassen eingeteilt. In Europa gilt im Bereich „Partikel-Luftfilter für allgemeine Raumluftechnik“ die DIN EN ISO 16890, die 2016 die zuvor geltende DIN EN ISO 799 ablöste. Die DIN EN ISO 799 wies erhebliche Schwächen im Prüfverfahren bezüglich realistischer Einsatzbedingungen auf. Die neue DIN EN ISO 16890 beschreibt nicht nur die Prüfmaßnahmen zur Ermittlung der Kenndaten von Luftfiltern, sondern sie gibt vor, dass drei Partikelfraktionen verschiedener Größen (PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1) gemessen werden müssen. Die neuen Prüfbedingungen ermöglichen eine genauere und realitätsnähere Filterauswahl zu den zu erwartenden Feinstaubfraktionen ($<10 \mu m$ Partikeldurchmesser). Ausschlaggebend für die Klassifizierung ist, ob ein Filter einen Abscheidegrad von mehr als 50 % des entsprechenden Partikelgrößenbereichs erreichen kann.

Man unterteilt Filter in Staubfilter und in Schwebstofffilter. Staubfilter lassen sich weiter, je nach Grad der Abscheidung verschiedener Partikelgrößendurchmesser, in Grobstaub- und Feinstaubfilter untergliedern.

Grobstaubfilter werden hauptsächlich als Vorfilter eingesetzt, da deren Einsatzgebiet für grobe Stäube mit Partikeldurchmessern von $>10\ \mu\text{m}$ vorgesehen ist. Sie bestehen aus Glasfasern oder synthetischen Fasern wie Polypropylen oder Polyester (ANONYM 2002). Eine effiziente Abscheidung durch Grobstaubfilter setzt eine bestimmte Luftgeschwindigkeit und eine bestimmte Masse der Partikel voraus, da die Partikel sonst problemlos dem Luftstrom folgen würden und sich somit der Abscheidegrad deutlich verringern würde (ANONYM 2002). Die Einteilung nach alter DIN EN ISO 799 erfolgte anhand des mittleren Abscheidegrades gegenüber synthetischen Prüfstäuben (ANSI/ASHRAE) in den Klassen G1 bis G4. Diese wurden durch die DIN EN ISO 16890 von der Klasse „ISO Coarse“ abgelöst.

Feinstaubfilter dienen der Abscheidung von partikulären Luftverunreinigungen $<10\ \mu\text{m}$. Sie werden beispielsweise zur Zuluftfiltration im Bereich der Lebensmittelproduktion verwendet, aber auch in Klimaanlage von Laboratorien und Krankenhäusern. Bei kleinen Partikeln ist für das Erreichen eines hohen Abscheidegrades eine niedrige Luftströmungsgeschwindigkeit von Vorteil (ANONYM 2002). Nach neuer DIN EN ISO 16890 klassifiziert man Feinstaubfilter in ISO ePM₁, ISO ePM_{2,5} und ISO ePM₁₀. Voraussetzung für die Klassifikation ist, dass ein Filter mindestens 50 % des entsprechenden Partikelgrößenbereiches abscheidet.

Schwebstofffilter werden insbesondere in Krankenhäusern, in Laboratorien und in Reinräumen für die pharmazeutische Produktion oder in der Elektrotechnik verwendet. Kleinste Verunreinigungen mit Partikelgrößen $<1\ \mu\text{m}$ wie Schwebstäube, Bakterien oder Viren lassen sich aus der Luft entfernen (CAESAR 2013). Sie werden in drei Filtergruppen eingeteilt: EPA-Filter (Efficient Particulate Air filter) mit den Filterklassen E10 bis E12, HEPA-Filter (High Efficiency Particulate Air filter) mit den Filterklassen H13 und H14 und ULPA-Filter (Ultra Low Penetration Air filter) mit den Filterklassen U15 bis U17. Für Schwebstofffilter gilt die DIN EN ISO 1822.

2.3.3 Luftfiltration in der Tierhaltung

In Gebieten mit einer hohen Schweinebestandsdichte, wie den mittleren Westen der USA, finden Zuluftfiltersysteme bereits seit einigen Jahren Anwendung, um das Risiko des Eintrags von Pathogenen wie PRRSV über den Luftweg zu minimieren (ALONSO et al. 2013a, PITKIN et al. 2009, SPRONK et al. 2010). SPRONK et al. (2010) konnten in einer 12-monatigen Studie nachweislich die Übertragung von PRRSV über den Einsatz von Zuluftfiltern verhindern und den Bestand vor einem klinischen Ausbruch bewahren. Auch die Übertragung einer Mischinfektion von PRRSV und *Mycoplasma hyopneumoniae* konnte mithilfe von Zuluftfiltersystemen, die zum Teil antimikrobiell wirksam waren, verhindert werden (DEE et al.

2010). Umluftfiltration ist eine weitere Variante der Luftfiltration. Die in einem geschlossenen Raum zirkulierende Luft wird dabei über eine Unterdruckbelüftung angesaugt und von Verschmutzungen befreit. Häufig werden Umluftfiltersysteme in der Industrie, wie z.B. in Heizungs- und Lüftungsanlagen oder in Klimaanlage von Autos, eingesetzt. Die Verwendung in Nutztierbeständen stellt jedoch eine Neuheit dar (ANTHONY et al. 2015). Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte war es den Einfluss der Verwendung von Umluftfiltration auf die Tiergesundheit zu erörtern. LAU et al. (1996) konnten in ihrer Studie den Staubgehalt der Stallluft in einem Schweinemastbestand um 18-64 % durch den Einsatz von Umluftfiltern senken. Des Weiteren stellten LAU et al. (1996) fest, dass die Mastzeit bis zum vermarktungsfähigen Schlachtgewicht um bis zu zehn Tage reduziert werden konnte. Auch in einer britischen Studie konnte die Mastzeit von Schweinen in einem Stall mit Umluftfiltration um sechs bis acht Tage verringert werden, im Vergleich zu einer Referenzgruppe in nicht gefilterter Stallluft (CARPENTER et al. 1986). Eine aktuellere Studie (WENKE et al. 2018) testete den Einsatz verschiedener Zuluftfiltersysteme und eines Umluftfiltersystems, die in bereits bestehende Lüftungsanlagen von drei Schweinemastställen eingebaut wurden. Über einen Zeitraum von drei Mastperioden wurden im zwei-wöchigen Rhythmus Stallklimaparameter gemessen, die Stallluftqualität ermittelt und die Tiergesundheit anhand von Gesundheitsparametern beurteilt. Dabei konnten WENKE et al. (2018) demonstrieren, dass sich Luftfilter problemlos in bereits bestehende Lüftungsanlagen integrieren lassen. Als Ergebnis verzeichneten sie im Stall mit dem Umluftfiltersystem den niedrigsten Staubgehalt mit $0,12 \text{ mg/m}^3$ Stallluft. Auch die bei der Schlachtuntersuchung ermittelte Lungengesundheit war bei den Schweinen aus dem Stall mit Umluftfiltration am besten. Eine signifikante Reduzierung des Keimgehaltes der Stallluft konnte allerdings nicht erreicht werden.

Bisher gibt es nur wenige Kosten-Nutzen-Analysen bezüglich der Anschaffung und dem Einbau von Luftfiltersystemen in Schweinebestände. In einer amerikanischen Studie ermittelte man einen Zeitraum von 5,35 Jahren, indem sich die Anschaffungskosten eines Filtersystems decken ließen. Staatliche Subventionierungen könnten den Zeitraum auf 2,1 Jahre verringern (ALONSO et al. 2013b). In Deutschland gibt es diesbezüglich bisher keine Untersuchungen.

2.4 Stallklima

Im Wesentlichen wird das Stallklima von den Faktoren Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Schadgaskonzentration (z.B. CO₂, NH₃) und der Luftgeschwindigkeit bestimmt. Innere Gegebenheiten (z.B. Oberflächentemperaturen, Beleuchtungsstärke, Staubbelastung, Keimgehalt), als auch äußere (z.B. Sonneneinstrahlung, Transmissionswärmeströme) wirken sich auf die Qualität der Stallluft aus. Weiterhin wird das Stallklima durch meteorologische, tierphysiologische und technische Faktoren beeinflusst (ZUCKER 2017). Das Stallklima wiederum prägt nachweislich die Tiergesundheit (CARPENTER 1986, SEEDORF 2000, TAKAI et al. 1998). Daher gehören regelmäßige Kontrollen des Stallklimas zu einer guten Bestandsbetreuung und einem guten Hygienemanagement.

2.4.1 Zusammensetzung der Stallluft

2.4.1.1 Organische Komponenten

2.4.1.1.1 Staub

Stallstaub setzt sich aus den folgenden Komponenten zusammen: Kot-, Futter-, Einstreu-, Haut- und Haarpartikeln, Mikroorganismen wie Bakterien, Viren, Protozoen oder Schimmelpilzen, Endotoxinen und Mykotoxinen, biogenen Aminen, Gasen und Medikamentenrückständen (ZUCKER 2017). Staub lässt sich in eine organische und in eine anorganische Komponente einteilen, wobei der organische Anteil mit ca. 85 % überwiegt (HARTUNG und SALEH 2007). Weiterhin lässt sich die organische Komponente in einen lebensfähigen und einen nicht-lebensfähigen Teil untergliedern (PEDERSEN et al. 2000). Vor allem Mikroorganismen nehmen den lebensfähigen Anteil ein (CARPENTER et al. 1986). Das Eindringen von Staub in den Respirationstrakt kann zu lokalen Reizungen und einer herabgesetzten Immunabwehr führen (HARTUNG und SALEH 2007). Ebenso können allergische Reaktionen und entzündliche Prozesse in Gang gesetzt werden (RYLANDER 1986, THELIN et al. 1984). Das Auftreten von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen und einer erhöhten Mortalität in Tierbeständen sahen POPE et al. (2002) in einem engen Zusammenhang mit der Staubbelastung der Stallluft.

Der gesundheitsschädliche Faktor ist, neben dem Schadstoffgehalt der Stäube, insbesondere die Größe der Staubpartikel, die die Weite des Eindringens in den Respirationstrakt bestimmt (COSTA und DOMENEGHINI 2018, HATCH und GROSS 1964, TAKAI et al. 1998). Auf der Grundlage des aerodynamischen Durchmessers werden Stäube in Grobstaub (>10 µm), Feinstaub (<10 µm) und Feinststaub (<1 µm) klassifiziert. Misst man den Gehalt an Feinstaub in der Luft, so wird er in Particulate Matter PM₁, PM_{2,5}, und PM₁₀ eingeteilt. Dabei wird PM_x definiert durch die Staubpartikel in der Luft, die bei einem aerodynamischen Durchmesser von x µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweisen (ANONYM 2014). Das bedeutet bei

PM₁₀, dass die Hälfte aller Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 10 µm erfasst wird. Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser >10 µm gelten als Grobstaub. Grobstaub wird von den Nasenhaaren, als auch von den Schleimhäuten des Nasen-Rachen-Raums aufgehalten und dringt daher nicht weiter in den Respirationstrakt ein. Staubpartikel mit einer Größe von <10 µm und 5 µm werden als einatembare Staubfraktion bzw. als E-Staub bezeichnet. Sie dringen bereits tiefer, bis in die Bronchien und Bronchiolen, ein. Staubpartikel mit einem Durchmesser von <5 µm sind so klein, dass sie bis in die Lunge gelangen können (COSTA und DOMENEGHINI 2018, SEEDORF 2000, ZUCKER 2017). Sie bilden die alveolengängige Staubfraktion, die auch als A-Staub bezeichnet wird. Abbildung 2 zeigt die Größenverhältnisse der unterschiedlichen Partikel-Größenfraktionen PM₁, PM_{2,5} und PM₁₀ (CAESAR 2013).



Abbildung 2: Darstellung von Partikeln der Größen PM₁, PM_{2,5} und PM₁₀ (CAESAR 2013).

Da sowohl für Tiere, als auch für Menschen, die in Ställen arbeiten, eine Gefahr für die Gesundheit durch das Einatmen von Staub ausgeht, sollte der Staubgehalt möglichst geringgehalten und regelmäßig überwacht werden (COSTA und DOMENEGHINI 2018, RADON et al. 2001). Für den Menschen ist in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS), bei denen von einer Arbeitszeit von acht Stunden und einer fünf-Tage-Woche ausgegangen wird, ein Arbeitsplatzgrenzwert für einatembaren Staub von 10 mg/m³ Luft festgelegt und 1,25 mg/m³ Luft für alveolengängigen Staub (ANONYM 2006). Diese Werte sind allerdings für Arbeiter in Schweinebetrieben zu unspezifisch, daher wurden in einer Gesundheitsstudie für diesen speziellen Fall Grenzwerte von 2,4 mg/m³ Luft für den einatembaren Staubanteil und 0,23 mg/m³ Luft für den alveolengängigen Staubanteil ermittelt. Zum Schutz der Gesundheit der Arbeiter in Schweineställen sollten diese Werte nicht überschritten werden (DONHAM und CUMRO 1999). Für Schweine in Stallhaltung gibt es keine gesetzlich festgelegten Grenzwerte. DONHAM et al. (1989) empfehlen jedoch

Gesamtstaubmengen von $3,7 \text{ mg/m}^3$ Luft und $0,23 \text{ mg/m}^3$ Luft für alveolengängigen Staub nicht zu überschreiten. TAKAI et al. (1998) ermittelten Staubkonzentrationen in Schweineställen in vier verschiedenen europäischen Ländern und deren Emissionswerte. Dabei konnten im Durchschnitt aller vier Länder ein Gehalt von $2,19 \text{ mg/m}^3$ Luft für einatembaren Staub und $0,23 \text{ mg/m}^3$ Luft alveolengängigen Staub gemessen werden. Eine amerikanische Studie veröffentlichte Werte von $2,2 \text{ mg/m}^3$ für einatembaren Staub und $0,10 \text{ mg/m}^3$ Luft für alveolengängigen Staub (PREDICALA et al. 2001). Bei einer deutschen Studie in einem Schweinemastbetrieb wurden deutlich geringere Werte von durchschnittlich $0,13 \text{ mg/m}^3$ Luft gemessen (WENKE et al. 2018).

Diese unterschiedlichen Angaben resultieren aus den folgenden Faktoren, die die Staubkonzentration beeinflussen:

Die Menge an Staub in der Stallluft wird von der gehaltenen Tierart (HARTUNG und SEEDORF 1999), vom Stallklima und der Lüftungsrate (WANG et al. 1999), von der Luftverteilung (MAGHIRANG et al. 1997), von der Fütterungsart (COSTA et al. 2007, GUINGAND 1999), von der Haltungs- und Aufstallungsform, von der Fäkaltechnologie (BANHAZI und CARGILL 1999, GUINGAND 1999, TAKAI et al. 1998), sowie vom Aktivitätsstatus der Tiere beeinflusst (COSTA et al. 2009). Auch die Jahres- und Tageszeiten wirken sich auf den Staubgehalt aus: so sind Stallstaubwerte im Winter aufgrund einer geringeren Belüftung höher als im Sommer und am Tag höher als in der Nacht (TAKAI et al. 1998). Der Hygienestatus eines tierhaltenden Betriebes ist ein weiterer und nicht zu vernachlässigender Faktor, der sich auf den Staubgehalt der Stallluft auswirkt: je weniger Hygienemaßnahmen ergriffen werden, desto höher erweist sich die Staubmenge (BANHAZI und CARGILL 1999).

2.4.1.1.2 Mikrobielle Zusammensetzung der Stallluft

Ungefähr 80 % der luftgetragenen Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze, Viren und Protozoen liegen an Staubpartikel gebunden vor (ZUCKER 2017). Geschützt durch Staub und Wassereinlagerungen können Mikroorganismen so überleben und über die Luft transportiert werden (CURTIS et al. 1975, ZUCKER 2017). Die Verweildauer und die Strecke über die die Keime an Staubpartikel gebunden transportiert werden können, ist abhängig von der Größe des Partikels: je größer das Partikel ist, desto mehr Keimmasse kann gebunden werden (CURTIS et al. 1975, WELLS 1955). Die Konzentration luftgetragener Mikroorganismen in Schweinehaltungen ist mit $5,1 \times 10^5 \text{ KbE/m}^3$ Luft laut HARTUNG und SEEDORF (1999) hoch, jedoch niedriger als in Geflügelhaltungen ($6,4 \times 10^5 \text{ KbE/m}^3$ Luft) und höher als in Rinderhaltungen ($4,3 \times 10^5 \text{ KbE/m}^3$ Luft). Tierhaltenden Betrieben wird empfohlen Konzentrationswerte von $1,0 \times 10^5 \text{ KbE/m}^3$ Luft nicht zu überschreiten – gesetzlich gibt es diesbezüglich jedoch keine Vorschriften (BANHAZI et al. 2008). Dennoch sollten hohe Konzentrationen an aktiven Mikroorganismen und Endotoxinen vermieden werden, da

mehrere Studien einen Zusammenhang zu verschiedenen Lungenerkrankungen feststellen konnten (CROOK et al. 1991, DONHAM et al. 1989). Der Großteil der Mikroorganismen der Stallluft wird von den Tieren selbst über Kot und Hautschuppen generiert und an die Stallluft abgegeben (SEEDORF 2000). Auch Futter stellt eine Quelle dar (SEEDORF et al. 1998). Bakterien der Gattung *Staphylococcus* nehmen prozentual mit 80-90 % den größten Anteil der in der Stallluft vorkommenden Keime ein, gefolgt von Streptokokken (SEEDORF et al. 1998, SEEDORF 2000, ZUCKER 2017). Fäkalkeime wie *Escherichia coli* oder andere *Enterobacteriaceae* findet man nur zu 0,5-2 % (SEEDORF et al. 1998, SEEDORF 2000, ZUCKER 2017). Staub ist auch ein Nährstofflieferant für Schimmelpilze wie *Mucor* spp., *Aspergillus* spp. und *Penicillium* spp., sodass sie mit einem Anteil von bis zu 2 % in der Stallluft nachgewiesen werden können (SEEDORF et al. 1998, SEEDORF 2000, ZUCKER 2017). Manche Schimmelpilze produzieren Mykotoxine wie z.B. Aflatoxin, welches einen kanzerogenen Effekt besitzt (SEEDORF et al. 1998).

2.4.1.2 Chemische und physikalische Komponenten

2.4.1.2.1 Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit (rLF), Luftgeschwindigkeit

Die Stalltemperatur wird von Faktoren wie der Außenluft, von der Wärmeproduktion im Stall, von der Lüftung, und von den umschließenden Bauteilen beeinflusst. Da auch die relative Luftfeuchtigkeit und die Luftbewegung einen direkten Einfluss auf die Stalltemperatur nehmen, und es ein wechselseitiges Zusammenspiel der Faktoren gibt, spricht man vom hydrothermischen Komplex (ZUCKER 2017). Die optimale Temperatur für das Wohlbefinden der Tiere und der bestmöglichen Leistung befindet sich in dem Bereich, indem der geringste energetische Aufwand erforderlich ist, die Körperkerntemperatur aufrecht zu halten, bzw. überschüssige Wärme abzugeben (HARTUNG und SPINDLER 2013). Dieser Bereich wird als thermoneutrale Zone bezeichnet. Die optimale Haltungstemperatur von Schweinen variiert je nach Alter der Tiere. Saugferkel benötigen anfangs eine Temperatur zwischen 20-32 °C (ZUCKER 2017), wohingegen Mastschweine kontinuierlich kältere Temperaturen in einem Bereich von 14-22 °C bevorzugen (GONYOU et al. 2006, ZUCKER 2017). Werden diese Temperaturbereiche dauerhaft über- bzw. unterschritten, führt dies zu Minderleistungen und Gesundheitsbeeinträchtigungen (PLONAIT 2004, REINER 2015, ZUCKER 2017). Minderleistungen können zum Beispiel durch Hitzestress entstehen, der zu einer verminderten Futteraufnahme führt (COLLIN et al. 2001). Schweine sind sehr anfällig für Hitzestress, da sie nicht schwitzen können und eine dicke subkutane Fettschicht besitzen, die es für sie kaum möglich macht Wärme von innen nach außen abzugeben (PETERSON et al. 2017). Zu niedrige Temperaturen führen zu einer Immunsuppression, sodass die Tiere anfälliger gegenüber Krankheiten werden. Insbesondere Mastschweine, die kalten

Umgebungstemperaturen ausgesetzt wurden, scheinen anfälliger für respiratorische Erkrankungen zu sein (FABLET et al. 2012, MADEC und JOSSE 1985, STÄRK et al. 1998).

Auch die rLF hat Einfluss auf das Wohlbefinden der Tiere, da sie in den Wärmehaushalt der Tiere eingreift (ZUCKER 2017). Sie gibt an wie viel Wasserdampf prozentual tatsächlich von der Luft aufgenommen werden kann, im Vergleich zur maximalen Wasserdampfaufnahmekapazität, die von der Lufttemperatur und dem Luftdruck bestimmt wird (FABLET et al. 2018, ZUCKER 2017). Je höher die Temperatur, desto mehr Wasserdampf kann theoretisch aufgenommen werden. Mehrere Studien belegen jedoch eine negative Korrelation zwischen der rLF und der Temperatur in Schweineställen. Steigt die Temperatur, sinkt die rLF und umgekehrt (DELBLIQUY et al. 1991, KIM et al. 2005). Die rLF im Schweinestall sollte ohne Heizung 60-80 % und mit Heizung 40-70 % betragen (BRUMM 2019, HARTUNG und SPINDLER 2013). Ist die rLF dauerhaft zu niedrig und der Staubgehalt der Stallluft sehr hoch, kann es durch Austrocknung und Reizung der Schleimhäute leichter zu Erkrankungen der oberen Atemwege kommen (HARTUNG und SPINDLER 2013, HEINRITZI 2006d). Eine hohe rLF führt zu einer höheren Konzentration an Mikroorganismen in der Stallluft und somit zu einem erhöhten Keimdruck (FABLET et al. 2018, ZUCKER 2017). Des Weiteren entsteht durch Kondensation am Tierkörper bei niedrigen Temperaturen eine Verdunstungskälte, die das Immunsystem zusätzlich strapaziert. GRANIER und MASSABIE (1996) sahen als Ergebnis ihrer Studie, dass die rLF bei einer Stalltemperatur von unter 30 °C kaum Einfluss auf die Leistung von Mastschweinen nimmt.

Der dritte Faktor im hydrothermischen Komplex ist die Luftgeschwindigkeit. Sie beeinflusst die Wärmeabgabe des Tieres und verschiebt die thermoneutrale Zone in einen höheren Bereich (ZUCKER 2017). Im Winter sollten Werte von über 0,2 m/s nicht überschritten werden. Bei Ferkeln sollte eine Anpassung nach unten erfolgen (0,1 m/s). Im Sommer kann die Luftgeschwindigkeit mit steigenden Außentemperaturen auf 0,6 m/s angehoben werden (HARTUNG UND SPINDLER 2013). Besonders Zugluft, also eine gerichtete Strömung, sollte verhindert werden, da diese zu Erkältungskrankheiten führen kann (ZUCKER 2017).

2.4.1.2.2 Ammoniak (NH₃)

Ammoniak zählt zu den vorherrschenden Gasen in Tierhaltungen. Circa 51 % der weltweiten Ammoniak-Emission stammen aus der Tierhaltung (WBA 2015). Das wasserlösliche, farblose Gas besitzt einen markant stechenden Geruch, der bereits ab 0,05 parts per million (ppm) wahrgenommen werden kann, und durch den mikrobiellen Abbau von Tierdung entsteht (PARK et al. 2020, SMEETS et al. 2007, VAN THRIEL et al. 2006). Es reagiert bevorzugt mit den feuchten Schleimhäuten der Augen, der Nase und der Lunge und liefert Krankheitserregern durch eine Zerstörung des Epithels eine Eintrittspforte in den Körper (HOY et al. 2006, MEULENBELT 2012). Schon sehr zeitig fand man heraus, dass Ammoniak einen

negativen Effekt auf die Tierleistung und Tiergesundheit hervorruft (DAY et al. 1965, JONES et al. 2001, KOVACS et al. 1967). So konnte beispielsweise eine bis zu 30 %ige Reduktion der täglichen Gewichtszunahme bei Absatzferkeln bei steigender Ammoniak-Konzentration der Stallluft in einer Studie von DRUMMOND et al. (1980) beobachtet werden. In Schweinehaltungen besteht bereits bei einer Ammoniak-Konzentration von 15 ppm gekoppelt mit Staubkonzentrationen von über 0,05 mg/m³ Luft für PM₁₀ eine Prädisposition für Infektionen der Atemwege (COSTA und DOMENEGHINI 2018). Als Kofaktor fördert Ammoniak das Auftreten von Atrophischer Rhinitis undENZootischer Bronchopneumonie (DONHAM 1991). Laut Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzV) gilt ein Grenzwert von 20 ppm im Aufenthaltsbereich der Schweine, der nicht dauerhaft überschritten werden sollte, da es sonst sowohl bei Menschen als auch bei Tieren zu chronischem Husten und Bronchitiden kommen kann (ANONYM 2006, ZEJDA et al. 1994).

2.4.1.2.3 Kohlendioxid (CO₂)

Kohlendioxid ist ein farbloses und schwach säuerlich riechendes Gas. Es ist neben Ammoniak eines der vorherrschenden Gase in der Stallluft und wird zu 80 % von den Tieren im Zuge des Stoffwechsels über die Ausatemluft produziert (ZUCKER 2017). Die TierSchNutzV gibt vor, dass eine CO₂-Konzentration von 3000 ppm nicht überschritten werden sollte (ANONYM 2006). Im Grunde ist CO₂ kein Schadgas im eigentlichen Sinne, da es erst ab Konzentrationen von 40.000 ppm zu Schläfrigkeit und ab 80.000 ppm zu Bewusstlosigkeit kommen kann (ZUCKER 2017). Solch hohe Konzentrationen werden im Stall üblicherweise nicht erreicht. Daher wird die Kohlendioxid-Konzentration der Stallluft herangezogen, um die Qualität des Stallklimas zu beurteilen, und das Lüftungsmanagement zu überprüfen (DONHAM 1991, ZUCKER 2017).

3 Veröffentlichung

3.1 Eigenanteil

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Tierhygiene und Öffentliches Veterinärwesen der Universität Leipzig durchgeführt und durch Prof. Dr. Uwe Truyen und Frau Dr. med. vet. Stephanie Speck betreut und in Zusammenarbeit mit der Firma REVENTA® konzipiert. Finanziert wurde die Arbeit durch Drittmittel von der Deutschen Rentenbank. UVC-Leuchten wurden von der Firma sterilAir® bereitgestellt.

Bei den Versuchen im Filterprüfstand wurde ich von Frau Dana Rüter und Frau Dr. Stephanie Speck fachlich und technisch unterstützt. Die für die Versuche notwendigen Bakterien- und Virenkulturen wurden eigenständig hergestellt. Die Entnahme der Proben und deren Weiterverarbeitung, sowie die Auswertung und Berechnung der Gesamtkeimgehalte und Virustiter erfolgte in eigener Verantwortung.

Während des Stallversuches erfolgten die wöchentlichen Messungen zu Stallklimaparametern und zur Ermittlung des Staub- und Keimgehaltes der Stallluft eigenständig. Herr Mario Reinhardt unterstützte mich dabei. Er war außerdem für die bautechnischen Belange des Versuchstierstalls zuständig. Die Versorgung der Tiere wurde hauptsächlich von Herrn Enrico Baßler sichergestellt. An den Wochenenden erhielt ich von allen wissenschaftlichen Mitarbeitern Unterstützung bei der Versorgung der Tiere. Bei der Weiterverarbeitung der Proben im Labor unterstützte mich Frau Evelin Brumme.

Bei der statistischen Auswertung der Daten erhielt ich fachliche Beratung vom Institut für Medizinische Informatik, Statistik und Epidemiologie (IMISE) der Universität Leipzig durch Herrn Dr. Matthias Horn.

Das Anfertigen der Manuskripte erfolgte selbstständig, und ich versichere keine anderen als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

3.2 Fremdanteil

Die Beurteilung der Lungengesundheit bei der Schlachtieruntersuchung auf dem Schlachthof erfolgte durch den Schweinegesundheitsdienst Sachsen.

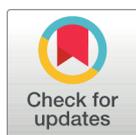
RESEARCH ARTICLE

Impact of UVC-sustained recirculating air filtration on airborne bacteria and dust in a pig facility

Lisa Eisenlöffel¹, Tobias Reutter², Matthias Horn³, Simon Schlegel⁴, Uwe Truyen¹, Stephanie Speck^{1*}

1 Institute of Animal Hygiene and Veterinary Public Health, University of Leipzig, Leipzig, Germany, **2** REVENTA® GmbH, Horstmar, Germany, **3** Institute for Medical Informatics, Statistics and Epidemiology (IMISE), University of Leipzig, Leipzig, Germany, **4** sterilAir AG, Weinfeld, Switzerland

* stephanie.speck@vetmed.uni-leipzig.de



Abstract

High amounts of aerial pollutants like dust and microorganisms can pose serious health hazards to animals and humans. The aim of the current study therefore was, to assess the efficiency of UVC irradiation combined to air filtration in reducing airborne microorganisms at laboratory scale. In a second part, a UVC-combined recirculating air filtration module (UVC module) was implemented in a small animal facility in order to assess its improvement of air quality with regard to airborne bacteria and dust. Tests at laboratory scale were performed using aerosols of *Staphylococcus (S.) aureus*, *Actinobacillus pleuropneumoniae*, porcine parvovirus (PPV) and porcine reproductive and respiratory syndrome virus. We varied relative humidity (RH) to evaluate its effect on UVC irradiation efficiency. In addition, viability of pathogens inside the filter material was determined over up to six months. UVC-combined air filtration resulted in a more than 99% reduction of viral and bacterial particles. RH had no influence on UVC efficiency. Viability in the filter matter varied depending on the pathogen used and RH with *S. aureus* and PPV being most resistant. In our small pig facility consisting of two separated barns, weekly air measurements were conducted over a period of 13 weeks (10 piglets) and 16 weeks (11 piglets), respectively. Airborne bacterial numbers were significantly lower in the barn equipped with the UVC module compared to the reference barn. On average a reduction to 37% of reference values could be achieved for bacteria, whereas the amount of total dust was reduced to a much lesser extent (i.e. to 78% of reference values). Measures taken in front of and behind the UVC module revealed a reduction of 99.4% for airborne bacteria and 95.0% for total dust. To conclude, recirculating air filtration combined to UVC provided efficient reduction of pathogens at laboratory and experimental scale. The implementation of such devices might improve the overall environmental quality in animal facilities.

OPEN ACCESS

Citation: Eisenlöffel L, Reutter T, Horn M, Schlegel S, Truyen U, Speck S (2019) Impact of UVC-sustained recirculating air filtration on airborne bacteria and dust in a pig facility. PLoS ONE 14 (11): e0225047. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047>

Editor: Caryn L. Heldt, Michigan Technological University, UNITED STATES

Received: July 2, 2019

Accepted: October 28, 2019

Published: November 7, 2019

Copyright: © 2019 Eisenlöffel et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the manuscript and its Supporting Information files.

Funding: This project was funded in part from a special purpose fund of the German federal government/Federal Ministry of Food and Agriculture/Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung/Landwirtschaftliche Rentenbank (University of Leipzig grant number 741 120/1 and REVENTA® GmbH grant number 742 393/1). We further acknowledge support from the German

Research Foundation (DFG) and Leipzig University within the program of Open Access Publishing. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript. REVENTA® GmbH provided support in the form of salaries for author TR. SterilAir AG provided support in the form of salaries for author SSchlegel. Both companies did not have any additional role in the study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing interests: Tobias Reutter is an employee of REVENTA® GmbH. Simon Schlegel is an employee of SterilAir AG. There are no patents, products in development or marketed products to declare. This does not alter our adherence to all the PLOS ONE policies on sharing data and materials, as detailed online in the guide for authors.

Introduction

Pathogens can be transmitted over the airborne route. This has been impressively demonstrated e.g. for porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV), Foot-and-Mouth-Disease virus, *Coxiella burnetii* and *Mycoplasma hyopneumoniae* which can be transported over several kilometers by wind [1–5]. At laboratory scale, a reduction efficiency of 92% to 99.9% was demonstrated depending on the air-filter type and the viruses or bacteria used for testing [6]. Nevertheless, air filtration is still not commonly used in pig production although it minimizes the risk of introducing airborne pathogens by supply air [5–8] and can be used to reduce pathogen burden from indoor air by recirculating air filtration [9–13]. Moreover, as airborne dust can cause serious health problems in animals and humans and acts as a carrier of pathogens, dust control is an important aspect in pig confinement buildings. Indoor air filtration effectively reduced dust levels in pig barns and improved pig performance which resulted in an earlier marketable state of fattening pigs [11]. In another study on a commercial pig farm mean airborne dust concentration was lowest in a barn with recirculating air filtration resulting in enhanced lung health in animals [14]. However, these findings were not affirmed by a significant reduction of airborne bacteria [14]. The authors concluded that combining UVC irradiation to recirculating air filtration might enhance elimination of airborne microorganisms [14]. UVC irradiation (100–280 nm) is highly mutagenic for microorganisms and its efficacy is dependent on the dose (J/m^2), which is composed of UVC intensity (W/m^2) and exposure time (s), the wavelength (254 nm), relative humidity (RH) and the susceptibility of microorganisms to UVC irradiation [15–17]. Through the formation of thymidine dimers, UVC functions as a mutagen and leads to damage of the microbial DNA. Several studies demonstrated the virucidal and bactericidal effectiveness of UVC irradiation [18–23]. Increased UVC resistance of certain bacteria was observed with increasing relative humidity (RH) [16–17] which is of importance for usage in pig husbandry conditions. Air disinfection by UVC irradiation is a new technology in pig production. Therefore, the objectives of this study were: 1) To determine the efficiency of UVC irradiation combined to air filtration in an air filter test chamber at laboratory scale using selected pathogens with high relevance in pig production, and 2) to determine the impact of UVC-combined air filtration on the total amount of airborne bacteria and dust in an animal housing at experimental scale.

Materials and methods

Pathogens chosen for air filter tests

Staphylococcus aureus (strain DSM 799) was chosen because Gram-positive bacteria account for the majority of airborne bacteria inside animal housings. Further, its methicillin-resistant variant (MRSA) can be found in pig barns in high numbers [24]. *Actinobacillus pleuropneumoniae* (APP) causes acute, sub-acute and chronic respiratory infections in pigs. The APP type strain (DSM 13472) was used for our experiments. We further chose PRRSV and Ungulate protoparvovirus I (formerly known as porcine parvovirus, PPV) because of their high economic impact in swine industry [25–27]. Culture conditions and preparation of test suspensions for the bacteria and PRRSV has been previously described in detail [6]. Briefly, bacterial test suspensions in tryptic soy broth (Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe, Germany) were adjusted to 10^8 – 10^9 colony-forming units (cfu)/ml and PRRSV suspensions grown in MARC-145 cells revealed a titer of $10^{5.6}$ – $10^{6.1}$ tissue culture infectious dose (TCID)₅₀/ml. PPV (strain NADL2) was grown in SPEV cells (CCLV-RIE 8; Collection of Cell Lines in Veterinary Medicine, Friedrich-Loeffler-Institute, Greifswald-Insel Riems, Germany) at 37°C without CO₂. The culture medium was composed of equal parts of MEM Hank's salts (Life Technologies

GmbH, Darmstadt, Germany) and MEM Earle's salts (Life Technologies GmbH) supplemented with non-essential amino acids (Life Technologies GmbH), sodium pyruvate (Life Technologies GmbH), 10% fetal calf serum (FCS; Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Schnelldorf, Germany) and L-Glutamine (GlutaMax-1 (100x), Life Technologies GmbH). PPV suspensions had a titer of $10^{6.8}$ – $10^{7.0}$ TCID₅₀/ml.

Experiments at laboratory scale

The air filter test chamber was previously described in detail [6]. Briefly, the chamber had a size of 4,200 mm (length) x 560 mm (width) x 560 mm (height) and was made of galvanized sheet metal with a matt non-reflecting surface. In addition to the original setup the test chamber was equipped with two UVC tubes (2036-4K, 36 W; sterilAir[®], Weinfelden, Switzerland) of 842 mm in length. They were set horizontally behind the air filter (Fig 1). The commercial air filter used consisted of six filter pockets of polyester (HSB 25A6-3; AFPRO filters GmbH, Bönen, Germany). The filter was classified as ISO Coarse 50% according to DIN EN ISO 16890 [28] or G3-filter according to EN 779:2012 [29], respectively. It had been determined to be <50% efficient at removing particles smaller than 10 µm in diameter. The filter dimension is 592x592x360 mm corresponding to a surface of 2.8 m². The initial pressure loss given by the manufacturer is 30 Pa at 3,400 m³/h. The filter was not neutralized in an isopropanol vapor atmosphere [28] as this would impair pathogen viability. Devices for charge neutralization (as aerosolized bacteria may carry electric charges) were not available for our study.

Fifty ml of pathogen suspensions were aerosolized by an Atomizer Aerosol Generator ATM 230 (Topas GmbH, Dresden, Germany), which functions as a collision nebulizer and had been successfully used in a previous study [6]. A particle impaction section removed coarse spray droplets resulting in a particle size distribution of 0.2 µm to 1 µm. HEPA-filtered compressed air of 5 bar was used to produce aerosols supplied into the test chamber. Five independent test runs were performed with each pathogen without and with UVC irradiation, respectively. UVC irradiation (µW/cm²) was measured using a UV Microlog MOD₁₀ (sglux SolGel Technologies GmbH, Berlin, Germany). The position of the UV-logger is given in Fig 1. Moreover, ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) within the filter test chamber was simulated using the software program "sterilAir UVGI" Version 1.0.1.1. (sterilAir[®], Weinfelden). We repeated tests with *S. aureus*, APP, and PRRSV with enhanced RH in the test chamber. This was achieved by enhancing RH in the laboratory using a humidifier. RH (%) inside the air filter

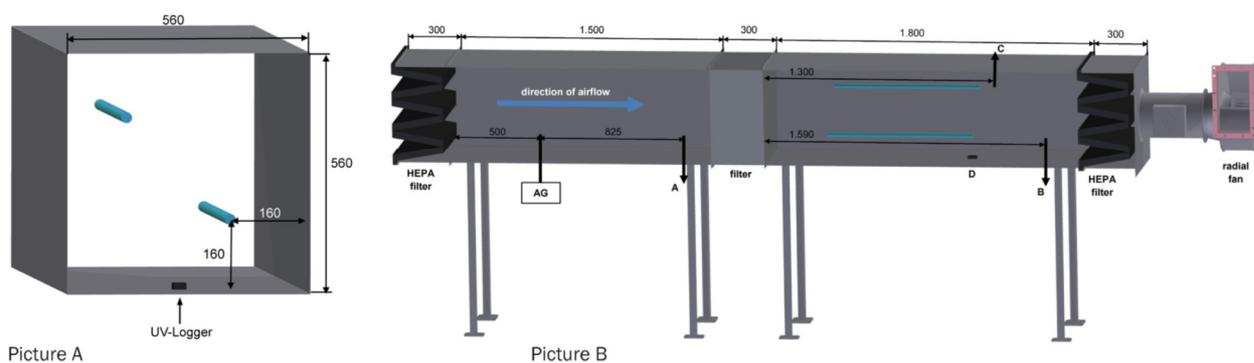


Fig 1. Scheme of the air filter test chamber. (Picture A) Cross section of the test chamber showing the position of both UVC tubes. (Picture B) Longitudinal section of the test chamber. The direction of airflow through the chamber is indicated by a blue arrow. The position of UVC tubes is given by two horizontal blue lines. Dimensions of the test chamber are given in mm. AG: aerosol generator, A: sampling point in front of the air filter, B: sampling point behind the air filter, C: measuring point for relative humidity in the test chamber, D: position of UV-logger.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.g001>

test chamber was measured by a Testo 635 (Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch, Germany). Trials with PPV and higher RH were not performed as parvoviruses are known to be very resistant to environmental factors [30]. The test chamber and UVC tubes were turned on for a 20 min warm-up time to achieve a steady-state operating temperature, a constant flow rate and irradiance. Each run was done over a period of 20 minutes. Filters were changed between the pathogens, between runs without and with UVC irradiation, and before tests with enhanced RH. For all tests a volume flow rate of 1,800 m³/h was used. The air inlet and outlet of the test chamber was filtered by HEPA filters (class E13) to ensure clean air. Isokinetic air sampling was done and corresponded to a collection volume of 660 l air/h. Air samples were collected by an air sampler pump (Analyt-MTC GmbH, Müllheim, Germany) using water soluble gelatin filters (Sartorius 12602-80-ALK, Sartorius AG, Göttingen, Germany) [6]. The first sampling point was in front of the pocket filter and the second was behind the UVC tubes (Fig 1). Briefly, gelatin filters were dissolved in 5 ml of tryptic soy broth or cell culture medium at 37°C. Determination of bacterial numbers and virus titers was done by the spread-plate method and virus titration, respectively [6,31–32]. For PPV an indirect immunofluorescence was used to determine PPV-infected SPEV cells seven days *post infectionem*. Cells were fixed with ice-cold acetone/methanol (1+1, v/v) and then rehydrated using PBS (pH 7.4). After blocking the cells with 3% FCS (Sigma-Aldrich Chemie GmbH) a PPV-positive swine serum (1:100) was applied and incubated at 37°C overnight. The serum was washed off with PBS and a fluorescein-conjugated second antibody (FITC-conjugated AffiniPure Goat Anti-Swine IgG, Jackson ImmunoResearch Laboratories, Inc., West Grove, Pennsylvania, USA) was added. After 8 hours of incubation at 37°C the titer plates were analyzed by a DMIL fluorescence microscope (Leica, Wetzlar, Germany) and the TCID₅₀/ml was calculated. The reduction efficiency of pathogens was calculated according to the following equation:

$$\text{Reduction (\%)} = \frac{\text{pathogen number behind the filter and UVC tubes}}{\text{pathogen number in front of the filter}} * 100\%$$

To investigate pathogen survival in the filter matter, each filter was placed into a separate plastic bag and stored at room temperature subsequently after the experiment. Five samples of 1 cm² each per filter were cut out after certain time intervals (30 min, 60 min, 120 min, 240 min, 24 h, 48 h, 7 d, 4 weeks, 2 months and 6 months), pooled and incubated for 10 min at room temperature in the respective culture medium. Virus titration and counting of bacteria was done as described before. All samples were additionally stored at -80°C. Prior to the experiments the filter material had been tested on all used cell lines and bacteria and revealed no toxic effects.

Description of the animal housing

The animal housing belongs to the Faculty of Veterinary Medicine at Leipzig University and consisted of two similar barns (barn 1: 7.23 m length x 3.32 m width x 2.92 m height; barn 2: 7.23 m length x 3.30 m width x 2.92 m height) arranged in parallel. Each barn was entered through a separate hygiene sluice where rubber boots were changed. The barns were equipped with separated air conditioning systems. Filtered (compact filter, class F7, DELBAG FläktGroup Deutschland GmbH, Herne, Germany) fresh air was delivered into each barn via four inlet valves at the ceiling (Fig 2). Windows remained closed for the entire study. The ventilation flow rate (equal pressure ventilation) was 1,200 m³/h resulting in approximately 17 times air change per hour. Used air was exhausted from each barn via four vents which were located at animal level behind a partition wall on one longitudinal site. Husbandry conditions were according to the German regulation for the protection of farmed animals [33]. Animals

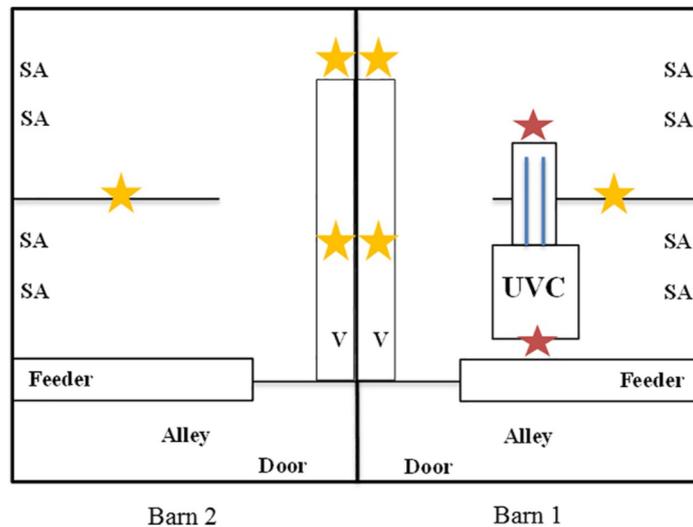


Fig 2. Structure of the barns and sampling points. Stars in yellow indicate the sampling locations for airborne dust and bacteria. Measures taken in front of and behind the UVC module are given as light red stars. SA—inlet valves for supply air; UVC—position of the UVC module; V—position of exhaust air vents.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.g002>

were housed with permission granted by the Landesdirektion Sachsen (reference number DD24-5131/244/11). Barn 1 was additionally equipped with a UVC-recirculating air filtration module (UVC module) (Fig 2). The UVC module consisted of the coarse dust filter tested at laboratory scale and two UVC tubes (2036-4K, sterilAir[®]) located behind the filter (Fig 3). Continuous air flow was guaranteed by an axial fan and was adjustable by a potentiometer. The ventilation flow rate of the UVC module in barn 1 additionally achieved a six times air change per hour. The air filter of the UVC module was changed between the first and the second trial of the animal study.

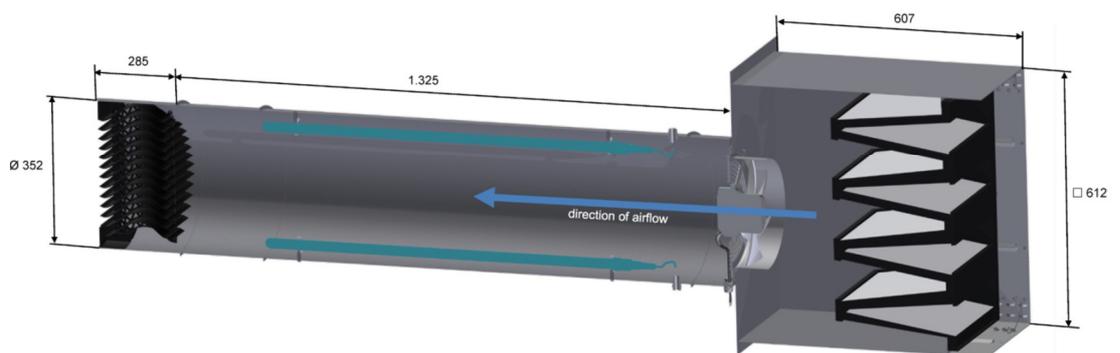


Fig 3. Longitudinal section of the UVC module. The module was composed of a pocket air filter (right rim of the picture), an axial fan (between filter and UVC tubes), and four UVC tubes (indicated as blue lines). A protective grid located downstream (left rim) ensured protection against UVC irradiation. The direction of airflow is given as blue arrow. UVC module dimensions are given in mm.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.g003>

Animals and husbandry conditions

Pigs were obtained from the Teaching and Research Farm of the University of Leipzig (registration number according to the German Livestock Movement Order “Viehverkehrsverordnung” DE143792903000). Animals were housed with permission granted by the Landesdirektion Sachsen (reference number DD24-5131/244/11). Husbandry conditions were according to the German regulation for the protection of farmed animals. The study was approved by the Animal Welfare Officer of the Veterinary Faculty at Leipzig University. According to the German Animal Protection Law, our animal study was not defined as an animal experiment and, therefore, an approval by the Committee on the Ethics of Animal Experiments was not necessary. At the end of each trial animals were transported to slaughter according to the German legislation regarding animal protection during transport (Tierschutztransportverordnung).

Piglets were housed on fully slatted floors without litter. Two trials over a period of 13 and 16 weeks respectively were performed. In the first trial 10 animals were kept per barn. Drinking water was provided by nipple drinkers and animals were fed a dry industry-standard diet *ad libitum* using manually filled feeders. Eleven piglets per barn were included in the second trial and were fed the same diet but only twice a day. Slurry trays underneath the slatted floors were discontinuously discharged in the middle and at the end of each trial. Each barn was cleaned and disinfected before restocking. Personnel had to change clothes before entering the animal housing. Animal health and behavior was checked daily by observation with particular attention to respiratory symptoms. Lung health was examined post-mortem by slaughterhouse personnel and results reported.

Measurement of indoor air quality

Measurements were conducted weekly between 9:00 a.m. and 12:00 p.m.. Dust values were calculated from data collected over 10 min sampling time using the DustTrak™ DRX Aerosol Monitor 8533 (TSI GmbH, Aachen, Germany), which is able to distinguish particle size fractions of $\leq 1 \mu\text{m}$, $\leq 2.5 \mu\text{m}$, $\leq 4 \mu\text{m}$, $\leq 10 \mu\text{m}$ and a total size fraction. Airborne bacteria were sampled by a Coriolis® μ Air sampler (Bertin Technologies, Montigny le Bretonneux, France) and samples were processed as described previously [14]. In addition, ammonia (Model CMS; Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck, Germany), CO₂ (Testo 535), temperature and RH (EBI 20-TH-1 data logger; Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co. KG ebro, Ingolstadt, Germany) were recorded. Dust and airborne bacteria were first sampled only at one sampling location per barn. Instruments were placed at an approximately height of 1.0 m. As of the third week of trial 1, dust was sampled at two locations. In the second trial, all samplings were carried out at three sampling locations (Fig 2). To avoid false high values due to an increased pig activity, feeders were filled at least one hour before measurements were taken during the first trial. In the second trial feeding was done afterwards. In addition, the effect of UVC-combined air filtration was assessed by comparing values simultaneously measured in front of (air inlet) and behind (air outlet) the UVC module (Fig 4) at a height of 1.93 m. Personnel left the barn during measurements.

Statistical analyses

All statistical analyses were performed using Microsoft® Excel® 2019. Barn 2 without any additional air filtration was set as the reference. Measurements of airborne bacteria and dust amounts were assumed to be independent of all previous measurements. Only those values obtained with the UVC module in operation were included in the statistical analyses, i.e. $n = 12$ timepoints for the first and $n = 16$ for the second trial. For each trial, the ratio of airborne bacterial counts in barn 1 (UVC module) compared to barn 2 (reference) was calculated



Fig 4. Position of the Coriolis[®] μ Air Sampler in front of the UVC module. The picture shows the Coriolis[®] μ Air Sampler operating on a mounted board in front of the pocket filter for measurements in close proximity to the UVC module.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.g004>

(mean bacterial numbers in barn 1 divided by mean bacterial numbers in barn 2). Ratios smaller than one correspond to a relative reduction of bacterial counts. Changes of dust amounts with respect to the reference were calculated in a similar manner. Ratios were log-transformed to guarantee approximately normally distributed values. For each trial, the null hypotheses of unchanged mean bacterial or dust counts (i.e., mean ratios equal one) were tested using one sample t-tests on a significance level of 5%. In addition, 95% confidence intervals (CI) were calculated for the estimated sample means.

Results

Retention efficiency determined in an air filter test chamber

The results of the different test runs are summarized in Table 1. Irrespective of the pathogen used a high loss of infectious particles was noticed when comparing pathogen numbers filled into the atomizer and pathogen amount measured in front of the filter (Table 1). Overall the results show that the G3-filter accounted for a low reduction of infectious particles with high variation within the five runs. Using UVC irradiation alone or in combination to the air filter resulted in a more than 99% reduction for bacteria and viruses. Only marginal differences were seen between the five replicates for each pathogen. The most efficient reduction was achieved for APP (i.e. 100%). In the first experiments RH was not modified and varied markedly. In the second test series, experiments with *S. aureus*, APP and PRRSV were repeated with RH adjusted to a mean of 66% (Table 2). Higher RH resulted in higher reduction rates for all pathogens in air filter tests without UVC irradiation. The effectiveness of the latter was not affected by higher RH. Simulation of UVGI at a volume flow rate of 1,800 m³/h, 20°C within

Table 1. Retention determined in an air filter test chamber with and without UVC irradiation.

Pathogen	Test setup	UVC intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	RH (%) ^a	Pathogen amount			Reduction (%) \pm SD ^b
				in culture suspension filled into the atomizer	in front of the filter	behind the filter	
<i>S. aureus</i>	filter	0	15.3	7.34×10^8 cfu/ml	8.31×10^5 cfu/ml	2.64×10^5 cfu/ml	67.71 ± 7.41
	filter, UVC	1,100	3.2 ^c	6.73×10^8 cfu/ml	3.43×10^5 cfu/ml	1.13×10^3 cfu/ml	99.74 ± 0.57
	UVC	1,190	12.7	6.42×10^8 cfu/ml	5.07×10^5 cfu/ml	4.60×10^1 cfu/ml	99.99 ± 0.01
APP	filter	0	15.3	8.73×10^8 cfu/ml	1.49×10^3 cfu/ml	7.63×10^2 cfu/ml	49.43 ± 23.77
	filter, UVC	1,220	17.4	9.40×10^8 cfu/ml	9.15×10^2 cfu/ml	0 cfu/ml	100.0 ± 0.0
	UVC	1,180	15.4	8.10×10^8 cfu/ml	5.53×10^3 cfu/ml	0 cfu/ml	100.0 ± 0.0
PRRSV	filter	0	nd ^c	$10^{5.8}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{3.5}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{2.7}$ TCID ₅₀ /ml	74.19 ± 16.70
	filter, UVC	1,160	33.8	$10^{5.7}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{3.8}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{1.0}$ TCID ₅₀ /ml	99.65 ± 0.41
	UVC	1,170	19.0	$10^{6.1}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{3.7}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{1.3}$ TCID ₅₀ /ml	99.29 ± 0.82
PPV	filter	0	37.9	$10^{7.0}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{4.8}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{4.1}$ TCID ₅₀ /ml	78.71 ± 17.70
	filter, UVC	1,180	43.2	$10^{6.8}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{4.8}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{1.7}$ TCID ₅₀ /ml	99.82 ± 0.12
	UVC	1,170	32.8	$10^{6.8}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{4.6}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{1.5}$ TCID ₅₀ /ml	99.87 ± 0.10

nd—not measured

SD—standard deviation

^aRH in these experiments was not modified and was documented once per run in the middle of the sampling time (i.e. after 10 min).^bResults represent the mean reduction (%) of five independent runs \pm SD.^cdevice defective<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.t001>

the test chamber revealed an average intensity of $1,612 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at 20% RH (S1 File) and 66% RH (S2 File), respectively. This is similar to the results measured by the UV-logger (Tables 1 and 2).

Viability of pathogens in the filter material from the first experiments was best for PPV which stayed infectious at least for four weeks but was no longer cultivable after two months. *S. aureus* lost its viability after one week while the filter sustained viability of PRRSV at least for 24 hours. In contrast, APP was cultivable only until 30 min after the end of the run. Increasing RH extended the viability of APP (4 h) and *S. aureus* (2 months) in the filter material while PRRSV seemed less viable (Table 3).

Bacteria and total dust concentration in air samples

Results are displayed in Table 4. Measures performed before restocking (i.e. after cleaning and disinfection) revealed total bacterial counts of ≤ 110 cfu/m³ and a total dust amount of < 0.02 mg/m³.

In the first trial, total airborne bacterial numbers exceeded 10^6 cfu/m³ in both barns. Total dust was always below 1 mg/m³ in barn 1 and only once higher in barn 2. Overall, bacteria and dust in barn 1 could be reduced to an average of 68.4% (95% CI [40.6%,115%]) and 86.5%

Table 2. Influence of relative humidity on the reduction efficiency of UVC-combined air filtration at laboratory scale.

Pathogen	Test setup	UVC intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	RH (%) ^a	Pathogen amount			Reduction (%) \pm SD ^b
				in culture suspension filled into the atomizer	in front of the filter	behind the filter	
<i>S. aureus</i>	filter	0	67.1	7.50×10^8 cfu/ml	8.10×10^5 cfu/ml	1.50×10^5 cfu/ml	80.88 ± 4.23
	filter, UVC	1,260	66.3	5.50×10^8 cfu/ml	5.58×10^5 cfu/ml	3.75×10^0 cfu/ml	99.99 ± 0.00
APP	filter	0	65.5	7.60×10^8 cfu/ml	3.10×10^4 cfu/ml	6.60×10^3 cfu/ml	79.48 ± 3.51
	filter, UVC	1,220	65.9	7.60×10^8 cfu/ml	2.20×10^4 cfu/ml	0 cfu/ml	100.0 ± 0.0
PRRSV	filter	0	65.6	$10^{6.1}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{3.8}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{3.0}$ TCID ₅₀ /ml	75.99 ± 10.76
	filter, UVC	1,180	65.7	$10^{5.5}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{3.1}$ TCID ₅₀ /ml	$10^{1.1}$ TCID ₅₀ /ml	98.63 ± 1.47

SD—standard deviation

^a RH was documented once per run in the middle of the sampling time (i.e. after 10 min).

^b Results represent the mean reduction (%) of five independent runs \pm SD.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.t002>

(95% CI [56.7%,132%]), respectively, compared to the reference barn 2. The observed reductions were not statistically significant ($p = 0.14$ for bacteria and $p = 0.46$ for dust).

In the second trial, bacterial numbers exceeded 10^6 cfu/m³ only in barn 2. With the exception of the results obtained at week 13, the bacterial numbers in air samples were always lower in barn 1 compared to barn 2. The amount of airborne dust was higher compared to the first trial and increased to >2 mg/m³ in barn 2 but was always less than 2 mg/m³ in barn 1. Bacteria and dust in barn 1 could be reduced to an average of 37.0% (95% CI [23.9%,57.2%]) and 78.0%

Table 3. Survival of bacteria and viruses in the filter matter determined after selected points in time.

Pathogen	Test setup	Pathogen viability after selected points in time									
		0.5 h	1 h	2 h	4 h	24 h	48 h	1 week	4 weeks	2 months	6 months
<i>S. aureus</i>	filter	+	+	+	+	+	+	+	-	nd	-
	filter, UVC	+	+	+	+	+	+	+	-	nd	-
	filter, UVC, RHadj	+	+	+	+	+	+	+	+	+	nd
APP	filter	+	-	-	-	-	-	-	-	nd	-
	filter, UVC	-	-	-	-	-	-	-	-	nd	-
	filter, UVC, RHadj	+	+	+	+	-	-	nd	nd	nd	nd
PRRSV	filter	+	-	+	+	+	-	-	-	nd	nd
	filter, UVC	+	+	+	+	+	-	-	-	nd	nd
	filter, UVC, RHadj	+	+	+	+	-	-	nd	nd	nd	nd
PPV	filter	+	+	+	+	+	+	+	+	-	nd
	filter, UVC	+	+	+	+	+	+	+	+	-	nd
	filter, UVC, RHadj	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd

RHadj—adjusted relative humidity (66% \pm 0.6%)

nd—not determined

+ indicates bacterial/viral growth

- indicates no bacterial/viral growth

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.t003>

Table 4. Amount of total dust and bacteria obtained from air samplings.

Trial	Season	Week	No. of animals	Ventilation flow rate, UVC module (m ³ /h)	Total dust (mg/m ³ ± SD)		Total airborne bacteria (cfu/m ³ ± SD)	
					Barn 1 with UVC module	Barn 2 (Reference)	Barn 1 with UVC module	Barn 2 (Reference)
1	Spring	0	0	na	0.014 ^a	0.016 ^a	0 ^b	0 ^b
		1	10	na	0.341 ^a	0.586 ^a	56,000 ^b	290,000 ^b
		2*	10	416	0.599 ^a	0.477 ^a	93,000 ^b	46,000 ^b
		3*	10	409	0.288 ± 0.206	0.581 ± 0.105	38,000 ^b	140,000 ^b
	Summer	4*	10	385	0.485 ± 0.408	0.650 ± 0.126	48,000 ^b	110,000 ^b
		5*	10	341	0.380 ± 0.207	0.458 ± 0.353	92,000 ^b	320,000 ^b
		6	10	423	0.365 ± 0.003	0.131 ± 0.016	140,000 ^b	420,000 ^b
		7	10	359	0.172 ± 0.115	0.513 ± 0.401	430,000 ^b	750,000 ^b
		8	10	315	0.302 ± 0.130	0.367 ± 0.255	240,000 ^b	620,000 ^b
		9	10	357	0.282 ± 0.146	0.228 ± 0.243	1,300,000 ^b	1,100,000 ^b
		10	10	322	0.607 ± 0.301	0.230 ± 0.018	780,000 ^b	540,000 ^b
		11	10	366	0.610 ± 0.323	1.340 ± 0.156	1,000,000 ^b	310,000 ^b
		12	10	300	0.710 ± 0.595	0.879 ± 0.482	510,000 ± 42,400	570,000 ± 127,000
13	9	352	0.363 ± 0.263	0.738 ± 0.291	345,000 ± 63,600	820,000 ± 396,000		
2	Summer	0	0	0	0.010 ± 0.005	0.004 ± 0.001	84 ± 23	40 ± 13
	Autumn	1	11	405	0.468 ± 0.112	0.597 ± 0.144	287,000 ± 49,300	397,000 ± 130,000
		2	11	405	0.200 ± 0.103	0.545 ± 0.117	81,000 ± 26,200	297,000 ± 66,600
		3	11	357	0.295 ± 0.079	0.603 ± 0.186	73,700 ± 15,500	267,000 ± 102,000
		4	11	387	0.667 ± 0.243	0.530 ± 0.055	94,300 ± 41,800	200,000 ± 60,800
		5	11	402	0.548 ± 0.214	0.403 ± 0.113	91,700 ± 18,500	433,000 ± 222,000
		6	11	392	0.643 ± 0.064	0.865 ± 0.250	190,000 ± 62,400	1,060,000 ± 661,000
		7	11	394	0.672 ± 0.086	0.890 ± 0.249	187,000 ± 95,000	530,000 ± 303,000
		8	11	393	0.848 ± 0.198	0.845 ± 0.207	141,000 ± 58,500	433,000 ± 115,000
		9	11	402	0.999 ± 0.374	1.360 ± 0.262	190,000 ± 60,800	527,000 ± 246,000
		10	11	420	0.572 ± 0.369	1.757 ± 0.567	53,700 ± 37,200	1,000,000 ± 195,000
		11	11	392	0.817 ± 0.250	1.257 ± 0.176	217,000 ± 70,900	1,070,000 ± 405,000
		12	11	422	1.281 ± 0.401	1.042 ± 0.548	260,000 ± 161,000	557,000 ± 169,000
		13	11	383	1.327 ± 0.309	0.855 ± 0.699	250,000 ± 115,000	130,000 ± 98,900
	Winter	14	11	427	0.831 ± 0.485	1.437 ± 0.367	80,000 ± 36,100	217,000 ± 37,900
		15	11	441	1.440 ± 0.427	1.867 ± 0.540	460,000 ± 105,000	520,000 ± 504,000
16		11	456	1.320 ± 0.708	1.270 ± 0.480	410,000 ± 26,900	433,000 ± 90,700	

Measurements were taken weekly. The ventilation flow rate at the UVC module was read at the beginning of each sampling day. Total dust values (mean ± SD) were calculated from data collected by the DustTrak™ DRX Aerosol Monitor over 10 min. Total dust comprises particles ≤1 µm, ≤2.5 µm, respirable particles, and ≤10 µm. The amount of total bacteria represents the mean ± SD of measurements done at three sampling locations (indicated as yellow stars in Fig 2). UVC intensity was between 1,100 and 1,280 µW/cm². Seasons were defined according to the astronomical calendar: spring (21st March to 20th June), summer (21st June to 22nd September), autumn (23rd September to 21st December), winter (22nd December to 20th March).

na–Not applicable as the module had been installed the second week of the first trial.

*Climate control unit of the general ventilation system in barn 1 was defective.

^a During the first two weeks of trial 1, dust was measured only at one sampling location.

^b During the first trial, bacterial counts were measured only at one sampling location.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.t004>

(95% CI [61.3%,99.1%]), respectively, compared to the reference barn 2. These reductions were statistically significant (p = 0.0002 for bacteria and p = 0.04 for dust).

Measures taken in front of and behind the UVC module simultaneously (Table 5) revealed a reduction of 99.4% for airborne bacteria which is similar to the results at laboratory scale and 95.0% for total dust. UVC intensity determined inside the module adjacent to the air outlet ranged from 1,100 to 1,280 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Air velocity at the outlet was 1.10 m/s and 1.20 m/s on average in the first and second trial, respectively. Overall, concentrations of airborne bacteria determined at the height of the UVC module were lower compared to those measured at the sampling points within the barn.

Table 5. Amount of total dust and bacteria measured at the inlet and outlet of the UVC module in barn 1.

Trial	Season	Week	No. of animals	Ventilation flow rate, UVC module (m ³ /h)	Total dust (mg/m ³ ± SD)		Total airborne bacteria (cfu/m ³ ± SD)	
					in front of UVC module	behind UVC module	in front of UVC module	behind UVC module
1	Spring	0	0	na	na	na	na	na
		1	10	na	na	na	na	na
		2	10	416	0.222	0.060	78,000	10,000
		3	10	409	0.225	0.035	30,000	1,300
	Summer	4	10	385	0.361	0.026	42,000	530
		5	10	341	0.155	0.013	80,000	380
		6	10	423	0.436	0.013	130,000	560
		7	10	359	0.100	0.003	740,000	600
		8	10	315	0.398	0.004	270,000	580
		9	10	357	0.439	0.003	480,000	950
		10	10	322	0.378	0.003	280,000	950
		11	10	366	0.119	0.001	710,000	600
		12	10	300	0.266	0.001	110,000	490
13	9	352	0.354	0.009	190,000	1,000		
2	Summer	0	0	0	module set off	module set off	module set off	module set off
	Autumn	1	11	405	0.257	0.071	400,000	7,900
		2	11	405	0.217	0.047	120,000	540
		3	11	357	0.629	0.029	140,000	350
		4	11	387	0.502	0.035	170,000	1,000
		5	11	402	0.308	0.014	150,000	790
		6	11	392	0.215	0.010	110,000	1,400
		7	11	394	0.435	0.031	130,000	800
		8	11	393	0.449	0.014	150,000	1,200
		9	11	402	0.318	0.008	250,000	4,200
		10	11	420	0.533	0.010	71,000	1,000
		11	11	392	0.296	0.007	180,000	530
		12	11	422	0.637	0.014	580,000	700
		13	11	383	0.696	0.005	730,000	2,400
	Winter	14	11	427	0.387	0.004	110,000	610
		15	11	441	0.759	0.015	210,000	7,700
16		11	456	0.620	0.004	260,000	600	

Measurements were taken weekly. The ventilation flow rate at the UVC module was read at the beginning of each sampling day. Total dust values (mean ± SD) were calculated from data collected by the DustTrak™ DRX Aerosol Monitor over 10 min. Total dust comprises particles $\leq 1 \mu\text{m}$, $\leq 2.5 \mu\text{m}$, respirable particles, and $\leq 10 \mu\text{m}$. UVC intensity was between 1,100 and 1,280 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Seasons were defined according to the astronomical calendar: spring (21st March to 20th June), summer (21st June to 22nd September), autumn (23rd September to 21st December), winter (22nd December to 20th March).
na–Not applicable as the module had been installed in the second week of the first trial.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225047.t005>

Indoor temperature, relative humidity, CO₂, and NH₃

During the first trial, indoor temperature varied from 20.0°C to 32.8°C (mean of 24.3°C, barn 1) and from 16.8°C to 32.8°C (mean 23.3°C, barn 2), respectively. Relative humidity indoors ranged from 24.2% to 83.6% (mean 51.9%) in barn 1 and from 25.7% to 92.9% (mean 58.6%) in barn 2. The mean concentration of CO₂ was 1,029 ppm (738–1,325 ppm, barn 1) and 1,013 ppm (808–1,146 ppm, barn 2), respectively. Ammonia ranged from <2.0–6.2 ppm in barn 1 and <2.0–15.4 ppm in barn 2.

In the second trial, indoor temperature of barn 1 varied from 15.7°C to 28.6°C (mean 22.5°C) and was similar for barn 2 (17.5°C to 28.6°, mean 22.9°C). Relative humidity indoors ranged from 24.3% to 93.6% (mean 42.3%, barn 1) and from 25.4% to 85.9% (mean 43.1%, barn 2), respectively. The mean concentration of CO₂ was 1,144 ppm (792–1,718 ppm, barn 1) and 1,100 ppm (749–1,449 ppm, barn 2), respectively. Ammonia ranged from <2.0–9.6 ppm in barn 1 and <2.0–5.8 ppm in barn 2.

Animal health

Respiratory symptoms were not noticed during both trials of the study. In the last week of the first trial one animal had to be euthanized because of a non-healing hoof wound, which led to lameness, pain and a separation from the group. At daily check-ups we observed that animals kept in barn 1 (with UVC module) overall were more active compared to the animals in barn 2. Lung health determined after the first trial at slaughter revealed pneumonia in one pig from barn 2 (reference barn) and no signs of pulmonary disease in barn 1 (with UVC module). Lung health was not impaired in any pig from the second trial.

Discussion

Air filters are highly efficient in reducing pathogens at laboratory scale [6]. According to the manufacturer, the efficiency of the coarse dust filter used in this study was less than 50% at removing particles of <10 µm in diameter. Nevertheless, this filter reduced viruses by approximately 74% (PRRSV) and 79% (PPV) from air in our experimental setting. Tests with bacteria resulted in a reduction of 50% (APP) and 68% (*S. aureus*), respectively. These results suggest that coarse dust filters may not be suitable to minimize the risk of pathogen introduction via supply air. However, inside animal housings pathogens are mostly associated with dust particles which are easier to trap [34]. Moreover, dust bound to the filter matter will increase the filter retention efficiency over time to a certain degree. Higher numbers of APP passed the filter although APP is larger in size than viruses and *S. aureus*. This phenomenon has been described before [6] and yet remains unexplained. Using UVC irradiation in addition to the air filter resulted in a >99% to 100% reduction of viruses and bacteria. This is accordant to others although UVC intensity varied distinctly between our experiments and these studies [17,23,35]. This may be attributed to the single UVC measurement device in our study which was placed at least 160 mm underneath the UVC tubes and measured irradiance at the bottom of the test chamber. However, UVGI simulation revealed an average UVC intensity similar to the results measured by the UV-logger. The spatial distribution of UVC irradiation within the test chamber [17,36] and the effective radiation exposure on airborne pathogens could not be assessed using this device. Moreover, we were not able to determine the total irradiation exposure that a particle would receive during its passage through the test chamber, which must be seen as a major weakness of our study. In addition, the volume flow rate in our experiments was higher compared to studies described elsewhere, hence our results are contradictory to others which assumed that a higher ventilation rate leads to a shorter residence time which could decrease UVC effectiveness [17,23,36]. Our experiments demonstrated that UVC

irradiation solely was as effective as UVC combined to air filtration in our setting (i.e. two tubes of 842 mm in length, air filter test chamber with a dimension of 4.2 m length x 0.56 m height x 0.56 m width, volume flow rate 1,800 m³/h). Nevertheless, an upstream coarse dust filter seems favorable as it diminishes dust deposition on the UVC tubes which ensures adequate irradiation emission. Differences in susceptibility to UVC irradiation and reduction efficiency between grampositive (*S. aureus*) and gramnegative (APP) bacteria, as described elsewhere [17–18,37–40], were not observed. Survival of the pathogens in the filter matter was similar to our previous study [6] except for APP. APP is known to be susceptible to desiccation [41] and viability became undetectable within more than 30 min after the experiment. PPV remained infectious in the filter matter for at least four weeks and it has been described to persist for several months under favorable conditions outside the host [42].

It has been described that the number of microorganisms killed by UVC irradiation decreased when relative humidity increased [16–17,20,22,37,40,43]. This was not supported by our results which rather confirm the findings of Rentschler and Nagy (1940) [44] and Walker et al. (2007) [45] who described no effect of relative humidity on UVC impact. Interestingly, the higher RH resulted in an increased viability in the filter matter of *S. aureus* (at least two months) and APP (at least 4 h). After each experiment, filters were subsequently stored in plastic bags that prevented evaporation of the moist inside the filter matter which most likely supported survivability.

Concern has been raised that UVC-inactivation rates determined by culture might be influenced by the type of air sampler [17]. Our experiments used an air sampler pump, which implies less stress for bacteria compared to impingement, and water-soluble gelatin membrane filters [6]. The latter offer a high retention rate and protect sampled microorganisms from drying. Bacteria may also experience stress during aerosolization by collision nebulizers such as the ATM 230, possibly resulting in false high reduction efficiencies [6,46]. We calculated reduction rates from aerosolized pathogens sampled in front of and behind the air filter hence, pathogens in both samples were likewise impaired by aerosolization and retention. The effect of both might therefore be negligible. Moreover, aerosolized bacteria carry electric charges which play an important role when particles are collected on filters [47]. Devices for charge neutralization were not available for our study. Moreover, the filter could not be neutralized in an isopropanol vapor atmosphere to eliminate electrostatic charge [6].

High amounts of aerial pollutants including dust and microorganisms can pose serious health hazards to animals and humans [48–50]. Microbial pollutants and dust in confined pig housings mainly originate from animals (skin, feces), bedding, and feed. Reducing dust indoors will concomitantly reduce microorganisms associated to dust [48]. However, although it has been described that high dust levels in pig housings reduce pig performance, measures for dust reduction are not commonly implemented [9,34]. As a second part of the present study, the efficiency of UVC irradiation combined to recirculating air filtration in a small pig facility was evaluated. The number of airborne bacteria determined was within the range of other studies [12,14,48,50]. Under conditions of our study, a mean removal efficiency of 31.6% to 63% for airborne bacteria in barn 1 compared to the reference barn was achieved which supports findings of others [51,52]. However, this reduction was less than the results obtained for *S. aureus* and APP at laboratory scale. This can be explained by the varying UVC-sensitivity of different airborne bacterial species as has been described e.g. for spore-forming *Bacillus* species which can be frequently found in environmental samples [53]. We used similar air filtration modules without UVC in a previous study without a remarkable reduction of airborne bacteria [14], hence, the reduction efficiency achieved here cannot only be attributed to the additional six times air change of the air filtration module. Significantly lower bacterial numbers in barn 1 compared to the reference barn could only be achieved in the second trial. This might in part

be explained by the fact that the piglets in trial 1 were older at restocking compared to piglets in trial 2. Therefore, the fattening period was shorter (i.e. 13 weeks) and less data were collected compared to the second trial. The smaller number of measurements ($n = 12$) as compared to the second trial ($n = 16$) resulted in a higher inaccuracy of reduction estimates. Moreover, a moderate fly infestation had to be eradicated during the first trial. The movements of the flies may have raised settled dust into suspension thereby also increasing the number of airborne bacteria. In addition, the climate control unit within the general ventilation system of barn 1 was defective for four weeks (week 2 until week 4 as indicated in Table 4). There was not any noticeable effect during that time but the overall mean indoor temperature was slightly higher compared to barn 2 which might have had an influence on dust formation and airborne bacterial load.

With the UVC module in operation in-room, total dust concentrations in barn 1 were reduced by 13.5% to 22% which is less than others reported [10,52,54]. However, others used different air flow rates through the filter. It is known that, besides other factors, the air exchange rates strongly influence dust concentrations [12]. The ventilation rate in both barns was 1,200 m³/h (air exchange rate of approximately 17-fold/h) and the UVC module in barn 1 accounted for additional six times air exchange. The air flow patterns of supply air were visualized using artificial fog and revealed a laminar air flow which was not disturbed by the UVC module and vice versa. Nevertheless, the three sampling locations chosen might have been suboptimal with regard to spatial variability of airborne dust in animal housings [55]. We did not investigate on the latter aspect which can be seen as a weakness of our study. Moreover, dust deposition rates were reported to be quite high and largely contribute to dust clearance especially in housing with fully slatted floors [52]. This is probably the reason why recirculating air filtration only resulted in a remote reduction of dust compared to airborne bacteria [52]. In contrast to the results obtained by air samplings taken at height of the animals, measures taken in close proximity to the UVC module revealed an up to 99.5% reduction of bacteria. This is similar to findings of Schulz and coworkers who examined UV-irradiation combined to an air washer [12].

In both trials, lung health assessed after slaughter revealed no distinct differences between pigs of barn 1 (with UVC module) and pigs from barn 2 (reference barn). Although, previous investigations showed a positive impact on animal lung health in pig housings with recirculating air filtration [9,11,14], these findings could not be substantiated by our research. The main reason, and concurrently a major weakness of our study, might be the small number of animals used in our experimental setup which restricted a statistical evaluation on this subject. Concentrations of CO₂ and NH₃ were always below the threshold limit values recommended by German order [33].

The amount and nature of airborne dust and microorganisms affects pig and human health as well as animal performance [9,11,49]. Moreover, the emission of infectious microbes via bioaerosols is of significant concern for public and environmental health as high numbers of e.g. methicillin-resistant *S. aureus* have been found in air sampling from pig facilities [14,56]. Hence, the reduction of airborne dust and microorganisms in animal confinements will decrease the risk of harmful effects on animals and humans [9,50,57]. By doing so, the emission ratio of these pollutants will also decrease thereby enhancing environmental protection. Based on the German Federal Immission Control Act (BImSchG) legal guidelines for exhaust air purification have been established in some German Federal States depending on the type of livestock and number of animal places involved but exhaust air treatment is not commonly used in all pig confinements. Our results demonstrate, that indoor air filtration, especially when combined to UVC irradiation, can significantly reduce airborne bacteria and lowers dust burden indoors which further contributes to environmental protection.

Conclusion

We successfully demonstrated the effectiveness of air disinfection using UVC irradiation at laboratory scale with reduction efficiencies of >99% for certain viruses and bacteria. Moreover, combining UVC irradiation to recirculating air filtration proved to be successful in reducing airborne bacteria and dust in a small animal facility. The implementation of such devices might improve the overall environmental quality in animal facilities.

Supporting information

S1 File. UVGI simulation within the filter test chamber at a relative humidity of 20%. The upper left graph depicts a scheme of the filter test chamber and the positions of the two UVC tubes are given as blue lines. The colored graphs display the UVC intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) within the filter test chamber.

(PDF)

S2 File. UVGI simulation within the filter test chamber at a relative humidity of 66%. The upper left graph depicts a scheme of the filter test chamber and the positions of the two UVC tubes are given as blue lines. The colored graphs display the UVC intensity ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$) within the filter test chamber.

(PDF)

Acknowledgments

The authors want to thank D. Rüster and E. Brumme for their excellent help in the laboratory and M. Reinhardt for his indispensable help within the experiments in the animal housing and in the laboratory.

Author Contributions

Conceptualization: Tobias Reutter, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Data curation: Lisa Eisenlöffel, Simon Schlegel, Stephanie Speck.

Formal analysis: Lisa Eisenlöffel, Matthias Horn, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Funding acquisition: Tobias Reutter, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Investigation: Lisa Eisenlöffel, Stephanie Speck.

Methodology: Tobias Reutter, Matthias Horn, Simon Schlegel, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Project administration: Lisa Eisenlöffel, Tobias Reutter, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Software: Simon Schlegel.

Supervision: Tobias Reutter, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Validation: Tobias Reutter, Matthias Horn, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Visualization: Lisa Eisenlöffel, Simon Schlegel, Stephanie Speck.

Writing – original draft: Lisa Eisenlöffel, Tobias Reutter, Matthias Horn, Simon Schlegel, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

Writing – review & editing: Lisa Eisenlöffel, Tobias Reutter, Matthias Horn, Simon Schlegel, Uwe Truyen, Stephanie Speck.

References

1. Otake S, Dee S, Corzo C, Oliveira S, Deen J. Long-distance airborne transport of infectious PRRSV and *Mycoplasma hyopneumoniae* from a swine population infected with multiple viral variants. *Vet Microbiol.* 2010; 145: 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2010.03.028> PMID: 20418029
2. Gloster J, Champion HJ, Sørensen JH, Mikkelsen T, Ryall DB, Astrup P, et al. 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.* 2003; 152: 525–533. <https://doi.org/10.1136/vr.152.17.525> PMID: 12739601
3. de Rooij MM, Borlée F, Smit LA, de Bruin A, Janse I, Heederik DJ, Wouters IM. Detection of *Coxiella burnetii* in Ambient Air after a Large Q Fever Outbreak. *PLoS One.* 2016; 11(3): e0151281. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151281> PMID: 26991094
4. Stärk KDC, Nicolet J, Frey J. Detection of *Mycoplasma hyopneumoniae* by Air Sampling with a Nested PCR Assay. *Appl Environ Microbiol.* 1998; 64(2): 543–548. PMID: 9464391
5. Dee S, Batista L, Deen J, Pijoan C. Evaluation of an air-filtration system for preventing aerosol transmission of Porcine reproductive and respiratory syndrome virus. *Can J Vet Res.* 2005; 69: 293–298. PMID: 16479728
6. Wenke C, Pospiech J, Reutter T, Truyen U, Speck S. Efficiency of different air filter types for pig facilities at laboratory scale. *PLoS ONE.* 2017; 12(10): e0186558. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186558> PMID: 29028843
7. Dee S, Otake S, Deen J. 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.* 2010; 154: 177–184. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2010.07.022> PMID: 20667494
8. Spronk G, Otake S, Dee S. Prevention of PRRSV infection in large breeding herds using air filtration. *Vet Rec.* 2010; 166: 758–759. <https://doi.org/10.1136/vr.b4848> PMID: 20543168
9. Carpenter GA, Cooper AW, Wheeler GE. The effect of air filtration on air hygiene and pig performance in early-weaner accommodation. *Anim Prod.* 1986; 43: 505–515.
10. van't Klooster CE, Roelofs PFMM, den Hartog LA. Effect of filtration, vacuum cleaning and washing in pig houses on aerosol levels and pig performance. *Livest Prod Sci.* 1993; 33: 171–182.
11. Lau AK, Vizcarra AT, Lo KV, Luymes J. Recirculation of filtered air in pig barns. *Can Agr Eng.* 1996; 3: 297–304.
12. Schulz J, Bao E, Clauß M, Hartung J. The potential of a new air cleaner to reduce airborne microorganisms in pig house air: preliminary results. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr.* 2013; 126: 143–148. PMID: 23540197
13. Anthony TR, Altmaier R, Park JH, Peters TM. Modeled effectiveness of ventilation with contaminant control devices on indoor air quality in a swine farrowing facility. *J Occup Environ Hyg.* 2014; 11: 434–449. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.875186> PMID: 24433305
14. Wenke C, Pospiech J, Reutter T, Altmann B, Truyen U, Speck S. Impact of different supply air and recirculating air filtration systems on stable climate, animal health, and performance of fattening pigs in a commercial pig farm. *PLoS ONE.* 2018; 13(3): e0194641. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194641> PMID: 29558482
15. Hertel E. Ueber physiologische Wirkung von Strahlen verschiedener Wellenlänge. *Zeitschrift für allgemeine Physiologie* 1905; 5: 95–122.
16. Riley RL, Kaufman JE. Effect of Relative Humidity on the Inactivation of Airborne *Serratia marcescens* by Ultraviolet Radiation. *Appl Microbiol.* 1972; 23(6): 1113–1120. PMID: 4557562
17. Peccia J, Werth HM, Miller S, Hernandez M. Effects of Relative Humidity on the Ultraviolet Induced Inactivation of Airborne Bacteria. *Aerosol Sci Technol* 2001; 35: 728–740.
18. Ko G, First MW, Burge HA. The Characterization of Upper-Room Ultraviolet Germicidal Irradiation in Inactivating Airborne Microorganisms. *Environ Health Perspect* 2002; 110(1): 95–101. <https://doi.org/10.1289/ehp.0211095> PMID: 11781170
19. Menzies D, Popa J, Hanley JA, Rand T, Milton DK. Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: double-blind multiple crossover trial. *Lancet.* 2003; 362: 1785–1791. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(03\)14897-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)14897-0) PMID: 14654316
20. McDevitt JJ, Milton DK, Rudnick SN, First MW. Inactivation of Poxviruses by Upper-Room UVC Light in a Simulated Hospital Room Environment. *PLoS ONE.* 2008; 3(9): e3186. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003186> PMID: 18781204

21. Escombe AR, Moore DAJ, Gilman RH, Navincopa M, Ticona E, Mitchell B, et al. Upper-Room Ultraviolet Light and Negative Air Ionization to Prevent Tuberculosis Transmission. *PLoS Med.* 2009; 6(3): e1000043. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000043> PMID: 19296717
22. McDevitt JJ, Rudnick SN, Radonovich LJ. Aerosol Susceptibility of Influenza Virus to UVC Light. *Appl Environ Microbiol.* 2012; 78(6): 1666–1669. <https://doi.org/10.1128/AEM.06960-11> PMID: 22226954
23. Chang CW, Li SY, Huang SH, Huang CK, Chen YY, Chen CC. Effects of ultraviolet germicidal irradiation and swirling motion on airborne *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Legionella pneumophila* under various relative humidities. *Indoor Air.* 2012; 23: 74–84. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00793.x> PMID: 22680348
24. Seedorf J. Emissions of airborne dust and microorganisms. *Landtechnik* 2000; 2: 182–183.
25. Holtkamp DJ, Kliebenstein JB, Neumann EJ, Zimmerman JJ, Rotto HF, Yoder TK, et al. Assessment of the economic impact of porcine reproductive and respiratory syndrome virus on United States pork producers. *J Swine Health Prod.* 2013; 21(2): 72–84.
26. Morrison RB, Joo HS. Acute reproductive losses due to porcine parvovirus infection in a swine herd: herd observations and economic analysis of the losses. *Prev Vet Med.* 1984; 2: 699–706.
27. Parke CR and Burgess GW. An economic assessment of porcine parvovirus vaccination. *Aust Vet J.* 1993; 70: 177–180. <https://doi.org/10.1111/j.1751-0813.1993.tb06124.x> PMID: 8393655
28. Anonymus. DIN EN ISO 16890–1:2017–08. Air filters for general ventilation—Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM) (ISO 16890–1:2016); German version. Available from: <https://dx.doi.org/10.31030/2510899> Cited 07 June 2019.
29. Anonymus. EN 779:2012–10. Particulate air filters for general ventilation—Determination of the filtration performance; German version EN 779:2012. Available from: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-779/136851927> Cited 07 June 2019.
30. Appel MJG, Cooper BJ, Greisen H, Scott F, Carmichael LE. Canine viral enteritis. I. Status report on corona- and parvo-like viral enteritides. *Cornell Vet.* 1979; 69(3): 123–133. PMID: 223812
31. Spearman C. The method of “right and wrong cases” (“constant stimuli”) without Gauss’s formulae. *Br J Psychol.* 1908; 2: 227–242.
32. Kaerber G. Beitrag zur kollektiven Behandlung pharmakologischer Reihenversuche. *Arch Exp Pathol Pharm.* 1921; 162: 480–487.
33. Anonymus. Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung. 2001. Available from: <http://www.gesetze-im-internet.de/tierschutznutztv/TierSchNutzTV.pdf> Cited 07 June 2019.
34. Hartung J, Saleh M. Composition of dust and effects on animals. *Landbauforsch Volk.* 2007; 308: 111–116.
35. Green CF, Scarpino PV. The use of ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) in disinfection of airborne bacteria. *Environ Eng Policy* 2002; 3: 101–107.
36. Xu P, Peccia J, Fabian P, Martyny JW, Fennelly KP, Hernandez M, et al. Efficacy of ultraviolet germicidal irradiation of upper-room air in inactivating airborne bacterial spores, mycobacteria in full-scale studies. *Atmos Environ.* 2003; 37: 405–419.
37. Ko G, First MW, Burge HA. Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* BCG aerosols. *Tuber Lung Dis.* 2000; 80 (4/5): 217–228.
38. Hijnen WAM, Beerendonk EF, Medema GJ. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. *Water Res.* 2006, 40: 3–22. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.10.030> PMID: 16386286
39. Kowalski WJ, Bahnfleth WP, Witham DL, Severin BF, Whittam TS. Mathematical Modeling of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection. *Quant Microbiol.* 2000; 2: 249–270.
40. Lin CY, Li CS. Control Effectiveness of Ultraviolet Germicidal Irradiation on Bioaerosols. *Aerosol Sci Technol.* 2002; 36: 474–478.
41. Assavacheep P, Rycroft AN. Survival of *Actinobacillus pleuropneumoniae* outside the pig. *Res Vet Sci.* 2013; 94: 22–26. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2012.07.024> PMID: 22892250
42. Mengeling WL, Lager KM, Vorwald AC. The effect of porcine parvovirus and porcine reproductive and respiratory syndrome virus on porcine reproductive performance. *Anim Reprod Sci.* 2000; 60–61: 199–210. PMID: 10844195
43. Tseng CC, Li CS. Inactivation of Virus-Containing Aerosols by Ultraviolet Germicidal Irradiation. *Aerosol Sci Technol.* 2005; 39: 1136–1142.
44. Rentschler HC, Nagy R, Mouromseff G. Bactericidal Effect of Ultraviolet Radiation. *J Bacteriol.* 1941; 42: 745–774. PMID: 16560483

45. Walker CM, Ko G. Effect of Ultraviolet Germicidal Irradiation on Viral Aerosols. *Environ Sci Technol*. 2007; 41: 5460–5465. <https://doi.org/10.1021/es070056u>
46. Zhen H, Han T, Fennell DE, Gediminas M. Release of free DNA by membrane-impaired bacterial aerosols due to aerosolization and air sampling. *Appl Environ Microbiol*. 2013; 79: 7780±7789. <https://doi.org/10.1128/AEM.02859-13> PMID: 24096426.
47. Mainelis G, Willeke K, Baron P, Reponen T, Grinshpun SA, GoÅrmy RL, et al. Electrical charges on airborne microorganisms. *J Aerosol Sci*. 2001; 32: 1087±1110.
48. Seedorf J, Hartung J, Schröder M, Linkert KH, Pedersen S, Takai H, et al. Concentrations and emissions of airborne endotoxins and microorganisms in livestock buildings in Northern Europe. In: *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1998; Vol. 1, No. 70. pp. 97–109.
49. Pedersen S, Nonnenmann M, Rautiainen R, Demmers TGM, Banhazi T, Lyngbye M. Dust in pig buildings. *J Agric Saf Health*. 2000; 6: 261–274. PMID: 11217691
50. Chmielowiec-Korzeniowska A, Tymczyna L, Pyrz M, Trawińska B, Abramczyk K, Dobrowolska M. Occupational exposure level of pig facility workers to chemical and biological pollutants. *Ann Agric Environ Med*. 2018; 25(2):262–267. <https://doi.org/10.26444/aaem/78479> PMID: 29936814
51. Lau AK, Vizcarra AT, Lo KV, Luymes J. Recirculation of filtered air in pig barns. *Can Agr Eng*. 1996; 3: 297–304.
52. Carpenter GA, Fryer JT. Air filtration in a piggery: filter design and dust mass balance. *J Agric Engng Res*. 1990; 46: 171–186.
53. Terpstra FG, van 't Wout AB, Schuitemaker H, van Engelenburg FA, Dekkers DW, Verhaar R, et al. Potential and limitation of UVC irradiation for the inactivation of pathogens in platelet concentrates. *Transfusion*. 2008; 48: 304–313. <https://doi.org/10.1111/j.1537-2995.2007.01524.x> PMID: 18028277
54. Anthony TR, Altmaier R, Jones S, Gassman R, Park JH, Peters TM. Use of recirculating ventilation with dust filtration to improve wintertime air quality in a swine farrowing room. *J Occup Environ Hyg*. 2015; 12: 635–646. <https://doi.org/10.1080/15459624.2015.1029616> PMID: 25950713
55. Barber EM, Dawson JR, Battams VA, Nicol AC. Spatial variability of airborne and settled dust in a piggery. *J Agric Engng Res*. 1991; 50: 107–127.
56. Mubareka S, Groulx N, Savory E, Cutts T, Theriault S, Scott JA et al. Bioaerosols and Transmission, a Diverse and Growing Community of Practice. *Front Public Health*. 2019; 7: 23. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00023> PMID: 30847337
57. Donham KJ. Association of environmental air contaminants with diseases and productivity in swine. *Am J Vet Res*. 1991; 52: 1723–1730. PMID: 1767997

4 Diskussion

Mit dem Einsatz von Umluftfiltration in der Schweinehaltung konnten in verschiedenen Studien positive Einflüsse auf die Lungengesundheit und die Leistungsparameter der Tiere beobachtet werden. Dennoch stellt diese Technik in Tierbeständen eine Neuheit dar (ANTHONY et al. 2014, CARPENTER et al. 1986, LAU et al. 1996, WENKE et al. 2018). UVC-Strahlen sind kurzwellige Energien im Bereich zwischen 100-280 nm, deren keimtötender Effekt schon zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckt, bewiesen und erforscht wurde (ESCOMBE et al. 2009, HERTEL 1905, WELLS et al. 1942). Gegenstand der vorliegenden Arbeit war es, durch gezielte Kombination der beiden Technologien, Umluftfiltration und UVC-Strahlung, die Stallluft in einer Schweinehaltung hinsichtlich des Staub- und Keimgehaltes zu verbessern. Im ersten Teil der Studie wurde das Verfahren im Labormaßstab mit vier für die Schweinehaltung relevanten Erregern getestet und die Effizienz von UVC-Strahlung über Reduktionsraten für jeden der Keime ermittelt. Im zweiten Teil der Studie wurde ein UVC-Modul in ein Stallabteil des Tierversuchsstalls des Instituts für Tierhygiene und Öffentliches Veterinärwesen eingebaut. Über einen Zeitraum von zwei Mastperioden (1. Mastperiode: 13 Wochen; 2. Mastperiode: 16 Wochen) wurden die Auswirkungen des UVC-Moduls auf die Stallluftqualität (insbesondere bakterielle Lebendkeimzahl und Staubgehalt), die Tiergesundheit und auf Stallklimaparameter ermittelt. Ein separates Stallabteil erhielt keine zusätzliche Filtereinrichtung und diente als Referenzstall.

Der im Filterprüfstand unter Laborbedingungen getestete Grobstaub-Taschenfilter wurde vom Hersteller gemäß DIN EN ISO 16890 (ANONYM 2017) als ISO Coarse 50 % eingestuft. Die Filtereffizienz des von uns verwendeten Filters war demnach weniger als 50 % für Partikel, die eine Größe von unter 10 µm aufwiesen. Dennoch erzielten wir im Labormaßstab Abscheideraten von 74 % für PRRSV und 79 % für PPV. Bei Versuchen mit Bakterien wurden Abscheideraten von 50 % (APP) und 68 % (*S. aureus*) ermittelt. Obwohl APP morphologisch größer als *S. aureus* ist, war die Reduktionsrate für APP im Laborversuch niedriger. Das gleiche Phänomen wurde bereits in der vorhergehenden Studie von WENKE et al. (2017) beobachtet. Zur Erzeugung des infektiösen Aerosols wurden APP und *S. aureus* in einem Flüssignährmedium kultiviert. Staphylokokken besitzen die Eigenschaft in unregelmäßigen Bakterienhaufen zu liegen während APP als einzelne Stäbchen vorkommen. Somit ist es denkbar, dass die höhere Reduktionsrate für *S. aureus* durch diese morphologische Eigenschaft verursacht wurde.

Bei Versuchen im Filterprüfstand, bei denen UVC-Strahlung zur Anwendung kam, wurden Reduktionsraten von mehr als 99 % für Viren und bis zu 100 % für Bakterien erreicht. Die Ergebnisse zeigten deutlich, dass der Haupteffekt auf die UVC-Strahlung, und nicht auf den Filter, zurückzuführen war. Trotzdem ist der Einsatz eines Grobstaubfilters sinnvoll. Beim

Einsatz im Stall reduziert der Filter Staubpartikel in der Stallluft und dient folglich auch als Schutz der UVC-Röhren vor Staubablagerungen. Eine adäquate Wirkung der Strahlungsquelle auf vorbeiströmende Partikel kann so gewährleistet werden. Vergleicht man die ermittelten Reduktionsraten unserer Studie mit Werten aus ähnlich konzipierten Untersuchungen mit UVC-Strahlung, so findet man vergleichbare Ergebnisse (CHANG et al. 2012, GREEN und SCARPINO 2002, PECCIA et al. 2001, SCHULZ et al. 2013). Deutliche Unterschiede bestanden in der UVC-Intensität, die in den einzelnen Studien verwendet wurde. Die UVC-Strahlungsintensität wurde in unserer Studie mittels eines UV-Loggers gemessen. Dieser Logger befand sich ca. 16 cm mittig unterhalb der zwei UVC-Röhren, wobei er zu einer der Röhren einen geringeren Abstand als zur anderen aufwies. Letzteres ergab sich zwangsläufig aus dem Aufbau des Filterprüfstandes. Eine Strahlungs-Simulation des UVC-Röhren-Herstellers ergab ähnliche Strahlungsintensitäten, wie die von uns über den UV-Logger ermittelten Werte. Die räumliche Verteilung der UVC-Strahlen innerhalb des Filterprüfstandes konnte nicht geprüft werden. Weiterhin war es uns nicht möglich, die tatsächliche Einwirkzeit der UVC-Strahlung auf ein einzelnes Aerosolpartikel zu ermitteln, was als Schwachstelle der Studie betrachtet werden kann. Die Größe der Aerosolpartikel des Aerosol-Zerstäubers (ATM 230, Topas GmbH) kann nach Herstellerangaben auf 0,2 µm bis 1,0 µm geschätzt werden. Die Partikelgröße ist nicht zu vernachlässigen, da sie nachweislich Einfluss auf die desinfizierende Wirkintensität der UVC-Strahlen nimmt. Je größer das Partikel mit dem gebundenen Erreger, desto schwächer ist der mutagene Effekt der UVC-Strahlen (KETHLEY und BRANCH 1972, KO et al. 2000). Auch der Weg eines Partikels, sowie mögliche Verwirbelungen im Zuge des Zerstäubens und des Transportes durch den Filterprüfstand lassen sich nicht nachvollziehen. Daher lässt sich die tatsächliche Aufenthaltszeit eines Partikels im Filterprüfstand nicht ermitteln. Der Volumenstrom im Filterprüfstand betrug in unserer Studie 1.800 m³/h, welcher verglichen mit anderen Studien höher war (CHANG et al. 2012, PECCIA et al. 2001, XU et al. 2003). Dennoch erreichten wir ähnlich hohe Reduktionsraten. Unsere Ergebnisse widersprechen demnach bisherigen Erkenntnissen, welche beschreiben, dass bei einem höheren Volumenstrom die Einwirkzeit der UVC-Strahlen auf ein Partikel verkürzt wird und demnach eine herabgesetzte UVC-Wirkung zu erwarten ist (FIRST et al. 2007, PECCIA et al. 2001, XU et al. 2003).

Zur Überprüfung des Einflusses der rLF auf die keimschädigende Wirkung der UVC-Strahlen wurde in der vorliegenden Arbeit die rLF im Filterprüfstand mithilfe eines Luftbefeuchters auf ca. 65 % erhöht. Mehrere Studien berichten von einer steigenden Resistenz der Mikroorganismen gegenüber der keimschädigenden Wirkung der UVC-Strahlen bei einer höheren rLF (KO et al. 2000, LIN und LI 2002, McDEVITT et al. 2008, McDEVITT et al. 2012, PECCIA et al. 2001, RILEY und KAUFMAN 1972, TSENG und LI 2005). Im Gegensatz dazu konnten wir in unserer Studie keinen Einfluss der rLF auf die UVC-Wirkung feststellen. Damit

entsprechen unsere Erkenntnisse denen von RENTSCHLER und NAGY (1942), sowie von WALKER et al. (2007). Lediglich die Überlebensfähigkeit von *S. aureus* und APP im Filtermaterial wurde durch die erhöhte rLF verlängert. So konnte *S. aureus* noch zwei Monate nach der Versuchsdurchführung in Kulturmedium aus dem Filtermaterial angezüchtet werden. Die Überlebensfähigkeit von APP, welcher als anfällig gegenüber Austrocknung beschrieben wird (ASSAVACHEEP et al. 2013), erhöhte sich von 30 min auf vier Stunden nach den Versuchen mit erhöhter rLF. Die Filter wurden nach jedem Versuch einzeln in Plastiktüten bei Raumtemperatur gelagert. Die Restfeuchtigkeit, die im Filtermaterial zurückblieb, konnte nicht Verdampfen und trug mit hoher Wahrscheinlichkeit positiv zur Überlebensfähigkeit der Keime bei. Ansonsten glichen die Ergebnisse zur Überlebensfähigkeit der Pathogene im Filtermaterial denen der vorhergehenden Studie von WENKE et al. (2017). PPV wird als sehr widerstandsfähig beschrieben und kann unter günstigen Bedingungen bis zu sechs Monate außerhalb eines Wirtes überleben (MENGELING et al. 2000). Zur Überlebensfähigkeit von PPV im Filtermaterial ließ sich feststellen, dass bis vier Wochen nach dem Versuch Infektiosität nachweisbar war. In den nach zwei Monaten genommenen Proben war das Virus nicht mehr vermehrungsfähig.

Einen weiteren Einfluss auf die Wirkung der UVC-Strahlung hat die individuelle Anfälligkeit von Mikroorganismen. So berichten HIJNEN et al. (2006), dass Bakterien empfindlicher auf UVC-Strahlen reagieren als Viren. In unseren Untersuchungen waren die Unterschiede in der Reduktion von Viren und Bakterien durch die UVC-Strahlung gering. Die Abscheideraten lagen in allen Versuchen über 99 %. Unterschiede zwischen der Anfälligkeit grampositiver und gramnegativer Bakterien gegenüber UVC-Strahlen, die in anderen Studien beschrieben wurden, konnten in unseren Versuchen nicht beobachtet werden (HIJNEN et al. 2006, KO et al. 2000, KO et al. 2002, KOWALSKI et al. 2000, LIN und LI 2002, PECCIA et al. 2001).

Bei der Herstellung von Aerosolen mit einem Kollisionszerstäuber ändern Bakterien im Zuge des Vernebelungs-Prozesses durch starke Scherkräfte ihre elektrische Ladung. Das Ausmaß dieses physikalischen Stresses, dem die Bakterien ausgesetzt werden, hängt vom Umfang der elektrischen Ladungsänderung ab. Die elektrische Ladung ist demnach ein Indikator für mechanischen Stress, der beim Aerosolisieren entsteht und der zu einem Verlust der Lebensfähigkeit von Bakterien führen kann (HEIDELBERG et al. 1997, MAINELIS et al. 2001). Weiterhin spielt die elektrische Ladung beim Abscheiden von Partikeln in Filtermaterialien eine entscheidende Rolle (MAINELIS et al. 2001). Die Reduktionsraten wurden ermittelt, indem Luftproben der vernebelten Keime vor dem Filter und nach dem Filter entnommen wurden. Das heißt, dass die Keime in beiden Proben gleichermaßen von den Auswirkungen des Aerosolisierens betroffen waren und eine mögliche Beeinflussung der Ergebnisse durch den Aerosolisierungs-Prozess als gering bewertet werden kann. MAINELIS et al. (2001)

beobachteten, dass gramnegative Bakterien durch den Kollisionszerstäuber anfälliger auf mechanischen Stress reagierten als grampositive Bakterien. Die DIN EN ISO 16890 gibt bei der Prüfung und Klassifizierung neuer Filter vor, die Filtermaterialien mit Isopropanol zu behandeln, um eine elektrische Neutralität der Fasern zu gewährleisten. Die nötigen Geräte für solch eine Neutralisation standen uns nicht zur Verfügung und hätten den finanziellen Rahmen der Studie gesprengt. Außerdem ist zu bedenken, dass die Viabilität der Keime durch Isopropanol-Reste ebenfalls beeinträchtigt werden könnte. Wir können daher die Auswirkungen der elektrischen Ladungsänderung auf die Filtereffizienz im Zuge des Vernebelns der Keimsuspensionen nicht einschätzen. Dies kann als eine Schwäche der vorliegenden Arbeit angesehen werden.

Die Art der Probennahme kann ebenfalls einen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse haben (PECCIA et al. 2001, THORNE et al. 1992). Es gibt keine Sammelmethode, die allen Anforderungen gerecht wird und alle Ziele erfüllt (COX 1987). Im Laborversuch wurden die Proben mithilfe einer Luftsammelpumpe und wasserlöslichen Gelatinefiltern gesammelt, da beschrieben wurde, dass Mikroorganismen durch diese Sammelmethode vor Stress durch Austrocknung geschützt werden (WENKE et al. 2017). Da wir in allen Versuchsdurchläufen ohne UVC-Strahlung hohe Wiederfindungsraten der Pathogene beobachten konnten, sind falsch hohe Reduktionsraten aufgrund der Probennahme auszuschließen.

Für Menschen, die in tierhaltenden Betrieben arbeiten, als auch für die Tiere selbst, stellen hohe Luftschadstoff-Mengen eine ernsthafte Gefahr für die Gesundheit dar (COSTA und DOMENEGHINI 2018, POPE et al. 2002, RADON et al. 2001). Der Stallstaub in Tierhaltungen stammt hauptsächlich von den Tieren selbst (Haut, Fäkalien), sowie von der Einstreu und den Futtermitteln (SEEDORF et al. 1998, SEEDORF 2000). Da sich Mikroorganismen als Cluster an Staub gebunden in der Luft befinden, führt eine Reduzierung des Staubgehaltes im Stallinneren gleichzeitig zu einer Reduktion dieser Mikroorganismen (SEEDORF et al. 1998). Obwohl beschrieben wurde, dass hohe Staubgehalte der Stallluft in Schweinehaltungen zu Leistungseinbußen der Tiere führen, werden Maßnahmen zur Staubreduzierung bisher kaum umgesetzt (CARPENTER et al. 1986, HARTUNG und SALEH 2007). In der vorliegenden Studie wurde ein Umluftfiltersystem mit nachfolgender UVC-Einheit in einem kleinen Versuchstierstall in zwei Versuchsdurchläufen getestet. Vergleicht man die von uns ermittelten Bakterien-Konzentrationen in der Stallluft unseres Referenzstalles ohne UVC-Modul (Stall 2), so stellt man fest, dass sie sich mit den Angaben anderer Studien decken (SCHULZ et al. 2013, SEEDORF et al. 1998, WENKE et al. 2018). WENKE et al. (2018), die in einer vorhergehenden Feldstudie ähnliche Filter-Systeme testeten, konnten allein durch Umluftfiltration keine nennenswerte Reduktion der Bakterienmenge in der Stallluft beobachten. Mit den vorherrschenden Bedingungen in unserer Studie ergab sich mithilfe des UVC-Moduls,

das aus einem Taschen-Grobstaubfilter, einem Axialventilator und vier UVC-Röhren aufgebaut war, eine durchschnittliche Reduktion der luftgetragenen Bakterien im umluftfiltrierten und UVC-behandelten Stall (Stall 1) von 31,6 % bis 63 % im Gegensatz zum Bakteriengehalt der Stallluft im unbehandelten Referenzstall (Stall 2). Die von uns beobachteten Reduktionen der Bakterienmenge der Stallluft im Stall mit UVC-Modul lassen sich nur durch die keimschädigende Wirkung der UVC-Strahlung erklären. Im ersten Versuchsdurchlauf wurde aufgrund einiger bestehender Schwierigkeiten, auf die später näher eingegangen wird, nur eine geringe Reduktion der Bakterienmenge der Stallluft des Stalls mit UVC-Modul (Stall 1) im Vergleich zum Referenzstall erreicht. Im zweiten Versuchsdurchlauf war es jedoch möglich den Bakteriengehalt der Stallluft des Stall 1 (mit UVC-Modul) signifikant zu reduzieren. Dass die Reduktionsrate dennoch geringer als im Labormaßstab ausfiel, lässt sich dadurch erklären, dass die Stallluft hinsichtlich der Mikroorganismen anders zusammengesetzt ist. Sporenbildende Bakterien, wie beispielsweise Vertreter der Gattung *Bacillus*, werden häufig in Umweltproben nachgewiesen und konnten auch in unseren Stallluft-Proben nachgewiesen werden (TERPSTRA et al. 2008). Sie gelten als resistenter gegenüber einer Inaktivierung durch UVC-Strahlung (KOWALSKI 2009). Auch die Lufttemperatur kann die keimschädigende Wirkung der UVC-Strahlung beeinflussen. Es ist beschrieben, dass sich hohe Temperaturen negativ auf die Konvektion der Luft und somit sowohl auf die Luftwechselrate, als auch auf die vertikale Durchmischung der Luft auswirken (RILEY et al. 1971). RILEY et al. (1971) testeten den Einfluss kalter bzw. warmer einströmender Luft auf den Desinfektionserfolg luftgetragener Keime durch UV-Strahlung. Dabei stellten sie fest, dass Mikroorganismen fast doppelt so schnell inaktiviert wurden, wenn kalte Luft in den Raum einströmte. Auch die Luftwechselrate war bei kalter einströmender Luft um ein Vielfaches größer. Die Ursache dieser Feststellungen sehen die Autoren im hohen Temperaturgefälle, das die Durchmischung der Luft des Raumes entweder begünstigt oder hemmt. Im ersten Versuchsdurchlauf fiel die Klimaanlage im Stall mit dem UVC-Modul (Stall 1) aus und war für vier Wochen defekt. Dies führte zu einer durchschnittlich höheren Stalltemperatur in diesem Stallabteil im Vergleich zum Referenzstall (Stall 2), bei dem die Klimaanlage während des gesamten Versuches funktionstüchtig war. Wir konnten nur im zweiten Versuchsdurchlauf eine signifikant geringere Bakterienmenge in der Stallluft des Stalls mit UVC-Modul (Stall 1), verglichen mit der Bakterienmenge des Referenzstalls ohne UVC-Modul (Stall 2), demonstrieren. Es ist möglich, dass die durchschnittlich höhere Lufttemperatur in Stall 1 (mit UVC-Modul) während des ersten Versuchsdurchlaufs dazu geführt hat, dass sowohl die Luftwechselrate, als auch die vertikale Durchmischung der Stallluft in diesem Stallabteil beeinträchtigt wurden. Das wiederum könnte im ersten Versuchsdurchlauf die abgeschwächte Wirkung der UVC-Strahlen und die damit einhergehende geringere Reduktionsrate der Bakterienmenge der Stallluft in Stall 1 (mit UVC-Modul), verglichen mit den Reduktionsraten des zweiten Versuchsdurchlaufs, erklären. Bei

den Messungen der Bakterienmenge der Stallluft direkt am UVC-Modul (siehe Abbildung 4 der Veröffentlichung) konnte, im Gegensatz zu Luftkeimmessungen, die auf Höhe der Schweine durchgeführt wurden, eine Reduktion der Bakterien um bis zu 99,5 % gemessen werden. Auch SCHULZ et al. (2013) erzielten ähnliche Reduktionsraten durch UVC-Strahlung, die mit einem Luftwäscher kombiniert wurde.

Gemäß Empfehlungen zur Luftprobennahme in Tierbeständen wird das Verwenden eines Zyklon-Sammlers empfohlen, da er einen effizienten Luftdurchsatz besitzt und Langzeitmessungen ermöglicht (WATHES und RANDALL 1989). Außerdem werden die Mikroorganismen nur einem geringen Stress ausgesetzt (WATHES und RANDALL 1989). Im Rahmen des Stallversuches wurde ein Luftkeimsammler zur Ermittlung des Bakteriengehaltes der Stallluft eingesetzt, der mit der Zyklon-Technik arbeitete. Die Proben wurden unmittelbar nach den Messungen im Labor weiterverarbeitet. Von einem Viabilitätsverlust der Bakterien von der Probennahme bis hin zur Weiterverarbeitung im Labor ist nicht auszugehen. Für jede Probennahmestelle wurde ein neuer steriler Probenbehälter verwendet und die Sammelaufsätze des Gerätes zwischendesinfiziert, um eine Kontamination der Probe durch die vorhergehende Messung auszuschließen.

Verglichen mit der Lebendkeimzahl wurde die Gesamtstaubmenge durch das UVC-Modul nur um durchschnittlich 13,5 % bis 22 % reduziert. Diese Reduktionsrate ist geringer, als andere Studien berichteten (ANTHONY et al. 2015, CARPENTER und FREYER 1990, VAN'T KLOOSTER et al. 1993). Ein möglicher Grund hierfür liegt in der Ventilationsrate, die bei unserem Versuch in beiden Stallabteilen 1.200 m³/h betrug und im Vergleich zu anderen Studien um ein Vielfaches geringer war (SCHULZ et al. 2013). Nachweislich hat die Ventilationsrate, neben anderen Faktoren, einen Einfluss auf die Staubkonzentration der Stallluft (GUINGAND 1999, SEEDORF und HARTUNG 2002). Die Ventilationsrate bestimmt zudem die Luftwechselrate eines Raumes und wird in „air changes per hour“ (ACH) angegeben. Sie beschreibt, wie oft das gesamte Luftvolumen eines Raumes in einer Stunde durch Frischluft ausgetauscht wird. Die in unserer Studie gegebene Ventilationsrate sorgte in beiden Ställen für eine Luftwechselrate von 17 ACH. Das UVC-Modul sorgte in Stall 1 für eine zusätzliche Luftwechselrate von 6 ACH, die der Referenzstall (Stall 2) ohne UVC-Modul nicht hatte.

Um die Luftströmungen im Stall und die Verteilung der Luft nachvollziehen zu können, wurde künstlicher schwarzgefärbter Nebel vor die Einlass-Stutzen der Zuluft und vor den Taschenfilter des UVC-Moduls erzeugt. In der subjektiven Wahrnehmung stellte sich ein laminarer Luftstrom dar, der den Nebel im ganzen Raum gleichmäßig verteilte. Das UVC-Modul schien zu keinen turbulenten Verwirbelungen des Luftstroms zu führen. Es wurde allerdings beschrieben, dass die Lüftungsart, sowie die Positionen der Zu- und Abluftschächte einen signifikanten Einfluss auf die vertikale Durchmischung der Luft haben können (KO et al.

2002). Die vier Einlass-Ventile der Zuluft befanden sich in unseren beiden Stallabteilen im Deckenbereich der Wand der Stallaußenseite. Gegenüber befanden sich vier Abluftstutzen auf Höhe der Tiere hinter einer Trennwand an der Stallmittelwand, die die beiden Stallabteile voneinander trennte. Der Auslass des UVC-Moduls befand sich ca. 1 m unterhalb der Stalldecke und war horizontal zum Luftstrom der Zu- und Abluft ausgerichtet. Die Statik des Stallgebäudes limitierte uns in der Auswahl der Platzierung und der Befestigung des UVC-Moduls. Die Position und die Ausrichtung des UVC-Moduls können die Ergebnisse der Staub- und Bakterienreduktionen der Stallluft beeinflusst haben. Das UVC-Modul saugte die Luft erst in ca. 2 m Höhe ein. Da Staub in Ställen hauptsächlich von den Tieren selbst, sowie von den Fäkalien und dem Futter stammt, wird der Staub vorwiegend in der Nähe des Bodens produziert. Möglicherweise war der Anteil des Staubes höher, der durch Staubsedimentation aus der Luft abgereinigt wurde, als wir annahmen. Besonders in Schweinehaltungen mit Vollspaltenböden, wie es bei unserer Studie der Fall war, wurde der Anteil von Staub, der sedimentiert, als hoch beschrieben (CARPENTER und FRYER 1990). Es ist uns nicht möglich den Anteil des Stallstaubes, der sedimentierte und folglich nicht über Luftproben erfasst werden konnte, einzuschätzen. Sedimentation kann dazu beigetragen haben, dass die Reduktionsrate des Staubes durch Umluftfiltration, verglichen zur hohen Reduktionsrate für Bakterien, verhältnismäßig gering ausfiel (CARPENTER und FRYER 1990). Womöglich hätte eine andere Position oder Ausrichtung des UVC-Moduls zu höheren Reduktionsraten führen können.

Zum Sammeln von Luftproben wird empfohlen mehrere verschiedene Messpunkte zu wählen, die sich zum einen auf Tierhöhe befinden und die zum anderen das Verhalten der Tiere und deren Aktivitätsstatus repräsentieren (SMITH et al. 1993, STÄRK 1999). Für unsere Messungen des Staub- und des Bakteriengehaltes der Stallluft wählten wir drei Messpunkte auf der Höhe der Tiere und zwei zusätzliche Messpunkte unmittelbar am Ein- und Auslass des UVC-Moduls. Während die Messungen liefen, wurde der Stall vom Personal verlassen, um zu vermeiden, dass zusätzliche Bewegungen zu einem vermehrten Aufwirbeln von Staub sorgten. Außerdem wurde darauf geachtet die Messungen nicht unmittelbar nach Fütterungszeiten durchzuführen, um dadurch bedingte falsch hohe Staub- und Keimwerte zu verhindern. Denn sowohl die Art der Fütterung, als auch die erhöhte Aktivität der Tiere während des Fressvorgangs sorgen für eine Staubaufwirbelung und beeinflussen daher die Staubkonzentration der Stallluft (SEEDORF 2000). Es ist beschrieben, dass Betriebe, in denen trockenes Futter verwendet wird, höhere Staubmengen aufweisen, als Betriebe, die flüssiges Futter verwenden (GUINGAND 1999). Die Schweine in unserem Versuch bekamen trockenes Pelletfutter. Die Ergebnisse der Staub- und Keimmessungen können sowohl von der Wahl der Messpunkte, als auch von der Fütterungsart beeinflusst worden sein. Beides wurde allerdings

so gewählt, dass sie ein repräsentatives Abbild der Staub- und Keimbelastung in einem kommerziellen Schweinebetrieb widerspiegeln können.

Bei dem Einsatz eines Grobstaubfilters als Umluftfilter, wie der in dieser Studie getestet, erhöht sich die Filtereffizienz, je länger er im Einsatz ist und umso mehr Staubpartikel sich im Filtermaterial bereits abgelagert haben – man spricht von der Bildung eines Filterkuchens. Zu Beginn der Staubmessungen im Stallversuch war noch kein Filterkuchen vorhanden, sodass davon auszugehen ist, dass in den ersten Wochen der Messungen der Großteil der Staubpartikel den Filter durchdringen konnte. Der Grobstaubfilter steigerte erst mit der Zeit und mit Bildung des Filterkuchens seine Abscheideeffizienz. Der Einsatz eines Grobstaubfilters, wie der von uns genutzte, kann ein Grund für die geringen Reduktionsraten des Staubgehaltes der Stallluft in unserem Stallversuch sein, da Filter dieser Filterklasse vorwiegend als Vorfilter eingesetzt werden. HEPA- bzw. ULPA-Filter, die eine deutlich höhere Abscheiderate für Mikroorganismen und Staub aufweisen, sind aufgrund des hohen Staubgehaltes der Stallluft nicht praktikabel, da sie zu schnell verstopfen würden. Außerdem wurden die Kosten des Einbaus von HEPA-Filter in einem kommerziellen Schweinebestand auf 1.500 ± 2.000 \$ pro Eber/Sau kalkuliert (BATISTA et al. 2009). WENKE et al. (2018) demonstrierten in einer Studie, in der mehrere Filter getestet wurden, dass es für den Einsatz in der Nutztierhaltung kostengünstigere und praktikablere Alternativen zu HEPA-Filtern gibt, die zu einer effizienten Abscheidung von Staub im Schweinestall eingesetzt werden können.

Nach beiden Versuchsdurchläufen wurden die Schweine geschlachtet und die Lungengesundheit während der Schlachttieruntersuchung beurteilt. Die Lungengesundheit der Schweine aus Stall 1 (mit UVC-Modul) wurde mit der Lungengesundheit der Schweine aus dem Referenzstall (Stall 2) verglichen. Es ergaben sich keine signifikanten Unterschiede, obwohl bereits mehrere Untersuchungen zeigen konnten, dass sich der Einsatz von Umluftfiltration in der Schweinehaltung positiv auf die Lungengesundheit auswirkte (CARPENTER et al. 1986, LAU et al. 1996, WENKE et al. 2018). Der Hauptgrund liegt höchstwahrscheinlich in der geringen Anzahl von Tieren, die in unsere Studie eingebunden waren (Versuchsdurchlauf 1: 10 Tiere pro Stallabteil, Versuchsdurchlauf 2: 11 Tiere pro Stallabteil). Die Anzahl der Tiere ergab sich aus der Größe des Versuchstierstalls. Durch die relativ kleine Tieranzahl war eine statistische Auswertung der Daten nur eingeschränkt möglich. Die Messung der Schadgaskonzentrationen in beiden Ställen ergab, dass keine Überschreitungen der empfohlenen Grenzwerte der Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzV) auftraten. Die Empfehlung sieht vor 3000 ppm für CO₂ und 20 ppm für NH₃ nicht zu überschreiten. Daher ist davon auszugehen, dass weder die Lungengesundheit, noch die Leistung der Tiere von den genannten Schadgasen in unserem Versuch beeinträchtigt wurden.

Die Menge, als auch die Zusammensetzung von Stäuben und Mikroorganismen in der Stallluft von Schweinebeständen haben Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier, sowie auf die Tierleistung (CARPENTER et al. 1986, LAU et al. 1996, PEDERSEN et al. 2000). Weiterhin stellt die Emission infektiöser Mikroorganismen, verbreitet über Bioaerosole, eine ernstzunehmende Angelegenheit für die öffentliche Gesundheit und den Umweltschutz dar. So konnten man Methicillin-resistente *S. aureus* (MRSA) nicht nur im Stall selbst, sondern auch in der Luft, sowie auf dem Boden der unmittelbaren Umgebung von Schweineställen isolieren (SCHULZ et al. 2012). Das zeigt, dass sich Erreger mit zoonotischem Potenzial aus der Tierhaltung über den Luftweg aus dem Stall in der Umwelt verbreiten können. Eine Reduktion der Staub- und Keimmenge der Stallluft in Nutztierbeständen verringert gleichzeitig die schädliche Wirkung, die diese auf die Gesundheit von Mensch und Tier haben kann (CARPENTER et al. 1986, CHMIELOWIEC-KORZENIOWSKA et al. 2018). Zusätzlich nimmt der Umfang der Emission dieser gesundheitsschädlichen Schadstoffe bei einer Reduktion der Staub- und Keimmenge im Stallinneren ab, was den Umweltschutz verstärkt. Aufgrund des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) existieren in manchen deutschen Bundesländern, wie Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen, rechtliche Vorschriften, die vorgeben, dass die Abluft von Tierbeständen, abhängig von Art der Tierhaltung und Anzahl der Tiere, einer Reinigung zu unterziehen ist (ANONYM 2016). Dennoch wird die Abluft-Reinigung von Schweinebeständen noch nicht flächendeckend umgesetzt. Wir konnten mit unserer Studie erfolgreich demonstrieren, dass Umluftfiltration, insbesondere in Kombination mit UVC-Strahlung, die Bakterienmenge der Stallluft im Stallinneren signifikant verringern und den Staubgehalt der Stallluft senken konnte. Die von uns getestete Technologie kann daher auch einen positiven Beitrag zum Schutz der Umwelt in der Umgebung von Tierbeständen leisten.

Im ersten Versuchsdurchlauf wurden wir mit einigen Problemen konfrontiert, die dazu führten, dass keine optimalen Bedingungen für die von uns angewandte Technik herrschten. Zum einen waren die Ferkel beim Umställen einige Wochen älter als die Ferkel des zweiten Durchlaufs. Das hatte zur Folge, dass im ersten Durchlauf weniger Messreihen und Daten gesammelt werden konnten (1. Durchlauf: 12 Messungen; 2. Durchlauf: 16 Messungen). Eine dadurch bedingte höhere Ungenauigkeit beim Auswerten der Reduktionsraten ist nicht sicher auszuschließen. Außerdem fiel die Klimaanlage als Teil der Lüftungsanlage im Stall mit dem UVC-Modul (Stall 1) für vier Wochen aus. Der Ausfall führte zu einer durchschnittlich erhöhten Stalltemperatur in diesem Stallabteil im Vergleich zum Referenzstall, bei dem es keinen Ausfall der Klimaanlage gab. Darüber hinaus verzeichneten wir im ersten Versuchsdurchlauf einen starken Fliegenbefall. Die Summe der Bewegungen der Fliegen könnte zu einem vermehrten Aufwirbeln von bereits sedimentiertem Staub und somit auch von Bakterien geführt haben. Trotz der Schwierigkeiten, mit denen wir im ersten Versuchsdurchlauf konfrontiert wurden,

konnten wir im zweiten Versuchsdurchlauf im gefilterten und UVC-behandelten Stall (Stall 1) signifikant geringere Bakterienmengen in der Stallluft erreichen und die Funktionstüchtigkeit der von uns genutzten UVC-Umluftfiltrations-Technologie erfolgreich demonstrieren.

In unseren Laborversuchen erreichten wir Reduktionen von über 99 % für ausgewählte Viren und Bakterien, indem wir UVC-Strahlung zur Luft-Desinfektion einsetzten. Des Weiteren erwies sich UVC-Strahlung kombiniert mit Umluftfiltration als erfolgreiche Technologie, um Bakterien- und Staubgehalte der Stallluft in einem kleinen Schweinebestand zu reduzieren. Der Einbau solcher Umluftfilter-UVC-Module kann folglich die Qualität des Umfeldes für Mensch und Tier in Nutztierhaltungen verbessern.

5 Zusammenfassung

Lisa Eisenlöffel

Reduzierung der Keim- und Staubbelastung der Stallluft in der Schweinehaltung mit UVC-kombinierter Umluftfiltration

Institut für Tierhygiene und Öffentliches Veterinärwesen, Veterinärmedizinische Fakultät, Universität Leipzig

Eingereicht im Juli 2021

54 Seiten, 249 Quellenangaben, 2 Abbildungen

Schlüsselwörter: Luftfiltration, Staub, Bakterien, Aerosole, UVC, luftgetragene Pathogene, Schwein

Einleitung: Einige Krankheitserreger, die für hohe wirtschaftliche Verluste in der Schweineindustrie sorgen, können über mehrere Kilometer über die Luft übertragen werden. Staub und daran gebundene Mikroorganismen können sowohl bei Tieren, als auch bei Menschen, die in der Landwirtschaft arbeiten, zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen. Um den aerogenen Erregereintrag und die Belastung der Gesundheit durch Stallstaub zu reduzieren, können Filtertechniken, wie Umluftfiltration, zum Einsatz kommen. In mehreren Studien konnte beim Einsatz von Umluftfiltration im Schweinestall ein positiver Einfluss auf die Lungengesundheit der Tiere verzeichnet werden. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend, war es Gegenstand dieser Arbeit die positiven Effekte der Umluftfiltration mit der keimtötenden Wirkung von UVC-Strahlen zu kombinieren und somit den Keimgehalt der Stallluft zu reduzieren.

Ziel der Untersuchung: Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die Effizienz von UVC-kombinierter Umluftfiltration hinsichtlich der Reduktionsrate luftgetragener Mikroorganismen im Labormaßstab zu untersuchen. Im zweiten Teil der Studie wurde ein UVC-Umluftfiltermodul in einen kleinen Stall integriert, um dessen Einfluss auf die Qualität der Stallluft bzw. auf die Staub- und Bakterienmenge im Vergleich zu einem Referenzstall zu überprüfen.

Material und Methoden: Für Testdurchläufe im Labormaßstab wurden Aerosole mit *Staphylococcus aureus*, *Actinobacillus pleuropneumoniae*, dem Virus des seuchenhaften Spätaborts (PRRSV) und dem Porcinen Parvovirus (PPV) erzeugt. In einem Luftfilterprüfstand wurden mit jedem Erreger je fünf unabhängige Testläufe mit und ohne UVC-Bestrahlung durchgeführt. Bei einigen Testdurchläufen wurde die relative Luftfeuchtigkeit (rLF) verändert, um den Einfluss einer erhöhten rLF auf die UVC-Wirksamkeit zu bewerten. Die Reduktionsrate entsprach der Differenz der infektiösen Partikel gemessen vor dem Luftfilter und hinter dem Luftfilter. Um das

Überleben von Krankheitserregern im Filtermaterial zu untersuchen, wurden die Filter in getrennten Plastiktüten aufbewahrt. Nach bestimmten Zeitintervallen wurden Filterproben entnommen, gepoolt und inkubiert. Es folgte eine Virustitration bzw. eine Zählung der Bakterien. Die Feldstudie fand in einem kleinen Instituts-eigenen Stall statt, der aus zwei getrennten Stallabteilen bestand. Es wurden wöchentlich Luftmessungen über einen Zeitraum von 13 Wochen bzw. 16 Wochen in jedem Stallabteil durchgeführt. Die Staub- und Bakterienmenge der Stallluft wurde an drei verschiedenen Probennahmestellen gemessen. Zusätzlich wurden Luft-Proben direkt vor und hinter dem UVC-Modul entnommen. Weiterhin wurde die Ammoniak- und CO₂-Konzentration, sowie Temperatur und rLF aufgezeichnet. Die Reduktionsraten der Staub- und Bakterienmenge der Stallluft wurde durch Berechnung der Werteverhältnisse (Ratios) der Messwerte aus Stall 1 (UVC-Modul) verglichen zu Stall 2 (Referenzstall) bestimmt. Ratios kleiner als eins entsprachen einer relativen Verringerung der Bakterienzahl bzw. Staubmenge. Durch logarithmische Transformierung der Ratios wurden annähernd normalverteilte Werte gewährleistet. Unter Verwendung eines t-Tests mit einer Probe auf einem Signifikanzniveau von 5 % wurden Nullhypothesen von unveränderten mittleren Bakterien- bzw. Staubwerten geprüft. Zusätzlich wurden 95 %ige Konfidenzintervalle für die geschätzten Stichprobenmittelwerte berechnet.

Ergebnisse: Bei Tests im Labormaßstab führte das UVC-kombinierte Filtersystem zu einer Reduzierung der viralen und bakteriellen Partikel um mehr als 99 %. Die rLF hatte keinen Einfluss auf die UVC-Effizienz. Die Lebensfähigkeit der Pathogene im Filtermaterial variierte in Abhängigkeit vom verwendeten Pathogen und der rLF, wobei sich *S. aureus* und PPV am resistantesten darstellten. In der Feldstudie erreichten wir in der Stallluft von Stall 1 (mit dem UVC-Modul) eine signifikant niedrigere Bakterienmenge im Vergleich zum Referenzstall (Stall 2). Die Bakterienkonzentration der Stallluft konnte durchschnittlich auf 37 % reduziert werden, während die Staubmenge in viel geringerem Maße (auf 78 %) verringert werden konnte. Messungen unmittelbar vor und hinter dem UVC-Modul ergaben in der Stallluft eine Reduktion von 99,4 % für Bakterien und von 95,0 % für Staub.

Schlussfolgerung: Wir konnten die Wirksamkeit von UVC-Strahlung zur Luftdesinfektion im Labormaßstab mit einer Reduktionseffizienz von >99 % für ausgewählte Viren und Bakterien erfolgreich demonstrieren. Darüber hinaus erwies sich die Kombination von UVC-Strahlung und Umluftfiltration als erfolgreich bei der Reduzierung der Bakterien- und Staubmenge der Stallluft in einem kleinen Schweinbestand. Der Einsatz dieser Technologie könnte die allgemeine Stallluftqualität in Nutztierställen verbessern.

6 Summary

Lisa Eisenlöffel

Reduction of airborne bacteria and dust concentration in a pig household by UVC-combined recirculating air filtration

Institute of Animal Hygiene and Veterinary Public Health, Faculty of Veterinary Medicine, University of Leipzig

Submitted in July 2021

54 pages, 249 sources, 2 illustrations

Keywords: air-filtration, dust, airborne bacteria, aerosols, airborne pathogens, UVC, pig

Introduction: Some pathogens, which cause high economic losses in the swine industry, can be transmitted over several kilometres via the airborne route. Dust and microorganisms bound to dust can lead to serious health problems for animals, as well as for human beings working in the agricultural environment. In order to reduce airborne pathogen burden and to lower the negative health impact of stable dust, air filtration technologies such as recirculating air filtration can be used. In several studies, a positive impact on swine lung health was seen, when recirculating air filtration was implemented in the pig barn. Filtration of supply air can minimize the risk of introducing airborne pathogens to indoor air. Based on this knowledge, the aim of this study was to combine the positive effects of recirculating air filtration with the germicidal effect of UVC-irradiation, and thus to reduce germ content of stable air.

Objective: The aim of the current study was, to assess the efficiency of UVC irradiation combined to air filtration in reducing airborne microorganisms at laboratory scale. In a second part, a UVC-combined recirculating air filtration module (UVC module) was implemented in a small animal facility in order to assess its improvement of air quality with regard to airborne bacteria and dust.

Material and Methods: Tests at laboratory scale were performed using aerosols of *Staphylococcus aureus*, *Actinobacillus pleuropneumoniae*, porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV) and porcine parvovirus (PPV). Five independent test runs were performed in a test chamber with each pathogen, with and without UVC irradiation, respectively. Relative humidity (RH) was manipulated in some test runs to evaluate the influence of increased RH to UVC-efficacy. Reduction efficiencies were calculated by numbers of pathogens entering and leaving the test chamber. To investigate the survival of pathogens in the filter material, the filters were stored in separated plastic bags. Filter samples were taken after certain time intervals, pooled and incubated, followed by virus titration or counting of bacteria.

Our field study occurred in a small pig facility consisting of two separated barns. Weekly air measurements were conducted over a period of 13 weeks (10 piglets) and 16 weeks (11 piglets) in each barn, respectively. Airborne dust and bacteria amount was sampled and calculated at three different sampling points. Furthermore, samples were taken right in front and behind the UVC-module. In addition, ammonia, CO₂, temperature and RH were recorded. Relative reduction of airborne dust and bacteria amount was determined by calculating ratios of values in barn 1 (UVC-module) compared to barn 2 (reference). Ratios smaller than one correspond to a relative reduction of bacterial counts/dust amount. Ratios were log-transformed to guarantee approximately normally distributed values. Null hypotheses of unchanged mean bacterial or dust counts (i.e., mean ratios equal one) were tested using one sample t-tests on a significance level of 5 %. In addition, 95 % confidence intervals (CI) were calculated for the estimated sample means.

Results: UVC-combined air filtration in tests at laboratory scale resulted in a more than 99 % reduction of viral and bacterial particles. RH had no influence on UVC efficiency. Viability in the filter matter varied depending on the pathogen used and RH with *S. aureus* and PPV being most resistant. In the field study, airborne bacterial numbers were significantly lower in the barn equipped with the UVC module compared to the reference barn. On average, a reduction to 37 % of reference values could be achieved for bacteria, whereas the amount of total dust was reduced to a much lesser extent (i.e. to 78 % of reference values). Measures taken in front of and behind the UVC module revealed a reduction of 99.4 % for airborne bacteria and 95.0 % for total dust.

Conclusion: We successfully demonstrated the effectiveness of air disinfection using UVC irradiation at laboratory scale with reduction efficiencies of >99 % for certain viruses and bacteria. Moreover, combining UVC irradiation to recirculating air filtration proved to be successful in reducing airborne bacteria and dust in a small animal facility. The implementation of such devices might improve the overall environmental quality in animal facilities.

Literaturverzeichnis

Albina E. Epidemiology of porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS): An overview. *Vet Microbiol.* 1997;55:309-316.

Alonso C, Murtaugh MP, Dee SA, Davies PR. Epidemiological study of air filtration systems for preventing PRRSV infection in large sow herds. *Prev Med Vet.* 2013a;112:109-117.

Alonso C, Davies PR, Polson DD, Dee SA, Lazarus WF. Financial implications of installing air filtration systems to prevent PRRSV infection in large sow herds. *Prev Vet Med.* 2013b;111:268-277.

Alt M, Witte KH. Untersuchungen über den Einfluss maternaler Antikörper auf die Vakzination gegen porcines Parvovirus (PPV). *Berl Munch Tierarztl Wochenschr.* 1985;99:257-262.

An T, Zhou Y, Liu G, Tian Z, Li J, Qiu H, Tong G. Genetic diversity and phylogenetic analysis of glycoprotein 5 of PRRSV isolates in mainland China from 1996 to 2006: coexistence of two NA –subgenotypes with great diversity. *Vet Microbiol.* 2007;123:43-52.

Anon. Grundlagen Filtertechnik. 2002 (zitiert am 09.01.2021):1-48, <https://www.luftfilterbau.de/cms/upload/produkte/Grundlagen/PDF/Filtertechnik_0I00.pdf>.

Anon. Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzTV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 29. Januar 2021 (BGBl. I S. 146) geändert worden ist (zitiert am 09.02.2021), <<http://www.gesetze-im-internet.de/tierschnutztv/TierSchNutzTV.pdf>>.

Anon. TRGS 900, Technische Regeln für Gefahrstoffe, Arbeitsplatzgrenzwerte. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 2006 (zitiert am 09.01.2021):1-69, <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/RegelwerkTRGS/pdf/TRGS-900.pdf?_blob=publicationFile&v=18.werk>.

Anon. Partikel-Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik, Bestimmung der Filterleistung; (DIN EN ISO 799:2012-10). Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2012.

Anon. Leitfaden „Ultraviolett-Strahlung künstlicher Quellen“. Fachverband für Strahlenschutz e.V. Schweiz: 2013 (zitiert am 08.02.2021):1-46. <https://www.fs-ev.org/fileadmin/user_upload/04_Arbeitsgruppen/08_Nichtionisierende_Strahlung/02_Dokumente/Leitfaeden/fs-05-131-aknir_uv_strahlung-1.pdf>.

Anon. Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 1 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873) geändert worden ist (zitiert am 14.02.2021). <<https://www.gesetze-im-internet.de/bimschg/BImSchG.pdf>>.

Anon. Schweinehaltungshygieneverordnung (SchHaltHygV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 02. April 2014 (BGBl. S. 326, die durch den Artikel 134 der Verordnung vom 29. März 2017 (BGBl. S. 626) geändert worden ist (zitiert am 06.02.2021). <<http://www.gesetze-im-internet.de/schhalthygv/SchHaltHygV.pdf>>.

Anon. Außenluft, Gravimetrisches Standardmessverfahren für die Bestimmung der PM₁₀- oder PM_{2,5}-Massenkonzentration des Schwebstaubes; (DIN EN ISO 12341:2014-08). Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2014.

Anon. Radiation: Ultraviolet (UV) radiation. World Health Organization. 09. März 2016 (zitiert am 16.01.2021). <[https://www.who.int/news-room/q-a-detail/radiation-ultraviolet-\(uv\)](https://www.who.int/news-room/q-a-detail/radiation-ultraviolet-(uv))>.

Anon. DLG-Merkblatt 403. Hinweis zum Betrieb von Abluftreinigungsanlagen für die Schweinehaltung. 3. Auflage, Stand 01/2016 (zitiert am 08.03.2021). <https://www.rimu.de/files/contentdata/DLG_Merkblatt_403_Hinweise%20zum%20Betrieb%20von%20Abluftreinigungsanlagen%20fuer%20die%20Schweinehaltung.pdf>.

Anon. Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik - Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM); (DIN EN ISO 16890-1:2017-08). Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2017.

Anon. Schweine. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). 2019 (zitiert am 05.02.2021). <<https://www.bmel.de/DE/themen/tiere/nutztiere/schweine/schweine.html>>.

Anon. Schwebstofffilter (EPA, HEPA, ULPA), 1. Teil: Klassifizierung, Leistungsprüfung, Kennzeichnung (DIN EN ISO 1822:1-2019-10). Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2019.

Anon. Tiere und tierische Erzeugung. Schweinebestand 2020 im Vergleich zum Vorjahr nahezu unverändert. Statistisches Bundesamt. 2020 (zitiert am 05.02.2021), <<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/schweine.html>>.

ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2007. Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices of Removal Efficiency by Particle Size. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007 (zitiert am 08.11.2020):1-16, <https://www.techstreet.com/ashrae/standards/ashrae-52-2-2007-supplement?gateway_code=ashrae&product_id=1644026>

Anthony TR, Altmaier R, Jones S, Gassman R, Park JH, Peters TM. Use of recirculating ventilation with dust filtration to improve wintertime air quality in a swine farrowing room. *J Occup Environ Health*. 2015;12:635-646.

Assavacheep P, Rycroft AN. Survival of *Actinobacillus pleuropneumoniae* outside the pig. *Res Vet Sci*. 2013;94:22-26.

Bachmann PA, Sheffy BE, Vauhan JT. Experimental *in utero* infection of fetal pigs with a porcine parvovirus. *Infect Immun*. 1975;12:455-460.

Banhazi T, Cargill C. Survey of pig sheds in Australia – Preliminary results. International symposium on dust control in animal production facilities; 1999 May 30 - June 02; Aarhus, Denmark. Aarhus: Congress proceedings; 1999. p. 76-82.

Banhazi TM, Seedorf J, Rutley DL, Pitchford WS. Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 1. Study justification and design. *J Agric Saf Health*. 2008;14:5-20.

Barber EM, Dawson JR, Battams VA, Nicol AC. Spatial variability of airborne and settled dust in a piggery. *J Agric Engng Res*. 1991;50:107-127.

Batista L, Pouliot F, Dufour V, Morin M. How does air filtration fit into porcine reproductive and respiratory virus regional control and eradication strategies? *Advances in Pork Production*. 2009;20:151-161.

Beggs CB, Noakes CJ, Sleight PA, Fletcher LA, Kerr KG. Methodology for determining the susceptibility of airborne microorganisms to irradiation by an upper-room UVGI system. *J Aerosol Sci*. 2006;37:885-902.

Beukers R, Berends W. Isolation and identification of the irradiation product of thymine. *Biochim Biophys Acta*. 1960;153:379-386.

Bintsis T, Litopoulou-Tzanetaki E, Robinson RK. Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry—a critical review. *J Sci Food Agric*. 2000;80:637–645.

Bintsis T. Foodborne pathogens. *AIMS Microbiol*. 2017;3:529-563.

- Brockmeier SL, Halbur PG, Thacker EL. Porcine respiratory disease complex. In: Brodgen KA, Guthmiller JM, Hrsg. Polymicrobial Diseases. 1. Aufl. Washington (DC): ASM Press; 2002. p. 231-258.
- Brumm MC. Effect of environment on health. In: Zimmerman JJ, Karriker LA, Ramirez A, Schwartz KJ, Stevenson GW, Zhang J, Hrsg. Disease of swine. 11. Aufl. Hoboken (New Jersey): Wiley-Blackwell; 2019. p. 50-58.
- Bucheli-Witschel M, Bassin T, Egli T. UV-C inactivation in *Escherichia coli* is affected by growth conditions preceding irradiation, in particular by the specific growth rate. J Appl Microbiol. 2010;109:1733-1744.
- Butler JE, Lager KM, Golde W, Faaberg KS, Sinkora M, Loving C, Zhang YI. Porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS): an immune dysregulatory pandemic. Immunol Res. 2014;59:81-108.
- Caesar T. Grundlagen der Filtration von Partikeln und Gasen. In: Caesar T, Hrsg. Industrielle Luftfiltration. 1. Auflg. München: Süddeutscher Verlag onpact GmbH; 2013. p. 6-28.
- Carpenter GA, Cooper AW, Wheeler GE. The effect of air filtration on air hygiene and pig performance in early-weaner accommodation. Anim Prod. 1986;43:505-515.
- Carpenter GA. Dust in livestock buildings – Review of some aspects. J Agric Eng Res. 1986;33:227-241.
- Carpenter GA, Fryer JT. Air filtration in a piggery: filter design and dust mass balance. J Agric Engng Res. 1990;46:171-186.
- Cartwright SF, Huck RA. Viruses isolated in association with herd infertility, abortions and stillbirths in pigs. Vet Rec. 1967;81:196-197.
- Chang CW, Li SY, Huang SH, Huang CK, Chen YY, Chen CC. Effects of ultraviolet germicidal irradiation and swirling motion on airborne *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* and *Legionella pneumophila* under various relative humidities. Indoor Air. 2012;23:74–84.
- Cho J, Dee S. Porcine reproductive and respiratory syndrome virus. Theriogenology. 2006;66:655-662.
- Clauss M, Springorum AC, Hartung J. Size and composition of airborne bacteria aggregates collected in animal house air by novel impactor system; Proceedings of the XVth ISAH Congress; 2011 July 03-07; Vienna, Austria. Brno: Tribun EU s.r.o.; 2011. p. 797-799.

Collin A, Van Milgen J, Dubois S, Noblet J. Effect of high temperature on feeding behaviour and heat production in group-housed young pigs. *Br J Nutr.* 2001;86:63-70.

Corrêa TQ, Blanco KC, Garcia EB, Perez SML, Chianfrone DJ, Morais VS, Bagnato VS. Effects of ultraviolet light and curcumin-mediated photodynamic inactivation on microbiological food safety: A study in meat and fruit. *Photodiagnosis Photodyn Ther.* 2020;30:101678. doi: 10.1016/j.pdpdt.2020.101678.

Costa A, Guarino M, Navarotto P, Savoini G, Berckmans D. Effects of corn milling type on physical characteristics and on dustiness of swine diets. *Trans ASABE.* 2007;50:1759-1764.

Costa A, Borgonovo F, Leroy T, Berckmans D, Guarino M. Dust concentration variation in relation to animal activity in a pig barn. *Biosyst Eng.* 2009;104:118-124.

Costa AM, Domeneghini C. Pollutants in livestock buildings – Ammonia and dust interplay with the respiratory tract. In: Banhazi T, Aland A, Hartung J, Hrsg. *Air quality and livestock farming. Series: Sustainable energy developments; Volume 15. 1. Aufl. London: Taylor & Francis Group; 2018. p. 49-59.*

Cox CS. *The aerobiological pathway of microorganisms. 1. Aufl. Chichester: John Wiley & Sons; 1987.*

Crook B, Robertson JF, Travers Glass SA, Botheroyd EM, Lacey J, Topping MD. Airborne dust, ammonia, microorganisms, and antigens in pig confinement houses and the respiratory health of exposed farm workers. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1991;52:271-279.

Curtis SE, Drummond JG, Grunloh DJ, Lynch PB, Jensen AH. Relative and qualitative aspects of aerial bacteria and dust in swine houses. *J Anim Sci.* 1975;41:1512-1520.

Cutler TD, Zimmerman JJ. Ultraviolet irradiation and the mechanisms underlying its inactivation of infectious agents. *Anim Health Res Rev.* 2011;12:15-23.

Day DL, Hasen EL, Anderson S. Gases and odors in swine confinement buildings. *Trans ASAE* 1965;8:118–121.

Dee S, Deen J, Otake S, Pijoan C. An experimental modul to evaluate the role of transport vehicles as a source of transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus to susceptible pigs. *Can J Vet Res.* 2004;68:128-133.

Dee S, Batista L, Deen J, Pijoan C. Evaluation of an air-filtration system for preventing aerosol transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus. *Can J Vet Res.* 2005;69:293-298.

Dee SA, Deen J, Cano JP, Batista L, Pijoan C. Further evaluation of alternative air-filtration systems for reducing the transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus by aerosol. *Can J Vet Res.* 2006;70:168-175.

Dee S, Otake S, Deen J. Use of a production 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.* 2010;154:177-184.

Dee S, Cano JP, Spronk G, Reicks D, Ruen P, Pitkin A, Polson D. Evaluation of the long-term effect of air filtration on the occurrence of new PRRSV infections in large breeding herds in swine-dense regions. *Viruses.* 2012;4:654-662.

Delbliquy B, Nicks B, Canart B, Buzitu S, Dewaele A. Caractéristiques hygométriques et niveau de pollution de l'air dans 9 locaux en porcherie d'élevage. *Ann Med Vet.* 1991;135:215-220.

Desrosiers R. Therapeutic control and economic aspect of porcine pleuropneumonia in finishing units. *Vet Rec.* 1986;119:89-90.

Desrosiers R, Moore C. Indirect transmission of *Actinobacillus pleuropneumoniae* infections. *J Swine Health Prod.* 1998;6:263-265.

Desrosiers R. Transmission of swine pathogens: different means, different needs. *Anim Health Res Rev.* 2011;12:1-13.

Doig PA, Willoughby RA. Response of swine to atmospheric ammonia and organic dust. *J Am Vet Med Assoc.* 1971;59:1353-1361.

Donham KJD, Hagling P, Peterson Y, Rylander R, Berlin L. Environmental and health studies of farm workers in Swedish confinement buildings. *British J Ind Med.* 1989;46:31-37.

Donham KJD. Association of environmental air contaminants with disease and productivity in swine. *Am J Vet Res.* 1991;52:1723-1730.

Donham KJD, Cumro S. Setting maximum dust exposure levels for people and animals in livestock facilities. International symposium on dust control in animal production facilities; 1999 May 30 - June 02; Aarhus, Denmark. Aarhus: Congress proceedings; 1999. p. 93-110.

Downes A, Blunt TP. The influence of light upon the development of bacteria. *Nat.* 1877a;20:218.

Downes A, Blunt TP. Researches on the effect of light upon bacteria and other organisms. *Proc Royal Soc Lond.* 1877b;26:488-500.

Downes A, Blunt TP. On the influence of light on protoplasm. Proc R Soc Lond. 1878;28:199-212.

Dreiling JB. An evaluation of ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) technologie in health care facilities [Master of Science]. Manhattan (Kansas): Kansas State University; 2008.

Drummond JG, Curtis SE, Simon J, Norton HW. Effects of aerial ammonia on growth and health of young pigs. J Anim Sci. 1980;50:1085–1091.

Duclaux E. Influence de la lumière du soleil sur la vitalité des germes des microbes. C R Acad Hebd Seances Acad Sci. 1885a;100:119-121.

Duclaux E. Sur la durée de la vie chez les germes des microbes. Ann Chim Phys. 1885b;6:5-59.

Duclaux E. Influence de la lumière du soleil sur la vitalité de micrococcus. C R Seances Soc Biol Fil. 1885c;37:508-510.

Ehrismann O, Noethling W. Über die bactericide Wirkung monochromatischen Lichtes. Ztschr Hyg Infektionskr. 1932;113:597-628.

Escombe AR, Moore DAJ, Gilman RH, Navincopa M, Ticona E, Mitchell B, Noakes C, Martínez C, Sheen P, Ramirez R, Quino W, Gonzalez A, Friedland JS, Evans CA. Upper-room ultraviolet light and negative air ionization to prevent tuberculosis transmission. PLoS Med. 2009;6(3):e1000043. doi: 10.1371/journal.pmed.1000043.

Eterpi M, McDonnell G, Thomas V. Disinfection efficacy against parvoviruses compared with reference viruses. J Hosp Infect. 2009;73:64-70.

Ewers C, Wieler H. Pasteurellaceae. In: Selbitz HJ, Truyen U, Valentin-Weigand P, Hrsg. Tiermedizinische Mikrobiologie, Infektions- und Seuchenlehre. 10. Aufl. Stuttgart: Enke Verlag; 2015. p. 223-246.

Fablet C, Dorenlor V, Eono F, Eveno E, Jolly JP, Portier F, Bidan F, Madec F, Rose N. Noninfectious factors associated with pneumonia and pleuritis in slaughtered pigs from 143 farrow-to-finish pig farms. Prev Vet Med. 2012;104:271-280.

Fablet C, Bidan F, Dorenlor V, Eono F, Eveno E, Rose N, Madec F. Air quality and factors related to sub-optimal pig housing conditions in nursery and finishing rooms. A field study in 143 French herds. In: Banhazi T, Aland A, Hartung J. Hrsg. Air Quality and Livestock Farming. Series: Sustainable energy developments; Volume 15. 1. Aufl. London: Taylor & Francis Group; 2018. p. 87-110.

- First M, Rudnick SN, Banahan KF, Vincent RL, Brickner PW. Fundamental factors affecting upper-room ultraviolet germicidal irradiation – Part I. Experimental. J Occup Environ Hyg. 2007;4:321-331.
- Fleming A. On the antibacterial action of cultures of a penicillium, with special reference to their use in the isolation of B. influenza. Brit J Exp Pathol. 1929;10:226–236.
- Francois S, Filloux D, Roumagnac P, Bigot D, Gayral P, Martin DP, Froissart R, Ogliastro M. Discovery of parvovirus-related sequences in an unexpected broad range of animals. Sci Rep. 2016;6:30880.
- Friese A, Schulz J, Hoehle L, Fetsch A, Tenhagen BA, Hartung J, Roesler U. Occurrence of MRSA in air and housing environment of pig barns. Vet Microbiol. 2012;158:129-135.
- Gates FL. A study of the bacterial action of ultraviolet light III. The absorption of ultra violet light by bacteria. J Gen Physiol. 1930;14:31-42.
- Gayán E, García-Gonzalo D, Álvarez I, Condón S. Resistance of *Staphylococcus aureus* to UV-C light and combined UV-heat treatments at mild temperatures. Int J Food Microbiol. 2014;172:30-39.
- Gonyou HW, Lemay SP, Zhang Y. Effects of the environment on productivity and disease. In: Straw B, Zimmermann W, d'Allaire S, Taylor DJ, Hrsg. Disease of Swine, 9. Aufl. Ames Iowa: Iowa State University Press; 2006. p. 1027-1038.
- Gottschalk M, Broes A. Actinobacillosis. In: Zimmerman JJ, Karriker LA, Ramirez A, Schwartz KJ, Stevenson GW, Zhang J, Hrsg. Disease of swine. 11. Aufl. Hoboken (New Jersey): Wiley-Blackwell; 2019. p. 749-766.
- Gould D, Chamberlaine A. *Staphylococcus aureus*: a review of the literature. J Clin Nurs. 1995;4:5–12.
- Gradil C, Molitor T, Harding M, Crabo B. Excretion of porcine parvovirus through the genital tract of boars. Am J Vet Res. 1990;51:359-362.
- Granier R, Massabie P. Influence du taux d'humidité relative de l'air ambiant sur l'état de santé et les performances zootechniques du porc à l'engrais. Journées Rech Porcine En France. 1996;28:195-200.
- Graveland H, Wagenaar JA, Heesterbeek H, Mevius D, van Duijkeren E, Heederik D. Methicillin resistant *Staphylococcus aureus* ST398 in veal calf farming: human MRSA carriage related with animal antimicrobial usage and farm hygiene. PLoS One 2010;5(6):e10990. doi: 10.1371/journal.pone.0010990.

Green CF, Scarpino PV. The use of ultraviolet germicidal irradiation (UVGI) in disinfection of airborne bacteria. *Environ Eng Policy*. 2002;3:101–107.

Große Beilage E, Nathues H, Grummer B, Hartung J, Kamphues J, Kietzmann M, Rohde J, Spindler RB, Weissenböck H. Diagnostik, Prophylaxe und Therapie von Atemwegserkrankungen in Schweinebeständen. In: Große Beilage E, Wendt M, Hrsg. Diagnostik und Gesundheitsmanagement im Schweinebestand, Band 1, 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2013. p. 200-270.

Guingand N. Dust concentrations in piggeries: Influence of season, age of pigs, type of floor and feed presentation in farrowing, post-weaning and finishing rooms. International symposium on dust control in animal production facilities; 1999 May 30 - June 02; Aarhus, Denmark. Aarhus: Congress proceedings; 1999. p. 69-75.

Harding JCS, Ladinig A, Novakovic P, Detmer SE, Wilkinson JM, Yang T, Lunney JK, Plastow GS. Novel insights into host responses and reproductive pathophysiology of porcine reproductive and respiratory syndrome caused by PRRSV-2. *Vet Microbiol*. 2017;209:114-123.

Hartung J, Seedorf J. Characterization of airborne dust in livestock housing and its effect on animal and environment. International symposium on dust control in animal production facilities; 1999 May 30 - June 02; Aarhus, Denmark. Aarhus: Congress proceedings; 1999. p.140-153.

Hartung J, Saleh M. Composition of dust and effects on animals. *Laufbauforsch Volk*. 2007;308:111-116.

Hartung J, Spindler B. Stallklima und Stalllüftung. In: Große Beilage E, Wendt M, Hrsg. Diagnostik und Gesundheitsmanagement im Schweinebestand, 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2013. p. 75-91.

Hatch TF, Gross P. Pulmonary deposition and retention of inhaled aerosols. 1. Aufl. New York: Academic Press; 1964.

Heegaard ED, Brown KE. Human Parvovirus B19. *Clin Microbiol Rev*. 2002;15:485-505.

Heidelberg JF, Shahamat M, Levin M, Rahman I, Stelma G, Grim C, Colwell RR. Effect of aerolization on culturability and viability of gram-negative bacteria. *J Appl Environ Microbiol*. 1997;63:3585-3588.

Heinritzi K. Pneumonie. In: Heinritzi K, Ginderle HR, Reiner G, Schnurrbusch U, Hrsg. Schweinekrankheiten. 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2006a. p. 137-146.

- Heinritzi K. Virale Infektionskrankheiten. In: Heinritzi K, Ginderle HR, Reiner G, Schnurrbusch U, Hrsg. Schweinekrankheiten. 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2006b. p. 107-124.
- Heinritzi K. Planmäßige Bestandsbehandlung. In: Heinritzi K, Ginderle HR, Reiner G, Schnurrbusch U, Hrsg. Schweinekrankheiten. 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2006c. p. 404-406.
- Heinritzi K. Allgemeiner Untersuchungsgang. In: Heinritzi K, Ginderle HR, Reiner G, Schnurrbusch U, Hrsg. Schweinekrankheiten. 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2006d. p. 16-22.
- Hertel E. Ueber physiologische Wirkung von Strahlen verschiedener Wellenlänge. Zeitschrift für allgemeine Physiologie 1905;5:95–122.
- Hijnen WAM, Beerendonk EF, Medema GJ. Inactivation credit of UV radiation for viruses, bacteria and protozoan (oo)cysts in water: a review. Water Res. 2006;40:3-22.
- Hockberger PE. The discovery of the damaging effect of sunlight on bacteria. J Photochem Photobiol A Chem. 2000;58:185-191.
- Hoffmann HV, Richter W. The microbial content of air – a significant factor in a fattening piggery using dry feed. Monatsh Veterinarmed. 1964;19:567-573.
- Holtkamp DJ, Kliebenstein JB, Neumann EJ, Zimmerman JJ, Rotto HF, Yoder TK, Wang C, Yeske PE, Mowrer CL, Haley CA. Assessment of the economic impact of porcine reproductive and respiratory syndrome virus on United States pork producers. J Swine Health Product. 2013;21:72-84.
- Hoy S, Gauly M, Krieter J. Gas in der Stallluft. In: Hoy S, Gauly M, Krieter J. Hrsg. Nutztierhaltung und -hygiene. 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2006. p. 182-202.
- Jobert JL, Savoye C, Cariolet R, Kobisch M, Madec F. Experimental aerosol transmission of *Actinobacillus pleuropneumoniae* to pigs. Can J Vet Res. 2000;64:21-26.
- Johnson RH, Collings DF. Transplacental infection of piglets with a porcine parvovirus. Res Vet Sci. 1971;12:570–572.
- Jones JB, Wathes CM, Persaud KC, White RP, Bryan N, Jones R. Acute and chronic exposure to ammonia and olfactory acuity for n-butanol in the pig. Appl Anim Behav Sci. 2001;71:13-28.
- Joo HS, Donaldson-Wood CR, Johnson RH. Observations on the pathogenesis of porcine parvovirus infection. Arch Virol. 1976;51:123–129.
- Joo HS, Johnson RH. Porcine parvovirus: a review. Vet Bull. 1976;46:653-660.

- Joo HS, Johnson RH. Serological responses in pigs vaccinated with inactivated porcine parvovirus. *Aust Vet J.* 1977;53:550-552.
- Kamp EM, Stockhofe-Zurwieden N, van Leengoed LA, Smits MA. Endobronchial inoculation with Apx toxins of *Actinobacillus pleuropneumoniae* leads to pleuropneumonia in pigs. *Infect Immun.* 1997;65:4350-4354.
- Kapur V, Elam MR, Pawlovich TM, Murtaugh MP. Genetic variation in porcine reproductive and respiratory syndrome virus isolates in the midwest United States. *J Gen Virol.* 1996;10:140-144.
- Karaman R, Jubeh B, Breijyeh Z. Resistance of gram-positive bacteria to current antibacterial agents and overcoming approaches. *Molecules.* 2020;25(12):2888. doi:10.3390/molecules25122888.
- Keffaber K. Reproductive failure of unknown etiology. *Am Assoc Swine Pract News.* 1989;1:1-10.
- Kethley TW, Branch K. Ultraviolet lamps for room air disinfection. Effect of sampling location and particle size of bacterial aerosol. *Arch Environ Health.* 1972;25:205-214.
- Khanna T, Friendship R, Dewey C, Weese JS. Methicillin resistant *Staphylococcus aureus* colonization in pigs and pig farmers. *Vet Microbiol.* 2008;128:298-303.
- Kim KY, Ko HJ, Lee KJ, Park JB, Kim CN. Temporal and spatial distributions of aerial contaminants in an enclosed pig building in winter. *Environ Res.* 2005;99:150-157.
- Kirby WM. Extraction of a highly potent penicillin inactivator from penicillin resistant staphylococci. *Science* 1944;99:452-453.
- Ko G, First MW, Burge HA. Influence of relative humidity on particle size and UV sensitivity of *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* BCG aerosols. *Tuber Lung Dis.* 2000;80(4/5):217-228.
- Ko G, First MW, Burge HA. The characterization of upper-room ultraviolet germicidal irradiation in inactivating airborne microorganisms. *Environ Health Perspect.* 2002;110:95-101.
- Kohmoto K. Present state of UV disinfection. Vol 6: Photobiology and Photochemistry. Vienna: Commission International de l'Eclairage ;1991. p. 1-9.
- Kovacs F, Nagy A, Sallai JN. 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.* 1967;22:496-505.

- Kowalski WJ, Bahnfleth WP. UVGI design basics for air and surface disinfection. *Heat Piping Air Cond.* 2000;72:100-110.
- Kowalski WJ. Design and optimization of UVGI air disinfection systems [Thesis for PhD]. State College: The Pennsylvania State University; 2001.
- Kowalski WJ, Bahnfleth WP. Proposed standards and guidelines for UVGI air disinfection. *IUVA News* 2004;6:20-25.
- Kowalski WJ. Introduction. In: Kowalski WJ, Hrsg. *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*. 1. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. 2009. p. 1-16.
- Kristensen CS, Angen O, Andreasen M, Takai H, Nielsen JP, Jorsal SE. Demonstration of airborne transmission of *Actinobacillus pleuropneumoniae* serotype 2 between simulated pig units located at close range. *Vet Microbiol.* 2004;98:243-249.
- Labas MD, Brandi RJ, Zalazar CS, Cassano AE. Water disinfection with UVC radiation and H₂O₂. A comparative study. *Photochem Photobiol Sci.* 2009;8:670-676.
- Lakhundi S, Zhang K. Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*: Molecular Characterization, Evolution, and Epidemiology. *Clin Microbiol Rev.* 2018;31(4):e00020-18. doi: 10.1128/CMR.00020-18.
- Larsen LP. Dansih SPF herds: A lesson in precautions. *Pig Progress.* 1998;46-47.
- Lau AK, Vizcarra AT, Lo KV, Luymes J. Recirculation of filtered air in pig barns. *Can Agric Eng.* 1996;38:297-304.
- Lewis HC, Mølbak K, Reese C, Aarestrup FM, Selchau M, Sørup M, Skov RL. Pigs as source of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* CC398 infections in humans, Denmark. *Emerg Infect Dis.* 2008;14:1383-1389.
- Lidwell OM, Lowbury EJ. The survival of bacteria in dust. *Annu Rev Microbiol.* 1950;14:38-43.
- Lin CY, Li CS. Control Effectiveness of ultraviolet germicidal irradiation on bioaerosols. *Aerosol Sci Technol.* 2002;36:474–478.
- Liu CY, Tseng CH, Wang HC, Dai CF, Shih YH. The study of an ultraviolet radiation technique for removal of the indoor air volatile organic compounds and bioaerosol. *Int J Environ Res Public Health.* 2019;16:2557. doi: 10.3390/ijerph16142557.
- López-Malo A, Palou E. Ultraviolet light and food preservation. In: Barbosa-Cánovas GV, Tapia MS, Cano MP, Hrsg. *Novel Food Processing Technologies*. 1. Aufl. Madrid: CRC Press; 2005. p. 464-484.

Luckiesh M. Applications of germicidal, erythematous, and infrared energy. New York: D. Van Nostrand Company; 1946.

Lunney JK, Benfield DA, Rowland RR. Porcine reproductive and respiratory syndrome virus: an update on an emerging and re-emerging viral disease of swine. *Virus Res.* 2010;154:1-6.

Madec J, Josse J. The risk factors of respiratory diseases on fatteners in intensive breeding-finishing units. Proceedings of the 8th International Pig Veterinary Society Congress; 1984 August 27-31; Ghent, Belgium. 1985. p. 349.

Madsen AM, Kurdi I, Feld L, Tendal K. Airborne MRSA and total *Staphylococcus aureus* as associated with particles of different sizes on pig farms. *Ann Work Expo Health.* 2018;62:966-977.

Maghirang RG, Puma MC, Liu Y, Clark P. Dust concentrations and particle size distribution in an enclosed swine nursery. *Trans ASAE.* 1997;40:749-754.

Mainelis G, Willeke K, Baron P, Reponen T, Grinshpun SA, Górný RL, Trakumas S. Electrical charges on airborne microorganisms. *J Aerosol Sci.* 2001;32:1087±1110.

Malley JP, Ballester NA, Margolin AB, Linden KG, Mofidi A, Bolton JR, Crozes G, Laine JM, Janex ML. Inactivation of pathogens with innovative UV technologies. American Research Foundation and American Water Works Association. Denver; 2004.

Martin SW, Willoughby RA. Organic dusts, sulphur dioxide and the respiratory tract of swine. *Arch Environ Health.* 1972;25:158-165.

Mathebula T, Leuschner FW, Chowdhury SP. The use of UVC-LEDs for the disinfection of *Mycobacterium tuberculosis*. Proceedings IEEE PES/IAS PowerAfrica; Cape Town: South Africa; 2018. p. 739-744.

McDevitt JJ, Milton DK, Rudnick SN, First MW. Inactivation of Poxviruses by Upper-Room UVC Light in a Simulated Hospital Room Environment. *PLoS ONE.* 2008;3(9):e3186. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003186> PMID: 18781204.

McDevitt JJ, Rudnick SN, Radonovich LJ. Aerosol susceptibility of influenza virus to UVC light. *Appl Environ Microbiol.* 2012;786:1666–1669.

Mengeling WL, Cutlip RC. Pathogenesis of in utero infection: experimental infection of five-week-old porcine fetuses with porcine parvovirus. *Am J Vet Res.* 1975;36:1173–1177.

Mengeling WL. Prevalence of porcine parvovirus-induced reproductive failure: An abattoir study. *J A Vet Med Assoc.* 1978;172:1291-1294.

- Mengeling WL, Lager KM, Vorwald AC. The effect of porcine parvovirus and porcine reproductive and respiratory syndrome virus on porcine reproductive performance. *Anim Reprod Sci.* 2000;60-61:199-210.
- Menzies D, Popa J, Hanley JA, Rand T, Milton DK. Effect of ultraviolet germicidal lights installed in office ventilation systems on workers' health and wellbeing: double-blind multiple crossover trial. *Lancet.* 2003;362:1785-1791.
- Metha SK, Mishra SK, Pierson DL. Evaluation of three portable samplers for monitoring airborne fungi. *Appl Environ Microbiol.* 1996;62:1835-1838.
- Meulenbelt J. *Ammonia. Med.* 2012;40:94-95.
- Meulenbergh JJM, Hulst MM, de Meuer EJ, Moonen PLMJ, den Besten A, de Kluyver EP, Wensvoort G, Moormann RJM. Lelystad virus, the causative agent of porcine epidemic abortion and respiratory syndrome (PEARS), is related to LDV and EAV. *Virology.* 1993;192:62-72.
- Miranda C, Thompson G. Canine parvovirus: The worldwide occurrence of antigenic variants. *J Gen Virol.* 2016;97:2043–2057.
- Mortensen S, Stryhn H, Søgaard R, Boklund A, Stärk KDC, Christensen J, Willberg P. Risk factors for infection of sow herds with porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS) virus. *Prev Vet Med.* 2002;53:83-101.
- Mphahlele M, Dharmadhikari AS, Jensen PA, Rudnick SN, van Reenen TH, Pagano MA, Leuschner W, Sears TA, Milonova SP, van der Walt M, Stoltz AC, Weyer K, Nardell EA. Institutional tuberculosis transmission. Controlled trial of upper room ultraviolet air disinfection: a basis for new dosing guidelines. *Am J Respir Crit Care Med.* 2015;192:477-484.
- Murtaugh MP, Xiao Z, Zuckermann F. Immunological responses of swine to porcine reproductive and respiratory syndrome virus infections. *Viral Immunol.* 2002;15:533-47.
- Murtaugh MP, Genzow M. Immunological solutions for treatment and prevention of porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS). *Vaccine.* 2011;29:8192-204.
- Neumann EJ, Kliebstein JB, Johnson CD, Mabry JW, Bush EJ, Seitzinger AH, Green AL, Zimmerman JJ. Assessment of the economic impact of porcine reproductive and respiratory syndrome on swine production in the United States. *J Am Vet Med Assoc.* 2005;227:385-392.
- Otake S, Dee SA, Jacobson L, Torremorell M, Pijoan C. Evaluation of aerosol transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus under controlled field conditions. *Vet Rec.* 2002a;150:804-808.

- Otake S, Dee SA, Rossow KD, Deen J, Joo HS, Molitor TW, Pijoan C. Transmission of porcine reproductive and respiratory syndrome virus by fomites (boots and coveralls). *J Swine Health Prod.* 2002b;10:59-65.
- Otake S, Dee SA, Rossow KD, Moon RD, Trincado C, Pijoan C. Transmission of reproductive and respiratory syndrome virus by houseflies (*Musca domestica*). *Vet Rec.* 2003;152:114-115.
- Otake S, Dee S, Corzo C, Oliveira S, Deen J. Long-distance airborne transport of infectious PRRSV and *Mycoplasma hyopneumoniae* from a swine population infected with multiple viral variants. *Vet Microbiol.* 2010;145:198-208.
- Park J, Kang T, Heo Y, Lee K, Kim K, Lee K, Yoon C. Evaluation of short-term exposure levels on ammonia and hydrogen sulfide during manure-handling processes at livestock farms. *Saf Health Work.* 2020;11:109-117.
- Pattison IH, Howell DG, Elliot J. *A. haemophilus*-like organism isolated from pig lung and the associated pneumonic lesions. *J Comp Pathol.* 1957;67:320-330.
- Peccia J, Werth HM, Miller S, Hernandez M. Effects of relative humidity on the ultraviolet induced inactivation of airborne bacteria. *Aerosol Sci Technol.* 2001;35:728-740.
- Pedersen S, Nonnenman M, Rautianen R, Demmers TGM, Banhazi T, Lyngbye M. Dust in pig buildings. *J Agric Saf Health.* 2000;6:261-274.
- Peterson E, Remmenga M, Hagerman AD, Akkina JE. Use of temperature, humidity, and slaughter condemnation data to predict increases in transport losses in three classes of swine and resulting foregone revenue. *Front Vet Sci.* 2017;4:67. doi: 10.3389/fvets.2017.00067.
- Pitkin A, Deen J, Dee S. Use of a production region model to assess the airborne spread of porcine reproductive and respiratory syndrome virus. *Vet Microbiol.* 2009;136:1-7.
- Plagemann PG. Porcine reproductive and respiratory syndrome virus: Origin hypothesis. *Emerg Infect Dis.* 2003;9:903-908.
- Plonait H. Einfluss der Haltungsbedingungen auf das Krankheitsgeschehen. In: Waldmann KH, Wendt M, Hrsg. *Lehrbuch der Schweinekrankheiten.* 4. Aufl. Stuttgart: Parvey Verlag; 2004. p. 11-24.
- Pohl S, Bertschinger HU, Frederiksen W, Manheim W. Transfer of *Haemophilus parasuis* and the *Pasteurella haemolytica*-like organism causing porcine necrotic pleuropneumonia to the genus *Actinobacillus* (*Actinobacillus pleuropneumoniae* comb. Nov.) on the basis of phenotypic and deoxyribonucleic acid relatedness. *Inst J Syst Bacteriol.* 1983;33:510-514.

- Pope CA, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*. 2002;287:1132-1141.
- Predicala B, Maghirang R, Jerez SB, Urban JE, Goodband RD. Dust and bioaerosol concentrations in two swine-finishing buildings in Kansas. *Trans ASAE*. 2001;44:1291-1298.
- Radon KC, Weber M, Iversen B, Danuser S, Pedersen S, Nowak D. Exposure assessment and lung function in pig and poultry famers. *Occup Environ Med*. 2001;58:405-410.
- Raev S, Yuzhakov A, Bulgakov A, Kostina L, Gerasianinov A, Verkhovsky O, Zaberezhny A, Aliper T. An outbreak of a respiratory disorder at a Russian swine farm associated with the co-circulation of PRRSV1 and PRRSV2. *Viruses*. 2020;12:1169. doi: 10.3390/v12101169.
- Reed NG. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. *Public Health Rep*. 2010;125:15-27.
- Reiner G. Der Schweinebestand. In: Reiner G, Hrsg. *Krankes Schwein-kranker Bestand*. 1. Aufl. Stuttgart: Eugen Ulmer KG; 2015. p. 222-280.
- Rentschler HC, Nagy R. Bactericidal action of ultraviolet radiation on air-borne microorganisms. *J Bacteriol*. 1942;44:85-94.
- Rhode SL. Replication process of the parvovirus H-1.I. Kinetics in a parasynchronous cell system. *J Virol*. 1973;11:856-861.
- Riley RL, Mills CC, Nyka W, Weinstock N, Storey PB, Sultan LU, Riley MC, Wells WF. Aerial dissemination of pulmonary tuberculosis: a two-year study of contagion in a tuberculosis ward. *Am J Hyg*. 1959;70:185-196.
- Riley RL, Mills CC, O'Grady F, Sultan LU, Wittstadt F, Shivpuri DN. Infectiousness of air from a tuberculosis ward. Ultraviolet irradiation of infected air: comparative infectiousness of different patients. *Am Rev Respir Dis*. 1962;85:511-525.
- Riley RL, Permutt S, Kaufman JE. Convection, air mixing, and ultraviolet air disinfection in rooms. *Arch Environ Health*. 1971;22:200-207.
- Riley RL, Kaufman JE. Effect of relative humidity on the inactivation of *Serratia marcescens* by ultraviolet radiation. *Appl Microbiol*. 1972;23:1113-1120.
- Ritter M, Olberding E, Malinzak R. Ultraviolet lighting during orthopaedic surgery and the rate of infection. *J Bone Joint Surg*. 2007;89:1935–1940.

- Ritzmann M, Gyra H, Johannes S, Hausleithner D, Heinritzi K. Vergleichende Untersuchungen über den Einsatz eines Parvovirose-Rotlauf-Kombinationsimpfstoffes sowie entsprechender Monovakzine bei unterschiedlichen Revakzinationszeitpunkten. Teil 2: Rotlaufinfektionsversuch. Tierarztl Prax. 2000;28:23-27.
- Rohrbach BW, Hall RF, Hitchcock JP. Effect of subclinical infection with *Actinobacillus pleuropneumoniae* in commingled feeder swine. J Am Vet Med Assoc. 1993;202:1095-1098.
- Ryan K, McCabe K, Clements N, Hernandez M, Miller SL. Inactivation of airborne microorganisms using novel ultraviolet radiation sources in reflective flow-through control devices. Aerosol Sci Technol. 2010;44:541–550.
- Rylander R. Lung diseases caused by organic dusts in the farm environment. Am J Ind Med. 1986;10:221-227.
- Schulz J, Friese A, Klees S, Tenhagen BA, Fetsch A, Rösler U, Hartung J. Longitudinal study of the contamination of air and of soil surfaces in the vicinity of pig barns by livestock-associated methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. Appl Environ Microbiol. 2012;78:5666-5671.
- Schulz J, Bao E, Clauß M, Hartung J. The potential of a new air cleaner to reduce airborne microorganisms in pig house air: preliminary results. Berl Munch Tierarztl Wochenschr. 2013;126:143-148.
- Seedorf J, Hartung J, Schröder M, Linkert KH, Phillips VR, Holden MR, Sneath RW, Short JL, White RP, Pedersen S, Takai H, Johnson JO, Metz JHM, Groot Koerkamp PWG, Uenk GH, Wathes CM. Concentration and emissions of airborne endotoxins and microorganisms in livestock buildings in Northern Europe. J Agric Eng Res. 1998;70:97-109.
- Seedorf J. Emissions of airborne dust and micro-organisms. Landtechnik. 2000;55:182-183.
- Seedorf J, Hartung J. Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung. KTBL-Schrift 393 Münster: LANDWIRTSCHAFTSVERLAG GmbH; 2002.
- Smeets MA, Bulsing PJ, van Rooden S, Steinmann R, de Ru JA, Ogink NW, van Thriel C, Dalton PH. Odor and irritation thresholds for ammonia: a comparison between static and dynamic olfactometry. Chem Senses. 2007;32:11–20.
- Smith JH, Boon CR, Wathes CM. Dust distribution and air flow in swine. Proceeding of IV. International Livestock Symposium; 1993 July 6-9; University of Warwick, Coventry, England; 1993.

Spronk G, Otake S, Dee S. Prevention of PRRSV infection in large breeding herds using air filtration. *Vet Rec.* 2010;166:758-759.

Stärk KDC, Pfeiffer DU, Morris RS. Risk factors for respiratory diseases in New Zealand pig herds. *N Z Vet J.* 1998;46:3-10.

Stärk KDC. The role of infectious aerosols in disease transmission in pigs. *Vet J.* 1999;158:164-181.

Stoian AMM, Rowland RRR. Challenges for porcine reproductive and respiratory syndrome (PRRS) vaccine design: reviewing virus glycoprotein interactions with CD163 and targets of virus neutralization. *Vet Sci.* 2019;6:9. doi: 10.3390/vetsci6010009.

Straw BA, Shin SJ, Yeager AE. Effect of pneumonia on growth rate and feed efficiency of minimal disease pigs exposed to *Actinobacillus pleuropneumoniae* and *Mycoplasma hyopneumoniae*. *Prev Vet Med.* 1990;9:287-294.

Streck AF, Truyen U. Porcine Parvovirus. *Curr Issues Mol Biol.* 2020;37:33-46.

Swenson SL, Hill HT, Zimmerman JJ, Evans LE, Landgraf JG, Wills RW, Sanderson TP, McGinley MJ, Brevik AK, Ciszewski DK, Merwin LF. Excretion of porcine reproductive and respiratory syndrome virus in semen after experimental infection in boars. *J Am Vet Med Assoc.* 1994;204:1943-1948.

Takai H, Pedersen S, Johnson JO, Metz JHM, Groot Koerkamp PWG, Uenk GH, Phillips VR, Holden MR, Sneath RW, Short JL, White RP, Hartung J, Seedorf J, Schröder M, Linkert KH, Wathes CM. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in northern Europe. *J agric Engng Res.* 1998;70:59-77.

Terpstra FG, van't Wout AB, Schuitemaker H, van Engelenburg FA, Dekkers DW, Verhaar R. Potential and limitation of UVC irradiation for the inactivation of pathogens in platelet concentrates. *Transfusion.* 2008;48:304-313.

Thelin A, Tegler O, Rylander R. Lung reactions during poultry handling related to dust and bacterial endotoxin levels. *Eur J Respir Dis.* 1984;65:266-271.

Thorne PS, Kiekhafer MS, Whitten P, Donham KJ. Comparison of bioaerosol sampling methods in barns housing swine. *Appl Environ Microbiol.* 1992;58:2543-2551.

Torremorell M, Pijoan C, Janni K, Walker R, Soo Joo H. Airborne transmission of *Actinobacillus pleuropneumoniae* and porcine reproductive and respiratory syndrome virus in nursery pigs. *Am J Vet Res.* 1997;58:828-832.

- Tran VV, Park D, Lee YC. Indoor air pollution, related human diseases, and recent trends in control and improvement of indoor air quality. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17:2927. doi: 10.3390/ijerph17082927.
- Truyen U, Streck AF. Porcine parvovirus. In: Zimmerman JJ, Karriker LA, Ramirez A, Schwartz KJ, Stevenson GW, Zhang J, Hrsg. *Disease of swine*. 11. Aufl. Hoboken (New Jersey): Wiley-Blackwell; 2019. p. 611-621.
- Tseng CC, Li CS. Inactivation of virus-containing aerosols by ultraviolet germicidal irradiation. *Aerosol Sci Technol*. 2005;39:1136–1142.
- van Belkum A, Verkaik NJ, de Vogel CP, Boelens HA, Verveer J, Nouwen JL, Verbrugh HA, Wertheim HFL. Reclassification of *Staphylococcus aureus* nasal carriage types. *J Infect Dis*. 2009;199:1820-1826.
- van Doorselaere J, Brar MS, Shi M, Karniychuk U, Leung CC, Nauwynck HJ. Complete genome characterization of East European Type 1 subtype 3 porcine reproductive and respiratory syndrome virus. *Virus Genes*. 2012;44:51-54.
- van Duijkeren E, Hengeveld P, Zomer TP, Landman F, Bosch T, Haenen A, van de Giessen A. Transmission of MRSA between humans and animals on duck and turkey farms. *J Antimicrob Chemother*. 2016;71:58-62.
- van't Klooster CE, Roelofs PFMM, den Hartog LA. Effect of filtration, vacuum cleaning and washing in pig houses on aerosol levels and pig performance. *Livest Prod Sci*. 1993;33:171–182.
- van Loo I, Huijsdens X, Tiemersma E, de Neeling A, van de Sande-Bruinsma N, Beaujean D, Voss A, Kluytmans J. Emergence of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* of animal origin in humans. *Emerg Infect Dis*. 2007;13:1834–1839.
- van Thriel C, Schäper M, Kieswetter E, Kleinbeck S, Juran S, Blaszkewicz M, Fricke HH, Altmann L, Berresheim H, Brüning T. From chemosensory thresholds to whole body exposures-experimental approaches evaluating chemosensory effects of chemicals. *Int Arch Occup Environ Health*. 2006;79:308–321.
- Voglmayr T. PRRSV: Kontrolle und Eradikation. *Der fortschrittliche Landwirt*. 2006;5:22-23.
- Voss A, Loeffen F, Bakker J, Klaassen C, Wolf M. Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in pig farming. *Emerg Infect Dis*. 2005;11:1965-1966.

- Wagstrom EA, Chang CC, Yoon KJ, Zimmerman JJ. Shedding of porcine reproductive and respiratory syndrome virus in mammary gland secretions of sows. *Am J Vet Res.* 2001;62:1876-1880.
- Walker CM, Ko G. Effect of ultraviolet germicidal irradiation on viral aerosols. *Environ Sci Technol.* 2007;41:5460–5465.
- Wang X, Zhang Y, Riskowski GL. Dust spatial distribution in a typical swine building. *International symposium on dust control in animal production facilities; 1999 May 30 - June 02; Aarhus, Denmark. Aarhus: Congress proceedings; 1999. p. 48-55.*
- Wathes CM, Randall JM. Aerosol sampling in animal houses. *Proceedings of a workshop held at the University of Bristol, Report EU 11877. Luxembourg: Commission of the European Communities; 1989.*
- Wells WF. On air-borne infection: study II. Droplets and droplet nuclei. *Am J Hyg.* 1934;20:611-618.
- Wells WF, Fair MG. Viability of *B. coli* exposed to ultra-violet radiation in air. *Science.* 1935;82:280-281.
- Wells WF, Wells MW, Wilder TS. The environmental control of epidemic contagion I: an epidemiologic study of radiant disinfection of air in day schools. *Am J Hyg.* 1942;35:97-121.
- Wells WF. *Airborne contagion and air hygiene.* 1. Aufl. Cambridge (Massachusetts): Harvard University Press; 1955.
- Wenke C, Pospiech J, Reutter T, Truyen U, Speck S. Efficiency of different air filter types for pig facilities at laboratory scale. *PLoS ONE* 2017;12(10):e0186558. doi: 10.1371/journal.pone.0186558.
- Wenke C, Pospiech J, Reutter T, Altmann B, Truyen U, Speck S. Impact of different supply air and recirculating air filtration systems on stable climate, animal health, and performance of fattening pigs in a commercial pig farm. *PLoS ONE* 2018;13(3):e0194641. doi: 10.1371/journal.pone.0194641.
- Wills RW, Zimmerman JJ, Yoon KJ, Swenson SL, Hoffman LJ, McGinley MJ, Hill HT, Platt KB. Porcine reproductive and respiratory syndrome virus: routes of excretion. *Vet Microbiol.* 1997;57:69-81.

Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMEL (WBA). Wege zu einer gesellschaftlich akzeptierten Nutztierhaltung. Berlin: Kurzfassung des Gutachtens. 2015 (zitiert am 08.02.2021):1-64,

<https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/agrarpolitik/GutachtenNutztierhaltung-Kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=2>.

Witte W, Mielke M. Community MRSA. Zentralbl Chir. 2007;132:124-129.

Wong E, Linton RH, Gerrard DE. Reduction of *Escherichia coli* and *Salmonella senftenberg* on pork skin and pork muscle using ultraviolet light. Food Microbiol. 1998;15:415-423.

Wrathall AE, Cartwright SF, Wells DE, Jones PC. Maternally-derived antibodies to porcine parvovirus and their effect on active antibody production after vaccination with an inactivated oil-emulsion vaccine. Vet Rec. 1987;120:475-478.

Xu P, Peccia J, Fabian P, Martyny JW, Fennelly KP, Hernandez M, Miller SL. Efficacy of ultraviolet germicidal irradiation of upper-room air in inactivating airborne bacterial spores and mycobacteria in full-scale studies. Atmos Environ. 2003;37:405-419.

Zeida JE, Barber E, Dosman JA, Olenchok SA, McDuffie HH, Rhodes C, Hurst T. Respiratory health status in swine producers relates to endotoxin exposure in the presence of low dust levels. J Occup Med. 1994;36:49-56.

Zhao Y, Zhu A, Tang J, Tang C, Chen J, Liu J. Identification and measurement of staphylococcal enterotoxin-like protein I (SEII) secretion from *Staphylococcus aureus* clinical isolate. J Appl Microbiol. 2016;121:539-546.

Zimmerman J, Dee SA, Holtkamp DJ, Murtaugh MP, Stadejek T, Stevenson GW, Torremorell M, Yang H, Zhang J. Porcine reproductive and respiratory syndrome viruses (Porcine Arteriviruses). In: Zimmerman JJ, Karriker LA, Ramirez A, Schwartz KJ, Stevenson GW, Zhang J, Hrsg. Disease of swine. 11. Aufl. Hoboken (New Jersey): Wiley-Blackwell; 2019. p. 685-708.

Zimmermann W, Plonait WH. Erkrankungen des Atmungsapparates. In: Waldmann KH, Wendt M, Hrsg. Lehrbuch der Schweinekrankheiten. 4. Aufl. Stuttgart: Parey Verlag; 2004. p. 111-150.

Zucker BA. Stallklima. In: Zucker BA, Hrsg. Kompendium der Tierhygiene. 5. Aufl. Berlin: Lehmanns Media; 2017. p. 94-110.

Danksagung

Als erstes gilt mein Dank Prof. Dr. Uwe Truyen, der mir zum einen mit der Zuweisung und Bereitstellung des Themas die Möglichkeit gab eine Dissertation zu verfassen, der mich zum anderen in der Planung und Durchführung des Projektes unterstützte und mich als Doktorvater betreute.

Besonders möchte ich mich auch bei Frau Dr. Stephanie Speck bedanken, die mich als Mentorin mit Ihrem umfangreichen Fachwissen und Ihren zahlreichen Erfahrungen während der gesamten Projektzeit begleitete. Selbst darüber hinaus unterstützte Sie mich weiterhin mit Rat und Kritik, sodass Sie einen entscheidenden Anteil zum Abschluss dieser Doktorarbeit leistete.

Dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) danke ich für die Bereitstellung der finanziellen Mittel zur Durchführung des Projektes, welche im Rahmen der Förderung von Innovationen zur Verbesserung der Haltung von landwirtschaftlichen Nutztieren über die Landwirtschaftliche Rentenbank bereitgestellt wurde.

Weiterhin danke ich der Firma Reventa GmbH, und ganz besonders Herrn Tobias Reutter, für die Planung, die Bereitstellung und Konstruktion, sowie dem Einbau der erprobten Technik in unserem Versuchsstall. Herr Reutter hatte immer ein offenes Ohr für technische Probleme, die im Zuge der neuen Technik entstanden. Er hat immer maßgeblich zu einer Lösungsfindung beigetragen und dafür lange Autofahrten in Kauf genommen. Danke für die tolle Zusammenarbeit.

Herrn Dr. Matthias Horn (IMISE) danke ich für die Beratung und Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Daten des Stallversuchs.

Ich danke den Mitarbeitern des Instituts für Tierhygiene und Öffentliches Veterinärwesen der Universität Leipzig für ihre Unterstützung im Labor und im Stall. Außerdem danke ich Frau Dana Rüster für die tatkräftige Hilfe bei der Durchführung des Laborversuchs, bei dem sie selbst ihren kleinen Finger opferte, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen. Mein Dank gilt weiterhin Herrn Mario Reinhardt für seine Hilfe bei der Probennahme in den Schweineställen. Ohne unsere Freundschaft hätte das ganze Projekt nur halb so viel Spaß gemacht. Frau Evelin Brumme danke ich für Ihre Unterstützung bei der Weiterverarbeitung der Proben. Herr Enrico Basler ist der Tierarzt, dem die Sauen vertrauen. Ich danke ihm, dass er sich um „meine“ Schweine so hervorragend gekümmert hat. Allen anderen Doktoranden danke ich für die Übernahme von Wochenenddiensten, die die Versorgung der Tiere gewährleisteten. Ohne diese große Hilfsbereitschaft hätte ich sonst kein freies Wochenende gehabt. Danke!

Zu guter Letzt danke ich meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden für die seelische und finanzielle Unterstützung während der gesamten Studienzzeit. Ohne diese Unterstützung

hätte ich das alles nicht geschafft. Seelische Unterstützung habe ich auch von meiner Hündin Abbie und meinem Kater Louis erhalten, die mir in den zahlreichen Stunden des Lernens und des Schreibens Gesellschaft leisteten und deren bedingungslose Liebe über so manch schwere Zeit hinweggeholfen hat. Und selbstverständlich danke ich meinem Partner Andreas, der mich seit dem dritten Semester begleitet, ertragen, geliebt und unterstützt hat und es nun nach acht Jahren immer noch tut. Danke für deine Geduld, dein Verständnis, deine Liebe und jegliche Form der Hilfe, die du mir entgegengebracht hast.