

Forschungsbericht

Nr. 144

Analyse der Zusammensetzung von Staubemissionen
aus Ställen verschiedener Nutztierarten und
Bestimmung des Gravimetriefaktors

Verfasser: Christoph Nannen und Wolfgang Büscher

Institut für Landtechnik

Herausgeber: Lehr- und Forschungsschwerpunkt „Umweltverträgliche und Standortgerechte Landwirtschaft“, Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Meckenheimer Allee 172 15, 53115 Bonn
Tel.: 0228 – 73 2285; Fax.: 0228 – 73 1776
www.usl.uni-bonn.de

Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
Bonn, Juni 2007

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. Wolfgang Büscher

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. agr. Christoph Nannen

Institut für Landtechnik
Nussallee 5
53115 Bonn

Zitiervorschlag:

NANNEN, C. UND W. BÜSCHER (2007): Analyse der Zusammensetzung von Staubemissionen aus Ställen verschiedener Nutztierarten und Bestimmung des Gravimetriefaktors. Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 144, 154 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XI
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole.....	XIII
Verzeichnis der verwendeten Formeln	XVI
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielsetzung	2
2 Literaturanalyse	3
2.1 Definition von Partikeln	3
2.2 Definitionen des Partikeldurchmessers	5
2.3 Aerodynamische Eigenschaften von Partikel	6
2.3.1 Masse und Verteilung, Größe und Dichte	7
2.3.2 Partikelform	9
2.3.3 Sedimentation	12
2.4 Biologische und chemische Eigenschaften von Aerosolen	15
2.5 Quellen des Stallstaubes	18
2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen	18
2.7 Partikelemissionen aus der Tierhaltungsanlagen.....	20
2.7.1 Staubbelastungen und Emissionen aus dem Haltungssystem Schwein.....	21
2.7.2 Staubbelastungen und Emissionen aus dem Haltungssystem Rind.....	23
2.7.3 Staubbelastungen und Emissionen aus dem Haltungssystem Geflügel.....	23
2.8 Messtechnik zur Bestimmung von Partikelemissionen.....	24
2.8.1 Gravimetrische Bestimmung	25
2.8.2 Streulichtspektroskopische Bestimmung.....	26
2.9 Lüftungssysteme in Tierställen.....	28
2.9.1 Zwangslüftung	28
2.9.2 Freie Lüftung	32

2.9.3	Methoden zur Bestimmung des Luftwechsels	36
3	Material und Methoden	42
3.1	Beschreibung der untersuchten Haltungssysteme	42
3.1.1	Haltungssystem Schwein.....	43
3.1.2	Haltungssystem Rind.....	49
3.1.3	Haltungssystem Geflügel	52
3.2	Messvorschriften	55
3.3	Messzeiträume.....	55
3.4	Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit der Stäube	56
3.5	Bestimmung der Quellemissionsfaktoren	56
3.5.1	Partikelmassenkonzentration.....	57
3.5.2	Luftvolumenstrom und Klimadaten	62
3.6	Tieraktivitätssensoren.....	66
4	Ergebnisse	68
4.1	Struktur der eigenen Untersuchungen	68
4.2	Ergebnisse der Voruntersuchungen.....	69
4.2.1	Auswertungsintervall	69
4.2.2	Validierung der Tracergasmethode	70
4.3	Sedimentationsgeschwindigkeit und Partikeldichten.....	70
4.4	Partikelgrößenverteilung, Luftvolumenstrom	72
4.4.1	Schweinehaltung	74
4.4.2	Rinderhaltung	79
4.4.3	Geflügelhaltung.....	80
4.4.4	Zwischenfazit zu Partikelmassenverteilung und Luftvolumenstrom	83
4.5	Partikelmassenkonzentration und Quellemission.....	84
4.5.1	Schweinehaltung	84
4.5.2	Rinderhaltung	91
4.5.3	Geflügelhaltung.....	92
4.5.4	Abschätzung der Jahresmittel zur Partikelmassenkonzentration und Quellemission.....	96
4.5.5	Zwischenfazit zur Partikelmassenkonzentration und Quellemission.....	98
4.6	Tieraktivität in der Schweinemast.....	99

4.6.1	Tieraktivität – Tagesverläufe.....	99
4.6.2	Tieraktivität und Quellemission	101
4.6.3	Zwischenfazit zu den Tieraktivitätsmessungen.....	106
5	Diskussion und Handlungsempfehlung	107
5.1	Auswahl der untersuchten Stallsysteme	107
5.2	Bewertung der eingesetzten Messmethodik	107
5.2.1	Partikelmessstechnik.....	107
5.2.2	Messung des Luftvolumenstroms.....	108
5.3	Partikelmassenverteilung.....	109
5.4	Einflüsse von Luftvolumenstrom und Tieraktivität auf die partikelförmigen Emissionen	110
5.4.1	Zwangsgelüftete Ställe	110
5.4.2	Freigelüftete Ställe.....	113
5.5	Einfluss von Haltung und Management auf die Luftqualität	114
5.6	Zeitliche Auflösung der Messung.....	118
5.7	Fazit und Ausblick.....	123
6	Zusammenfassung	124
7	Literaturverzeichnis	126
8	Anhang.....	137
9	Liste für weitere Forschungsaktivitäten.....	145
10	Liste der Veröffentlichungen.....	147
11	Liste der Vorträge	149
12	Liste der Posterpräsentationen	151
13	Kurzfassung	153

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Seite
Abbildung 1: Ausbreitung luftfremder Stoffe (MÜLLER, H-J., 2003)	1
Abbildung 2: Einteilung der "Partikel" nach MÜLLER, W., 2002.....	3
Abbildung 3: Komponenten eines Bioaerosols	4
Abbildung 4: Streulichtdurchmesser in Abhängigkeit der Orientierung eines Partikels zur Lichtquelle, Streuwinkel = 90° (nach SCHMITT- PAUKSZTAT, 2006).....	6
Abbildung 5: Respiratorisches System und Tiefe der Eindringung der Partikel (FIRMA SCHÄFER)	8
Abbildung 6: Methoden zur Bewertung von Partikelformen (ZLATEV, 2005).....	10
Abbildung 7: Sinkgeschwindigkeiten für unterschiedliche Partikelgrößen für eine Partikeldichte von 1 g/cm ³ und einer Lufttemperatur von 15°C (nach PEDERSEN, 1992)	13
Abbildung 8: Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Stäube in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers (nach SCHMITT-PAUKSZTAT et al., 2005)	14
Abbildung 9: Aufbau und Prinzip eines einfachen Kaskadenimpaktors (nach MITCHELL, 1995)	25
Abbildung 10: Messprinzip eines Streulichtspektrometers (nach GOLZ, 2004).....	26
Abbildung 11: Ansicht eines Streulichtspektrometers der Firma GRIMM Aerosoltechnik GmbH.....	26
Abbildung 12: Strahllüftung in einem Abferkelabteil (DLG, 2006)	29
Abbildung 13: Porendeckenlüftung (nach JUNGBLUTH et al., 2005).....	29
Abbildung 14: Zuluft einströmung über Rieselkanal	30
Abbildung 15: Raumluftströmung bei Futterganglüftung in der Sommer- und Wintersituation (nach JUNGBLUTH et al., 2005)	31
Abbildung 16: Oberflurabsaugung mit Absperrschiebern.....	32
Abbildung 17: Prinzip der Trauf-First-Lüftung (modifiziert, nach HAIDN, MÜLLER, 2003).....	34
Abbildung 18: Prinzip der Querlüftung (nach HAIDN, MÜLLER, 2003)	34
Abbildung 19: Prinzip der Kombination von Trauf-First-Lüftung und Querlüftung	35
Abbildung 20: Erwünschtes Strömungsbild in einem Offenfrontstall (nach VAN CAENEGEM, 2006).....	36
Abbildung 21: Einbausituationen von Messventilatoren im turbulenten Luftstrom und zu erwartende Messgenauigkeit (nach BÜSCHER et al., 2001)	37
Abbildung 22: Untersuchte Ställe im Bereich Schwein	43

Abbildung 23:	Skizze einer Abferkelbucht (KTBL-Schrift 446).....	44
Abbildung 24:	Skizze eines Wartestalls mit Abruffütterung (KTBL-Schrift 446)	45
Abbildung 25:	Skizze eines Deckzentrums mit Fress-Liegebuchten und mittig liegendem Laufbereich (KTBL-Schrift 446).....	45
Abbildung 26:	Skizzen der beiden Ferkelaufzuchtsabteile (links Kleingruppe, rechts Großgruppe) (KTBL-Schrift 446).....	46
Abbildung 27:	Skizze einer Mastschweinebucht (KTBL-Schrift 446)	47
Abbildung 28:	Skizze eines mit Stroh eingestreuten Schweinemastabteils (KTBL-Schrift 446).....	48
Abbildung 29:	Untersuchte Ställe im Bereich Rind	49
Abbildung 30:	Lüftungseinstellung Sommer links und rechts des Futtertisches, Stall Rind_TF	50
Abbildung 31:	Firstöffnung und Zuluftsystem im Stall Rind_SB.....	50
Abbildung 32:	Lage des Liegeboxenlaufstalls „Rind_TF“	51
Abbildung 33:	Lage des Liegeboxenlaufstalls „Rind_SB“	51
Abbildung 34:	Untersuchte Ställe in der Geflügelhaltung	52
Abbildung 35:	Querschnitt eines Legehennenstalls mit Käfigsystem.....	53
Abbildung 36:	Querschnitt eines Legehennenstalls mit Volierengestellen, Kaltscharraum und Auslauf	53
Abbildung 37:	Lage des untersuchten Putenstalls.....	54
Abbildung 38:	Aufbau des Sedimentationszylinders (nach SCHMITT-PAUKSZTAT, 2006).....	56
Abbildung 39:	Messaufbau für die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration (1)....	57
Abbildung 40:	Messaufbau für die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration (2)....	58
Abbildung 41:	Messaufbau zur Bestimmung der Partikelkonzentration in den freigelüfteten Ställen mit Blick vom Futtertisch in den First.....	59
Abbildung 42:	Messaufbau zur Luftvolumenstromermittlung in zwangsgelüfteten Ställen.....	63
Abbildung 43:	Messzyklus zur Ermittlung der Luftwechselrate.....	63
Abbildung 44:	Ultraschallanemometer auf dem First des Liegeboxenstalls.....	64
Abbildung 45:	Aufbau der Messtechnik.....	65
Abbildung 46:	eingesetzter Aktivitätssensor	67
Abbildung 47:	Messanordnung der Aktivitätssensoren und abgetasteter Bereich.....	67
Abbildung 48:	Abweichung der berechneten Halbstundenmittelwerte der Partikelquellemission vom Tagesmittelwert in der Schweinemast im Bereich Endmast	69
Abbildung 49:	Verhältnis von Dichte zu Form der Partikel bei der Tierart Schwein.....	71

Abbildung 50:	Partikelgrößenabhängige Dichte von Stäuben aus Ställen mit unterschiedlichen Tierarten und Haltungsformen	71
Abbildung 51:	Partikelanzahl- und Massenverteilung in der Ferkelaufzucht (FA_2) unter Sommerbedingungen.....	72
Abbildung 52:	Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom im Abferkelbereich	75
Abbildung 53:	Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom im Warte-/Deckbereich.....	76
Abbildung 54:	Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Ferkelaufzucht	76
Abbildung 55:	Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Vormast.....	77
Abbildung 56:	Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Vormast mit Einstreu	78
Abbildung 57:	Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Endmast.....	79
Abbildung 58:	Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Rinderhaltung	80
Abbildung 59:	Partikelmassenkonzentration in der Geflügelhaltung.....	81
Abbildung 60:	Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in der Putenmast unter Sommerbedingungen (nach SCHNEIDER, T., 2006).....	81
Abbildung 61:	Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in der Putenmast unter Übergangsbedingungen (nach SCHNEIDER, T., 2006)	82
Abbildung 62:	Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in der Putenmast unter Winterbedingungen (nach SCHNEIDER, T., 2006)	83
Abbildung 63:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission im Abferkelbereich.....	85
Abbildung 64:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission im Wartestall mit Selbstfangbuchten.....	85
Abbildung 65:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission im Wartestall mit Abruffütterung.....	86
Abbildung 66:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Ferkelaufzucht mit Oberflurabsaugung	87
Abbildung 67:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Ferkelaufzucht mit Unterflurabsaugung.....	88
Abbildung 68:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Vormast ohne Einstreu.....	89
Abbildung 69:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Vormast mit Einstreu.....	89
Abbildung 70:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Endmast.....	90
Abbildung 71:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission in Stall Rind_SB.....	91
Abbildung 72:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission in Stall Rind_TF.....	92

Abbildung 73:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission von Legehennen in der Käfighaltung.....	93
Abbildung 74:	Partikelmassenkonzentration und Quellemission von Legehennen in der Volierenhaltung.....	93
Abbildung 75:	Partikelmassenkonzentration in der Putenmast (nach SCHNEIDER, T., 2006).....	94
Abbildung 76:	Partikelquellemission in der Putenmast (nach SCHNEIDER, T., 2006).....	95
Abbildung 77:	Partikelquellemission der drei Messdurchgänge mit linearer Anpassung (nach SCHNEIDER, T., 2006)	96
Abbildung 78:	Tagesverlauf der Tieraktivität in der Vormast unter Sommer- und Übergangsbedingungen.....	99
Abbildung 79:	Tagesverlauf der Tieraktivität in der Endmast unter Sommer- und Winterbedingungen	100
Abbildung 80:	Tagesverlauf der Tieraktivität in der Vormast in eingestreuten und strohlosen Ställen	101
Abbildung 81:	Linearer Zusammenhang zwischen Tieraktivität und Partikelmassenkonzentration im Stallinnenraum	102
Abbildung 82:	Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Vormast unter Sommerbedingungen.....	103
Abbildung 83:	Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Vormast unter Übergangsbedingungen.....	103
Abbildung 84:	Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Vormast unter Übergangsbedingungen im eingestreuten System ...	104
Abbildung 85:	Zusammenhang zwischen Partikelmassenkonzentration und Tieraktivität in der Endmast unter Sommerbedingungen	105
Abbildung 86:	Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Endmast unter Winterbedingungen.....	105
Abbildung 87:	Steuerung des Luftwechsels in einem zwangsgelüfteten Stallsystem....	111
Abbildung 88:	Verhältnis der Partikelgrößenfraktionen, gemessen im Stallinnenraum in einer Höhe von 1,2 m bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen, in Relation zur Lufrate 3.000 bis 3.400 m ³ h ⁻¹ (=100%).....	112
Abbildung 89:	Verhältnis der Partikelgrößenfraktionen, gemessen in der Abluft bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen, in Relation zur Lufrate 3.000 bis 3.400 m ³ h ⁻¹ (=100%)	112
Abbildung 90:	Durchschnittliche Abluft-Partikelmassenkonzentration auf Basis von Halbstundenmittelwerten bei strohloser und eingestreuter Haltung in der Vormast	114
Abbildung 91:	Tageszeitlicher Verlauf der Partikelmassenkonzentration im Stall Rind_SB zu verschiedenen Jahreszeiten	115
Abbildung 92:	Partikelfreisetzung beim Spielen der Kuh mit Futter	116

Abbildung 93: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration bei Wartesaunen in Abhängigkeit der Haltungssysteme Abruffütterung und manuelle Fütterung mit Selbstfangbuchten.....	117
Abbildung 94: Vergleich der Berechnung der Partikelquellemission aus Tagesmittelwerten oder Halbstundenmittelwerten von Luftvolumenstrom und Partikelmassenkonzentration am Beispiel der Rohdaten aus der Endmast	118
Abbildung 95: Durchschnittlicher jahreszeitlicher Tagesverlauf des Luftvolumenstroms in der Endmast	119
Abbildung 96: Luftvolumenstrom und Partikelmassenkonzentration unter Sommerbedingungen	120
Abbildung 97: Luftvolumenstrom und Luftfeuchtigkeit unter Sommerbedingungen....	120
Abbildung 98: Luftvolumenstrom und Tieraktivität unter Sommerbedingungen	120
Abbildung 99: Luftvolumenstrom und Partikelmassenkonzentration unter Übergangsbedingungen	121
Abbildung 100: Luftvolumenstrom und Luftfeuchtigkeit unter Übergangsbedingungen	121
Abbildung 101: Luftvolumenstrom und Partikelmassenkonzentration unter Winterbedingungen	122
Abbildung 102: Luftvolumenstrom und Luftfeuchtigkeit unter Winterbedingungen	122
Abbildung 103: Luftvolumenstrom und Tieraktivität unter Winterbedingungen	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle		Seite
Tabelle 1:	Zusammenstellung wichtiger disperser Systeme und ihrer Bezeichnungen (MÜLLER, W., 2002)	4
Tabelle 2:	Partikelgrößen in μm und tierartspezifische Massenanteile (AARNINK et al, 1999)	7
Tabelle 3:	Partikelfractionen und zugehörige Partikelgrößen (EN 481).....	9
Tabelle 4:	Inhaltsstoffe von Schweinestallstäuben; prozentuale Anteile an der Substratmasse in %.....	17
Tabelle 5:	Einteilung von Messparametern und Messmethoden zur quantitativen und qualitativen Erfassung von luftgetragenen Partikeln (verändert nach HARTUNG, 2001)	27
Tabelle 6:	Theoretische aerodynamische Durchmesser von Latexkugeln unterschiedlicher Größe bei einem Abscheidegrad von 50 %.....	61
Tabelle 7:	Umfang der Untersuchungen.....	68
Tabelle 8:	Luftwechselzahl n [h^{-1}] durch unterschiedliche Messmethoden bestimmt (SCHNEIDER et al. 2005).....	70
Tabelle 9:	Mittlere Verteilung der Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in den untersuchten Haltungssystemen	73
Tabelle 10:	Abschätzung der Jahresmittelwerte sowie der Emissionsfaktoren.....	97

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
κ		Partikelformfaktor
κ_i		Partikelformfaktor in Abhängigkeit der Partikelfraktion i
$\rho_{Dolomit}$	[g cm ⁻³]	Dichte von Dolomitstaub (Kalibration-Standard)
ρ_P	[g cm ⁻³]	Partikeldichte
ρ_{Luft}	[kg m ⁻³]	Dichte der Luft
$\Psi_{U/A}$		Sphärizität aus Partikelumfang und Projektionsfläche
Ψ_{Wa}		Sphärizität nach Wadell, zweidimensional
η	[μPa s]	dynamische Viskosität der Luft
\bar{v}	[m s ⁻¹]	mittlere gewichtete Luftgeschwindigkeit
ΔT	[K]	Temperaturdifferenz
Δp	[kg m ⁻³]	Differenz der Luftdichte innen und außen
A_K	[m]	Querschnittsfläche des Strömungskanals
A	[μm]	Flächeninhalt der Projektionsfläche
ABF		Schwein, Abferkelbereich
c_{Abluft}	[g m ⁻³]	Partikelkonzentration in der Abluft
$c_{außen}$	[g m ⁻³]	Partikelkonzentration außen (Hintergrundkonzentration)
c_{ti}	[g m ⁻³]	Massenkonzentration in der Raumluft zum Zeitpunkt t_i
c_{t0}	[g m ⁻³]	Massenkonzentration zum Zeitpunkt $t = 0$
$c_i(t)$	[g m ⁻³]	Massenkonzentration in Abhängigkeit von der Zeit
$C_{Stalleuft}$	[kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	spezifische Wärmekapazität der Luft
$c_{Tracer Abluft}$	[g m ⁻³]	Konzentration des Tracergases in der Abluft
$c_{Tracer Zuluft}$	[g m ⁻³]	Konzentration des Tracergases in der Zuluft
C_C		Cunningham-Korrektur-Faktor
CO		Kohlenstoffmonoxid
CO ₂		Kohlenstoffdioxid
c_{t0}	[g m ⁻³]	Massenkonzentration zum Startzeitpunkt $t = 0$
d	[μm]	Partikeldurchmesser
DIN		Deutsche Industrie Norm
e		Euler'sche Zahl
EM_1		Schwein, Endmast Stall 1, konventionell

EM_2		Schwein, Endmast Stall 2, konventionell
FA_1		Ferkelaufzucht mit Abluft-Oberflur-Absaugung
FA_2		Ferkelaufzucht mit Abluft-Unterflurabsaugung
g	$[m\ s^{-2}]$	Erdbeschleunigung
GmbH		Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GV		Großvieheinheit (1 GV = 500 kg Lebendmasse)
H ₂ O		Wasser
KG		Kapitalgesellschaft
Leg_Kä		Legehenne, Käfighaltung
Leg_Vol		Legehenne, Volierenhaltung
\dot{m}_p	$[g\ h^{-1}]$	Partikelmassenstrom
\dot{m}_Q	$[g\ h^{-1}]$	Tracermassenstrom
m_{F_i}		Massenfaktor einer Größenklasse der Aerosolspektrometers
N		Stickstoff
Pu_Ma		Putenmast
$\dot{Q}_{abgeführt}$	$[W]$	abgeführte Wärmemenge
r		Korrelationskoeffizient
r_i	$[\mu m]$	Radius der Partikel in Abhängigkeit der Größenklasse
R ²		Bestimmtheitsmaß
Rind_SB		Rinderstall mit Spaceboard-Lüftung
Rind_TF		Rinderstall mit Trauf-First-Lüftung
SF ₆		Schwefelhexafluorid
t	$[s]$	Zeit
U	$[\mu m]$	Umfang eines Partikels
V	$[m^3]$	Stallvolumen
\dot{V}	$[m^3\ h^{-1}]$	Luftvolumenstrom
VDI		Verein Deutscher Ingenieure
VM_1		Schwein, Vormast Stall 1, konventionell
VM_2		Schwein, Vormast Stall 2, konventionell
VM_Streu		Schwein, Vormast mit Einstreu Stroh
v_s	$[m\ s^{-1}]$	Sedimentationsgeschwindigkeit
WS_AF		Wartestall mit Abruffütterung
WS_SB		Schwein, Wartestall mit Selbstfangbuchten

$X_{a,z}$	[μm]	Durchmesser eines Kreises, der die Projektionsfläche umschließt
$X_{p,s}$	[μm]	Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises bei stabiler Teilchenlage

Verzeichnis der verwendeten Formeln

Formel	Seite
Formel 1: Verhältnis von Partikelumfang zu Projektionsfläche (STARK, MÜLLER, 2004).....	12
Formel 2: Sphärizität nach WADELL (1933), zweidimensional	12
Formel 3: Sedimentationsgeschwindigkeit	14
Formel 4: Gleichung für den Emissionsmassenstrom	20
Formel 5: Bestimmung des Luftvolumenstroms durch Luftgeschwindigkeit und Querschnittsfläche	37
Formel 6: Berechnung des Volumenstroms mit der Wärmebilanzmethode	38
Formel 7: Abklingmethode (MÜLLER, H.-J. 2001)	40
Formel 8: Formel zur Berechnung der Konzentrationsdifferenz bei der konstanten Tracergas-Methode	40
Formel 9: Berechnung des Luftvolumenstroms mit der konstanten Tracergas-Methode.....	41
Formel 10: Berechnung des Massenfaktors in Abhängigkeit der Größenklasse des Aerosolspektrometers.....	59
Formel 11: Berechnung der Partikelmassenkonzentration aus der Partikelanzahlkonzentration	61

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

In der LUFTQUALITÄTSRICHTLINIE der EU (1999/30/EG) wurden für Luftschadstoffe Grenzwerte festgelegt, die seit Januar 2005 in Deutschland verbindlich sind. Gegenüber der vorherigen Fassung fand erstmals eine Beschreibung von verschiedenen schützenswerten Gütern statt. Als Schutzgüter werden der Mensch, der Tier- und Pflanzenbestand, ihre Lebensgemeinschaften, Lebensräume und deren Wechselbeziehungen sowie Kultur- und Sachgüter bezeichnet. Mit der Novellierung der TA-Luft und der BImSchV von 2002 wurden die Grenzwertregelungen für partikelförmige Emissionen in deutsches Recht umgesetzt. In der Öffentlichkeit wird über Feinstaubbelastungen in Städten diskutiert, die hauptsächlich durch Industrieanlagen und Verkehr verursacht werden. In diesem Zusammenhang zeigen arbeitsmedizinische Untersuchungen die gesundheitsschädigende Wirkung der Staubpartikel auf die Atemwege des Menschen. Die Art dieser Schädigungen hängt von verschiedenen physikalischen und chemischen Parametern der Partikel ab (KAPPOS et al., 2003). Relevante Faktoren sind die Größe, die Dichte und die Form.

Anders als in industriellen Bereichen ist über die physikalischen Eigenschaften der partikelförmigen Emissionen aus Nutztierställen in Abhängigkeit von Tierart und Haltungform jedoch nur wenig bekannt. Allerdings zeigen Berichte aus den letzten Jahren eine Zunahme der Atemwegserkrankungen des Stallpersonals (RADON et al., 1995).

Weiterhin bestimmen nicht alleine die Klimabedingungen die Transmission und damit die Immission, sondern auch die physikalischen Eigenschaften (s. Abbildung 1).

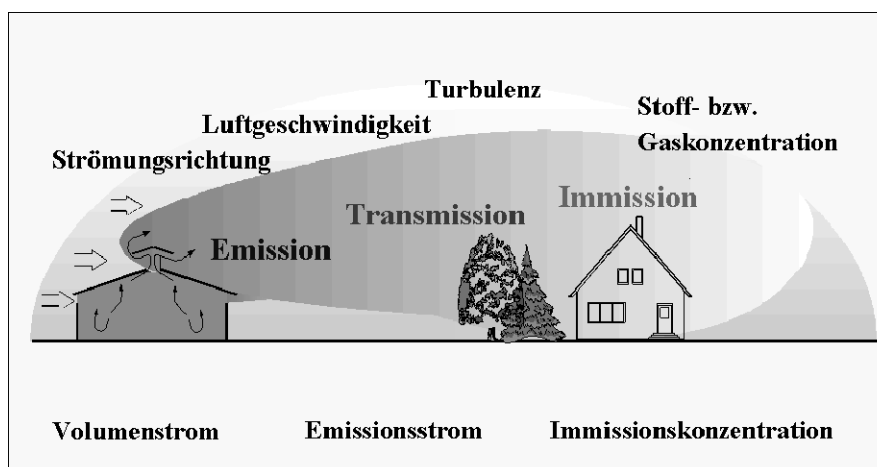


Abbildung 1: Ausbreitung luftfremder Stoffe (MÜLLER, H-J., 2003)

Zahlreiche methodische Fragen erschweren eine objektive Diskussion um die Thematik der partikelförmigen Emissionen. Die ordnungsgemäße Probennahme der Partikel zur Berechnung von Emissionsfaktoren steht dabei genauso im Vordergrund wie die Differenzierung zwischen verschiedenen Haltungsverfahren innerhalb einer Tierart.

Erst seit kurzem werden Modelle zur Berechnung der Ausbreitung von Partikeln entwickelt oder angepasst. Hier fehlt vor allem die Grundlage belastbarer Daten durch empirisch bestimmte Quellemissionen und Stoffeigenschaften. Quellemissionen aus dem Produkt von Volumenstrom und Staubkonzentration sind anlagenspezifisch. Staubkonzentration und Stoffeigenschaften sind wiederum abhängig von der Tierart und dem Haltungsverfahren im Stall. Derzeit wird im Allgemeinen - unabhängig von der Herkunft des Staubes - von Partikeln einer definierten Dichte und Größe ausgegangen.

1.2 Zielsetzung

Das Forschungsziel dieses Projektes liegt in der Analyse der Zusammensetzung von Stäuben, die aus Stallanlagen für Schweine, Rinder, Hühner und Puten emittiert werden. Außerdem sollen typische Quellemissionen dieser Tierhaltungsanlagen ermittelt werden. Dabei sind sowohl zwangsbelüftete als auch freigelüftete Anlagen unter Berücksichtigung der spezifischen Einflüsse von Stall, Klima und Tierbesatz zu untersuchen.

Zur Bestimmung der Quellemissionen sollen die Luftwechselraten der untersuchten Stallanlagen über verschiedene Methoden ermittelt und als Untersuchungsparameter einbezogen werden.

Die bei Modellrechnungen nötigen Stoffeigenschaften von Partikeln sind u.a. die Masse und die Dichte der Partikel sowie deren Sedimentationsverhalten. Eine Bestimmung der Partikeldichte über die Parameter Sedimentation und Partikelform hat als Ziel, genauere Umrechnungsfaktoren von der Partikelanzahl- in die Partikelmassenkonzentration zu ermitteln. Bisher existierende Untersuchungen zur Sedimentation sind sehr speziell; zumeist werden theoretische Berechnungen zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit genutzt. Weiterhin sollen vermutete Unterschiede der Partikelgrößenverteilungen und Partikeldichten in verschiedenen Haltungssystemen aufgedeckt und quantifiziert werden.

Eine genauere Beschreibung und Differenzierung der physikalischen Eigenschaften sowie deren Bewertung im Hinblick auf die Quellemissionen soll zu realistischen Ausgangsdaten für mögliche Ausbreitungsrechnungen führen.

2 Literaturanalyse

2.1 Definition von Partikeln

Kleinste Teilchen im festen oder flüssigen Aggregatzustand, welche in einem gasförmigen Medium suspensiert sind, bezeichnet man als **Aerosole**. Sie entstehen durch Zerstäubung oder Pulverisierung von flüssigen oder festen Stoffen (JARNYCH, 1976).

Durch Luftströmungen, Vibrationen, etc. werden Aerosole in einen Schwebезustand versetzt. Das Aerosol bildet im Schwebезustand ein disperses System mit dem umgebenen Medium, der Luft. Neben den Dispersionsaerosolen gibt es Kondensationsaerosole, die sich aus Einzelmolekülen und in der Luft befindlichen Dämpfen zusammensetzen. Des Weiteren kommen Mischformen dieser beiden Aerosolformen vor (ANGERSBACH-HEGER, 2002).

Wenn Materie als dispers bezeichnet wird, dann bildet sie kein einheitliches Ganzes, sondern sie ist in klar voneinander abgrenzbare Elementgruppen unterteilt (MÜLLER, W. 2002). In einem solchen System werden die dispersen Elemente als disperse Phase bezeichnet. Die disperse Phase wird von der kontinuierlichen Phase umgeben. Im weiteren Verlauf wird die disperse Phase als **Partikel** bezeichnet.

Es lässt sich nun folgende Einteilung (Abbildung 2) eines Partikels in drei Abschnitte vornehmen. Teilchen und Körner werden als festes Partikel, Tropfen als flüssiges Partikel und eine Blase als gasförmiges Partikel beschrieben (MÜLLER, W. 2002).

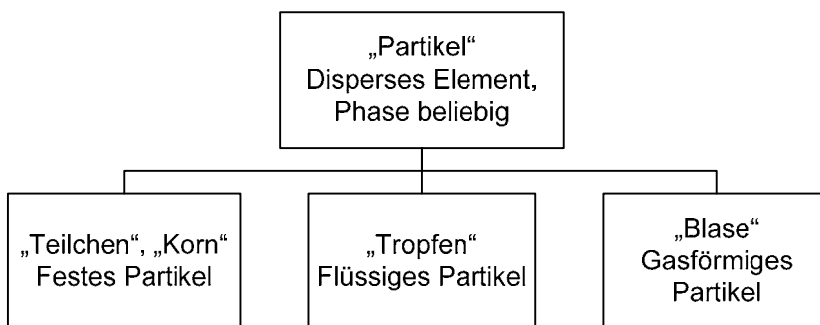


Abbildung 2 Einteilung der "Partikel" nach MÜLLER, W., 2002

Zusammenfassend sind in Tabelle 1 verschiedene disperse und kontinuierliche Phasen dargestellt, die in Kombination unterschiedliche Bezeichnungen führen. So werden in einem Aerosol das Gas als kontinuierliche Phase und das darin befindliche feste Teilchen oder der Flüssigkeitstropfen als disperse Phase bezeichnet.

Tabelle 1: Zusammenstellung wichtiger disperser Systeme und ihrer Bezeichnungen (MÜLLER, W., 2002)

Disperse Phase	Kontinuierliche Phase (Fluid)	Bezeichnung
Feste Teilchen (Partikel)	Flüssigkeit	Suspension, Schlamm
Feste Teilchen (Partikel)	Gas	Aerosol, Staubluft, Rauch
Flüssigkeitstropfen	Flüssigkeit	Emulsion
Flüssigkeitstropfen	Gas	Aerosol, Nebel
Gasblasen	Flüssigkeit	Blasensystem, Schaum

Mit dem Begriff *Bioaerosol* beschreibt man eine Konfiguration, die sich aus belebten und unbelebten Bestandteilen zusammensetzt. Die belebten Partikel haben einen biologischen Ursprung und biologische Aktivität (SEEDORF, HARTUNG, 2002). Sie können somit allergische, toxische, infektiöse, pharmakologische Prozesse auslösen. Zur Gruppe der belebten Bestandteile zählen Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze, Viren, Milben, Hefen, Protozoen und Produkte von Mikroorganismen wie Endotoxine, aber auch Mykotoxine und β -Glukane. Die unbelebten Partikel in den Bioaerosolen werden als *Staub* bezeichnet.

Für Stäube gibt die DFG (2006) folgende Definition an: "Stäube sind unbelebte disperse Verteilungen fester Stoffe in Gasen, die durch mechanische Prozesse oder durch Aufwirbelung entstehen". Feststoffaerosole, die durch Kondensation entstanden sind, nennt man Rauche. Als Nebel werden Aerosole mit flüssigen Teilchen bezeichnet. Dabei spielt es keine Rolle, ob sie durch Kondensation oder Dispergierung entstanden sind (JARNYCH, 1976). Stäube gehören zusammen mit Rauchen und Nebeln zu den Aerosolen. Diese Dispersionsaerosole entstehen unter natürlichen Bedingungen, aber auch bei Produktionsprozessen. In Abbildung 3 sind die bereits beschriebenen Komponenten des Bioaerosols aufgezeigt.

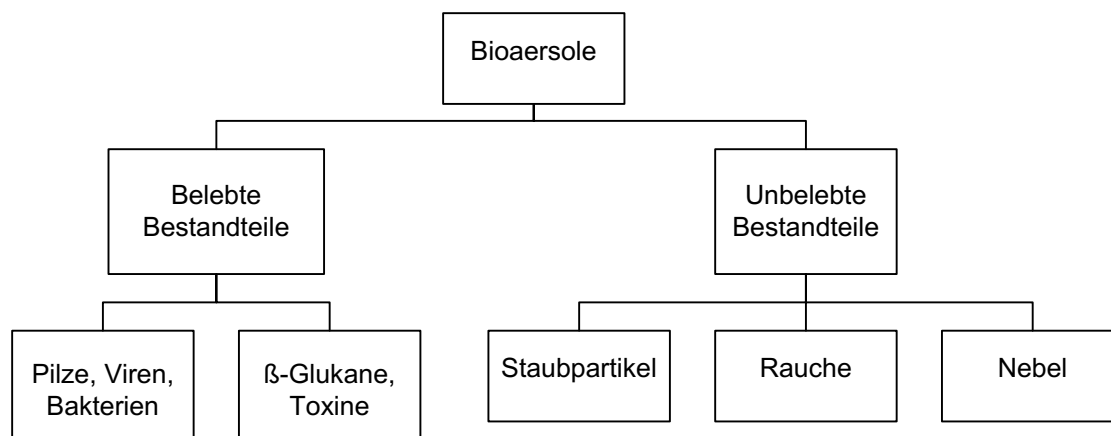


Abbildung 3: Komponenten eines Bioaerosols

Belebte und unbelebte Bestandteile bilden ein gemeinsames Agglomerat in der Luft, wobei ca. 80 % der luftgetragenen Mikroorganismen an Partikel angelagert sind (SEEDORF, HARTUNG, 2002). Dieser Zusammenschluss von Staub auf der einen Seite und dem belebten Teil auf der anderen Seite wird als Cluster bezeichnet (MÜLLER et al., 1977). Der Staub nimmt dabei die Rolle eines "Carriers" ein, da sich die belebten Bestandteile des Bioaerosols an die Staubpartikel heften (SEEDORF, HARTUNG, 2002).

Als übergeordneten Begriff für Aerosole und Bioaerosole kann „Partikel“ verwendet werden.

2.2 Definitionen des Partikeldurchmessers

Die Bestimmung eines Partikeldurchmessers kann nach verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen. Je nach Messsystem und wissenschaftlicher Fragestellung ergeben sich daraus Konsequenzen, die beim Umgang mit dem Begriff des Partikeldurchmessers jedem Anwender bewusst sein sollten. Im folgenden Kapitel werden gegenwärtig gebräuchliche Durchmesservarianten beschrieben.

Äquivalentdurchmesser für Projektionsfläche und Volumen

Für die Bestimmung des Äquivalentdurchmessers werden das unregelmäßig geformte Partikel mit einer Kugel oder die Projektionsfläche unter dem Mikroskop mit einem umgebenen Kreis verglichen. Der Äquivalentdurchmesser ist der Durchmesser eines Kreises, der unter gleichen physikalischen Bedingungen denselben Durchmesser hat wie das betrachtete Partikel (MÜLLER, W., 2002). In der dreidimensionalen Ebene wird mit einer Kugel genauso verfahren. Folgende geometrische Äquivalentdurchmesser sind zu unterscheiden:

- Durchmesser der volumengleichen Kugel
- Durchmesser der oberflächengleichen Kugel
- Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises

Aerodynamischer Durchmesser

Für den aerodynamischen Durchmesser werden zwei Annahmen getroffen. Zum einen wird davon ausgegangen, dass die Sinkgeschwindigkeit des zu untersuchenden Partikels gleich der Sinkgeschwindigkeit des Modells ist. Zum anderen wird eine Einheitsdichte eingeführt (1 g/cm^3), die auf das Modell bezogen ist und die Möglichkeit bietet, mehrere Partikel mit unterschiedlichen Dichten miteinander zu vergleichen.

Stokes Durchmesser

Unter dem Begriff Stokes Durchmesser versteht man den Durchmesser einer Kugel mit gleicher Dichte und gleicher Sinkgeschwindigkeit wie das zu untersuchende Partikel (HINDS, 1982). Er unterscheidet sich somit vom aerodynamischen Durchmesser nur in der Gleichsetzung der Dichte des Äquivalentpartikels mit der Dichte der Kugel.

Optischer Durchmesser

Der optische Durchmesser wird oft als Streulichtdurchmesser bezeichnet, da er ansonsten leicht mit dem Projektionsflächenäquivalent-Durchmesser verwechselt werden kann. Er beschreibt den Durchmesser eines Partikels, das das gleiche Streulichtspektrum erzeugt wie das Äquivalentpartikel. Dieses Verfahren zur Bestimmung eines Partikeldurchmessers ist im Gegensatz zu den weiter oben beschriebenen Verfahren als sensitiv zu bezeichnen, da die Intensität des Streulichtes abhängig von der Lage des Partikels im Raum ist. Abbildung 4 zeigt, dass Partikel ähnlicher Form und Größe in Abhängigkeit ihrer räumlichen Lage unterschiedliche optische Partikeldurchmesser aufweisen.

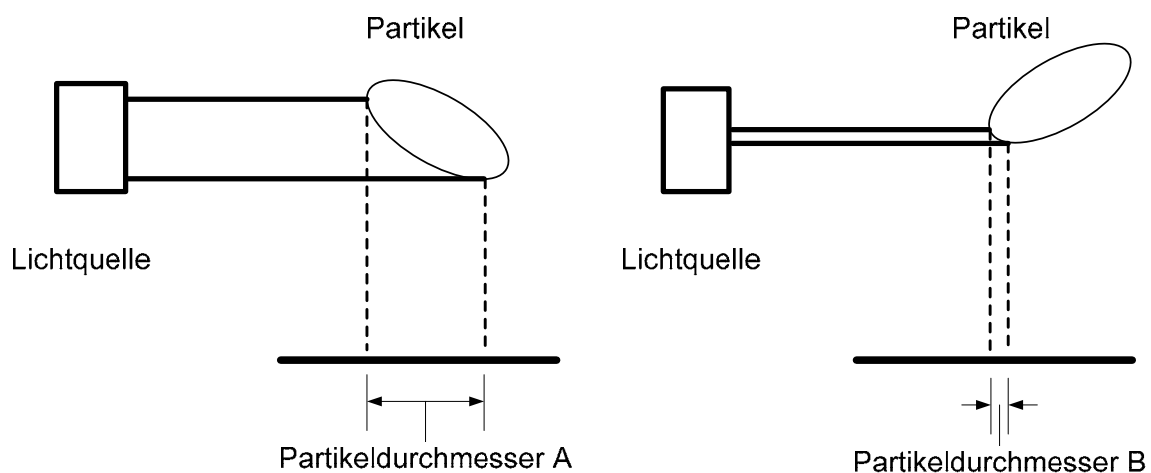


Abbildung 4: Streulichtdurchmesser in Abhängigkeit der Orientierung eines Partikels zur Lichtquelle, Streuwinkel = 90° (nach SCHMITT-PAUKSZTAT, 2006)

2.3 Aerodynamische Eigenschaften von Partikel

Die physikalische Charakterisierung der Bioaerosole beinhaltet u.a. Größe, Masse und Sedimentationsverhalten. Alle Aerosole sind im Luftstrom bestimmten aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten unterworfen (COX, 1995). Dabei haben die physikalischen Eigenschaften zum Beispiel einen Einfluss auf die Eindringtiefe der Partikel in die Lunge und somit auch eine gesundheitsrelevante Bedeutung.

2.3.1 Masse und Verteilung, Größe und Dichte

Masse und Verteilung

Konzentrationsangaben von Partikeln erfolgen massenspezifisch in mg/m^3 oder mittels der Anzahl der Partikel pro Volumeneinheit (Partikel pro m^3). Für eine partikelbezogene Messung können in Abhängigkeit vom Messverfahren Partikel bestimmter Größe gezählt werden. Die Größenverteilung der luftgetragenen Partikel ist in Nutztierställen untersucht worden. YODER, VAN WICKLEN (1988) stellten Ergebnisse für die Größenverteilung fest. Demnach lag in beiden Untersuchungen der Anteil der Partikelgrößen zwischen 0,3 bis 10 μm bei etwa 84 %. In dänischen Untersuchungen von PEDERSEN (1992) lagen 94 % aller Partikel in einem Bereich kleiner 10 μm . Eine detaillierte Aufstellung über die Massenanteile luftgetragener Staubpartikel findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Partikelgrößen in μm und tierartspezifische Massenanteile (AARNINK et al, 1999)

Partikelgröße in μm	Massenanteil pro m^3 Luft in %	
	Schwein	Masthähnchen
0,43 bis 0,65	0,5	0,3
0,65 bis 1,1	0,7	0,4
1,1 bis 2,1	3,3	0,7
2,1 bis 3,3	3,9	2,5
3,3 bis 4,7	8,2	5,9
4,7 bis 5,8	12,9	7,8
5,8 bis 9,0	26,1	21,0
> 9	44,5	61,4

Partikelgröße

Die Partikelgrößen betragen im Allgemeinen zwischen 0,5 und 100 μm (HIRST, 1995). Sie werden dabei immer durch den aerodynamischen Partikeldurchmesser angegeben.

Die Einteilung der Partikel in Fraktionen ist in der Literatur nicht einheitlich zu finden. Ältere Quellen aus den Siebziger Jahren unterscheiden zwischen Grobstaub (50 bis 500 μm), Mittelstaub (10 bis 50 μm), Feinstaub (0,5 bis 10 μm) und Feinststaub (0,1 bis 0,5 μm) (MEHLHORN, 1979). Mit Schwebstaub (TSP: total suspended particulates) wird nach VDI 2463, Blatt 1 die Größenfraktion bis zu einem Durchmesser von etwa 30 μm beschrieben.

Abbildung 5 zeigt die menschlichen Atemwege mit ihren Teilbereichen und die Tiefe der Partikeleindringung in Abhängigkeit des Durchmessers des Partikels.

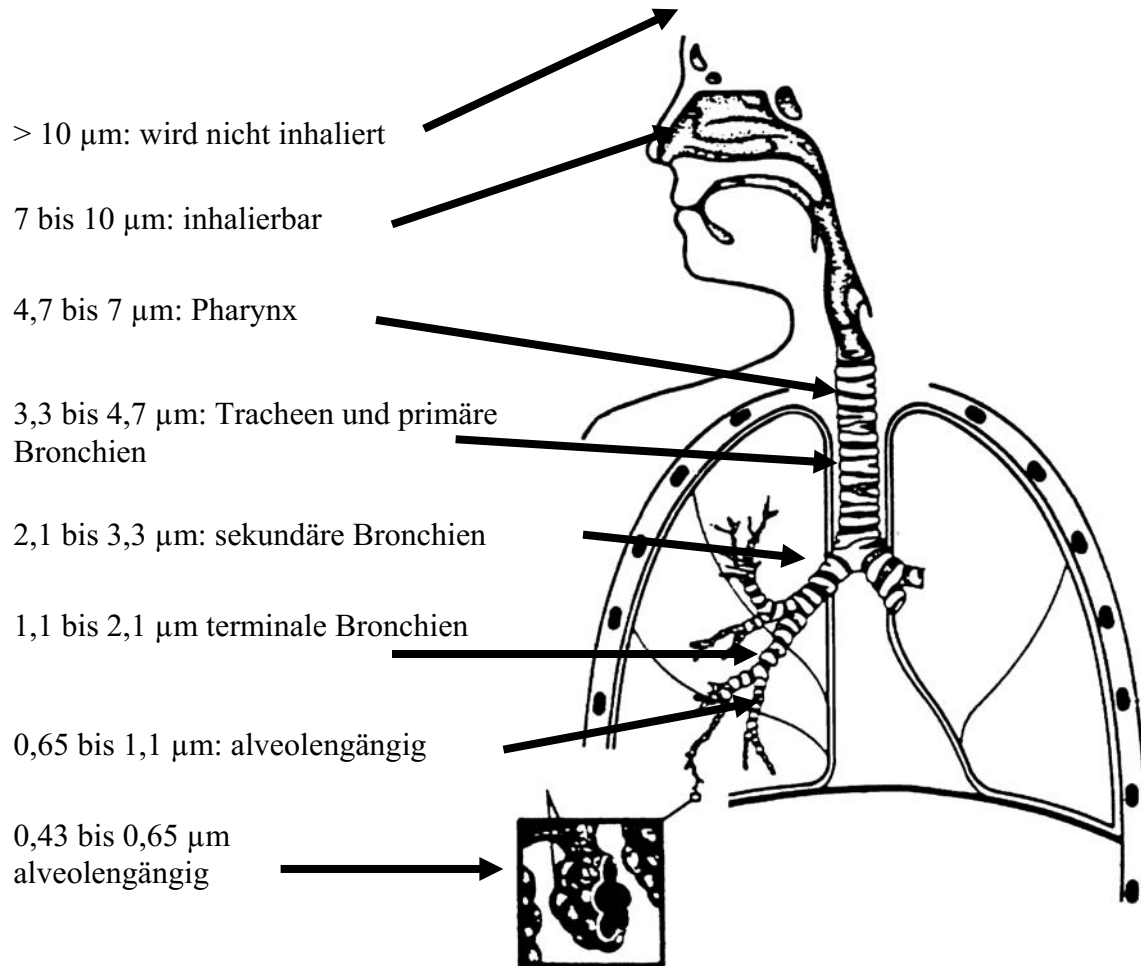


Abbildung 5: Respiratorisches System und Tiefe der Eindringung der Partikel (FIRMA SCHÄFER)

Bei Angaben zu Emissionsfaktoren oder Massenkonzentrationen werden die Größenfraktionen oftmals mit PM (Particulate Matter) angegeben. PM₁₀ und PM_{2,5} beinhalten alle Partikel, die durch eine Trennkurve mit einem Abscheidegrad von 50 % unterhalb von 2,5 bzw. 10 μm beschrieben werden können. Die PM₁₀-Fraktion ist mit der thoracalen Fraktion gemäß ISO 7708 gleichzusetzen.

Neuere Quellen gehen jedoch auf die respiratorischen Eigenschaften der Partikel ein und stellen damit die arbeitsmedizinischen Aspekte in den Vordergrund. Tabelle 3 zeigt Partikelfraktionen und die dazugehörigen Partikelgrößen gemäß EN 481.

Tabelle 3: Partikelfractionen und zugehörige Partikelgrößen (EN 481)

Fraktion arbeitsmedizinisch	Partikelgröße	Beschreibung
einatembar – inhalable	bis zu 100 µm	Der Massenanteil, der durch den Mund und die Nase eingeatmet wird
thoracal	bis zu 10 µm*	Der Massenanteil der eingeatmeten Partikel, der über den Kehlkopf hinaus zur Lunge vordringt
tracheobrachial = thoracal - alveolengängig	4 bis 10 µm	Der Massenanteil der eingeatmeten Partikel, der über den Kehlkopf hinaus vordringt aber nicht bis in die nichtcilierten Luftwege gelangt
alveolengängig - respirable	bis zu 4 µm*	Der Massenanteil der eingeatmeten Luft, der bis in die nichtcilierten Luftwege vordringt

* entspricht einer Abscheidewirksamkeit von 50 %

Dichte

Die Dichte der Partikel in verschiedenen Größenklassen und innerhalb eines Haltungssystems ist nicht einheitlich. Sie ist der maßgebliche Parameter für die Berechnung von Massenverteilungen einer Partikelprobe. Es ist zwar möglich, durch Angabe von Konventionsfaktoren die Umrechnung einer ermittelten Staubfraktion in andere Fraktionen vorzunehmen, jedoch werden bei dieser Berechnung keine spezifischen Unterschiede in der Dichte der Partikel beachtet. In der Literatur finden sich keine Angaben zu den Dichtewerten einzelner Staubfraktionen in unterschiedlichen Tierhaltungssystemen. Es kann vermutet werden, dass die Dichten des Futters, möglicher Einstreu, Haut- und Haarpartikel oder Betonabrieb nicht identisch sind und somit einen Einfluss auf die durchschnittliche Dichte in unterschiedlichen Größenklassen haben. Dieses Defizit kann durch die physikalischen Eigenschaften der Partikel gedeckt werden. Die physikalische Ableitung der Dichte von Partikeln erfolgt über die Partikelform und die Sedimentationsgeschwindigkeit. Beide Parameter werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

Vor allem bei optischen Partikelzählern ist die Umrechnung von Partikelanzahl auf Partikelmasse nur mit größenabhängigen Massenfaktoren möglich, die die Dichte der Partikel einbeziehen.

2.3.2 Partikelform

Die Partikelform von Tierstäuben ist ein Gebiet, das in der Literatur bisher wenig Beachtung gefunden hat. Es gibt wenige Beschreibungen von Stäuben aus Tierhaltungsanlagen. Voraussetzung für die Bestimmung von Formfaktoren sind

mikroskopische Bilder der Partikel. AARNINK et al. (1999) mikroskopierten Stallstaub aus der Schweinehaltung und fanden neben Futterbestandteilen auch Hautpartikel. Der Formenreichtum umfasst Partikel mit sphärischer Gestalt, faserartig gestreckt oder gekrümmt, schuppenförmig oder polymorph (SEEDORF, HARTUNG, 2002). Durch Partikelseparation und Agglomeration wird der Polymorphismus ständig erweitert. Somit hat die Partikelform neben der Partikeldichte einen erheblichen Einfluss auf das Verhalten der Partikel von ihrer Entstehung im Stall über den Abluftpunkt und die Transmission hinaus bis zum Ort der Immission.

Die gegenwärtige Partikelformcharakterisierung basiert auf mehreren Gesichtspunkten, die sowohl beschreibende Elemente als auch physikalische Eigenschaften beinhalten. Geht man von der Form eines Einzelpartikels aus, kann folgende Einteilung gewählt werden (ZLATEV, 2005).

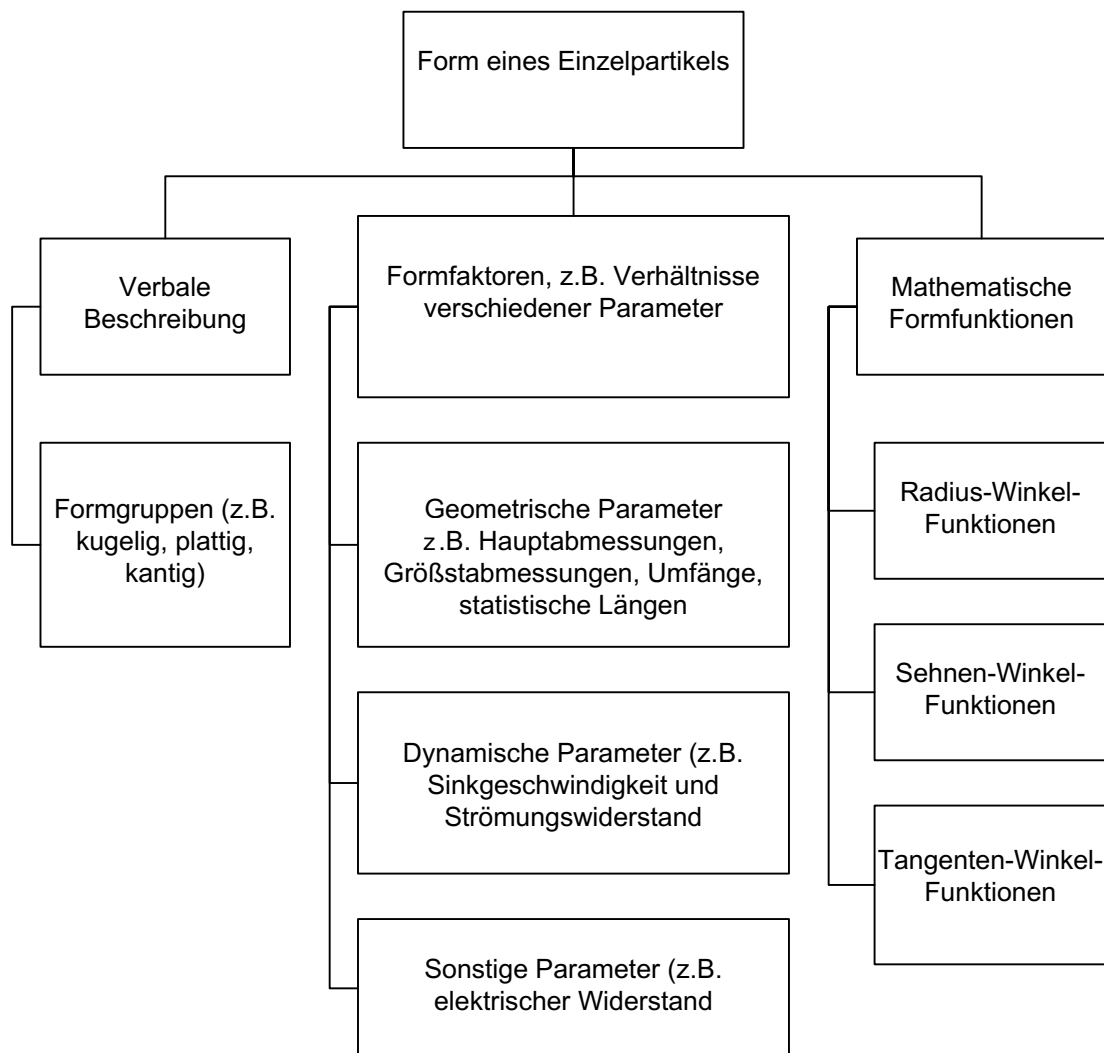


Abbildung 6: Methoden zur Bewertung von Partikelformen (ZLATEV, 2005)

Die obige Einteilung zeigt, dass es differenzierte für entsprechende Fragestellungen passende Beschreibungen der Partikelform gibt. Eine verbale Beschreibung kann lediglich mikroskopisch betrachtete Partikel in Formklassen einteilen, wobei es im visuellen Ermessensspielraum des Betrachters liegt, wie die Partikel eingestuft werden. Die Gestalt des Partikels kann dabei wertmäßig nicht quantifiziert werden. Um einen genaueren Einblick in die verbale Einordnung der Partikel zu bekommen, ist im BRITISH-STANDARD 2955 ein Wörterverzeichnis aufgestellt worden, das Beschreibungen kurz erläutert und charakterisiert. Zur Berechnung der Partikelform aus Tierhaltungsstätten ist diese Art der Vorgehensweise nicht anzuwenden. Die in Abbildung 6 genannten Möglichkeiten zur Bestimmung von Formfaktoren geben einen Überblick über die Meso- und Makrogestalt der Partikel. Hier wird mit Hilfe von messbaren Faktoren ein quantifizierbares Messergebnis berechnet. Wenn von einer zweidimensionalen Betrachtungsweise der Partikel ausgegangen wird, lassen sich drei Charakterisierungen der Berechnungsgrößen über die Länge, über die Fläche und kalkulatorisch über das Volumen der Partikel einteilen.

Wenn über Längen gesprochen wird, sind verschiedene Durchmesser des Partikels zu nennen. Neben dem Feret- oder Martin-Durchmesser zählen auch Partikelabmessungen in Abhängigkeit ihrer Lage dazu. Mit diesen Werten können Kubizität, Flachheit, Elongation oder Rundheit eines Partikels beschrieben werden. Des Weiteren zählt der Umfang eines Partikels zu den direkt messbaren Größen. Aus diesen direkt messbaren Größen lassen sich indirekte Größen wie die Sphärizität nach Wadell (ψ_{WA}) berechnen.

Bei Betrachtung der Fläche als Projektionsfläche des Partikels kann der Äquivalentdurchmesser des projektionsflächengleichen Kreises als berechnete Messgröße für die Berechnung eines Formfaktors angewendet werden. Durch Interpolieren der Projektionsfläche ist es möglich, das Volumen des Partikels kalkulatorisch abzuschätzen. Folgende Formeln stellen einige Möglichkeiten der Berechnung von Formfaktoren auf Basis eines zweidimensional erfassten Bildes dar. Für eine ausreichende Sicherheit sind mehrfache Wiederholungsmessungen durchzuführen, da der Formfaktor auf einer zweidimensionalen Projektion des Partikels beruht (ZLATEV, 2005).

Formel 1: Verhältnis von Partikelumfang zu Projektionsfläche (STARK, MÜLLER, 2004)

$$\Psi_{U,A} = \frac{U}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}}$$

mit:

$\Psi_{U/A}$ = Sphärizität aus Partikelumfang und Projektionsfläche

U = Partikelumfang

A = Flächeninhalt der Projektionsfläche

Formel 2: Sphärizität nach WADELL (1933), zweidimensional

$$\Psi_{Wa} = \frac{X_{p,s}}{X_{a,s}}$$

mit:

Ψ_{Wa} = Sphärizität nach Wadell, zweidimensional

$X_{p,s}$ = Durchmesser des projektionsflächengleichen Kreises bei stabiler Teilchenlage

$X_{a,z}$ = Durchmesser eines Kreises, der die Projektionsfläche umschließt

In heute gängigen Bildanalyseverfahren kommen die oben beschriebenen messbaren Größen zum Einsatz. Mit ihnen ist es möglich, große Datenmengen in kurzer Zeit zu analysieren und eine größenabhängige Formfaktorverteilung festzustellen.

Mathematische Formfunktionen, wie in Abbildung 6 aufgeführt, kommen zum Tragen, wenn die Mikrogestalt eines Partikels untersucht werden soll. Oberflächenbeschaffenheiten, Rauigkeit und Konturen spielen dabei eine Rolle. Diese Art der Partikelformbestimmung wird vor allem in Bereichen eingesetzt, in denen eine qualitative Analyse der Partikel von großer Bedeutung ist.

2.3.3 Sedimentation

Der Begriff Sedimentation beschreibt den „Idealzustand“ der stationären Fallgeschwindigkeit eines Partikels in einer unendlich ausgedehnten ruhenden kontinuierlichen Phase unter Wirkung der Schwerkraft. Sie ist eine Funktion des Dichteunterschiedes zwischen Fluid und Partikel, der Partikelgröße und Partikelform. Auf Partikel und Fluid wirken dabei Massen- und Oberflächenkräfte. Zu den Massenkräften gehören Trägheitskräfte und die Zentrifugalkraft. Die Auftriebskraft wird den Oberflächenkräften zugeordnet, denn jedes Beschleunigungsfeld bewirkt in einem Fluid einen Druckgradienten

(PETERMANN, 2004). Die Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit kann durch kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren erfolgen. Kontinuierliche Verfahren erfassen die Messwerte online. In diskontinuierlichen Systemen wird die Sinkgeschwindigkeit nach einer Probenahme im Labor berechnet. Des Weiteren gibt es Unterschiede in der Wahl des Mediums, d.h., ob in flüssigen Medien oder in Gasen gemessen wird. Ausführliche Beschreibungen einzelner Verfahren sind in entsprechender Literatur zu finden (SCHMITT-PAUKSZTAT, 2006). Als ein Beispiel sei die in dieser Arbeit angewandte Methode zur Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit von SCHMITT-PAUKSZTAT, (2006) zu nennen, die mit Hilfe einiger physikalischer Größen ermittelt werden kann. In Abbildung 7 sind Sinkgeschwindigkeiten für verschiedene aerodynamische Partikeldurchmesser angegeben.

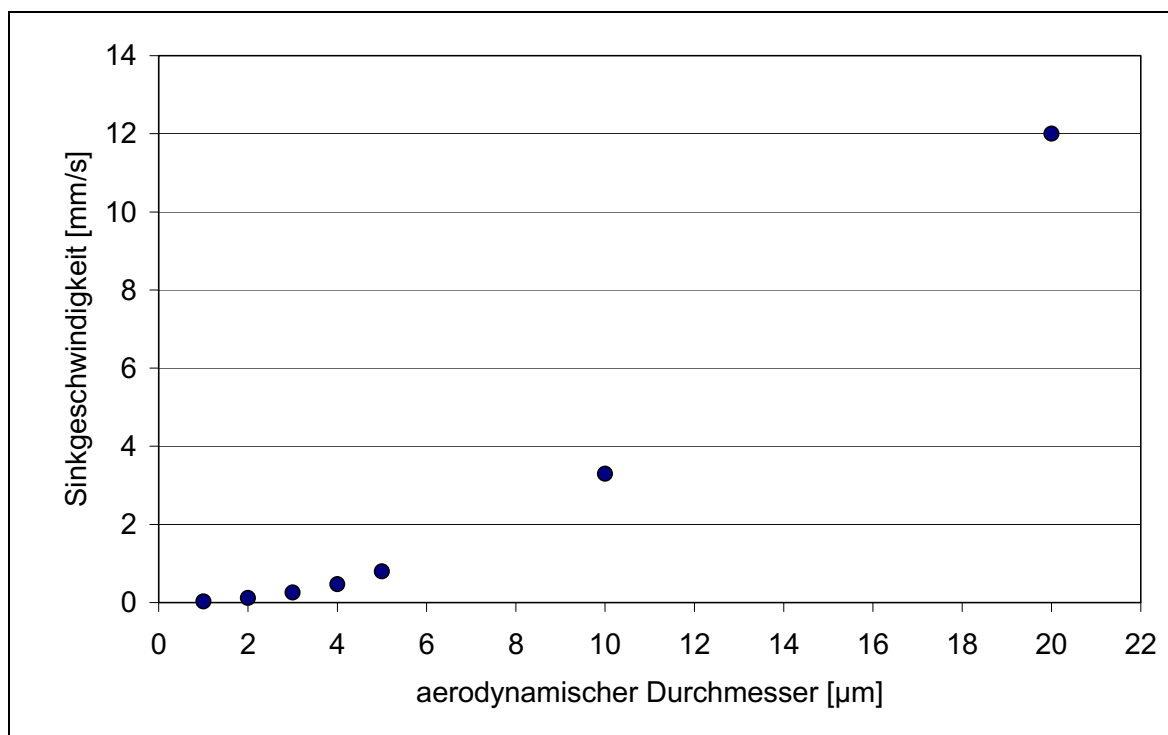


Abbildung 7: Sinkgeschwindigkeiten für unterschiedliche Partikelgrößen für eine Partikeldichte von 1 g/cm^3 und einer Lufttemperatur von 15°C (nach PEDERSEN, 1992)

Untersuchungen von SCHMITT-PAUKSZTAT et al. (2005) zeigen dagegen, dass Tierstäube unterschiedlicher Herkunft andere Sinkgeschwindigkeiten aufweisen als Kalibrierstäube wie z.B. Dolomit. Die Sedimentationsgeschwindigkeit v_s ist gegeben durch:

Formel 3: Sedimentationsgeschwindigkeit

$$v_s = \frac{1}{18} \cdot \frac{C_C}{\eta} \cdot \frac{\rho_P}{\kappa} \cdot g \cdot d^2$$

mit:

 v_s = Sedimentationsgeschwindigkeit C_C = Cunningham-Korrektur-Faktor ρ_P = Partikeldichte κ = Partikelformfaktor g = Erdbeschleunigung; d = Partikeldurchmesser η = dynamische Viskosität der Luft

Innerhalb der Formel 3 kann zwischen partikelspezifischen Faktoren und unspezifischen Faktoren unterschieden werden. Partikelspezifische Faktoren sind die Partikelgröße, der Formfaktor und die Dichte. Der Cunningham-Korrektur-Faktor kann als abhängige Variable bezeichnet werden, die sich aus der Partikelgröße und der mittleren freien Weglänge des Gases, durch das sich das Partikel bewegt, berechnen lässt. In Abbildung 8 sind die empirisch ermittelten Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Stäube dargestellt. Dolomitstaub mit einer Dichte von $2,78 \text{ g/cm}^3$ weicht von den Proben aus Schweine- und Geflügelställen ab. Der theoretische Staub mit der Dichte 1 g/cm^3 entspricht dem Verlauf der Werte aus Abbildung 7.

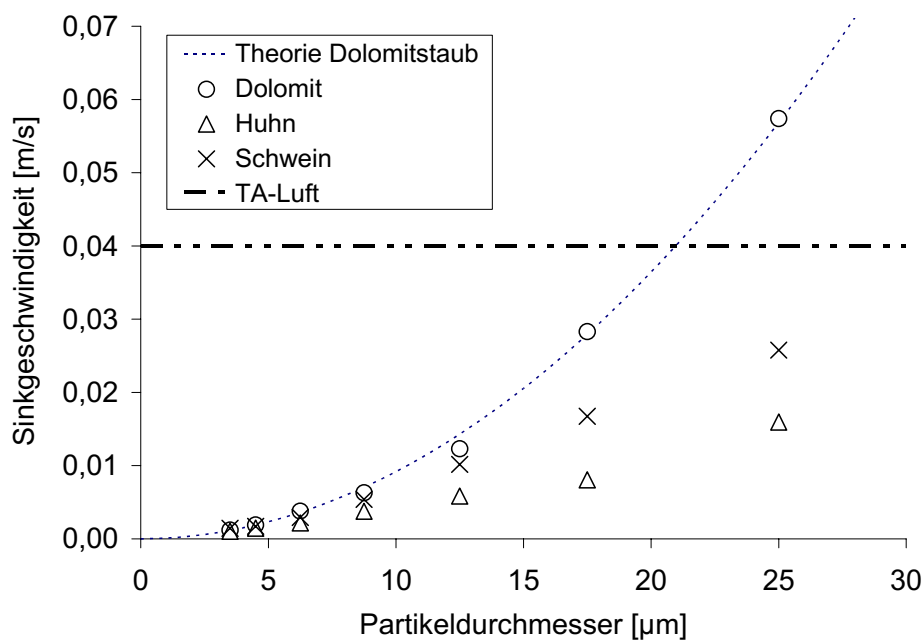


Abbildung 8: Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Stäube in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers (nach SCHMITT-PAUKSZTAT et al., 2005)

Durch die Beschreibung der Parameter Dichte, Form und Sedimentationsgeschwindigkeit lassen sich Zusammenhänge darstellen, die vor allem in Ausbreitungsmodellen bestimmende Faktoren für die Vorhersage der Partikelverteilung und Deposition darstellen. Oftmals erfolgt die Berechnung der Flugbahn von Partikeln unter der Annahme, dass alle Partikel unabhängig von ihrer Größe die Sphärizität einer Kugel mit der Einheitsdichte von 1g/cm^3 besitzen. Entscheidende Parameter der Ausbreitungsrechnung sind jedoch die Faktoren Dichte und Form und die daraus resultierenden Sedimentationsgeschwindigkeiten. Die Gleichung zur Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit beinhaltet diese Parameter. Durch Umformung und Einsetzen aller bekannten Faktoren sind lediglich die Form und die Dichte der Partikel als Variablen zu bestimmen. Durch die Einführung des **Quotienten aus Partikeldichte und Partikelform (σ/κ)** für unterschiedliche Partikelgrößen und Tierarten besteht die Möglichkeit, eine Dichte der Partikel zu berechnen. Dazu ist jedoch eine Bestimmung des Partikelfaktors mittels mikroskopischer Analyse notwendig. Mit dieser Dichte ist die Umrechnung einer mit Streulichtspektrometer erfassten Partikelanzahl in die Partikelmasse möglich. (SCHMITT-PAUKSZTAT, 2006)

2.4 Biologische und chemische Eigenschaften von Aerosolen

Eine biologische Charakterisierung der Bioaerosole lässt ihre Herkunft erkennen. Durch eine lichtmikroskopische Betrachtung kann die Herkunft der Partikel festgestellt werden. Neben Futterbestandteilen, wie z.B. Stärke sind auch Fäkalien-, Pilzkomponenten und Mineralien zu sehen. Dabei nehmen die Futter- und Fäkalienbestandteile den größten Teil ein (DONHAM et al., 1986). Die einzelnen Bestandteile haben unterschiedliche biologische Wirkungen.

Keime, Bakterien und Pilze

Da die Luft keinen günstigen Lebensraum für Mikroorganismen bietet, dient sie primär als deren Transportmedium. Mikroorganismen gelangen als isolierte Partikel in die Luft. Darunter befinden sich vor allem Pilzsporen. Es kann auch eine Haftung an feste Partikel wie zum Beispiel an Stäuben stattfinden. Dies ist häufig bei Bakterien und Hefen gegeben (SALLE, 1948).

Das Spektrum der nachgewiesenen Keime ist vielfältig. Es hängt von der natürlichen Besiedlung der Umgebung und von der Überlebensfähigkeit der Keime in der Luft ab (KÄMPFER, WEIßENFELS, 1997). Durch sichtbares Licht wird z.B. ein negativer Einfluss auf Bakterien ausgeübt (BAUSUM et al., 1982). Außerdem wird die biologische Stabilität durch den sogenannten "open-air-factor" beeinflusst, welcher von Temperatur, Luftfeuchtigkeit,

Strahlung, Ozongehalt und anderen Luftbestandteilen abhängig ist (MAY et al., 1969). Die Trägerpartikel haben dabei eine Größe von ca. 3-15 µm (CARPENTER, 1986).

Die Beziehungen zwischen Staub und in der Umgebungsluft vorkommenden Keimen befinden sich in einem ständigen Wechsel ihrer Konzentrationen zueinander. Dabei ist der Keimbesatz abhängig von der Größe der Staubpartikel. Bei aerodynamischen Durchmessern von mehr als 5 µm liegt ein erheblich höherer relativer Keimbesatz vor als in den kleineren Fraktionen. Diese sind zu über 95 % frei von Mikroorganismen (STRAUCH et al., 1977).

Für die einzelnen Nutztierarten lassen sich verschieden hohe Gehalte an Mikroorganismen in der Stallluft feststellen. Dabei steigt ihre Konzentration in der Stallluft von Rind über Schwein zu Geflügel an. Für Pilze dagegen gelten genau umgekehrte Konzentrationsverhältnisse (SEEDORF, HARTUNG, 2002).

Im Kontext der Pilze sollte man vor allem die Bedeutung der Mykotoxine hervorheben. Mykotoxine sind ein Produkt von Pilzen. Sie werden den Stoffgruppen der Antibiotika und Alkaloide zugeordnet. Den Mykotoxinen werden umfangreiche immunmodulatorische Eigenschaften und vielschichtige Giftwirkungen zugeschrieben. Eine massive Verpilzung kann zur Dispergierung der Mykotoxine in der Stallluft führen (SEEDORF, HARTUNG, 2002). Ein erhöhtes Auftreten von Faktorenkrankheiten durch Minderung der Widerstandsfähigkeit gegen Mikroorganismen ist die Folge.

Endotoxine

Endotoxine befinden sich überall in der Umwelt. Als ganze Gram-negative Zellen, große Membranfragmente von Mikroorganismen oder als makromolekulare Aggregate sind sie auch Bestandteile des Staubes. Diese Endotoxine werden auch als amphiphile Heteropolymere bezeichnet. Proteine und Phospholipide können in Form von platten- und kugelförmigen Partikeln darin integriert sein. Der Durchmesser dieser sogenannten Mikrovesikel beträgt 30 bis 50 nm (DUTKIEWICZ et al., 1992). Damit liegen sie im Bereich des ultrafeinen Staubes und haben eine gesundheitliche Relevanz. So beinhalten Endotoxine entzündungsauslösende Substanzen, die auch in Stäuben auftreten (SEEDORF, HARTUNG, 2002). Ihre Wirkung erzielen sie aber erst nach Zerfall der Mikroorganismen.

Die Wirkungen der Endotoxine im Organismus von Mensch und Tier sind unterschiedlich zu bewerten. Bei niedrigen Mengen wird die Paramunität und Antikörpersynthese gefördert. Bei großen Mengen ist dagegen die Phagozytose und Infektionsabwehr geschwächt (PETZOLDT, KIRCHHOFF, 1986).

Für Endotoxine gibt es bisher keine Grenzwerte, nicht einmal in der Humanmedizin. Für Schweineställe gibt HILLIGER (1990) eine erwartete Konzentration von 10 µg/g Staub an. Die Unterschiede innerhalb der Tierarten stellen sich folgendermaßen dar. Die

Geflügelhaltung weist eine 1,8-fach höhere Konzentration an Endotoxinen auf als die Schweinehaltung und eine 11,1-fach höhere Konzentration als die Rinderhaltung (SEEDORF, HARTUNG, 2002).

β-Glukane

β-Glukane sind Bestandteile von Pilzzellwänden und können bis zu 60 % von deren Trockenmasse ausmachen. β-Glukane haben eine biologische Aktivität, die wesentlich vom Molekulargewicht, dem Grad der Verzweigungen der Seitenketten und der Herkunft abhängig ist (YOUNG et al., 1998). Medizinisch relevant ist die Gruppe der β-(1,3)-D-Glukane, da sie immunmodulatorische Effekte, aber auch Anti-Tumor-Effekte haben.

Chemische Eigenschaften

Mit Hilfe der „Weender Analyse“ lässt sich die chemische Zusammensetzung von Stäuben bestimmen. Dabei wird eine Einteilung in Trockenmasse und Rohwasser vorgenommen. Die Trockenmasse wird näher untersucht und teilt sich auf in anorganische Stoffe und die organische Substanz bestehend aus Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N-freien Extraktstoffen. Der Nachweis von Rohprotein erfolgt nach der "Kjeldahl-Methode" durch Aufschluss mit Schwefelsäure und anschließender Destillation und Titration des Ammoniaks. Die Rohfettfraktion wird analytisch als Etherextrakt bezeichnet. Etherextrakt entsteht bei der Extraktion der organischen Substanz mit Petrolether. Der in Laugen und Säuren unlösliche fett-, stickstoff-, und aschefreie Rückstand bildet den Rohfaseranteil. Die N-freien Extraktstoffe werden durch Subtraktion rechnerisch ermittelt (KIRCHGESSNER, 1997).

Verschiedene Autoren haben die Substratmasse von Stäuben aus Schweineställen bestimmt. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 4:

Tabelle 4: Inhaltsstoffe von Schweinestallstäuben; prozentuale Anteile an der Substratmasse in %

Substrat	Roh- wasser	Trocken- substanz	Roh- asche	Roh- protein	Rohfett	Roh- faser	N-freie Extrakt- Stoffe
AENGST (1984)	13,1	86,9	14,6	23,9	4,3	3,4	53,7
ZEITLER (1987)	12,4	87,9	15,3	30,8	k.A.	k.A.	k.A.
DONHAM al. (1986) et	k.A.	k.A.	k.A.	22,6	k.A.	k.A.	k.A.

2.5 Quellen des Stallstaubes

Als Quellen des Staubes in Schweineställen werden verschiedene Faktoren zugrunde gelegt. Die größte Bedeutung hat das Futter mit ca. 82-90 % Anteil am Staub. Als weitere Quellen treten, falls vorhanden, die Einstreu (55-68 %) sowie das Tier selbst in Form von Fäkalien, Hautschuppen oder Haaren auf (PEARSON, SHARPLES, 1995). In geringen Mengen kommt auch von außen durch Zuluftführung, geöffnete Fenster, etc. Staub in den Stall hinein. (DAWSON, 1990). AARNINK et al. (1999) stellten bei mikroskopischen Untersuchungen neben den Futterbestandteilen vornehmlich Hautpartikel mit einem Anteil von ca. 10 % fest. Des Weiteren bildet der Stall selbst noch Staubquellen durch Abrieb an Wand und Boden. Die Quellen des Staubes in Schweineställen sind durch einige Parameter beeinflussbar. Dazu zählen Feuchtigkeit im Stall, Tieraktivität, Luftgeschwindigkeit, Art des Einstreumaterials, Futterart und -struktur und das Management. Dabei besteht eine hohe Korrelation zwischen Tieraktivität und Staubkonzentration. Sie wird durch den Tagesrhythmus der Tiere bestimmt (PEDERSEN, 2004).

Keime gelangen im Allgemeinen über das Futter, die Einstreu und die Fäkalien in die Umgebungsluft des Stalles (SEEDORF, HARTUNG, 2002). Als weitere Quelle für Keime sind schon sedimentierte Keime zu nennen, die dann durch Luftbewegung mit anorganischen oder organischen Partikeln agglomerieren und wieder in den Schwebezustand übergehen (MÜLLER, 1987). Dieser Vorgang wird als Resuspension bezeichnet.

2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Das Bundes-Immissionsschutz-Gesetz (BImSchG) beschreibt in §1 seine Intention. Menschen, Tiere und Pflanzen, der Boden, das Wasser, die Atmosphäre, sowie Kultur- und sonstige Sachgüter sollen vor schädlichen Umwelteinwirkungen geschützt werden. Dabei ist dem Entstehen der schädlichen Umwelteinwirkungen vorzubeugen. Dieses Vorbeugeprinzip wird in der Verwaltungsvorschrift TA-Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) mit der Angabe von Grenzwerten für den Emissionsmassenstrom und der Massenkonzentration schädlicher Stoffe konkretisiert. Des Weiteren finden sich Grenzwerte in der von der Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG, 2006) herausgegebenen MAK-Liste (**M**aximale **A**rbeitsplatz**k**onzentration).

TA-Luft

Entsprechend dem gesetzlichen Auftrag ist es Ziel der TA-Luft, den Behörden den heutigen Erkenntnissen entsprechende bundeseinheitliche Vorgaben an die Hand zu geben, mit denen eine Beurteilung der Emission und Immission vor allem bei genehmigungsbedürftigen Anlagen vorgenommen werden kann.

Um die Beurteilungskriterien zu normieren, sind in der TA-Luft die Begriffe Emission und Immission mit den dazugehörigen Vorgaben zur Angabe der Werte definiert.

„Emissionen im Sinne dieser Verwaltungsvorschrift sind die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen“ (TA-Luft). Die Emissionen werden zum einen als Masse der emittierten Stoffe oder Stoffgruppen bezogen auf das Volumen, also als Massenkonzentrationen angegeben. Zum anderen erfolgt die Angabe als Masse der emittierten Stoffe oder Stoffgruppen bezogen auf eine Zeiteinheit (Emissionsmassenstrom). Die dazugehörigen Grenzwerte sehen folgendermaßen aus:

Die im Abgas enthaltenen staubförmigen Emissionen dürfen:

- die Massenkonzentration 20 mg/m^3
- oder
- den Massenstrom $0,20 \text{ kg/h}$

nicht überschreiten.

Falls der Massenstrom von $0,20 \text{ kg/h}$ unterschritten bleibt, darf die Massenkonzentration den Wert $0,15 \text{ mg/m}^3$ nicht überschreiten. Wird als Beispiel eine Tierhaltungsanlage mit 2.000 Mastplätzen zugrunde gelegt, dann berechnet sich der relevante Gesamtmassenstrom durch Summierung aller Massenströme aus sämtlichen Abluftkaminen.

Der Begriff des Emissionsfaktors definiert die TA-Luft mit dem „Verhältnis der emittierten Stoffe oder Stoffgruppen zu der Masse der erzeugten oder verarbeiteten Produkte oder zur Tierplatzzahl“. Um Emissionsfaktoren unterschiedlicher Tierarten vergleichen zu können, wird die emittierte Staubmasse auf eine Großvieheinheit (GV, 500 kg Lebtiermasse) bezogen. Die Massenverhältnisse und somit die Emissionsfaktoren werden auf einen Tag bezogen, d.h. die kleinste notwendige Messeinheit beträgt 24 Stunden.

MAK-Liste

Die „Maximale Arbeitsplatz Konzentration“ ist ein Grenzwert eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, bei der die Gesundheit eines Arbeitnehmers bei achtstündiger täglicher Arbeit im Allgemeinen nicht beeinträchtigt wird (GefStoffV). Bei den Grenzwerten wird zwischen zwei Größenfraktionen unterschieden, dem einatembaren und dem alveolengängigen Staub. Der einatembare Anteil darf eine Konzentration von 4 mg/m^3 nicht überschreiten, für den alveolengängigen Anteil gilt der Grenzwert $1,5 \text{ mg/m}^3$. Dabei handelt es sich um Mittelwerte über den achtstündigen Arbeitstag. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte sind Schutzmaßnahmen zu ergreifen, die die Raumbelastung mindern können, zum Beispiel Staubmasken (SCHEUERMANN, 2004).

2.7 Partikelemissionen aus der Tierhaltungsanlagen

Gemäß den Definitionen aus Kapitel 2.6 werden die Emissionsmassenströme als Produkt von Luftvolumenstrom und Konzentration des emittierten Stoffes berechnet. Die Emissionsquelle ist der Punkt, an dem der Emissionsstrom die Stallanlage verlässt. Dies können Abluftkamine in zwangsgelüfteten Anlagen, sowie first- oder traufseitige Öffnungen bei freigelüfteten Anlagen sein.

Formel 4: Gleichung für den Emissionsmassenstrom

$$\dot{m}_p = \dot{V} \cdot (c_{Abluft} - c_{aussen})$$

mit:

\dot{m}_p Partikelmassenstrom in g h^{-1}

\dot{V} Luftvolumenstrom in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$

c_{Abluft} Partikelkonzentration in der Abluft in g m^{-3}

c_{aussen} Partikelkonzentration Hintergrund der Stallanlage in g m^{-3}

In der Literatur finden sich zahlreiche Angaben zur Höhe der Partikelemissionen und Partikelmassenkonzentrationen. Dabei ist eine Einteilung nach Handlungsabschnitt, Größenfraktion, Messprinzip und Messort unabdingbar, um die Daten vergleichen zu können. Die hohe Varianz innerhalb der Haltungssysteme ist auf verschiedene Messprinzipien und Messorte zurückzuführen. Im Allgemeinen gibt es einige Faktoren, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Partikelkonzentrationen und Emissionsfaktoren haben. Je höher der Luftvolumenstrom, desto stärker tritt ein Verdünnungseffekt auf, der ein Absinken der Massenkonzentration zur Folge hat (WANG et al., 2000; TAKAI et al., 1998). Demgegenüber erhöht sich jedoch in Abhängigkeit von der Tierart der Emissionsfaktor, da der erhöhte Luftvolumenstrom einen größeren Einfluss haben kann als der Verdünnungseffekt. Das Alter der Tiere spielt eine weitere Rolle. Je älter die Tiere werden, desto niedriger ist das Aktivitätsniveau bezogen auf die vom Tier eingenommene Fläche. Mit zunehmendem Alter sinkt der Temperaturbedarf, was einen steigenden Luftvolumenstrom pro Tier zur Folge hat (ATTWOOD et al., 1987). Durch eine Bildung von Feuchtflächen können bereits sedimentierte Partikel nicht mehr resuspendiert werden (TAKAI et al., 1998). Die Luftfeuchtigkeit spielt vor allem in eingestreuten Haltungsverfahren und Systemen mit hohem Wärmebedarf eine Rolle. Luftfeuchtigkeit und Temperatur haben einen Einfluss auf die Staubkonzentration in der Stallluft, da die Partikel eine hygroskopische Wirkung haben.

2.7.1 Staubbelastungen und Emissionen aus dem Haltungssystem Schwein

Das Haltungssystem Schwein lässt sich in vier Bereiche einteilen, angefangen mit dem Abferkelabteil, über den Warte- und Deckbereich hin zur Ferkelaufzucht und Schweinemast. In diesen Abschnitten stellen die Tiere unterschiedliche Ansprüche an ihre Umweltbedingungen, wie z.B. Wärmebedarf oder Platzangebot. Auf Grund der variierenden Haltungsbedingungen lassen sich Unterschiede in der Höhe von Massenkonzentrationen und Emissionsmassenströmen feststellen. Der Abferkelbereich und der Warte-/Deckbereich sind zusammengefasst worden, da keine unterschiedlichen Werte in der Literatur zu finden sind.

Abferkelbereich

In den Veröffentlichungen von WATHES (2004) werden innerhalb des Haltungsabschnitts Abferkelung drei Haltungsverfahren untersucht. Dabei variieren die Angaben zum Emissionsmassenstrom auf Teilspalten- oder Vollspaltenböden und eingestreuten Systemen kaum voneinander. Der Massenstrom beträgt für den einatembaren Anteil (inhalable dust) ca. $140 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$. Für den Bereich der Wartesauen und das Deckzentrum gelten ähnliche Werte. In anderen Veröffentlichungen kann eine eindeutige Zuordnung der erhobenen Werte zu einem Haltungssystem nicht vorgenommen werden, wie z.B. bei TAKAI et al. (1998). Die veröffentlichten Werte für Sauen liegen zwischen $0,63$ und $3,49 \text{ mg m}^{-3}$ für den einatembaren Anteil und $0,09$ bis $0,46 \text{ mg m}^{-3}$ für den alveolengängigen Staub (respirable dust). Bei den Emissionsfaktoren wird zwischen eingestreuten und strohlosen Ställen unterschieden. Die eingestreuten Systeme emittieren $448 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ einatembaren Staub im Gegensatz zum strohlosen System, das mit $345 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ darunter liegt. In der alveolengängigen Fraktion sind gleich hohe Emissionen von $47,5$ bzw. $47,8 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ vorhanden. Die hohen Schwankungen kommen auf Grund einer hohen Anzahl von Messungen in verschiedenen Ländern Nordeuropas zustande. Die unter Winterbedingungen ermittelten Werte von PHILLIPS et al. (1998) weisen ohne Angabe des Haltungsverfahrens geringere Massenströme von $130 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ auf als die Werte von TAKAI et al. (1998). JACOBSON et al. (2004) gibt PM10-Massenströme an, bei denen jahreszeitliche Einflüsse und Haltungsverfahren berücksichtigt worden sind. Für die Sommermessungen werden im eingestreuten System $369 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ und für den Stall mit Spaltenboden $14 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ angegeben. Die Emissionsrate im Winter reduziert sich nur im Haltungsverfahren Einstreu um 60% gegenüber dem Sommer. Auf dem Spaltenboden steigt die PM10-Emission auf $380 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ an, welche vom Autor als Ausnahme interpretiert wird.

Ferkelaufzucht

Die Ferkelaufzucht besitzt die größte Belegdichte im Haltungssystem Schwein. Der Mindestflächenbedarf liegt hier im Gewichtsabschnitt von 10 bis 20 kg bei 0,2 m²/Tier, steigt dann auf 0,35 m²/Tier an bis 35 kg Lebendgewicht (TierSchNutzV, 2006). Die Ferkelaufzucht ist mit Ausnahme der Vormast das einzige Stallsystem in dem geheizt wird. Luftfeuchtigkeit und Temperatur haben einen Einfluss auf die Staubkonzentration in der Stallluft, da die Partikel eine hygroskopische Wirkung haben. Es besteht nach BUTERA et al. (1991) eine signifikante positive Korrelation zwischen dem prozentualen Anteil des alveolengängigen Feinstaubes (< 2,5 µm) und der relativen Feuchtigkeit. Größere Partikel sedimentieren durch feuchtebedingte Agglomeration; der prozentuale Anteil des Feinstaubes steigt. TAKAI et al. (1998) unterscheiden zwischen Massenstrom und Massenkonzentration bei einatembaren und alveolengängigen Partikelfractionen. Es ist auf Vollspaltenböden gemessen worden. Der Massenstrom beträgt 2,8 mg h⁻¹ GV⁻¹ für den einatembaren und 0,29 mg h⁻¹ GV⁻¹ für den alveolengängigen Bereich. Bei der Massenkonzentration stehen 274 mg·m⁻³ dem Wert 69 mg·m⁻³ gegenüber.

Schweinemast

Auf Grund der Vielzahl von Veröffentlichungen zu Emissionskennzahlen in der Schweinemast ist diese der am intensivsten untersuchte Handlungsabschnitt in der Schweinehaltung. Die Messungen sind von mehreren Autoren in verschiedenen Handlungsverfahren unter Berücksichtigung tageszeitlicher Schwankungen und unterschiedlicher Lebendgewichte der Schweine durchgeführt worden. Des Weiteren können die Staubfraktionen einatembar, PM10 und alveolengängig miteinander verglichen werden. In der Praxis ist im Handlungsabschnitt Schweinemast die Wahl zwischen einer Trockenfütterung mit Futter in Form von Mehl, Pellets oder Granulat und einer Flüssigfütterung mit Trockensubstanzgehalten von unter 25 % getroffen worden. DAWSON (1990) stellte fest, dass ein Stallsystem mit Flüssigfütterung gegenüber einer Trockenfütterung 50 % geringere Partikelkonzentrationen aufweist. Dabei ist die Quelle Futter in der Flüssigfütterung als nicht mehr vorhanden bezeichnet worden. In einer anderen Untersuchung zeigten ZEITLER et al. (1987) ähnliche Ergebnisse. Eine Flüssigfütterung emittierte im Winter 58 % weniger Partikel als eine Trockenfütterung mit Futter in Mehlform. Durch Neuentwicklungen in der Trockenfütterungstechnik haben diese Unterschiede in den letzten Jahren abgenommen. Neue verfahrenstechnische Lösungen haben erreicht, dass Futter ohne Kontakt zur Stallluft bis in den Futterautomaten hineintransportiert werden kann und somit Trocken- und Flüssigfütterung annähernd gleich zu betrachten sind (NANNEN et al., 2005).

2.7.2 Staubbelastungen und Emissionen aus dem Haltungssystem Rind

Im Haltungssystem Rind sollte in den nun abgeschlossenen Untersuchungen der Emissionsfaktor für die Milchviehhaltung in einem freigelüfteten Boxenlaufstall bestimmt werden. Vergleichbare Messungen sind von TAKAI et al. (1998) und JACOBSON (2004) vorgenommen worden. Beide Autoren unterscheiden zwischen Winter- und Sommermessungen, TAKAI et al. (1998) auch zwischen Tag- und Nachtsituation. Die Partikelmassenkonzentrationen betragen nachts um $0,7 \text{ mg m}^{-3}$ und tagsüber um $0,58 \text{ mg m}^{-3}$ für den einatembaren Anteil. Diese Größenfraktion nimmt den über das Jahr gemittelten Wert von $0,22$ bis $0,65 \text{ mg m}^{-3}$ ein. Für die alveolengängigen Partikel konnten keine Unterschiede zwischen Sommer und Winter festgestellt werden. Die Emissionsfaktoren lagen bei JACOBSON um den Faktor 3 bis 4 höher als bei TAKAI. JACOBSON gibt für den einatembaren Anteil im Sommer $528 \text{ mg h}^{-1} \text{ GV}^{-1}$ an. Die Wintermessungen sind um 50 % niedriger.

Beide Autoren stellen unterschiedlich hohe Emissionen fest, die maßgeblich von den klimatischen Gegebenheiten, der Anströmrichtung des Windes und der Windgeschwindigkeit abhängen. Luftraten im Winter können je nach Stallsystem genauso hoch sein wie im Sommer.

2.7.3 Staubbelastungen und Emissionen aus dem Haltungssystem Geflügel

Die Geflügelhaltung beinhaltet verschiedene Tierarten, die in unterschiedlichen Haltungssystemen aufgestellt werden können. Neben der Legehennenhaltung und der Broilermast, die fast ausschließlich in zwangsgelüfteten Ställen stattfinden, werden Mastputen oftmals in frei gelüfteten Louisiana-Ställen gehalten (SCHNEIDER, T. 2006). Die Partikelemissionen aus den eingestreuten Haltungsverfahren Legehennen in Voliere oder Bodenhaltung, Broilermast und Putenmast emittieren nach Literaturrecherche höhere Partikelmassen als die nicht eingestreute Haltung von Legehennen im Käfig. Da auf Grund der Änderung der Legehennenverordnung (Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung, 2006) die konventionelle Käfighaltung ab dem 31.12.2008 verboten ist, wird neben allen Vor- und Nachteilen des Systems die Partikelemission pro Henne in den nächsten Jahren ansteigen. Im Folgenden sind Emissionsfaktoren und Massenkonzentrationen einzelner in dieser Arbeit zu untersuchenden Haltungssysteme gemäß bestehender Literatur angegeben.

Legehenne

In der Käfighaltung sind unter anderem Untersuchungen von TAKAI et al., (1998) und LIM et al., (2003) vorgenommen worden. Im Gegensatz zur Käfighaltung liegen die Emissionsfaktoren in der Volierenhaltung um den Faktor sechs bis fünfzehn höher. Im

Vergleich zu den anderen Tierarten finden sich in der Volierenhaltung die höchsten Massenkonzentrationen für die einatembare Größenfraktion mit fast $7,6 \text{ mg m}^{-3}$ (WACHENFELT, 1999). Von LIM et al., (2003) gemessene Massenkonzentrationen von TSP (Schwebstaub) in der Käfighaltung liegen bei ca. 2 mg m^{-3} .

Putenmast

JACOBSON (2004) veröffentlichte Emissionsfaktoren eines Putenmaststalls in unterschiedlichen Größenfraktionen und in jahreszeitlicher Abhängigkeit. Für den einatembaren Anteil konnten im Sommer mit $9,6 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ höhere Emissionsfaktoren gemessen werden als im Winter mit $0,4 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$. In den anderen Größenklassen alveolengängiger Staub und PM10 sind diese Unterschiede ebenfalls festgestellt worden. Im Sommer wurde $0,33 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ alveolengängiger Staub und $1,28 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ PM10 emittiert. Die Winterwerte sind um 15 bis 20 % niedriger anzusetzen als die Sommerwerte. In der alveolengängigen Größenfraktion hat HINZ (1998) eine Massenkonzentration von $< 6 \text{ mg m}^{-3}$ festgestellt.

2.8 Messtechnik zur Bestimmung von Partikelemissionen

In der Literatur finden sich zwei verschiedene derzeit gängige Messmethoden zur Bestimmung der Partikelkonzentration. Die gravimetrische Bestimmung des Staubes wird mit Filtern oder Sammelplatten vorgenommen. Die optische Bestimmung arbeitet mit Streulicht oder Transmissionslicht. Bei der gravimetrischen Bestimmung unterscheidet man zwischen Filtration und Sammlung. Folgende zu messende Parameter werden als Anforderungen an die Messtechnik und damit an die Erfassung von Partikelemissionen gestellt:

- Partikelmassenkonzentration,
- Partikelgröße,
- Partikelanzahlkonzentration,
- Partikelgrößenverteilung.

Nicht alle Messsysteme können alle vier Parameter aktiv bestimmen. Durch Kenntnis bestimmter Faktoren wie Partikeldichte kann z.B. von der Partikelanzahl auf die Masse geschlossen werden.

2.8.1 Gravimetrische Bestimmung

Filtersysteme

In Filtersystemen werden die Partikel auf Glasfaserfiltern gesammelt. Anschließend besteht die Möglichkeit der weiteren chemischen Analyse der gesammelten Partikel. Als Beispiel für eine quasi kontinuierliche Bestimmung der Partikelmassenkonzentration ist das TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) zu nennen. Das Messprinzip des TEOM-Verfahrens beruht auf der Frequenzänderung eines mit einem Filter verbundenen oszillierenden konischen Röhrchens. Diese Änderung der Frequenz wird durch sich auf dem Filter absetzende Partikel erreicht. Die Massenbestimmung erfolgt dabei gleichzeitig mit den Probennahmen. Die Sensoreinheit kann mit unterschiedlichen Sammelköpfen ausgestattet werden, so dass verschiedene Größenfraktionen abgeschieden werden können (HINDS, 1999). Andere Gravimetriesammler arbeiten mit radialsymmetrischen Ansaugköpfen nach VDI 2066, Blatt 1. Dabei wird ein definierter Luftstrom am Filter angelegt. Über die gewogene Masse des Filters und die durchgeströmte Luftmenge kann eine Massenkonzentration berechnet werden.

Impaktoren

Das Funktionsprinzip eines mehrstufigen Kaskadenimpaktors ist in Abbildung 9 dargestellt. Luftgetragene Partikel strömen durch die Bohrungsöffnung einer Siebplatte. Dabei prallen nur Partikel mit großer Trägheit auf eine Impaktorplatte und verbleiben dort.

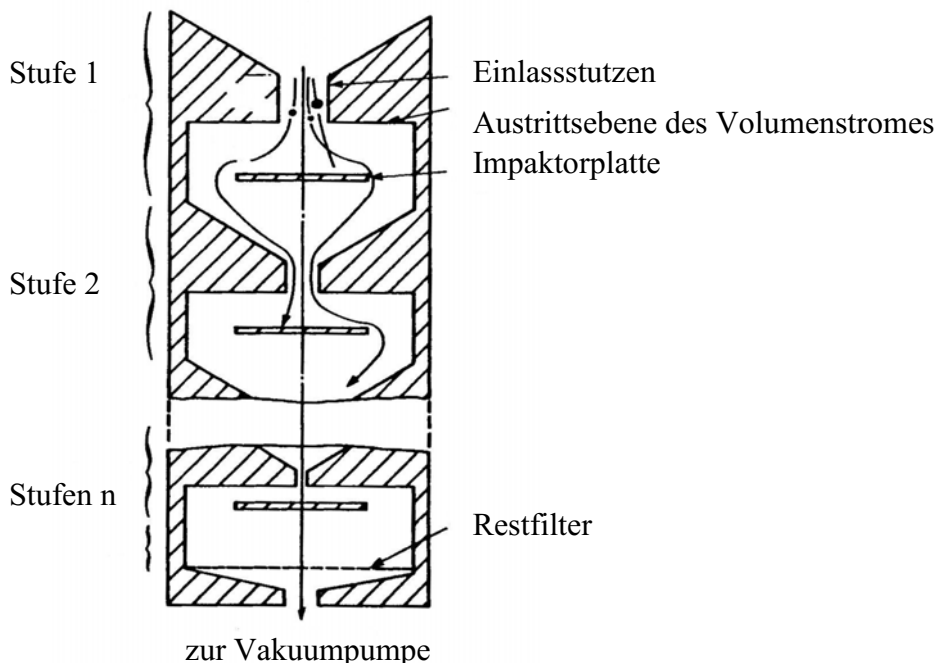


Abbildung 9: Aufbau und Prinzip eines einfachen Kaskadenimpaktors (nach MITCHELL, 1995)

Partikel mit kleineren aerodynamischen Durchmessern werden um die Impaktorplatte herumgeleitet und nicht gesammelt. Sieb- und Impaktorplatte werden als Impaktorstufe bezeichnet. Es erfolgt somit eine Größenfraktionierung der untersuchten Partikel gemäß ihrer aerodynamischen Eigenschaften (MITCHELL, 1995).

Gravimetrisch erhobene Werte haben den Nachteil, dass sie nichts über den zeitlichen Verlauf der Partikelkonzentration aussagen können. Es bleibt jedoch die Möglichkeit, Tagesmittelwerte als kleinste Auswertungsintervalle miteinander zu vergleichen oder während spezieller Aktivitäten im Stall, z.B. Fütterungszeiten, Proben zu ziehen und diese auszuwerten.

2.8.2 Streulichtspektroskopische Bestimmung

Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, wird bei diesen Methoden das um 90° umgelenkte Streulicht über einen Spiegel mit einem Öffnungswinkel von etwa 60° auf eine Empfängerdiode geschickt. Wenn Partikel den Laserstrahl durchqueren, geben sie einen Streulichtimpuls ab. Das Signal der Diode wird durch den Empfänger in verschiedenen Größenkanälen klassifiziert. Die Pfeile veranschaulichen den Weg des Lichts (GOLZ, 2004).

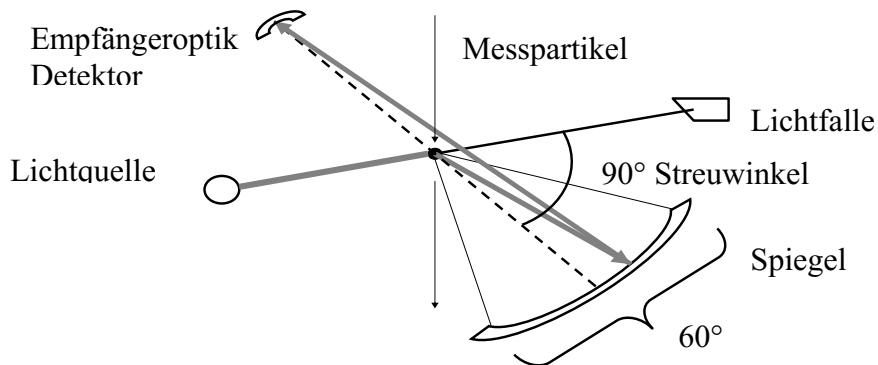


Abbildung 10: Messprinzip eines Streulichtspektrometers (nach GOLZ, 2004)



Abbildung 11: Ansicht eines Streulichtspektrometers der Firma GRIMM Aerosoltechnik GmbH

Weiterführende Mess- und Analysemethoden sind in Tabelle 5 dargestellt. Zu einzelnen zu messenden Parametern sind die entsprechenden Mess- und Analysemethoden mit Literaturbeispielen angegeben.

Tabelle 5: Einteilung von Messparametern und Messmethoden zur quantitativen und qualitativen Erfassung von luftgetragenen Partikeln (verändert nach HARTUNG, 2001)

Parameter	Mess- und Analysemethode	Literaturbeispiele
Partikelmassenkonzentration	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Glasfilter (GGF) Gesamtstaub: mind. 3 h bei 2,0 l min⁻¹ Feinstaub: mind.: 6 h bei 1,9 l min⁻¹ und einem vorgeschalteten Zyklon ▪ Passivsammler ▪ Taperd Element Oscillating Microbalance (TEOM) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ WANG et al., 1999 ▪ HOFMANN et al., 1999 ▪ HINDS, 1999
Partikelgröße	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorkonditionierung, d.h. Vorschalten von Filtern entsprechend dem ISO Standard ▪ optische Partikelzähler (OPC) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ HINDS, 1999
Partikelanzahlkonzentration	<ul style="list-style-type: none"> ▪ optische Partikelzähler (OPC) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ HINDS, 1999 ▪ SCHNEIDER, F. et al., 2001
Partikelgrößenverteilung nach Anzahl ... nach Masse ...	<ul style="list-style-type: none"> ▪ optische Partikelzähler (OPC) ▪ GFF mit entsprechenden Vorsätzen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ HINDS, 1999 ▪ SCHNEIDER, F. et al. 2002 ▪ SEEDDORF, 1999 ▪ HINDS, 1999 ▪ SCHNEIDER, F. et al., 2001
Partikelbeladung (adsorbierbare Bestandteile)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ chemische Analyse ▪ portable Direkteinlass-Massenspektrometer ▪ Electron-probe X-ray-micro analysis 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ AARNINK et al., 1999 ▪ SCHNEIDER, F. et al., 2001

2.9 Lüftungssysteme in Tierställen

Lüftungssysteme in Tierställen haben die Aufgabe, Schadgase wie Ammoniak und Kohlendioxid sowie Wasserdampf nach außen zu befördern, um ein adäquates Stallklima zu schaffen. Im Sommer steht die Abführung der Wärme im Vordergrund, um einen Wärmestau zu verhindern, der bei den Tieren Hitzestress hervorruft und letztlich auch zum Tod der Tiere führen kann. Im Winter liegt die Hauptaufgabe der Lüftung darin, den Wasserdampf und die Schadgaskonzentrationen abzuführen, um die gesetzlichen Rahmbedingungen einzuhalten. Die Dimensionierung des Lüftungssystems hängt von der Tierart, der Anlagengröße, dem Tierbesatz und den klimatischen Randbedingungen ab. Nach WATHES et al., (1983) muss die Lüftung so dimensioniert sein, dass sowohl die Gesundheit von Mensch und Tier zur Erhaltung der Produktivität sichergestellt ist, als auch das Stallgebäude und seine Einrichtungsgegenstände gegen Kondensat und den damit verbundenen Folgeschäden geschützt werden. In der DIN 18910 sind Kennzahlen zum erforderlichen Luftvolumenstrom pro Tier angegeben, die bei Planung der Lüftungsanlage berücksichtigt werden sollten.

2.9.1 Zwangslüftung

Ställe mit Zwangslüftung sind in der Schweinehaltung und Legehennenhaltung sehr stark verbreitet. Hier übernehmen Ventilatoren den Abtransport der Schadgase und sorgen so für das notwendige, den gesetzlichen Vorgaben entsprechende Stallklima. Es lässt sich auf Grund der Anordnung der Ventilatoren eine Unterteilung in Über-, Unter- oder Gleichdrucklüftung vornehmen, von denen die Unterdrucklüftung die größte Verbreitung hat (JUNGBLUTH et al., 2005). Das Zwangslüftungsverfahren kann klassisch in Zuluftsysteme und Abluftsysteme untergliedert werden.

Zuluftsysteme

Neben den Strahl Lüftungssystemen, bei denen die Frischluft über kleine Öffnungen mit hoher Geschwindigkeit in das Abteil geleitet wird, gibt es Rieselkanal- und Porendeckenlüftungen. Von ihnen geht im Gegensatz zur Strahlungslüftung keine Zugluft aus. Das Prinzip der Strahl Lüftung ist in Abbildung 12 zu erkennen. Die Luft strömt durch die links oben installierte Zuluftöffnung in den Stall hinein.



Abbildung 12: Strahl­lüftung in einem Abferkelabteil (DLG, 2006)

Bei Rieselkanal- und Porendeckenlüftungen handelt es sich um perforierte Zuluft­elemente, durch die die Frischluft langsam in den Stall einströmen kann. Eine Porendeckenlüftung ist in Abbildung 13 zu sehen. Die Zuluft strömt in einen isolierten Dachraum. Durch die Porendecke, die hier aus Lochplatten besteht, strömt die Luft weiter in das Stallabteil hinein. Die Einströmung wird durch den oben angeführten Unterdruck im Stallinnenraum induziert.

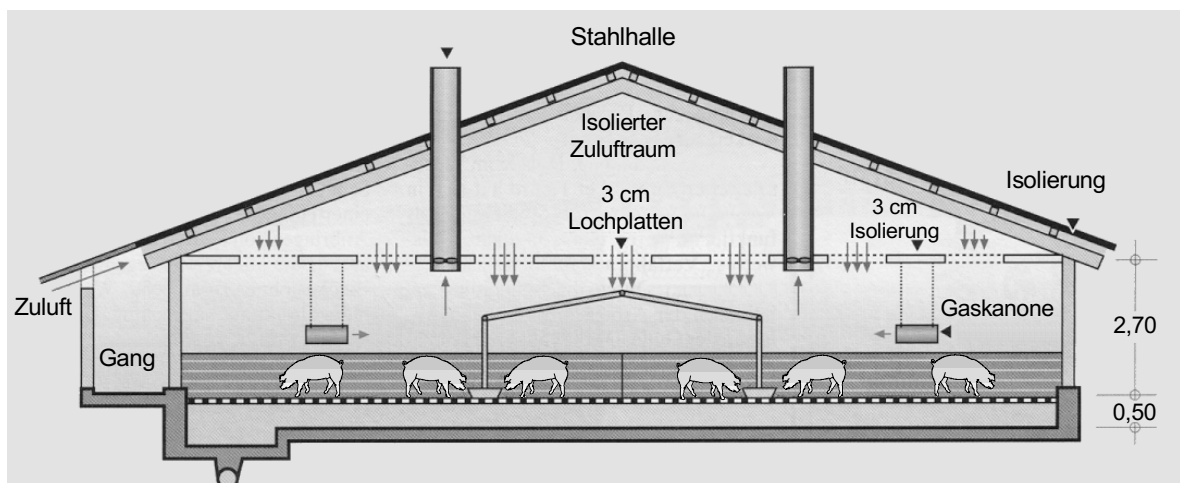


Abbildung 13: Porendeckenlüftung (nach JUNGLUTH et al., 2005)

Die Rieselkanäle sind je nach Bauart oberhalb des Futterganges oder über den Tieren mit einem Mindestabstand von ca. 0,5 m zur Außenwand installiert (s. Abbildung 14).

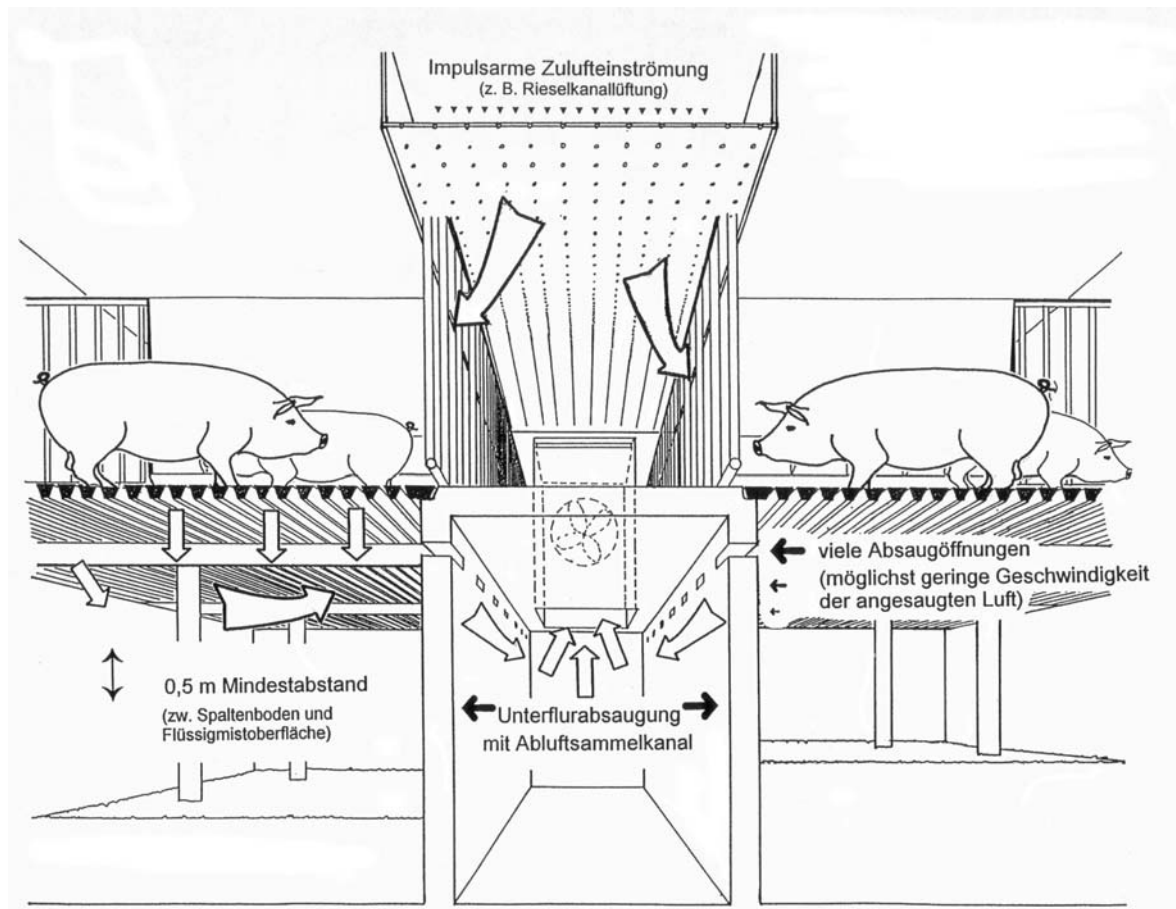
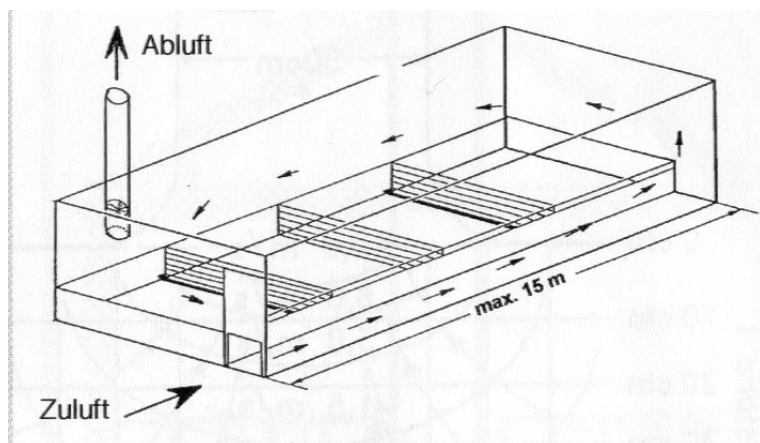


Abbildung 14: Zuluft einströmung über Rieselkanal

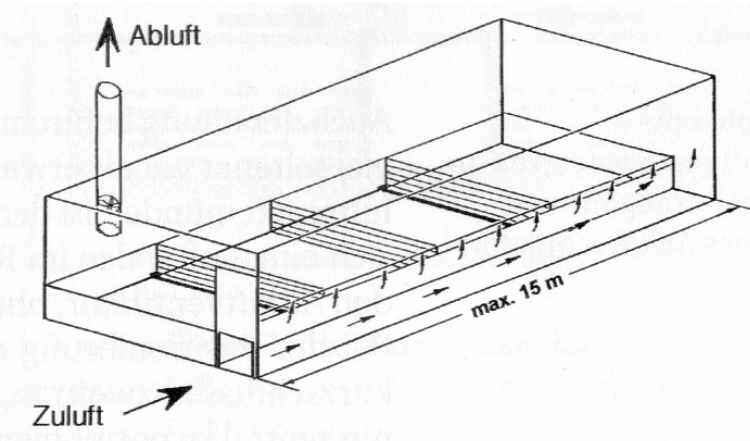
Bei der Planung von Ställen mit Rieselkanälen oder Porendecken sollte bedacht werden, dass ein gleichmäßiger Luftaustritt gewährleistet wird. Des Weiteren sollte die Einspeisegeschwindigkeit in den Rieselkanal und die Eintrittsgeschwindigkeit in den isolierten Zuluftraum bei Porendeckenlüftung nicht mehr als 2 m s^{-1} betragen. Eine Kanallänge von über 15 m führt bei einseitiger Einspeisung zu einer schlechten Luftverteilung im Stallabteil.

Natürlich bestehen auch Möglichkeiten, die verschiedenen Zuluftsysteme miteinander zu kombinieren. Als ein Kombi-System sei die Futtergang-Lüftung erwähnt, die unter Sommerbedingungen als Strahl- und im Winter als Verdrängungslüftung arbeitet. Durch eine verstellbare Öffnung im unteren Bereich der Abteiltür gelangt die Zuluft in den Futtergang, der zu den Tieren hin dicht geschlossene Buchtenwände haben sollte. Von da aus „fließt oder schwappt“ die Luft im Winterbetrieb zu den Tieren, während sie im Sommer zuerst bis an das Ende des Ganges fließt, um dann über die Tiere zum Ventilator zurückzuströmen. Die maximale Einströmgeschwindigkeit sollte im Sommer allerdings $2,5 \text{ m s}^{-2}$ nicht überschreiten. Auf Grund der begrenzten Fläche, über die die Frischluft in

das Abteil eintreten kann, beschränkt sich die Länge des Abteils auf ca. 15 m. Wenn allerdings der Unterflurbereich des Futterganges als Zuluftfläche mitgenutzt werden kann, können auch längere Abteile realisiert werden.



Sommersituation



Wintersituation

Abbildung 15: Raumluftrömung bei Futterganglüftung in der Sommer- und Wintersituation (nach JUNGBLUTH et al., 2005)

Abluftsysteme

Grundsätzlich kann bei den Abluftsystemen zwischen Oberflur- und Unterflurabsaugung unterschieden werden. Größter Unterschied dabei sind die Abluftpunkte. Während in Ställen mit Oberflurabsaugung Abluftventilatoren in der Decke installiert sind und die Abluft oberhalb der Tiere absaugen, wird bei der Unterflurabsaugung durch die Spalten des perforierten Bodens hindurch die Abluft unterhalb der Tiere abgesaugt. Die Dimensionierung des Lüftungssystems sollte nach DIN 18910 vorgenommen werden. Durch entsprechende Wahl der Ventilatoren kann eine auch ökonomisch sinnvolle

Lüftungsanlage installiert werden. Absperrschieber unterhalb des Ventilators oder Stellklappen im Abluftschacht sorgen neben der einstellbaren Drehzahl des Ventilators für eine genaue Anpassung des Abluftvolumenstroms an die Sollvorgaben.



Abbildung 16: Oberflurabsaugung mit Absperrschiebern

Wird bei der Unterflurabsaugung, wie in Abbildung 14 zu sehen ist, über einen Kanal abgesaugt und der Ventilator befindet sich am Ende dieses Kanals, dann sollte eine Anpassung der Öffnungen vorgenommen werden. Der abzusaugende Volumenstrom wächst mit zunehmender Länge des Kanals an (KRAUSE, LINKE, 2005). Die punktförmige Absaugung ist nicht mehr genehmigungsfähig, da mit sehr hoher Luftgeschwindigkeit abgesaugt werden muss. Der Austrag von Schadgaskonzentrationen, vor allem Ammoniak und Geruch, wäre zu hoch. Als Vorteil der Unterflurabsaugung sei zu nennen, dass die Luftqualität im Tierbereich hinsichtlich der NH_3 -Belastung geringer ist als bei der Oberflurabsaugung. Diesem Vorteil steht jedoch ein höherer Bauaufwand gegenüber (JUNGBLUTH et al., 2005).

2.9.2 Freie Lüftung

In frei gelüfteten Ställen muss die angesprochene Druckdifferenz durch physikalische Effekte erzielt werden. Dabei haben Thermik und Windeinflüsse an den Zuluft- und Abluftöffnungen, sowie die Strömungsverhältnisse in und um das Gebäude einen wesentlichen Einfluss auf das Emissionsgeschehen (MÜLLER, H-J. et al., 1996). Es lassen sich drei Systeme unterscheiden, die von der Bauart der Stallhülle und der Tierart abhängig sind.

Folgende Bauarten können unterschieden werden.

- Trauf-First-Lüftung (oder: Schwerkraft-Lüftung)
- Querlüftung
- Kombination aus Trauf-First- und Querlüftung
- Offenfront-Lüftung

Des Weiteren sind bauliche Aspekte zu beachten, die bei der Errichtung eines freigelüfteten Stallgebäudes eingehalten werden sollten (MUTAF, 2004). Damit der Effekt einer Schwerkraft-Lüftung optimiert werden kann, sollte die Dachneigung zwischen 20 und 30° liegen. Bei der Konstruktion der Firstöffnung in diesen Ställen sollte darauf geachtet werden, dass Windabweiser eingebaut werden, die dort das Einströmen von Außenluft verhindern. In quergelüfteten Anlagen sollten die Seitenöffnungen ca. 40 bis 50 % der Seitenfläche bei einer Traufenhöhe von mindestens 3 m ausmachen. Bei Bedarf ist die Dämmung der Decke ratsam, um einen zusätzlichen Wärmeeintrag in den Stall im Sommer zu vermeiden (JUNGBLUTH et al., 2005; SAINSBURY, 1983). Im Folgenden werden die vier Lüftungsvarianten kurz beschrieben.

Trauf-First-Lüftung

Die Trauf-First-Lüftung ist ein weit verbreitetes Lüftungssystem in der Rinderhaltung. Von den Tieren wird Wärme produziert, die eine Thermik im Stallinnenraum induziert, so dass eine Luftbewegung von unten nach oben entsteht. An den Traufseiten strömt zwangsläufig Frischluft nach, die sich im Stall durch Luftverwirbelungen verteilt, Schadgase aufnimmt und als Abluft durch den offenen First den Stall verlässt wie in Abbildung 17 zu erkennen ist (KRAUSE, LINKE, 2004a). Dieser Effekt wird durch den Windstrom am First des Gebäudes unterstützt. Es entsteht ein Unterdruck im Stall, der den Volumenstrom erhöht (s. Abbildung 17). Bei geschlossenen Toren eines Boxenlaufstalls wird das Ableitverhalten der Emissionen maßgeblich durch die Windanströmung der First- sowie Traufseiten beeinflusst. Des Weiteren ändern sich die Luftmassenbewegungen im Stallinnenraum unter wechselnden Außenbedingungen, so dass unterschiedliche Stofffreisetzungen im Stall auftreten können (KRAUSE, LINKE, 2004).

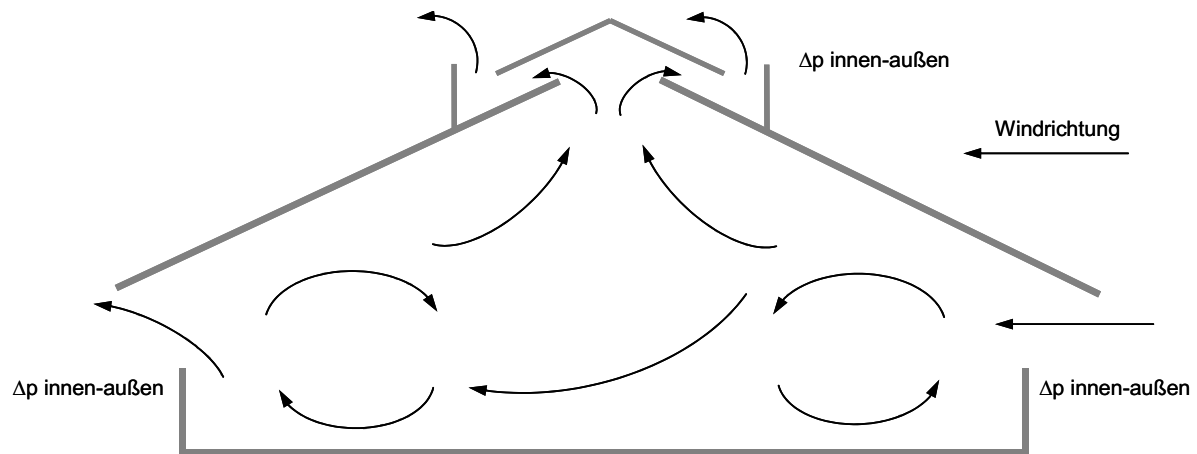


Abbildung 17: Prinzip der Trauf-First-Lüftung (modifiziert, nach Haidn, Müller, 2003)

Querlüftung

Für die Querlüftung werden Stallbreiten bis 12 m empfohlen. Hier hat der Wind den größten Einfluss auf den Luftdurchsatz. Beide Längsseiten des Stalles haben breite Öffnungen, die bei Bedarf in ihrer Öffnungsbreite eingestellt werden können. An der dem Wind zugewandten Seite strömt die Frischluft in den Stall ein. Es herrscht ein Überdruck, so dass dort keine Abluft den Stall verlassen kann. Der Abluft bleibt die gegenüberliegende Längsseite des Gebäudes für den Austritt. Der Dachraum ist in diesem System geschlossen. Absolute Windstille kann natürlich zu Problemen führen (Haidn, Müller, 2003). Der Einsatz von Umluftventilatoren im Stallinnenraum ist dann unerlässlich.

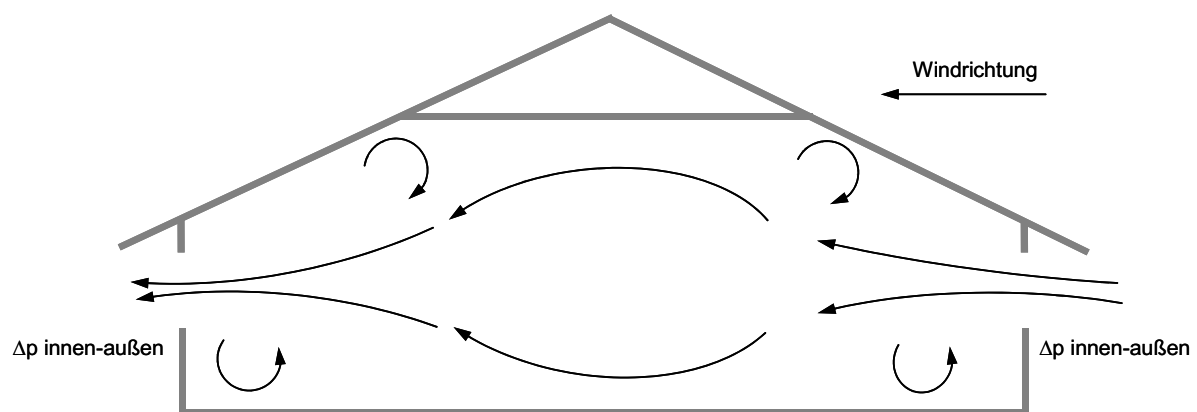


Abbildung 18: Prinzip der Querlüftung (nach Haidn, Müller, 2003)

Kombination aus Trauf-First-Lüftung und Querlüftung

Werden bei Wahl der Querlüftung die Stallbreiten von 12 m überschritten, empfiehlt sich der Einbau eines offenen Firstes, durch den zusätzlich Abluft entweichen kann und der thermische Effekt genutzt wird. Mit diesem System ist es möglich, den Luftdurchsatz an die Außenklimasituation anzupassen. In den Wintermonaten kann mit Hilfe von Jalousien die Zuluftfläche verkleinert werden, so dass primär die Trauf-First-Lüftung arbeitet. In der Sommersituation wird dann bei offenen Seitenflächen der anströmende Wind ausgenutzt, um den Luftdurchsatz zu erhöhen.

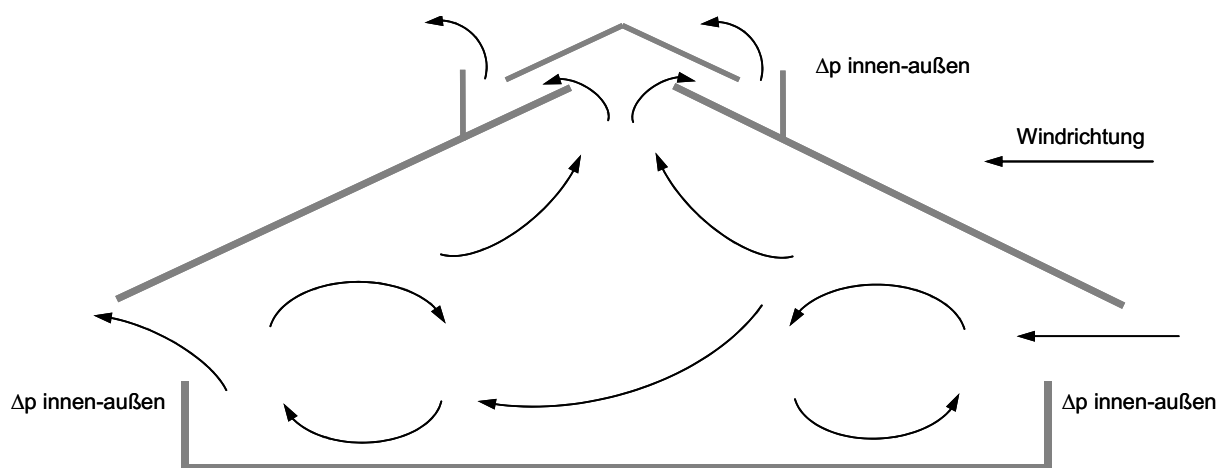


Abbildung 19: Prinzip der Kombination von Trauf-First-Lüftung und Querlüftung

Offenfront-Lüftung

In Offenfrontställen entspricht die Stallinnentemperatur den Außenklimabedingungen. Die Ausrichtung der offenen Seite nach Südosten gewährleistet, dass im Winter die tief stehende Sonne bis in den hinteren Liegebereich der Tiere scheint. Des Weiteren sollen so Schlagregen, Treibschnee und Westwind abgehalten werden. (MÜLLER, P. 1995).

Bei der Offenfront-Lüftung strömen unter Winterbedingungen Zu- und Abluft durch die gleiche Öffnung. Die drei anderen Wände müssen je nach Tierart unbedingt geschlossen sein, um Zugluft zu vermeiden. Besonders Kälber sind dabei als empfindlich einzustufen. Oftmals ist es auch ratsam, die offene Seite mit einem Windschutznetz zu versehen, damit die Zuluftgeschwindigkeit gebremst wird. Im Sommer dagegen sind die Windschutznetze zu entfernen. Bei sehr heißem Wetter sollte zudem die Möglichkeit der Öffnung der gegenüberliegenden Wand bestehen, um einen Hitzestau im Stall zu vermeiden. Es kommt eine Querlüftung zustande.

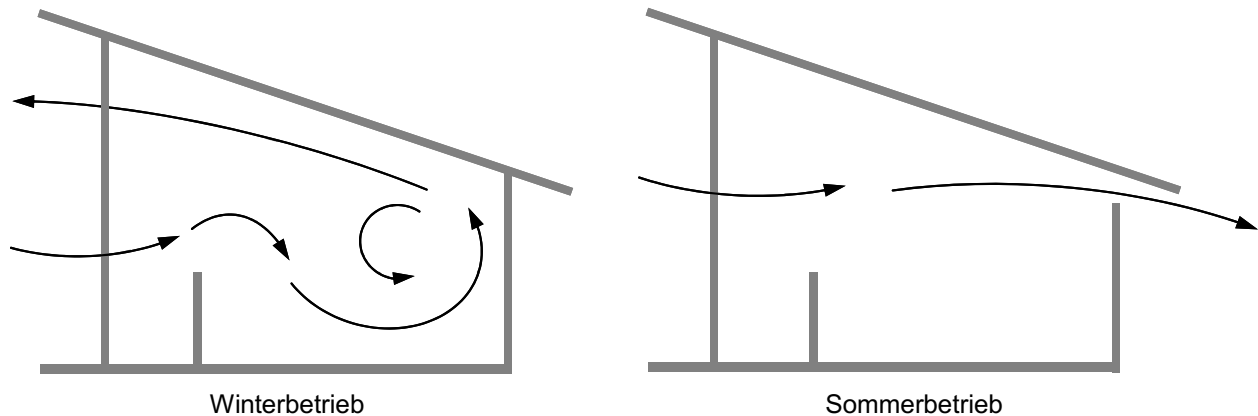


Abbildung 20: Erwünschtes Strömungsbild in einem Offenfrontstall (nach VAN CAENEGEM, 2006)

2.9.3 Methoden zur Bestimmung des Luftwechsels

Zur Bestimmung des Luftwechsels in zwangsgelüfteten Nutztierställen kann zwischen direkten und indirekten Methoden unterschieden werden. Zu den direkten Methoden gehören Messventilatoren, Differenzdruckmessungen mit Normblenden und Ein-Punkt-Messungen. Die indirekten Methoden basieren auf der Schleifenmethode mit Anemometer und der Raster- oder Netzmessung mit Anemometern. Frei gelüftete Ställe weisen meistens komplizierte Strömungsverhältnisse auf, so dass die Lufrate durch Bilanzierungsmethoden oder Abklingmethoden in Verbindung mit Tracergaszusatz beschrieben werden kann.

Messventilator (Turbinenradzähler) - Zwangslüftung

Eine der direkten Methoden zur Bestimmung des Luftwechsels in zwangsgelüfteten Ställen ist der Einsatz von Messventilatoren. Durch den Luftstrom wird das Turbinenrad in Rotation versetzt. Über die Zählung der Flügelradumdrehungen mit einem Entfernungssignalgeber wird der Messwert als eine Drehzahl pro Zeiteinheit ausgegeben. Um eine Umrechnung in den Luftvolumenstrom vornehmen zu können, müssen die Messventilatoren kalibriert werden. Ein weiterer Grund für die Notwendigkeit einer Kalibrierung sind auftretende Reibungskräfte in den Lagern (VRANKEN et al., 1997).

Der Einsatz des Messventilators sollte im Idealfall in runden Abluftkaminen gleichen Durchmessers erfolgen, damit der gesamte Luftstrom erfasst werden kann. Der messbare Volumenstrom hängt von der Trägheitsgrenze der Achslagerung des jeweils eingesetzten Messventilators ab. Die Empfindlichkeit des Messsystems variiert bei unterschiedlichen Anströmbedingungen. Diese ist u.a. von der Einbausituation abhängig, wie in Abbildung 21 zu erkennen ist. (Büscher et al. 2001)

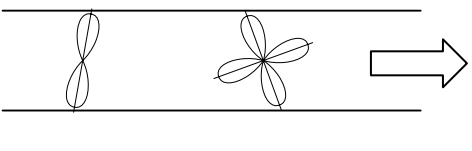
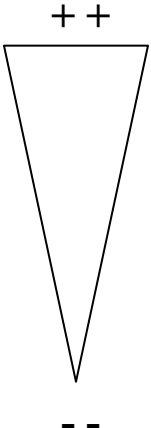
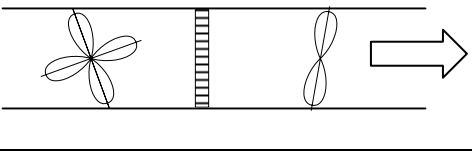
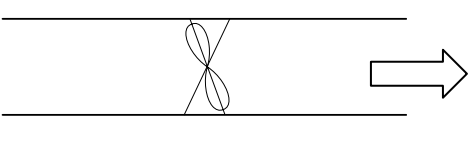
Anordnung des Messventilators	Aufbau und Prinzip	Messgenauigkeit
a) vor dem Ventilator im Rohr ohne Gleichrichter		
b) hinter dem Ventilator im Rohr mit Gleichrichter		
c) drallfrei im Rechteckkanal ohne Gleichrichter		

Abbildung 21: Einbausituationen von Messventilatoren im turbulenten Luftstrom und zu erwartende Messgenauigkeit (nach BÜSCHER et al., 2001)

Differenzdruckmethode mit Normblenden - Zwangslüftung

Die gemessene Druckdifferenz mit Normblenden scheidet als weitere direkte Methode auf Grund des hohen messtechnischen Aufwandes in Stallanlagen aus. Bei dieser Methode wird auf den Förderstrom zurückgerechnet, in dem der dynamische Druck der Luftströmung mit Ringblenden gemessen wird. Dabei müssen laut BÜSCHER et al., (2001) die Randbedingungen relativ konstant sein.

Indirekte Methode - Zwangslüftung

Es ist aber möglich, die Druckdifferenz zwischen Frischluft-Einlass und Abluft festzustellen, in dem diese über die Flächen und dort gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten wie folgt berechnet werden kann:

Formel 5: Bestimmung des Luftvolumenstroms durch Luftgeschwindigkeit und Querschnittsfläche

$$\dot{V} = \bar{v} \cdot A_K$$

mit:

\dot{V} = Volumenstrom [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]

\bar{v} = mittlere gewichtete Luftgeschwindigkeit

A_K = Querschnittsfläche des Strömungskanals

Die Querschnittsfläche kann leicht geometrisch bestimmt werden. Bei der Berechnung der mittleren Luftgeschwindigkeit können zwei Verfahren zum Einsatz kommen. Die Schleifenmethode beinhaltet die Messung und anschließende Bildung eines Mittelwertes der Luftgeschwindigkeit auf mehreren Schleifenbahnen im Kanalquerschnitt. Bei der Raster- und Netzmessung erfolgt die Geschwindigkeitsmessung an mehreren Stellen über den Querschnitt verteilt (VDI-Richtlinie 2080, 1984). Wenn die Querschnittsfläche einen Kreis beschreibt, dann werden die Kreisringe (Schwerlinien) gebildet, auf denen die Messungen vorgenommen werden.

Bilanzierungsmethoden – Freie Lüftung

Da in den freigelüfteten Stallungen ein Einbau von Messventilatoren oder Anemometern möglich ist, werden oftmals Stoff- oder Wärmebilanzen aufgestellt, über die eine Bestimmung des Luftvolumenstroms durchgeführt werden kann. Für eine Bilanzierung kann folgende allgemeingültige Gleichung aufgestellt werden:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Zugeführte} \\ \text{Ströme} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Abgeführte} \\ \text{Ströme} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Änderung in} \\ \text{der Stallluft} \end{array} \right\}$$

Die **Wärmebilanzierung** beinhaltet alle Wärmeströme, die in einem Stallgebäude vorherrschen. Der Wärmetausch mit dem Gebäude, die Lüftungswärme, Heizungswärme und sensible Wärme der Tiere sind wie auch die Verdunstung, Kondensation und Temperaturdifferenz (innen ↔ außen) Bestandteil der Bilanzierung. Da sich die äußeren Randbedingungen, vor allem die Temperaturdifferenz, ändern können, ist diese Methode mit einem nicht zu unterschätzenden Fehler behaftet. (MÜLLER, H-J. 2001)

Der Luftvolumenstrom berechnet sich dann aus der abgeführten Wärmemenge, der Dichte der Luft, der spezifischen Wärmekapazität der Luft sowie der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft.

Formel 6: Berechnung des Volumenstroms mit der Wärmebilanzmethode

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_{\text{abgeführt}} \cdot 3600}{\rho_{\text{Luft}} \cdot C_{\text{Stallluft}} \cdot \Delta T}$$

mit:

\dot{V} = Luftvolumenstrom [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]

$\dot{Q}_{\text{abgeführt}}$ = abgeführte Wärmemenge [W]

ρ_{Luft} = Dichte der Luft [kg m^{-3}]

$C_{\text{Stallluft}}$	= spezifische Wärmekapazität der Luft [$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
ΔT	= Temperaturdifferenz [K]

Bei den **Stoffbilanzmethoden** sind die CO_2 -Bilanz, die H_2O -Bilanz und die Tracergasmethode zu erwähnen. Erstere sind unmittelbar abhängig von Tierart, Tierverhalten und Klimabedingungen (VAN OUWERKERK, PEDERSEN, 1994). Die Aufstellung einer Stoffbilanz kann durch Verlaufsmessungen der CO_2 -Konzentration in der Zu- und Abluft aufgestellt werden. Die notwendigen Berechnungsdaten lassen sich aus Tabellenwerken entnehmen (CIGR, 1984). Dabei ist die Abschätzung der Wasserdampfproduktion unsicherer zu betrachten als die CO_2 -Produktion. Beide Methoden können nach MÜLLER, H.-J. (2001) lediglich der Abschätzung des Luftvolumens dienen, da die Quantifizierung der Stoffmengen einen hohen Fehler besitzt.

Als weitere Möglichkeit zur Bestimmung des Luftvolumenstroms in freigelüfteten Ställen bestehen Tracergasmethoden, die als Stoffbilanzen mit den Gasen SF_6 , $^{85}\text{Krypton}$ oder CO vorgenommen werden. Innerhalb dieser Methode kann zwischen der Abklingmethode, der Anstiegsmethode, sowie der konstanten Tracerdosierung und konstanten Tracerkonzentration unterschieden werden. In allen Verfahren ist die homogene Vermischung des Tracergases mit der Stallluft zwingende Voraussetzung (DEMERS et al., 1997).

Im Folgenden werden die Abklingmethode und die konstante Tracerdosierung betrachtet. Die weiteren Verfahren und Anforderungen an die Tracergase werden bei MÜLLER, H.-J. (2001) eingehend beschrieben.

Bei der **Abklingmethode** wird nach einmaligem Dosieren des Tracergases in die Zuluft dessen Konzentrationsabfall in der Abluft gemessen. Es gelten nach MÜLLER, H.-J. (2001) einige Rahmenbedingungen, die beim Messaufbau beachtet werden müssen:

- Nach einmaliger Dosierung ist keine weitere Tracerquelle vorhanden.
- Es ist keine Senke vorhanden.
- Eine vollständige Durchmischung des Tracergases mit der Stallluft ist gewährleistet.
- Die Gaskonzentration in der nachströmenden Frischluft ist nach Dosierung gleich Null
- Vor der Eindosierung ist die Anfangskonzentration gleich Null.

Daraus ergibt sich folgende Gleichung der Bestimmung des Luftvolumenstroms:

Formel 7: Abklingmethode (MÜLLER, H.-J. 2001)

$$c_{t_i} = c_{t_0} \cdot e^{-\frac{\dot{V}}{V} \cdot t}$$

mit:

$$c_{t_i} = \text{Massenkonzentration in der Raumluft zum Zeitpunkt } t_i \text{ [g m}^{-3}\text{]}$$

$$c_{t_0} = \text{Massenkonzentration zum Zeitpunkt } t = 0 \text{ [g m}^{-3}\text{]}$$

$$\dot{V} = \text{Volumenstrom [m}^3 \text{ s}^{-1}\text{]}$$

$$V = \text{Stallvolumen [m}^3\text{]}$$

$$t = \text{Zeit [s]}$$

Der Quotient $\left(\frac{\dot{V}}{V}\right)$ beschreibt die Luftwechselzahl (n). Durch Multiplikation der

Luftwechselzahl mit dem Stallvolumen kann der Luftvolumenstrom berechnet werden. Bei der Abklingmethode kann jedoch nur ein zeitlicher Ausschnitt des Luftwechsels im Stall beschrieben werden. Des Weiteren ist der methodische Fehler von der zeitlichen Auflösung des Messgerätes zur Detektion der Tracergaskonzentration abhängig. Eine Validierung der Abklingmethode ist von SCHNEIDER, T. et al. (2005) in einem zwangsgelüfteten Broilermaststall vorgenommen worden. Dank einer hohen zeitlichen Auflösung von einer Sekunde konnte eine hohe Übereinstimmung des ermittelten Luftvolumenstroms mit der Messventilatormethode nachgewiesen werden.

Bei der konstanten Tracerdosierung wird ein konstanter Tracergasstrom zugeführt. Die Berechnung des Luftvolumenstroms erfolgt durch Bestimmung der Konzentrationsdifferenz zwischen Abluft und Frischluft. Damit ist die Aufzeichnung eines zeitlichen Verlaufs des Luftvolumenstroms möglich. Er wird wie folgt berechnet:

Formel 8: Formel zur Berechnung der Konzentrationsdifferenz bei der konstanten Tracergas-Methode

$$c_i(t) = \frac{\dot{m}_Q}{\dot{V}} \cdot \left\{ 1 - e^{-\frac{\dot{V}}{V} \cdot t} \right\}$$

mit:

$$c_i(t) = \text{Massenkonzentration in Abhängigkeit von der Zeit [g m}^{-3}\text{]}$$

$$\dot{m}_Q = \text{Tracermassenstrom [g h}^{-1}\text{]}$$

Der Verlauf der Konzentration (c_i) über die Zeit ($t \rightarrow \infty$) kann als Konzentrationsdifferenz zwischen der Zuluft ($c_{Tracer\ Zuluft}$) und der Abluft ($c_{Tracer\ Abluft}$) eingesetzt werden. Damit ergibt sich für den Luftvolumenstrom folgender Term:

Formel 9: Berechnung des Luftvolumenstroms mit der konstanten Tracergas-Methode

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_Q}{c_{Tracer\ Abluft} - c_{Tracer\ Zuluft}}$$

mit:

\dot{V} = Luftvolumenstrom [$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$]

\dot{m}_Q = Tracermassenstrom [g h^{-1}]

$c_{Tracer\ Abluft}$ = Konzentration des Tracergases in der Abluft [g m^{-3}]

$c_{Tracer\ Zuluft}$ = Konzentration des Tracergases in der Zuluft [g m^{-3}]

3 Material und Methoden

3.1 Beschreibung der untersuchten Haltungssysteme

In den folgenden Unterkapiteln werden alle untersuchten Stallsysteme beschrieben. Zum einen wird Bezug genommen auf die Abmessungen der Stallungen, zum anderen werden die Haltungs- und Fütterungssysteme vorgestellt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die einzelnen Stallsysteme wie folgt abgekürzt.

- Abferkelabteil Abf
- Wartestall/Selbstfangbuchten WS_Sb
- Wartestall Abruffütterung WS_Ab
- Ferkelaufzucht Stall 1 FA_1
- Ferkelaufzucht Stall 2 FA_2
- Schweinemast Vormast Stall 1 VM_1
- Schweinemast Vormast Stall 2 VM_2
- Schweinemast/Einstreu VM_Streu
- Schweinemast Endmast Stall 1 EM_1
- Schweinemast Endmast Stall 2 EM_2
- Rinderhaltung: Trauf/First Rind_TF
- Rinderhaltung: Spaceboard Rind_SB
- Legehennen Käfig Leg_Kä
- Legehennen Voliere Leg_Vol
- Putenmast Pu_Ma

3.1.1 Haltungssystem Schwein

In der Schweinehaltung sind die klassischen Handlungsabschnitte Ferkelerzeugung, Ferkelaufzucht und Schweinemast untersucht worden. Der Hauptteil der Messungen fand in konventionellen Stallsystemen mit Vollspaltenboden und Zwangslüftung statt. In der Schweinemast wurde jedoch auch ein mit Stroh eingestreutes System in die Untersuchung aufgenommen.

Aus Abbildung 22 lässt sich erkennen, dass insgesamt acht Varianten untersucht wurden.

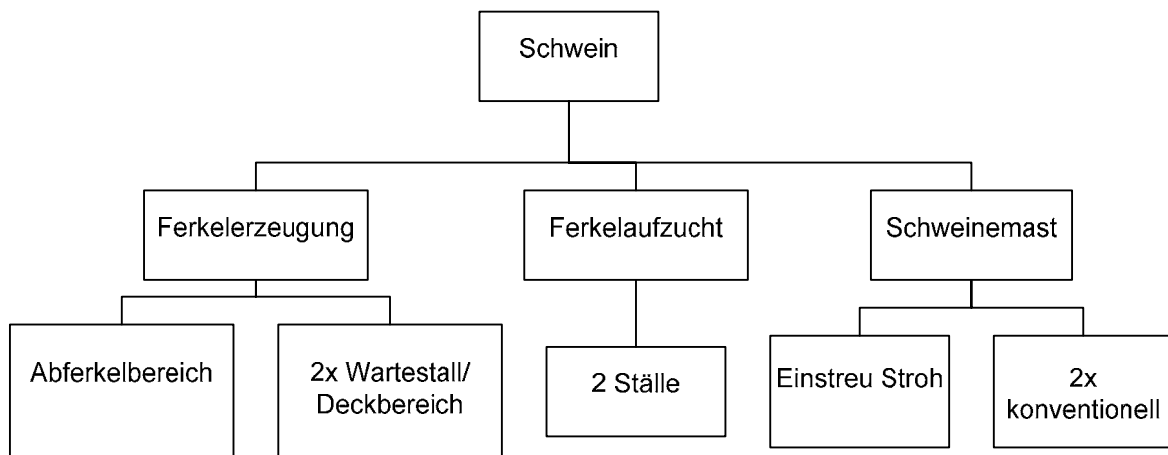


Abbildung 22: Untersuchte Ställe im Bereich Schwein

Abferkelabteil

Das untersuchte Abferkelabteil ist typisch für die konventionellen Stallsysteme und bietet Platz für acht Sauen. Der 10 m lange, 6 m breite und 2,8 m hohe Raum ist durch einen Gang getrennt, so dass sich jeweils vier Sauen links und rechts dieses Ganges in Abferkelbuchten befinden. Jede Abferkelbucht ist getrennt in Schutzkorb für die Sau sowie Ferkelnest und Laufbereich für die Ferkel. Die Sauen werden eine Woche vor dem Abferkeltermin in das Abteil eingestallt. Während dieser Zeit sind keine Beprobungen vorgenommen worden. Erst ab der zweiten von vier Säugewochen fanden die Messungen statt.

Die Fütterung der Sauen erfolgte zweimal täglich per Hand in die wandständigen Tröge. Die Ferkel wurden ab der zweiten Lebenswoche zusätzlich mit sogenanntem Praestarter versorgt.

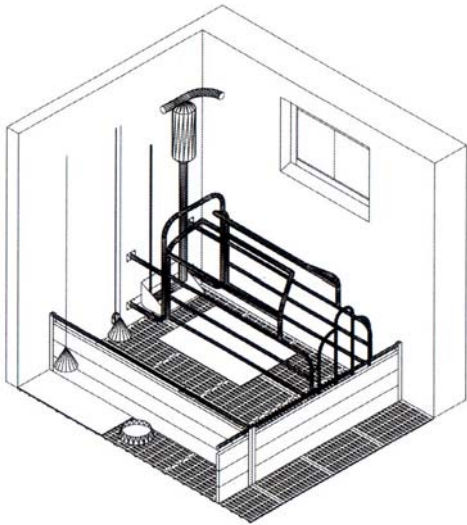


Abbildung 23: Skizze einer Abferkelbucht (KTBL-Schrift 446)

Deckzentrum und Wartestall

Aus rechtlichen Gründen müssen in allen Bundesländern die Sauen in Gruppen gehalten werden. Lediglich während der Säugezeit und der Belegwoche dürfen sie in Einzelhaltung aufgestellt werden. Somit können das Deckzentrum und der Wartebereich im Bezug auf die Haltungsansprüche, Lüftung und Heizung als identisch betrachtet werden. In der Gruppenhaltung lassen sich verschiedene Systeme realisieren, von denen in dieser Arbeit zwei mit Zwangslüftung näher untersucht worden sind. Zum einen sind in einem Deckzentrum mit Selbstfangbuchten auf Vollspaltenböden und der Möglichkeit einer Gruppenhaltung nach der Belegung die Staubemissionen bestimmt worden, zum anderen wurde ein Wartestall mit einer installierten Abruffütterung mit in das Messprogramm aufgenommen.

Im Wartestall mit Abruffütterung werden 40 Sauen als Gruppe gehalten. Das mit Vollspalten ausgelegte Abteil hat eine Länge von 11 m und eine Breite von 9 m. Die Höhe beträgt 2,8 m. Neben seinem Bewegungs- und Fütterungsbereich bietet es auch Rückzugsflächen, in denen die Sauen ruhen können. Die Zuluft wird durch eine Porendecke in das Abteil geleitet. Ein Abluftventilator mit einem Durchmesser von 520 mm in der Mitte des Abteils sorgt für den Abtransport der Schadgase. Die Fütterung der Sauen erfolgt ohne direktes Eingreifen des Landwirts. Nach Freigabe der Abruffütterung können die Tiere die Station betreten und werden per Responder identifiziert. Anschließend wird eine Portion Futter zugeteilt. Die Sauen haben so die Möglichkeit, ihre durch den Landwirt bestimmte Futtermenge im Laufe des Tages aufzunehmen.

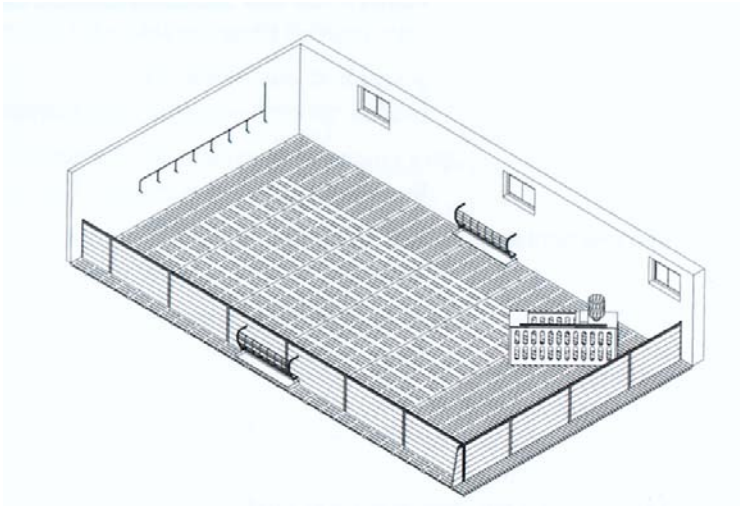


Abbildung 24: Skizze eines Wartestalls mit Abruffütterung (KTBL-Schrift 446)

Das zweite untersuchte Abteil wird als Deck- und Wartestall genutzt. Es besteht die Möglichkeit, die Sauen zur Belegung in den Selbstfangbuchten zu fixieren. Im weiteren Verlauf werden die Sauen lediglich zur Fütterungszeit in ihren Buchten festgehalten, so dass eine Aufstallung der 44 Sauen in dem 16 m langen, 7,5 m breiten und 3 m hohen Abteil in Gruppenhaltung durchgeführt werden kann (s. Abbildung 25). Von zwei Gängen an beiden Seitenwänden erfolgt die Fütterung der Sauen per Hand zweimal täglich. An der Stirnseite des Abteils befinden sich zwei Eberbuchten.

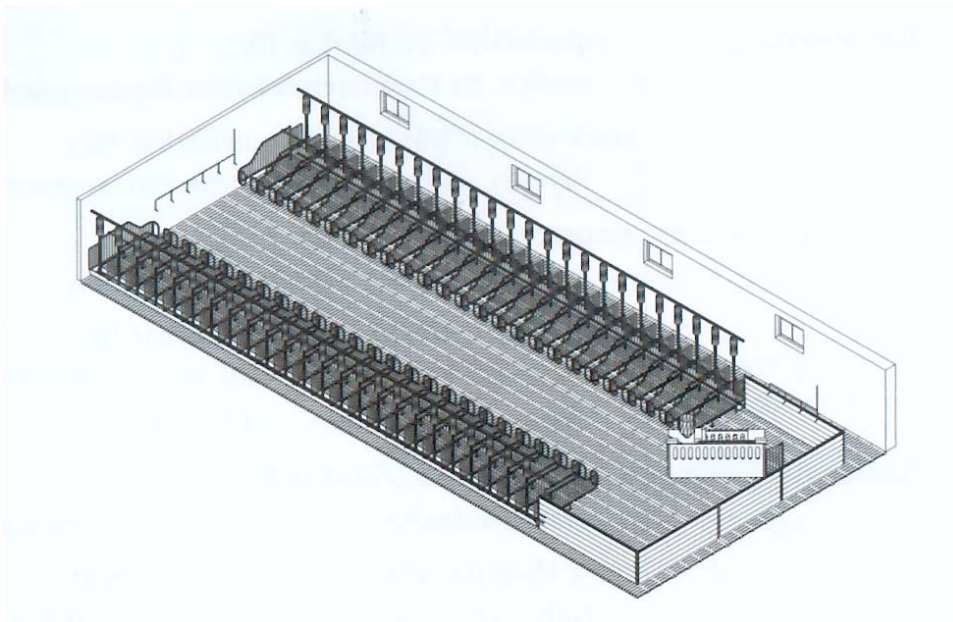


Abbildung 25: Skizze eines Deckzentrums mit Fress-Liegebuchten und mittig liegendem Laufbereich (KTBL-Schrift 446)

Aus dem Dachraum gelangt die Zuluft über einen 0,8 m breiten Rieselkanal unterhalb der Decke in den Stall. Der Rieselkanal ist endständig mit der linken und rechten Abteilwand abgeschlossen. Die Luft fällt somit zunächst in den Futtergang, strömt durch den Liegebereich der Selbstfangbuchten und gelangt schließlich zum mittig installierten Abluftkamin mit einem Durchmesser von 520 mm.

Ferkelaufzucht

Aus der Ferkelaufzucht sind Daten aus zwei konventionellen Ställen in das Projekt eingegangen. Beide Abteile haben 220 bzw. 200 Ferkelaufzuchtplätze, aufgeteilt in vier bzw. acht Buchten. Das Platzangebot beträgt 0,35 m² pro Tier. In den Abteilen erfolgt die Zuluftführung über die Türen der Abteile (Türganglüftung). Abbildung 26 zeigt beide Haltungssysteme der Klein- bzw. Großgruppe.

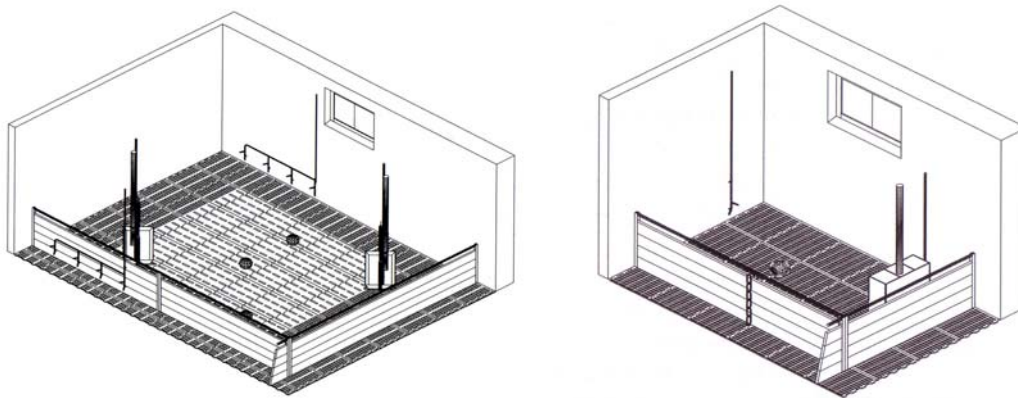


Abbildung 26: Skizzen der beiden Ferkelaufzuchtabteile (links Kleingruppe, rechts Großgruppe) (KTBL-Schrift 446)

Es bestehen jedoch Unterschiede in der Abluftführung. Im etwas größeren Abteil (FA_2) ist eine Kombination von Ober- und Unterflurabsaugung eingebaut. Die Winterluftfrate wird komplett unterflurseitig an zwei Punkten abgesaugt. Die Absaugpunkte liegen links und rechts in den vorderen Ecken des Abteils. Ein Sammelkanal führt von dort nach oben und weiter unterhalb der Decke Richtung Futtergang. Von dort erfolgt der Abtransport nach außen. Die Abluft wird in FA_1 mit zwei Ventilatoren Oberflur abgesaugt.

Die Tiere werden auf Vollspaltenboden gehalten und mit Trockenfutter versorgt. Das Einstallgewicht der Tiere beträgt ca. 8 bis 10 kg. Bei einem Gewicht von 30 kg erfolgt eine Umstallung in den Bereich der Schweinemast. Die durch die rechtlichen Rahmenbedingungen vorgeschriebenen Spielmöglichkeiten werden durch eine in jeder Bucht an der Decke angebrachten Spielkette und den Rohrbreiautomaten erfüllt.

Schweinemast

Für den Bereich der Schweinemast standen zwei baugleiche konventionelle Mastschweinställe mit Vollspaltenboden zur Verfügung, die mit einem Trockenfütterungssystem (Breiautomaten) sowie einer Futtergangelüftung ausgestattet waren (Abbildung 27). Die untersuchten Abteile in Stall 1 (VM/EM_1) hatten 96 Mastplätze, Stall 2 (VM/EM_2) 118 Mastplätze bei einem Platzangebot von 0,8 m² pro Tier.

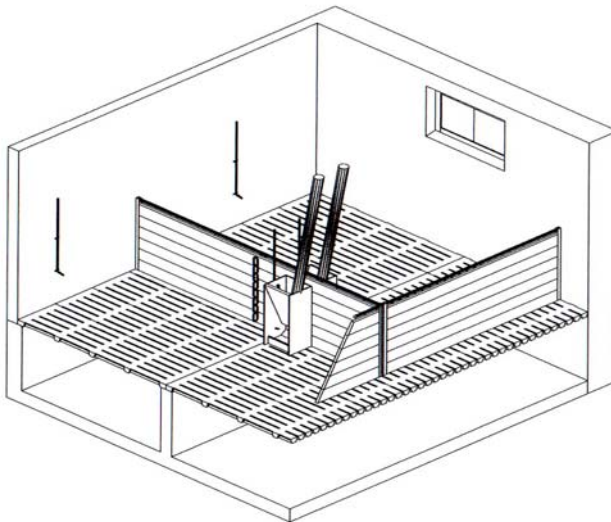


Abbildung 27: Skizze einer Mastschweinebucht (KTBL-Schrift 446)

Da bei den Mastschweinen auch eine vom Lebendgewicht der Tiere abhängige Erfassung der Staubemissionen vorgenommen worden ist, fanden insgesamt in jeweils zwei Abteilen pro Stall parallel Messungen statt. Diese Art der Untersuchung war möglich, da in den Ställen eine abteilweise Belegung mit Ferkeln erfolgte. Das Einstallgewicht der Ferkel betrug ca. 25 bis 28 kg. Bei einem Gewicht von 117 kg verließen sie den Stall.

Einziger Unterschied zwischen den Stallanlagen war die unterschiedliche Anzahl von Abluftventilatoren pro Abteil. In Stall 1 wurde die Abluft mit zwei Ventilatoren aus dem Abteil befördert. Die Abluftpunkte lagen mittig über den jeweiligen ersten Buchten links und rechts des Futtergangs. Stall 2 dagegen besaß nur einen Ventilator pro Abteil, der oberhalb des Futtergangs im Eingangsbereich des Abteils installiert war. Er konnte so eingestellt werden, dass durch zusätzliche Abluftkanäle auch über den Tieren in den ersten Buchten links und rechts eine Absaugung möglich war.

Neben den beiden konventionellen Systemen ist der mit Stroh eingestreute Schweinemaststall der Lehr- und Forschungsstation Klein Altendorf der Universität Bonn untersucht worden. Da in den jahreszeitlichen Messzeiträumen keine zusätzlichen Versuche in diesem

Stall stattfanden, konnte von einer typischen Bewirtschaftung ausgegangen werden. Das untersuchte Stallabteil mit einer Länge von 14 m, einer Breite von 12,6 m und Höhe von 3,2 m besteht aus einem mittig liegenden Futtergang, von dem sich je drei Buchten links und rechts befinden. Der vordere Bereich am Futtergang jeder Bucht ist als planbefestigte Fläche ausgelegt. Der hintere eingestreute Bereich liegt etwa 50 cm tiefer und ist über Stufen zu erreichen. Im Laufe der Mast füllt sich der Einstreubereich mit Mist, so dass am Ende der Mast beide Bereiche auf einem Niveau liegen. Die Fütterung erfolgt über eine Seilkettenförderanlage mit Trockenfutter in Mehlform. Die Futterautomaten sind in die Trennwand zum Futtergang eingelassen. Eine Wasserversorgung am Automaten ist im Gegensatz zu den anderen untersuchten konventionellen Ställen nicht vorhanden. Über zwei Zapfentränken im Einstreubereich kann Wasser aufgenommen werden. Die Zuluftführung erfolgt durch einen Rieselkanal über dem Tierbereich. Ein Abluftventilator mit einem Durchmesser von 630 mm befindet sich in der Mitte des Stalles. Die Stroheinstreu wird nach Bedarf aufgefüllt. Normalerweise geschieht das täglich bei der morgendlichen Tierkontrolle. Nach dem Verkauf der Tiere wird ausgemistet. Abbildung 28 zeigt eine Prinzipskizze des untersuchten Stallsystems.

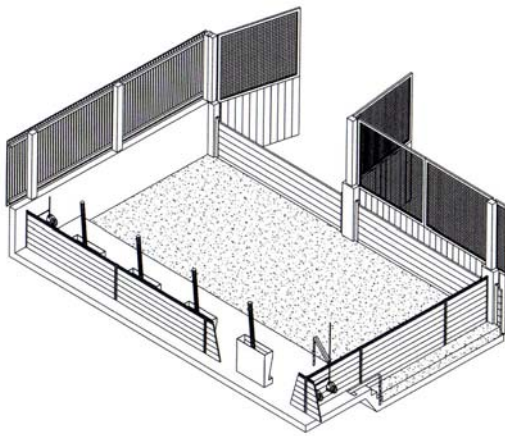


Abbildung 28: Skizze eines mit Stroh eingestreuten Schweinemastabteils (KTBL-Schrift 446)

3.1.2 Haltungssystem Rind

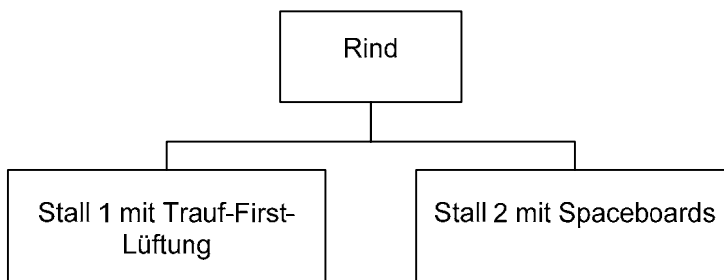


Abbildung 29: Untersuchte Ställe im Bereich Rind

Für die Untersuchung standen zwei Milchviehställe zur Verfügung, die als Liegeboxenställe konzipiert waren. Mit einem Tierbesatz von etwa 50 GV sind beide Ställe miteinander vergleichbar. In beiden Stallungen wird der anfallende Wirtschaftsdünger unterhalb des Betonspaltenbodens gelagert. Es gibt jedoch bauartbedingte Unterschiede, die einen Einfluss auf das Strömungsgeschehen und den Luftvolumenstrom haben.

Der erste Liegeboxenlaufstall (Rind_TF) ist als Trauf-First-gelüftetes Gebäude errichtet worden. Die Länge beträgt 32 m bei einer Breite von 24 m, einer Traufhöhe von 2,5 m und einer Firsthöhe von 9 m. Er ist als 4-reihiger Liegeboxenstall konzipiert. Der Futtertisch teilt den Stall in einen Bereich mit drei Liegeboxenreihen und Melkraum auf der einen und den Buchten für die weibliche Nachzucht, sowie einen Abkalbebereich auf der gegenüberliegenden Seite. Das Dach ist nicht wärmegeämmt. Während der Stall im Winter und den Übergangsmonaten mit Trauf-First-Lüftung betrieben wird, entfernt der Betriebsleiter im Sommer an der Traufseite in einer Höhe von 2 m eine 50 cm hohe Fensterreihe aus Glasbausteinen, so dass eine Kombination aus Trauf-First-Lüftung und Querlüftung entsteht. Abbildung 30 zeigt den beschriebenen Stall mit den Elementen für die Trauf-First-Lüftung. Die Fotos wurden unter Sommerbedingungen aufgenommen, da die Glasbausteine bereits ausgebaut sind.

Die Futtervorlage erfolgt zweimal täglich mit einem Futtermischwagen als Teil-Mischung. Über einen Kraftfutterautomaten wird der zusätzliche spezifische Nährstoffbedarf der Milchkühe gedeckt. Der Stall hat einen Tierbesatz von 33 Milchkühen und 25 Tieren für die weibliche Nachzucht. Von Mai bis Oktober haben die Tiere tagsüber die Möglichkeit zum Weidegang durch ein kleines Tor am hinteren Ende des Stalles. Das Tor an der Vorderseite des Stalles ist im Sommer und Übergang geöffnet, im Winter dagegen geschlossen.



Abbildung 30: Lüftungseinstellung Sommer links und rechts des Futtertisches, Stall Rind_TF

Der zweite Liegeboxenlaufstall hat die Abmessungen von 30 m Länge, 24 m Breite, 11 m Firsthöhe und zwei Seitenwänden, die unterschiedliche Höhen von 4,2 m auf der Seite mit dem Melkraum und 3,2 m auf der anderen Seite vorweisen. Die Seitenwände sind bis auf 0,7 m unterhalb der Traufe mit Holzbrettern verkleidet. Die Zuluft strömt durch die mit sogenannten Spaceboards verkleidete Restfläche in den Stall und kann durch den offenen First mit Dachkonstruktion entweichen (s. Abbildung 31).



Abbildung 31: Firstöffnung und Zuluftsystem im Stall Rind_SB

In Stall Rind_SB sind auf der linken Seite des Futtertisches zwei Liegeboxenreihen installiert. Die anderen Funktionsbereiche entsprechen denen des oben beschriebenen Laufstalles (Rind_TF). Das Grundfutter wird für diesen Stall alle zwei bis drei Tage mit einem Siloblockschneider aus dem Silostock entnommen und auf dem Futtertisch abgesetzt. Die Verteilung erfolgt zweimal täglich per Hand. Das Ausgleichsfutter wird auf die gleiche Weise verabreicht. Wie im ersten Stall ist auch hier zusätzlich ein Kraftfutterautomat installiert, der den restlichen Nährstoffbedarf der Kühe nach Vorgabe

durch den Betriebsleiter deckt. Neben 23 Kühen stehen noch weitere 15 Rinder (weibliche Nachzucht) und 10 Mastbullen in diesem Stall. Wie auch beim ersten Stall haben die Kühe die Möglichkeit des Weideganges. Jedoch bleibt hier ganzjährig das vordere Tor mit Ausnahme der Futtereinholung geschlossen.

Da die Luftvolumenströme in den freigelüfteten Ställen von der Anströmrichtung und der Geschwindigkeit des Windes abhängen, sind beide Ställe als Luftbildaufnahme in den folgenden Abbildungen zu sehen.

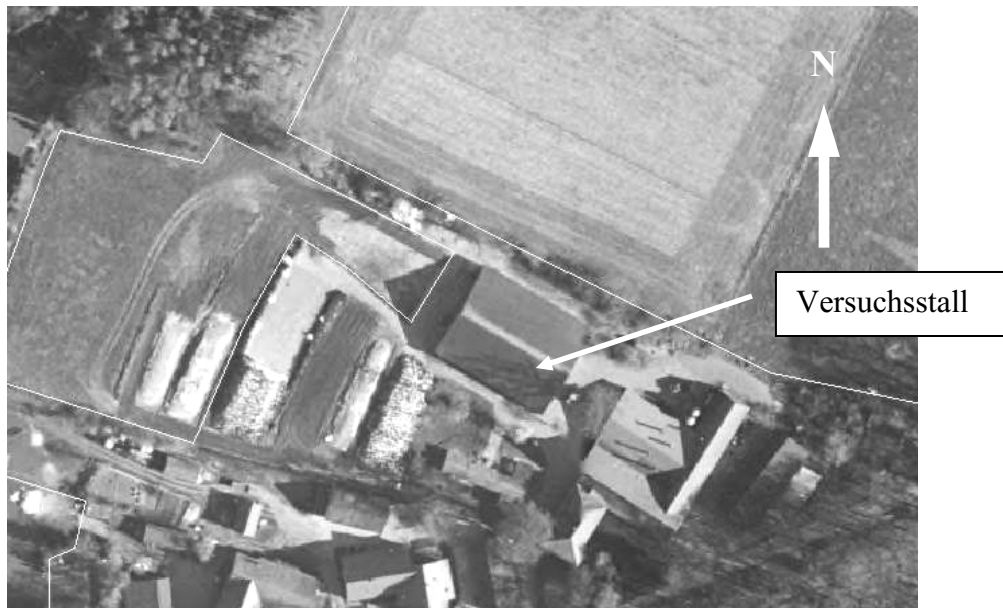


Abbildung 32: Lage des Liegeboxenlaufstalls „Rind_TF“

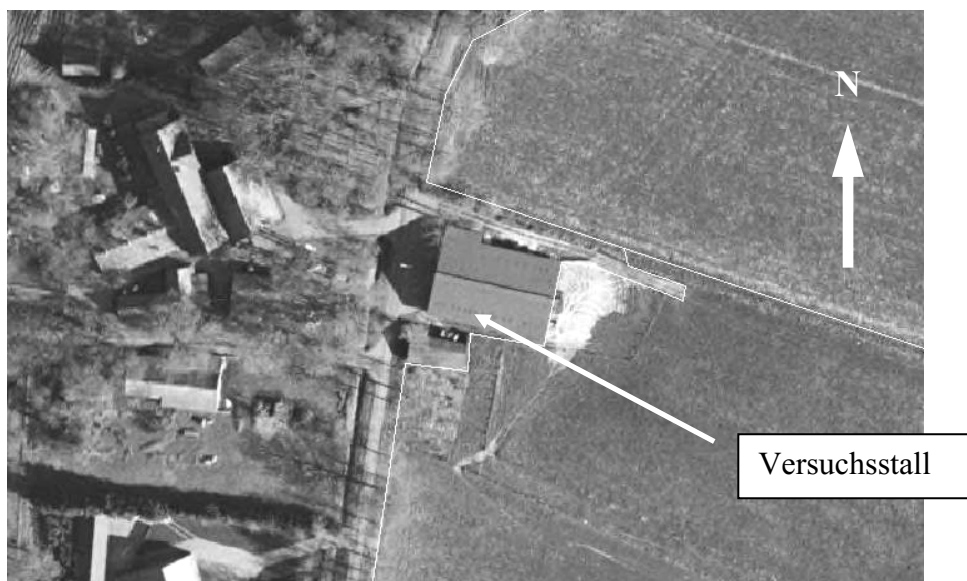


Abbildung 33: Lage des Liegeboxenlaufstalls „Rind_SB“

Die Bilder zeigen, dass die Ausrichtung beider Ställe fast identisch ist. Die schwarzen Pfeile kennzeichnen die Lage der Gebäude. Während der Stall Rind_TF (Abbildung 32) bei Hauptwindrichtung Südwest quer angeströmt wird, ist bei Stall Rind_SB (Abbildung 33) Nord- oder Südwind dafür notwendig. Des Weiteren ist dort bei Hauptwindrichtung Südwest eine Maschinenhalle mit einer Höhe von 4 m vorzufinden, die eine Queranströmung zusätzlich erschwert. Einflüsse der westlich gelegenen Baumgruppen sind schwer auszumachen.

3.1.3 Haltungssystem Geflügel

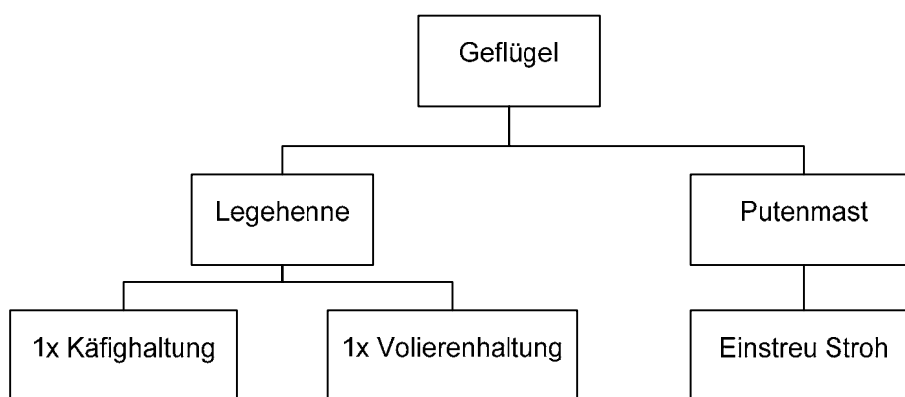


Abbildung 34: Untersuchte Ställe in der Geflügelhaltung

Legehennen Käfig

Die 46.000 Legehennen im untersuchten Stall werden in konventionellen Käfigen gehalten, die ab dem 31.12.2008 nicht mehr eingesetzt werden dürfen. Der 70 m lange und 26 m breite Stall ist mit einer Zwangslüftung ausgestattet. Durch Zuluftklappen an den Seitenwänden strömt Frischluft ein. Die Abluft wird mit acht an der Firstachse des Stalls ausgerichteten Ventilatoren abgesaugt (s. Abbildung 35). Im Käfigsystem auf drei Etagen sind unter jeder Ebene belüftete Kotbänder installiert, die die Exkremente direkt aus dem Stall befördern. Kettenfütterung und Zapfentränken versorgen die Tiere mit Futter und Wasser. Das Emissionspotenzial dieser Ställe wird als gering eingestuft (KTBL-Schrift 446).

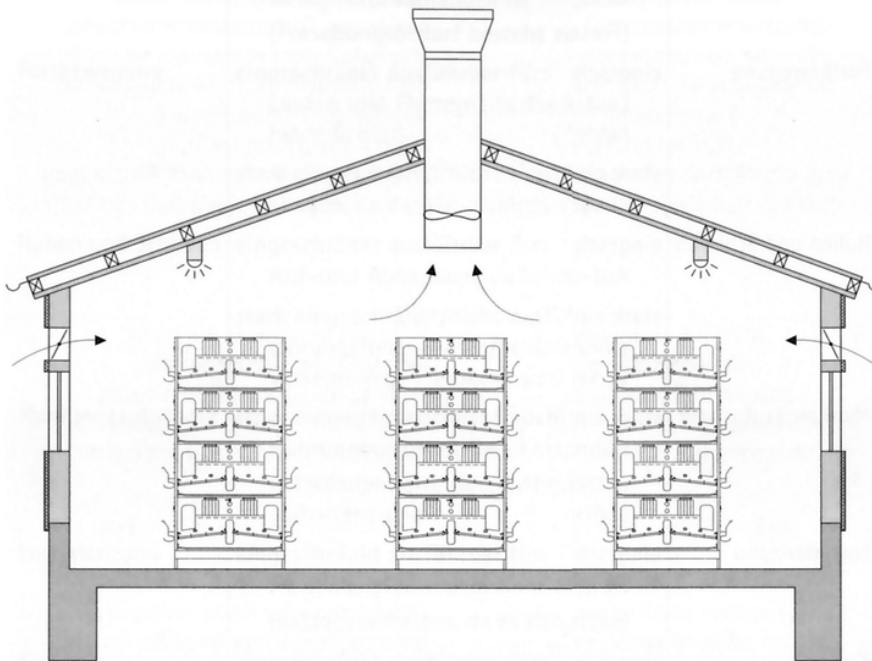


Abbildung 35: Querschnitt eines Legehennenstalls mit Käfigsystem

Legehennen Voliere

Der Legehennenstall mit Volierengestellen, Kaltscharraum und Auslauf hatte einen Tierbestand von 13.000 Hennen. Er lässt sich in separate Funktionsbereiche einteilen, die in Abbildung 36 zu sehen sind.

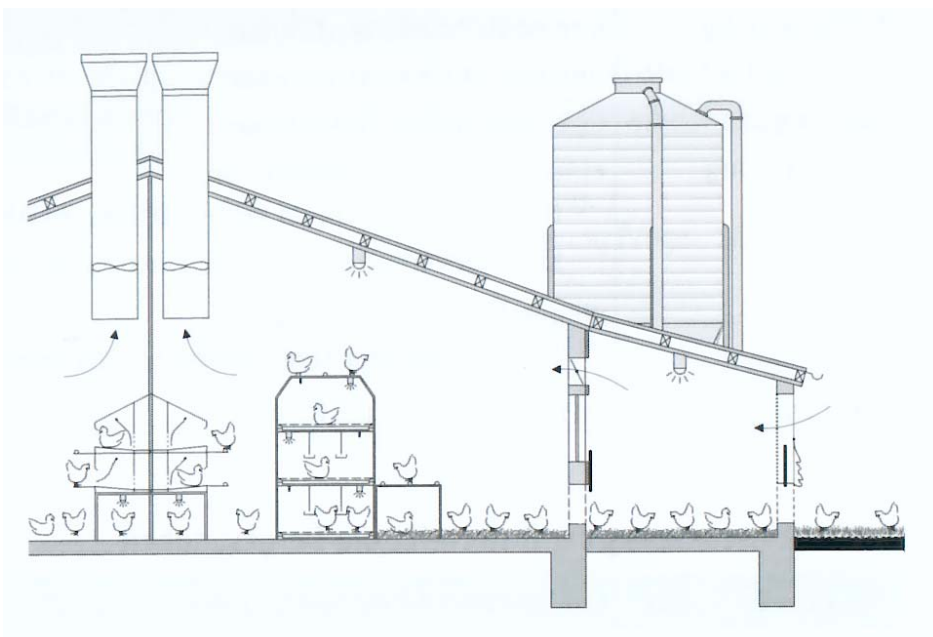


Abbildung 36: Querschnitt eines Legehennenstalls mit Volierengestellen, Kaltscharraum und Auslauf

Neben einem eingestreuten Kaltscharrraum besteht ein Auslauf mit Naturboden. Beide Bereiche können durch verschließbare Klappen vom Stallinnenraum abgetrennt werden. Dieser hat einen Innenscharrraum, Volierengestelle mit Sitzstangen, Fütterungs- und Tränkeeinrichtungen und einen perforierten Kotbereich mit unbelüftetem Kotband. Die Eier werden in abgedunkelten Legenestern abgelegt. Von da aus erfolgt eine automatische Eiersammlung. Das Emissionspotenzial des Stallsystems wird laut weiter oben genannten Bewertungsrahmen als zufrieden stellend beurteilt. Der Stall hat eine Länge von 86 m und eine Breite von 7,5 m. Der Kaltscharrraum nimmt eine Fläche von 430 m² ein.

Putenmast

Der untersuchte Putenstall mit einer Länge von 125,2 m, einer Breite von 16,6 m, einer Traufhöhe von 2,6 m und einer Firsthöhe von 5,8 m ist einer von drei nebeneinander gebauten Ställen (s. Abbildung 37). Er hat an seiner Nordseite einen Serviceraum von ca. 12 m². Der Stallboden besteht aus einer Betonplatte. Die Seitenwände bestehen aus Multiplexplatten, während die Giebelseiten mit Poroton-Steinen gemauert sind. Das mit Eternit gedeckte Dach ist von unten mit einer Wärmedämmung versehen.

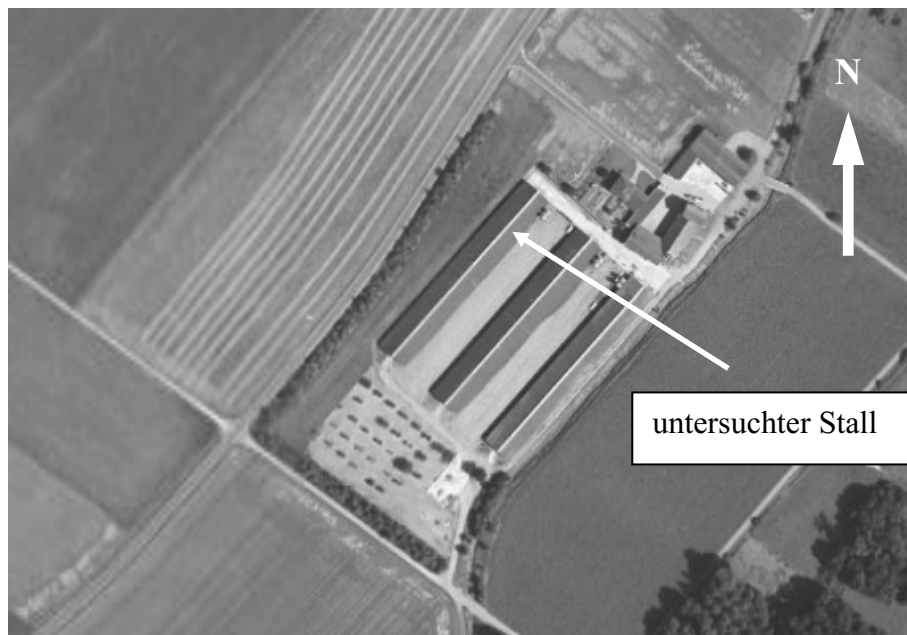


Abbildung 37: Lage des untersuchten Putenstalls

Als Lüftungssystem dient die in 2.9.2 beschriebene Kombination aus Trauf-First-Lüftung und Querlüftung. Beide Seitenwände sind oberhalb der 1,6 m hohen Multiplexplatten mit 1,0 m breiten Jalousien versehen, die den Klimabedingungen durch stufenweises Öffnen und Schließen angepasst werden können. Wenn die Jalousien maximal geöffnet sind,

entspricht dies einer 40%igen Perforation der Seitenwände. Der Hubfirst kann ebenfalls als Steuerungselement der Lüftungsanlage gesehen werden. Er wird dem Lüftungsbedarf angepasst. Die in der mittleren Achse des Stalls installierten Umluftventilatoren beugen im Sommer dem Hitzestress der Puten vor. Die je ca. 15 m² großen Tore an den Giebelseiten können als zusätzliche Möglichkeit zur Temperaturabsenkung im Stall geöffnet werden. In Abbildung 37 lässt sich erkennen, dass der freigelüftete Stall quer zu der dort vorherrschenden Windrichtung liegt. Der Abstand zu einer Hecke an der windzugewandten Seite beträgt 16 bzw. 34 m.

3.2 Messvorschriften

Für die ordnungsgemäße Probennahme müssen Messvorschriften eingehalten werden. In der VDI 2066, Blatt 1 (Messen von Partikeln; Staubmessungen in strömenden Gasen; Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung) sind verschiedene Messverfahren und deren Durchführung beschrieben. Der Abluftvolumenstrom wird als strömendes Gas betrachtet. Somit ist die isokinetische Probennahme anzuwenden. Eine rasterartige Netzmessung oder eine Messung auf sogenannten Schwerlinien muss durchgeführt werden, um die Partikelkonzentrationen in einem Abluftkamin möglichst genau zu erfassen. Es kann druckseitig hinter dem Ventilator oder saugseitig vor dem Ventilator im Stall gemessen werden.

Eine Konzentrationsmessung im Stallinnenraum kam nicht in Frage, da durch SCHMITT-PAUSKZTAT et al. (2004) erhebliche Abweichungen zwischen Abluft- und Innenraumkonzentrationen festgestellt worden sind. Des Weiteren musste ein optimaler Schutz der Messgeräte gewährleistet werden.

3.3 Messzeiträume

Ziel dieser Arbeit war es, jahreszeitliche Abhängigkeiten der Staubemissionen in den verschiedenen Nutztierbereichen zu untersuchen. Das Frühjahr und der Herbst sind als Übergangsjahreszeit zusammengefasst worden. Mit Sommer- und Wintermessungen waren somit in drei Messperioden die Massenkonzentrationen und Emissionsfaktoren der Stäube in allen Ställen zu analysieren. Um tageszeitliche Einflüsse mit einbeziehen zu können und um daraus statistisch aussagekräftige Ergebnisse abzuleiten, war es nötig, mindestens vier 24-Stunden-Messungen in jeder der zu untersuchenden Variante vorzunehmen. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass einzelne Stichproben über den Tag verteilt um das Drei- bis Sechsfache von den Tagesmittelwerten abweichen können. Durch das 24-Stunden Messintervall wird eine Über- oder Unterschätzung der Partikelemissionen vermieden.

3.4 Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit der Stäube

Die Bestimmung der Sinkgeschwindigkeit der Partikel erfolgte mit einem Sedimentationszylinder und dem dazugehörigen Messprinzip nach SCHMITT-PAUKSZTAT (2006). Abbildung 38 zeigt den Aufbau des Sedimentationszylinders. Der zu untersuchende Staub wird mit Druckluft durch die Verwirbelungseinrichtung in den Messzylinder eingespült.

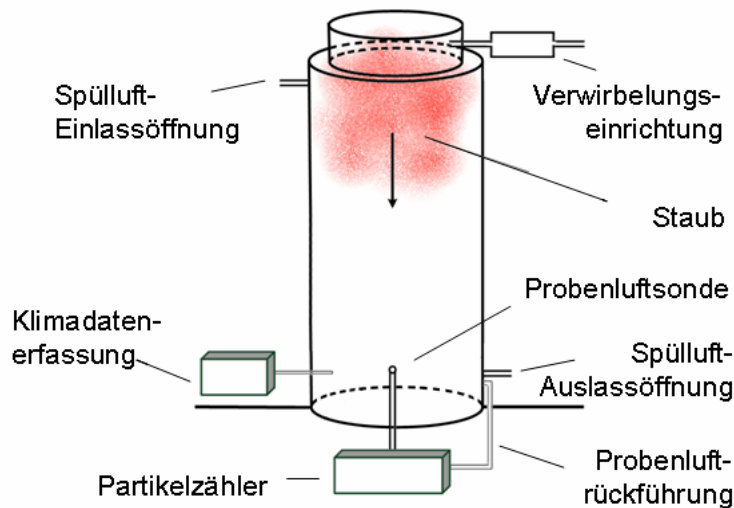


Abbildung 38: Aufbau des Sedimentationszylinders (nach SCHMITT-PAUKSZTAT, 2006)

In der Verwirbelungseinrichtung werden die Partikel vereinzelt, so dass sie gemäß ihren aerodynamischen Eigenschaften sedimentieren. Am Boden des Zylinders ist ein Aerosolspektrometer der Firma GRIMM Aerosoltechnik GmbH, Ainring, installiert, das die ankommenden Partikel nach ihrem Streulichtdurchmesser detektiert. Über eine Bediensoftware lassen sich Zeitpunkt der Partikelfreisetzung, Spülzeiten der Messkammer und Messdauer einstellen. Diffusionseffekte führen dazu, dass die Partikel einer Größenklasse des Aerosolspektrometers nicht zeitgleich, sondern Gauß-verteilt am Boden eintreffen.

3.5 Bestimmung der Quellemissionsfaktoren

Für die Bestimmung der Quellemissionsfaktoren ist es notwendig, die Parameter Partikelmassenkonzentration, Luftvolumenstrom und den aktuellen Stallbesatz (Anzahl der Großvieheinheiten [GV]) des zu untersuchenden Stalles zu erfassen. Gemäß Formel 4 auf Seite 20 wird der Massenstrom berechnet, mit anschließender Division durch die Anzahl der GV. Im folgenden Abschnitt ist die Vorgehensweise zur Berechnung der erwähnten Parameter dargestellt.

3.5.1 Partikelmassenkonzentration

Partikelanzahlkonzentration

Die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration erfolgte mit einem Aerosolspektrometer der Firma GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co KG, Ainring. Die technischen Daten zum eingesetzten Messgerät befinden sich im Anhang. Die Probenluft wird durch eine Pumpe mit konstantem Luftstrom durch eine Einlassöffnung in das Gerät gesaugt. Dort erfolgt die Zählung und Größeneinteilung der Partikel gemäß dem in Kapitel 2.8.2 auf Seite 26 beschriebenen Streulichtprinzip. Als Messdaten wird eine Partikelanzahl pro m³ ausgegeben.

Messaufbau in den zwangsgelüfteten Ställen

Der Messaufbau in den zwangsgelüfteten Ställen ist in Abbildung 39 dargestellt. Das Messgerät wurde in einer unterhalb der Stalldecke hängenden Box platziert. Die isokinetische Probensonde ist aus der Box durch eine Bohrungsöffnung in den Abluftschacht eingeführt worden.

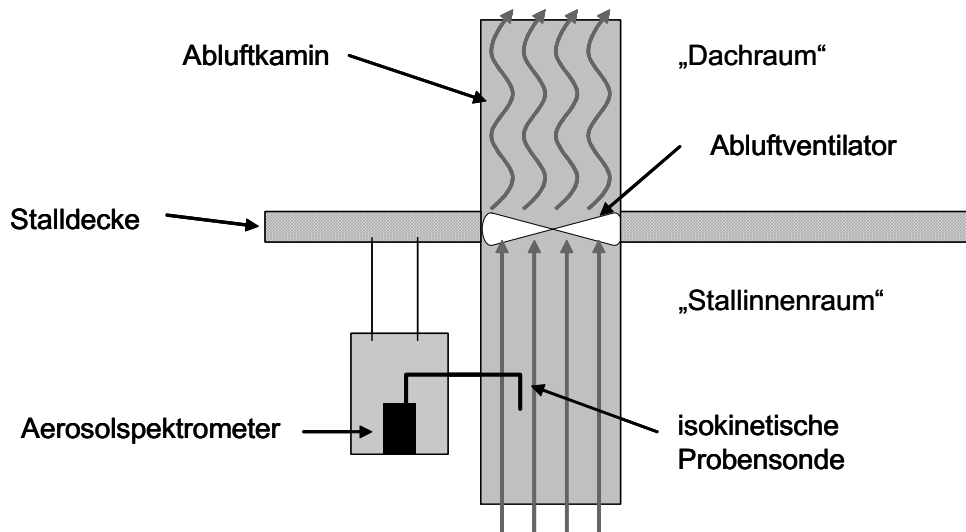


Abbildung 39: Messaufbau für die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration (1)

Die Probennahme fand somit an der saugenden Seite des Ventilators statt. Dies war möglich, weil sich in allen Versuchsställen die in Abbildung 40 zu erkennenden Abluftschächte unterhalb des auf Deckenhöhe eingebauten Ventilators befanden. Die VDI 2066 schreibt vor, dass die Messungen in strömenden Gasen unter gleichförmiger Bewegung des Volumenstroms erfolgen sollten. Dabei muss bedacht werden, dass die

Luftströmung erst ab einer dem zehnfachen Durchmesser des Abluftkamins entsprechenden Entfernung hinter dem Ventilator wieder annähernd gleichmäßig strömt. Zwei weitere Gründe als Ergebnis der Voruntersuchungen zeigen die Zweckmäßigkeit des gewählten Einbaus. Zum einen war der Einbau von Gleichrichtern in jedem Abluftkamin aus Sicht des Landwirts und des dafür notwendigen Umbauaufwandes nicht zu realisieren. Zum anderen hätte das Aerosolspektrometer auf dem Dach am Abluftkamin installiert werden müssen. Das Messgerät reagiert jedoch sensibel auf hohe Luftfeuchtigkeit. Wenn die Außentemperaturen unter die Temperatur des Abluftvolumenstroms gefallen sind, hat sich im Gerät Kondenswasser gebildet. Bei der Installation des Messgerätes im Stallinnenraum und Beprobung der Abluft ist jedoch keine Temperaturdifferenz vorhanden.



Abbildung 40: Messaufbau für die Bestimmung der Partikelanzahlkonzentration (2)

Messaufbau in den freigelüfteten Ställen

Für die Beprobung der freigelüfteten Ställe stand nur ein Aerosolspektrometer zur Verfügung. Somit musste ein optimaler Messort an den Luftaustrittsöffnungen gefunden werden. Da in beiden Ställen das Melkhaus in den Stall integriert und im übrigen Bereich die Verteilung der Tiere relativ homogen ist, wurde als Ort der Probennahme ein Punkt nach 17 m Entfernung von der Giebelseite der Ställe festgelegt. Die isokinetische Probensonde ragt dabei etwa 20 cm in den Stall hinein, so dass in der Probenluft keine Verdünnungseffekte mit der den Stall umgebenden Luft entstehen konnten. In Abbildung 41 ist der Messaufbau dargestellt. Der Betrachter blickt vom Futtertisch aus nach oben in den First.



Abbildung 41: Messaufbau zur Bestimmung der Partikelkonzentration in den freigelüfteten Ställen mit Blick vom Futtertisch in den First

Gravimetriefaktor für Aerosolspektrometer; Quotient $\frac{\rho}{\kappa}$

Eine wichtige Voraussetzung zur Bestimmung des Emissionsmassenstroms stellt der **Gravimetriefaktor** dar. Er beschreibt die Abweichung der Dichte des untersuchten Staubes vom Kalibrierstaub Dolomit (Microdolomit DR80), mit dem das Aerosolspektrometer intern die gemessene Partikelanzahlkonzentration in eine Massenkonzentration umrechnet. Zunächst wird auf Basis des mittleren Durchmessers jeder Größenklasse des Aerosolspektrometers das Volumen einer äquivalenten Kugel berechnet. Mit der Einheitsdichte des Dolomitstaubes erfolgt die Bildung eines Massenfaktors, der als Multiplikator zwischen Partikelanzahlkonzentration und Partikelmassenkonzentration eingesetzt werden kann (s. Formel 10).

Formel 10: Berechnung des Massenfaktors in Abhängigkeit der Größenklasse des Aerosolspektrometers

$$m_{F_i} = \rho_{dolomit} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_i^3$$

mit:

m_{F_i} = Massenfaktor einer Größenklasse der Aerosolspektrometers

$\rho_{Dolomit}$ = Dichte von Dolomitstaub (Kalibration-Standard)

r_i = Radius der Partikel in Abhängigkeit der Größenklasse

Mit Hilfe des Gravimetriefaktors ist es dann möglich, auf die tatsächliche Massenkonzentration des untersuchten Tierstaubes zu schließen. Er wird normalerweise als Quotient aus gewogener Partikelmasse des Filters im Aerosolspektrometer und der kalkulierten Masse durch das Aerosolspektrometer selbst berechnet.

Der Einsatz nur eines Gravimetriefaktors für alle Größenklassen des Aerosolspektrometers ist mit Fehlern behaftet, da bei Stoffgemischen zu erwarten ist, dass sich vermutlich Dichte und Form der Partikel in jeder Größenklasse unterscheiden. Zur Lösung dieses Problems ist zunächst eine größenabhängige Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit wie in Kapitel 3.4 vorgenommen worden. Die partikelspezifischen Parameter dieser Berechnung sind die Dichte ρ und die dynamische Form κ . Die Sedimentationsgeschwindigkeit ist maßgeblich von den genannten Parametern Dichte und Form abhängig. Anschließend wurde die Form der Partikel mittels Bildanalyse von mikroskopierten Staubpartikeln unterschiedlicher Größenklassen vorgenommen. Der Quotient ρ/κ wurde von SCHMITT-PAUKSZTAT (2006) eingeführt.

Bildanalyse von Staubpartikeln

Um die Dichte der Partikel in verschiedenen Größenklassen zu definieren, sind Partikelproben aus den Ställen entnommen und nach Eindosierung in den Sedimentationszylinder mit einem Andersen-Sammler der Firma SCHÄFER (Kaskaden-Impaktor) fraktioniert worden. Sein achtstufiger Aufbau ermöglichte es, luftgetragene Partikel gemäß ihrer aerodynamischen Durchmesser einzuteilen. Durch einen Austausch der Metallimpaktorplatten gegen baugleiche Glasplatten konnten die Partikel unter einem Durchlichtmikroskop der Firma LEITZ betrachtet werden. Beim Einsatz des Andersen-Sammlers und der anschließenden mikroskopischen Untersuchung war die Laufzeit die maßgebende Variable. Für die mikroskopische Auswertung war eine isolierte Lage der Partikel notwendig, um diese in ihrer Form und Größe bestimmen zu können. Die Laufzeit des Sammlers musste für einzelne Stäube individuell eingestellt werden. Für den Betrieb des Andersen-Sammlers ist ein Luftvolumenstrom im Gerät von 28,3 l/min erforderlich. In folgender Tabelle sind die theoretischen Durchmesser in den einzelnen Impaktorstufen des Andersen-Sammlers zu sehen. Da Partikel $< 2 \mu\text{m}$ nur einen sehr kleinen Anteil ($< 5\%$) an der Gesamtmassenkonzentration haben, sind Partikel der ersten fünf Stufen in die Analyse aufgenommen worden.

Tabelle 6: Theoretische aerodynamische Durchmesser von Latexkugeln unterschiedlicher Größe bei einem Abscheidegrad von 50 %

	Theoretischer aerodynamischer Durchmesser Andersen-Sammler	Massenanteil nach AARNINK et al. (1999) beim Schweinestaub
Stufe 0	> 11 µm	44,5
Stufe 1	7 bis 11 µm	26,1
Stufe 2	4,7 bis 7 µm	12,9
Stufe 3	3,3 bis 4,7 µm	8,2
Stufe 4	2,1 bis 3,3 µm	3,9
Stufe 5	1,1 bis 2,1 µm	3,3
Stufe 6	0,65 bis 1,1 µm	0,7
Stufe 7	0,43 bis 0,65 µm	0,5

Für die Bildaufnahme wurde eine Vergrößerungseinstellung für alle Partikelproben beibehalten, um die Vergleichbarkeit in der Auswertung der Daten zu gewährleisten. Die Auswertung der Bilder erfolgte mit der Bildverarbeitungssoftware KS 400 von ZEISS. Mit den Parametern Projektionsfläche und Umfang des Partikels wurden nach STARK, MÜLLER (2004) die Form der Partikel für die einzelnen Partikelgrößenklassen über 2 µm berechnet. Die durchschnittliche Dichte jeder Partikelfraktion konnte durch den bereits erläuterten mit Hilfe der Sedimentationsgeschwindigkeit bestimmbar Quotienten ρ/κ berechnet werden. Auf Basis der beschriebenen Methodik lässt sich mit folgender Formel 11 der dimensionslose Massenfaktor ($m_{\text{Faktor } i}$) bestimmen, mit dem direkt von der Partikelanzahlkonzentration in die Massenkonzentration umgerechnet werden kann.

Formel 11: Berechnung der Partikelmassenkonzentration aus der Partikelanzahlkonzentration

$$m_{\text{Faktor } i} = \left(\frac{\rho}{\kappa} \right)_i \cdot \kappa_i \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_i^3$$

mit:

$m_{\text{Faktor } i}$ = Massenfaktor in Abhängigkeit der Partikelfraktion i

$\left(\frac{\rho}{\kappa} \right)_i$ = Partikeldichte/Partikelform in Abhängigkeit der Partikelfraktion i [kg m^{-3}]

κ_i = Partikelformfaktor in Abhängigkeit der Partikelfraktion i

r_i = mittlerer Radius in jeder Partikelfraktion i [μm]

Hintergrundkonzentration

Als Hintergrundkonzentration wird die Partikelkonzentration in der Zuluft des Stalles bezeichnet. Durch stichprobenartige Messungen der Hintergrundkonzentration in den Stallanlagen zeigten nur sehr geringe Massenkonzentrationen von 0,004 bis 0,04 $\mu\text{g m}^{-3}$. Somit ist im weiteren Verlauf der Messungen auf die Einbeziehung der Hintergrundkonzentration verzichtet worden.

3.5.2 Luftvolumenstrom und Klimadaten

Zwangsgelüftete Ställe

In den zwangsgelüfteten Ställen erfolgte die Bestimmung des Luftvolumenstroms mit kalibrierten Messventilatoren. Die Vorteile dieser Methode liegen in der Genauigkeit der Messwerte und dem einfachen Aufbau der Messapparatur. Während der Dauer einer Messung erfolgte die Aufnahme von Daten für die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in der Abluft und in der Umgebung des Stalles mit einem Datenlogger der Firma AHLBORN, Holzkirchen. Zwei wichtige Voraussetzungen waren für den Einsatz der Messventilatoren zu prüfen. Die Abluft des zu untersuchenden Abteils musste separat abgeführt werden. Eine Zentralabsaugung durfte nicht vorhanden sein. Des Weiteren war eine runde Form des Abluftkamins eine zwingende Voraussetzung, da für alle Kamingrößen nur runde Messventilatoren vorhanden sind. Der Messventilator wird druckseitig am oberen Ende des Abluftkamins aufgesetzt und bei Bedarf mit Spanngurten fixiert. Diese Position des Messventilators ist mit einem höheren Fehler behaftet als der Einbau an der Druckseite. Dafür wäre jedoch der Aufwand für Einbau und Umbau sehr hoch gewesen. Zudem spielten hygienische Aspekte eine Rolle, da direkt hintereinander in verschiedenen Ställen Messungen stattfanden. Sämtliche austretende Luft strömt durch den Schacht des Messventilators und treibt ein Flügelrad an. Das Messintervall beträgt eine Minute. Jedem Betrag des Luftvolumenstroms kann somit eine Partikelkonzentration zugeordnet werden.

Um die Messtechnik für die Datenaufnahme vor Witterungseinflüssen zu schützen, ist eine spritzwassergeschützte Aluminiumbox angefertigt worden, die mit einer Haltekonstruktion am Abluftkamin befestigt wird. Somit war eine Messung des Luftvolumenstroms jederzeit möglich. Abbildung 42 zeigt den beschriebenen Messaufbau.

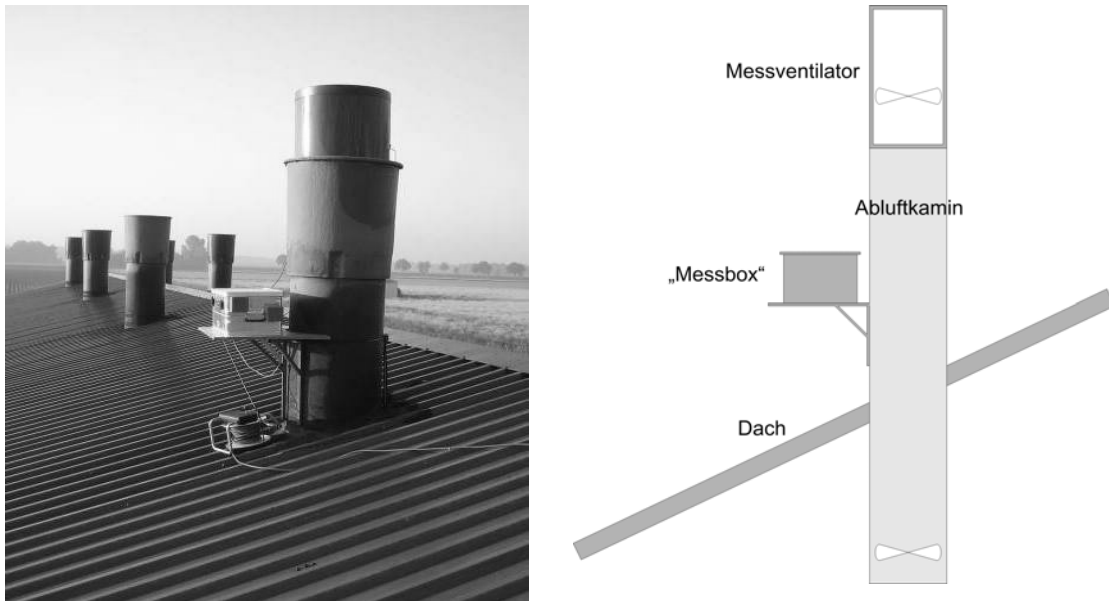


Abbildung 42: Messaufbau zur Luftvolumenstromermittlung in zwangsgelüfteten Ställen

Freie Lüftung

In den freigelüfteten Ställen erfolgte die Erfassung des Luftvolumenstroms mit der Tracergasmethode. Das Messprinzip und dessen Validierung ist von SCHNEIDER, T. (2006) beschrieben worden.

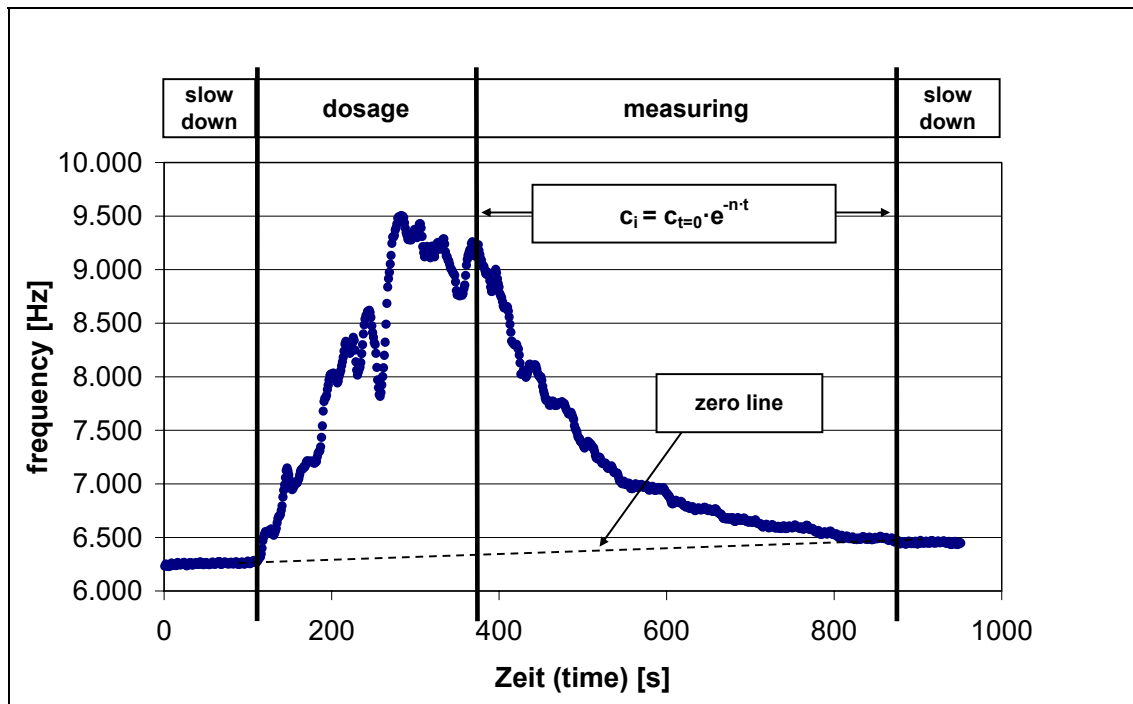


Abbildung 43: Messzyklus zur Ermittlung der Luftwechselrate

Abbildung 43 zeigt einen typischen Messzyklus aus dem untersuchten Milchviehstall. Nach Spülen der Messkammer mit Frischluft während der Beruhigungszeit wird für drei Minuten SF₆ eindosiert. Dabei erreicht die detektierte Tracergaskonzentration einen relativ konstanten Plateauwert. Während der Messzeit ist das exponentielle Abfallen der Konzentration von SF₆ erkennbar. Aus dieser Abklingkurve wird nach Korrektur der Daten mit der Nulllinie die Luftwechselzahl berechnet ($c_t = c_{t=0} \cdot e^{-n \cdot t}$ mit n = Luftwechselrate in s⁻¹). Der Messzyklus ist abgeschlossen, es folgt wiederum eine Beruhigungszeit mit Spülung der Messkammer.

An den Traufenseiten der in 3.1.2 beschriebenen Liegeboxenställe wurde das Indikatorgasgemisch (SF₆ und N) in einem Abstand von 1,5 m gleichmäßig eindosiert. Die Absaugung erfolgte gleichmäßig am First mit identischer Technik wie bei der Eindosierung, um auch hier eine homogene Mischprobe der Abluft zu gewährleisten. Die Dosierungs- und Absaugschläuche bestehen aus PE und haben einen Innendurchmesser von 4 mm. Die Bestimmung der SF₆-Konzentration in der Abluft erfolgte mit einem modifizierten Leakmeter 200 (Meltron Quantilek Messtechnik GmbH, heute: USON, Neuss). Das technische Datenblatt befindet sich im Anhang. Dieses Gerät findet in der Leckagesuche Anwendung. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 5 ppm. Es besitzt mit einem Messintervall von einer Sekunde eine hohe zeitliche Auflösung. Um Temperatur, Windgeschwindigkeit und Windanströmrichtung auf die Firstachse des Stalles zu erfassen, wurde ein Ultraschallanemometer (METEK, Elmshorn) parallel zur Firstachse installiert (s. Abbildung 44).



Abbildung 44: Ultraschallanemometer auf dem First des Liegeboxenstalls

Die Daten vom SF₆-Messgerät und Ultraschallanemometer können in einer Software parallel gespeichert werden, so dass eine synchrone Zuordnung von Indikatorgaskonzentration und Klimadaten möglich ist.

Der Messaufbau für die Tracergas-Technik ist in Abbildung 45 zu sehen.

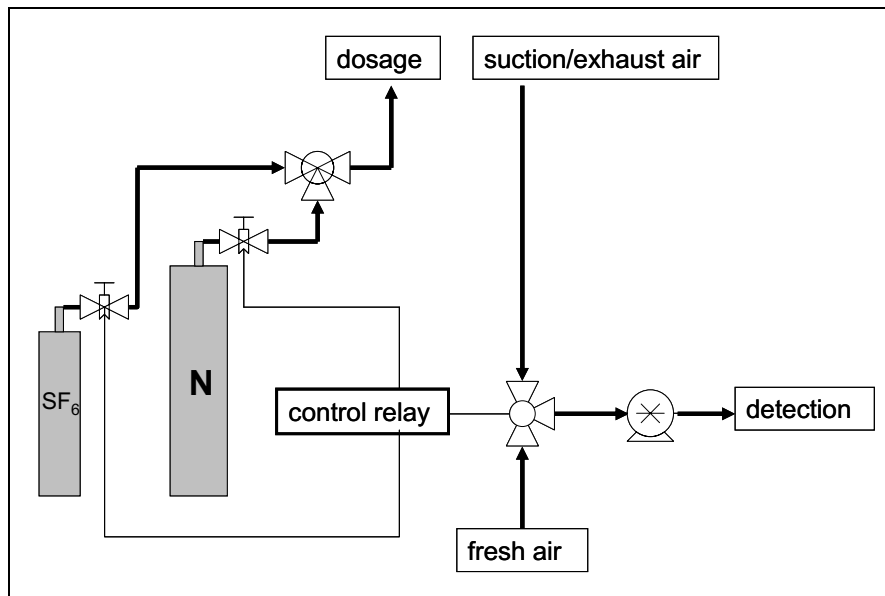


Abbildung 45: Aufbau der Messtechnik

Da es sich bei SF₆ um ein sehr dichtes Gas handelt, wird ein SF₆-N-Gemisch in den Stall dosiert. Das Mischungsverhältnis wird über die sich an den Gasflaschen befindlichen Druckminderer eingestellt. An beide Gasflaschen sind zusätzlich elektromagnetische Ventile angeschlossen, die über eine Relaiskarte angesteuert werden können. Nach jeder gemessenen Abklingkurve wird Frischluft an das SF₆-Messgerät geleitet, damit der Detektor und die Pumpe frei von Indikatorgasen sind. Die Umschaltung von Absaugung zu Frischluftzufuhr erfolgt ebenfalls durch Ansteuerung eines elektromagnetischen Ventils mit der Relaiskarte. Weiterhin wurde darauf geachtet, dass die beprobte Stallluft von der Messkammer abgeleitet wird. Eine Kontamination der Umgebungsluft des SF₆-Messgerätes kann somit vermieden werden.

Die Relaiskarte wird über eine für diesen Zweck erstellte Software bedient. Hier können für Dosierung, Messung und Beruhigung jeweils Zeitintervalle eingegeben werden. Ein Test der Ventile auf ihre Funktionsfähigkeit ist ebenfalls möglich. Beruhigung, Dosierung und Messung bilden einen Messzyklus. Die Anzahl der ablaufenden Messzyklen kann mit der Angabe der Wiederholungen eingestellt werden. Die Verbindung zum Messrechner erfolgt über einen USB-Anschluss. Die jetzt bestehende automatisierte Messtechnik wird

je nach Klimabedingungen und Stallgröße eingestellt. Das System arbeitet nur zeitgesteuert, d.h. eine automatische Anpassung auf sich ändernde Windanströmungsgeschwindigkeiten oder -richtungen ist derzeit noch nicht möglich. Größere Änderungen dieser Art müssten manuell eingestellt werden. Unter den in den Versuchen gegebenen Bedingungen ist die Dosierzeit mit drei Minuten konstant eingestellt worden. Diese Zeit reicht auch bei erhöhter Luftwechselrate aus, um genügend Indikatorgas einzudosieren und exakte Abklingkurven aufzuzeichnen. Bei der Messzeit musste Bezug genommen werden auf Phasen mit niedrigem Luftwechsel, da ein Abklingen der Indikatorgaskonzentration zu 0 ppm gewährleistet werden sollte. Es gelang mit den beschriebenen Einstellungen, alle 25 Minuten eine Luftwechselrate zu ermitteln.

3.6 Tieraktivitätssensoren

Aus der Literatur ist bekannt, dass vor allem die Tieraktivität einen großen Einfluss auf die Freisetzung von Staubpartikeln hat. Der enge Zusammenhang wird von PEDERSEN (1993) beschrieben. Um diesen Einfluss auf die Tiere in jahreszeitlicher Abhängigkeit darstellen zu können, sind Aktivitätssensoren entwickelt worden. Sie geben einen Einblick in die Höhe und den Verlauf der Tieraktivität in einem Mastschweinegestall (VM_1; EM_1). Die in der Untersuchung verwendeten Sensoren sind handelsübliche passive Infrarotsensoren, die für diese Anwendung modifiziert wurden (s. Abbildung 46). Die integrierte Relaissteuerung zur Vermeidung von Störungen wurde deaktiviert und stattdessen eine Spannung direkt am Sensor abgegriffen, die ein zur aufgenommenen Bewegung analoges Signal abbildet. Das Signal ist differenziell, eine schnelle Erwärmung oder Abkühlung vor dem Sensor erzeugt einen höheren positiven oder negativen Wert als eine langsame Änderung der Temperatur. Die Amplitude des Impulses ist somit proportional zur Stärke der Änderung der Temperatur. Eine „verschliffene“ Impulsform bewirkt, dass langsame Temperaturveränderungen kein Signal liefern. Zur Weiterverarbeitung des Signals wird dieses zunächst gleichgerichtet. Dadurch wird nicht mehr zwischen Erwärmung und Abkühlung unterschieden. Das eingehende Signal wird dann durch eine Halteschaltung geleitet mit der Folge, dass die kurzen Impulse künstlich um eine am Sensor einstellbare Zeit verlängert werden.

Die Kalibrierung der vier Aktivitätssensoren erfolgte mit einem dafür entwickelten Bewegungssimulator, so dass alle Sensoren miteinander vergleichbar waren. Von den acht Buchten des Abteils sind vier für die Messungen entsprechend Abbildung 47 vorbereitet worden. Die Einbauhöhe im Schweinestabteil betrug 2,20 m über Betonspaltenboden. Die erhobenen Messdaten konnten mit den Partikelkonzentrationen und Abluftvolumenströmen verglichen werden, um Aussagen daraus abzuleiten.

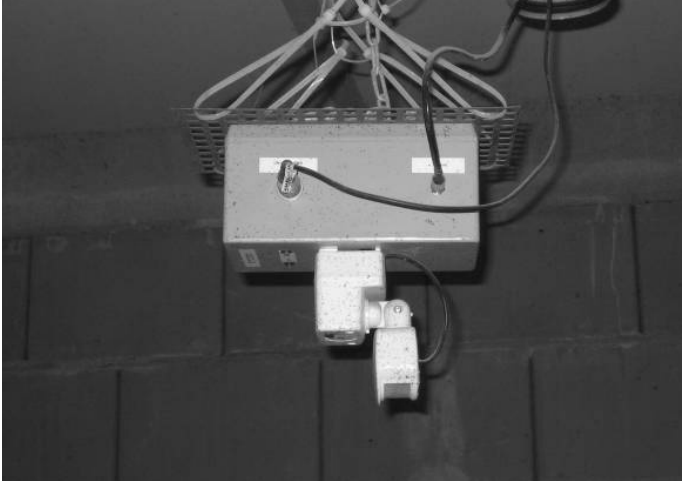


Abbildung 46: eingesetzter Aktivitätssensor



Abbildung 47: Messanordnung der Aktivitätssensoren und abgetasteter Bereich

4 Ergebnisse

4.1 Struktur der eigenen Untersuchungen

In Tabelle 7 ist die Struktur der Untersuchungen dargestellt. Die Übergangszeit beinhaltet Messungen aus Frühling und Herbst. Beide Jahreszeiten werden unter dem Begriff „Übergang“ zusammengefasst. In der Schweinehaltung sind drei oder mehr Messtage pro Jahreszeit in die Untersuchungen aufgenommen worden. Für die Tierart Rind wurden in jeder Jahreszeit an mindestens fünf Tagen Messungen durchgeführt. In der Legehennenhaltung konnten auf Grund der Geflügelpest Messungen nur in den Übergangs- und Sommermonaten erfolgen. In der Putenmast sind Daten aus zwei Durchgängen eingegangen.

Tabelle 7: Umfang der Untersuchungen

Tierart	Haltungssystem	Jahreszeit	Anzahl der Messtage
Schwein	Abferkelbereich	Sommer	3
		Übergang	3
		Winter	5
	Wartestall / Deckzentrum	Sommer	8
		Übergang	11
		Winter	10
	Ferkelaufzucht	Sommer	7
		Übergang	7
		Winter	11
	Vormast	Sommer	12
		Übergang	9
		Winter	9
	Vormast Einstreu	Sommer	5
		Übergang	4
		Winter	4
Endmast	Sommer	12	
	Übergang	15	
	Winter	13	
Rind	Rind	Sommer	5
		Übergang	5
		Winter	7
Geflügel	Legehenne Käfig	Sommer	3
		Übergang	2
	Legehenne Voliere	Sommer	4
		Übergang	2
	Putenmast	ein Durchgang pro Jahreszeit	

4.2 Ergebnisse der Voruntersuchungen

4.2.1 Auswertungsintervall

Vor Beginn der Messungen stellte sich die Frage nach einem geeigneten Auswertungsintervall. Die Analyse von tageszeitlichen Verläufen der Partikelquell-emissionen hat gezeigt, dass einzelne Halbstundenmittelwerte um das 3 bis 4-fache höher oder niedriger sein können als der Tagesmittelwert (s. Abbildung 48). Um eine durchschnittliche Partikelquellemission zu bestimmen, muss die 24-Stunden-Messung als kleinstes Auswertungsintervall angesetzt werden. Bei drei- bis vierstündigen Spotmessungen werden die Emissionsfaktoren je nach Zeitfenster nicht richtig bewertet. Abbildung 48 zeigt weiterhin, dass während der dargestellten fünf Tage die Partikelquellemission im Zeitfenster von etwa 22 Uhr bis 12 Uhr unterschätzt, von 12 Uhr bis 22 Uhr überschätzt wird. Die grau hinterlegten Rechtecke beziehen sich auf die Überschätzung.

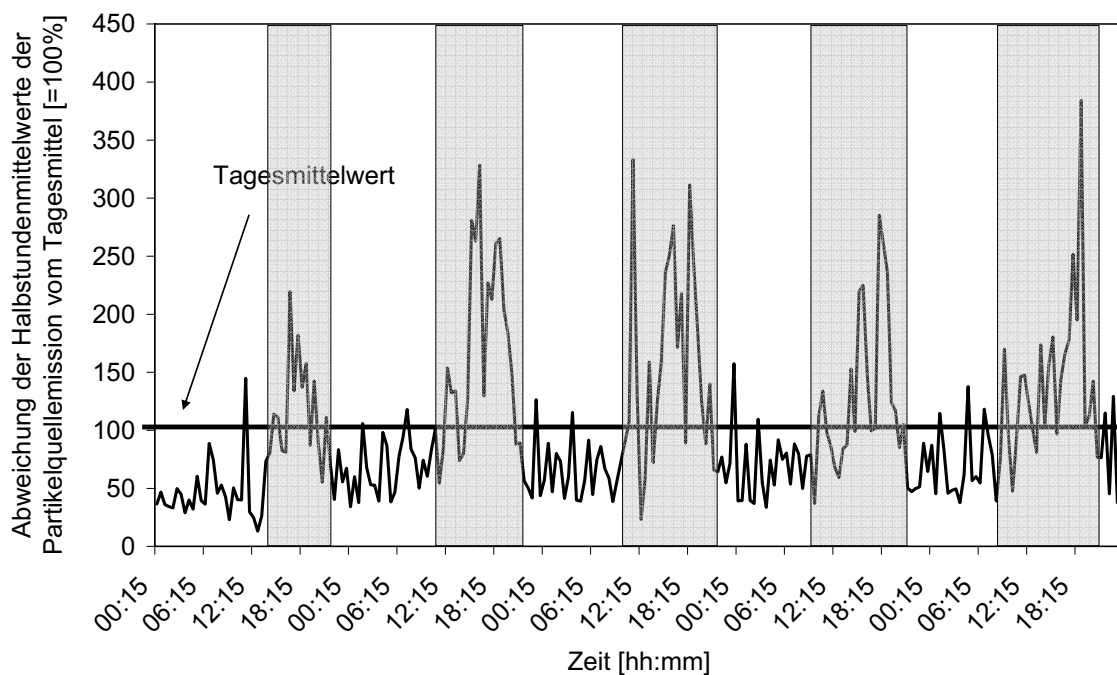


Abbildung 48: Abweichung der berechneten Halbstundenmittelwerte der Partikelquellemission vom Tagesmittelwert in der Schweinemast im Bereich Endmast

4.2.2 Validierung der Tracergasmethode

Die Tracergasmethode stellt als indirekte Bestimmung des Luftvolumenstroms hohe Anforderungen an den Messaufbau und die Durchführung der Messungen. Um die Genauigkeit dieser Methode zu bestimmen, sind in einem zwangsgelüfteten Hähnchenmaststall Validierungsmessungen mit Messventilatoren durchgeführt worden (SCHNEIDER, et al., 2005). Die Ergebnisse in Tabelle 8 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung beider Systeme.

Tabelle 8: Luftwechselzahl n [h^{-1}] durch unterschiedliche Messmethoden bestimmt (SCHNEIDER et al. 2005)

Lüftungseinstellung	Messventilator [h^{-1}]	Tracergas Mittelwert [h^{-1}]	Tracergas 1 [h^{-1}]	Tracergas 2 [h^{-1}]	Tracergas 3 [h^{-1}]
100 %	$31,4 \pm 1,7$	$30,9 \pm 3,1$	30,4	30,9	31,5
50 %	$18,0 \pm 1,0$	$17,8 \pm 1,8$	18,25	17,4	17,6
25 %	$9,3 \pm 0,5$	$9,3 \pm 0,9$	9,4	9,18	9,18

Durch die funktionierende Automatisierung der Eindosierung des SF_6/N -Gemisches und der Beprobung waren die notwendigen Wartungsarbeiten zwar höher als bei der Messventilator-Methode, aber mit 4- bis 6-stündigen Kontrollen ohne Probleme zu gewährleisten. Weiterhin konnte unabhängig von der Witterung gearbeitet werden, da die gesamte Messtechnik in einem KFZ installiert war. Die Verschlauchung musste nach einmaliger Verlegung nicht verändert werden. Vor jeder Messperiode war jedoch eine Funktionsprüfung der Düsen in der Zuluft notwendig, um eine homogene Verteilung des Tracergasgemisches sicherzustellen. Dabei erfolgte eine Spülung mit Druckluft.

4.3 Sedimentationsgeschwindigkeit und Partikeldichten

Die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln konnte für die Tierarten Legehennen und Schwein bestimmt werden. Diese wurden genutzt, um den Quotienten $\frac{\rho}{\kappa}$ aus Partikeldichte und Partikelform zu berechnen. Als Beispiel für diese Berechnung ist in Abbildung 49 das Verhältnis von Partikeldichte zu Partikelform in Abhängigkeit verschiedener Partikelgrößenklassen dargestellt.

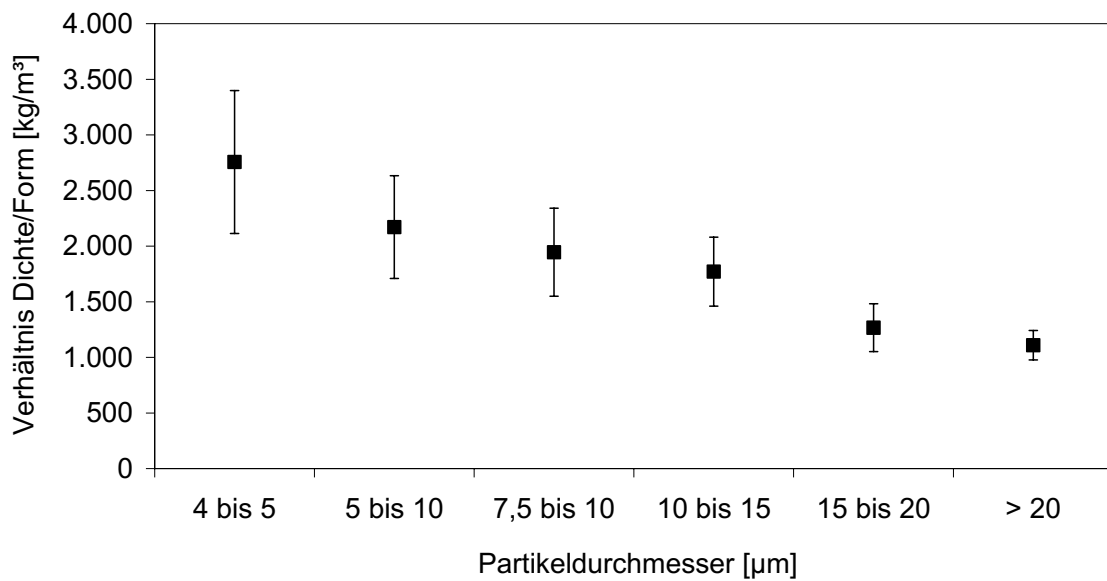


Abbildung 49: Verhältnis von Dichte zu Form der Partikel bei der Tierart Schwein

Abbildung 50 zeigt die mit Hilfe des Formfaktors berechneten Dichten unterschiedlicher Stäube in verschiedenen Größenklassen beim Schwein und der Legehennen in Käfig- und Volierenhaltung. Mit Hilfe der Dichte kann ein tierartspezifischer Massenfaktor berechnet werden, der die Umrechnung von Partikelanzahlkonzentration in die Massenkonzentration ermöglicht. Dies ist besonders wichtig für reine Partikelzähl-Messgeräte.

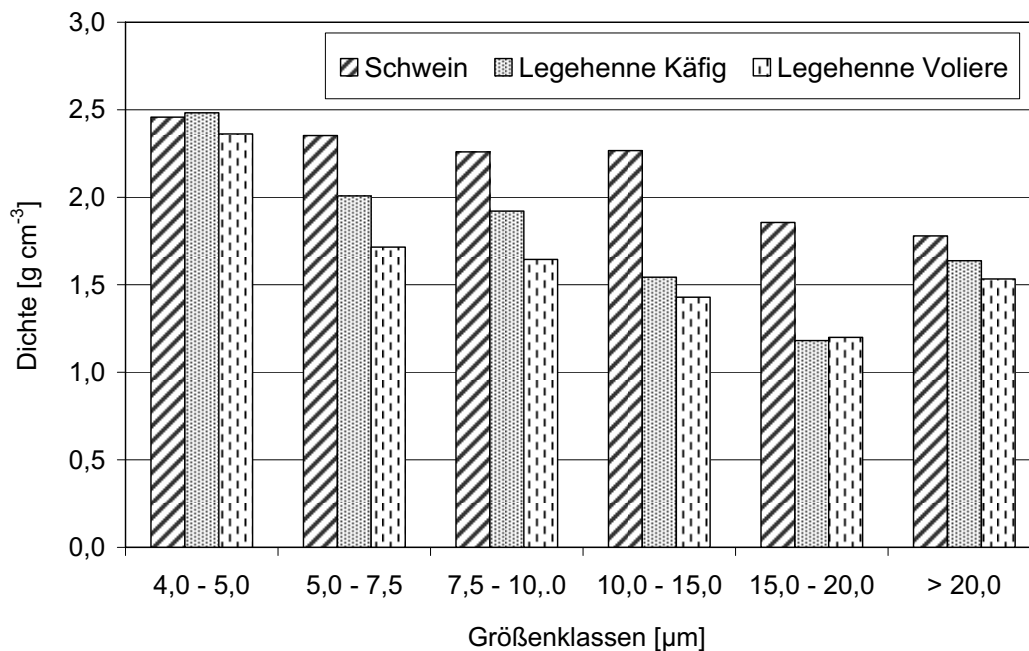


Abbildung 50: Partikelgrößenabhängige Dichte von Stäuben aus Ställen mit unterschiedlichen Tierarten und Haltungsformen

Um diese Erkenntnisse zu stützen, sind stichprobenartig Parallelmessungen mit einem Gravimetriesammler für Gesamtstaub durchgeführt worden. In allen Messungen konnten gleich hohe Partikelmassenkonzentrationen festgestellt werden, so dass das Aerosolspektrometer sowohl für die Bestimmung der Quellemission als auch für die Beschreibung der Partikelgrößenverteilungen eingesetzt werden kann. Abbildung 50 zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Tierarten, aber auch innerhalb einer Tierart zwischen verschiedenen Haltungsformen.

4.4 Partikelgrößenverteilung, Luftvolumenstrom

Die Partikelgrößenverteilung beschreibt den prozentualen Anteil der Anzahl- oder Massenkonzentration in verschiedenen Größenklassen. Eine einfache Einteilung bietet das verwendete Aerosolspektrometer mit 15 Klassen von 0,3 bis 20 μm . Die ausführlichen Tabellen zur Verteilung der Partikel befinden sich im Anhang. Allgemein ist festgestellt worden, dass sehr geringe Anteile der Partikelanzahl einen großen Anteil der Partikelmasse bestimmen. Als Beispiel dafür ist in folgender Abbildung 51 die Anzahl- und Massenverteilung in der Ferkelaufzucht (FA_2) unter Sommerbedingungen dargestellt.

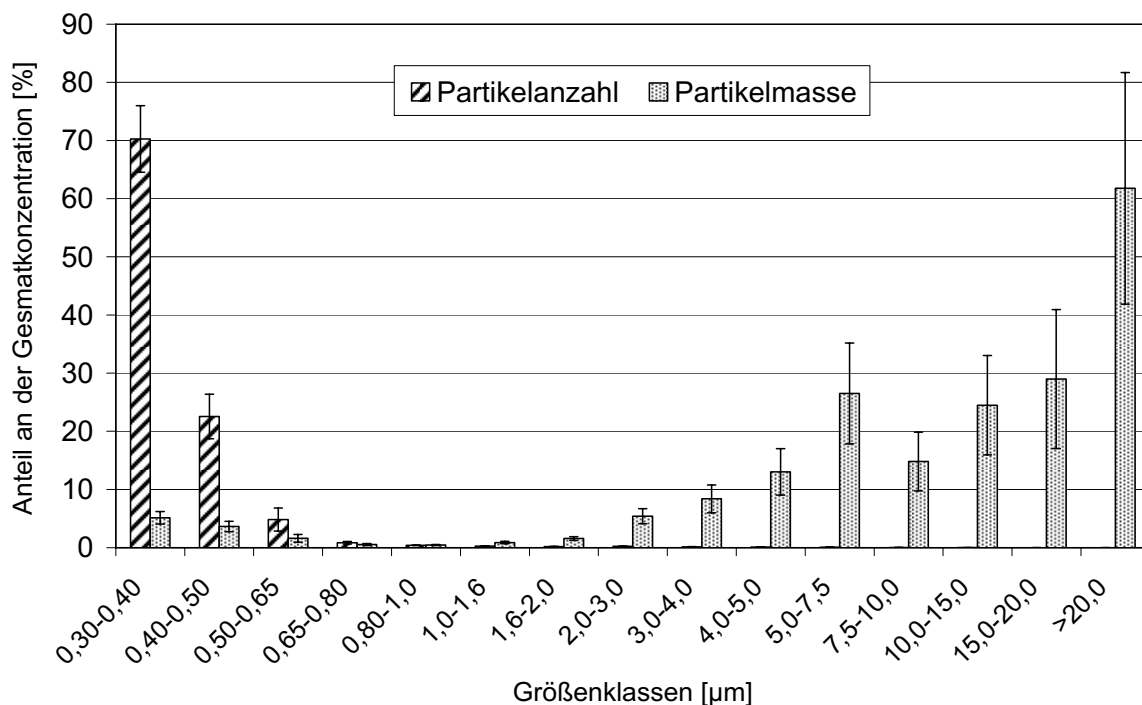


Abbildung 51: Partikelanzahl- und Massenverteilung in der Ferkelaufzucht (FA_2) unter Sommerbedingungen

Mit über 70 % nehmen die vom Aerosolspektrometer detektierten Partikel der kleinsten Größenklasse den größten Anteil in der Anzahl ein. Dem gegenüber steht ein Massenanteil der kleinsten Größenklasse von lediglich 4 %. Auf der anderen Seite haben die Partikel mit einem Durchmesser von über 20 µm mit einem Anteil in der Anzahl unter 1 % den größten Einfluss auf den Staubmassenanteil von 30 % in dieser Klasse.

Folgende Tabelle 9 zeigt die über das Jahr gemittelten Verteilungen der Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration. Neben Unterschieden zwischen den Tierarten sind Abweichungen innerhalb der Haltungssysteme einer Tierart zu erkennen. Die jahreszeitlichen Unterschiede sind im Anhang in Tabellenform dargestellt. Wesentliche Unterschiede bei der Partikelmassenverteilung sind zwischen FA_1 und FA_2, sowie zwischen VM und VM_Stroh erkennbar. Im Ferkelaufzuchtstall FA_1 mit Oberflurabsaugung ist der Anteil von Partikeln > 15 µm im Vergleich zur Variante mit Unterflurabsaugung in FA_2 um 35 % höher. Beim Vergleich der strohlosen Variante in der Schweine-Vormast stellte sich ein niedrigerer Anteil größerer Partikel (>7,5 µm) heraus.

Tabelle 9: Mittlere Verteilung der Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in den untersuchten Haltungssystemen

Partikelanzahl	VM	VM Stroh	EM	FA_1	FA_2	WS_AF	WS_SB	ABF	Leg Käfig	Leg Voliere	Rind SB	Rind TF
0.75-1.0 µm	36,4	23,9	19,9	22,4	28,5	29,7	27,8	35,2	22,1	23,6	65,42	64,01
1.0-2.0 µm	22,6	29,4	30,8	32,3	32,4	31,0	32,0	28,2	29,7	31,7	26,70	31,92
2.0-3.5 µm	22,3	25,5	26,7	23,9	23,1	25,1	23,3	23,9	22,2	28,7	4,90	3,19
3.5-5.0 µm	13,0	11,5	13,4	12,0	9,3	9,2	10,2	8,9	13,9	11,4	2,13	0,66
5.0-7.5 µm	4,1	6,3	6,3	5,7	4,5	3,2	3,9	2,8	7,7	3,5	0,72	0,17
7.5-10.0 µm	0,9	1,7	1,4	1,4	1,1	0,7	1,0	0,5	2,5	0,6	0,10	0,03
10.0-15.0 µm	0,4	1,0	0,8	1,1	0,7	0,6	0,9	0,3	1,5	0,3	0,03	0,01
>15.0 µm	0,3	0,8	0,6	1,1	0,4	0,5	0,8	0,2	0,4	0,1	0,01	0,01
Partikelmasse												
0.75-1.0 µm	0,4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,2	0,4	3,6	9,0
1.0-2.0 µm	1,6	1,6	1,7	1,0	2,4	2,2	2,2	2,8	1,4	2,9	8,0	21,5
2.0-3.5 µm	9,1	6,4	7,2	4,3	7,8	8,5	10,1	11,1	6,2	16,8	10,7	13,7
3.5-5.0 µm	17,8	9,5	11,6	7,7	10,4	10,4	15,1	15,4	12,9	22,9	15,2	11,5
5.0-7.5 µm	14,7	15,7	17,6	11,8	16,3	11,3	12,3	14,7	20,5	20,0	14,6	9,5
7.5-10.0 µm	8,2	10,8	10,4	7,1	10,0	6,8	7,2	6,8	18,0	9,6	7,3	4,3
10.0-15.0 µm	12,0	17,5	16,6	13,5	18,7	15,5	15,1	12,5	24,4	9,9	10,5	4,5
>15.0 µm	36,3	38,3	34,7	54,5	34,0	45,0	37,5	36,1	16,5	17,5	30,0	26,0

Der Luftvolumenstrom ist neben der Tieraktivität der Parameter mit dem höchsten Einfluss auf die Partikelkonzentration und die Quellemission. Er kann durch verschiedene Faktoren wie Stallinnentemperatur, CO₂-Konzentration oder Sollwertvorgaben im Lüftungscomputer gesteuert werden. Neben den Klimafaktoren hat somit das Management des Landwirts einen starken Einfluss auf die Zusammenhänge.

Physikalisch kann davon ausgegangen werden, dass durch einen hohen Luftvolumenstrom eine Partikelverdünnung in der Abluft auftritt, wenn der Luftdurchsatz steigt. Dem gegenüber kann durch erhöhten Luftvolumenstrom eine vermehrte Resuspension von sedimentierten Partikeln stattfinden, die steigende Partikelkonzentrationen zur Folge hat. Die Stoffdynamik ist hohen Interaktionen unterworfen. Unter diesem Gesichtspunkt sind die dargestellten Ergebnisse dieses Kapitels von großen Unterschieden geprägt.

4.4.1 Schweinehaltung

In diesem Kapitel werden in den einzelnen untersuchten Haltungssystemen die Partikelmassenverteilungen in Abhängigkeit der jahreszeitlichen Unterschiede dargestellt. Zusätzlich ist in den Abbildungen der Luftvolumenstrom pro Tierplatz angegeben. Anhand der Partikelmassenkonzentrationen in den drei Größenbereichen 0,3 bis 5,0 µm, 5,0 bis 10 µm und > 10 µm kann ein Überblick über die Partikelverteilung gewonnen werden, der die Partikeldynamik in den unterschiedlichen Stallssystemen näher beschreibt. Die dargestellten Größenfraktionen sind nicht mit der in der Literaturanalyse beschriebenen Partikelfraktion PM10 oder PM5 gleichzusetzen. Sie geben die Größeneinteilungen des Aerosolspektrometers wieder. Als Datengrundlage ist die Partikelmassenkonzentration der einzelnen Messtage mit dem dazugehörigen Luftvolumenstrom eingegangen. Die Standardabweichungen beschreiben die durchschnittliche Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert über alle Messtage einer Jahreszeit in einer abgebildeten Größenklasse.

Abferkelbereich

Abbildung 52 zeigt die Partikelmassenkonzentrationen in drei Größenklassen bei verschiedenen Jahreszeiten. Während der Übergangszeit ist der Luftvolumenstrom am niedrigsten. Die Partikelmassenkonzentration großer Partikel ist hier sehr hoch.

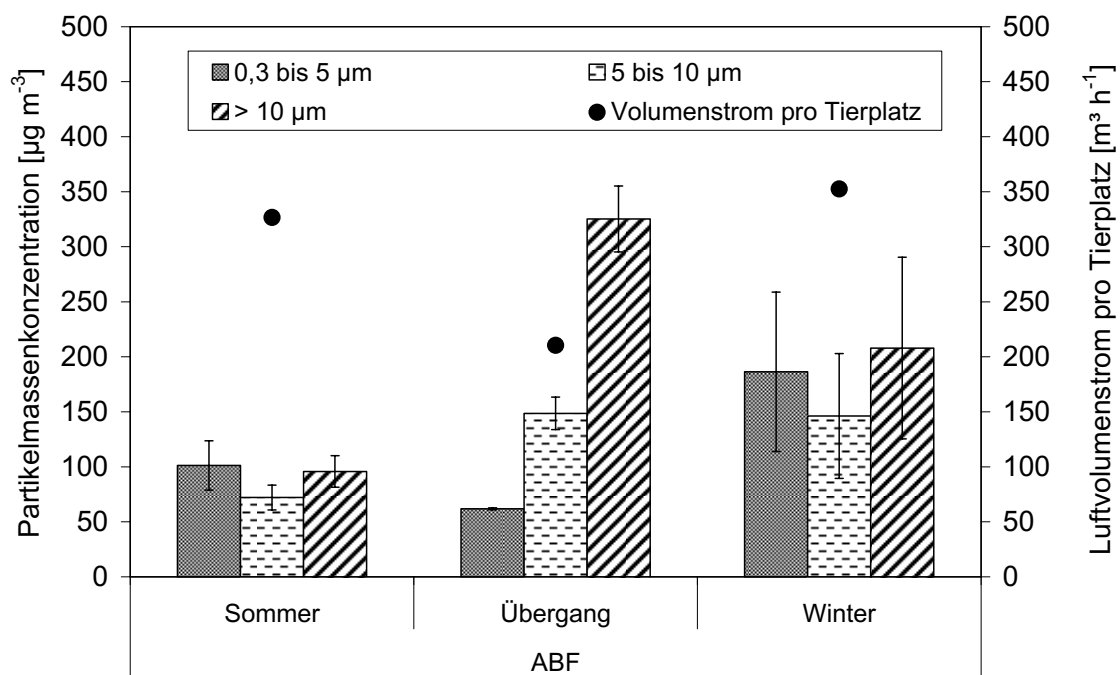


Abbildung 52: Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom im Abferkelbereich

Kleine Partikel kommen dagegen in niedrigerer Konzentration vor. Innerhalb der Größenklasse 5 bis 10 µm sind lediglich geringe Unterschiede zu erkennen. Zwischen den Partikelkonzentrationen im Übergang und im Winter ist kein signifikanter Unterschied feststellbar. Nur der Sommerwert liegt etwas niedriger. Bei ähnlichen Luftvolumenströmen ist hier die Partikelverteilung gleich.

Warte-/Deckbereich

Im Warte- und Deckbereich ist zwischen einer Großgruppe mit Abruffütterung (WS_AF) und dem Haltungssystem mit Selbstfangbuchten (WS_SB) unterschieden worden. Beide Stallsysteme zeigen jedoch ein ähnliches Bild hinsichtlich der Partikelmassenverteilung in unterschiedlichen Jahreszeiten und Größenklassen (s. Abbildung 53). Es fällt auf, dass kein starker Verdünnungseffekt durch die höheren Luftvolumenströme im Sommer auftritt. In WS_AF liegen die Partikelmassenkonzentrationen im Sommer sogar über den Werten aus dem Winter. Die Luftraten pro Tierplatz sind in WS_SB um 50 % höher, die Partikelmassenkonzentrationen liegen um ca. 20 % niedriger als in WS_AF.

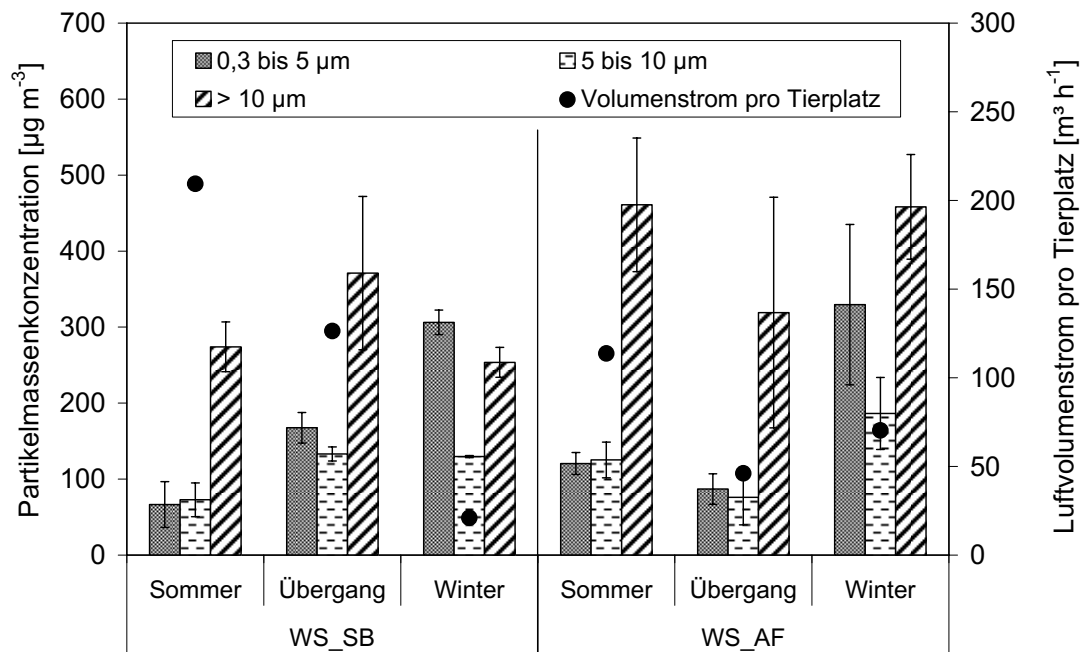


Abbildung 53: Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom im Warte-/Deckbereich

Ferkelaufzucht

In der Ferkelaufzucht bildet das Lüftungssystem den einzigen Unterschied zwischen FA_1 und FA_2. Die Ergebnisse zu Partikelmassenverteilung und Luftvolumenstrom sind in Abbildung 54 dargestellt.

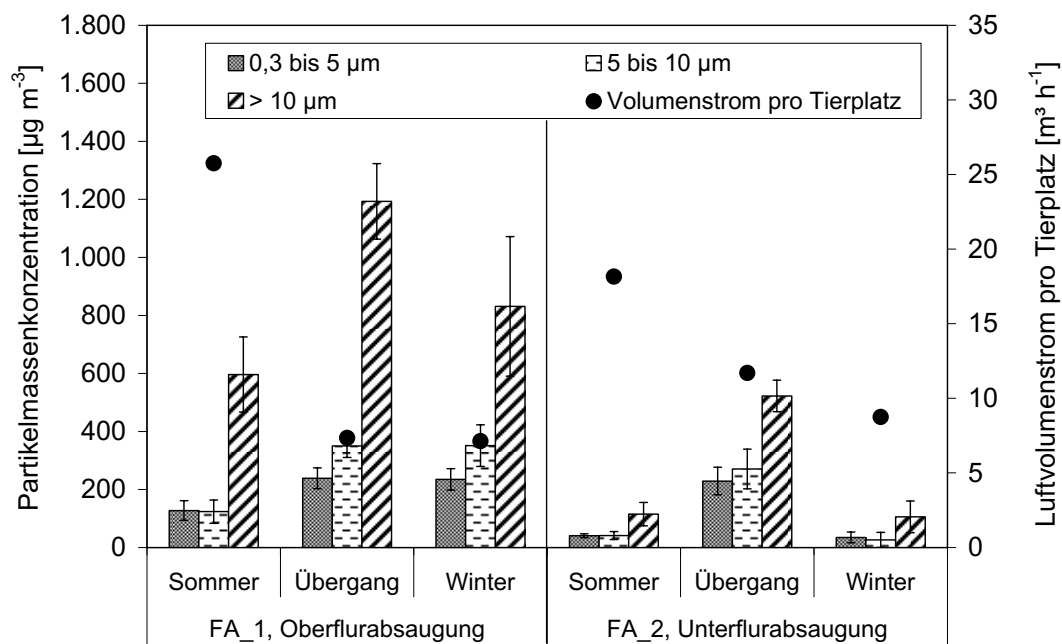


Abbildung 54: Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Ferkelaufzucht

Die Partikelmassenverteilung ist in beiden Ställen gleich. Mit steigender Partikelgröße innerhalb einer Jahreszeit erhöht sich die Konzentration. Aus Abbildung 54 lässt sich weiterhin erkennen, dass in FA_1 in der Größenklasse $> 10 \mu\text{m}$ trotz gleicher Luftvolumenströme im Übergang und Winter Konzentrationsunterschiede festgestellt worden sind. Der Effekt der Unterflurabsaugung wird vor allem im Winter deutlich. Trotz niedriger Luftvolumenströme ist die Partikelmassenkonzentration nicht höher als im Sommer.

Vormast

Im Bereich der Vormast sind stallspezifische Unterschiede trotz identischer Haltungssysteme ermittelt worden (s. Abbildung 55). In VM_1 entspricht die Verteilung den Ergebnissen aus dem Warte- und Deckbereich. In beiden Ställen sind die durchschnittlichen Luftvolumenströme in der Übergangszeit am höchsten. Es herrschte in VM_1 ein doppelt so hoher Luftwechsel wie in VM_2. Der Verdünnungseffekt durch den Luftvolumenstrom ist zwar erkennbar; die Partikelmassenkonzentrationen liegen jedoch in fast allen Größenklassen über denen in VM_2.

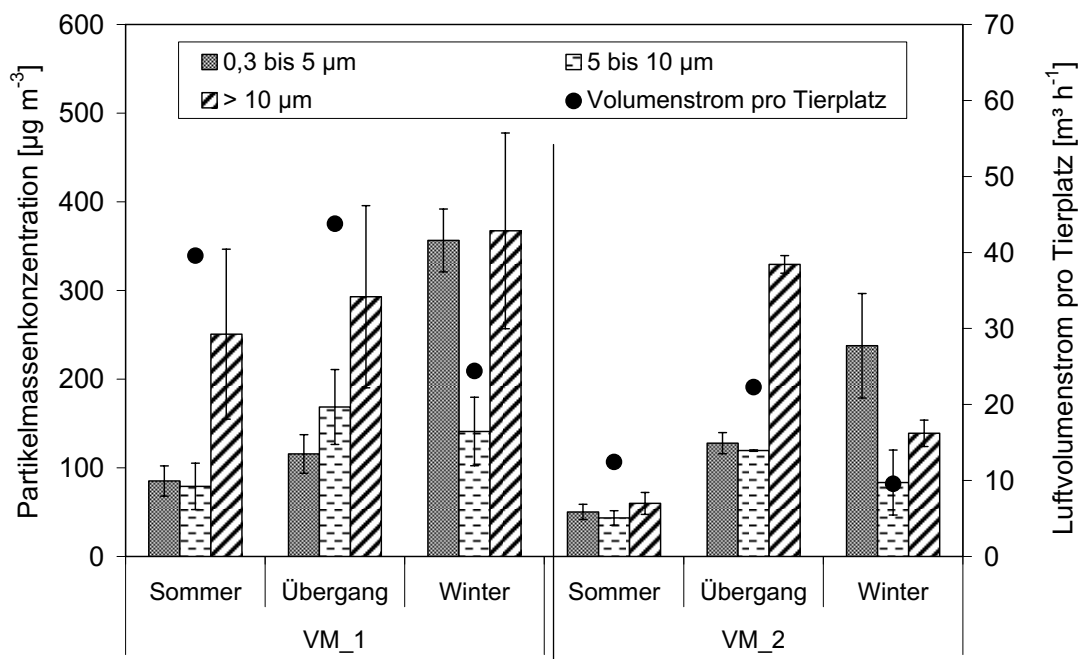


Abbildung 55: Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Vormast

Vormast, Einstreu

In der eingestreuten Variante in Abbildung 56 der Vormast fällt der Luftvolumenstrom vom Sommer über den Übergang zum Winter ab. Die eingestellte Lufrate pro Tierplatz ist in allen Jahreszeiten höher als in den konventionellen Systemen der Vormast.

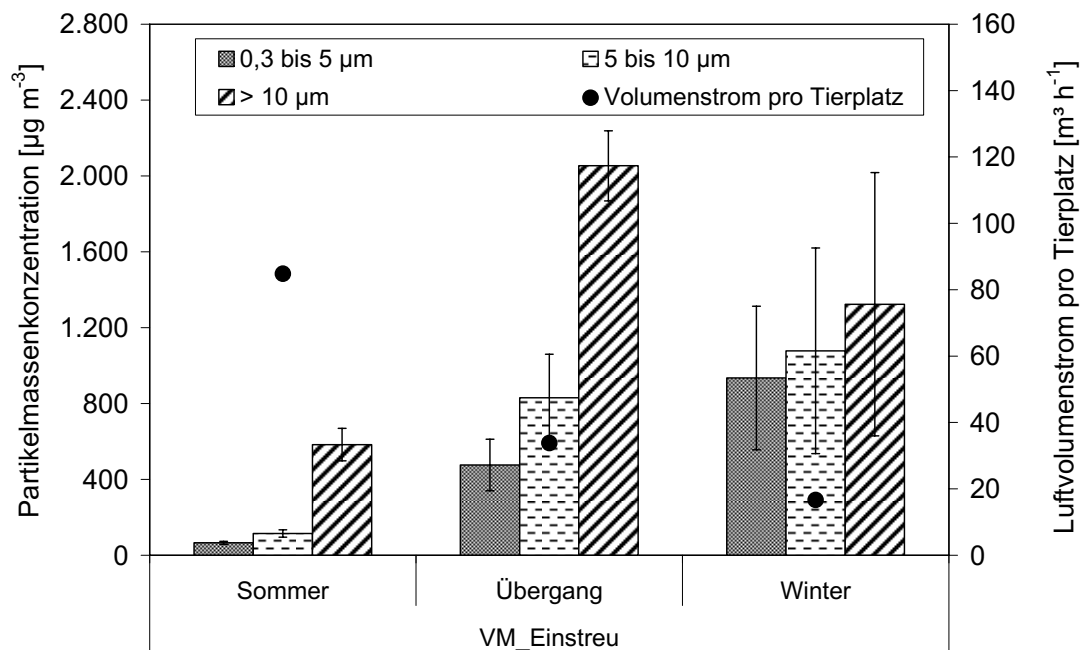


Abbildung 56: Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Vormast mit Einstreu

Die Partikelmassenverteilung unter Sommer- und Übergangsbedingungen ist gleich, da das Verhältnis der Massenkonzentrationen innerhalb der beiden Jahreszeiten jeweils gleich hoch ist. Die Größenklasse > 10 µm nimmt im Sommer und im Übergang einen höheren Anteil ein als im Winter. Beim Vergleich der Partikelgrößen im Verlauf der Jahreszeiten ist zu erkennen, dass die Massenkonzentration in den ersten beiden Klassen von Sommer zu Winter ansteigt. Die Partikel > 10 µm erreichen zu Übergangsbedingungen entgegen der Erwartung den höchsten Wert.

Endmast

Die Partikelmassenverteilungen sind bei gleichen Haltungsbedingungen in beiden Endmastställen ähnlich. Die Luftvolumenströme fallen im jahreszeitlichen Verlauf. Bei den Partikelmassenkonzentrationen sind in der Klasse 0,3 bis 5 µm keine Abweichungen festzustellen. In der Klasse 5 bis 10 µm bestehen Unterschiede in der Übergangszeit. Die Konzentration ist dort in EM_2 um 50 % höher als in EM_1. Die deutlichsten Differenzen

zwischen beiden Ställen ergeben sich in der Klasse $> 10 \mu\text{m}$ zu Sommerbedingungen, da trotz höherem Luftvolumenstrom die Partikelmassenkonzentration in EM_1 um 50 % höher ist als in EM_2.

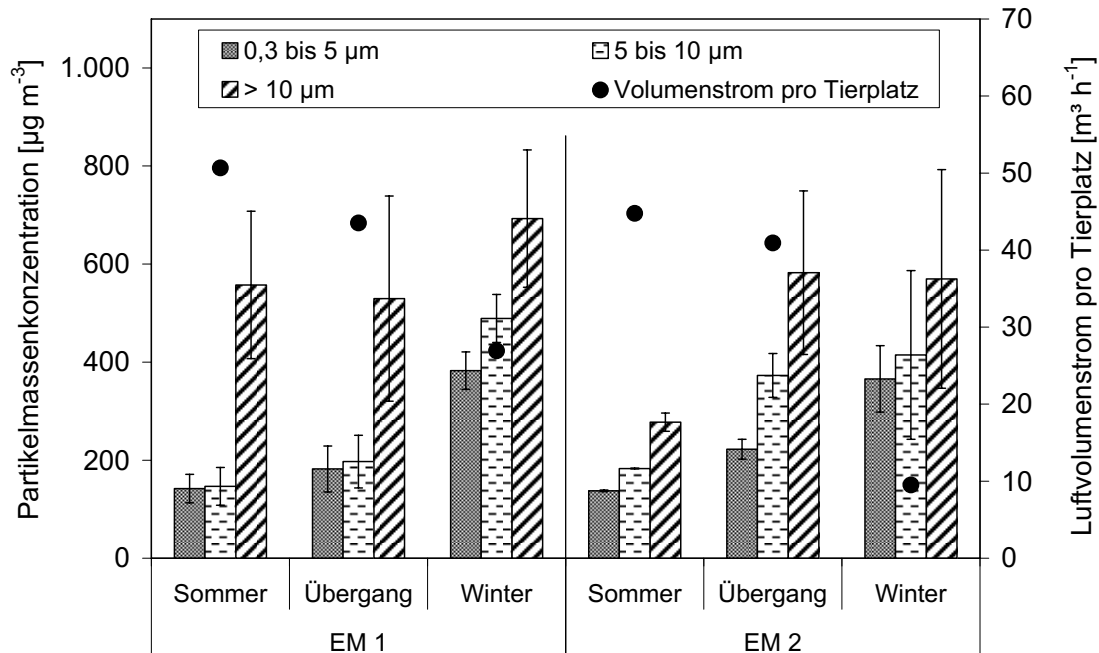


Abbildung 57: Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Endmast

4.4.2 Rinderhaltung

Im Gegensatz zu den zwangsgelüfteten Schweineställen ergibt sich in den freigelüfteten Rinderställen ein anderes Bild über den jahreszeitlichen Verlauf der Luftvolumenströme. Abbildung 58 zeigt, dass die Luftrate pro Tierplatz in beiden Rinderställen im Winter höher ist als im Sommer bzw. im Übergang. Die Partikelmassenkonzentrationen liegen um den Faktor 20 bis 40 niedriger als in den Schweineställen. Vor allem Partikel in der Größenklasse $> 10 \mu\text{m}$ nehmen mit Ausnahme der Sommermessungen in Rind_SB einen sehr geringen Anteil ein. Dabei sinkt die Partikelmassenkonzentration in dieser Größenklasse im Verlauf der Jahreszeiten, während der Luftvolumenstrom ansteigt. Die Sommermessung in Rind_TF konnte auf Grund messtechnischer Probleme nicht mit in die Auswertung aufgenommen werden.

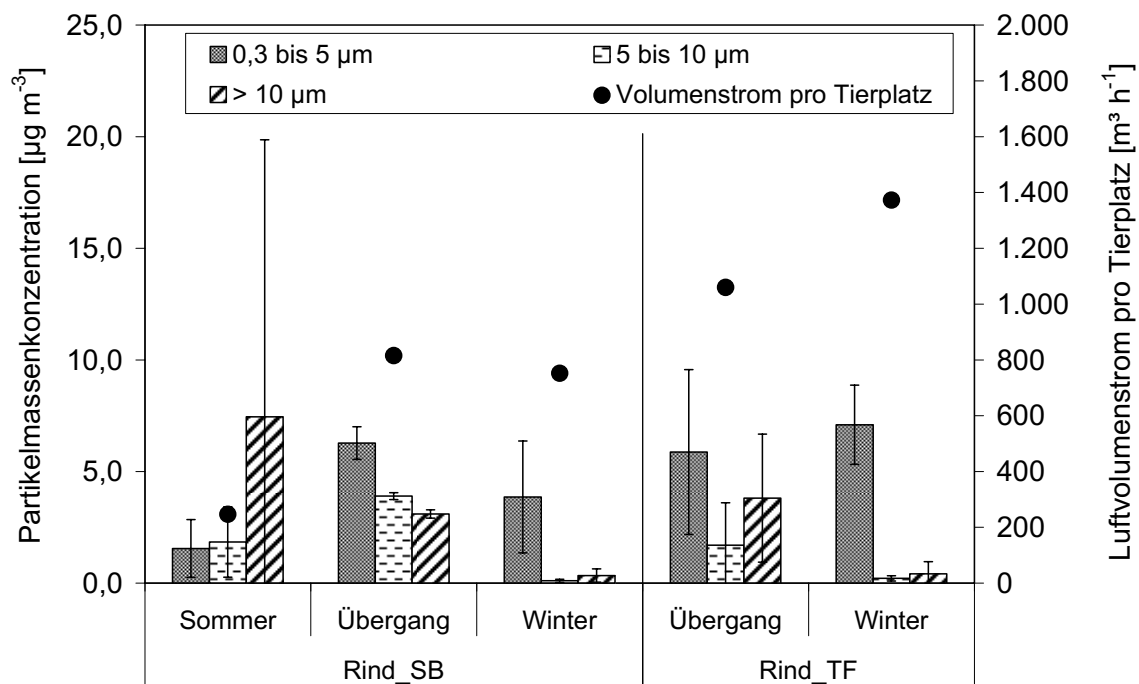


Abbildung 58: Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom in der Rinderhaltung

4.4.3 Geflügelhaltung

In der Legehennenhaltung sind deutliche Unterschiede zwischen Käfig- und Volierenhaltung zu erkennen (s. Abbildung 59). Während bei der Käfighaltung in den untersuchten Jahreszeiten Sommer und Übergang sehr geringe Partikelmassenkonzentrationen festgestellt wurden, steigt in der Volierenhaltung die Partikelkonzentration in allen Größenklassen stark an. Dabei nehmen die Partikel von 0,3 bis 5 μm einen größeren Anteil ein als die beiden anderen Bereiche. Das Verhältnis der Partikelmassenkonzentrationen in den einzelnen Größenklassen und demnach auch die Partikelverteilung sind von den Schweineställen verschieden. Sie ähneln mehr der Verteilung in der Rinderhaltung. Der Luftvolumenstrom pro Tierplatz ist unter Sommer- und Übergangsbedingungen in beiden Haltungssystemen gleich hoch.

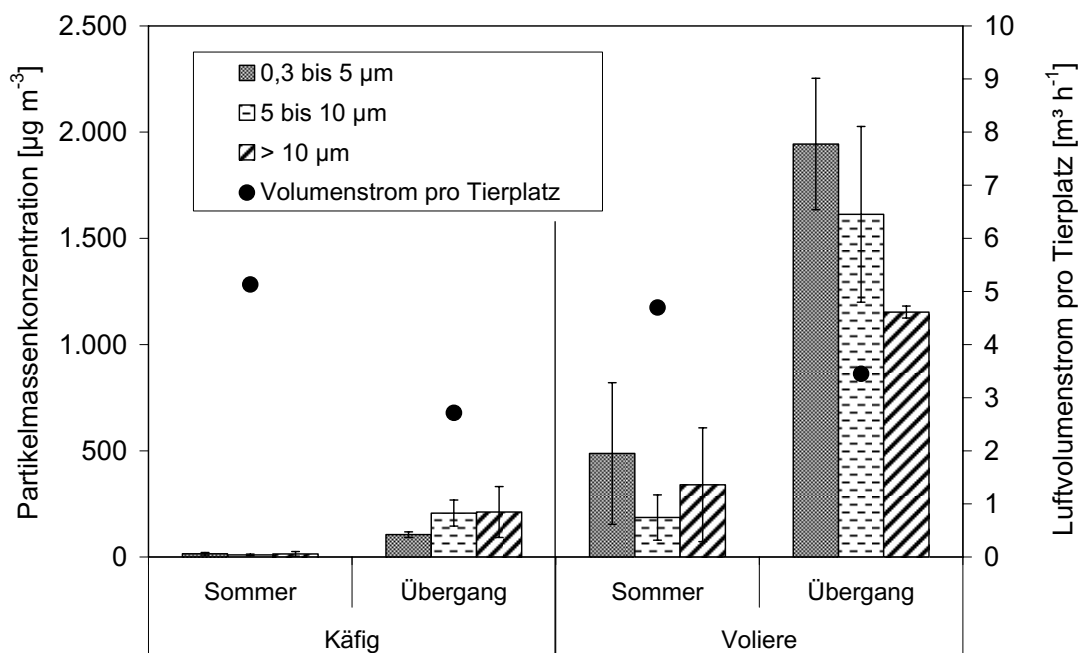


Abbildung 59: Partikelmassenkonzentration in der Geflügelhaltung

Putenmast

In Abbildung 60 ist die Partikelgrößenverteilung in der Partikelmassenkonzentration und in der Partikelanzahlkonzentration dargestellt.

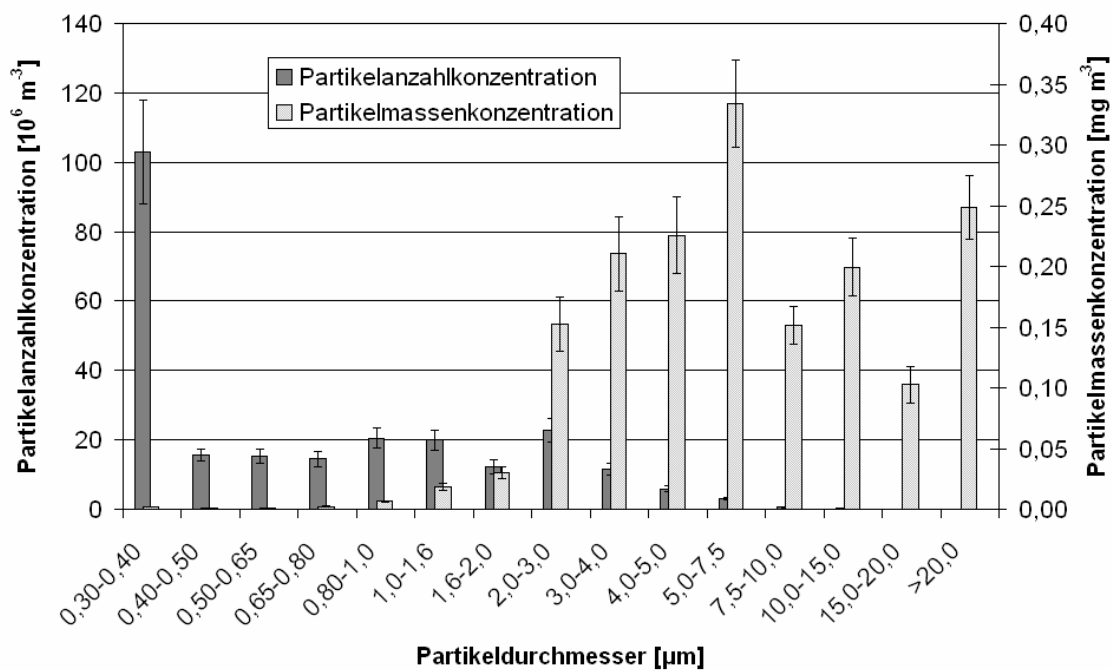


Abbildung 60: Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in der Putenmast unter Sommerbedingungen (nach SCHNEIDER, T., 2006)

Für die Massenverteilung zeigt sich, dass die Fraktionen mit Partikeln eines Durchmessers von über 2 μm den größten Anteil an der Gesamtstaubmasse haben. Dagegen spielen bei der Partikelanzahlkonzentration die feinsten Partikel die größte Rolle. (SCHNEIDER, T., 2006) Die typische Konzentrationsverteilung in den Übergangsmessungen (15.03.05 bis 24.05.05) ist in Abbildung 61 dargestellt. Die Verteilung zeigt Ähnlichkeiten zu den vorangegangenen Verteilungen der Messungen in den anderen Jahreszeiten. Die Partikelfraktion mit Größen über 20,0 μm ist allerdings in der Massenverteilung besonders stark vertreten. (SCHNEIDER, T., 2006)

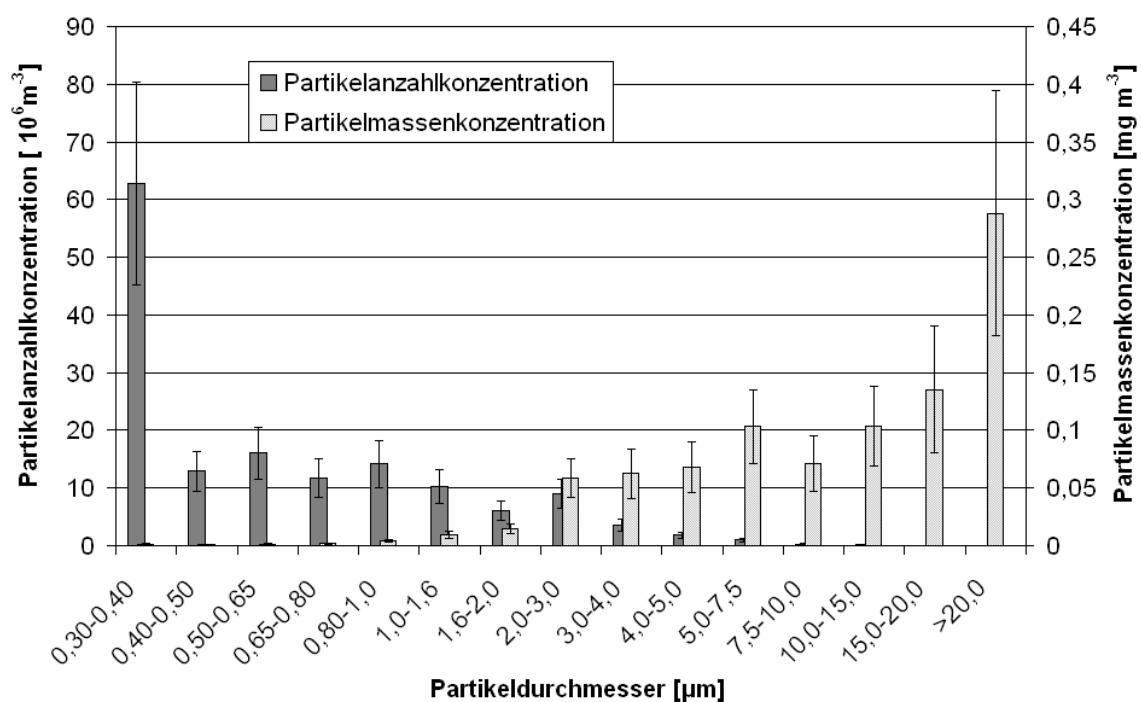


Abbildung 61: Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in der Putenmast unter Übergangsbedingungen (nach SCHNEIDER, T., 2006)

Die typische Partikelgrößenverteilung aus den Wintermessungen ist den Ergebnissen der Sommermessungen ähnlich (Abbildung 62). In der Partikel*massen*konzentration nehmen die Partikel ab einer Größe von 2,0 μm den größten Anteil an der Gesamtmasse ein. In der Partikel*anzahl*konzentration ist die Fraktion der kleinsten Partikel von 0,3 bis 0,4 μm die größte Fraktion. (SCHNEIDER, T., 2006)

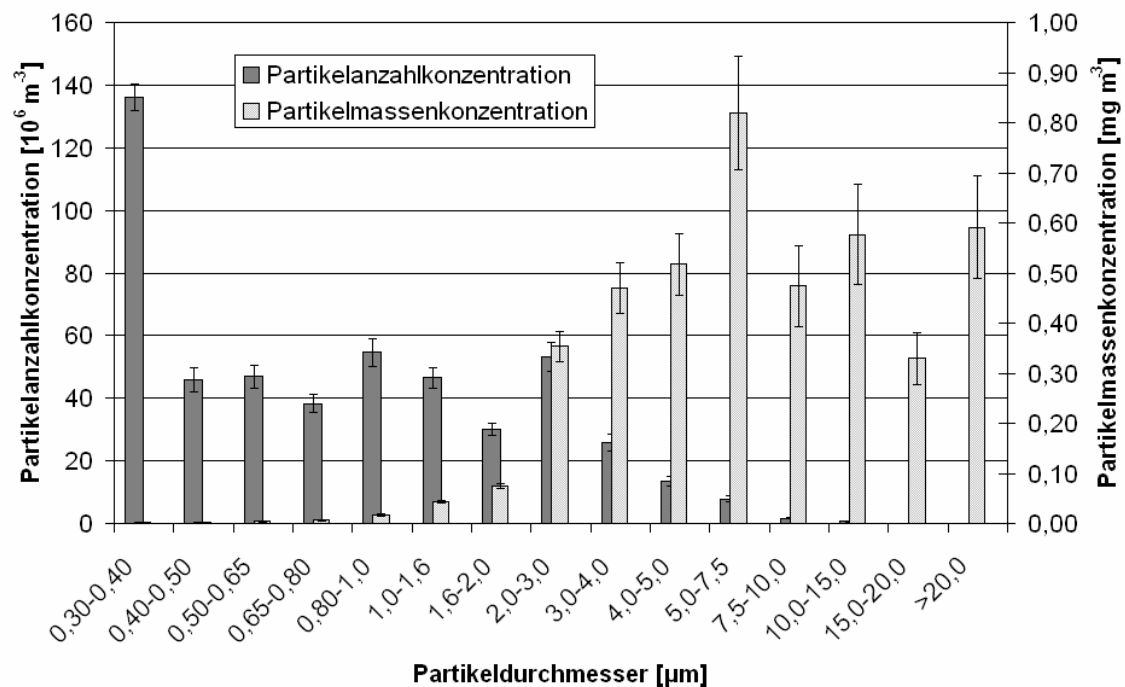


Abbildung 62: Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration in der Putenmast unter Winterbedingungen (nach SCHNEIDER, T., 2006)

4.4.4 Zwischenfazit zu Partikelmassenverteilung und Luftvolumenstrom

Folgende Ergebnisse lassen sich aus dem vorgestellten Untersuchungsblock ableiten:

- Die Partikelverteilung ist in allen Jahreszeiten unterschiedlich.
- Es bestehen Unterschiede zwischen den Haltungssystemen und den Tierarten.
- Die durchschnittlichen Luftvolumenströme in den zwangsgelüfteten Haltungssystemen sind im Sommer oder Übergang am höchsten, im Winter am niedrigsten.
- Bei der Legehennenhaltung in der Voliere ist der Anteil kleiner Partikel besonders hoch.
- Der Luftvolumenstrom in den freigelüfteten Rinderställen ist im Winter höher als unter Sommer- oder Übergangsbedingungen.
- Es gibt trotz gleicher Haltungsbedingungen stallspezifische Unterschiede in der Partikelverteilung.
- In beiden Varianten der Ferkelaufzucht konnte eine ähnliche Partikelverteilung festgestellt werden, obwohl unterschiedliche Abluftsysteme installiert sind.

4.5 Partikelmassenkonzentration und Quellemission

Partikelmassenkonzentration und Partikelemission sind mit Grenzwerten in der TA-Luft beschrieben. Im folgenden Kapitel werden die Höhe der Partikelmassenkonzentration in mg m^{-3} und die Quellemission in $\text{g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ für alle untersuchten Stallsysteme dargestellt. Die Berechnung der Quellemission erfolgte nach Formel 4 auf Seite 20. Als Auswertungsintervall ist auf Grund von Ergebnissen der Voruntersuchungen der 24-Stundenmittelwert festgelegt worden. In den Boxplots-Diagrammen kennzeichnet die schwarze Linie innerhalb der Box den Median, die gestrichelte Linie das arithmetische Mittel. Die mittleren 50 % der Werte liegen innerhalb der Box. Die dünnen Querstriche ober- und unterhalb der Box beschreiben den größten bzw. kleinsten Wert der Stichprobe, die noch keinen Ausreißer oder Extremwert darstellen. In der Grafik werden Ausreißer (1,5-fache des 75 %-Perzentils) mit einem Kreis und Extremwerte (3-fache des 75 %-Perzentils) mit einem Sternchen gekennzeichnet. Die Art der Darstellung mit Boxplots wurde gewählt, um Ausreißer und das Streuungsmaß besser darstellen zu können. Da Ausreißer plausible Werte darstellen, die auf Grund von nachvollziehbaren Vorgängen im Stall und aus dem Messprotokoll hervorgehen, sind für die Abschätzung der Partikelmassenkonzentration und der Quellemission das jeweilige arithmetische Mittel berechnet worden.

4.5.1 Schweinehaltung

Abferkelstall

Abbildung 63 zeigt die durchschnittliche Partikelmassenkonzentration und dazugehörige Quellemission in jahreszeitlicher Abhängigkeit. Die Partikelmassenkonzentration steigt von $0,27 \text{ mg m}^{-3}$ im Sommer auf $0,55 \text{ mg m}^{-3}$ im Übergang. Dieser Wert liegt leicht über der Konzentration im Winter mit $0,5 \text{ mg m}^{-3}$. Das Streuungsmaß ist jedoch im Winter höher als zu Übergangs- und Sommerbedingungen. Ein Ausreißer von $8,2 \text{ mg m}^{-3}$ ist sogar vorhanden. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Quellemission mit dem Unterschied, dass im Winter mit $0,36 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ ein höherer Massenstrom den Stall verlässt als im Übergang. Das hohe Streuungsmaß ist auch im Winter zu erkennen, da die Quellemission als Produkt aus Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom berechnet wird.

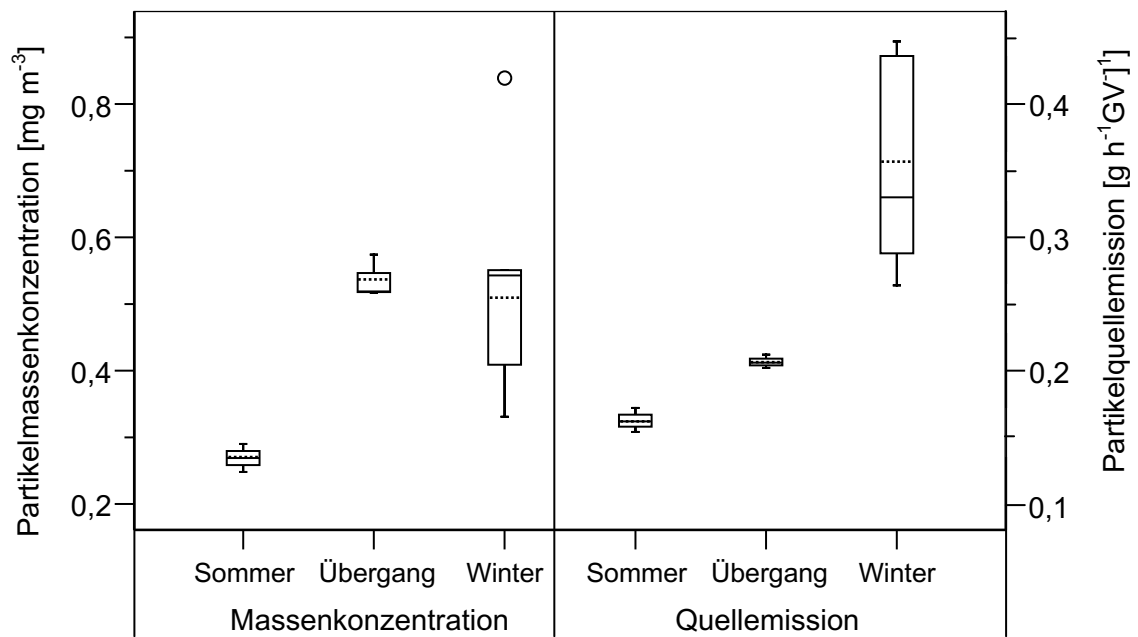


Abbildung 63: Partikelmassenkonzentration und Quellemission im Abferkelbereich

Wartestall mit Selbstfangbuchten (WS_SB)

Im Wartestall WS_SB in Abbildung 64 ist die Massenkonzentration mit 0,65 mg m⁻³ zu Übergangsbedingungen am niedrigsten.

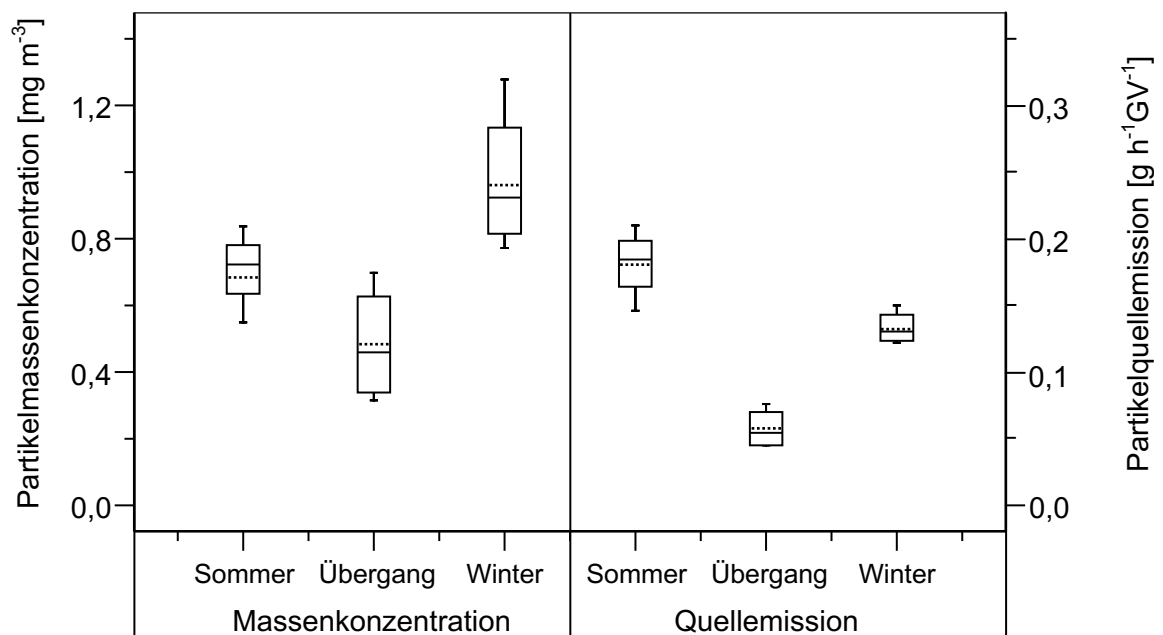


Abbildung 64: Partikelmassenkonzentration und Quellemission im Wartestall mit Selbstfangbuchten

Höhere Konzentrationen finden sich im Sommer und Winter, wobei die Tagesmittelwerte im Winter und Übergang stärker streuen als im Sommer. Die Quellemission hat im Sommer ihren Maximalwert, im Übergang liegt sie noch unterhalb der Werte für den Winter. Das Streuungsmaß der Tagesmittelwerte im Sommer ist am größten. Allgemein konnten keine großen Ausreißer bei Partikelmassenkonzentration und Quellemission festgestellt werden. Der Median der Tagesmittelwerte liegt nahe bei deren arithmetischen Mittelwerten.

Wartestall Abruffütterung

Beim Wartestall mit Abruffütterung (WS_AF) bestätigt sich der vermutete Verdünnungseffekt durch den Luftvolumenstrom. Steigende Partikelmassenkonzentrationen und sinkende Quellemissionen von der wärmeren zur kälteren Jahreszeit sind in Abbildung 65 erkennbar. Die Massenkonzentrationen haben im Vergleich zu WS_SB ein höheres Niveau.

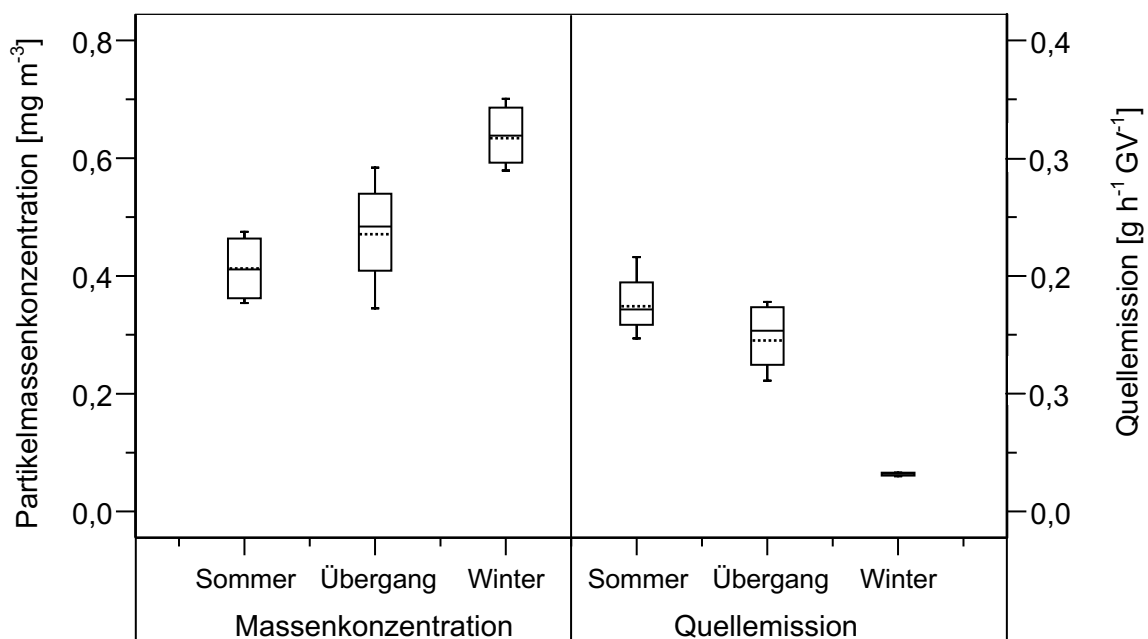


Abbildung 65: Partikelmassenkonzentration und Quellemission im Wartestall mit Abruffütterung

Die Quellemissionswerte liegen auf Grund höherer Luftvolumenströme in WS_SB auf etwa gleicher Höhe. Das Streuungsmaß der Partikelmassenkonzentration bei den Übergangsmessungen lässt erkennen, dass auch während dieser Jahreszeit einzelne Tagesmittelwerte bis auf die niedrigen Konzentrationen im Sommer absinken können. Die

höchsten Konzentrationswerte des Übergangs stimmen dagegen mit den niedrigsten Konzentrationswerten des Winters überein.

Ferkelaufzucht Oberflurabsaugung

Unter Sommerbedingungen ist die Partikelmassenkonzentration mit $0,9 \text{ mg m}^{-3}$ am niedrigsten (s. Abbildung 66). Die dazugehörige Quellemission nimmt mit $0,45 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ den höchsten Wert an. Die Mittelwerte streuen jedoch so stark, dass im Sommer an einzelnen Tagen Quellemissionen gemessen worden sind, die unterhalb des Mittelwerts während der Übergangszeit lagen. Obwohl während des Übergangs die höchste Partikelmassenkonzentration gemessen worden ist, ist die Quellemission dieser Jahreszeit nicht am niedrigsten. Der niedrigste Wert ist im Winter festgestellt worden.

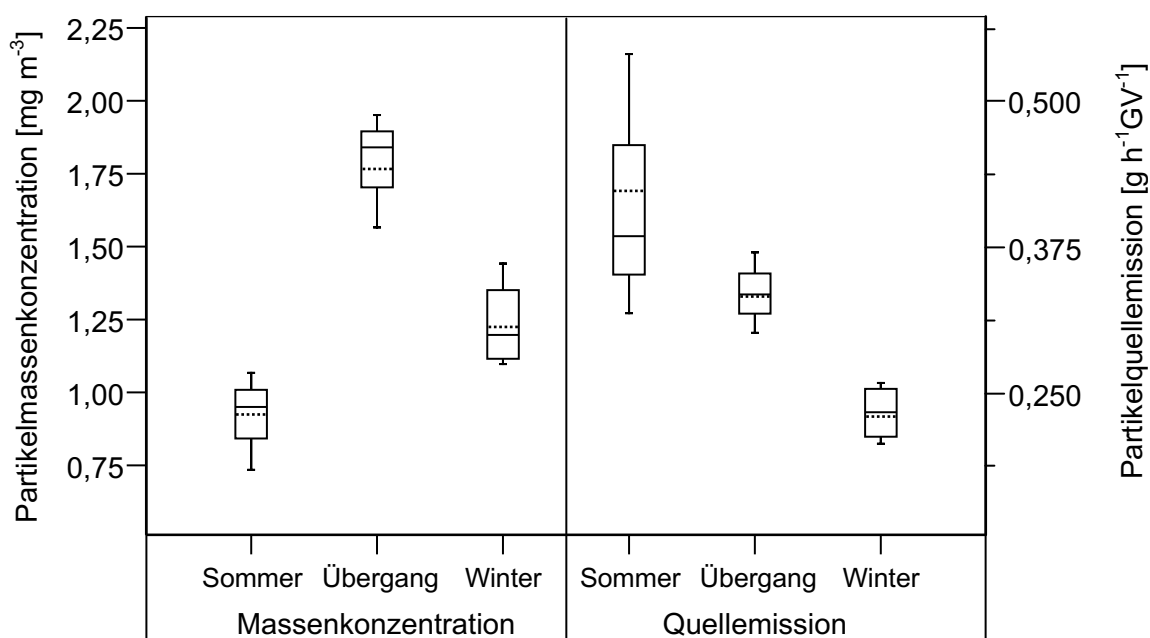


Abbildung 66: Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Ferkelaufzucht mit Oberflurabsaugung

Ferkelaufzucht Unterflurabsaugung

Abbildung 67 zeigt die Situation im Ferkelaufzuchtteil mit Unterflurabsaugung (FA_2). Auch hier ist die Partikelmassenkonzentration während der Übergangszeit am höchsten. Allerdings liegen die Werte um das 2 bis 4-fache niedriger als in der Stallvariante mit Oberflurabsaugung. Beim Massenstrom emittiert der Stall unter Übergangsbedingungen die höchste Staubmenge mit $0,37 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$. Dies entspricht dem Sommermittelwert aus FA_1, der jedoch wesentlich höheren Schwankungen (bis zu $0,55 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$) unterworfen ist als der höchste Mittelwert aus FA_2 ($0,4 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$). Unter Winterbedingungen sind

sehr geringe Partikelmassenkonzentrationen gemessen worden, die durch dementsprechend geringe Luftvolumenströme niedrige Quellemissionen zur Folge haben.

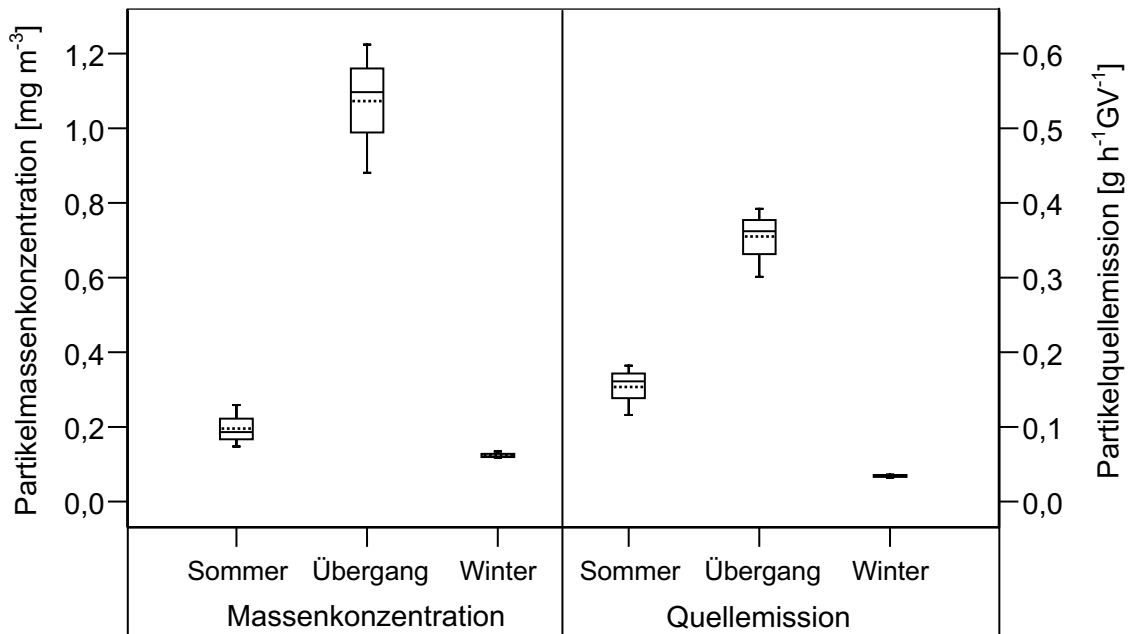


Abbildung 67: Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Ferkelaufzucht mit Unterflurabsaugung

Vormast konventionell

In der konventionellen Vormast ohne Einstreu (Abbildung 68) zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Wartestall mit Abruffütterung. Die Partikelmassenkonzentrationen steigen an, die Quellemissionen sinken bei sich ändernden Jahreszeiten.

Im Gegensatz zur beschriebenen Situation im Wartebereich liegen die Mittelwerte näher zusammen. Die Partikelmassenkonzentrationen während der Sommer- und Übergangsbedingungen lassen sich kaum unterscheiden. Der Median im Sommer ist niedriger als im Übergang, da an einigen Tagen sehr hohe Konzentrationen gemessen worden sind, die den Mittelwert erhöhen. Die Wintersituation kann jedoch klar abgegrenzt werden. Die Massenkonzentration beträgt dort $0,9 \text{ mg m}^{-3}$. Ein statistischer Mittelwertvergleich hat gezeigt, dass die Quellemissionen in den drei Messperioden keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Die höchsten und niedrigsten Werte sind im Sommer zu finden. Das Streuungsmaß ist hier besonders hoch.

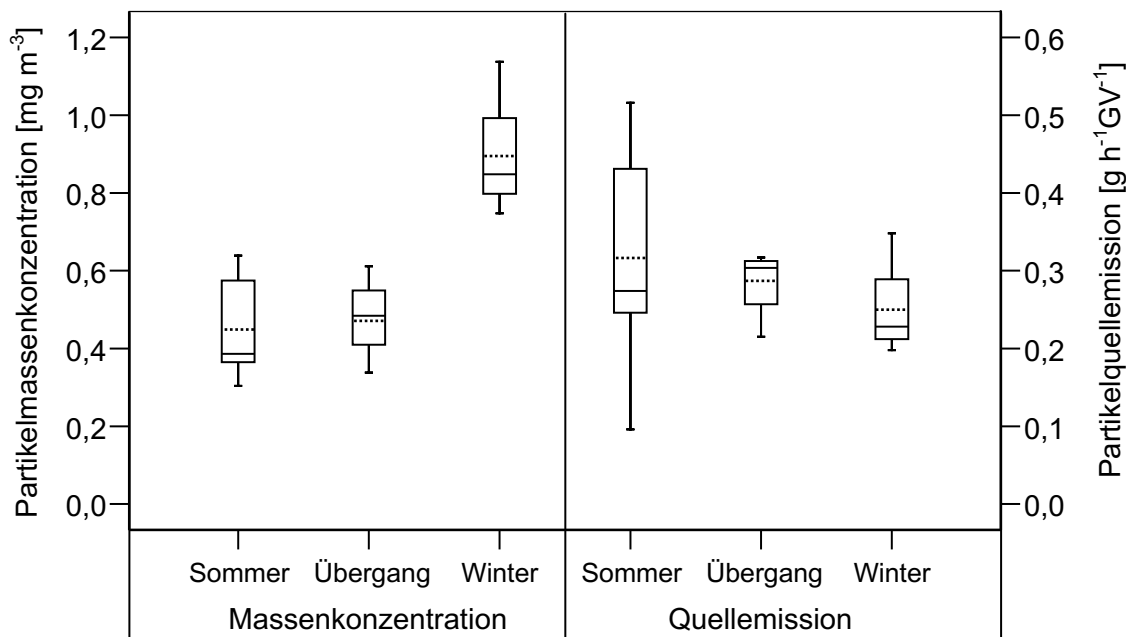


Abbildung 68: Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Vormast ohne Einstreu

Vormast Einstreu

Die Ergebnisse der eingestreuten Variante der Vormast in Abbildung 69 lassen erkennen, dass eine 5-fach höhere mittlere Partikelmassenkonzentration im Vergleich zur Vormast ohne Einstreu erreicht wird.

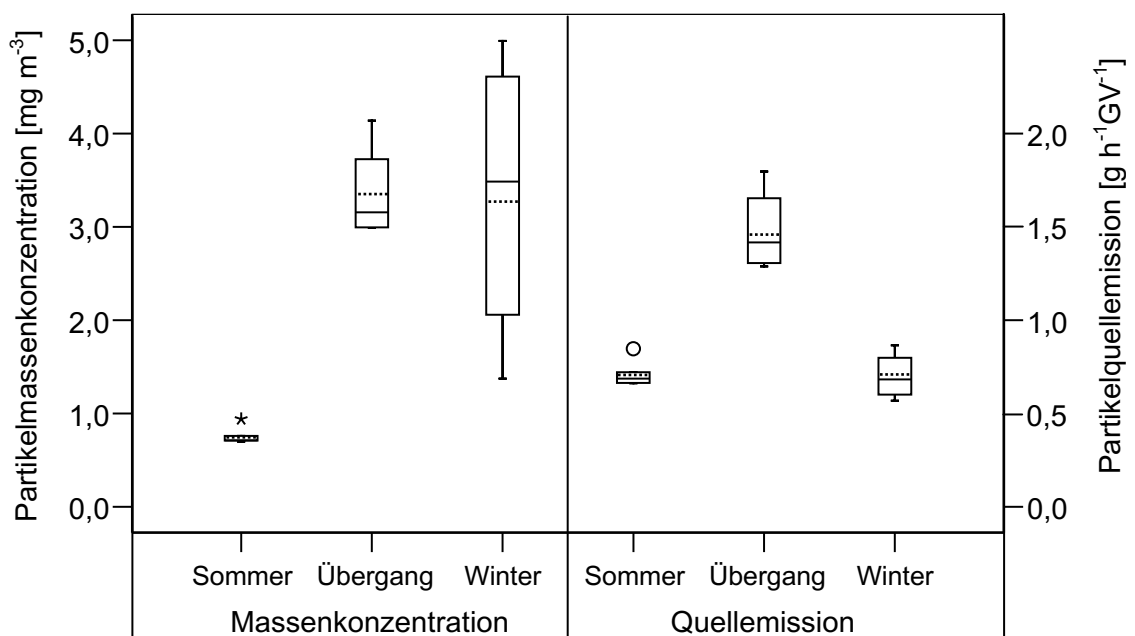


Abbildung 69: Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Vormast mit Einstreu

Durch Multiplikation der Konzentration mit dem Luftvolumenstrom ergeben sich Quellemissionen, die unter Übergangsbedingungen auf bis zu $1,8 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ ansteigen können. Die strohlose Variante erreicht hier nur Werte von $0,5 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$. In der Wintersituation ist ein hohes Streuungsmaß erkennbar. Die Tagesmittelwerte der Partikelmassenkonzentration schwanken von $1,2$ bis $5,0 \text{ mg m}^{-3}$.

Endmast

Steigende Partikelmassenkonzentrationen sind zu Sommer- zu Winterbedingungen bestimmt worden. Dabei ist die Streubreite der Daten sehr groß. Die niedrigsten Einzelwerte aus Übergangs- und Wintermessungen liegen jeweils unterhalb des Mittelwertes der vorausgehenden Jahreszeit. Des Weiteren ist in der Wintermessung ein Ausreißer zu erkennen, der um den Faktor 3 unter dem Mittelwert liegt. Die Mittelwerte weichen allerdings kaum von den Medianen ab, so dass die Streuung um den Mittelwert herum in beide Richtungen gleich hoch ist. Die berechneten Mittelwerte der Quellemissionen für Sommer und Übergang unterscheiden sich mit einem Wert von $0,24 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ nicht voneinander. Es bestehen jedoch Unterschiede zwischen den Medianen. Da dieser im Übergang höher ist als das arithmetische Mittel, sind im Vergleich zum Sommer Tage mit niedrigeren Massenströmen festzustellen. Im Winter liegt der Massenstrom signifikant niedriger bei $0,12 \text{ g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$. Allgemein ist die Partikelmassenkonzentration höher als im identischen Abteil mit Schweinen in der Vormast. Die Quellemissionen liegen auf gleichem Niveau.

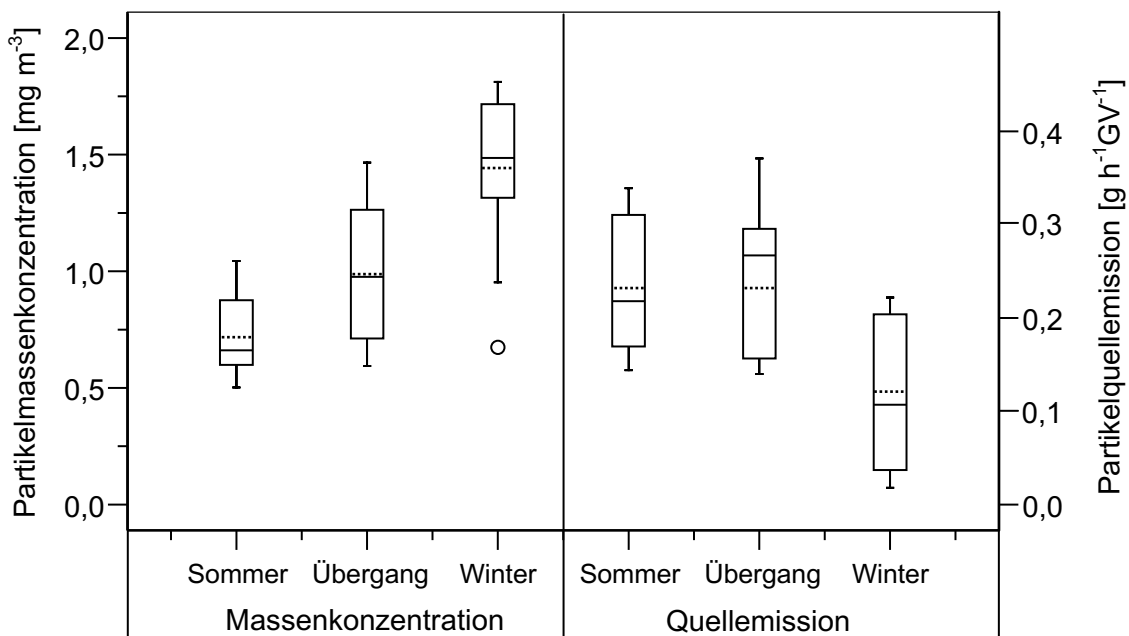


Abbildung 70: Partikelmassenkonzentration und Quellemission in der Endmast

4.5.2 Rinderhaltung

Rind_SF

Im untersuchten Stall Rind_SF ist ein Abfall der mittleren Partikelmassenkonzentration von Sommer- zu Winterbedingungen zu beobachten (Abbildung 71). Allerdings weichen die einzelnen Tagesmittelwerte im Sommer stark voneinander ab. Die Konzentration für den Übergang liegt im Bereich der Sommerwerte.

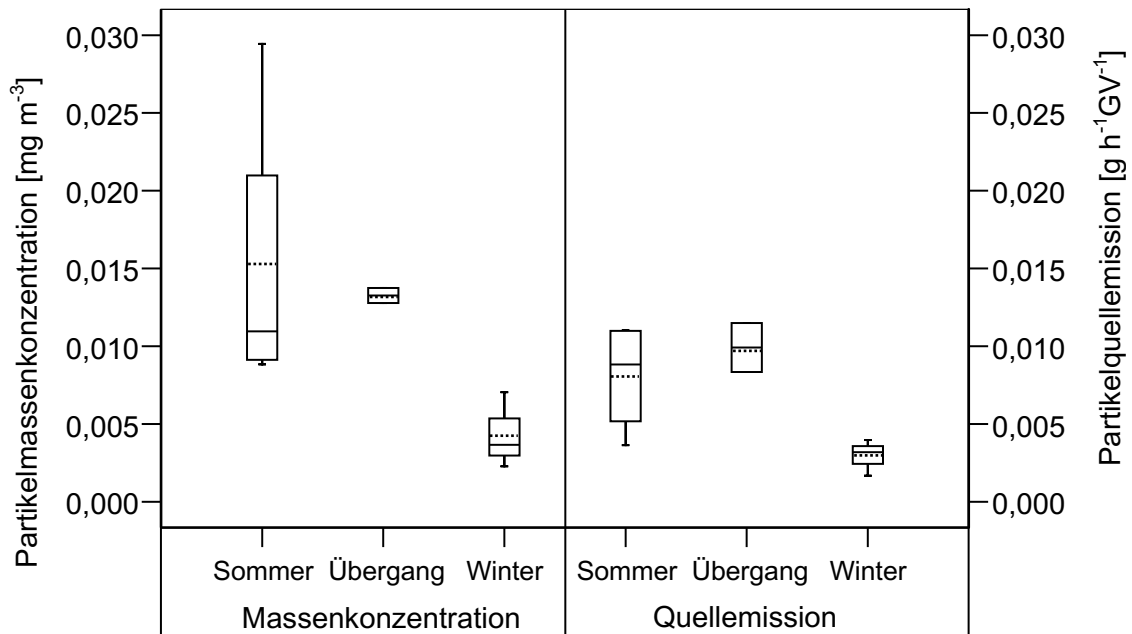


Abbildung 71: Partikelmassenkonzentration und Quellemission in Stall Rind_SB

Eine signifikante Änderung der Partikelmassenkonzentration ist lediglich im Winter festzustellen. Stichprobenartige Messungen außerhalb des Stalles ergaben Hintergrundkonzentrationen, die bei Annahme gleicher Dichte der Partikel um 0,004 mg m⁻³ lagen. Eine Vernachlässigung der Hintergrundkonzentration ist hier nicht zulässig. Die sehr niedrige Konzentration im Winter entspricht der Hintergrundkonzentration. Bei den Daten zur Quellemission sind keine signifikanten Unterschiede zwischen Sommer und Übergang gemessen worden. Wie bei der Partikelmassenkonzentration liegt die Quellemission im Winter am niedrigsten.

Rind_TF

Im zweiten untersuchten Rinderstall mit Trauf-First-Lüftung konnten bei der Partikelmassenkonzentration keine signifikanten Unterschiede zwischen Übergangs- und Winterbedingungen gefunden werden. Abbildung 72 zeigt, dass die Streuung der Werte

sehr hoch ist. Tendenziell treten im Sommer höhere Massenkonzentrationen auf. Auch die Quellemissionswerte weisen bis auf etwas höhere Einzelwerte im Übergang keine Unterschiede auf. Ein Vergleich mit Rind_SB ergibt etwas höhere Partikelmassenkonzentrationen und Quellemissionen als im Stall Rind_TF.

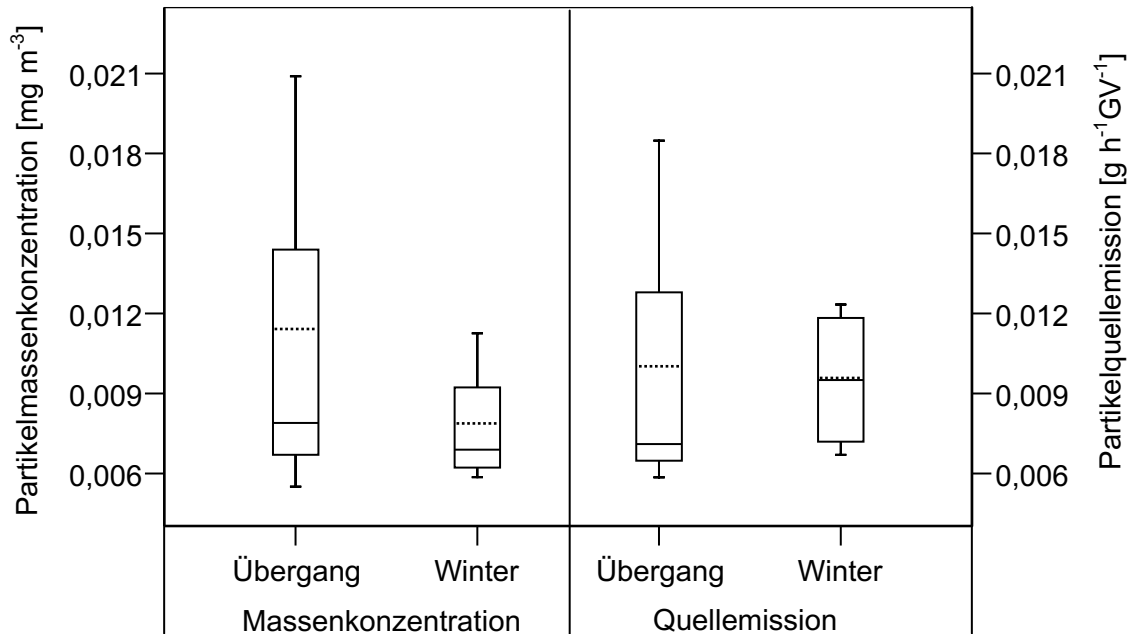


Abbildung 72: Partikelmassenkonzentration und Quellemission in Stall Rind_TF

4.5.3 Geflügelhaltung

Legehennen Käfig

Ein geringer Stichprobenumfang im Sommer führt zu sehr kleinen Schwankungen bei Partikelmassenkonzentration und Quellemission (s. Abbildung 73). Dabei sind die Hintergrundkonzentrationen nur halb so hoch wie die gemessene Konzentration in der Abluft. Die Tagesmittelwerte sind während der Übergangszeit um den Faktor 10 höher als zu Sommerbedingungen.

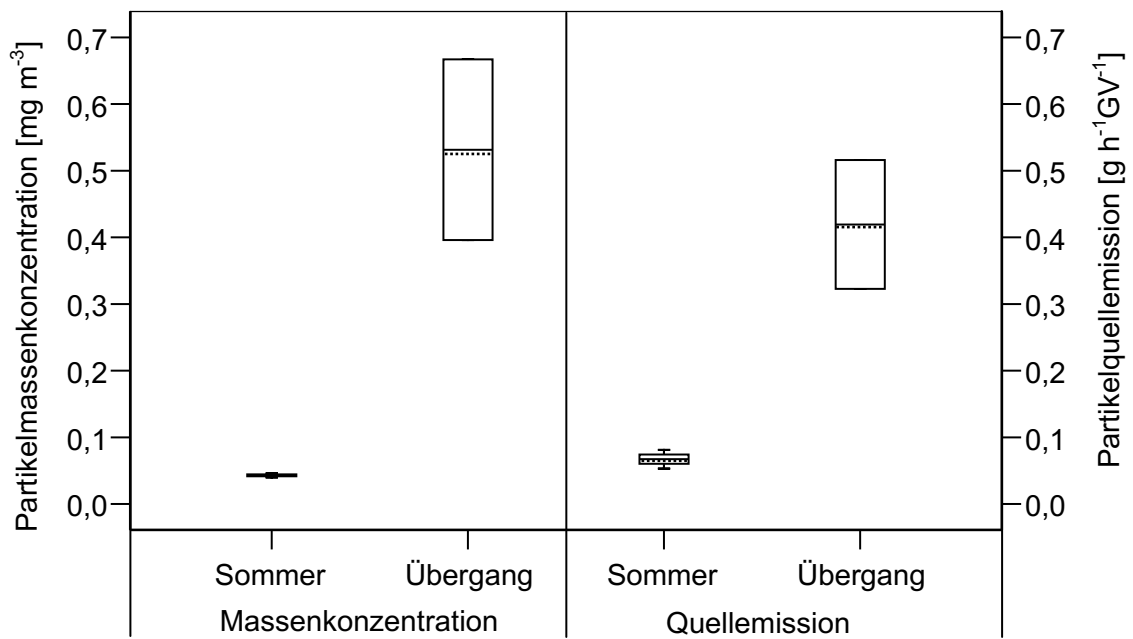


Abbildung 73: Partikelmassenkonzentration und Quellemission von Legehennen in der Käfighaltung

Legehenne Voliere

Die Ergebnisse aus der Volierenhaltung sind in Abbildung 74 dargestellt. Es konnten steigende Partikelmassenkonzentrationen und Quellemissionen festgestellt werden.

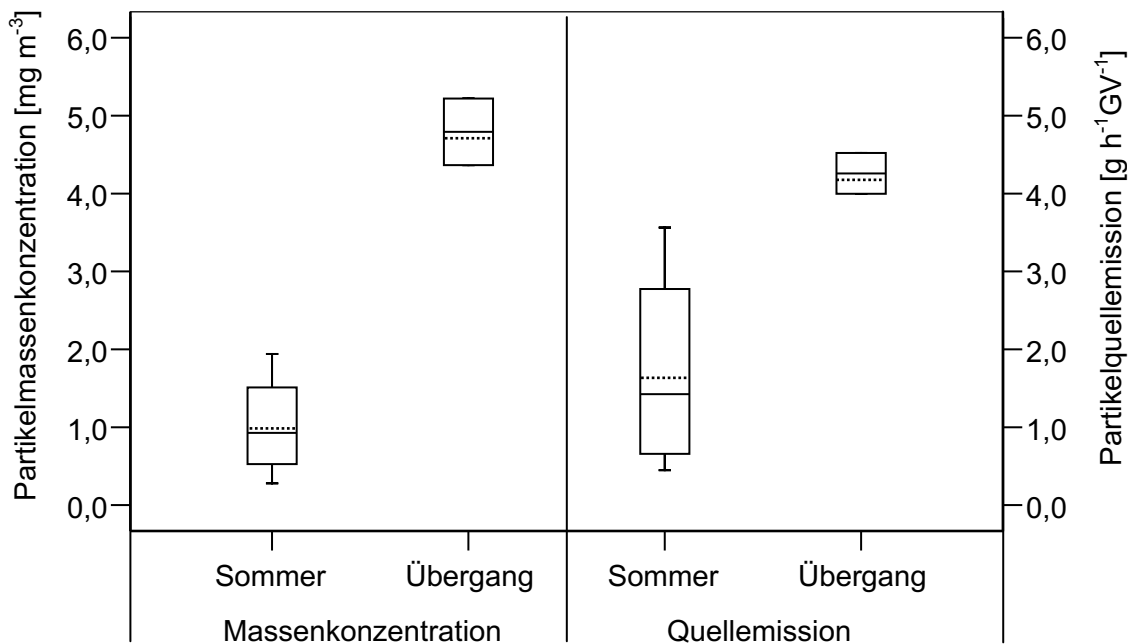


Abbildung 74: Partikelmassenkonzentration und Quellemission von Legehennen in der Volierenhaltung

Die Volierenhaltung emittiert 10-fach höheren Staubfrachten als die Käfighaltung. Die Streuung der Daten ist im Sommer höher als zu Übergangszeiten. Mediane und arithmetische Mittel liegen nahe zusammen. Die Boxplots zeigen eine gleichmäßige Streuung der Daten um den Mittelwert.

Putenmast

In Abbildung 75 sind die gemessenen Partikelkonzentrationen aller Messdurchgänge in den unterschiedlichen Jahreszeiten dargestellt. Die Verteilung der Konzentrationswerte im Sommer und im Übergang zeigen große Gemeinsamkeiten.

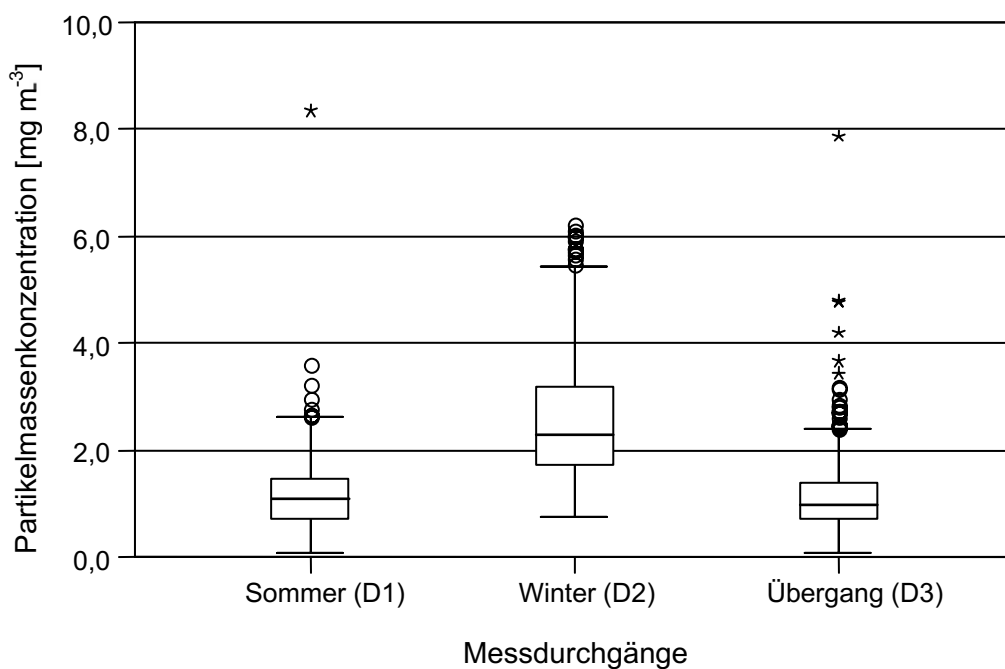


Abbildung 75: Partikelmassenkonzentration in der Putenmast (nach SCHNEIDER, T., 2006)

Demgegenüber weisen die Konzentrationswerte des Winterdurchganges eine größere Streuung auf und liegen insgesamt auf einem höheren Niveau. (SCHNEIDER, T., 2006)

Bei der Bestimmung der Partikelquellemission wurden die jeweils zugehörigen Staubkonzentrationen, gemittelt über den Messzeitraum der Luftvolumenstrombestimmung, mit dem jeweiligen Luftvolumenstrom multipliziert. Auf die Berücksichtigung der Hintergrundkonzentration wurde auf Grund der geringen Bedeutung verzichtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 76 dargestellt. Um auf saisonale Emissionsfaktoren schließen zu können, wurden verschiedene Einflüsse für die Messdurchgänge bei der Berechnung berücksichtigt. Da die Messungen meist tagsüber

stattfanden, mussten die Staubkonzentrationswerte um die Konzentrationsverläufe in der Nacht rechnerisch korrigiert werden. Für den Sommerdurchgang, in dem nachts die gleichen Lüftungseinstellungen wie tagsüber vorherrschten, wurde die durchschnittliche Tageskonzentration für die 8 Ruhestunden in der Nacht auf 17 % korrigiert auf Grundlage der Ergebnisse der Verlaufsmessungen im Sommer (nach SCHNEIDER, T., 2006).

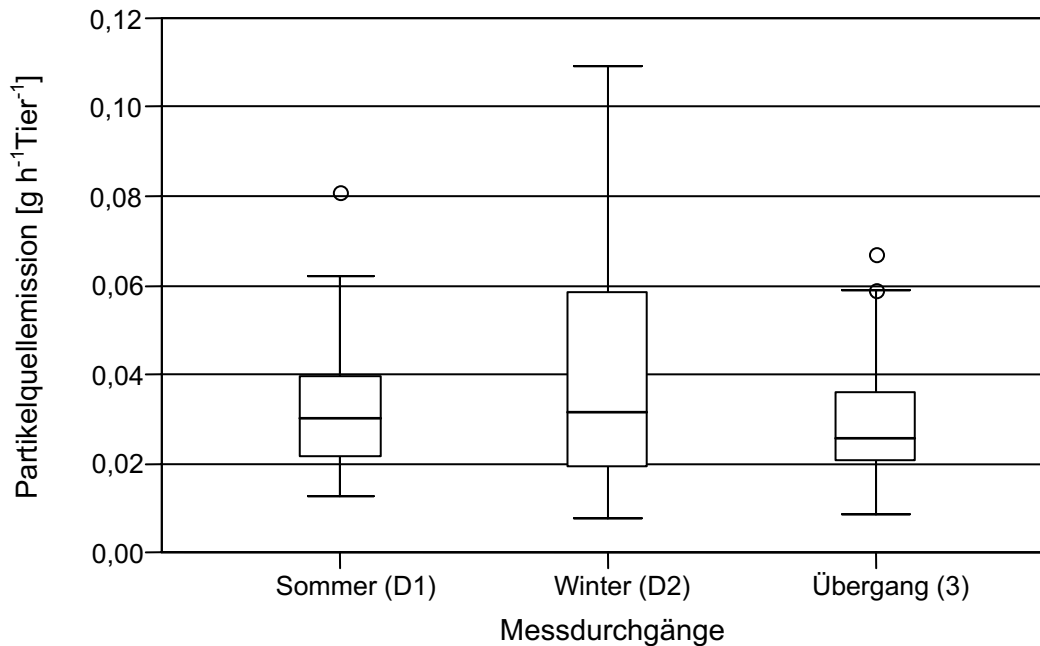


Abbildung 76: Partikelquellemission in der Putenmast (nach SCHNEIDER, T., 2006)

Werden die Lüftungseinstellungen im Winter und in der Übergangszeit beibehalten, sinkt die Staubkonzentration in der Nacht ab. Allerdings kann in den Übergangszeiten und im Winter davon ausgegangen werden, dass zeitweise die Lüftungseinstellungen, die tagsüber im Stall vorherrschen, nachts verändert werden, um den Luftvolumenstrom zu verringern und für die Tiere angenehme Temperaturen zu erhalten. Da keine Unterscheidung getroffen werden kann, wann welche Lüftungssituation vorherrscht, erfolgt die Korrektur pauschal für den Winterdurchgang auf 42 % und für den Übergangsdurchgang auf 56 % der Tageskonzentration für die achtstündige Nachtzeit. Diese Werte ergeben sich aus der Mittelwertbildung der möglichen Konzentrationsveränderungen in der Nacht für den jeweiligen Messdurchgang (nach SCHNEIDER, T., 2006).

Um den gesamten Mastzeitraum in die Betrachtung aufnehmen zu können, wurde eine lineare Anpassung an die Tagesmittelwerte der Staubkonzentration vorgenommen (Abbildung 77) und über den gesamten Mastzeitraum gemittelt.

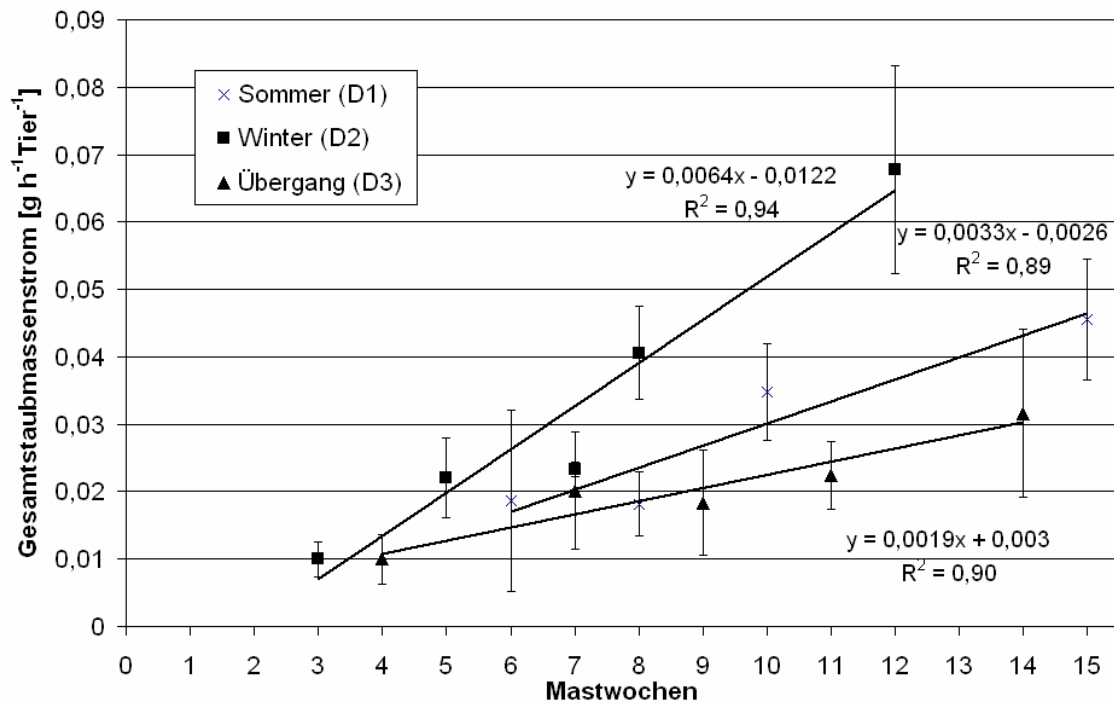


Abbildung 77: Partikelquellemission der drei Messdurchgänge mit linearer Anpassung (nach SCHNEIDER, T., 2006)

4.5.4 Abschätzung der Jahresmittel zur Partikelmassenkonzentration und Quellemission

In Tabelle 10 sind die Abschätzungen der Jahresmittelwerte von Partikelmassenkonzentrationen und Partikelquellemissionen sowie des Emissionsfaktors dargestellt. Für die Berechnung der Jahresmittelwerte sind unter hiesigen Klimabedingungen die Daten aus Sommer und Winter mit einfacher, die Daten aus dem Übergang mit doppelter Gewichtung eingegangen. Die Ermittlung des Emissionsfaktors beinhaltet die Einbeziehung der Belegungs- und der Leertage in jedem Haltungssystem. Für den Abferkelbereich und die Warteställe werden keine Wachstumskurven benötigt.

In der Schweinemast ist dafür der einzelne Durchgang in die Abschnitte Vor- und Endmast zerlegt worden. Beide Abschnitte gehen zu 50 % auf Grund gleicher Aufenthaltsdauer der Tiere in die Kalkulation ein. Der Emissionsfaktor wird in $\text{kg Jahr}^{-1}\text{GV}^{-1}$ angegeben.

In der Rinderhaltung entsprechen die berechneten Jahresmittel der Partikelmassenkonzentration der in der Zuluft gemessenen Hintergrundkonzentrationen. Deshalb ist die Angabe eines Emissionsfaktors nicht sinnvoll.

Tabelle 10: Abschätzung der Jahresmittelwerte sowie der Emissionsfaktoren

Tierart	Haltungsabschnitt	Partikel- massenkonzentration [mg m⁻³]	Partikel- quellemis- sion [g h⁻¹GV⁻¹]	Partikel- emissions- faktor [kg Jahr⁻¹GV⁻¹]
Schwein	Abferkelbereich	0,47	0,232	1,92
	Wartestall WS_SB	0,66	0,109	0,92
	Wartestall WS_AF	0,55	0,134	1,07
	Ferkelaufzucht mit Oberflurabsaugung (FA_1)	1,46	0,324	2,64
	Ferkelaufzucht mit Unterflurabsaugung (FA_2)	0,59	0,218	1,77
	Vormast ohne Einstreu	0,58	0,283	
	Vormast mit Einstreu	2,70	1,094	
	Endmast	1,03	0,207	
	Mast gesamt			2,08
Rind	Rinderstall *	0,011	0,009	-
Geflügel	Legehennen Käfig **	0,37	0,302	2,61
	Legehennen Voliere **	2,47	2,566	22,14
	Putenmast		0,98	

* entspricht im Wesentlichen der Hintergrundkonzentration

** ohne Wintermessung abzüglich 30 %, da Innenraumkonzentrationen vorliegen

Die Angaben der Jahresmittelwerte in der Legehennenhaltung beziehen sich auf Sommer- und Übergangsmessungen. Da unter Winterbedingungen niedrigere Luftvolumenströme zu erwarten sind, kann von einer Überschätzung des Partikelemissionsfaktors ausgegangen werden. Da die Messungen Partikelmassenkonzentrationen in beiden Legehennenställen im Stallinnenraum durchgeführt worden sind, wurden die Daten in Anlehnung der Veröffentlichung von SCHMITT-PAUKSZTAT et al. (2004) um 30 % reduziert.

4.5.5 Zwischenfazit zur Partikelmassenkonzentration und Quellemission

Aus dem Kapitel Partikelmassenkonzentration und Quellemission können folgende Ergebnisse zusammengefasst werden:

- In den untersuchten Rinderställen lag die Partikelemission um Faktor 10 bis 50 niedriger als in den übrigen untersuchten Haltungssystemen. Die Abluftkonzentration entspricht in den meisten Fällen der Hintergrundkonzentration.
- Die Quellemission der Legehennen in Volierenhaltung ist 10-fach höher als in der Haltung von Legehennen im Käfig.
- Unterschiedliche Abluftsysteme ergeben unterschiedliche Partikelmassenkonzentrationen und Quellemissionen bei ansonsten gleichen Haltungsbedingungen.
- Die Quellemissionen pro GV aus konventionellen Vormast- und Endmastställen sind nahezu identisch. Allerdings sind die Partikelmassenkonzentrationen in der Endmast höher als in der Vormast.
- Beim Vergleich von Vormast mit und ohne Einstreu konnte festgestellt werden, dass eingestreute Stallsysteme 4- bis 5-fach höhere Quellemissionen freisetzen als Systeme ohne Einstreu.
- In fast allen Stallsystemen der Schweinehaltung sind zu Sommer- oder Übergangsbedingungen die höchsten Quellemissionen pro GV gemessen worden. Die Partikelmassenkonzentration erreicht im Winter ihre höchsten Werte.

4.6 Tieraktivität in der Schweinemast

Die Tieraktivität ist als Einflussfaktor auf die staubförmigen Emissionen in der Schweinemast gemessen worden. Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der Tieraktivitätsmessungen in der Schweinemast dargestellt. Es handelt sich dabei um Tagesverläufe der relativen Tieraktivität. Neben den jahreszeitlichen Einflüssen ist zudem der Einfluss des Tiergewichts untersucht worden. Anschließend werden die Ergebnisse der Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Tieraktivität und Partikelquellemission beschrieben.

4.6.1 Tieraktivität – Tagesverläufe

Vormast

In Abbildung 78 sind die Tagesverläufe der Tieraktivität in der Vormast zu unterschiedlichen Jahreszeiten (Sommer und Übergang) dargestellt. Die Messpunkte sind als Halbstunden-Mittelwerte aus $n=5$ Tagen im Sommer und $n=4$ Tagen in der Übergangszeit ausgewertet worden. Die Einzelwerte beschreiben die Abweichung zum Tagesmittel, das der relativen Tieraktivität 1,00 entspricht. Die Zeiten der Tierkontrolle konnten aus dem Messprotokoll entnommen werden.

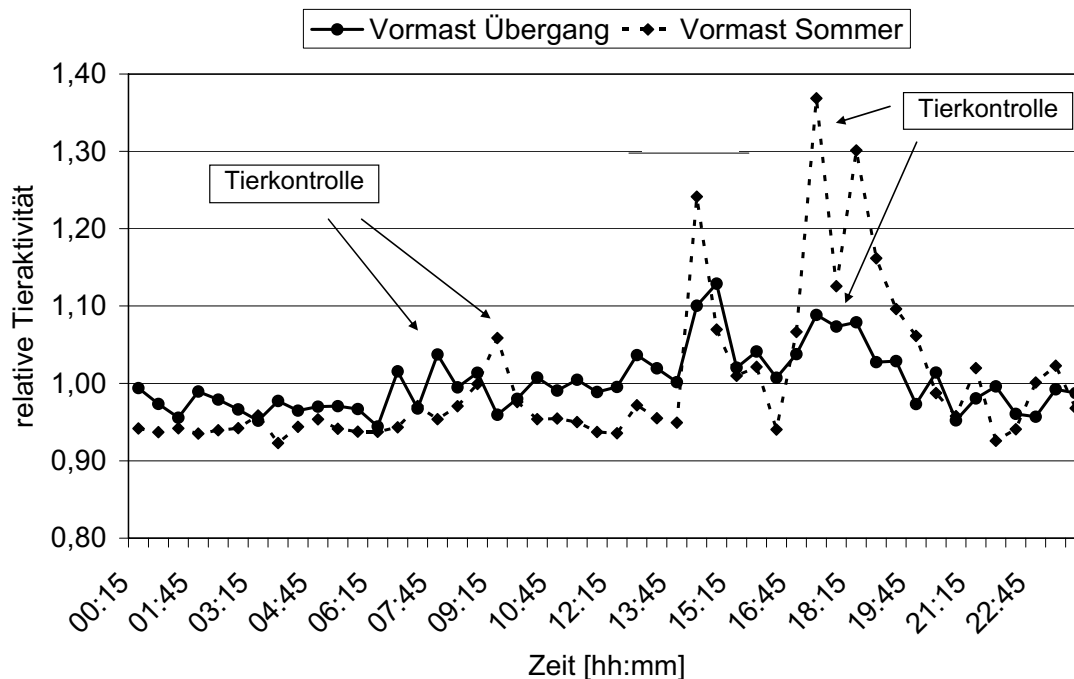


Abbildung 78: Tagesverlauf der Tieraktivität in der Vormast unter Sommer- und Übergangsbedingungen

Grundsätzlich bestehen in beiden Jahreszeiten keine großen Unterschiede im Verlauf der Tieraktivität. Die leicht höheren Abweichungen vom Tagesmittel im Sommer sind auf geringe Tiergewichte während der Messzeit zurückzuführen. Die Bestimmung des Schwankungsbereichs von Einzelwert zu Einzelwert kann als Maßzahl der Veränderung der Tieraktivität gesehen werden. Er liegt im Sommer bei 2,45 % und während der Übergangszeit bei 3,81 %.

Endmast

Die jahreszeitlichen Einflüsse der Tieraktivität sind in der Endmast erkennbar. Die geringe Wärmetoleranz schwerer Tiere führt im Winter zu stärkeren Abweichungen vom Tagesmittel als im Sommer. Des Weiteren ist der Schwankungsbereich im Winter um 21 % höher als im Sommer. Die dargestellten Tagesverläufe sind durch Mittelwertbildung von $n=4$ im Sommer und $n=3$ Messtagen berechnet worden. Selbst während der Tierkontrolle im Sommer ist keine nennenswerte Änderung der Aktivität zu erkennen. Lediglich in den Abendstunden kann diese beobachtet werden. Unter Winterbedingungen ist der Anstieg der Aktivität von 15 bis 17 Uhr nicht mit den Aufzeichnungen des Messprotokolls erklärbar.

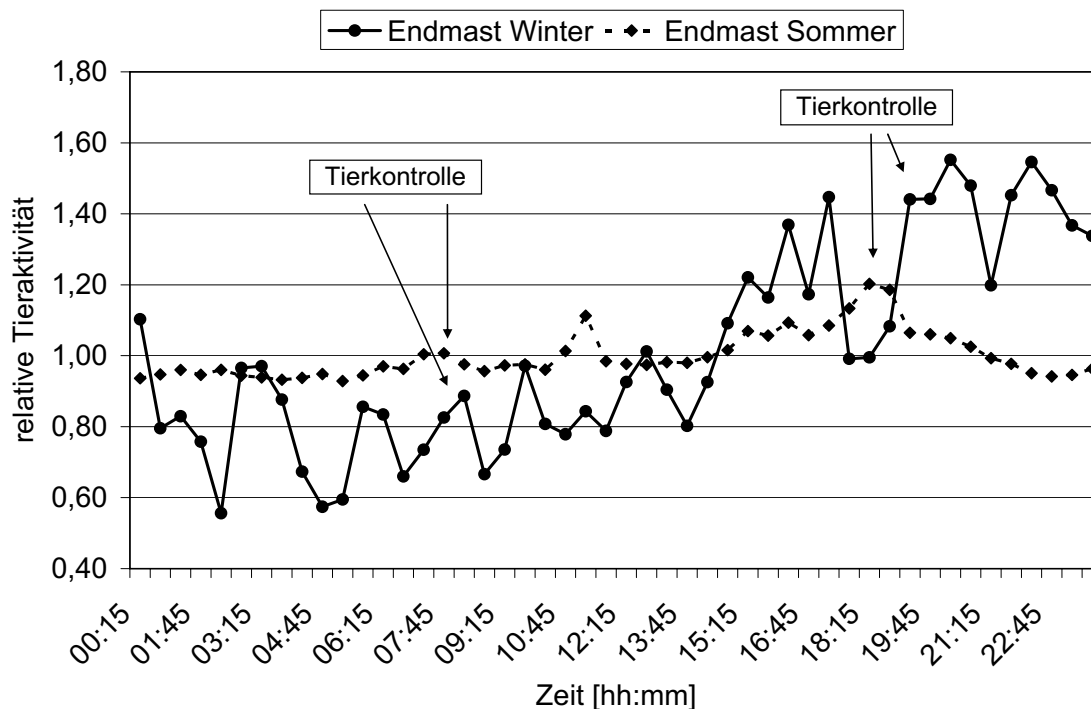


Abbildung 79: Tagesverlauf der Tieraktivität in der Endmast unter Sommer- und Winterbedingungen

Unterschiede der Haltungssysteme mit/ohne Einstreu

Während der Übergangszeit konnten sowohl im einstreulosen Stall als auch in einem mit Stroh eingestreuten Stall Tieraktivitätsmessungen durchgeführt werden. Die Tiere befanden sich in der Vormast. Der Tagesverlauf in Abbildung 80 unterscheidet sich durch einen Aktivitätsanstieg während des morgendlichen Einstreuens und der abendlichen Tierkontrolle. Beide Effekte sind auf das Management zurückzuführen. Der Betriebsleiter im eingestreuten System geht bei der Tierkontrolle direkt in den Tierbereich. In der strohlosen Variante wird vom Futtergang aus kontrolliert.

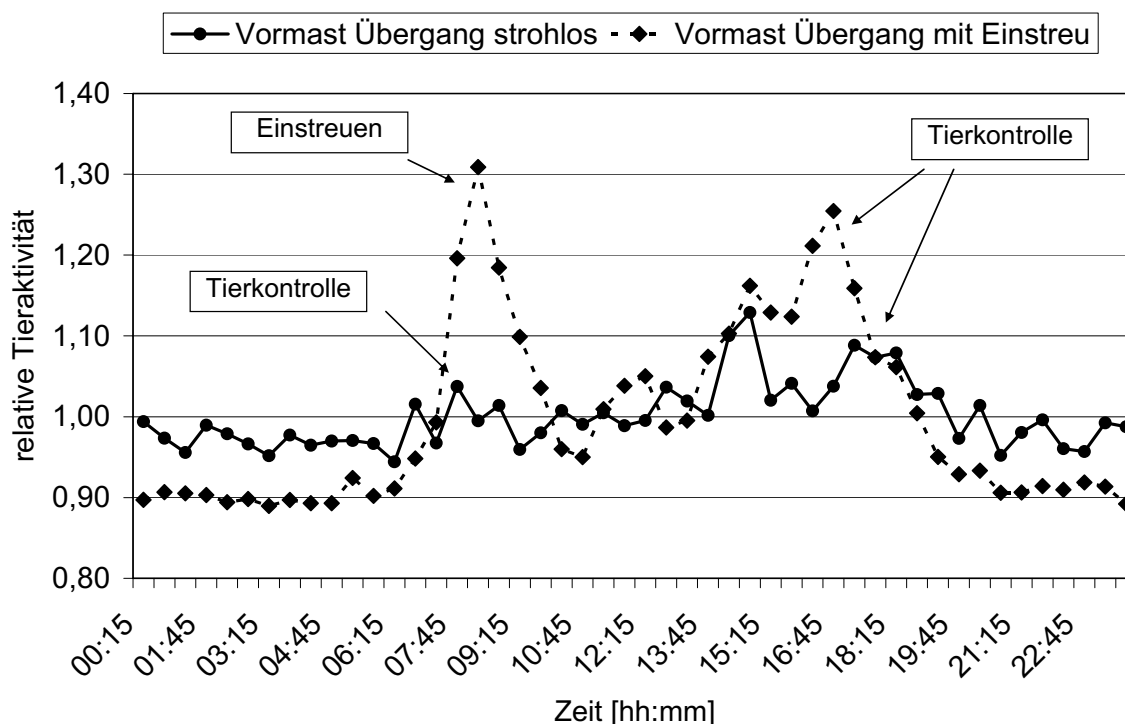


Abbildung 80: Tagesverlauf der Tieraktivität in der Vormast in eingestreuten und strohlosen Ställen

4.6.2 Tieraktivität und Quellemission

Um den Einfluss der Tieraktivität auf die Partikelmassenkonzentration im Stallinnenraum darzustellen, ist in Abbildung 81 der enge Zusammenhang zwischen beiden Faktoren zu sehen. Die Innenraumkonzentration wurde in einer Höhe von 1,2 m über den Tieren mit dem Aerosolspektrometer erfasst. Die Tieraktivität beinhaltet nur die Daten des Sensors, den die untersuchte Bucht erfassen konnte. Der Korrelationskoeffizient von $r = 0,77$ belegt die enge Beziehung von Partikeln und der Aktivität der Schweine.

Anschließend wurde eine Abschätzung der Partikelquellemission mit Hilfe der Tieraktivität durchgeführt. Dabei wurde von einem linearen Zusammenhang zwischen den Parametern ausgegangen. In unterschiedlichen Jahreszeiten und Haltungsabschnitten ergeben sich voneinander abweichende Werte.

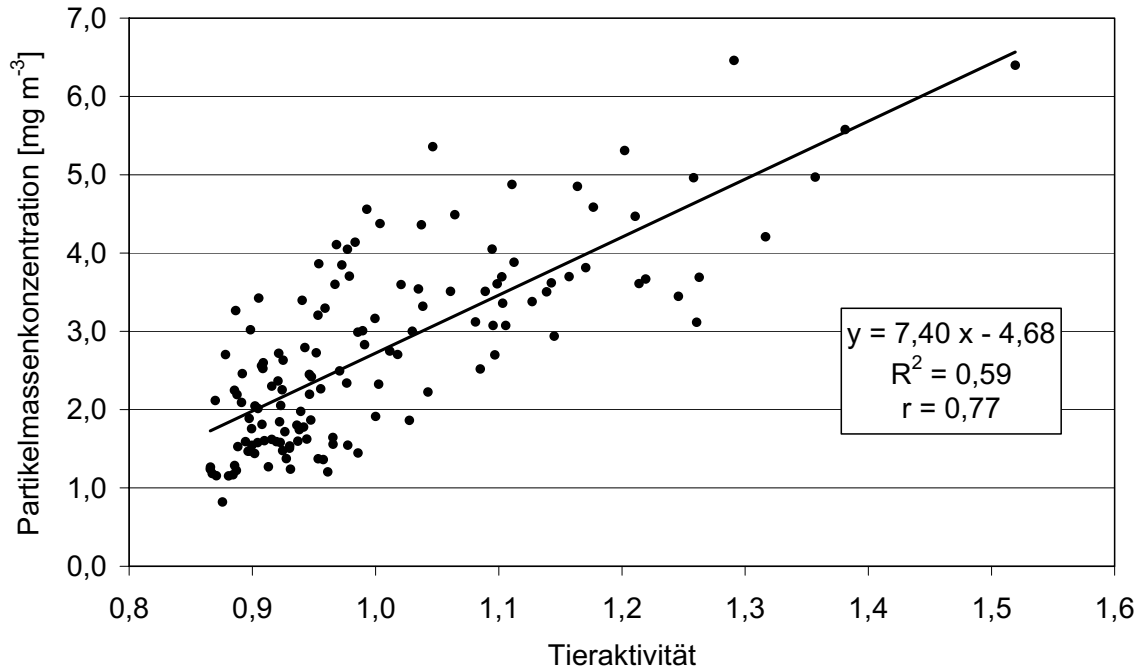


Abbildung 81: Linearer Zusammenhang zwischen Tieraktivität und Partikelmassenkonzentration im Stallinnenraum

Vormast Sommer

In der Vormast konnten vier Tagesmessungen aus dem Sommer zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Tieraktivität und Quellemission verwendet werden. In Abbildung 82 sind die Daten beider Messparameter dargestellt.

Die Partikelquellemission in $\text{g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$ als Produkt aus Partikelmassenkonzentration und Luftvolumenstrom wird somit von zwei Faktoren beeinflusst. Der Korrelationskoeffizient von $r = 0,71$ zeigt den in der Literatur beschriebenen engen Zusammenhang.

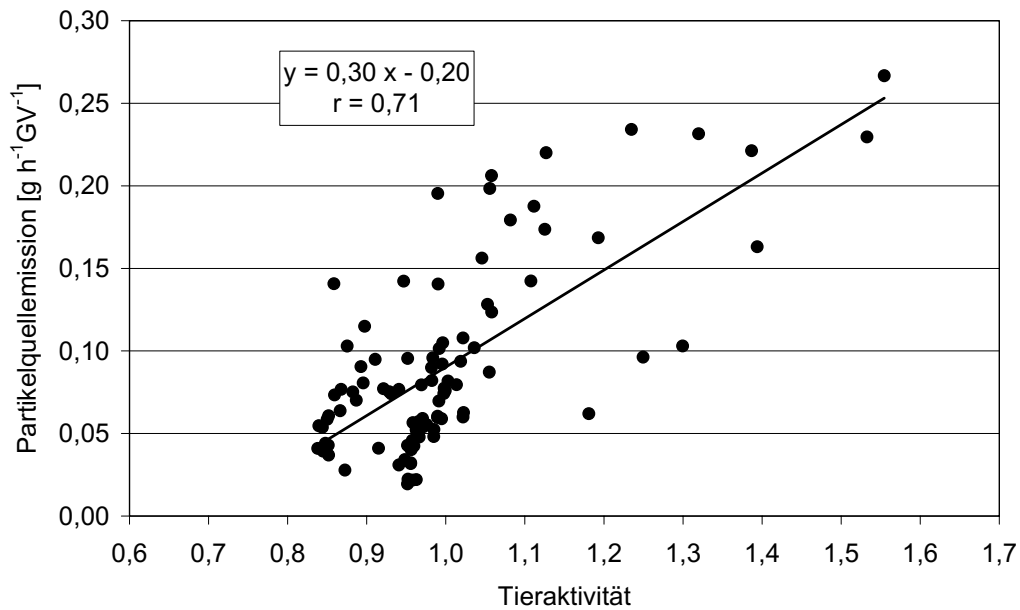


Abbildung 82: Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Vormast unter Sommerbedingungen

Vormast Übergang

Unter Übergangsbedingungen ist der Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität niedriger als im Sommer. Abbildung 83 zeigt die Punktwolke mit der Regressionsgeraden und dem Korrelationskoeffizient von $r = 0,65$.

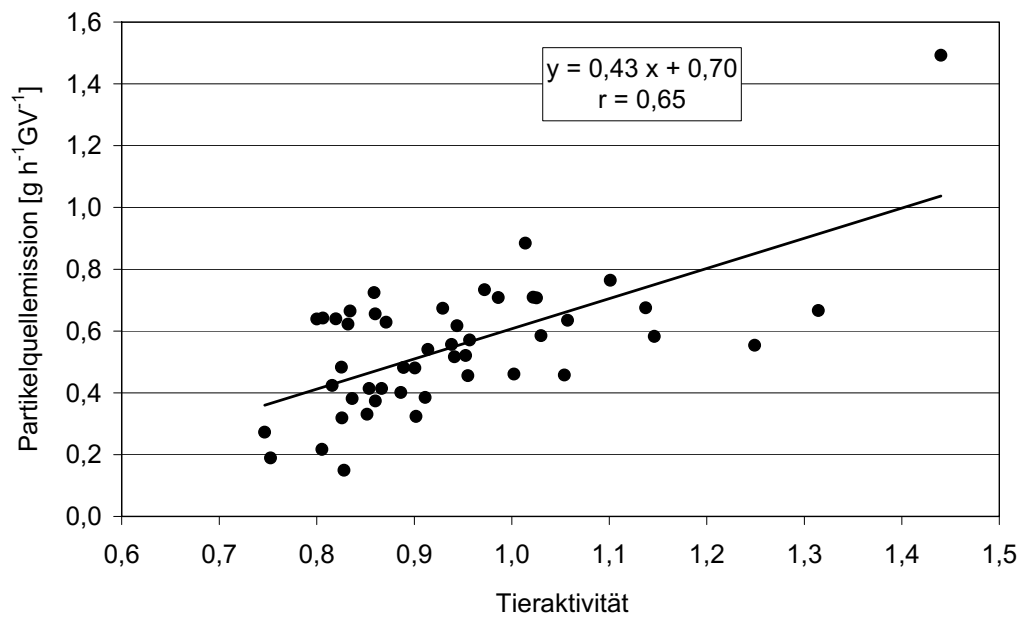


Abbildung 83: Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Vormast unter Übergangsbedingungen

Vormast Einstreu Stroh

In der mit Stroh eingestreuten Variante der Vormast wurden während des Übergangs Tieraktivitätsmessungen vorgenommen. Als Ergebnis dieser Messungen konnte ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,65$ zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität berechnet werden (s. Abbildung 84). Die Steigung der Regressionsgleichung ist höher als in der strohlosen Variante in Abbildung 83. Die Verteilung der Daten in der Punktwolke zeigt, dass sehr viele Messwerte unterhalb des relativen Mittelwertes der Tieraktivität von 1,0 bei niedrigen Partikelquellemissionen zu erkennen sind. In der strohlosen Variante sind Tieraktivitätswerte trotz gleicher Korrelationskoeffizienten gleichmäßiger verteilt.

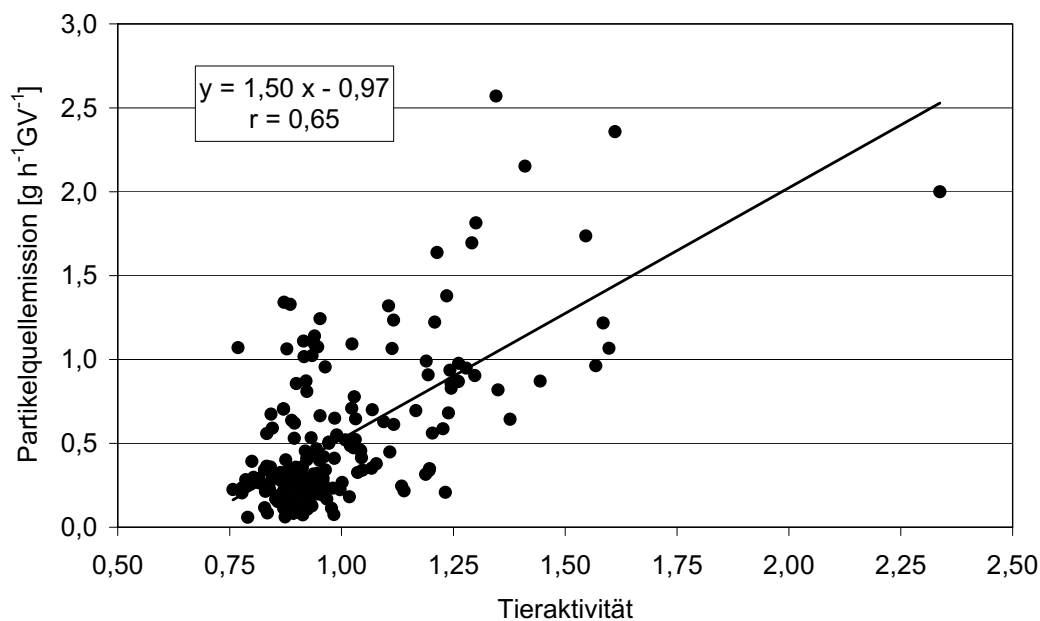


Abbildung 84: Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Vormast unter Übergangsbedingungen im eingestreuten System

Endmast Sommer

In der Endmast besteht im Sommer ein sehr enger Zusammenhang von $r = 0,81$ zwischen Partikelquellstärke und Tieraktivität wie in Abbildung 85 zu erkennen ist. Wie schon in der eingestreuten Variante der Vormast befindet sich der Großteil der Messwerte im Bereich niedriger Tieraktivität und niedriger Partikelquellemission. Die Abweichungen der Tieraktivität von deren Mittelwert sind nicht so hoch wie in den anderen Stallsystemen.

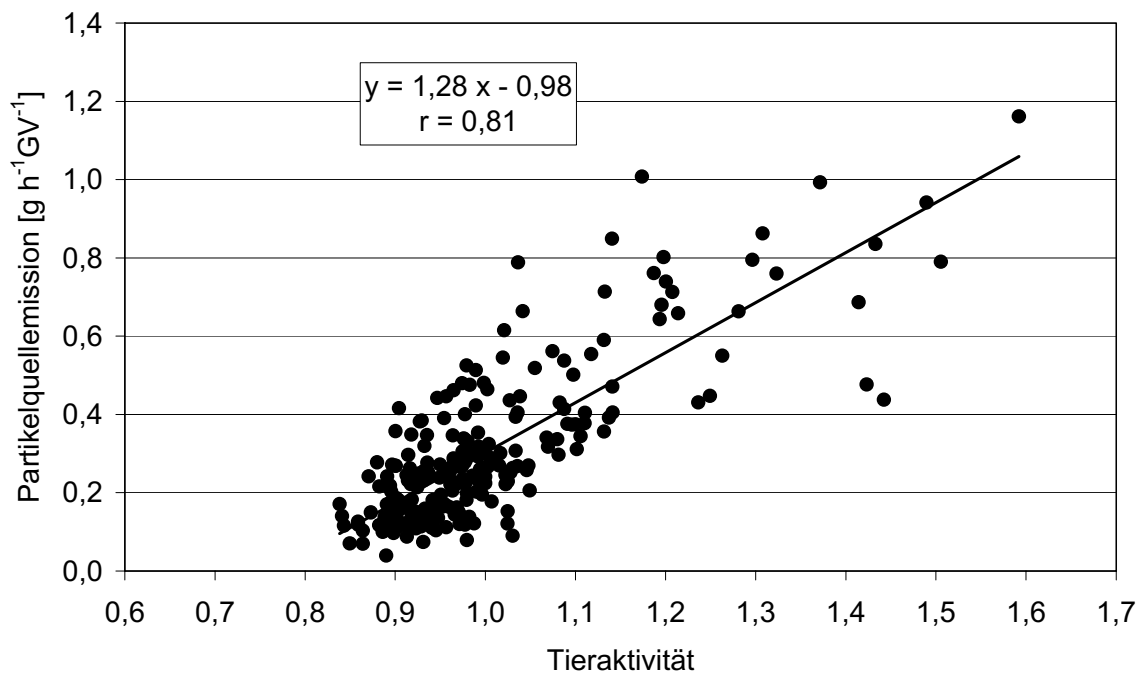


Abbildung 85: Zusammenhang zwischen Partikelmassenkonzentration und Tieraktivität in der Endmast unter Sommerbedingungen

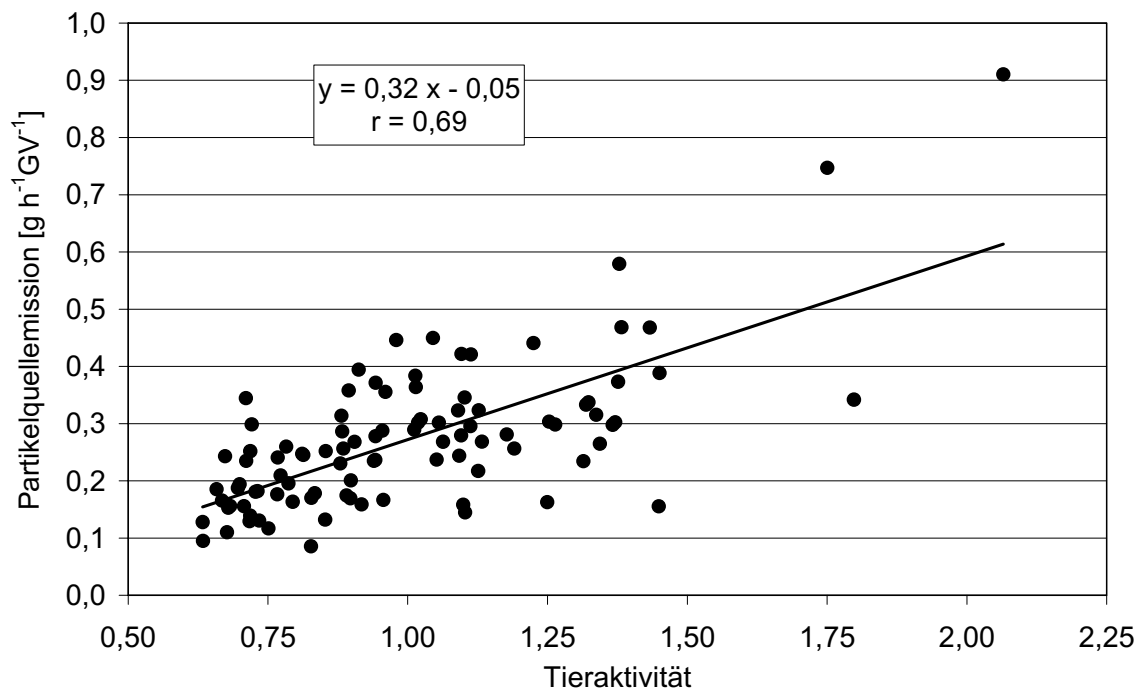


Abbildung 86: Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität in der Endmast unter Winterbedingungen

Endmast Winter

Der lineare Zusammenhang zwischen Partikelquellemission und Tieraktivität der Endmast im Winter ist in Abbildung 86 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient von $r = 0,69$ ist niedriger als unter Sommerbedingungen. Die Verteilung der Tieraktivität ist jedoch gleichmäßiger.

4.6.3 Zwischenfazit zu den Tieraktivitätsmessungen

Folgende Punkte können als Ergebnis der Tieraktivitätsmessungen festgehalten werden:

- Tieraktivität (a) und Partikelquellemission (b) stellen einen linearen, engen Zusammenhang dar.
- In der Endmast wurden höhere Korrelationskoeffizienten zwischen (a) und (b) festgestellt als in der Vormast.
- In der Vormast bestehen keine wesentlichen Unterschiede in den Tagesverläufen der Tieraktivität zu unterschiedlichen Jahreszeiten.
- Der Schwankungsbereich im Verlauf der Tieraktivität in der Endmast unter Winterbedingungen ist höher als im Sommer.
- Die Tagesverläufe der Tieraktivität im eingestreuten Haltungssystem zeigen bis auf Aktivitätsanstiege während des Einstreuens keinen Unterschied zur nicht eingestreuten Variante.
- Der Zusammenhang in der Vor- und Endmast ist im Sommer höher als im Winter oder während der Übergangszeit.
- Da in die Berechnung der Partikelquellemission der Luftvolumenstrom einfließt, existiert neben der Tieraktivität ein weiterer Einflussfaktor, der die Zusammenhänge und damit die Höhe des Korrelationskoeffizienten beeinflussen könnte.

5 Diskussion und Handlungsempfehlung

5.1 Auswahl der untersuchten Stallsysteme

Bei der Auswahl der untersuchten Ställe standen mehrere Gesichtspunkte im Vordergrund. Durch vorangehende Gespräche mit den einzelnen Landwirten wurde festgestellt, dass alle untersuchten Haltungssysteme in der KTBL-Schrift 446 (Nationaler Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren) beschrieben sind und praxisüblich betrieben werden. Das Lüftungssystem in den zwangsgelüfteten Schweineställen durfte nicht als Zentralabsaugung konzipiert sein, da eine abteilweise Erfassung des Luftvolumenstroms und der Partikelkonzentration nur durch dezentrale Abluftführung erreicht werden konnte. Dieser Umstand ermöglichte es, die Partikelmessungen in jedem Abteil an der Saugseite des Abluftventilators vorzunehmen, um einerseits eine korrekte Messung durchzuführen, andererseits die Funktionsfähigkeit des Aerosolspektrometers sicherzustellen und die gewünschte Datenqualität zu gewährleisten.

5.2 Bewertung der eingesetzten Messmethodik

5.2.1 Partikelmesstechnik

Das eingesetzte Aerosolspektrometer zeichnet sich durch eine handliche Bauart aus, ist einfach zu installieren und wartungsfreundlich. Die Ausgabe von größenabhängigen Partikelanzahlkonzentrationen ermöglichte die Betrachtung von tageszeitlichen Verläufen, sowie die Analyse von Zusammenhängen mit anderen erfassten Parametern wie Luftvolumenstrom, Luftfeuchtigkeit oder Temperatur.

Da eine direkte Bestimmung der Partikelmassenkonzentration nicht möglich ist und die bekannten Probleme bei der Umrechnung von Partikelanzahl- in Partikelmassenkonzentration in der Bestimmung von Umrechnungsfaktoren (Gravimetriefaktoren) liegen, wurde das durch SCHMITT-PAUKSZTAT (2006) publizierte Verfahren zur Bestimmung eines Quotienten aus Partikeldichte und Partikelform angewandt. In Verbindung mit einer bildanalytischen, größenabhängigen Berechnung der Partikelform wurde die Partikeldichte verschiedener Größenfraktionen bestimmt. Ohne die Betrachtung der Dichten in einzelnen Größenklassen ist die Angabe der Massenkonzentration fehlerhaft. Die herkömmliche Berechnung des Gravimetriefaktors ist nicht anzuwenden, da der geräteinterne entscheidende Umrechnungsfaktor in der Größenklasse über 20 µm nicht

bekannt ist. Ist dieser zu hoch, wird die vom Gerät berechnete Partikelmasse überschätzt. Der Quotient aus Masse im gewogenen Filter und berechneter Masse des Gerätes sinkt.

Die Richtigkeit der selbst ermittelten Massenfaktoren zur Umrechnung der Partikelanzahl in die Partikelmassenkonzentration ist durch parallele Messungen mit einem Gravimetriesammler bestätigt worden (s. Abbildung A 2 im Anhang). Da das Aerosolspektrometer die detektierten Staubpartikel gemäß ihrer Streulichtdurchmesser in 15 Größenklassen einteilt, konnten Aussagen über die Partikelverteilung, über den tageszeitlichen Verlauf der Massenkonzentration und über Zusammenhänge zwischen Partikeln und Luftvolumenstrom, Luftfeuchtigkeit oder Tieraktivität dargestellt werden. Vor allem die auftretenden Interaktionen zwischen Luftvolumenstrom und Partikelmassekonzentration haben eine wichtige Bedeutung, die in Kapitel 5.6 näher beleuchtet wird.

Während der Messungen von bis zu vier Tagen ohne Unterbrechung traten keine Probleme auf. Die isokinetische Probennahme funktionierte einwandfrei. Da die Luftgeschwindigkeiten in der Abluft während der einzelnen Messperioden keine großen Schwankungen zeigten, war ein Düsenwechsel nicht notwendig. Bei anfänglichen Testmessungen, bei denen das Aerosolspektrometer mit in die am Abluftkamin auf dem Dach angebrachte Messbox installiert wurde (s. Abbildung 42 auf Seite 63), war eine Bildung von Kondenswasser zu beobachten. Die warme Abluft mit Temperaturen von oft mehr als 25°C traf auf kühlere Umgebungsluft im Messgerät. Laut Herstellerangaben führen hohe Luftfeuchtigkeiten bei optisch arbeitenden Staubmessgeräten zu Fehlmessungen, da die Wassermoleküle als Partikel erkannt werden. Des Weiteren tritt durch die Bildung von Kondenswasser am Verbindungsschlauch zwischen isokinetischer Probensonde und Messgerät die Möglichkeit einer Ablagerung und Bindung der Partikel auf. Fehlmessungen wären die Folge gewesen. Diese Probleme konnten vermieden werden.

5.2.2 Messung des Luftvolumenstroms

Zwangsgelüftete Ställe

Die Bestimmung des Luftvolumenstroms in zwangsgelüfteten Stallsystemen mit dem Messventilator stellte sich als ein sehr einfach zu installierendes, witterungsunabhängiges und zuverlässiges System dar. Lediglich der Auf- und Abbau war bei Regen auf Grund hoher Rutschgefahr auf dem Dach nicht möglich. In der wetterfesten am Abluftkamin angebrachten Messbox konnte der Datenlogger sicher aufbewahrt werden. Neben der Speicherung der Daten des Messventilators waren Sensoren für Luftfeuchtigkeit und Temperatur zur Bestimmung der klimatischen Randbedingungen der Abluft sowie der

Außenluft angeschlossen. Aus sicherheitstechnischen Aspekten erfolgte der Messaufbau immer unter Beteiligung einer zweiten Person.

Freigelüftete Ställe

Bei der Berechnung der Luftwechselzahl nach der Abklingmethode in den freigelüfteten Rinderställen wird der exponentielle Abfall der Tracergaskonzentration gemessen. Da das relativ kleine Messintervall des EC-Detektors die Abklingkurve sehr genau beschreibt, kann der Beginn des Abklingens präziser bestimmt werden. In Arbeiten von SEIPELT (1999) konnten lediglich alle 30 Sekunden Messwerte aufgenommen werden. Bei hohen Luftwechselzahlen besteht die Abklingkurve dann nur aus etwa 10 Werten. Die ermittelten Luftwechselzahlen können nur als Stichprobenmessungen gewertet werden, da bei einem in Kapitel 3.5.2 beschriebenen Durchlauf einer Messung ein mittlerer Luftvolumenstrom über diesen Zeitraum erfasst werden kann. Der berechnete Luftvolumenstrom der einzelnen Messintervalle wurde für diesen Zeitraum als Mittelwert angesetzt und zur Kalkulation der Partikelquellemission mit den pro Minute erfassten Partikelmassenkonzentrationen verwendet.

5.3 Partikelmassenverteilung

Die Verteilung der Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentration wurde in Kapitel 4.4 in Tabelle 9 dargestellt und weiterhin durch die absolute Höhe der Partikelmassenkonzentrationen in einzelnen Größenfraktionen beschrieben. Bei einem Vergleich der Verteilung mit Literaturangaben sind bei der Partikelanzahl abweichende Werte gegenüber Ergebnissen von YODER, VAN WICKLEN (1988) und PEDERSEN (1992) festgestellt worden. Beide Autorengruppen bestimmten einen geringeren Anteil von Partikeln $< 10 \mu\text{m}$. In allen untersuchten Ställen in diesem Projekt lag der Anteil der Partikelanzahlkonzentration in dieser Fraktion jedoch bei über 97 % gegenüber den Literaturwerten von 84 bzw. 94 %. Dabei sollte bedacht werden, dass die eigenen Untersuchungen im Abluftstrom durchgeführt wurden. SCHMITT-PAUKSZTAT et al. (2004) stellte deutliche Unterschiede zwischen der Partikelanzahlkonzentration im Raum und in der Abluft fest, die hauptsächlich durch weniger große Partikel in der Abluft belegt werden konnten. Der Ort der Probennahme in den oben erwähnten Publikationen war nicht ersichtlich.

Die von AARNINK et al. (1999) publizierte Verteilung der Massenanteile für Schweine konnte nur z.T. bestätigt werden, da innerhalb der Tierart Schwein sehr große Schwankungen in Abhängigkeit des Haltungssystems und des Handlungsabschnitts bestimmt werden konnten.

Bei der Ausbreitungssimulation von partikelförmigen Emissionen können die Partikelverteilungen in Verbindung mit tageszeitlichen Verläufen eingehen. Wird von der Messmethodik der Partikelzählung ausgegangen, so kann mit Hilfe der in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse ein „Ablaufplan“ erstellt werden, der von der Partikelanzahl bis zur größen- und zeitabhängigen Quellemission reicht.

1. Massenfaktor zur Umrechnung von der Partikelanzahl- auf die Partikelmassenkonzentration:
 - a. durch Angabe tierartspezifischer, von der Größe abhängige Partikeldichten
 - b. durch Angabe von größenabhängigen Sedimentationsfaktoren
 - c. durch Angabe von größenabhängigen Partikelmassenkonzentrationen unter Beachtung tageszeitlicher und jahreszeitlicher Schwankungen
2. Erfassung des Luftvolumenstroms für zwangsgelüftete und freigelüftete Stallanlagen
3. Bestimmung einer Quellemission in Abhängigkeit eines Zeitfensters für verschiedene standardisierte Tierhaltungsverfahren

5.4 Einflüsse von Luftvolumenstrom und Tieraktivität auf die partikelförmigen Emissionen

Das Zusammenwirken von Tieraktivität und Luftvolumenstrom bestimmt die Höhe der Partikelmassenkonzentration. Der Luftvolumenstrom wird bei der Berechnung der Quellemission ein zweites Mal benötigt. Im folgenden Kapitel werden beide Parameter verglichen und Abhängigkeiten dargestellt.

5.4.1 Zwangsgelüftete Ställe

Vor allem in den zwangsgelüfteten Ställen kann der Luftvolumenstrom als Maßzahl für sich ändernde Klimabedingungen angenommen werden. Unter Winterbedingungen mit niedrigen Tag-Nacht-Schwankungen sind kaum Volumenstromänderungen festzustellen. Bei stärkeren Veränderungen der Außentemperatur während des Übergangs findet eine Anpassung des Luftvolumenstroms statt, damit die eingestellte Solltemperatur konstant gehalten werden kann (s. Abbildung 87). Im Sommer wird über einen längeren Zeitraum die maximale Luftrate erreicht. Ohne geeignete Kühlsysteme kann die eingestellte Solltemperatur dann nicht mehr eingehalten werden. Die Ausprägung in den verschiedenen Jahreszeiten hängt hauptsächlich von der Stallbelegung und Tierart ab.

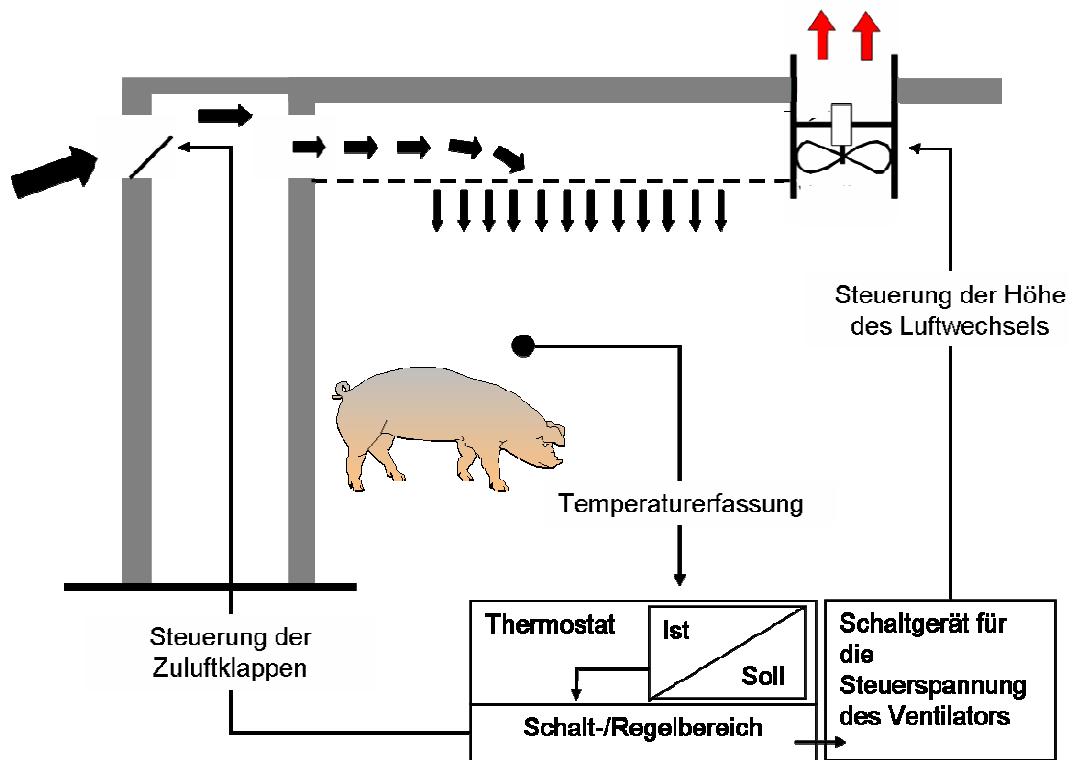


Abbildung 87: Steuerung des Luftwechsels in einem zwangsgelüfteten Stallsystem

Ein weiterer Grund für die Erhöhung der Stallinnentemperatur und damit der Lüfrate ist die Tieraktivität. Die Tiere produzieren durch Bewegung Wärme, die fortgelüftet werden muss. Der angenommene Verdünnungseffekt bei steigendem Luftvolumenstrom (WANG et al., 2000; TAKAI et al., 1998) konnte nicht in allen Systemen bestätigt werden. Tierartspezifische Unterschiede spielen eine große Rolle. Während Sauen und Endmastschweine in den Sommermonaten geringere Tieraktivität aufweisen als in den kühleren Jahreszeiten, zeigen die Tiere in der Ferkelaufzucht und Vormast dieses Verhalten nicht.

Die Untersuchung der Stallinnenraumkonzentration und ein Vergleich mit der Abluftkonzentration konnten hier Aufschluss geben. Dazu wurde der Luftvolumenstrom in drei Stufen eingeteilt. Es erfolgte eine gleichzeitige Messung der Partikelanzahlkonzentrationen im Stallinnenraum und in der Abluft. Die Abbildungen 86 und 87 zeigen die Konzentrationsverhältnisse in den verschiedenen Größenklassen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Luftvolumenströmen in Relation zur niedrigsten Klasse der Lüfrate von 3.000 bis 3.400 m³h⁻¹. Im Stallinnenraum ist bei steigendem Luftvolumenstrom eine Erhöhung der Anzahlkonzentration ab einem Partikeldurchmesser von 10 µm festzustellen.

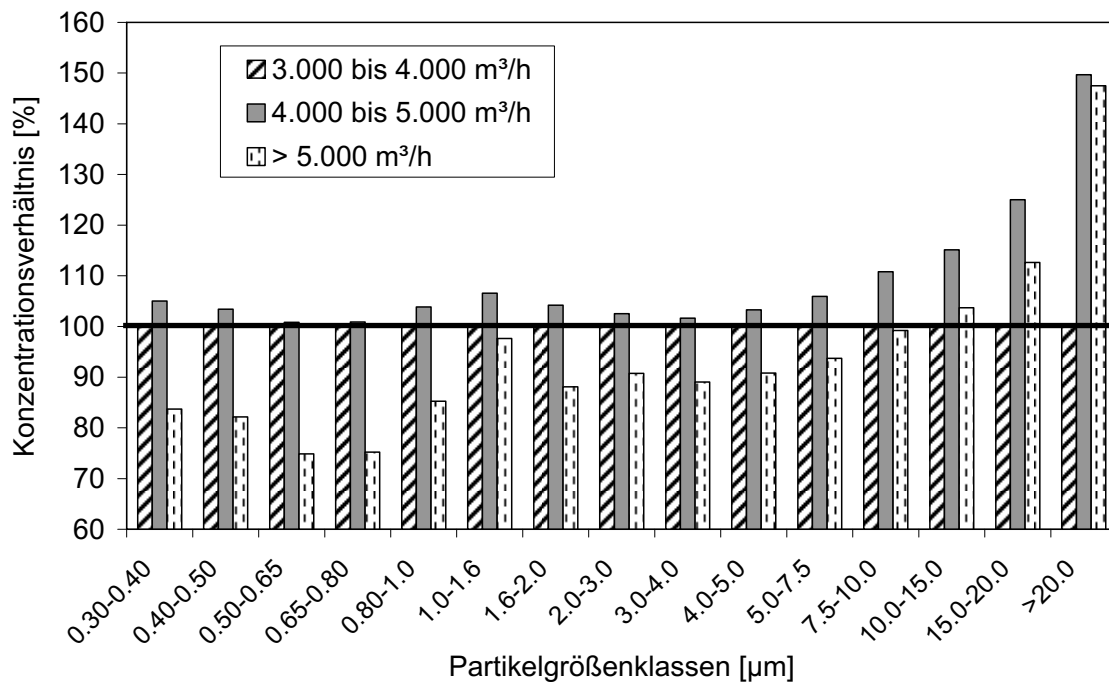


Abbildung 88: Verhältnis der Partikelgrößenfraktionen, gemessen im Stallinnenraum in einer Höhe von 1,2 m bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen, in Relation zur Luftrate 3.000 bis 3.400 m³h⁻¹ (=100%)

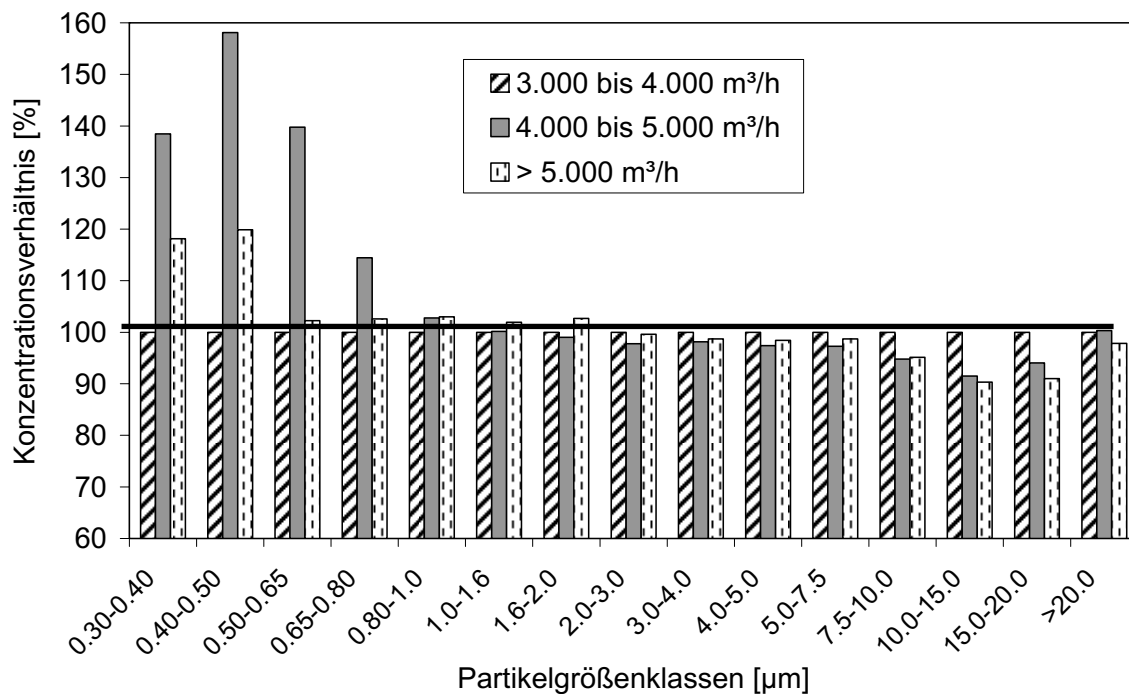


Abbildung 89: Verhältnis der Partikelgrößenfraktionen, gemessen in der Abluft bei unterschiedlichen Luftvolumenströmen, in Relation zur Luftrate 3.000 bis 3.400 m³h⁻¹ (=100%)

Durch einen Vergleich der Zeitfenster hohen Luftvolumenstroms und hoher Partikelanzahlkonzentration wurde belegt, dass während dieser Zeit die mit passiven Infrarot-Sensoren gemessene Tieraktivität sehr hoch war. Das führt zu einem geringen Verdünnungseffekt großer Partikel in der Abluft, der in Abbildung 89 zu erkennen ist. Eine systematische Analyse ist jedoch nicht möglich, da die bestimmenden Parameter Luftvolumenstrom und Tieraktivität starken Interaktionen unterworfen sind.

5.4.2 Freigelüftete Ställe

In den freigelüfteten Stallsystemen wurde entgegen der Erwartungen im Winter ein höherer Luftvolumenstrom festgestellt als in den Sommer- und Übergangsmonaten. Nach SCHNEIDER, T. (2006) hat im Sommer die Windrichtung den größten Einfluss auf den Luftvolumenstrom. Da während der gesamten Messungen die Windrichtung im Wesentlichen konstant war, rückten die Faktoren Windrichtung, Thermik und Öffnungsflächen der Ställe in den Vordergrund. In Stall Rind_TF wurden von April bis Oktober einige der Glasbausteine aus den Seitenwänden entfernt, um den Effekt der Querlüftung auszunutzen und damit die Luftrate zu erhöhen. Da an den Seitenwänden die Eindosierung des Tracergas-Gemisches erfolgte, konnte nicht quantifiziert werden, ob die Querlüftung so stark war, dass die Seiten des Stalls auch als Abluftfläche genutzt wurden. Nebelproben zeigten, dass die Luft an der vom Wind abgewandten Seite weder durchgehend in den Stall hinein noch aus dem Gebäude heraus strömte. Des Weiteren war das Tor zum Befahren des Futtertisches von März bis Oktober geöffnet, so dass auch dort mit einem Ein- und Ausströmen von Luft gerechnet werden konnte. Nur wenn über die Seitenwände und Tore ein höherer Luftwechsel als über den First erfolgt, kann der Luftvolumenstrom unterschätzt werden. Die Luftwechsellmessung basiert auf dem Abklingen und nicht auf der absoluten Höhe der Tracergaskonzentration.

Im Stall Rind_SB dagegen gab es im Laufe der Messungen keine Veränderungen in der Öffnungsfläche des Stalles. Jedoch stiegen auch hier die Luftraten im Winter an. Als weiteren Parameter der Luftrate kann somit die Thermik bzw. die Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Innenluft gesehen werden. Da laut SCHNEIDER, T. (2006) eine wechselseitige Beziehung zwischen Temperaturdifferenz und Luftwechsel besteht, müsste für eine weitere Betrachtung die Außentemperatur in die Auswertung einbezogen werden.

5.5 Einfluss von Haltung und Management auf die Luftqualität

In den Ergebnissen aus dem Schweine-Vormaststall mit Einstreu war ein deutlicher Unterschied in der Höhe der Partikelmassenkonzentrationen in der Abluft im Vergleich zu strohlosen Systemen zu erkennen (s. Abbildung 69, Seite 89).

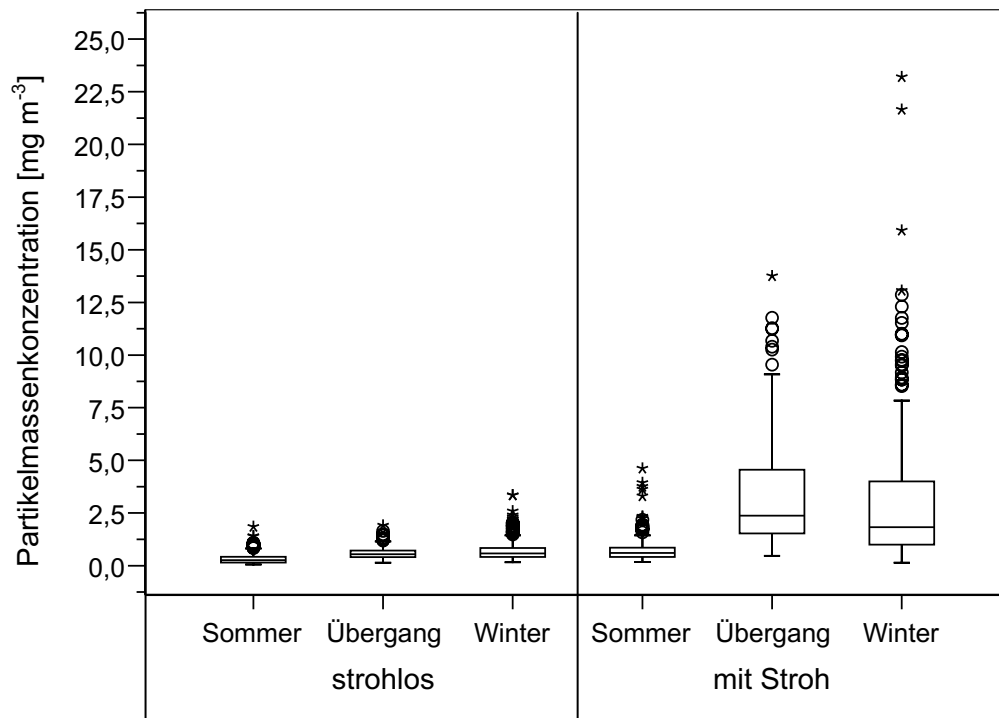


Abbildung 90: Durchschnittliche Abluft-Partikelmassenkonzentration auf Basis von Halbstundenmittelwerten bei strohloser und eingestreuter Haltung in der Vormast

Abbildung 90 zeigt, dass die Streuung der Partikelkonzentration in der eingestreuten Variante sehr hoch ist. Einige Halbstundenmittelwerte im Winter überschreiten sogar den Grenzwert der TA-Luft von 20 mg m^{-3} . Die Zapfentränken sind im eingestreuten Bereich installiert. Dies kann eine höhere Feuchte der Mistmatratze erzeugen, die in der Vormast jedoch nicht festgestellt werden konnte. Das Strohmanagement hat durch tägliches Einstreuen von Stroh mit guter Qualität funktioniert. Zapfentränken im Trog reduzieren in Abhängigkeit von ihrer Nutzung durch die Schweine die Partikelfreisetzung (PEARSON, SHARPLES, 1995). Da in der eingestreuten Variante das Futter aus dem Fallrohr der Seilkettenförderanlage Kontakt in freiem Fall zur Stallluft hat, ist zum Einen von einer erhöhten Partikelfreisetzung der Fütterung auszugehen, zum Anderen gelangt durch das Einstreuen selbst ein hoher Partikelanteil in die Umgebungsluft.

Neben der Einstreu bestimmt das Management die Lüftungseinstellungen der zwangsgelüfteten Stallsysteme. An Lüftungscomputer werden bestimmte Anforderungen gestellt. Sie sollen mindestens die eingestellte Solltemperatur in Abhängigkeit der Gewichtsentwicklung der Tiere anpassen und dabei Zuluftelemente entsprechend dem Luftvolumenstrom steuern können. Eine Speicherung der Messdaten für einen späteren Abruf gehört ebenfalls zu den Anforderungen (JUNGBLUTH, et al., 2005). Dem Landwirt obliegt die Aufgabe, die Lüftungskurven einzugeben und Bandbreiten für die Regelung festzulegen wie z.B. die Mindestlufrate oder die Solltemperatur. Richtwerte lassen sich aus der DIN 18910 ableiten. Die unterschiedlich hohen Partikelmassenkonzentrationen und Quellemission in Stallsystemen mit gleichen Haltungsbedingungen sind u.a. Folgen des Managements.

In den frei gelüfteten Rinderställen führen die alltäglichen Arbeiten wie Fütterung, Eintreuen und Melken zu einem Anstieg der Partikelmassenkonzentration. In Abbildung 91 ist der tageszeitliche Verlauf der Partikelmassenkonzentration im Stall Rind_SB dargestellt. Die Grafik zeigt, dass jeweils zu den Melk- und Fütterungszeiten die Massenkonzentrationen ansteigen. Aus Abbildung 71 auf Seite 91 geht hervor, dass unter Sommer- und Übergangsbedingungen gleich hohe Partikelmassenkonzentrationen mit hohem Streuungsmaß vorliegen.

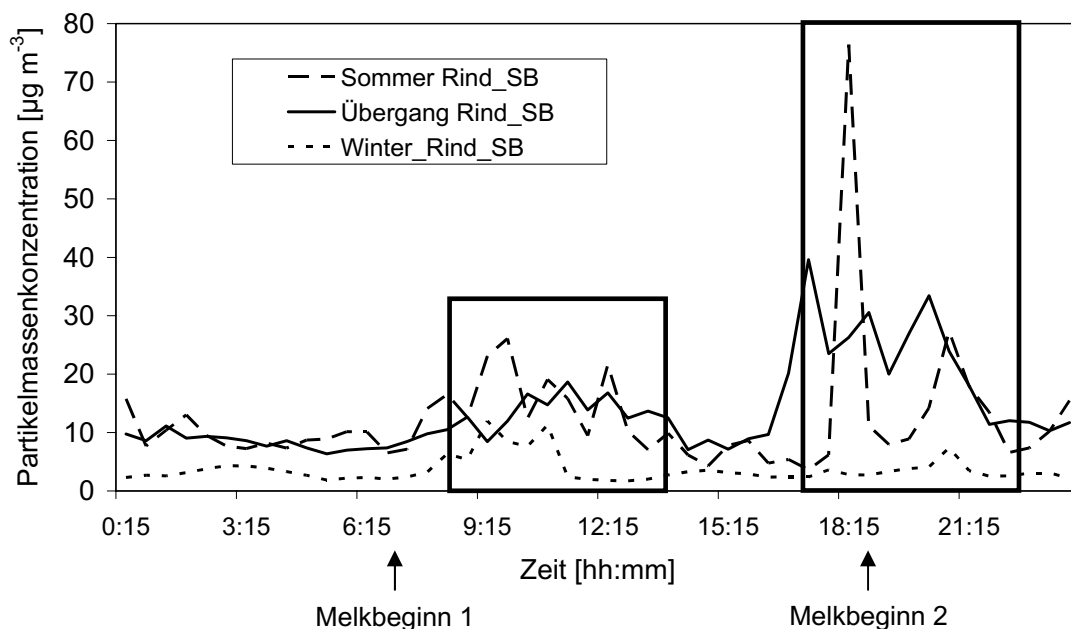


Abbildung 91: Tageszeitlicher Verlauf der Partikelmassenkonzentration im Stall Rind_SB zu verschiedenen Jahreszeiten

Im Winter dagegen ist die Massenkonzentration niedriger und zeigt einen deutlich geringeren Schwankungsbereich, da die Verlaufskurve während der abendlichen Fütterung und Melkarbeit nicht steigt (s. rechtes Zeitfenster in Abbildung 91). Nachweisliche Gründe dafür können nicht angegeben werden. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass unter Winterbedingungen die relative Luftfeuchtigkeit nahezu 100 % ist. Unter diesen Bedingungen kann sich kaum Staub bilden.

Das linke Zeitfenster kennzeichnet die Fütterungszeit nach dem morgendlichen Melken, das um 6.30 Uhr beginnt. Eine Erhöhung der Partikelmassenkonzentration ist zu erkennen, die durch beobachtetes Spielen der Kühe mit dem frisch vorgelegten Futter zu erklären ist. Abbildung 92 zeigt diesen Vorgang.

Eine Steuerung des Luftvolumenstroms konnte nur in Stall Rind_TF (Trauf-First-Lüftung) indirekt durch den Ausbau der Glasbausteine erreicht werden. Von einer gezielten Steuerung kann jedoch nicht die Rede sein.

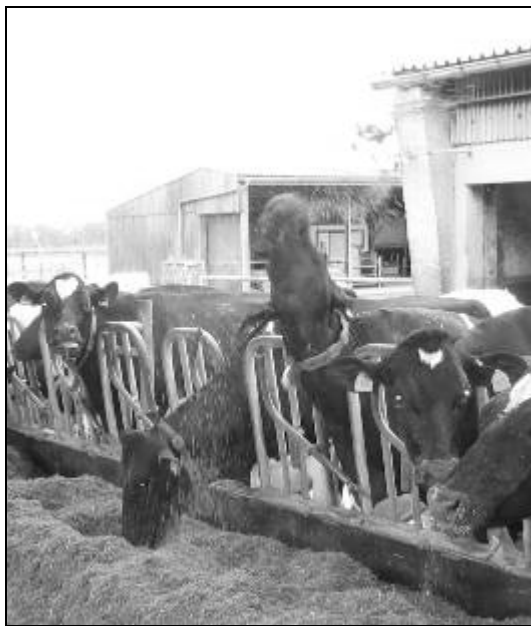


Abbildung 92: Partikelfreisetzung beim Spielen der Kuh mit Futter

In der vorliegenden Arbeit sind in der Ferkelaufzucht und in der Haltung von Wartesauen jeweils zwei unterschiedliche Systeme hinsichtlich der partikelförmigen Emissionen untersucht worden. Da in beiden Handlungsabschnitten Unterschiede in der Höhe von Partikelmassenkonzentration und Quellemission vorliegen, werden hier mögliche Ursachen diskutiert.

Oberflur- und Unterflurabsaugung in der Ferkelaufzucht

Bei der Bewertung von Oberflur- und Unterflurabsaugung bezüglich der umweltrelevanten Emissionen wird in der Literatur über Geruch und Ammoniak berichtet. In Stallsystemen mit Unterflurabsaugung ist die NH_3 -Konzentration im Stallinnenraum geringer. Die Qualität der Stallinnenluft steigt (JUNGBLUTH et al., 2005). Die Luftströme im Stall lassen die Vermutung zu, dass große Teile der Partikel gar nicht erst in den Atembereich der Tiere und des Landwirts gelangen. Die zu allen Jahreszeiten niedrigeren Partikelmassenkonzentrationen in der Variante mit Unterflurabsaugung (FA_2) ergeben sich aus dem Anteil der Abluft, der hier unterhalb des Spaltenbodens abgesaugt wird. Nur im Winter ist eine ausschließliche Unterflurabsaugung gegeben, die die Partikelemission drastisch senkt. Weitere Untersuchungen der Innenraumkonzentration müssen zeigen, ob durch die Absaugung unterhalb des Spaltenbodens „am Ort des Geschehens“ nicht nur eine Absenkung der Quellemission sondern auch eine Verbesserung der Stallluft zu erwarten ist.

Wartestall: Abruffütterung, Selbstfangbuchten

Zwischen den unterschiedlichen Varianten in der Haltung von Wartesauen zeigen sich leichte Abweichungen in der Höhe der Massenkonzentration. Die täglich zweimalige manuelle Futtervorlage erhöht zeitweise die Partikelmassenkonzentration. Durch ein insgesamt höheres Niveau der Konzentration bei der Abruffütterung durch ständigen Tierverkehr an der Abrufstation ist die Abweichung zu erklären (s. Abbildung 93).

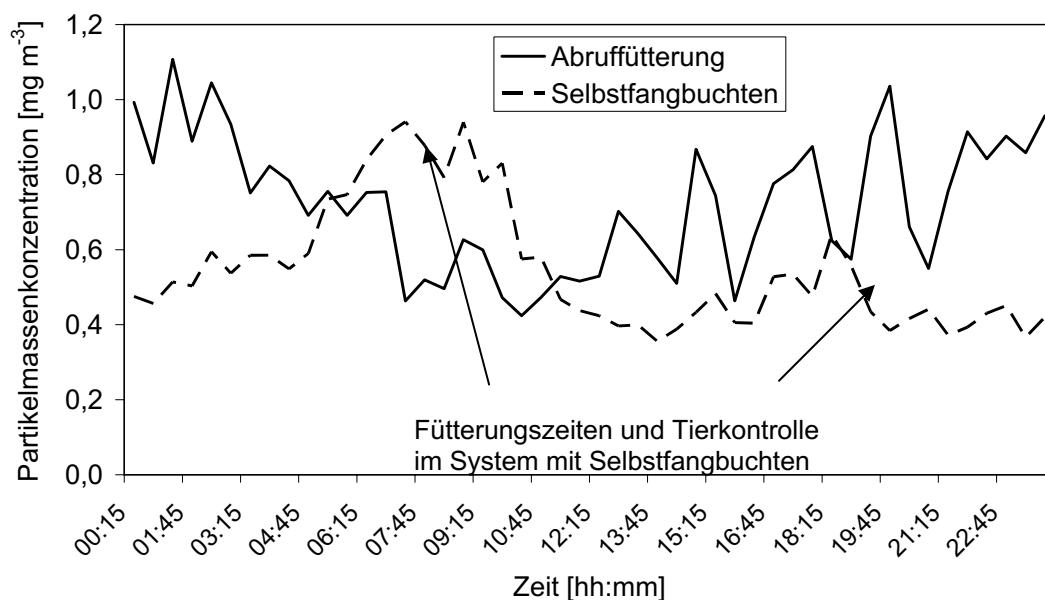


Abbildung 93: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration bei Wartesauen in Abhängigkeit der Haltungssysteme Abruffütterung und manuelle Fütterung mit Selbstfangbuchten

5.6 Zeitliche Auflösung der Messung

In Kapitel 4.2.1 wurde die Notwendigkeit einer Auswertung auf Basis der 24-Stundenmessung dargestellt. Für die Bestimmung des Tagesmittelwertes ist jedoch die zeitliche Auflösung des Aerosolspektrometers von großer Bedeutung. Anhand der Untersuchungen in Schweinemastabteil EM_1 ist festgestellt worden, dass die Berechnung der Partikelquellemission auf Basis von Halbstundenmittelwerten andere Ergebnisse liefert als eine Berechnung durch Multiplikation der Tagesmittelwerte von Luftvolumenstrom und Partikelmassenkonzentration. Dabei spielen die Faktoren Luftvolumenstrom, Tieraktivität und Luftfeuchtigkeit eine wesentliche Rolle. Abbildung 94 zeigt beide Möglichkeiten zur Berechnung der Quellemission. Als Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse kann zunächst der Luftvolumenstrom herangezogen werden. Die Darstellung der durchschnittlichen Tagesverläufe des Luftvolumenstroms in den drei Jahreszeiten ist in Abbildung 95 zu erkennen. Während im Winter nur sehr geringe tageszeitliche Schwankungen vorhanden sind, steigt der Luftvolumenstrom in den Sommer- und Übergangsmonaten ab 11 Uhr auf das 1,5-fache der Werte in der Nacht an. Ab 21 Uhr sinkt die Kurve wieder ab.

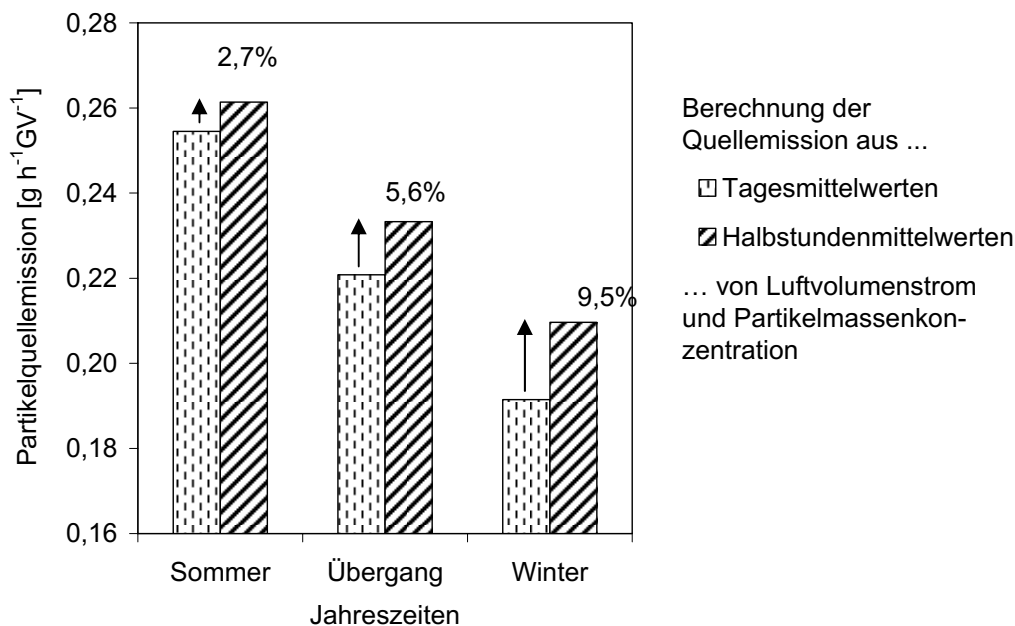


Abbildung 94: Vergleich der Berechnung der Partikelquellemission aus Tagesmittelwerten oder Halbstundenmittelwerten von Luftvolumenstrom und Partikelmassenkonzentration am Beispiel der Rohdaten aus der Endmast

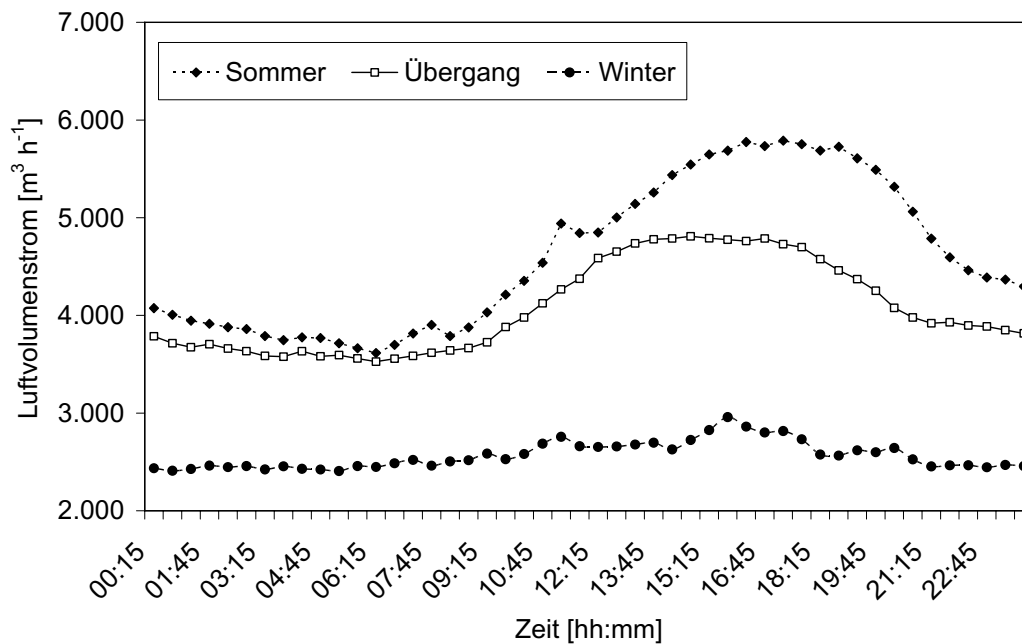


Abbildung 95: Durchschnittlicher jahreszeitlicher Tagesverlauf des Luftvolumenstroms in der Endmast

Anhand der Abbildungen auf den folgenden Seiten können die Abweichungen wie folgt erklärt werden. Unter Sommerbedingungen beschreiben die Tagesverläufe von Luftrate und Tieraktivität ($r = 0,81$), sowie Luftrate und Partikelmassenkonzentration ($r = 0,32$) einen engeren Zusammenhang als unter Übergangs- oder Winterbedingungen. Die Betrachtung des Verlaufs der Luftfeuchtigkeit in der Abluft unterstützt die Zusammenhänge. BUTERA et al. (1991) stellten eine feuchtebedingte Agglomeration bereits sedimentierter Partikel fest, so dass bei hoher Luftfeuchtigkeit weniger Partikel resuspendieren können.

Steigt der Luftvolumenstrom im Sommer an, sinkt die Luftfeuchtigkeit, da der von den Tieren produzierte Wasserdampf fortgelüftet wird. Im Übergang ist diese Beziehung noch ansatzweise, jedoch nicht konsequent zu erkennen. Der Tagesverlauf der Luftfeuchtigkeit im Winter deckt sich jedoch mit dem Verlauf des Luftvolumenstroms. Während der Nacht sinkt die Zulufttemperatur, die Heizung wird eingeschaltet und der Luftvolumenstrom stellt sich auf den eingestellten Mindestwert ein, so dass die relative Luftfeuchtigkeit im Abteil abfällt. Bei einem Anstieg des Luftvolumenstroms schaltet sich die Heizung ab und die Luftfeuchtigkeit steigt an.

Eine Verdünnung der Partikelmassenkonzentration bei steigendem Luftvolumenstrom im Sommer ist nicht erkennbar. Des Weiteren ist der Schwankungsbereich der Tieraktivität und der Partikelmassenkonzentration sehr gering. Im Winter dagegen sind die Tiere

aktiver, die Werte streuen stark um den Mittelwert. Auf Grund der höheren Tieraktivität ist auch die Partikelmassenkonzentration größeren Schwankungen unterworfen. Dabei treten Verdünnungseffekte auf, die zufällig sein können, da der Luftvolumenstrom im Winter durch den Einsatz einer Heizung hauptsächlich von der Zulufttemperatur und Heizungseinstellung bestimmt wird.

Folgende Abbildungen zeigen die Zusammenhänge im Sommer in der Schweine-Endmast:

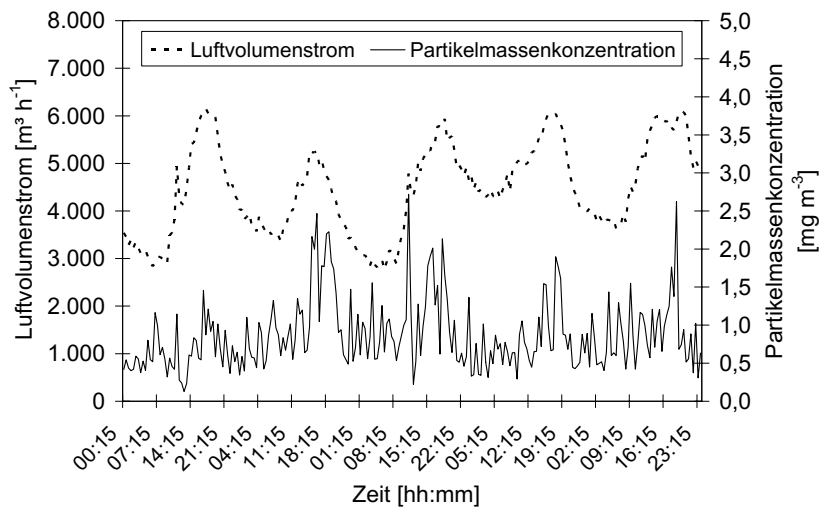


Abbildung 96:
Luftvolumenstrom und
Partikelmassenkonzentration unter Sommerbedingungen

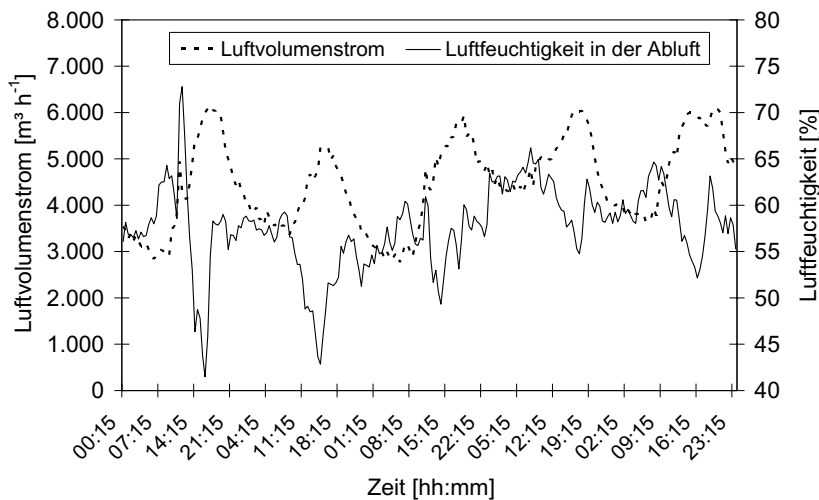


Abbildung 97:
Luftvolumenstrom und
Luftfeuchtigkeit
unter Sommerbedingungen

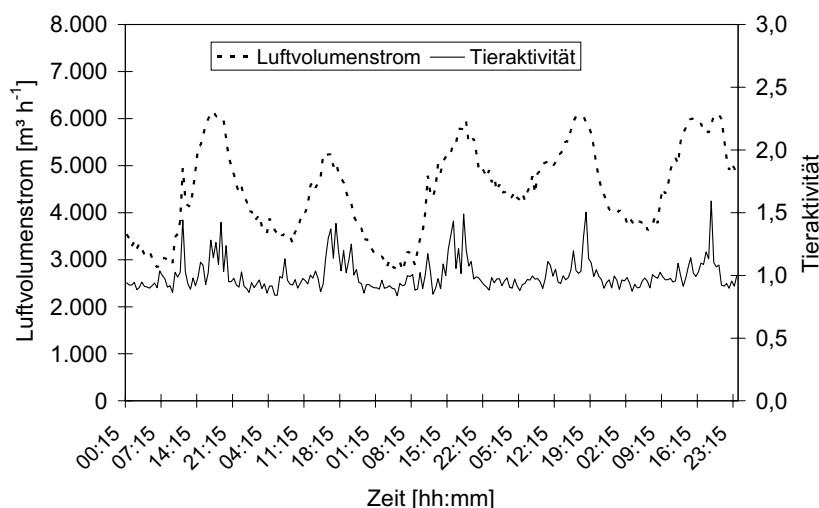


Abbildung 98:
Luftvolumenstrom und
Tieraktivität unter
Sommerbedingungen

Folgende Abbildungen zeigen die Zusammenhänge im Übergang in der Schweine-Endmast:

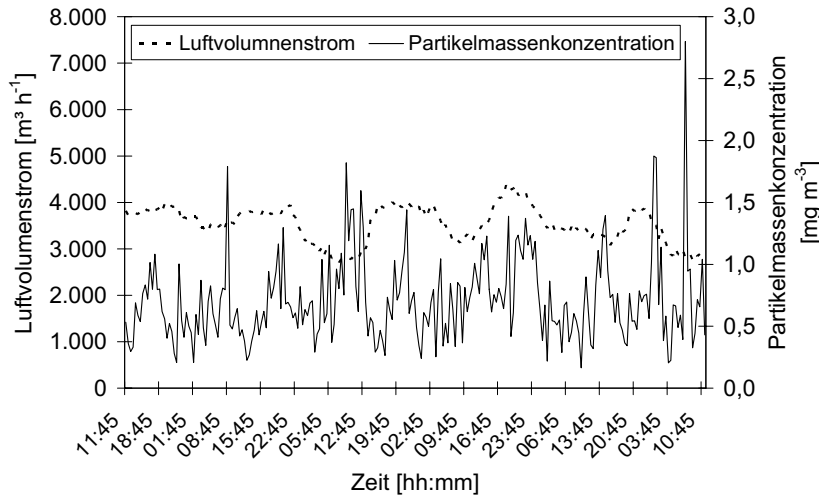


Abbildung 99:
Luftvolumenstrom und
Partikelmassenkonzentration unter Übergangsbedingungen

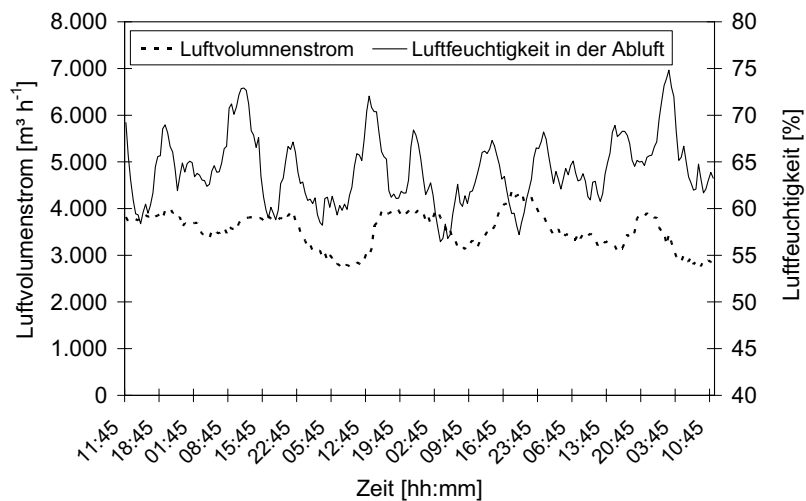


Abbildung 100:
Luftvolumenstrom und
Luftfeuchtigkeit
unter Übergangsbedingungen

Unter Übergangsbedingungen sind keine Aktivitätsmessungen durchgeführt worden.

Folgende Abbildungen zeigen die Zusammenhänge im Winter in der Schweine-Endmast:

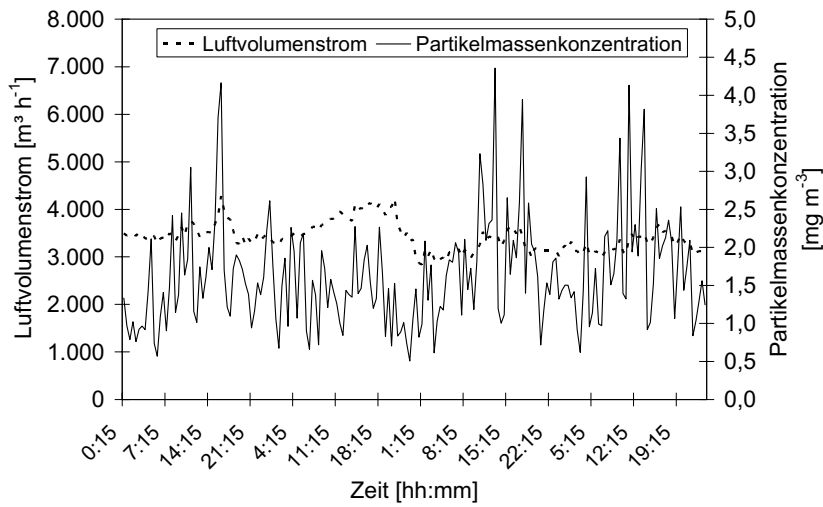


Abbildung 101:
Luftvolumenstrom und
Partikelmassenkonzen-
tration unter Winter
bedingungen

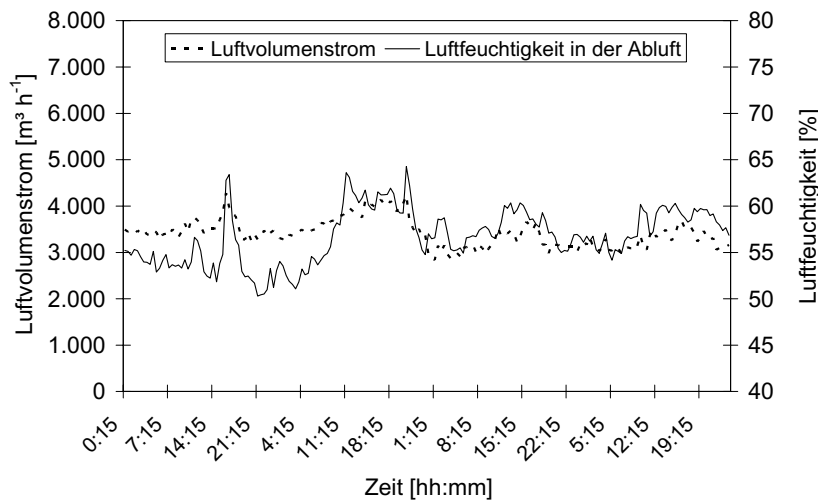


Abbildung 102:
Luftvolumenstrom und
Luftfeuchtigkeit unter
Winterbedingungen

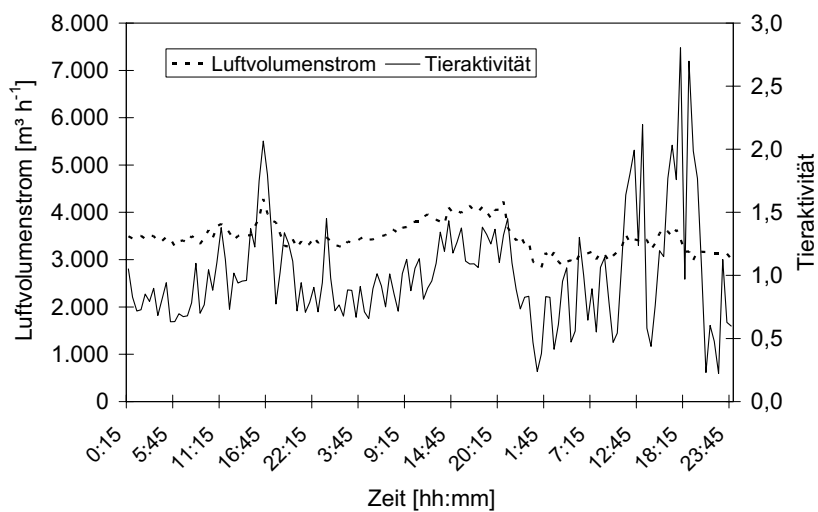


Abbildung 103:
Luftvolumenstrom und
Tieraktivität unter
Winterbedingungen

5.7 Fazit und Ausblick

Ziel des Projektes war es, die physikalische Zusammensetzung von partikelförmigen Emissionen aus typischen Tierställen in NRW zu analysieren und die Quellemission zu bestimmen. Der Einsatz des Aerosolspektrometers ermöglichte die Angabe einer Partikelverteilung über mehrere Größenklassen. Mit der Bestimmung von größenabhängigen Sedimentationsgeschwindigkeiten und Partikelformfaktoren konnten Partikeldichten für die Tierarten Schwein und Legehennen berechnet werden. Eine weiterführende Untersuchung der Partikeldichten bei anderen Tierarten in Abhängigkeit einzelner Haltungssysteme kann helfen, die Partikelemissionen in Bezug auf die Transmission genauer zu quantifizieren.

Neben den Faktoren Sedimentationsgeschwindigkeit, Partikelform und Tieraktivität sollten die Agglomeration und Resuspension von Staubpartikeln im Fokus weiterer Untersuchungen stehen. Je größer das Wissen über die physikalischen Eigenschaften und die Partikelfreisetzung ist, desto effektiver können Maßnahmen zur Minderung der partikelförmigen Emissionen durchgeführt werden.

Auch die das Management betreffenden Einflüsse, wie z.B. die Unterflurabsaugung in zwangsgelüfteten Ställen, konnten mit geeigneten Methoden näher beleuchtet werden, um ohne den Einsatz von teuren Abluftreinigungsverfahren sowohl die Quellemission zu senken als auch die Luftqualität im Innenraum zu verbessern.

Die Rohdaten lassen sehr detaillierte Auswertungen zu und können bei Bedarf auf einer CD zur Verfügung gestellt werden.

Folgende Punkte sollten bei der Erfassung von partikelförmigen Emissionen und der anschließenden Berechnung eines Emissionsfaktors beachtet werden:

- 24-Stundenmessung als kleinstes Auswertungsintervall
- direkte Erfassung des Luftvolumenstroms, da er neben der Tieraktivität als Einflussfaktor betrachtet werden kann
- Messungen sollten in gleichförmig strömender Abluft mit isokinetischer Probennahme nach VDI 2066 durchgeführt werden
- Messungen müssen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt werden
- Durch hohe Varianzen innerhalb der Haltungssysteme können die ermittelten Emissionsfaktoren lediglich als Schätzwerte angesehen werden
- Die Grenzwerte der TA-Luft für die Partikelmassenkonzentration werden in keinem untersuchten Haltungsverfahren überschritten

6 Zusammenfassung

Gegenstand des hier beschriebenen und abgeschlossenen Forschungsvorhabens war die systematische Analyse der Zusammensetzung von Partikelemissionen aus Stallanlagen verschiedener Tierarten (Schweine, Rinder, Hühner und Puten) in unterschiedlichen Haltungsverfahren. Die Ergebnisse der Untersuchung bieten wissenschaftliche Vergleichsmöglichkeiten der Quellemissionen aus unterschiedlichen Haltungssystemen innerhalb verschiedener Tierarten. Zudem liefern die Ergebnisse realistische Werte für die Quellemissionen von Stallanlagen in NRW.

Es konnten verschiedene methodische Faktoren bestimmt werden, die zur Ermittlung von Partikelemissionsfaktoren eine wichtige Rolle spielen. Dabei ist die Datengrundlage einer 24-Stunden-Messung als kleinstes Auswertungsintervall zu betrachten, da Halbstundenmittelwerte um bis zu 300 % vom Tagesmittel abweichen können und der Luftvolumenstrom sowie die Tieraktivität erheblichen Einfluss auf den Verlauf der Partikelkonzentration haben. Weiterhin ist eine isokinetische Probennahme im Abluftstrom die Voraussetzung für eine ordnungsgemäße Erfassung der Partikelkonzentration. Das Management des Landwirts ist als Bindeglied zwischen eingesetzter Technik, Klimabedingungen und Tierverhalten zu sehen. Durch gezielte Steuerung der Anlagen in Abhängigkeit von klimatischen Randbedingungen kann er in das Emissionsgeschehen eingreifen. Um einen durchschnittlichen Emissionsfaktor bezogen auf ein Jahr zu kalkulieren, sind Messungen in den verschiedenen Jahreszeiten unter möglichst „typischen“ Praxisbedingungen durchgeführt worden.

Die im Projektantrag beschriebene Bestimmung der Pilzsporenkonzentrationen ist in einer separaten Arbeit für die Pferdehaltung mit der veterinär-medizinischen Fakultät der Humboldt-Universität Berlin bearbeitet worden. Die Daten stehen kurz vor der Veröffentlichung und können im Herbst 2007 bereitgestellt werden.

Für die Partikelkonzentrationsmessungen wurden Aerosolspektrometer eingesetzt. Dabei werden die Stäube durch eine Fraktionierung in Partikelgrößen anhand ihres durch Streulicht bestimmten Querschnitts beschrieben. Die hier gewählte Methode zur Einteilung der Partikelgrößen lässt Vergleiche mit anderen z.B. arbeitsmedizinischen Untersuchungen zu. Die Erfassung des Luftvolumenstroms erfolgte in den zwangsgelüfteten Stallsystemen mit Messventilatoren und in den freigelüfteten Rinderställen mit der Tracergas-Abklingmethode (SF_6). Die Darstellung der Ergebnisse wurde auf Basis von Partikelmassenkonzentrationen (mg m^{-3}) und der Quellemission ($\text{g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$) vorgenommen. In die Berechnung eines Jahresmittelwertes für die Partikelemission sind die Daten aus den

Sommer- und Wintermessungen unter hiesigen Klimabedingungen zu jeweils 25 % und die Daten aus den Übergangsmessungen zu 50 % eingegangen.

In der konventionellen Schweinehaltung auf Vollspaltenboden werden die Grenzwerte der TA-Luft bei den heutigen Bestandsgrößen in NRW nicht erreicht. Eingestreute Systeme dagegen emittieren höhere Staubfrachten und sind hinsichtlich der Emissionsmassenströme kritischer zu betrachten. Verbesserter Tierschutz und höhere Umweltbelastungen stehen hier in einem Zielkonflikt. Im Rinderbereich entsprechen die durchschnittlichen Partikelkonzentrationen der Hintergrundkonzentration. Lediglich während der Fütterungs- und Melkzeigen steigen die Emissionen auf ein Niveau oberhalb der Stallumgebung an. Auf Grund der Geflügelpest waren in der Geflügelhaltung keine weiteren Messungen möglich. Eine Korrektur der Messdaten in der Legehennenhaltung musste vorgenommen werden, da an den Messtagen keine Möglichkeit bestand die Partikelkonzentration direkt im Abluftstrom zu erfassen. Somit können die Daten aus diesen Stallsystemen leider nur als grobe Abschätzung der Partikelemission ausgelegt werden.

Der Grenzwert der Partikelmassenkonzentrationen in der Abluft aus der TA-Luft von 20 mg m^{-3} wird in keinem der untersuchten Stallsysteme erreicht.

Mit der eingesetzten Partikelmesstechnik war es möglich, Größenverteilungen und Tagesverläufe der Massenkonzentrationen vorzunehmen. Diese Tagesverläufe zeigen charakteristische Unterschiede zwischen und innerhalb der Tierarten in verschiedenen Haltungssystemen.

Durch die Bestimmung von Partikeldichten und Sedimentationsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Tierarten konnten weitere physikalische Eigenschaften der Staubpartikel näher untersucht werden. Zusammen mit diesen Eigenschaften und den Partikelverteilungen sowie den Tagesverläufen könnte eine Datengrundlage für Ausbreitungssimulationen geschaffen werden.

7 Literaturverzeichnis

AARNINK, A.J.A.; P.F.M.M. ROELOFS; H. ELLEN; H. GUNNIK; 1999:

Dust Sources in Animal Houses.

In: Proceedings of the International Symposium „Dust Control in Animal Production Facilities“.

Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm,
8700 Horsens, Denmark; S. 34 - 40

AENGST, C.; 1984:

Zur Zusammensetzung des Staubes in einem Schweinemaststall

Dissertation

Tierärztliche Hochschule Hannover

ANGERSBACH-HEGER, S.; 2002:

Untersuchungen zur Emission und Verfrachtung luftgetragener Mikroorganismen von der Auslauffläche einer Legehennenfreilandhaltung.

ATTWOOD, P.; R. BROUWER; P. RUIGEWAARD; P. VERSLOOT; R. DE WIT; D. HEEDERICK;
J.S.M. BOLEIJ; 1987:

A Study of the Relationship Between Airborne Contaminants and Environmental Factors in Dutch Swine Confinement Buildings.

Am. Ind. Hyg. Assoc. J. (48), S. 743 - 744

BAUSUM, H.T.; S.A. SCHAUB; K.F. KENYON; M.J. SMALL; 1982:

Comparison of Coliphage and Bacterial Aerosols of a Wastewater Spray Irrigation Site.

Appl. Environ. Microbiol. 43, 28-38

BImSchG; 2002:

Bundes-Immissionsschutzgesetz

BGBl. I Nr.71 vom 04.Oktober 2002, S. 3830

BRITISH STANDARD 2955; 1958:

Glossary of terms relating to powders.

British Standard Institution, 1958

BÜSCHER, W.; S. NESER; A. GRONAUER; 2001:

Luftvolumenstromermittlung in zwangsgelüfteten Ställen.

In: Messmethoden für Ammoniak-Emissionen.

KTBL-Schrift 401, Darmstadt.

ISBN 3-7843-2130-5

- BUTERA, M.; J.H. SMITH; W.D. MORRISON; R.R. HACJER; F.A. KAINS; J.R. OGILVIE; 1991:
Concentration of respirable Dust and Bioaerosols and Identification of certain
microbial Types in a Hog-growing Facility.
Can. J. anim. Science, 71: 271 - 277
- CAENEGEM VAN, L.; 2006:
Kälber brauchen Aussenluftqualität.
ART-Berichte (früher:FAT-Berichte), Nr. 667, 2006
Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART
- CARPENTER, G.A.; 1986:
Dust in Livestock Buildings – Review of some Aspects.
J. agric. Engng. Res., 33: S. 227 - 241
- CIGR; 1984:
Report I of working group on climatization of animal houses.
Scottish farm building investigation, Aberdeen, 1984
- COX, C.S.; 1995:
Physical aspects of Bioaerosol Particles.
In: Bioaerosols Handbook, C.S. Cox and C.M. Wathes (Hrsg.)
CRC Press, Boca Raton, Florida, USA: S.15-25
- DAWSON, J.R.; 1990:
Minimizing dust in livestock buildings: Possible alternatives to mechanical
separation.
J. agr.Engng. Res., 47: S.235-248
- DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft); 2006:
MAK- und BAK-Wert-Liste 2006.
Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Mitteilung
42.
Wiley-VCH Verlagsgesellschaft mbh, Weinheim, Deutschland
- DIN 18910:
Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung - Teil 1:
Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe
- DLG; 2006:
Lüftung von Schweineställen
DLG-Arbeitsunterlage, 2006
Arbeiten aus dem DLG-Ausschuss „Technik in der Tierischen Produktion“
- DONHAM, K.J.; L.J. SCALLON; W. POPENDORF; 1986:
Characterization of dusts collected from swine confinement buildings
Am. Ind. Hyg. Assoc. J., Vol. 47, S. 404 - 410

DUTKIRWICZ, J.; J. TUCKER; R. BURRELL; S.A. OLENCHOCK; D. SCHWEGLER-BERRY; G.E. KELLER; B. OCHALSKA; F. KACZMARSKI; C. SKORSKA; 1992:
Ultrastructure of the Endotoxin produced by Gram-negative Bacteria associated with organic Dusts.
System. Appl. Microbiol., 15: S. 474 - 485

EN 481; 1993:
Arbeitsplatzatmosphäre: Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel.
Deutsche Fassung EN 481: 1993
Beuth Verlag, Berlin

FIRMA SCHÄFER:
Betriebsanleitung des Andersen-Sammlers
D-63225 Langen

GefStoffV; 1999:
Gefahrstoffverordnung vom 15.11.1999
BGBl. I S. 2233

GOLZ, U.; 2004:
Grimm Aerosoltechnik GmbH
D-83404 Ainring

HAIDN, B.; H.-J. MÜLLER; 2003:
Verfahren der freien Lüftung.
In: Lüftung von Schweineställen.
DLG-Arbeitsunterlage, 3. überarbeitete Fassung, Herbst 2003

HARTUNG, E.; 2001:
Konzeption, Realisierung und Evaluierung einer Versuchseinrichtung zur Entwicklung und differenzierten Beurteilung von Haltungssystemen für Mastschweine

HILLIGER, H.G.; 1990:
Stallgebäude, Stallluft und Lüftung
Enke-Verlag, Stuttgart, S. 14-30
ISBN 3-432-99221-1

HINDS, W.C.; 1982:
Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurements of Airborne Particles
ISBN 0471194107

HINDS, W.C.; 1999:
Aerosol Technology. Property, Behaviour and Measurement of Airborne Particles.
2nd Edition, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and sons, Inc.,
ISBN 0-471-19410-7

- HINZ, T.; S. LINKE; 1998:
Comprehensive Experimental Study of Aerial Pollutants in and Emissions from
Livestock buildings. Part 2: Results
Journal of Agricultural Engineering, 70, 1998, S. 119 - 129
- HIRST, J.M.; 1995:
Bioaerosols: Introduction, retrospect and prospect.
In: Bioaerosols Handbook, C.S. Cox and C.M. Wathes (Hrsg.)
CRC Press, Boca Raton, Florida, USA: S.5-14
- HOFMANN, R.; E.-M. BECK; R. BÖHM; G. DANNEBERG; S. GERBL-RIEGER; E. GÖTTLICH; A.
KOCH; M. KÜHNER; V. KUMMER; K. LIEBL; W. MARTENS; T. MISSEL; A. NEFF; U.
PALMGREN; R. RABE; B. SCHILLING; F. SCHNEIDER; F. TILKES; P. WIESER; 1999:
Erfassung von luftgetragenen Kultivierbaren Mikroorganismen aus
Kompostierungsanlagen – Emissionen und Immissionen.
In: Eikmann, T. & R. Hofmann (Hrsg.): Stand von Wissenschaft, Forschung und
Technik zu siedlungshygienischen Aspekten der Abfallentsorgung und –
verwertung,
Kommission Reinhaltung der Luft (KRDL) im VDI und DIN, Band 30
- ISO 7708; 1995:
Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die
gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme.
Beuth-Verlag
- JACOBSON, L.D.; B.P. HETCHLER; V.J. JOHNSON; 2004:
Particulate Emissions from Pig, Poultry, and Dairy Facilities located in Minnesota
AgEng, Session 22; Leuven, 2004
S. 628
- JARNYCH, V.S.; 1976:
Aerosole in der Veterinärmedizin.
VEB, Deutscher Landwirtschaftsverlag
- JUNGBLUTH, T.; W. BÜSCHER; M. KRAUSE; 2005:
Technik Tierhaltung: Grundwissen Bachelor
Verlag Eugen Ulmer Stuttgart
ISBN 3-8252-2641-7
- KÄMPFER, P.; W.D. WEIBENFELS; 1997:
Luftgetragene Mikroorganismen in Abfallbehandlungsanlagen.
Fachgruppe Mikrobiologie der Vereinigung für Allgemeine und Angewandte
Mikrobiologie
e.V. VAAM Lieskau, 1997

- KAPPOS, A.; P. BRUCKMANN; T. EIKMANN; N. ENGLERT; U. HEINRICH; P. HÖPPE; E. KOCH; N. METZ; K. RAUCHFUSS; P. ROMBOUT; J. SCHABRONATH; V. SCHULZ-KLEMP; M. F. SPALLEK; H.-E. WICHMANN; W. G. KREYLING; G. H. M. KRAUSE, 2003:
Bewertung des aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstandes zur gesundheitlichen Wirkung von Partikeln in der Luft
Arbeitsgruppe „Wirkungen von Feinstaub auf die menschliche Gesundheit“ der Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN
Umweltmed Forsch Prax 8, 2003,
S. 257 - 278
- KIRCHGESSNER, M.; 1997:
Tierernährung: Leitfaden für Studium, Beratung und Praxis
Verlagsunion Agrar, Frankfurt (Main)
ISBN 3-7690-0549-X
- KRAUSE, K.-H.; S. LINKE; 2004 a:
Dreidimensionales Strömungsgeschehen bei den Außenklimaställen in der Rinderhaltung
Förderkreis Stallklima, Tagung am 5. - 6. Oktober 2004 in Grub
- KRAUSE, K.-H.; S. LINKE; 2004:
Windwirkung auf Emissionen beim Boxenlaufstall
Landtechnik Heft 6, 2004
S. 348
- KRAUSE, K.-H.; S. LINKE; 2005:
Strömungsverhalten bei der Unterflurabsaugung – Teil 2
Landtechnik Heft 3, 2005
S. 176 - 177
- KTBL-SCHRIFT 446
Nationaler bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren, 2006
ISBN: 13: 978-3-939371-13-7
- LIM, T.-T.; A.J. HEBER; J.-Q. NI; J.X. GALLIEN; H. XIN; 2003:
Air Quality Measurements at a Laying Hen House: Particulate Matter Concentrations and Emissions.
In: Air Pollution from Agricultural Operations III,
Proceedings of the 12-15 October 2003 Conference (Research Triangle Park, North Carolina USA), Publication Date 12 October 2003, 701P1403.
S. 249 - 256
- LUFTQUALITÄTARICHTLINIE, 1999:
Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22.04.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft
In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften

- MAY, K.R.; H.A. DRYETT; L.P. PACKMAN; 1969:
Toxicity of Open Air to a Variety of Microorganisms.
Nature 221, 1146-1147
- MEHLHORN, G.; 1979:
Lehrbuch der Tierhygiene. Bd. 1
Gustav Fischer Verlag, Jena
- MITCHELL, J.P.; 1995:
Particle Size Analyzers: Practical Procedures and Laboratory Techniques.
In: Bioaerosols Handbook, C.S. Cox and C.M. Wathes (Hrsg.)
CRC Press, Boca Raton, Florida, USA: S. 5-14
- MÜLLER, H.-J.; (2003):
In DLG-Arbeitsunterlage: „Lüftung von Schweineställen“, DLG-Verlag Frankfurt
- MÜLLER, H.-J.; 2001:
Bilanzmethoden zur Luftvolumenstrombestimmung in frei gelüfteten Ställen.
In: Messmethoden für Ammoniak-Emissionen.
KTBL-Schrift 401, Darmstadt.
ISBN 3-7843-2130-5
- MÜLLER, H.-J.; K.-H. KRAUSE; W. ECKHOF; 1996:
Untersuchungen zum Emissions- und Immissionsverhalten von Puten- und
Entenställen.,
Agrartechnische Forschung 2, S. 127 - 137
- MÜLLER, P.; 1995:
Ställe für die Jungviehaufzucht.
KTBL-Arbeitsblatt 1095, 1995
- MÜLLER, W.; 1987:
Origin, Quantity and Quality of microbial Emissions in Animal Houses.
Dust and microbial Emissions from Animal Production.
In: STRAUCH, D. (ed.): Animal production and environmental health. Elsevier
Sci. Pub.
Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo
- MÜLLER, W.; 2002:
Skriptum zur Vorlesung Mechanische Grundoperationen, SS 2002
Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik
- MÜLLER, W; P. WIESER; J. WOIWODE; 1977:
Zur Größe koloniebildender Einheiten in der Stallluft.
Berl. Münch. Tierärztl. Wschr., 90: S. 6-11

- MUTAF, S.; S. ALKAN; N. SEBER; 2004:
The effects of natural ventilation air exchange on psychrometric results in poultry houses in hot environment – Design characteristics.
Agr. Eng. Int.: CIGR Journal of sci. res. and dev.
Manuskript BC 03 023. August
- NANNEN, C.; 2005:
Mikroskopische Untersuchungen von Staubpartikeln in Mastschweinställen
Landtechnik, Heft 4, 2006
S. 60 - 61
- OUWERKERK VAN, E.N.J.; S. PEDERSEN; 1994:
Application of carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. Proceedings of the XII World Congress on Agricultural Engineering. Milano, 29. Aug. - 1. Sept., Vol.1, S. 516-529
- PEARSON, C.C.; T.J. SHARPLES; 1995:
Airborne Dust Concentration in livestock buildings and the Effect of Feed.
J. agr.Engng. Res., 60: S.145-154
- PEDERSEN, S.; 1992:
Dust and Gases. 2nd Report of Working Group „Climatization of Animal Houses“.
Landwirtschaftliche Fakultät, Universität Gent, Belgien
- PEDERSEN, S.; 1993:
Time based variation in airborne dust in respect to animal activity.
Proceedings of the 4th International Symposium „Livestock Environment IV“ in Coventry, 6. bis 9 Juli 1993, England
S. 718 - 725
- PEDERSEN, S.; 2004:
Maßnahmen zur Minderung der Partikelbelastung in Ställen
KTBL-Tagung „Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall – Herkunft, Erfassung, Wirkung, Maßnahmen“
02./03. November 2004, Hannover
- PETERMANN, M.; 2004:
Vorlesungsunterlagen
Lehrstuhl für Partikeltechnologie und Partikeldesign; Ruhr-Universität Bochum
- PETZOLDT, K.; H. KIRCHHOFF; 1986:
Kompendium der veterinärmedizinischen Mikrobiologie, Teil 1.
Ein Leitfaden für Studierende
M.& H. Schaper-Verlag, Alfeld, S. 91-94
ISBN 3-7944-0146-8

- PHILLIPS, V.R.; M.R. HOLDEN; R.W. SNEATH; J.L. SHORT; R.P. WHITE; J. SEEDORF; J. HARTUNG; M. SCHRÖDER; K.H. LINKERT; S. PEDERSEN; H. TAKAI; J.O. JOHNSON; P.W.G. GROOT KOERKAMP; G.H. UENK; R. SCHOLTENS; J.H.M. METZ; C.M. WATHES; 1998:
The Development of Robust Methods for Measuring Concentrations and Emission Rates of Gaseous and Particulate Air Pollutants in Livestock Buildings
Journal of Agricultural Engineering, Jg. 1998
Heft 70, S. 11 - 24
- RADON, K.; E. MONSO; C. WEBER; B. DAUSER; M. IVERSEN; U. OPRAVIL; K. DONHAM; J. HARTUNG; S. PEDERSEN; S. GARZ; D. BLAINY; U. RABE; D. NOWAK, 2002:
Prevalence and risk factors for airway diseases in farmers – summary of results of the European farmers' project
Ann. Agric. Environ. Med. 9, S. 207 – 213
- SAINSBURY, W.B.; 1983:
Poultry housing and disease
Veterinary Record 113, S. 565 - 568
- SALLE, A.J.; 1948:
Fundamental Principles of Bacteriology.
Mc Graw-Hill Book
ISBN 0-007-054480-8
- SCHUEERMANN, H.; 2004:
Persönliche Schutzmaßnahmen.
In: Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall.
KTBL-Schrift 436, S. 194 - 199
- SCHMITT-PAUKSZTAT, G.; 2006:
Verfahren zur Bestimmung der Sedimentationsgeschwindigkeit von Stäuben und Festlegung partikelspezifischer Parameter für deren Ausbreitungssimulation.
VDI-MEG Schrift 440
ISSN 0931-6264
- SCHMITT-PAUKSZTAT, G.; E. ROSENTHAL; W. BÜSCHER; B. DIEKMANN; 2005:
Sinkgeschwindigkeiten von Tierstäuben.
Agrartechnische Forschung 11 (2005)
Heft 5, S. 133 - 144
- SCHMITT-PAUKSZTAT, G.; O. WALLENFANG; W. BÜSCHER; B. DIEKMANN; 2004:
Partikelkonzentrationen in der Stallabluft im Vergleich mit der Innenraumkonzentration
Agrartechnische Forschung 10, (2004)
Heft 6, S. 105 - 110

- SCHNEIDER, F.; T. ENGELHARDT; P.H. WIESER; 2001:
Characterization of Aerosol Particles from Animal Husbandry with Single Particle Analytic Techniques.
ASAE Annual International Meeting, 30.07. - 01.08.2001,
Sacramento, California, USA, Paper-No. 014010.
ASAE St.Joseph, Michigan, USA
- SCHNEIDER, T.; 2006:
Untersuchungen zur Partikelemission eines frei gelüfteten Putenstalles mit Hilfe der Tracergasmethode.
VDI-MEG-Schrift 439, ISSN 0931-6264
- SCHNEIDER, T.; W. BÜSCHER; O. WALLENFANG; 2005:
Validierung der Tracergasmethode zur Luftvolumenstrombestimmung
Agrartechnische Forschung 11, 2005, Heft 6, S. 175 - 182
- SEEDORF, J.; J. HARTUNG; 2002:
Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung
KTBL-Schrift 393
ISBN 3-7843-2145-3
- SEEDORF, J.; J. HARTUNG; M. KLOTZ; 1999:
An optical particle counter for liquid dispersed livestock dust.
In: Proceedings of the International Symposium on Dust Control in animal Production Facilities,
30.05. - 02.06.1999, Aarhus, Denmark, Research Centre Bygholm, P.O. Box 536,
DK-8700 Horsens, Denmark.
ISBN 87-88976-35-1, S. 289 - 294
- STARK, U.; A. MÜLLER; 2004:
Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen – schnelle und effektive Methode zur Beurteilung.
Ratgeber Abbruch & Recycling 2004
Stein-Verlag Baden-Baden GmbH
- STRAUCH, D; W. BAADER; C. TIETJEN; 1977:
Abfälle aus der Tierhaltung – Anfall, Umweltbelastung, Behandlung, Verwertung
Ulmer Verlag, Stuttgart
ISBN 3-8001-4328-3
- TAKAI, H.; J.O. JOHNSEN; J.H.M. METZ; P.W.G. GROOT KOOERKAMP; G.H. UENK; V.R. PHILLIPS; M.R. HOLDEN; R.W. SNEATH; J.L. SHORT; R.P. WHITE; J. HARTUNG; J. SEEDORF; M. SCHRÖDER; K.H. LINKERT; C.M. WATHES; 1998:
Concentrations and Emissions of Airborne Dust in Livestock Buildings in Northern Europe.
J. agric. Engng Res. (70) S. 49 - 58

- TA-LUFT; 1999, geändert 2001:
Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz
- TierSchNutzV; 2006:
Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung
angefertigt: 25.10.2001, letzte Änderung: 30.11.2006
- VDI-Richtlinie 2066; Blatt 1; 2006:
Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung
- VDI-Richtlinie 2080; 1984:
Messverfahren und Messgeräte für Raumluftechnische Anlagen.
Beuth Verlag Köln
- VDI-Richtlinie 2463; Blatt 1; 1999:
Messen von Partikeln - Gravimetrische Bestimmung der Massenkonzentration von Partikeln in der Außenluft – Grundlagen
- VRANKEN, E.; D. BERCKMANS; V. GOEDEELS; 1997:
Development of a low cost ventilation rate sensor for micro-environmental control in agricultural buildings.
Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung.
Tagung in Kiel, S. 466 - 475
- WACHENFELT VON, E.; 1999:
Dust reduction in alternative production systems for laying hens.
Pages 261–264 in Proc. Intl. Symp.
Dust Control in Anim. Prod. Facilities, Aarhus, Denmark.
- WADELL, H.; 1933:
Sphericity and roundness of rock particles. Journal of Geology 41 (1933)
S. 310-331.
- WANG, X.; L.Y. ZHAO; G.L. RISKOWSKI; 2000:
Effect of Ventilation Rate on Dust Spatial Distribution in Mechanically Ventilated Airspace.
Transaction of the ASAE (43) 6, S. 1877 - 1884

- WANG, X.; Y. ZHANG; G.L. RISKOWSKI; 1999:
Dust Spatial Distribution in a typical Swine Building.
In: Proceedings of the International Symposium „Dust Control in Animal
Production Facilities.
Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm,
8700 Horsens, Denmark; S. 48 - 55
ISBN 87-88976-35-1
- WATHES, C.M.; C.D.R. JONES; A.J.F. WEBSTER; 1983:
Ventilation, air hygiene and animal health
Veterinary Record 113, S. 554 - 559
- WATHES, C.M.; T.G.M. DEMMERS; N. TEER; R.P. WHITE; L.L. TAYLOR; V. BLAND; P.
JONES; D. ARMSTRONG; A.C.J. GRESHAM; J. HARTUNG; D.J. CHENNELLS; S.H.
DONE; 2004:
Production responses of weaned pigs after chronic exposure to airborne dust and
ammonia
In: Animal science 78 (2004) 87-97
ISSN 1357-7298
- YODER, M.F.; G.L. VAN WICKLEN; 1988:
Respirable Aerosol Generation by Broiler Chicken
Transaction of the Am. Soc. Agric. Eng., 31: S. 1510 - 1517
- YOUNG, R.S.; A.M. JONES; P.J. NICHOLLS; 1998:
Something in the Air: Endoxins and Glucans as Environmental Troublemakers.
J. Pharma. Pharmacol., 50: S. 11 - 17
- ZEITLER, M.H.; M. KÖNIG, W. GROTH; 1987:
Der Einfluss von Futterform [mehlförmig, pelletiert, flüssig] und Jahreszeit auf die
Konzentration und Korngrößenverteilung luftgetragener Staubpartikel in
Mastschweinställen
Deutsche Tierärztl. Wochenschrift 1987, Vol. 94(7), S. 420 - 424
- ZLATEV, M.; 2005:
Beitrag zur quantitativen Kornformcharakterisierung unter besonderer Berück-
sichtigung der digitalen Bildaufnahmetechnik.
TU Bergakademie Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energie-
technik, 2005
Archivserver Deutsche Nationalbibliothek:
Link: <http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=978198808>

8 Anhang

Tabelle A 1: Partikelanzahl- und Partikelmassenverteilung in jahreszeitlicher Abhängigkeit in der Vormast und Endmast von Schweinen

Partikelanzahl	Sommer	Übergang	Winter	Sommer	Übergang	Winter	Sommer	Übergang	Winter
	Vormast ohne Stroh			Vormast mit Stroh			Endmast		
0.75-1.0 µm	19,2	39,1	37,4	19,4	21,4	29,5	20,6	19,1	23,0
1.0-2.0 µm	32,9	22,7	19,0	30,7	29,5	28,7	34,6	30,3	30,1
2.0-3.5 µm	26,2	20,0	25,0	22,8	25,4	26,2	25,8	25,2	25,7
3.5-5.0 µm	13,7	11,4	15,5	13,1	12,3	9,8	10,9	14,1	13,1
5.0-7.5 µm	5,5	4,9	2,2	7,6	7,3	4,2	5,8	7,6	6,1
7.5-10.0 µm	1,0	1,1	0,4	2,3	2,0	1,0	1,3	2,1	1,2
10.0-15.0 µm	0,6	0,5	0,3	1,8	1,2	0,4	0,6	1,2	0,6
>15.0 µm	0,8	0,4	0,2	2,1	0,9	0,2	0,4	0,5	0,3
Partikelmasse									
0.75-1.0 µm	0,2	0,4	0,6	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,3
1.0-2.0 µm	2,0	1,5	1,6	0,6	1,3	2,4	2,4	1,3	2,4
2.0-3.5 µm	7,9	6,8	13,1	2,5	4,8	10,6	7,8	6,1	9,4
3.5-5.0 µm	12,3	11,9	29,2	4,6	7,8	14,1	11,5	10,8	14,0
5.0-7.5 µm	15,1	15,8	12,7	8,4	14,6	19,7	19,4	18,6	20,5
7.5-10.0 µm	6,9	9,3	6,8	6,8	10,2	12,9	11,5	13,3	10,7
10.0-15.0 µm	11,7	12,8	10,9	15,6	18,6	15,7	15,8	21,9	15,3
>15.0 µm	44,0	41,4	25,2	61,4	42,6	24,2	31,2	27,9	27,4

Tabelle A 2: Partikelanzahl- und Partikelmassenverteilung in jahreszeitlicher Abhängigkeit in der Ferkelaufzucht

Partikelanzahl	Sommer	Übergang	Winter	Sommer	Übergang	Winter
	Ferkelaufzucht, Oberflurabs.			Ferkelaufzucht, Unterflurabs.		
0.75-1.0 µm	27,5	16,7	34,7	29,2	28,2	43,6
1.0-2.0 µm	37,3	27,4	32,5	31,2	32,4	44,2
2.0-3.5 µm	22,7	25,8	11,6	20,0	23,7	8,1
3.5-5.0 µm	6,8	17,4	8,6	11,3	9,1	2,0
5.0-7.5 µm	2,8	8,6	6,5	5,6	4,4	1,3
7.5-10.0 µm	1,1	1,8	2,5	1,2	1,1	0,2
10.0-15.0 µm	1,1	1,0	1,8	0,7	0,7	0,2
>15.0 µm	0,8	1,4	1,9	0,8	0,4	0,4
Partikelmasse						
0.75-1.0 µm	0,3	0,1	0,0	0,2	0,3	0,9
1.0-2.0 µm	2,3	0,7	0,4	1,3	2,5	5,8
2.0-3.5 µm	5,8	4,0	3,4	5,1	8,1	5,4
3.5-5.0 µm	5,8	8,3	6,7	9,3	10,5	5,9
5.0-7.5 µm	7,6	12,8	11,7	14,2	16,5	9,5
7.5-10.0 µm	7,2	6,9	8,9	7,9	10,3	3,9
10.0-15.0 µm	21,6	11,3	16,5	13,1	19,4	6,2
>15.0 µm	49,6	55,9	52,4	48,7	32,4	62,4

Tabelle A 3: Partikelanzahl- und Partikelmassenverteilung in jahreszeitlicher Abhängigkeit in den Warteställen für Sauen

Partikelanzahl	Sommer	Übergang	Winter	Sommer	Übergang	Winter
	Wartestall, Abruffütterung			Wartestall, Selbstfangbuchten		
0.75-1.0 µm	31,3	40,3	21,1	27,0	22,4	44,7
1.0-2.0 µm	35,5	33,1	24,7	34,9	34,8	19,8
2.0-3.5 µm	20,8	15,6	35,8	20,4	25,3	21,9
3.5-5.0 µm	6,9	6,0	13,8	9,6	10,2	11,4
5.0-7.5 µm	3,3	3,0	3,1	4,4	4,4	1,6
7.5-10.0 µm	0,9	0,8	0,6	1,4	1,1	0,4
10.0-15.0 µm	0,8	0,6	0,4	1,3	0,9	0,2
>15.0 µm	0,6	0,6	0,3	1,0	0,9	0,1
Massenkonzentration						
0.75-1.0 µm	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	1,0
1.0-2.0 µm	2,4	2,3	2,0	1,4	2,4	2,2
2.0-3.5 µm	5,9	4,5	14,2	5,2	9,1	15,2
3.5-5.0 µm	6,8	6,2	17,0	7,6	11,0	27,7
5.0-7.5 µm	10,6	9,9	13,0	10,4	13,2	11,7
7.5-10.0 µm	7,5	6,8	6,2	7,6	7,2	7,1
10.0-15.0 µm	18,5	15,2	13,7	20,7	14,6	12,9
>15.0 µm	48,1	54,7	33,6	46,9	42,3	22,2

Tabelle A 4: Partikelanzahl- und Partikelmassenverteilung in jahreszeitlicher Abhängigkeit im Abferkelbereich und in den Rinderställen

Partikelanzahl	Sommer	Übergang	Sommer	Übergang
	Legehennen Käfig	Legehennen Käfig	Legehennen Voliere	Legehennen Voliere
0.75-1.0 µm	29,9	17,4	26,8	18,9
1.0-2.0 µm	33,5	27,5	35,7	25,9
2.0-3.5 µm	20,3	23,4	27,0	31,2
3.5-5.0 µm	10,5	16,0	8,1	16,2
5.0-7.5 µm	4,1	10,0	1,7	6,2
7.5-10.0 µm	0,9	3,5	0,3	1,1
10.0-15.0 µm	0,6	2,0	0,2	0,4
>15.0 µm	0,3	0,4	0,1	0,1
Partikelmasse				
0.75-1.0 µm	0,5	0,1	0,8	0,3
1.0-2.0 µm	2,8	1,2	4,8	2,1
2.0-3.5 µm	10,0	5,7	21,2	14,9
3.5-5.0 µm	17,0	12,3	20,6	23,8
5.0-7.5 µm	18,2	20,8	12,5	23,2
7.5-10.0 µm	9,9	19,1	6,1	11,1
10.0-15.0 µm	15,8	25,6	9,4	10,2
>15.0 µm	25,6	15,2	24,7	14,4

Tabelle A 5: Partikelanzahl- und Partikelmassenverteilung in jahreszeitlicher Abhängigkeit im Abferkelbereich und in den Rinderställen

Partikelanzahl	Sommer	Übergang	Winter	Sommer	Übergang	Winter	Übergang	Winter
	ABF	ABF	ABF	Rind_SB	Rind_SB	Rind_SB	Rind_TF	Rind_TF
0.75-1.0 µm	27,6	47,3	23,4	55,0	65,0	67,9	65,0	61,7
1.0-2.0 µm	34,6	25,6	28,2	37,8	26,3	29,0	30,8	34,6
2.0-3.5 µm	25,2	15,9	33,7	4,9	5,3	2,7	3,1	3,4
3.5-5.0 µm	8,6	8,2	10,0	1,6	2,4	0,3	0,8	0,2
5.0-7.5 µm	3,1	2,2	3,3	0,5	0,8	0,1	0,2	0,0
7.5-10.0 µm	0,5	0,3	0,8	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
10.0-15.0 µm	0,2	0,2	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
>15.0 µm	0,1	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Partikelmasse								
0.75-1.0 µm	0,6	0,8	0,4	1,5	4,8	16,9	7,9	16,4
1.0-2.0 µm	4,6	2,2	3,0	4,3	10,3	30,1	18,9	38,4
2.0-3.5 µm	14,1	8,5	15,1	8,5	12,5	16,4	12,5	21,4
3.5-5.0 µm	16,2	15,3	15,3	10,7	19,8	7,4	12,4	6,0
5.0-7.5 µm	19,4	12,4	16,9	8,6	20,9	5,2	10,3	4,3
7.5-10.0 µm	8,3	4,6	10,5	6,3	8,5	1,6	4,7	1,6
10.0-15.0 µm	11,9	10,4	16,9	15,2	6,6	2,8	4,9	2,2
>15.0 µm	25,0	45,8	22,1	44,9	16,7	19,6	28,6	9,6

Kalibrierung der passiven Infrarot-Sensoren

Für jeden Sensor ist eine Kalibrierkurve erstellt worden, die das ausgegebene Signal in vergleichbare Daten umwandelt. Die Höhe der Tieraktivität ist bei der Kalibrierung durch die Auswahl von Glühlampen mit unterschiedlichen Watt-Stärken vorgenommen worden. Der tageszeitliche Verlauf beschreibt die relative Abweichung der Einzelwerte vom Tagesmittelwert. Die Tieraktivität kann somit in ihrem Verlauf, nicht aber in ihrer absoluten Höhe angegeben werden. In dieser Arbeit soll die Aktivitätsmessung als Einflussfaktor auf die Partikelemissionen näher beleuchtet werden. Abbildung A 1 zeigt die Kalibrierkurven der vier eingesetzten Aktivitätssensoren.

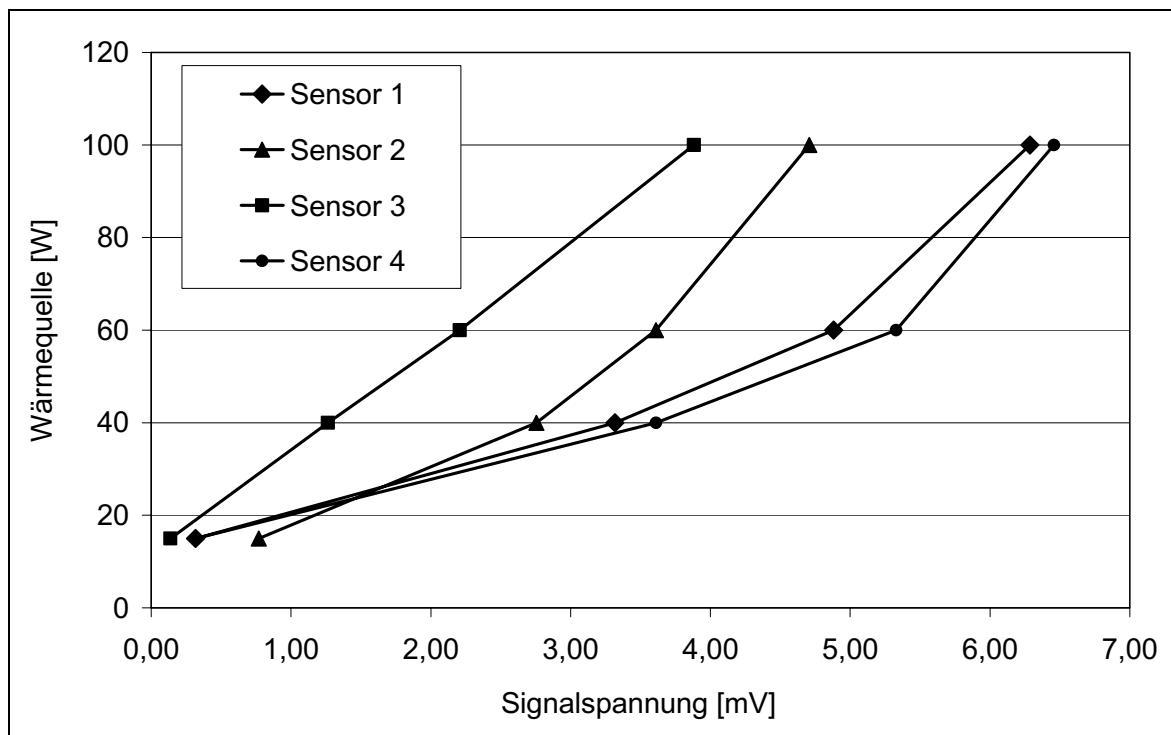


Abbildung A 1: Kalibrierkurven der einzelnen passiven Infrarotsensoren

Die dazugehörigen Funktionsterme basieren auf einer Kurvenanpassung. Sie lauten wie folgt:

$$y_1 = 13,65 e^{0,32x} \quad \text{mit } R^2 = 0,99$$

$$y_2 = 10,44 e^{0,48x} \quad \text{mit } R^2 = 0,99$$

$$y_3 = 22,66 x + 11,32 \quad \text{mit } R^2 = 0,99$$

$$y_4 = 13,46 e^{0,30x} \quad \text{mit } R^2 = 0,99$$

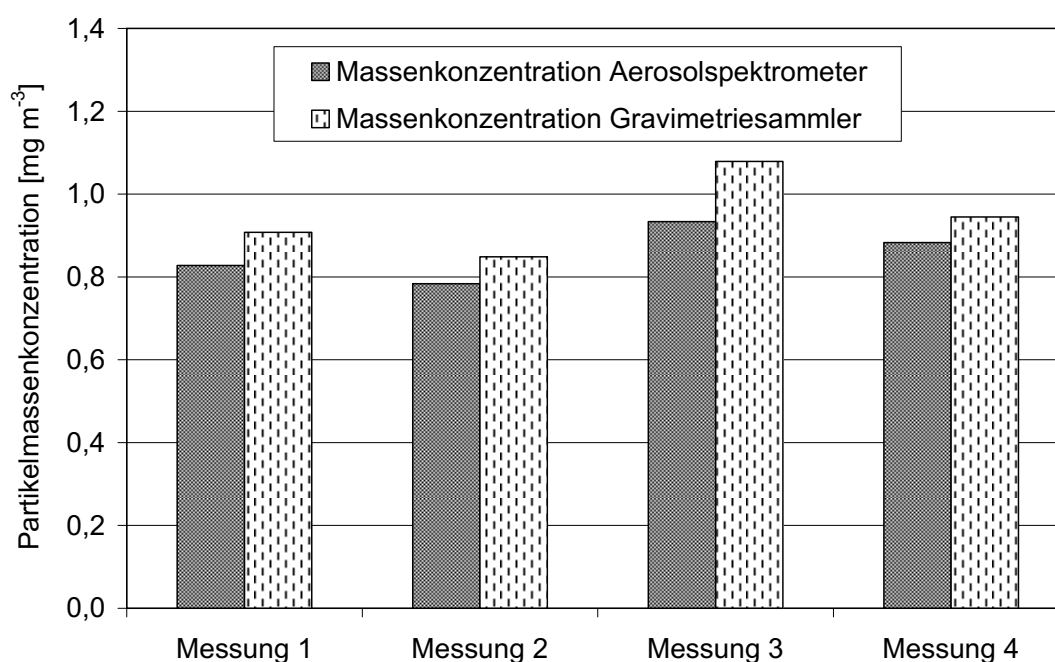


Abbildung A 2: Vergleich von Aerosolspektrometer und gravimetrischem Sammler

Tabelle A 6: Technisches Datenblatt des eingesetzten Tracergas-Detektors

Meltron Qualitek Messtechnik GmbH, Hekkersbergstraße 6, D-41460 Neuss	
Detektor	Miniatur-Elektroneneinfangdetektor
Messparameter	SF ₆ oder R12
Auflösung	0,1·10 ⁻⁷ ml/s für SF ₆
Messbereich	1·10 ⁻⁷ bis 1·10 ⁻⁴ ml/s für SF ₆ 0,1 bis 60 ppm für SF ₆
Reaktionszeit	1 Sekunde
Regenerierungszeit	2 Sekunden
Kalibrierung	Kalibrierung durch den Benutzer
Spannungsversorgung	AC Netzspannung 96-264 V AC, 50/60 Hz, 40 VA. 12 V DC aufladbarer Bleiakkumulator, Gel-Typ, bietet 8 Stunden Dauerbetrieb nach vollständiger Aufladung
Gasversorgung	600 cm ³ Gasflasche mit Argon von min. 99,998 % Reinheit für 30 Stunden Dauerbetrieb bei Füllung auf 150 bar.
Schnittstellen	serielle Schnittstelle RS232, 0-2 V Analogausgang
Speicher	für 100 Prüfergebnisse
Abmessungen	Koffer L 430 mm, B 400 mm, H 230 mm
Betriebstemperatur	5°C bis 45°C

Tabelle A 7: Technisches Datenblatt des eingesetzten Aerosolspektrometers

Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG, Dorfstrasse 9, D-83404 Ainring	
Messbereich	Staubgröße 0,3 bis >20 µm; Partikelmasse 1 bis 100.000 µg/m ³ ; Partikelanzahl bis 2.000.000 l ⁻¹
Messprinzip	90° Streulichtmessung
Klassifizierung	in 15 Kanälen, angegebenen Kanalschwellen gelten für einen Zählwirkungsgrad von 50 % mit monodispersen Latexaerosol
Massenberechnung	durch Extrapolation wird ein weiterer Kanal unterhalb des feinsten gemessenen Kanals errechnet. Für die Massenberechnung wird der arithmetische Mittelwert der Kanalschwellen benutzt.
Reproduzierbarkeit	±2% über den gesamten Messbereich
Selbstdiagnose	automatisch nach jedem Start
Probenvolumenstrom	1,2 l/min ±5% konstant durch Regelung
Spülluftmenge	0,3 l/min konstant durch Regelung. Automatische Nachlaufreinigung im Bereitschaftsmodus (Standby)
Probensammler	47 mm Rundfilter aus PTFE
Analogeingänge	3 Stück (0-10 V), Auflösung 10 Bit (ca. 10mV)
Datenschnittstelle	RS-232 (9600 Bd, 8 Bit, keine Parität, 1 Stop-Bit)
Datenspeicherkarte	512 Kbyte- 1 Mbyte
Stromversorgung	Batterie 12V/2,3 Ah, Typ LC-SA 122R3B6 Panasonic voll geladen für 7-8 Stunden Dauerbetrieb 18V-Netzteil: MI2818, AC 95-250V, 47-63 Hz, Schutzklasse II (schutzisoliert)
Betriebstemperatur	0 bis +40 °C, r.F. <95% (nicht kondensierend)
Probenluft	+4 bis +40 °C, r.F. <95% (nicht korrosiv)
Temperatur- und Feuchtefühler (Modell 1.153)	
Stecker	6-polig
Stromversorgung	10V ±5 %, < 5 mA
Temperaturmessbereich	0,3 bis +80 °C
Auflösung	0,1 K
Genauigkeit	typ. 0,3 K
Feuchtmessbereich	0 bis 100 %rF
Auflösung	0,1 %
Genauigkeit	typ. 1%

Tabelle A 8: Technisches Datenblatt des Ultraschallanemometers

METEK Meteorologische Messtechnik GmbH		
Measuring Range	Wind velocity	0 - 60 m/s
	Wind components	-60 - 60 m/s
	Wind direction	0 - 360 °
	Wind direction (with Hysteresis)	0 - 540 °
	Temperature	-30 - 50 °C
	Pt 100 Inputs (option)	-30 - 50 °C
	Analog Inputs (option)	-10 - 10 V
	Clock Inputs (option)	0 - 10 Hz
	Measuring Resolution	Wind velocity
Wind components		± 0,01 m/s
Wind direction		± 0,4 °
Temperature		± 0,01 K
Pt 100 Inputs (option)		± 0,25 K
Analog Inputs (option)		±0,05 V
Time Resolution		Sampling rate
	Averaging Interval	1 - 65535 Samples
Analog data Output (8 Bit Resolution, 0-10 V)	Wind velocity	0 - 60 m/s
	Wind components	-60 - 60 m/s
	Wind direction	0 - 360 °
	Wind direction (with Hysteresis)	0 - 540 °
	Temperature	-30 - 50 °C
	Power Consumption	Sensor Electronic
Low Power Mode (no heating)		approx. 1,5 W
Sensor Heating (Option)		approx. 50,0 W
Dimensions	Sound Paths	180 mm
	Sensor Head (Ø x Height)	320 x 240 mm
	Supporting Rod	270 mm
	Electronic box	120 x 120 x 120 mm
	Mounting clamp (inner Ø/ outer Ø x Length)	40 / 60 x 120 mm

9 Liste für weitere Forschungsaktivitäten

- Untersuchung der physikalischen Faktoren Agglomeration und Resuspension für die weitergehende Analyse der partikelförmigen Emissionen
- Bestimmung von größenabhängigen Partikeldichten für weitere Tierhaltungsverfahren zur Vervollständigung einer Datenbank für die Ausbreitungssimulation
- Untersuchungen zur Effizienz von emissionsmindernden Maßnahmen im Stallinnenraum

10 Liste der Veröffentlichungen

- SCHMITT-PAUKSZTAT, G.; E. ROSENTHAL; W. BÜSCHER; B. DIEKMANN:
Sinkgeschwindigkeiten von Tierstäuben.
Agrartechnische Forschung 11 (2005)
Heft 5, S. 133 - 144
- NANNEN, C.; G. SCHMITT-PAUKSZTAT; W. BÜSCHER:
Mikroskopische Untersuchungen von Staubpartikeln in Mastschweinställen
Landtechnik, Heft 4, 2006
S. 60 - 61
- NANNEN, C.; W. BÜSCHER:
Einfluss der Tieraktivität auf Staubfreisetzung und Partikelemissionen
Landtechnik, Heft 1, 2006
S. 36 - 37
- NANNEN, C.; T. SCHNEIDER; W. BÜSCHER:
Automatisierte Volumenstrommessung in freigelüfteten Milchviehställen mit Trauf-
First-Lüftung
Landtechnik, Heft 6, 2006
S. 388 bis 389
- NANNEN, C.; W. BÜSCHER:
The influence of animal activity on dust generation and particle emissions from
fattening pig barns
CIGR World Congress, Bonn, 2006
VDI-Bericht Nr. 1958 (LT 454 A)
S. 451 - 452

Zwei weitere Veröffentlichungen sind bereits angenommen:

- NANNEN, C.; W. BÜSCHER:
Particle emissions from German livestock buildings - influences and fluctuation factors
Kofferenz: Particulate Matter - PM - in and from Agriculture
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
- NANNEN, C.; W. BÜSCHER:
Partikelemissionen aus Nutztierställen – Abhängigkeiten
BTU-Tagung, Bonn, Oktober 2007

11 Liste der Vorträge

- CIGR World Congress, Bonn; 2006:
Vortrag zur oben angeführten Veröffentlichung
- Beide weiteren bereits angenommenen Veröffentlichungen sind mit einem Vortrag verbunden.

12 Liste der Posterpräsentationen

- NANNEN, C.; T. SCHNEIDER; W. BÜSCHER:
Dust measurements – considering fluctuation factors
Dustconf – How to improve air quality, Maastricht, 2007
S. 155
- Eurotier 2006, Hannover
Stand: Landwirtschaftlichen Fakultät, Uni Bonn
- Poster im Rahmen des „Cold Chain-Management“, 2nd Workshop, 2006:
„Partikelemissionen in der Schweinemast

13 Kurzfassung

In der LUFTQUALITÄTSRICHTLINIE der EU (1999/30/EG) wurden für Luftschadstoffe Grenzwerte festgelegt, die seit Januar 2005 in Deutschland verbindlich sind. Gegenüber der vorherigen Fassung fand erstmals eine Festlegung und Beschreibung von verschiedenen schützenswerten Gütern statt. Als Schutzgüter werden der Mensch, der Tier- und Pflanzenbestand, ihre Lebensgemeinschaften, Lebensräume und deren Wechselbeziehungen sowie Kultur- und Sachgüter bezeichnet. Mit der Novellierung der TA-Luft und der BImSchV von 2002 wurden die Grenzwertregelungen für partikelförmige Emissionen in deutsches Recht umgesetzt. In der Öffentlichkeit wird über Feinstaubbelastungen in Städten diskutiert, die hauptsächlich durch Industrieanlagen und Verkehr verursacht werden. In diesem Zusammenhang zeigen arbeitsmedizinische Untersuchungen die gesundheitsschädigende Wirkung der Staubpartikel auf die Atemwege des Menschen. Die Art dieser Schädigungen hängt von verschiedenen physikalischen und chemischen Parametern der Partikel ab (KAPPOS et al., 2003). Relevante Faktoren sind die Größe, die Dichte und die Form. Anders als in industriellen Bereichen ist über die physikalischen Eigenschaften der partikelförmigen Emissionen aus Nutztierställen in Abhängigkeit von Tierart und Haltungsform jedoch nur wenig bekannt.

Gegenstand des hier beschriebenen und abgeschlossenen Forschungsvorhabens war die systematische Analyse der Zusammensetzung von Partikelemissionen aus Stallanlagen verschiedener Tierarten (Schweine, Rinder, Hühner und Puten) in unterschiedlichen Haltungsverfahren. Die Ergebnisse der Untersuchung bieten wissenschaftliche Vergleichsmöglichkeiten der Quellemissionen aus unterschiedlichen Haltungssystemen innerhalb verschiedener Tierarten. Zudem liefern die Ergebnisse realistische Werte für die Quellemissionen von Stallanlagen in NRW.

Es konnten verschiedene methodische Faktoren bestimmt werden, die zur Ermittlung von Partikelemissionsfaktoren eine wichtige Rolle spielen. Dabei ist die Datengrundlage einer 24-Stunden-Messung als kleinstes Auswertungsintervall zu betrachten, da Halbstundenmittelwerte um bis zu 300 % vom Tagesmittel abweichen können und der Luftvolumenstrom sowie die Tieraktivität erheblichen Einfluss auf den Verlauf der Partikelkonzentration haben. Weiterhin ist eine isokinetische Probennahme im Abluftstrom die Voraussetzung für eine ordnungsgemäße Erfassung der Partikelkonzentration. Das Management des Landwirts ist als Bindeglied zwischen eingesetzter Technik, Klimabedingungen und Tierverhalten zu sehen. Durch gezielte Steuerung der Anlagen in Abhängigkeit von klimatischen Randbedingungen kann er in das Emissionsgeschehen

eingreifen. Um einen durchschnittlichen Emissionsfaktor bezogen auf ein Jahr zu kalkulieren, sind Messungen in den verschiedenen Jahreszeiten unter möglichst „typischen“ Praxisbedingungen durchgeführt worden.

Für die Partikelkonzentrationsmessungen wurden Aerosolspektrometer eingesetzt. Dabei werden die Stäube durch eine Fraktionierung in Partikelgrößen anhand ihres durch Streulicht bestimmten Querschnitts beschrieben. Die hier gewählte Methode zur Einteilung der Partikelgrößen lässt Vergleiche mit anderen z.B. arbeitsmedizinischen Untersuchungen zu. Die Erfassung des Luftvolumenstroms erfolgte in den zwangsgelüfteten Stallsystemen mit Messventilatoren und in den freigelüfteten Rinderställen mit der Tracergas-Abklingmethode (SF_6). Die Darstellung der Ergebnisse wurde auf Basis von Partikelmassenkonzentrationen (mg m^{-3}) und der Quellemission ($\text{g h}^{-1}\text{GV}^{-1}$) vorgenommen. In die Berechnung eines Jahresmittelwertes für die Partikelemission sind die Daten aus den Sommer- und Wintermessungen unter hiesigen Klimabedingungen zu jeweils 25 % und die Daten aus den Übergangsmessungen zu 50 % eingegangen.

In der konventionellen Schweinehaltung auf Vollspaltenboden werden die Grenzwerte der TA-Luft bei den heutigen Bestandsgrößen in NRW nicht erreicht. Eingestreute Systeme dagegen emittieren höhere Staubfrachten und sind hinsichtlich der Emissionsmassenströme kritischer zu betrachten. Verbessertes Tierschutz und höhere Umweltbelastungen stehen hier in einem Zielkonflikt. Im Rinderbereich entsprechen die durchschnittlichen Partikelkonzentrationen der Hintergrundkonzentration. Lediglich während der Fütterungs- und Melkzeigen steigen die Emissionen auf ein Niveau oberhalb der Stallumgebung an. Auf Grund der Geflügelpest waren in der Geflügelhaltung keine weiteren Messungen möglich. Eine Korrektur der Messdaten in der Legehennenhaltung musste vorgenommen werden, da an den Messtagen keine Möglichkeit bestand die Partikelkonzentration direkt im Abluftstrom zu erfassen. Somit können die Daten aus diesen Stallsystemen leider nur als grobe Abschätzung der Partikelemission ausgelegt werden.

Der Grenzwert der Partikelmassenkonzentrationen in der Abluft aus der TA-Luft von 20 mg m^{-3} wird in keinem der untersuchten Stallsysteme erreicht.

Mit der eingesetzten Partikelmesstechnik war es möglich, Größenverteilungen und Tagesverläufe der Massenkonzentrationen vorzunehmen. Diese Tagesverläufe zeigen charakteristische Unterschiede zwischen und innerhalb der Tierarten in verschiedenen Haltungssystemen. Durch die Bestimmung von Partikeldichten und Sedimentationsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Tierarten konnten weitere physikalische Eigenschaften der Staubpartikel näher untersucht werden. Zusammen mit diesen Eigenschaften und den Partikelverteilungen sowie den Tagesverläufen könnte eine Datengrundlage für Ausbreitungssimulationen geschaffen werden.