

Forschungsbericht

Nr. 169

Feinstaubbelastungen in Tierställen - Situationsbewertung und Minderungsmaßnahmen

Verfasser:

Prof. Dr. agr. W. Büscher
Dr. agr. J. Henseler-Paßmann
Dipl.-Ing. agr. A. Schmithausen

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 Klimaschutz,
Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes
Nordrhein-Westfalen
Bonn, Juli 2012

ISSN 1610-2460

Projektleitung: Prof. Dr. agr. Wolfgang Büscher

Projektbearbeiter: Dr. agr. Jessica Henseler-Paßmann
Dipl.-Ing. agr. Alexander Schmithausen

Institut für Landtechnik
Nussallee 5
53115 Bonn

Zitiervorschlag:

BÜSCHER, W.; J., HENSELER-PABMANN; A., SCHMITHAUSEN (2012):
Feinstaubbelastungen in Tierställen - Situationsbewertung und Minderungsmaßnahmen.
Landwirtschaftliche Fakultät der Universität Bonn, Schriftenreihe des Lehr- und
Forschungsschwerpunktes USL, Nr. 169, 212 Seiten.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Anhang Tabellenverzeichnis.....	X
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole.....	XII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielsetzung und Arbeitsprogramm	2
2 Literaturanalyse	4
2.1 Stallstäube und deren Wirkung auf die Atemwege von Mensch und Tier	4
2.2 Definition von Bioaerosolen.....	7
2.3 Partikeldurchmesser.....	8
2.3.1 Aerodynamischer Durchmesser.....	8
2.3.2 Streulichtdurchmesser	9
2.4 Einteilung in Größenfraktionen	9
2.4.1 Chemische Zusammensetzung	14
2.5 Entstehung und Freisetzung von Stallstäuben.....	16
2.5.1 Staubquellen und Staubbestandteile	16
2.5.2 Die Staubkonzentration in der Stallluft	18
2.5.3 Staubeintrag durch Futter	19
2.5.4 Staubeintrag durch die Tiere.....	21
2.5.5 Staubeintrag durch Kot und Urin.....	22
2.5.6 Eintrag durch Einstreumaterial	22
2.5.7 Staubkonzentration im Innenraum	23
2.5.8 Staubemission in der Abluft	24
2.6 Einflussfaktoren auf die Staubkonzentrationen im Innenraum	24
2.6.1 Einfluss der Lüftung	25

2.6.2	Einfluss der Fütterung	25
2.6.3	Einfluss durch Management und Tieraktivitäten.....	26
2.7	Möglichkeiten der Staubreduktion	27
2.8	Minderungsmaßnahmen von Feinstäuben in Stallanlagen	27
2.9	Messtechnik zur Bestimmung von Feinstäuben	28
2.9.1	Gravimetrische Verfahren	29
2.9.2	Optische Verfahren.....	30
2.10	Lüftungssysteme.....	31
2.10.1	Lüftungssysteme in der Schweinehaltung.....	31
	Aufgaben der Lüftung	31
	Zwangslüftungsverfahren	32
	Zuluftsysteme	32
	Strahl Lüftungssysteme.....	32
	Rieselkanallüftung	33
	Porendeckenlüftung	33
	Kombinierte Systeme	33
	Abluftsysteme.....	34
2.10.2	Lüftungssysteme in der Rinderhaltung.....	34
	Trauf-First-Lüftungen.....	34
	Offenfrontstallung	35
	Querlüftungssysteme	36
2.10.3	Lüftungssysteme in der Geflügelhaltung.....	36
2.11	Gesetzliche Rahmenbedingungen.....	37
2.12	Partikelinnenraumkonzentrationen in der Schweinehaltung	40
3	Material und Methoden	44
3.1	Charakterisierung und Darstellung der ausgewählten Versuchsbetriebe	44
3.1.1	Haltungssystem Schwein.....	44
3.1.2	Haltungssystem Rind.....	54
3.1.3	Haltungssystem Geflügel.....	57
3.2	Staubsammeltechnik.....	63
3.3	Chemische Analyse	64
3.4	Bestimmung der Partikelinnenraumkonzentration	64

3.4.1	Messbedingungen	64
3.4.2	Stallklimadaten	65
3.4.3	Ammoniakmessungen	65
3.4.4	Videoaufzeichnungen	66
3.4.5	Erfassung der Feinstaubkonzentration im Innenraum	67
3.5	Belastungsunterschiede zwischen den Funktionsbereichen	68
4	Ergebnisse	70
4.1	Chemische Analyse des gesammelten Tierstallstaubes	70
4.1.1	Haltungssystem Schwein	70
4.1.2	Haltungssystem Rind	71
4.1.3	Haltungssystem Geflügel	72
4.2	Belastungsunterschiede zwischen den Funktionsbereichen	73
4.2.1	Haltungssystem Schwein	73
4.2.2	Haltungssystem Rind	87
4.2.3	Haltungssystem Geflügel	96
4.3	Feinstaubbelastungen in Tierställen	99
4.3.1	Haltungssystem Schwein	99
4.3.2	Haltungssystem Rind	115
4.3.3	Haltungssystem Geflügel	120
4.4	Minderungsmaßnahmen	134
4.4.1	Haltungssystem Schwein	134
4.4.2	Haltungssystem Geflügel	135
5	Diskussion und Handlungsempfehlung	138
5.1	Auswahl der untersuchten Stallsysteme	138
5.2	Bewertung der eingesetzten Messmethodik	138
5.2.1	Staubsammeltechnik	138
5.2.2	Partikelmessstechnik	140
5.2.3	Bewertung der ausgewählten Messpunkte	142
5.2.4	Bewertung der Kameraaufzeichnungen	143
5.3	Bewertung der Messergebnisse	143
5.3.1	Chemische Analyse	143
5.3.2	Homogenitätsanalyse	146

5.3.3	Staubzusammensetzung.....	149
5.3.4	Langzeitmessungen	150
5.3.5	Feinstaubkonzentration im Innenraum	151
5.4	Einflüsse auf die partikelförmigen Emissionen.....	154
5.4.1	Einflüsse von Luftvolumenstrom	154
5.4.2	Einflüsse von Haltung und Management auf die Luftqualität.....	156
5.4.3	Einfluss unterschiedlicher Messtechniken auf Partikelkonzentrationen ...	160
5.4.4	Einflüsse zur Minderung von Partikelkonzentrationen	160
5.5	Fazit und Ausblick.....	161
6	Zusammenfassung	164
7	Literaturverzeichnis	167
8	Anhang.....	183
9	Kurzfassung in Deutsch und Englisch	211

Abbildungsverzeichnis

Abbildung	Seite
Abbildung 1: Schematische Gegenüberstellung der Atemwegsgängigkeit von unterschiedlich großen Partikeln (nach HOPPENHEIDT, 2002).....	4
Abbildung 2: Komponenten von Bioaerosolen (nach NANNEN & BÜSCHER, 2006).....	7
Abbildung 3: Schematische Darstellung der arbeitsmedizinisch-toxikologisch relevanten Anteile der Aerosole in den Atmungsorganen (modifiziert nach DFG, 2009).....	12
Abbildung 4: Staubquellen (nach AARNINK & ELLEN, 2007).....	19
Abbildung 5: Einflussfaktoren auf die Staubkonzentration in Ställen (modifiziert, nach PEDERSEN, 2004).....	24
Abbildung 6: Beispiel zur Abhängigkeit der Staubkonzentration von der Tieraktivität in einem Ferkelstall (nach PEDERSEN, 2004).....	26
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messprinzips eines Aerosolspektrometers (modifiziert nach GRIMM, 2011).....	31
Abbildung 8: System der Trauf-First-Lüftung (nach HAIDN & MÜLLER, 2003).....	35
Abbildung 9: System der Offenfrontstallung (nach HENSELER-PABMANN, 2010).....	35
Abbildung 10: System der Querlüftung (nach HAIDN & MÜLLER, 2003).....	36
Abbildung 11: Grundriss von Maststall 1 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (STERNBERG, 2011).....	45
Abbildung 12: Grundriss von Maststall 2 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (STERNBERG, 2011).....	46
Abbildung 13: Grundriss von Maststall 3 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (STERNBERG, 2011).....	47
Abbildung 14: Grundriss von Maststall 4 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011).....	48
Abbildung 15: Grundriss von Maststall 5 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011).....	49
Abbildung 16: Grundriss von Stall 6 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011).....	51
Abbildung 17: Grundriss von Stall 7 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011).....	53
Abbildung 18: Grundriss von Milchviehstall 1 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (FEUSER, 2011).....	55
Abbildung 19: Grundriss von Milchviehstall 2 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (FEUSER, 2011).....	56

Abbildung 20: Grundriss von Milchviehstall 3 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (FEUSER, 2011)	57
Abbildung 21: Schematischer Querschnitt des untersuchten Stallgebäudes (KTBL, 2006)	59
Abbildung 22: Funktionselemente des EUROVENT EV 625A-EU (verändert nach Big Dutchman International GmbH, Vechta).....	60
Abbildung 23: Querschnitt des Geflügelversuchsstall 2 (JAEGER, 2011).....	61
Abbildung 24: Abbildung des Geflügelversuchsstall 2 (JAEGER, 2011)	62
Abbildung 25: Technische Zeichnung der Horizontalsichte (HENSELER-PABMANN, 2010)	63
Abbildung 26: Schema der Weender-Analyse (nach WEISS et al. 2000)	64
Abbildung 27: Dräger CMS (links), CMS Chip (rechts)	66
Abbildung 28: Installation der Aerosolspektrometer im Schweinestall.....	68
Abbildung 29: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 1	74
Abbildung 30: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 1	75
Abbildung 31: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 2 anhand eines Farb-Kontur-Diagramms.....	76
Abbildung 32: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 2.....	78
Abbildung 33: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 3	79
Abbildung 34: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 3	80
Abbildung 35: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 4.....	82
Abbildung 36: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 4.....	83
Abbildung 37: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 5	85
Abbildung 38: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 5.....	86
Abbildung 39: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Milchviehstall 1.....	88
Abbildung 40: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Milchviehstall 1	90
Abbildung 41: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Milchviehstall 2.....	91
Abbildung 42: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Milchviehstall 2	93

Abbildung 43: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Milchviehstall 3.....	94
Abbildung 44: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Milchviehstall 3	95
Abbildung 45: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum im Geflügelstall 2..	97
Abbildung 46: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Geflügelstall 2.....	98
Abbildung 47: Tagesverlauf (03.09.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 1	100
Abbildung 48: Tagesverlauf (08.09.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 2.....	102
Abbildung 49: Tagesverlauf (11.09.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 3	104
Abbildung 50: Tagesverlauf (04.10.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 4.....	106
Abbildung 51: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für Maststall 5	108
Abbildung 52: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Abferkelstall	109
Abbildung 53: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Wartestall.....	111
Abbildung 54: Vergleich der Partikelmassenkonzentrationen in den untersuchten Ställen an verschiedenen Positionen (Sternberg, 2011).....	114
Abbildung 55: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Milchviehstall 1 .	116
Abbildung 56: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Milchviehstall 2 .	117
Abbildung 57: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Milchviehstall 3 .	119
Abbildung 58: Vergleich drei unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der Partikelmassenkonzentrationen in der Haltung von Legehennen in Kleingruppen.....	122
Abbildung 59: Typische Partikelgrößenverteilung nach Partikelmassen- und Partikelanzahlkonzentrationen in der Kleingruppenhaltung.....	123
Abbildung 60: Gemessene Massenkonzentrationen im Bereich der Abluftkamine im Tagesverlauf für die Partikelgrößenfraktionen PM _{2,5} , PM ₁₀ und Gesamtstaub am 22./23.01.2009	124
Abbildung 61: Gemessene Massenkonzentrationen im Bereich des Arbeitsplatzes im Tagesverlauf für die Partikelgrößenfraktionen PM _{2,5} , PM ₁₀ und Gesamtstaub am 22./23.01.2009	125
Abbildung 62: Vergleich der gravimetrisch bestimmten Partikelmassenkonzentrationen am Arbeitsplatz und im Bereich der Abluftkamine für die Messperioden 1 und 2.....	127

Abbildung 63: Gemessene Partikelmassenkonzentrationen im Bereich der Abluftkamine für die Partikelgrößenfraktionen PM _{2,5} , PM ₁₀ und Gesamtstaub im 48-Stunden-Verlauf vom 22. bis 24.01.2009	128
Abbildung 64: Partikelmassenkonzentration in µg m ⁻³ für PM _{2,5} , PM ₁₀ und PM _{Gesamt} am 01.04.2011 in 1,20 m Höhe.....	129
Abbildung 65: Partikelmassenkonzentration in µg m ⁻³ für PM _{2,5} , PM ₁₀ und PM _{Gesamt} am 29.03.2011 im Kaltscharraum.....	132
Abbildung 66: Verteilung der Partikelmassenkonzentration für PM _{2,5} , PM ₁₀ und PM _{Gesamt}	133
Abbildung 67: Übersicht der technischen Möglichkeiten zur Nachrüstung von emissionsmindernden Maßnahmen in Schweineställen (nach HÖLSCHER (2006))	134
Abbildung 68: Funktionsprinzip der Minderungsmaßnahmen „Umluftfilterung“ und „Öl-Sprüh-Technik“ sowie deren Minderungseffekt auf Staub und Ammoniak in der Stall- und Abluft (HÖLSCHER, 2006)	135
Abbildung 69: Übersicht über die Untersuchungsergebnisse der Dänischen Arbeitsgruppe zur Minderung der Staubemissionen durch Indoor-Maßnahmen nach PEDERSEN (2004)	136
Abbildung 70: Wirksamkeit der trockenen und nassen Umluft-Filterung auf die verschiedenen Staubkonzentrationen im Innenraum in einem Legehennenstall (Gesamtstaub, PM ₁₀ und PM _{2,5}) (MOSTAFA, 2011).....	136
Abbildung 71: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Substratmasse (%) der Staubinhaltsstoffe in verschiedenen Tierställen Saleh (2006).....	145

Tabellenverzeichnis

Tabelle	Seite
Tabelle 1: Partikelfractionen und zugehörige Partikelgrößen (nach DIN EN 481, 1993 und Nannen & Büscher, 2007).....	10
Tabelle 2: Massenanteile luftgetragener Staubpartikel in Schweine- und Masthähnchenställen (nach SEEDORF & HARTUNG, 2002).....	13
Tabelle 3: Inhaltsstoffe von Schweinestallstäuben (prozentualer Anteil an der Substratmasse) (verändert nach Seedorf & Hartung, 2002)	15
Tabelle 4: Mineralstoffgehalte von Futtermitteln (nach Kirchgeßner, 2004)	16
Tabelle 5: Immissionswerte für Feinstaub (nach TA LUFT, 2002).....	38
Tabelle 6: Höchstwerte verschiedener Schadstoffe (nach Zoo, 2008)	39
Tabelle 7: Partikelinnenraumkonzentrationen in der Schweinehaltung (nach CAMBRA-LOPEZ ET AL., 2010)	41
Tabelle 8: Mittlere einatembare und alveolengängige Staubkonzentrationen in Milchviehställen (nach Takai et al., 1998).....	42
Tabelle 9: Mittlere einatembare und alveolengängige Staubkonzentrationen in Geflügelställen (nach Takai et al., 1998).....	43
Tabelle 10: Übersicht der untersuchten Schweineställe	44
Tabelle 11: Übersicht der untersuchten Milchviehställe	54
Tabelle 12: Übersicht der untersuchten Geflügelställe.....	57
Tabelle 13: Untersuchungszeiträume der verschiedenen Ställe	65
Tabelle 14: Aufschlüsselung der Weender-Analyse für den untersuchten Mastschweinestallstaub.....	70
Tabelle 15: Aufschlüsselung der Weender-Analyse für den untersuchten Rinderstallstaub.....	72
Tabelle 16: Aufschlüsselung der Weender-Analyse für den untersuchten Geflügelstallstaub	73
Tabelle 17: Direkter Vergleich der Homogenitätsanalysen in den Milchviehställen.....	96
Tabelle 18: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 1	100
Tabelle 19: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 2	102
Tabelle 20: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 3	104
Tabelle 21: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 4	106
Tabelle 22: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 5	108
Tabelle 23: Gegenüberstellung der Messtage für den Abferkelstall	110
Tabelle 24: Gegenüberstellung der Messtage für den Wartestall.....	112

Tabelle 25: Gegenüberstellung der Feinstaubkonzentrationen in den untersuchten Mastschweineeställen	113
Tabelle 26: Gegenüberstellung der Messtage für den Milchviehstall 1	116
Tabelle 27: Gegenüberstellung der Messtage für den Milchviehstall 2	118
Tabelle 28: Gegenüberstellung der Messtage für den Milchviehstall 3	119
Tabelle 29: Gegenüberstellung der Feinstaubkonzentrationen in den untersuchten Milchviehställen.....	120
Tabelle 30: Bestimmung der Gravimetriefaktoren I und II anhand der vorliegenden Messergebnisse für das Aerosolspektrometer II	121
Tabelle 31: Deskriptive Statistik für die Partikelmassenkonzentrationen im Kontrollgang in 1,20 m Höhe	130
Tabelle 32: Vergleich der gemessenen Staubkonzentrationen in der Kleingruppenhaltung mit Literaturangaben aus der Boden- und Volierenhaltung im Arbeitsplatzbereich (Blomberg et al., 2004).....	152

Anhang Tabellenverzeichnis

Tabelle	Seite
Tabelle A 1: Technische Daten des Aerosolspektrometers Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 83404 Ainring.....	183
Tabelle A 2: Kalibrierfaktoren des Aerosolspektrometers I zum Referenzgerät	183
Tabelle A 3: Technisches Datenblatt des eingesetzten Aerosolspektrometers.....	184
Tabelle A 4: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 4 ..	185
Tabelle A 5 Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 5 ...	188
Tabelle A 6: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 6 ..	191
Tabelle A 7: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 7 ..	194
Tabelle A 8: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Milchviehstall 1	197
Tabelle A 9: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Milchviehstall 2	201
Tabelle A 10: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Milchviehstall 3	204
Tabelle A 11: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Schweinebereich in Schweinestall 1	208
Tabelle A 12: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Kontrollbereich in Schweinestall 1	208
Tabelle A 13: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Schweinebereich in Schweinestall 2	209

Tabelle A 14: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Kontrollbereich in Schweinestall 2	209
Tabelle A 15: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Schweinebereich in Schweinestall 3	210
Tabelle A 16: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Kontrollbereich in Schweinestall 3	210

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Beschreibung
μg	-	Mikrogramm
μm	-	Mikrometer
AGW	$[\text{mg m}^{-3}]$	Arbeitsplatz-Grenzwert
BImSchG		Bundes-Immissionsschutzgesetz
CH_4	[ppm]	Methan
CO_2	[ppm]	Kohlenstoffdioxid
DFG		Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN		Deutsche Industrie Norm
d_{ae}		aerodynamischer Durchmesser
GefStoffV		Verordnung zum Schutz von Gefahrenstoffen
GV		Großvieheinheit (1 GV = 500 kg Lebendmasse)
ISO		International Organisation for Standardization
KBE	[1.000 / ml]	Koloniebildende Einheiten
KTBL		Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
MAK	$[\text{mg m}^{-3}]$	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
N		Stickstoff
NfE	$[\text{g kg}^{-1} \text{ TM}]$	Stickstofffreie Extraktstoffe
NH_3	[ppm]	Ammoniak
NIOSH		National Institute of Occupational Safety and Health
OSHA		Occupational Safety Health Administration
PM		Particulate matter
PM_{10}		Particulate matter (Partikel $\leq 10\mu\text{m}$)
$\text{PM}_{2,5}$		Particulate matter (Partikel $\leq 2,5\mu\text{m}$)
ppm		Parts per Million (Teile von einer Millionen)
r		Korrelationskoeffizient
SF_6		Schwefel-Hexafluorid
TM		Trockenmasse
TA-Luft		Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TierSchNutzV		Tierschutz- Nutztierhaltungsverordnung

TP		Tierplatz
V	[m ³]	Stallvolumen
VDI		Verein Deutscher Ingenieure
XA	g kg ⁻¹ TM	Rohasche
XF	g kg ⁻¹ TM	Rohfaser
XL	g kg ⁻¹ TM	Rohfett
XP	g kg ⁻¹ TM	Rohprotein

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Einleitung

Vor dem Hintergrund eines gesteigerten Tierschutz-Bewusstseins in der Gesellschaft, einer kritischen Berichterstattung über zunehmende Stallstauballergien von Tierhaltern und über rechtliche Umweltprobleme im Nahbereich von Stallanlagen sollte den Staubbelastungen im Stall mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Die Problemsituation zum Thema Stallstaub lässt sich auf folgende drei Bereiche fokussieren:

- Stallstauballergien sind für viele Tierhalter zu einem chronischen Gesundheitsproblem geworden, weil durch den Strukturwandel und die Spezialisierung tendenziell immer mehr Arbeits- und Lebenszeit im Stall verbracht wird (KISTNER, 2005).
- Aus veterinärmedizinischer Richtung wird über zunehmende Lungenbeanstandungen bei den Mastschweinen in den Schlachthöfen berichtet, was von den Tierärzten auf zu hohe Ammoniak- und Stallstaubbelastungen zurückgeführt wird (LKV, 2008).
- In immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren werden seit Einführung der derzeit gültigen TA-Luft (2002) auch Grenzwerte für Stallstäube gefordert. Oft kommt es zu heftigen Auseinandersetzungen in der Standortdiskussion von Stallanlagen, weil Stäube als Ursache für potenzielle Krankheiten der Anwohner oder für Tiere in benachbarten Ställen betrachtet werden. Emissionsminderungsmaßnahmen sollten aber schon im Stall ansetzen, wo der Staub generiert wird und mit der Abluft den Stall verlässt, und nicht erst durch eine kostenintensive Abluftbehandlung (ARENDS et al., 2006).

Stallstäuben und Aspekte des Anwohnerschutzes

Mit Hilfe von Emissionsfaktoren wird auch für Stäube der zu erwartende Ausstoß der Stallanlage beim Genehmigungsverfahren quantifiziert. Für die Deposition der Stäube im Nahbereich der Ställe gibt es vereinfachte Ausbreitungsmodelle, die gelegentlich zur Prognose zum Einsatz kommen (TA-LUFT, 2002). Fühlen sich die Anwohner von der

Anlage bedroht und können die benötigten Mindestabstände nicht eingehalten werden, steht den Landwirten oft nur die Abluftreinigung als Gegenmaßnahme zur Verfügung (KAPPOS et al., 2003). Stallinnenraum-Techniken zur Minderung der Stallstaubkonzentration, von denen auch die Tiere und das Stallpersonal profitieren würden, werden leider nicht diskutiert, weil es keine Minderungsfaktoren bzw. zu wenige Untersuchungen hierzu gibt (PEDERSEN, 2004). Ebenfalls zu diesen Fragen sollen die geplanten Untersuchungen einen Beitrag zur Versachlichung leisten.

In den letzten 10 bis 20 Jahren wurden numerische Simulationsmethoden zur Vorhersage von Luftströmungen im Modellmaßstab und Originalmaßstab entwickelt (THANH et al. 2007). Allerdings sind diese Modelle nur in der Lage, Gas- aber keine Partikelströmungen in der Raumluft zu berücksichtigen. Um diese Modelle zu entwickeln und zu validieren, müssen neben den klimatischen Parametern: Temperatur, Luftfeuchtigkeit, und Luftgeschwindigkeit im Stallinnenraum der Luftvolumenstrom und die aerodynamischen Eigenschaften (Sedimentation, Suspension, Resuspension und Agglomeration) der unterschiedlich großen Partikel im Luftstrom berücksichtigt werden (DESTA et. al. 2004; KRAUSE & MÜLLER, 2007). Zu diesen Eigenschaften wurden vom Antragsteller und der Arbeitsgruppe aus Physikern und Tier-Technikern Untersuchungen in Prüfständen durchgeführt. Allerdings standen dabei Immissionsprobleme im Vordergrund und nicht Aspekte der Innenraum-Luftqualitätsprognose.

1.2 Zielsetzung und Arbeitsprogramm

Aus den oben genannten Gründen sollen mit dem Forschungsprojekt vorrangig zwei Ziele verfolgt werden:

Ziel 1: In verschiedenen Stallsystemen sollen Staubbelastungsprofile im Innenraum über den Tag messtechnisch ermittelt werden, um eine sachgerechte Situationsbewertung bei den verschiedenen Tierarten in typischen Ställen vornehmen zu können.

In der vorliegenden Arbeit wurden daher verschiedene Stallungen von Schweinen, Milchvieh und Geflügel, die sich hinsichtlich ihres baulichen Konzepts und der Zuluftführung unterschieden, untersucht. Zur Bestimmung der Partikelinnenraumkonzentration wurden zwei 15 Kanal Aerosolspektrometer (Modell 1.108 der Firma Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG) verwendet. Bei den Messungen in den Schweinestallungen erfassten die Messgeräte zum einen die Feinstaubbelastung im

Schweinebereich und zum anderen im Bereich des Kontrollganges. Die Messgeräte zeichneten 15 verschiedene Größenklassen von $> 0,3$ bis $> 20,0 \mu\text{m}$ auf. Das Messintervall betrug eine Minute. Die Versuche wurden nach der VDI Richtlinie 2463 durchgeführt. Zusätzlich wurden im Stall zwei Dome-Kameras der Firma Gutkes GmbH, Hannover installiert. Durch die Videoüberwachung der Abteile konnten die Tieraktivitäten sowie die Kontrollzeiten beobachtet werden. Bei der späteren Auswertung der Partikelmassenkonzentrationen im Stall konnten die Ereignisse im Stall den Konzentrations-Peaks zugeordnet werden. Weiterhin wurden Versuche zur Homogenität der Feinstaubbelastungen im Raum durchgeführt. Hierzu wurden zwei parallele Messlinien in Längsrichtung des Stalles bestimmt. Auf diesen Messlinien wurden zehn Messpunkte in gleichmäßigen Abständen verteilt. An den einzelnen Messpunkten wurden die Aerosolspektrometer installiert und verblieben dort für jeweils zehn Minuten. Die Aerosolspektrometer zeichneten die Messdaten in einem Intervall von sechs Sekunden auf. Die Partikelmassenkonzentration der 15 Größenklassen wurde zu $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ zusammengefasst. Die $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ Werte der Partikelmassenkonzentration wurden in Abhängigkeit der Messpunkte zu einer Matrix konvertiert. Anhand von Kontur-Farbdiagrammen konnte eine Übersicht der Feinstaubbelastung im Innenraum ermöglicht werden.

Der lückenhafte Kenntnisstand gibt Anlass, die Forschungsarbeit in diesem Bereich weiter voranzutreiben. Mittels der Sammlung und Verdichtung von Datenmaterial über Partikelinnenraumkonzentrationen in typischen Tierhaltungsanlagen soll diese Arbeit einen Beitrag zur Eruiierung der aktuellen Belastungssituation durch Stallstäube für Mensch und Nutztiere leisten.

Ziel 2: Ausgehend von einer Literaturanalyse sollen die im praktischen Einsatz befindlichen Staubminderungsmaßnahmen erfasst, beschrieben und punktuell in ihrer Wirksamkeit überprüft werden. Dabei soll es nicht nur um die Wirksamkeit der Maßnahmen für den arbeitenden Menschen gehen, sondern auch um Belastungsminderungen für die im Stall lebenden Tiere und den Staubaustoß in die Umwelt über die Abluftkamine.

2 Literaturanalyse

2.1 Stallstäube und deren Wirkung auf die Atemwege von Mensch und Tier

Stallstaub kann verschiedene Auswirkungen auf die Gesundheit von Mensch und Tier haben. Die Effekte werden maßgeblich von der Größe der eingeatmeten Partikel (Abbildung 1) und von deren Beladung mit toxischen oder gasförmigen Stoffen bestimmt (SEEDORF & HARTUNG, 2002). Nach AARNINK et al. (1999) wird neben den Pilzsporen besonders den Endotoxinen eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Unter anderem werden Endotoxine als Bestandteil der Zellwand gramnegativer Bakterien nach dem Zerfall dieser Bakterien freigesetzt. Sie werden auch für Atemwegserkrankungen bei in der Tierhaltung arbeitenden Menschen verantwortlich gemacht.

Messungen von Staubkonzentrationen am Arbeitsplatz werden gemäß der Gefahrstoffverordnung durchgeführt. Einzuhaltende Grenzwerte sind als MAK-Werte für Gesamtstaub und verschiedene Größenfraktionen dort aufgeführt (WÜRBS, 2005). Typischerweise wird zwischen Gesamtstaub PM₁₀, PM₁₀ (Stäube kleiner 10 µm) und PM_{2,5} (Stäube kleiner 2,5 µm) unterschieden. Diese Unterteilung wird unter anderem auch benötigt, um die Eindringtiefe in den Atemtrakt, wie in Abbildung 1 dargestellt, zu berücksichtigen (ARMBRUSTER, 1984).

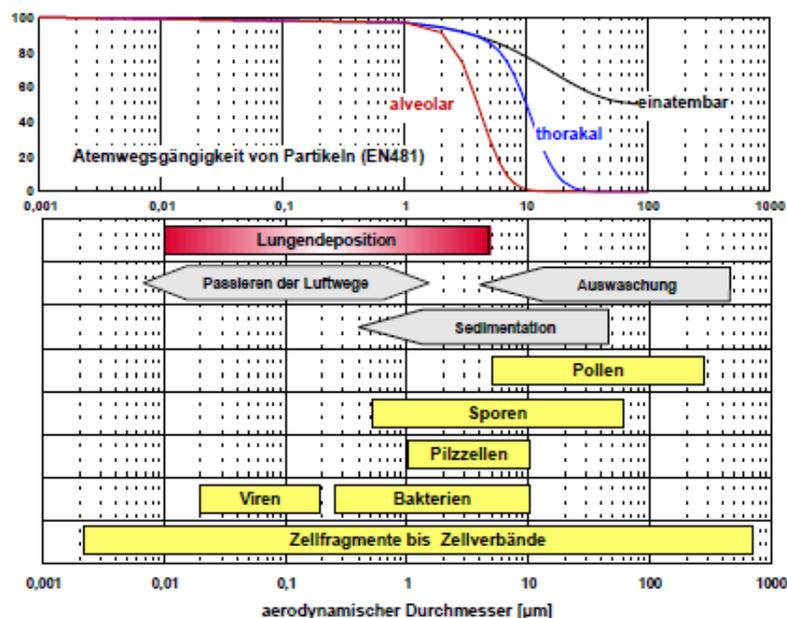


Abbildung 1: Schematische Gegenüberstellung der Atemwegsgängigkeit von unterschiedlich großen Partikeln (nach HOPPENHEIDT, 2002)

Bei der Erfassung der Partikelkonzentrationen am Arbeitsplatz, geht man von einer Langzeitbelastung und der davon ausgehenden Wirkung auf die Atemwege aus. Dauerhaft hohe Belastungen senken die Leistungsfähigkeit der Lunge und steigern die Anfälligkeit gegenüber respiratorischen Erkrankungen. In Abhängigkeit von der Feinstaubkonzentration im Arbeitsbereich werden Atemschutzmasken von den Berufsgenossenschaften für das Stallpersonal gefordert (HOPPENHEIDT & MÜCKE, 1998).

Die Verteilung des eingeatmeten Aerosols auf die Teilbereiche der Atemwege wird neben den Teilcheneigenschaften laut DFG (2009) stark beeinflusst durch:

- Individuelle Unterschiede in der Anatomie der Atemwege.
- Individuelle Atemgewohnheiten, insbesondere durch den unterschiedlichen Übergang von der Nasen- zur Mundatmung bei körperlicher Arbeit sowie unterschiedliche Atemfrequenzen, Atemströme und damit Atemvolumina.
- Pathophysiologische Veränderungen der Atemorgane.

Nach HELLER & KÖLLNER (2007) können angesichts der spezifischen Belastungssituation in Nordrhein-Westfalen, die durch lokal bzw. regional auftretende hohe Viehdichte geprägt ist, mögliche Folgen für Gesundheit der Bewohner und Bewohnerinnen im kleinräumigen Umgebungsbereich von Nutztierbetrieben nicht ausgeschlossen werden.

Was die Messpunkte für die Innenraumkonzentrationen angeht, wird von einer homogenen Verteilung der Stäube ausgegangen, die jedoch in großen Räumen (wie Stallungen) nicht vorhanden ist. Es wird allgemein gefordert, die Konzentrationsgradienten im Stallinnenraum in die Betrachtung des Arbeitsplatzgrenzwertes mit einzubeziehen (AARNINK et al., 1999).

Für Tiere bedeutet eine nicht homogene Raumlufverteilung, dass Bereiche innerhalb des Stallabteils weniger gut durchlüftet und die Belastungen unterschiedlich sind. Diese Situation findet ihren Niederschlag in der Beanstandung vieler Lungen im Schlachthof. Lungenspitzen-Nekrosen und eitrige Lungenbeutel werden von den Veterinär-Aufsichtsbehörden in der Regel auf zu hohe Staub- und Ammoniakkonzentrationen zurückgeführt (LKV, 2008). Das Rind ist im Vergleich zu anderen Nutztieren weniger stark von Atemwegserkrankungen betroffen. In BARDELLA (2002) wird dennoch über die Ursachen einer möglichen Erkrankung diskutiert. Die Ursachen beim Rind liegen in der

besonderen Anatomie des Tieres. Die Lunge ist im Gegensatz zum Tierkörper relativ klein. Weiterhin muss die Lunge mit sauerstoffreicher Luft ventiliert werden, um die heute geforderten Höchstleistungen zu erbringen. Daraus resultiert laut BARDELLA (2002) eine hohe Kontaminationsgefahr bei erregerhaltiger Luft.

Um eine Atemwegserkrankung bei jungen Kälbern zu vermeiden, empfiehlt HOPPENHEIDT (2002) eine möglichst frühe Aufstallung in Kälberhütten an der Außenluft.

Auch bei Sport- und Freizeitpferden wird über eine zunehmende Anzahl chronischer Atemwegserkrankungen berichtet. Dort wird intensiv über alternative Einstreumaterialien, die Strohqualität von Großballen und den Einsatz von Staubminderungsmaßnahmen im Stall diskutiert (SZABO, 2007).

In zwangsbelüfteten Stallanlagen hat die Lüftungsanlage die Aufgabe, durch eine gleichmäßige Luftströmung im Stall, Schadgase, Wasserdampf und Wärme aus dem Innenraum abzuführen. Dabei stellen sich durch wechselnde klimatische Randbedingungen auch unterschiedliche Luftverteilungen und Luftgeschwindigkeiten ein. So sind nach DIN 18 910-1 (2004) im Sommer hohe Luftvolumenströme notwendig, um vornehmlich die Wärme abzutransportieren. Hitzestress hat negative Auswirkungen auf die Herz-Kreislaufaktivität und die biologischen Leistungen in der Tierhaltung. Unter Winterbedingungen sind dagegen nur geringe Luftvolumenströme vorhanden, die sicherstellen sollen, dass Kohlendioxid und Wasserdampf abtransportiert werden mit gleichzeitiger Prämisse, die Wärmeverluste über die Lüftungsanlage so gering wie möglich zu halten. Bei der Wahl des Lüftungssystems sollte darauf geachtet werden, dass gute klimatische Bedingungen für die Tiere geschaffen und Emissionen möglichst gering gehalten werden (DAWSON, 1990). Für die verschiedenen Stall- und Lüftungssysteme sowie für die verschiedenen Tierarten gibt es derzeit kaum belastbare Literatur zur Feinstaub-Belastungssituation von Mensch und Tier. Hier sollen die geplanten Untersuchungen helfen, Wissenslücken zu schließen.

2.2 Definition von Bioaerosolen

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die partikelförmigen Komponenten der Luft als Staub zusammengefasst. Genauer handelt es sich bei Stäuben um disperse Verteilungen fester Stoffe in Gasen, die durch mechanische Prozesse oder durch Aufwirbelung entstehen (DFG, 2009; GALLMANN, 2009).

Stäube zählen gemeinsam mit den Rauchen und Nebeln zu den Aerosolen. Diese bestehen aus Gasen oder Luft, in denen flüssige und/oder feste Partikel über einen längeren Zeitraum in feinstverteilter Form vorliegen (DFG, 2008 und JUNGBLUTH ET AL., 2005). Die Bezeichnung Bioaerosol umschreibt komplexe luftgetragene Partikel aus unbelebten und belebten Bestandteilen (Abbildung 2). Die Komponenten dieser Konfiguration haben einen biologischen Ursprung oder die Entwicklung einer biologischen Aktivität gemeinsam. Mikroorganismen wie zum Beispiel Bakterien, Pilze, Viren, Milben, Hefen oder Protozoen, aber auch deren Zellwandbestandteile und Stoffwechselprodukte werden den belebten Bestandteilen der Bioaerosole zugeordnet. Auf der unbelebten Seite finden sich die Staubpartikel wieder (NANNEN & BÜSCHER, 2007; SEEDORF & HARTUNG, 2002; HOOPENHEIDT, 2002).

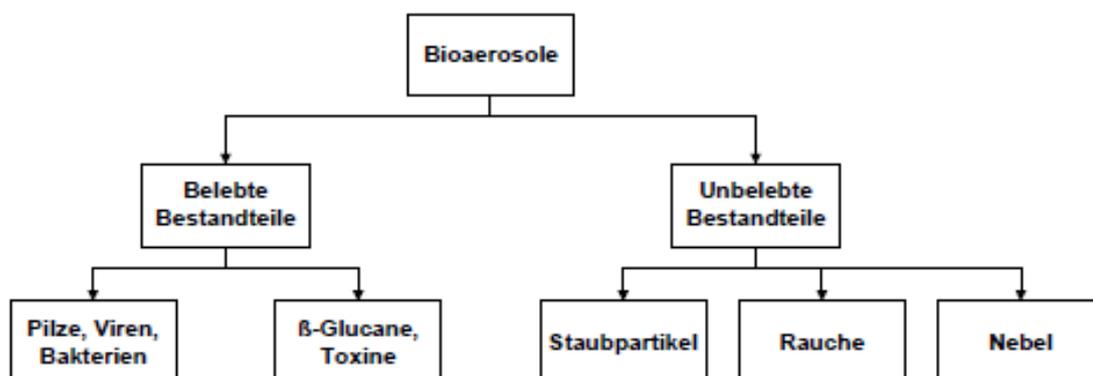


Abbildung 2: Komponenten von Bioaerosolen (nach NANNEN & BÜSCHER, 2006)

Durch Agglomeration von belebten und unbelebten Komponenten in der Luft werden so genannte Cluster gebildet (MÜLLER et al., 1977). Da sich ca. 80 % der luftgetragenen Mikroorganismen an Partikel anlagern, dienen diese nicht nur als Vehikel, sondern auch als Substrat.

Nach DFG (2009) wird für diese Komponenten folgende Nomenklatur verwendet:

- Primärteilchen sind kompakte einzelne Teilchen, die im Elektronenmikroskop als solche erkennbar sind.
- Aggregate sind Gruppen fest miteinander verbundener Primärteilchen.
- Agglomerate sind Gruppen von Teilchen, die durch schwache Kräfte, insbesondere Van der Waals-Kräfte, zusammengehalten werden.

Nach HIRST (1995) können Bioaerosole durch infektiöse, allergene oder toxische Eigenschaften sowie durch pharmakologische Wirkungen erheblichen Einfluss auf Lebewesen nehmen.

Die diversen Bestandteile eines Bioaerosols können starke räumliche und zeitliche Konzentrationsschwankungen aufweisen, so dass die analytische Erfassung der Bioaerosolbestandteile hohe Anforderungen sowohl an die Versuchsplanung als auch an die Durchführung stellt (HOPPENHEIDT & MÜCKE, 1998).

2.3 Partikeldurchmesser

In Bioaerosolen vorkommende Partikel sind nicht sphärisch. Dies macht es unmöglich, ihre Größe durch einen einzelnen geometrischen Wert zu umschreiben. Um dennoch eine Veranschaulichung für die Größe eines unregelmäßig geformten Partikels zu schaffen, kann ein Äquivalenzdurchmesser verwendet werden. Unter diesem versteht man die Zuordnung des geometrischen Durchmessers eines kugelförmigen Partikels, das die gleiche physikalische Eigenschaft besitzt oder dasselbe Verhalten in einem Prozess aufweist, wie das zu charakterisierende nicht kugelförmige Partikel (GAIL & HORTIG, 2004).

2.3.1 Aerodynamischer Durchmesser

Als aerodynamischer Durchmesser (d_{ae}) eines Partikels beliebiger Form und Dichte wird der Durchmesser einer Kugel mit einer Einheitsdichte von $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ bezeichnet, welche die gleiche Sedimentationsgeschwindigkeit in ruhender und laminar strömender Luft besitzt. Dieser Zusammenhang ist gültig für Teilchen mit einem $d_{ae} > 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ (DFG, 2008).

2.3.2 Streulichtdurchmesser

Der Streulichtdurchmesser wird über das Verfahren der Streulichtmessung definiert. Nach NANNEN & BÜSCHER (2007) entspricht dieser dem Durchmesser eines Partikels, welcher das gleiche Streulichtspektrum erzeugt, wie das Äquivalentpartikel. Die Intensität der Lichtstreuung ist dabei abhängig von der Form des Partikels in Verbindung mit seiner Lage im Raum sowie von der chemischen Zusammensetzung des Partikels.

2.4 Einteilung in Größenfraktionen

Natürliche Aerosole, wie sie beispielsweise in der Tierhaltung vorkommen, sind polydispers, d.h. sie umfassen Partikel verschiedener Größen. Diese Partikelgrößen erstrecken sich vom submikroskopischen Bereich ($< 1 \mu\text{m}$) bis hin zu mehr als $100 \mu\text{m}$. Die Partikelgröße hat sich als Richtwert für die Einteilung der Partikel in Fraktionen durchgesetzt. Neben Form und Dichte der Partikel entscheidet die Größe im Wesentlichen über den Transport und die mögliche Deposition von Feststoffpartikeln in den Atemwegen (DFG, 2008 und HARTUNG 2007). Zusammensetzung und Wirkung der Bioaerosole bleiben im Rahmen der Differenzierung nach Größenfraktionen ungeachtet. Eine allgemeingültige Definition für die einzelnen Partikelfraktionen gibt es nicht. Sowohl in der wissenschaftlichen Literatur, als auch in verschiedenen rechtlichen Kontexten erfolgt die Einteilung in Fraktionen nach unterschiedlichen Maßstäben. Damit einher gehen Abweichungen im Verständnis und der Verwendung von Begrifflichkeiten. Im Bereich des Arbeitsschutzes findet vor allem die DIN EN 481 (1993) Anwendung. Die Tabelle 1 gibt Aufschluss über die Partikelfraktionen und die zugehörige Partikelgrößen gemäß DIN EN 481.

Tabelle 1: Partikelfractionen und zugehörige Partikelgrößen (nach DIN EN 481, 1993 und Nannen & Büscher, 2007)

Fraktion	Partikelgröße	Beschreibung
arbeitsmedizinisch		
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, die über den Kehlkopf hinaus zur Lunge vordringen
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 %		

Die häufig verwendete Abkürzung PM steht für Particulate Matter, um die Partikel anhand ihres Durchmessers einzuteilen. Eine Definition der für den Bereich des Umweltschutzes relevanten Staubfraktionen erfolgt in der Richtlinie 2008/50/EG (2008):

- PM_{2,5} sind die Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass gemäß EN 14907 passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.
- PM₁₀ sind die Partikel, die einen gröbselektierenden Lufteinlass gemäß EN 12341 passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % aufweist.

Im wissenschaftlichen Kontext wird im deutschsprachigen Raum häufig eine der beiden oben angeführten Begriffsbestimmungen herangezogen. Im Rahmen dieser Arbeit wird

unter anderem für Analyse und Auswertung auf die Definition gemäß der Richtlinie 2008/50/EG zurückgegriffen.

Die Einteilung der Partikelgrößen wird nach WICHMANN (2002) wie folgt vorgenommen:

- Der Gesamtschwebstaub (Total Suspended Particulates, TSP) umfasst bei der derzeitigen Messung mittels Beta-Absorption Partikel, mit einem Durchmesser unter 15 μm .
- Der inhalierbare Schwebstaub umfasst Partikel unter 10 μm Durchmesser.
- Der lungengängige Schwebstaub umfasst Partikel unter 2,5 μm . Er wird auch als Feinstaub (FP) bezeichnet.
- Die ultrafeinen Partikel (UP) umfassen Teilchen unter 0,1 μm .

Die ultrafeinen Partikel sind laut DFG (2009) durch einen Mobilitäts-Äquivalentdurchmesser gekennzeichnet. Im Vergleich zu größeren Partikeln sind bei dieser Fraktion die große spezifische Oberfläche, die leichtere Löslichkeit und die Aufnahme in die Zelle signifikant. Ultrafeine Partikel können aufgrund ihrer hohen diffusiven Eigenbeweglichkeit miteinander koagulieren, so dass es zur Bildung von größeren Teilchen kommt. Weiter wird die Lebensdauer dieser Fraktion in WICHMANN (2002) als Bruchteil von Sekunden bis wenige Stunden in Abhängigkeit von der Aerosolkonzentration und den thermodynamischen Bedingungen bezeichnet.

Eine alternative Darstellungsweise für Staubeinteilungen zeigt die nachfolgende Abbildung 3.

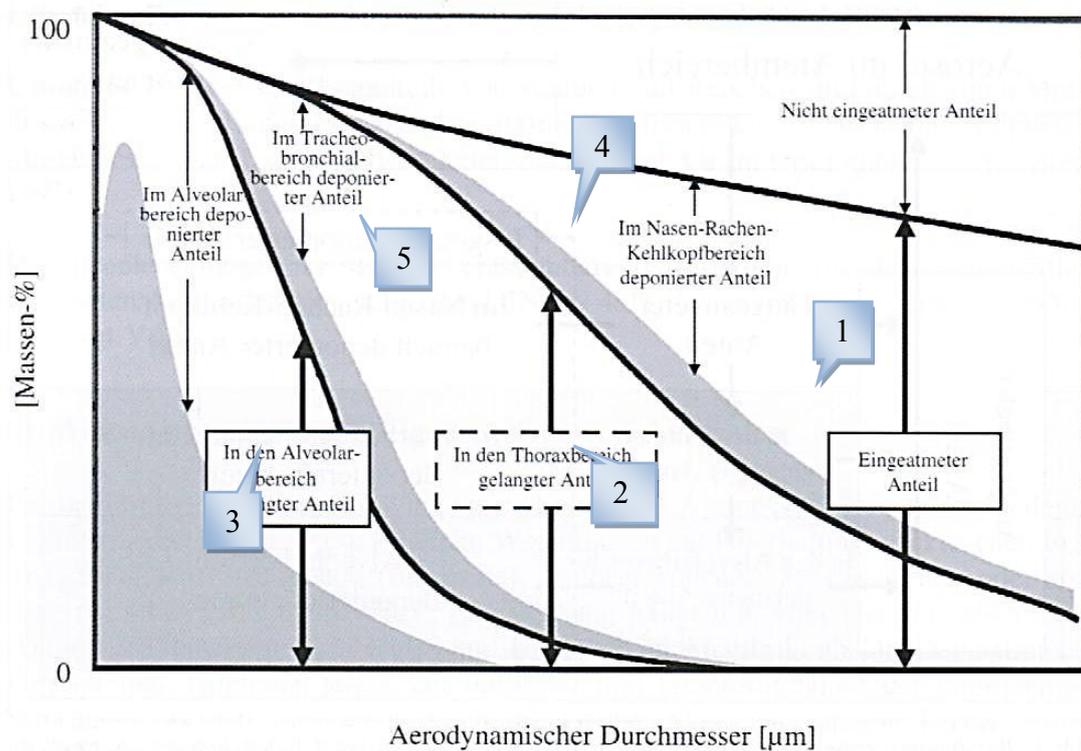


Abbildung 3: Schematische Darstellung der arbeitsmedizinisch-toxikologisch relevanten Anteile der Aerosole in den Atmungsorganen (modifiziert nach DFG, 2009)

1. **Einatembare Fraktion = Gesamtstaub (PM 100):** (inhalable) der durch Mund und Nase einatembare Massenanteil aller Schwebstoffe.
2. **Thoraxgängige Fraktion (PM 10):** (thoracic) der über den Kehlkopf hinaus eindringende Massenanteil der eingeatmeten Partikel.
3. **Alveolengängige Fraktion = Feinstaub (PM 2,5):** (respirable) der bis in die nichtcilierten Luftwege vordringende Massenanteil der Partikel.
4. **Extrathorakale Fraktion (PM 100 – PM 10):** Diese Fraktion ergibt sich aus der Differenz zwischen der einatembaren und der thoraxgängigen Fraktion. Partikel, die nicht über den Kehlkopf hinaus vordringen.
5. **Tracheo-Bronchiale Fraktion (PM 10 – PM 2,5):** Diese Fraktion ergibt sich aus der Differenz zwischen der thoraxgängigen und der alveolengängigen Fraktion. Diese gelangen über den Kehlkopf hinaus, aber nicht in die nichtcilierten Luftwege (DFG, 2009; GALLMANN, 2003; HARTUNG, 2004).

Eine Studie von SHEFFIELD (2011) zur Partikelinnenraumkonzentration und -emission in und aus querbelüfteten Milchviehställen mit eingestreuten Liegeboxen ergab folgende Ergebnisse: $78,2 \mu\text{g m}^{-3}$ in der Nähe des östlichen Endes des Stalls; $74,8 \mu\text{g m}^{-3}$ in der Stallmitte und $94,8 \mu\text{g m}^{-3}$ in der Nähe des westlichen Endes des Stalls. Diese Werte sind zehn- bis hundertmal niedriger als aufgezeichnete Staubkonzentrationen von Geflügel- und Schweineställen.

Wie in Tabelle 2 ersichtlich ist, fällt in Geflügelställen mehr Staub als bei den Schweinen an. Bei Schweinen entsteht sechsmal mehr Staub als in Rinderställen (PEDERSEN, 2004; SEEDORF & HARTUNG, 2002).

Tabelle 2: Massenanteile luftgetragener Staubpartikel in Schweine- und Masthähnchenställen (nach SEEDORF & HARTUNG, 2002)

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

Nach SEEDORF & HARTUNG (2002) liegen die Werte für einatembaren Staub (PM_{100} = Gesamtstaub) bei $1,21$ bis $2,67 \text{ mg m}^{-3}$ und für alveolengängigen Staub ($\text{PM}_{2,5}$ = Feinstaub) bei $0,10$ bis $0,29 \text{ mg m}^{-3}$, und somit laut der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG, 2006) im vorgegebenen Rahmen der MAK-Werte.

LOHMANN (2004) gibt für einatembaren Staub in der Schweinemast folgende Werte an:

- Vollspaltenboden: $1,66$ bis $3,97 \text{ mg m}^{-3}$
- Teilspaltenboden: $1,56$ bis $4,15 \text{ mg m}^{-3}$
- Stroh (Tiefmist): $1,28$ bis $2,11 \text{ mg m}^{-3}$

Diese Ergebnisse liegen ebenfalls im Rahmen der vorgegebenen MAK-Werte der Deutschen Forschungsgesellschaft. Des Weiteren ist festgestellt worden, dass bei eingestreuten Haltungssystemen mehr alveolengängiger Staub ($PM_{2,5}$ = Feinstaub) auftritt als bei nicht eingestreuten Systemen (HARTUNG, 2004 und HENSELER-PABMANN, 2010).

Der Anteil der PM_{10} -Partikel (thoraxgängige Fraktion) am Gesamtstaub liegt bei über 40 % (PEDERSEN, 2004). Der mittlere Anteil des alveolargängigen Staubes beträgt in der Endmast 12,4 %. Feinstaub spielt im Schweinestall die größte Rolle, da sein Anteil bei etwa 84 % liegt (NANNEN, 2007; SEEDORF & HARTUNG, 2002).

Für die Messung der Partikelgrößenverteilung im Bereich der feinen und ultrafeinen Partikel werden nach ZIMMERMANN (2002) vor allem Mobilitätsklassierer (differential mobility analyzer, DMA) eingesetzt. Es wird beschrieben, dass die Partikel des polydispersen Aerosols durch eine radioaktive Quelle oder eine Corona-Entladung elektrisch aufgeladen werden, wobei jedes Partikel im Bereich von 3 bis 700 nm nur eine einfache Elementarladung trägt.

Um die Größe von Partikeln im Bereich 0,7 bis 20 μm zu bestimmen, verwendet man eine Technik, welche die Geschwindigkeit von Einzelpartikeln in einem beschleunigten Gas (Expansion des Aerosols durch eine Düse) erfasst. Aufgrund ihrer Trägheit erreichen größere Partikel nach ZIMMERMANN (2002) während der Beschleunigung eine niedrigere Geschwindigkeit als entsprechend kleinere Partikel. Weiterhin lässt sich aus der Geschwindigkeit der aerodynamische Durchmesser bestimmen.

2.4.1 Chemische Zusammensetzung

Aerosolpartikel in Schweineställen bestehen bis zu 90 % aus organischer Substanz (AARNINK et al., 1999; AENGST, 1984). Eine chemische Analyse erlaubt es, die Herkunft des Stallstaubes näher zu bestimmen. Für die Untersuchung wird häufig die Weender-Analyse herangezogen. Dabei handelt es sich um ein standardisiertes Verfahren, welches ursprünglich aus der Futtermittelanalytik stammt. Die Tabelle 3 verschafft einen Überblick über die Inhaltsstoffe von Schweinestallstäuben. Besonders erwähnenswert ist der relativ hohe Gehalt an Rohprotein, der in den einzelnen Veröffentlichungen zwischen 23 und 38 % beträgt. Diese Spannweite ist möglicherweise durch unterschiedliche Haltung- und Fütterungskonzepte zu erklären.

Tabelle 3: Inhaltsstoffe von Schweinestallstäuben (prozentualer Anteil an der Substratmasse) (verändert nach Seedorf & Hartung, 2002)

Substrat	Rohwasser	Trocken substanz	Rohasche	Rohprotein	Rohfett	Rohfaser	N-freie Extraktstoffe
AENGST (1984)	13,1	86,9	14,6	23,9	4,3	3,4	-
DONHAM et al. (1986)	-	-	-	22,6	-	-	-
ZEITLER (1988)	12,4	87,9	15,3	30,8	-	-	-
SALEH (2006)	9,8	90,2	14,5	38,4	3,6	1,3	32,5
Alle Angaben in %							

Üblicherweise wird die Weender-Analyse bei der Futtermittelanalyse eingesetzt. Im Analysegang wird das Ausgangssubstrat zunächst in den Wasser- und Trockenmasseanteil unterteilt. Die Trockenmasse (TM) umfasst sowohl anorganische als auch organische Stoffe. Die organischen Stoffe werden, da sie vorwiegend aus Kohlenstoff bestehen, durch Veraschung in einem Muffelofen (550°C) verbrannt. Die anorganische Komponente verbleibt bei der Verbrennung als Rückstand (Rohasche = XA). Mit Hilfe dieses Wertes lässt sich laut KIRCHGEBNER (2004) der Anteil der organischen Masse (organische Substanz) an der TM errechnen.

Weiter bietet die Weender-Analyse die Möglichkeit zur Ermittlung von Rohprotein (XP), Rohfett (XL) und Rohfaser (XF). XP wird dabei standardmäßig nach der Methode von Kjeldahl bestimmt. Der Aufschluss des Substrats erfolgt bei dieser Vorgehensweise mit Schwefelsäure. Daraufhin erhält man den Stickstoffgehalt der untersuchten Substanz, dessen Wert mit 6,25 multipliziert wird, um den XP-Gehalt der Ausgangssubstanz zu errechnen (KIRCHGEBNER, 2004). Ein Ergebnis der Weender-Analyse bezüglich des Rinderstallstaubes liefert SALEH (2006). Hier beträgt die TM 85,8 %, der XA-Gehalt 18,8 %, der XP-Gehalt 29,7 %, XL-Gehalt 6,6 %, XF ebenfalls 6,6 % und die stickstofffreien Extraktstoffe (NfE) 24,1 %. Die relativ hohen Anteile an XA werden mit dem Anteil an Futter erklärt, welches besonders bei Rindern je nach Erntemethode mit Erde bzw. Sand belastet sein kann.

Um die Kohlenhydrate besser zu differenzieren, arbeitet man mit der Methode von VAN SOEST, wo der Anteil an Gerüstsubstanzen (Cellulose, Hemicellulose und Lignin) bestimmt wird.

Die Mineralstoffbestimmung erfolgt mittels Flammen-AAS, eine speziell auf Mineralstoffe ausgerichtete Analysegerät. Die Mineralstoffgehalte der Einstreu- und Futterkomponenten zeigt Tabelle 4. Die Futtermittel weisen unterschiedliche Gehalte an Calcium, Phosphor, Magnesium und Natrium auf, anhand derer eine Aussage über den Anteil des verwendeten Futtermittels z. B. am Gesamt-Kalziumgehalt getroffen werden kann.

Tabelle 4: Mineralstoffgehalte von Futtermitteln (nach Kirchgeßner, 2004)

Futtermittel	Mineralstoffgehalt [g*kg ⁻¹ TM]			
	Ca	P	Mg	Na
Gerstenstroh	4,8	0,8	0,9	3,7
Haferstroh	4,1	1,4	1,1	2,3
Wiesengras (1. Schnitt)	6,8	3,7	2,2	0,58
Wiesengras (2. Schnitt)	9,1	3,9	2,7	1,04
Maissilage	3,9	2,6	2,3	0,4

Bioaerosole können als Komponenten wie bereits erwähnt, unter anderem Kot und Urin enthalten, wobei das daraus resultierende Ammoniak (NH₃) im Gegensatz zu anderen Gasen sehr stark ausgeprägt ist. Nach LAVES (2007) hängt die Konzentration neben dem Aufstellungs- und Entmistungssystem vom Tierbesatz und seiner Stoffwechsellistung sowie der Luftaustauschrate und Stalltemperatur ab

2.5 Entstehung und Freisetzung von Stallstäuben

2.5.1 Staubquellen und Staubbestandteile

Im Vergleich zur Außenluft kann die Luft in Innenräumen nach HOPPENHEIDT & MÜCKE (1998) eine Vielzahl abiotischer und/oder biotischer Inhaltsstoffe enthalten. Ställe, Fressplatzoberflächen, Düngerlager, Silagemieten, Kompostierungsstrukturen und andere

kleinere Quellen können zur Staubbildung beitragen (COPELAND, 2010). In KTBL (2009) sind Staubemissionen aus der Landwirtschaft beschrieben, welche aus Partikeln anorganischer Substanzen, z. B. vom Boden, geformt werden und gleichzeitig Partikel organischer Herkunft von Pflanzen und Tieren beinhalten.

Eine Studie von CHOINIÈRE-FARMSTEAD (1993) zeigt, dass Staub in Viehställen aus zahlreichen Komponenten unterschiedlicher Größe und Form besteht. Weiter wird beschrieben, dass 70 bis 90 % des Staubes organisch sind, was bedeutet, dass er biologisch aktiv ist und mit dem Abwehrsystem des Atmungsapparats reagieren kann. Als organisch werden laut ALTMANN-BREWE & ALTMANN (1999) Futter, Einstreu, Borsten, Haut- oder Federpartikel, Futterzusätze, Medikamentenpartikel und -rückstände angesehen.

Das Futter selbst und der Fütterungsprozess können zu 80 bis 90 % des Gesamtstaubes beitragen. Einstreumaterialien wie Stroh oder Holzspäne können nach EMISSION INVENTORY GUIDEBOOK (2006) auch ausschlaggebende Effekte auf die Partikelkonzentration in der Stallluft haben. Je nach Typ und Menge an Einstreu und seiner Ausbringung kann ihr Beitrag zwischen 55 und 68 % der gesamten luftübertragenen Partikel liegen EMISSION INVENTORY GUIDEBOOK (2006). Weiter wird beschrieben, dass die Tierhaut, das Fell oder das Gefieder der untergebrachten Tiere und deren Kot und Urin Staubkonzentrationen verursachen, die bis zu 12 % zur Gesamtstaubmenge beitragen können. Nach HARTUNG & SPINDLER (2008) ist das Futter mit 80 bis 90 %, die Einstreu mit 55 bis 68 %, die Tiere selbst (z. B. Tierhaare, Hautschuppen) mit 2 bis 12 % und Fäkalien mit einem Anteil von 1 bis 8 % im Staub vertreten.

Eine Studie von ASAY (1984) hat ergeben, dass durch eine Luftströmung über $0,3 \text{ m sec}^{-1}$ das Aufwirbeln des Staubes hervorgerufen wird. Wenn sich in dieser Zone die Futtertröge mit mehligem Futter befinden, kommt es bei mechanischer Durchlüftung zum Ausblasen kleinster Teilchen des Futters aus der Futtermischung. Nach ASAY (1984) ist die Spitzenkonzentration von Staub mit dem Rhythmus der Fütterung und Handhabung mit Streu, sowie mit der Aktivität der Tiere verbunden.

PEDERSEN (1998) beschreibt den Anteil verschiedener Komponenten im Staub in Abhängigkeit von der Partikelkonzentration. Weiter wird beschrieben, dass bei niedrigen Partikelkonzentrationen in der Stallluft abgestoßene Hautreste wesentliche Bestandteile

des Staubes sind, wo hingegen bei höheren Staubbelastungen der größte Teil vom Futter und Stroh ausgeht. In einem Milchviehstall können etwa 10.000.000 Staubpartikel* l^{-1} Stallluft vorhanden sein, wenn verschimmelter Heu oder Getreide verfüttert oder Stroh verteilt werden. Auch bei Verwendung von qualitativ hochwertigem Heu und Stroh werden Staubkonzentrationen von 1.000.000 bis 2.000.000 Staubpartikel l^{-1} Luft beschrieben (CHOINIÈRE-FARMSTEAD, 1993).

Nutztierställe sind nicht nur eine Quelle für Staub, sondern auch für Bakterien, Endotoxine oder Schimmelpilze, die an Staubpartikeln haften. Eine enge Verbindung zwischen der Staubmenge und luftübertragenen Bakterien und ihrer Endotoxine wird in einer Studie von BAKUTIS ET AL. (2004) beschrieben. Die gemessenen Konzentrationen in Milchviehställen waren hier wesentlich geringer als in Schweine- und Geflügelställen. Nach ALTMANN-BREWE und ALTMANN (1999) erreicht der Keimgehalt im Rinderbereich 58 bis 212 KBE l^{-1} Stallluft. Untersuchungen in Milchviehställen ergaben, dass der größte Anteil der Gesamtkeimflora hier auf Staphylokokkus epidermidis zurückzuführen ist (DIEZ, 1977). In SCAIFE (2008) wird der Luftkeimgehalt im Umfeld von Nutztierställen beschrieben. Emissionen in einem Kilometer Entfernung sind nicht selten. Ausgebreitet werden die Keime unter anderem durch die Anhaftung an die Staubpartikel.

2.5.2 Die Staubkonzentration in der Stallluft

Stallstaub entstammt verschiedener Quellen. Seine Bildung und Freisetzung ist von zahlreichen Faktoren und Prozessen abhängig (AARNIK & ELLEN, 2007). Neben den Tieren selbst sind Futter, Fäkalien und im Stall vorhandenes Einstreumaterial als wesentliche Ausgangspunkte anzuführen (SEEDORF & HARTUNG, 2002). Dabei kann der Beitrag der einzelnen Staubquellen in Abhängigkeit von Tierart und Haltungssystem sehr unterschiedlich ausfallen. Untersuchungen von CAMBRA et al. (2010) zeigten, basierend auf chemischen und morphologischen Charakteristika von Partikeln, dass in der einstreulosen Schweinehaltung der meiste Stallstaub auf die Ausscheidungen der Tiere zurückzuführen ist. So ließen sich unabhängig vom Produktionsabschnitt etwa 70 bis 98 % der $PM_{2,5}$ - Fraktion und 41 bis 94 % der PM_{10} - Fraktion dieser Quelle zuordnen. In diesem Zusammenhang lag der Beitrag von Haaren und Hautschuppen bei unter 20 % bzw. unter 30 %, wobei der Anteil dieser Staubquelle bei Ferkeln, Mastschweinen und Sauen unterschiedlich groß ausfiel. Für beide Fraktionen lag der auf das Futter zurückzuführende

Anteil des Stallstaubes unter 16 %. Damit liegt dieser Wert deutlich unter denen anderer Studien.

Die Abbildung 4 gibt einen schematischen Überblick über die wichtigsten Quellen von Stallstaub und listet die zugehörigen, für das Aufkommen von Stallstaub relevanten Eigenschaften auf. Unter den Einflussfaktoren werden alle Prozesse und Abläufe subsumiert, die die Bildung und Freisetzung bzw. Ablagerung von Staubpartikeln innerhalb des Stalls bestimmen sowie den Transport aus diesem heraus.

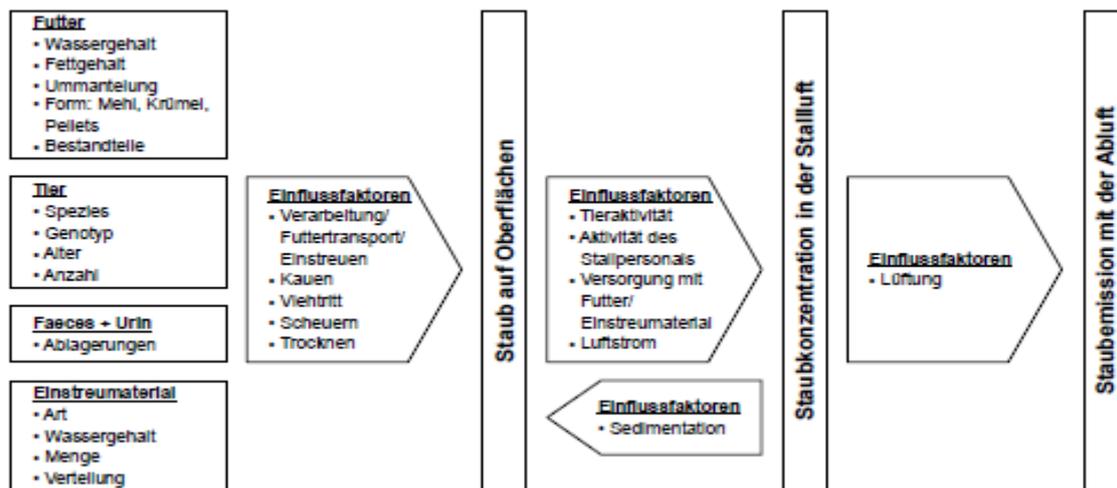


Abbildung 4: Staubquellen (nach AARNINK & ELLEN, 2007)

2.5.3 Staubeintrag durch Futter

Die Bedeutung, die dem Wassergehalt im Futter in Bezug auf die Entwicklung von Staub beigemessen wird, hat sich in den vergangenen Jahren gewandelt. Während in den achtziger Jahren in Hinblick auf Staubaufkommen und -zusammensetzung zumeist deutliche Unterschiede zwischen Schweinehaltungssystemen mit Trocken- oder Flüssigfütterung aufgezeigt wurden, sind diese Abweichungen in jüngeren Untersuchungen nicht zu erkennen. So berichteten DAWSON (1990) und ZEITLER et al. (1987) von bis zu 50 % geringeren Staubkonzentrationen (mg m^{-3}) bei Angebot von flüssigem Futter im Vergleich zu trockenem Futter. Dem gegenüber stehen die jüngeren Untersuchungen von NANNEN et al. (2005), in denen hinsichtlich der Staubentwicklung bestehende Unterschiede zwischen beiden Fütterungssystemen relativiert werden. Nur tendenziell in einigen Fraktionsgruppen sollen demnach Differenzen auszumachen sein, die die Partikelgrößenverteilung und die Partikelform betreffen. Auch Keck et al. (2004) konnten keine signifikanten Unterschiede

in Zusammenhang mit der Fütterung – trocken oder flüssig – finden. Die zu beobachtende Angleichung des Staubaufkommens bei Schweinehaltungssystemen mit Trocken- oder Flüssigfütterung ist vor allem auf die verfahrenstechnische Weiterentwicklung der Trockenfütterungssysteme zurückzuführen. Diese sieht eine Vermeidung des unmittelbaren Kontakts zwischen Futter und Stallluft bis zum Verzehr durch die Tiere vor. Einen weiteren futterbasierten Ansatz zur Dezimierung der Staubentwicklung stellt die Verwendung von tierischen Fetten oder pflanzlichen Ölen als Futterzugabe dar. Sie zählt zu den wirkungsvollsten Methoden, um eine Verringerung der Staubbelastung in Ställen zu erzielen. Dies geht aus zahlreichen Untersuchungen hervor. Ergebnisse von CHIBA et al. (1987) zeigen, dass durch eine Zugabe von 2,5 bzw. 5 % tierischem Fett eine Verringerung des Gesamtstaubaufkommens im Stall um 20 bzw. 50 % bewirkt werden kann. In diese Richtung weisen auch die Untersuchungen von TAKAI et al. (1996), bei denen eine Reduktion des Gesamtstaubaufkommens um 37 % in der Ferkelaufzucht und um 42 % in der Mast bei Ergänzung von 4 % tierischem Fett erreicht wurde. Neben einer quantitativen Betrachtung ist aber auch die Art (Qualität) des zugesetzten Fettes von Relevanz. So stellten HEBER & MARTIN (1988) fest, dass etwa doppelt so viel tierisches Fett wie Sojaöl notwendig war, um einen gleichen Minderungseffekt zu erwirken. Diese Ergebnisse können jedoch nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden, da der auf das Futter zurückzuführende Anteil des Staubes am Gesamtaufkommen mit und ohne Einsatz des Fettzusatzes nicht erfasst wurde. Der tatsächliche Minderungseffekt auf die Staubquelle „Futter“ bleibt unbekannt.

Eine Ummantelung von Futterpellets mit Fetten, Ölen oder anderen Stoffen stellt eine weitere Möglichkeit dar, die Freisetzung von Partikeln aus dem Futter zu reduzieren. Auch die Wahl der Futterform hat Einfluss auf die Staubkonzentration im Stall. Je nach Körnung unterscheidet man zwischen Mehl, Krümel oder Pellets. ZEITLER et al. (1987) zeigten, dass die Verwendung von Pellets zur Versorgung von Schweinen gegenüber der Verwendung von Mehl eine Verringerung des Gesamtstaubaufkommens um 31 % nach sich zog. Ähnliches berichten LI et al. (1992). Mehl verursachte 40 % mehr alveolengängige Partikel als Pellets. Außerdem wurde durch die Wahl von 7 mm großen Pellets 17 % weniger Staub erzeugt als bei 3 mm großen Pellets. Die Bestandteile von Futtermittel haben ebenfalls Einfluss. So erzeugt eine auf Gerste basierende Ration unter Laborbedingungen weniger Staub als eine auf Mais basierende (THALER et al., 2002). HEBER & MARTIN (1988) stellten

beim Vergleich von Futtermitteln bestehend aus 75 % Mais, Sorghum oder Weizen fest, dass eine Ration mit überwiegendem Maisanteil ein rund 12 % geringeres Staubaufkommen verursachte als bei Sorghum und rund 6 % geringer als bei Weizen.

Bei der futterbedingten Entstehung von Stallstaub kommen weitere bislang noch nicht genannte Einflussfaktoren zum Tragen. Dazu zählt die Gestaltung der Fütterungstechnik von der Bereitung, über den Transport hin zum Angebot des Futters. Nach THALER ET AL. (2002) ist nicht unbedingt entscheidend, mit welcher Technik das Futter gemahlen oder gequetscht wird, sondern vielmehr, bis zu welchem Grad dies geschieht. Was den Transport des Futters zu den Tieren anbelangt, gibt es in Bezug auf die Freisetzung von Staub zum Teil widersprüchliche Ergebnisse. Gleiches gilt für das Angebot des Futters (PEARSON & SHARPLES, 1995). Dies lässt die Vermutung zu, dass weitere Einflussfaktoren nicht ausreichend abgegrenzt wurden. Durch die Wahl eines Fütterungssystems und des dazugehörigen Managements wird das Verhalten der Tiere und demzufolge auch die Stauberzeugung und -konzentration im Gebäude beeinflusst (TAKAI et al., 1998).

2.5.4 Staubeintrag durch die Tiere

In der Stallluft befindliche Partikel können auch durch die Tiere selbst - genauer durch Haare, Federn oder Hautschuppen - eingebracht werden. Je nach Tierart unterliegen die anfallenden Mengen dieser organischen Bestandteile Schwankungen. Nach AARNINK & ELLEN (2007) kann das Ausmaß des Staubeintrages durch Tiere auch im Genotyp begründet sein. So wurden Unterschiede in der Aktivität und der Qualität des Gefieders zwischen Geflügel verschiedenen Genotyps festgestellt. In seinen Untersuchungen beschreibt GUSTAFFSON (1997) einen proportionalen Zusammenhang zwischen den freigesetzten Mengen an Staub und der Anzahl und dem Gewicht der Schweine in einem Maststall. Ebenso stellt er eine zunehmende Staubabgabe mit fortschreitendem Alter bei Geflügel fest. Auch HINZ & LINKE (1998) beobachteten bei Geflügel eine linear steigende Konzentration mit zunehmender Lebendmasse. In ihren Untersuchungen zur Schweinemast zeichnete sich jedoch ein insgesamt negativer Trend zwischen Lebendmasse und einatembarer Partikelkonzentration ab. Als mögliche Erklärung dieser Ergebnisse führten sie die verminderte Aktivität der älteren Tiere an. Nicht außer Acht gelassen werden sollte in diesem Zusammenhang der Umstand, dass mit steigender Lebendmasse in einem Tierstall unter anderem auch der Bedarf an Futter und der Anfall von Exkrementen

steigt, welche ebenfalls Staubquellen darstellen. Partikel aus Hautschuppen und ausgefallenen Haaren oder Federn weisen in der Regel noch nicht die entsprechende Dichte, Form oder Größe auf, um in die Stallluft gelangen zu können. Erst durch Prozesse wie das Scheuern der Schweine am Stallinventar oder durch ihre Aktivität kommt es zur notwendigen Zerkleinerung der Partikel (AARNINK & ELLEN, 2007).

2.5.5 Staubeintrag durch Kot und Urin

Kot und Urin sind - auf Stalloberflächen verteilt und an Tieren anhaftend - eine bedeutende Quelle für die Bildung von Staub. Der Beitrag dieser Quelle zum Gesamtstaubaufkommen richtet sich vor allem nach dem Ausmaß der Verschmutzungen. Studien von BANHAZI et al. (2004) und ZUCKER et al. (2005) zeigten, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Buchtenhygiene und der Konzentration an luftgetragendem Staub, sowie Bakterien und Endotoxinen besteht. Da Staub nur aus getrocknetem Kot und Urin gebildet wird, üben die Gestaltung der Böden und das Stallklima besonderen Einfluss aus. Bei Spaltenböden kann die Feuchtigkeit rascher drainieren. Planbefestigte Böden bieten eine größere Oberfläche und vorhandenes Einstreumaterial absorbiert Feuchtigkeit (AARNINK & ELLEN, 2007 und TAKAI et al., 1998). Aufgrund der Tatsache, dass Kotpartikel Futterpartikeln in ihren chemischen und morphologischen Eigenschaften ähneln und unverdaute Futterbestandteile im Kot wieder auftauchen, gestaltet sich eine eindeutige Differenzierung zwischen beiden schwierig. Im Rahmen der Weiterentwicklung von Analysemethoden kommt es deshalb bezüglich des Beitrags der einzelnen Staubquellen zum Gesamtaufkommen zu Diskrepanzen zwischen älteren und jüngeren Untersuchungen. CAMBRA-LOPEZ et al. (2010) zeigten, dass in der Schweinehaltung die meisten Partikel den Fäkalien und nicht, wie häufig angenommen, dem Futter entstammen.

2.5.6 Eintrag durch Einstreumaterial

Im begrenzten Umfang ist in Deutschland die Haltung von Schweinen in eingestreuten und teileingestreuten Systemen vorzufinden. Darüber hinaus kann Einstreu als Beschäftigungsmaterial zum Einsatz kommen. Einstreumaterial wie beispielsweise Stroh kann eine beachtliche Partikelquelle darstellen und zu hohen Belastungsspitzen im Innenraum führen (HAEUSSERMANN et al., 2007). Allgemein geht man deshalb davon aus, dass in Ställen, in denen eingestreut wird, höhere Partikelinnenraumkonzentrationen

vorzufinden sind als bei einstreulosen Systemen AARNINK et al., 2004 und HARTUNG & SPINDLER, 2008). Jedoch gibt es diesbezüglich auch Untersuchungen, die gegenläufige Tendenzen aufzeigen (HARTUNG et al., 2004; TAKAI, 1998). Der Umfang der Staubeinbringung durch Einstreu ist von verschiedenen Faktoren abhängig (AARNINK & ELLEN, 2007). Sowohl die Art des verwendeten Materials, als auch dessen Feuchtigkeitsgehalt haben Einfluss auf die Partikelfreisetzung. So mindert leichtes, gleichmäßiges Anfeuchten vor dem Einstreuen das Staubaufkommen. Des Weiteren bestehen zwischen dem Tief- und dem Flachstreuverfahren Unterschiede, da sedimentierter Staub, durch die in einer dicken Mistmatratze enthaltene Feuchtigkeit, gebunden werden kann. Ebenfalls von Relevanz sind das Verfahren und die Häufigkeit des Nachstreuens. Neben diesen Faktoren spielen auch die Prozesse zur Gewinnung des Einstreumaterials (Ernten, Trocknen, Schneiden und Lagern), die Aktivitäten der Tiere im Stall (Laufen, Kauen, Scheuern), oder bakterielle Zersetzungsprozesse eine Rolle.

2.5.7 Staubkonzentration im Innenraum

Nach der Entstehung eines Staubpartikels kann dieses direkt in die Luft übergehen, oder am Boden, auf Einrichtungsgegenständen oder auf den Tieren verbleiben (AARNINK et al., 2007). Luftgetragene Partikel können sich durch Sedimentation wieder auf Oberflächen im Stall ablagern und erneut durch Aufwirbelung in den Luftstrom gelangen - diesen Vorgang bezeichnet man als Resuspension (HENSELER-PASMANN, 2010). Vor allem die Aktivität der Tiere, aber auch die des Stallpersonals, sowie die Prozesse, die mit der Futter- und Einstreuversorgung in Verbindung stehen, lösen Impulse aus, durch die die Aerosolpartikel in den Luftstrom gelangen können. So zeigte schon PEDERSEN (1993) einen engen Zusammenhang zwischen der Tieraktivität und dem Staubgehalt in der Stallluft auf. Eine erhöhte Tieraktivität bewirkt einen vermehrten Übergang größerer Staubpartikel in die Stallluft, die sonst aufgrund ihres Sedimentationsverhaltens auf den Stallobertflächen verblieben waren (NANNEN & BÜSCHER, 2007). Zwar steigt hierdurch die Gesamtpartikelanzahlkonzentration nur unwesentlich, jedoch kommt es infolge der Verschiebung der Partikelgrößenverteilung zu einem deutlichen Anstieg der Gesamtpartikelmassenkonzentration (SCHNEIDER et al., 2006). Neben dem Haupteinflussfaktor Tieraktivität kommen für Änderungen der Partikelkonzentration im Innenraum die Luftfeuchtigkeit und der Luftvolumenstrom in Frage (COSTA et al., 2009;

NANNEN & BÜSCHER 2008). Eine erhöhte Geschwindigkeit der Luftströmung im Stall hat zur Folge, dass sich eine vermehrte Anzahl größerer Partikel in der Luft befindet. In diesem Zusammenhang kann das Lüftungssystem, vor allem die Gestaltung der Zuluftführung einen maßgeblichen Einfluss haben (ROSENTHAL et al., 2007).

2.5.8 Staubemission in der Abluft

Mit der Abluft wird ein Teil der luftgetragenen Staubpartikel aus dem Stall geführt. Im Wesentlichen wird die Menge an emittiertem Staub durch den Luftvolumenstrom beeinflusst (ARNINK & ELLEN, 2007). Dennoch führt ein Anstieg der Lüftungsrate nicht zu einer proportionalen Reduktion der Staubkonzentration, da sich die Geschwindigkeit der im Innenraum strömenden Luft auf die Sedimentation der Partikel auswirkt (GUSTAFSSON, 1997). Nach SCHMITT et al. (2004) konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Partikelkonzentration im Innenraum von der in der Abluft abweicht. NANNEN und BÜSCHER (2006) stellten fest, dass diese Konzentrationen mit steigendem Luftvolumenstrom einander immer mehr angleichen.

2.6 Einflussfaktoren auf die Staubkonzentrationen im Innenraum

Die Staubkonzentration im Stall ist nicht nur von einem Faktor abhängig, sondern wird, wie in Abbildung 5 dargestellt ist, durch verschiedene Faktoren beeinflusst. In diesem Kapitel werden die Faktoren aufgegriffen und näher erläutert.

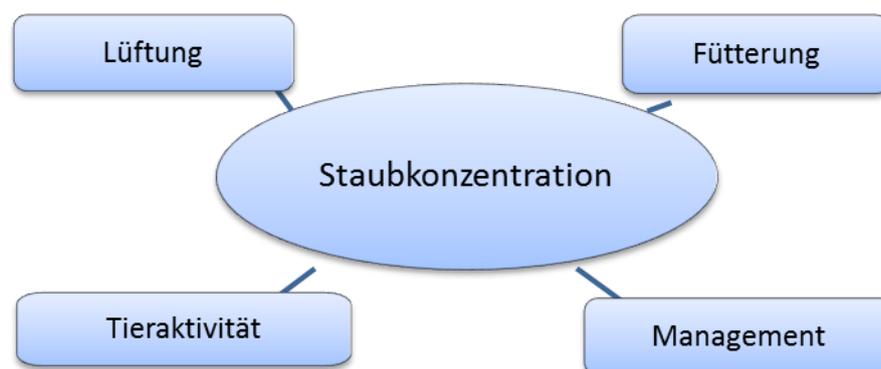


Abbildung 5: Einflussfaktoren auf die Staubkonzentration in Ställen (modifiziert, nach PEDERSEN, 2004)

2.6.1 Einfluss der Lüftung

Die Partikelkonzentration ist im Sommer größer als im Winter, da im Sommer höhere Luftstraten vorherrschen (NANNEN & BÜSCHER, 2007). Hierdurch bedingt kommt es zu einer höheren Staubaufwirbelung. Je höher der Luftvolumenstrom im Stall ist, desto stärker ist der Verdünnungseffekt auf den Staub, was ein Absinken der Massenkonzentration zur Folge hat. Dies zieht allerdings eine Erhöhung des Emissionsfaktors nach sich (COSTA et al., 2009; NANNEN, 2007).

Die Art der Zu- und Abluftführung hat ebenfalls einen Einfluss auf die Staubkonzentration. Wird die Abluft durch die First hinaus geleitet, gelangen weniger Partikel mit großer Masse hinaus. Gelangt die Abluft durch Öffnungen in den Seitenwänden oder durch eine Absaugung durch den Giebel nach außen, so gelangen auch mehr größere Partikel nach draußen (NANNEN, 2007). Weiterhin ist zu beachten, ob im Stall nach einem Unterdruck- oder Gleichdruckverfahren belüftet wird: Ein Unterdruckverfahren erzeugt mehr Staub als ein Gleichdruckverfahren, da bei Gleichdruckverfahren mehr Staub sedimentiert. Beim Unterdruckverfahren gelangt die Zuluft in der Regel durch Wandelemente in den Stall, die Stallluft wird mit Abluftventilatoren im Deckenbereich abgesaugt. Bei einem Lüftungssystem mit Unterdruckverfahren, beispielsweise mit einer Porendecke, wird ähnlich wenig Staub produziert, wie bei einem System basierend auf dem Gleichdruckverfahren. Dies ist durch die langsamen Luftgeschwindigkeiten bei dem Lüftungssystem mit der Porendecke begründet (PEDERSEN, 2004).

2.6.2 Einfluss der Fütterung

Generell steigt der Staubgehalt in der Luft während der Fütterung stark an (COSTA & GUARINO, 2009; COSTA et al., 2009 und NANNEN & BÜSCHER, 2007). Bei der Fütterung ist vor allem die Futterkonsistenz von großer Bedeutung. Die Flüssigfütterung verursacht eine um 20 % geringe Staubbelastung im Gegensatz zur Trockenfütterung (PEDERSEN, 2004; SEEDORF & HARTUNG, 2002), dabei sind Futtermehle die größten Staubverursacher. Pellets liegen hinsichtlich der Belastung zwischen Flüssigfütterung und Futtermehlen (SEEDORF & HARTUNG, 2002). Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Staubbelastung bei rationierter Fütterung im Gegensatz zur ad libitum Fütterung größer ist.

2.6.3 Einfluss durch Management und Tieraktivitäten

Einen großen Einfluss auf die Bewegung des Staubes und die Größenverteilung der Partikel hat die Aktivität der Tiere, einschließlich ihres Tag-Nacht-Rhythmus (COSTA & GUARINO, 2009; COSTA et al., 2009 und SEEDORF & HARTUNG, 2000). Mit steigender Tieraktivität nimmt der Anteil der Partikel mit großem Durchmesser überdurchschnittlich zu (Abb. 6).



Abbildung 6: Beispiel zur Abhängigkeit der Staubkonzentration von der Tieraktivität in einem Ferkelstall (nach PEDERSEN, 2004)

Feinere Partikel weisen geringere Zuwachsraten auf (SCHNEIDER et al., 2006). Mit steigendem Alter sinkt die Aktivität bezogen auf die Fläche, gleichzeitig sinkt der Temperaturbedarf und der Volumenstrom steigt (NANNEN, 2007). Die Tierzahl ist ebenfalls bedeutsam, da die Staubbelastung proportional zur Tierzahl steigt. Die Lebendmasse hat zur Staubbelastung als lineare Regression ein positives Bestimmtheitsmaß von 0,62 bis 0,93. Der Zusammenhang zwischen Lebendmasse der Tiere und der Staubbelastung ist hoch. Bei traditionellem Management liegt die Tieraktivität tagsüber bei 20 %. Im Mittel von Tag und Nacht ist die Aktivität 20 % geringer als am Tag (PEDERSEN, 2004). Arbeiten im Stall, wie Entmistung und Kontrollgänge aber auch Fütterungszeiten, tragen nach NANNEN & BÜSCHER (2007) zur Staubbelastung bei.

2.7 Möglichkeiten der Staubreduktion

Grundlegend lässt sich zwischen drei verschiedenen Strategien zur Minderung der Staubkonzentration im Stall differenzieren. Eine Möglichkeit besteht in der Überwachung der Staubquellen, um Entstehung und Emission von Staubpartikeln einzuschränken. Eine andere Option stellt die Anwendung von Maßnahmen dar, die der Staubentfernung aus dem Gebäude und der Reinhaltung der Luft dienen. Darüber hinaus kann durch eine effektive Strömungsverteilung im Raum, sowie durch eine Steigerung des Abluftvolumenstromes eine Minderung der Luftbelastung im Innenraum erzielt werden. Letztere Maßnahme kann sich jedoch auch erhöhend auf die Innenraumkonzentration luftgetragener Partikel auswirken (CAMBRA-LOPEZ et al., 2010; HAEUSSERMANN, 2006 und TAKAI & PEDERSEN, 2000). Auch kann durch das Versprühen von Wasser oder Pflanzenöl eine Verringerung der Staubkonzentration erzielt werden - vor allem aufgrund der Staubbindung an den Stalloberflächen. Da diese staubreduzierenden Zusatzstoffe als Aerosole verteilt werden, müssen mögliche negative Nebeneffekte wie beispielsweise ein Anstieg der Luftfeuchtigkeit und eine Verschmutzung der Oberflächen in Kauf genommen werden.

Für eine stallinterne Luftreinigung kommen in erster Linie Techniken wie Ionisation, elektrostatische Abscheider und andere Filtersysteme in Frage. Diese kommen ohne größere Wassermengen aus. Für eine ausreichende Rezirkulation der gefilterten Luft werden hohe Luftraten benötigt. Bei starken Staubbelastungen können Filtersysteme deshalb an ihre technischen Leistungsgrenzen stoßen.

2.8 Minderungsmaßnahmen von Feinstäuben in Stallanlagen

Nach EMISSION INVENTORY GUIDEBOOK (2006) steht eine Reihe von Maßnahmen zur Verringerung der Konzentrationen von luftübertragenem Staub in Viehställen zur Verfügung.

Eine hervorragende Innenraum-Luftqualität beruht laut CHOINIERE-FARMSTEAD (1993) auf Stallmanagement, Fütterung und Stallmist- bzw. Dünger-Handling-Systemen, Ventilationssystemen und auf der allgemeinen Sauberkeit des Betriebes. In ATIA (2004) sind Möglichkeiten zur Staubreduktion aufgeführt:

- Das Eintreten des Feinstaubes minimieren.

- Verhindern, dass diese Partikel Staubwolken bilden.
- Entfernen von luftübertragenem Staub mit Luftreinigungsgeräten.

Das Versprühen von Wasser oder Öl reduziert die einatembare Partikelfraktion in zwangsbelüfteten Ställen. Durch das Benebeln der einströmenden Luft wird die Einstreu direkt oder indirekt infolge der hohen Luftfeuchtigkeit benetzt (ATIA, 2004). Auch die richtige und rechtzeitige Pflege der Tröge, Schnecken und anderen Futtertransporteinrichtungen ist für eine ordnungsgemäße Staubkontrolle erforderlich. Das EMISSION INVENTORY GUIDEBOOK (2006) führt als Maßnahmen außerdem die Nassfütterung und die Zugabe von Fettzusätzen ins Futter auf.

Maßnahmen wie Besprenkelung werden in Milchviehställen in der Regel nicht angewandt. HARTUNG & SPINDLER (2008) diskutieren für Rinderställe eine Befeuchtung des zur Einstreu genutzten Stroh in Bezug auf die Staubreduktion. Dadurch soll die Gesamtstaub- und Endotoxinabgabe an die Luft um mehr als 90 % gesenkt werden.

Abluftreinigungsanlagen können Geruchs-, Staub- oder Ammoniakemissionen aus der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung erheblich mindern (BMELV, 2009).

2.9 Messtechnik zur Bestimmung von Feinstäuben

Es gibt eine Vielzahl von Techniken zur Bestimmung der Partikelgröße, Partikelanzahlkonzentration, Partikelmassenkonzentration und Partikelverteilung, aber auch um Bioaerosolbestandteile zu quantifizieren.

In unterschiedlichen Anwendungsbereichen werden zudem aussagekräftige qualitative Informationen über Bioaerosolbestandteile benötigt. Die komplexe Zusammensetzung von Bioaerosolen und die im Regelfall sehr geringen Konzentrationen einzelner Bestandteile verhindern es, die Bioaerosolbelastung einer Luftprobe insgesamt mit einer einzigen Nachweismethode zu erfassen. Bei nahezu allen bislang angewandten Verfahren werden nach HOPPENHEIDT (2002) die Bestandteile zunächst aus der Luft abgeschieden und dadurch aufkonzentriert.

Um einen Einblick in die nächtliche Situation für den Tierbereich zu erlangen, ist nach ZENTNER (2009) bereits mit geringem technischem und zeitlichem Aufwand eine

entsprechende Erkenntnis möglich. Kabellose Messgeräte liefern Daten für Temperatur und Feuchte je nach gewünschter Position im Stall.

Nach HELLER & KÖLLNER (2007) ist festzuhalten, dass bedingt durch den großen Einfluss an kaum zu beeinflussenden Randbedingungen (Windverhältnisse, Gebäudeeinfluss, Tierverhalten, etc.), die Untersuchungen im Umgebungsbereich von Tierställen hohe Anforderungen an Messtechnik und Analytik stellen.

2.9.1 Gravimetrische Verfahren

Zur gravimetrischen Bestimmung der Staubkonzentration verwendet man laut HENSELER-PABMANN (2010) Filtersysteme oder Impaktoren.

Der am einfachsten zu erfassende physikalische Parameter ist die Masse der abgeschiedenen Partikel. Durch Auswiegen der Filtermedien kann nach ZIMMERMANN (2002) die Massenkonzentration über den Probenahmezeitraum bei bekannter Pumpenleistung bestimmt werden. Gemäß VDI 2463 arbeiten Gravimetriesammler mit radialsymmetrischen Ansaugköpfen. Weiter wird beschrieben, dass bei der Wägung selbst auftretende Fehler im Verhältnis zu anderen Einflussgrößen abgeschätzt und durch Auswahl eines geeigneten Waagentyps klein gehalten werden können. Nach ZIMMERMANN (2002) ist die Verwendung kontinuierlich arbeitender Mikrowaagen gebräuchlich, welche die abgeschiedene Partikelmasse differenziell erfassen. Weitere Verfahren beruhen auf der Absorption von radioaktiver β -Strahlung durch ein mit abgeschiedenen Partikeln belegtes Filtermedium. Bei der Auswahl der Materialien der Messfilter ist laut VDI 2066, Blatt 1 (VDI-RICHTLINIE, 1975) auf folgendes zu achten:

Abscheidegrad, Durchlassgrad, Filterwiderstand, Temperaturüberständigkeit, Feuchtebeständigkeit, chemische Beständigkeit, mechanische Festigkeit, Flächengewicht und Belegungsdichte. Besondere Bedingungen stellt das Auftreten von z. B. besonders hohen Temperaturen (Sonde kühlen) oder hoher durch Säure verursachten Taupunkte (Sonde beheizen), das Messen bei Anfall von Flüssigkeitstropfen (z. B. hinter Nassabscheidern) oder die Messung in brennbaren Staub-Gas-Gemischen dar. Sind im Teilvolumenstrom kondensierende oder verdampfende Stoffe enthalten, so ist nach (VDI-RICHTLINIE, 1975) der Gaszustand im Staubabscheider anzugeben.

Laut HILLIGER et al. (1984) bieten Sedimentationsmethoden den Vorteil, dass größere Staubmengen gewonnen werden können, die weiterführende Untersuchungen ermöglichen. Sedimentationsraten einer Studie von BARBER et al. (1991) aus wöchentlichen Proben variierten zwischen 80 und $200 \text{ mg m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ über eine 12-Wochen-Periode. Staubablagerungen auf den Filtern variierten linear mit der Zeit. Eine Einteilung der Partikelgrößen ist mit diesem Verfahren nicht möglich.

In ZIMMERMANN (2002) ist die größenklassenaufgelöste Sammlung mittels eines Impaktors beschrieben, bei der unter Annahme einer mittleren Dichte der Partikel auch erste Informationen über die Anzahlverteilung der Partikel erfasst werden können. Bei einer Untersuchung von SCHRADE (2009) wurde Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als $10 \text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}) kontinuierlich gravimetrisch mit Impaktoren bestimmt. Weiter wird beschrieben, dass die aerosolhaltige Probe mit einem definierten Volumenstrom in einer Düse beschleunigt und danach umgelenkt wird. Partikel größer als $10 \text{ }\mu\text{m}$ treffen aufgrund ihrer Trägheit auf eine geölte Prallplatte und werden darauf abgeschieden. Kleinere Partikel bleiben im Gasstrom, werden auf dem nachfolgenden Filter (S&S, GF 10 HY, 37 mm) zurückgehalten und nach der Messung im Labor bestimmt.

2.9.2 Optische Verfahren

Optische Einzelteilchen-Zähler (optical particle counter, OPC) können nach ZIMMERMANN (2002) über die Bestimmung der Streulichtintensität von z. B. Einzelpartikeln herangezogen werden.

Jedes Teilchen wird individuell mit Hilfe von Streulicht-Photometrie innerhalb einer optischen Zelle erfasst. Die Luft im Stallbereich wird einer Lichtquelle oder einem Laser ausgesetzt. Der verstreute Lichtimpuls von jedem Teilchen basiert auf der Intensität dieses Lichtsignals, welche auf die Partikelgröße zurückzuführen ist (GRIMM, 2011). Weiter wird beschrieben, dass das gestreute Licht direkt über ein bestimmtes Weitwinkel-System mit einem Reflektor an einem Streuwinkel von 90° eingeholt wird. Auf diese Weise ist die Abhängigkeit des Berechnungsindex auf das gemessene Signal gering. So ermöglicht jede Streuintensität eine präzise Bestimmung der Partikelgröße. Nach HENSELER-PABMANN (2010) beruht die Streuungsintensität des Lichts auf der Größe, der Materialeigenschaft und der Form des Partikels.

In GRIMM (2011) wird das sogenannte Aerosolspektrometer beschrieben, welches die Partikel-Größenverteilung der festen und tröpfchenförmigen Aerosolpartikel in verschiedenen Größenklassen sammelt. Der schematische Aufbau dieses Messgerätes ist der Abbildung 7 zu entnehmen.

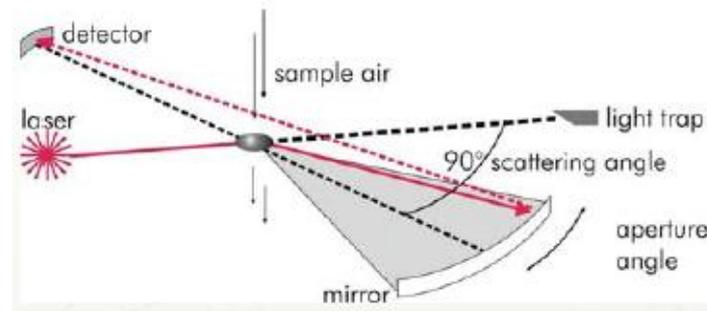


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messprinzips eines Aerosolspektrometers (modifiziert nach GRIMM, 2011)

2.10 Lüftungssysteme

2.10.1 Lüftungssysteme in der Schweinehaltung

Aufgaben der Lüftung

In Abhängigkeit von Jahreszeit, Haltungsform und Haltungsabschnitt variieren die Ansprüche der Schweine an das Stallklima. Die Regulierung von Lüftung und Heizung dient der Gesunderhaltung der Tiere und soll gleichzeitig eine hohe tierische Leistungsbereitschaft sicherstellen. Dabei bestehen die Anforderungen an die Lüftung zum einen in der gleichmäßigen Durchspülung des Stallraumes mit Frischluft, zum anderen in der ausreichenden Abfuhr von Wasserdampf, Wärme und Gasen. Diese auch als Raumlasten bezeichneten Stoffe können nach JUNGBLUTH et al. (2005) sowohl eine gesundheitsschädigende als auch eine gebäudeschädigende Wirkung haben. Während im Sommer aufgrund hoher Außentemperaturen die Abfuhr von Wärme zur Vermeidung von Wärmestau im Gebäude und übermäßigem Hitzestress für die Schweine im Vordergrund steht, muss die Lüftung im Winter vorrangig dafür Sorge tragen, dass Wasserdampf und Kohlendioxid, aber auch Schwefelwasserstoff und Ammoniak in ausreichendem Maße abtransportiert werden, damit es nicht zu Kondensat-Bildung und zu überhöhten Schadgaskonzentrationen kommt (JUNGBLUTH et al., 2005).

Zwangslüftungsverfahren

Zwangslüftungsverfahren sind durch den aktiven Luftaustausch im Stallinnenraum und die aktive Regulierung des Stallklimas mittels Ventilatoren gekennzeichnet. In Bezug auf die Druckverhältnisse im Stall unterscheidet man bei den Lüftungssystemen zwischen Überdruck-, Unterdruck- und Gleichdruckanlagen, wobei Unterdrucksysteme mit Niederdruck-Axialventilatoren die weiteste Verbreitung finden (KTBL, 2009).

Zuluftsysteme

Strömt Luft über Öffnungen in den zwangsbelüfteten Stall, so bewegt sie sich innerhalb des Raumes auf charakteristischen Bahnen bis sie wieder abgeführt wird. Für diese Raumströmungen ist die Gestaltung der Zuluftführung maßgeblich verantwortlich. Dabei gilt: Je höher die Einströmgeschwindigkeit in den Raum, desto größer ist auch die Impulswirkung auf die Raumluft. Ist der Impuls groß genug, entsteht eine Drehbewegung im Raum. Diese auch als Luftwalze bezeichnete Bewegung kommt bei nur geringer Impulswirkung nicht zustande. In solchen Fällen haben andere Faktoren, wie beispielsweise Thermik, übergeordneten Einfluss auf die Luftbewegung (JUNGBLUTH et al., 2005). Die verschiedenen Zuluftsysteme lassen sich nach ihrer Impulswirkung auf die Raumströmung differenzieren.

Strahllüftungssysteme

Bei Strahllüftungssystemen erfolgt die Zuluftführung vom Zentralgang oder Dachraum ausgehend über verstellbare Zuluftelemente an der Decke, seitlich oder im Raum angeordnet (KTBL, 2009). Durch eine entsprechende Stellung der Zuluftelemente soll die Frischluft durch den Unterdruck im Stall mit hoher Geschwindigkeit in den Raum geführt werden und dadurch die gesamte Raumluft in Bewegung setzen. Es bilden sich Luftwalzen aus. Die Einströmgeschwindigkeit sollte im Sommer nicht über $4,0 \text{ m s}^{-1}$ liegen, um Zugluft im tiernahen Bereich zu vermeiden. Im Winter muss sie aber mindestens $1,0 \text{ m s}^{-1}$ betragen, da sonst kalte Zuluft direkt auf die unterhalb der Klappen befindlichen Tiere fällt. Damit der Raum über die gesamte Tiefe mit Luft durchspült wird, befinden sich die Öffnungen der Klappen direkt unter der Stalldecke. Es geht darum, den so genannten Coanda-Effekt zu nutzen. Bei diesem Phänomen strömt der Zuluftstrahl durch Adhäsion an der glatten Decke entlang. Die Eindringtiefe der Zuluft ist bei einseitiger Luftzuführung maximal auf das Vierfache der Raumhöhe begrenzt (JUNGBLUTH et al., 2005).

Rieselkanallüftung

Die Zuluftführung erfolgt vom Zentralgang ausgehend über Zuluftkanäle an der Stalldecke mit perforierten Lochplatten an der Unterseite. Die Zuluft wird durch die Poren des Kanals in den Stallinnenraum gezogen und sinkt in vielen kleinen Strahlen von der Decke zu den Tieren, da diese Zuluft kühler und damit schwerer ist als die Stallluft. Ziel dieser Verdrängungslüftung ist es, mit frischer Zuluft impulsarm die vorhandene Stallluft mitsamt ihren Raumlasten über Ventilatoren hinauszuschieben und zu ersetzen. Bei der Planung solcher Anlagen ist darauf zu achten, dass die Luftgeschwindigkeit im Kanal nicht mehr als $2,0 \text{ m s}^{-1}$ beträgt, um einen gleichmäßigen Luftaustritt zu gewährleisten. Die Kanallänge ist bei einseitiger Einspeisung auf 12 bis 15 m zu begrenzen und die Mindestfläche an perforiertem Kanalboden ist vom verwendeten Material bzw. von dessen Luftdurchlässigkeit abhängig (JUNGBLUTH et al., 2005).

Porendeckenlüftung

Sind mehr als 50 % der Stalldeckenfläche mit perforierten Elementen versehen, spricht man von einer Porendeckenlüftung. Die Zuluftführung erfolgt vom Zentralgang oder Dachraum ausgehend, über eine Zwischendecke mit Lochplatten. Die Perforierung der Decke fällt in der Regel kleiner aus als bei der Rieselkanallüftung. Die Möglichkeit einer schnelleren Verschmutzung durch Staub und Kondensat-Rückstände ist dabei von Nachteil. Dem gegenüber stehen eine sehr gleichmäßige und langsame Verteilung der Frischluft und die Vermeidung von Wärmeverlusten über die Porendecke bei richtigem Betrieb des Lüftungssystems. Der Druckraum oberhalb der Zuluftdecke sollte mindestens 50 cm hoch sein und die Einströmgeschwindigkeit in diesen sollte nicht größer als $2,0 \text{ m s}^{-1}$ betragen, damit die Zuluft gleichmäßig im gesamten Abteil einströmen kann (JUNGBLUTH et al., 2005).

Kombinierte Systeme

Als Kombination aus verschiedenen Systemen sind viele Möglichkeiten denkbar. Die Besonderheit der Futterganglüftung besteht darin, dass sie im Sommer als Strahlungslüftung und im Winter als Verdrängungslüftung arbeitet. Die Zuluftführung erfolgt über den Zentralgang durch verstellbare Öffnungen im unteren Bereich der Abteiltür (KTBL, 2009). Bei niedriger Winterluftfrate strömt die Zuluft durch die Türöffnung in Bodennähe in den Futtergang, erwärmt sich allmählich, steigt bis zur

Buchtenwand auf und "schwappt" in die Buchten. Bei hohen Sommerluftraten strömt die Zuluft zugig durch den Futtergang und prallt gegen die Wand am Abteilende. Die Luft wird dann durch die Buchten in den vorderen Teil des Raumes zu den Ventilatoren gezogen. Die Strömung ergibt eine Raumwalze. Die Futterganglüftung ist nur für kleine Abteile mit etwa 15 m Länge einsetzbar, da die Luftgeschwindigkeit am Lufteintritt und im Gang nicht über $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ liegen sollte (JUNGBLUTH et al., 2005).

Abluftsysteme

Bei der Abluftführung wird eine Einteilung nach dem Ort der Absaugung vorgenommen. So unterscheidet man zwischen der Oberflur- und der Unterflurabsaugung. Erstere kommt am häufigsten zur Anwendung. Der Absaugpunkt befindet sich im Bereich der Stalldecke. Bei der Unterflurabsaugung befindet sich dieser Punkt unterhalb des Spaltenbodens, was einen Mindestabstand von 50 cm zwischen Flüssigmist und Spaltenboden erforderlich macht (KTBL, 2009). Bei dieser Abluftführung ist die Luftqualität im Tierbereich deutlich besser, da die Schadgase aus dem Flüssigmist unmittelbar abgesaugt werden.

2.10.2 Lüftungssysteme in der Rinderhaltung

In der Milchviehhaltung wird überwiegend mit dem Verfahren der freien Lüftung gearbeitet. Weiterhin wird der Luftwechsel dabei vorrangig durch den Wind bzw. thermischen Auftrieb und nicht mit Ventilatoren erreicht. Ein freibelüfteter Stall mit ausreichend dimensionierten Zu- und Abluftflächen zeichnet sich dadurch aus, dass die Stallinnentemperatur annähernd der Außentemperatur verläuft (ZENTNER, 2009). Die freie Lüftung beruht auf passiv physikalischen Effekten. Eine Voraussetzung ist die Druckdifferenz zwischen Innenraum und Umgebung. Dies wird laut HENSELER-PABMANN (2010) einerseits durch thermische Effekte im Stall und andererseits durch Windeinwirkungen von außen gewährleistet. Zu dem Prinzip der freien Lüftung gehören die Trauf-First-Lüftung, der Offenfrontstall sowie die Querlüftung.

Trauf-First-Lüftungen

Trauf-First-Lüftungen sind durch eine klare Trennung von Zu- und Abluftführung gekennzeichnet. Zuluft gelangt über die Traufen in den Innenraum. Über die Längsachse des Stalles gelangt der größte Teil der Abluft durch den geöffneten First ins Freie. Die Längsachse des Stalls sollte quer zur Hauptwindrichtung liegen, um mithilfe des Windes

den Luftwechsel zu gewährleisten (JUNGLUTH et al., 2005). Ist in der kalten Jahreszeit ein erhöhtes Auftreten von Kondenswasser zu beobachten, so ist der Luftwechsel laut ZENTNER (2009) im Tierbereich unzureichend. Wenn die Dachhülle wärmedämmend ist, kann man bei geringem Luftwechsel im Winter Temperaturen unter dem Gefrierpunkt verhindern sowie im Sommer den Hitzestress für die Tiere wesentlich verringern.

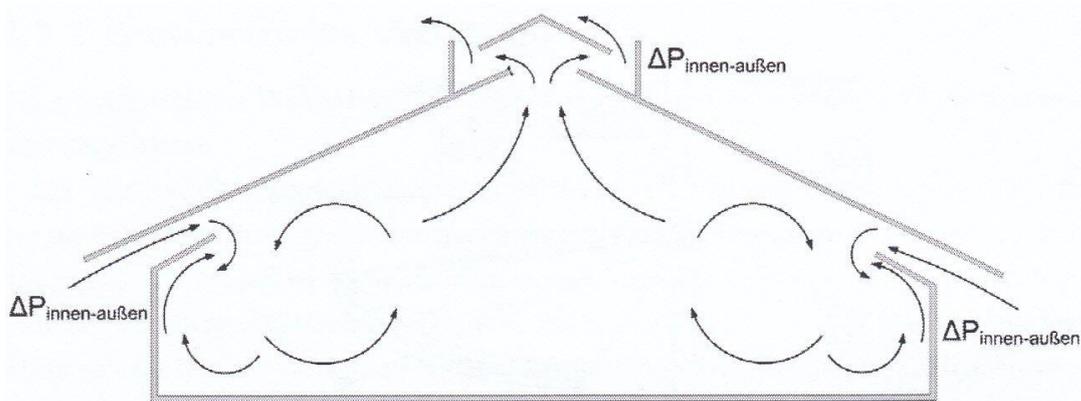


Abbildung 8: System der Trauf-First-Lüftung (nach Haidn & Müller, 2003)

Offenfrontstallung

Der Offenfrontstall wird nahezu ausschließlich in der Milchviehhaltung eingesetzt. Sie haben drei geschlossene Wände. Die der Hauptwindrichtung abgewandte Seite ist offen, wie in Abbildung 9 dargestellt. Üblicherweise erfolgt die Futtervorlage von dieser Seite unter einem Dachüberstand. Es herrschen Außenklimabedingungen im Stall, jedoch kann durch richtige Ausrichtung zum Wind Zugluft und tiefes Eindringen von Schnee verhindert werden. Nachträglich werden viele Offenfrontställe mit Windschutznetzen ausgestattet, um den Luftaustausch im Winter zu begrenzen (JUNGLUTH et al., 2005).

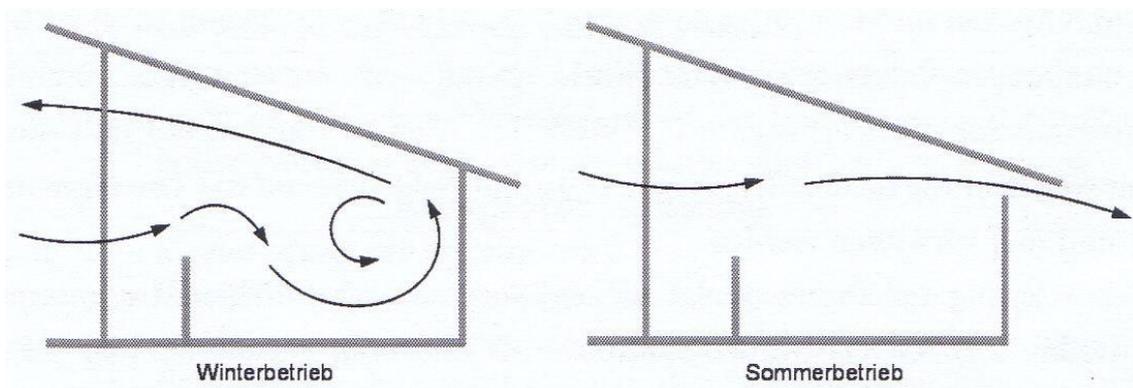


Abbildung 9: System der Offenfrontstallung (nach Henseler-Pabmann, 2010)

Querlüftungssysteme

Bei Querlüftungssystemen strömt die Luft laut JUNGBLUTH et al. (2005) von der windzugewandten Seitenwand durch den Tierbereich und verlässt durch die windabgewandte Seitenwand, wie in Abbildung 10 dargestellt, den Raum. Typisch für dieses Lüftungsverfahren sind daher schmale, lang gestreckte Stallgrundrisse. Während sich in quer gelüfteten Ställen die Luftströmung im Stall annähernd der des Außenbereiches verhält, wird die Luftströmung in geschlossenen Stallungen durch das installierte Zu- und Abluftsystem geregelt (VDI, 1999). Die Luftbewegung kann kaum kontrolliert werden, wenn die Frischluft punktuell oder gerichtet mit wenigen Öffnungen und damit großer Impulswirkung in den Stall induziert wird.

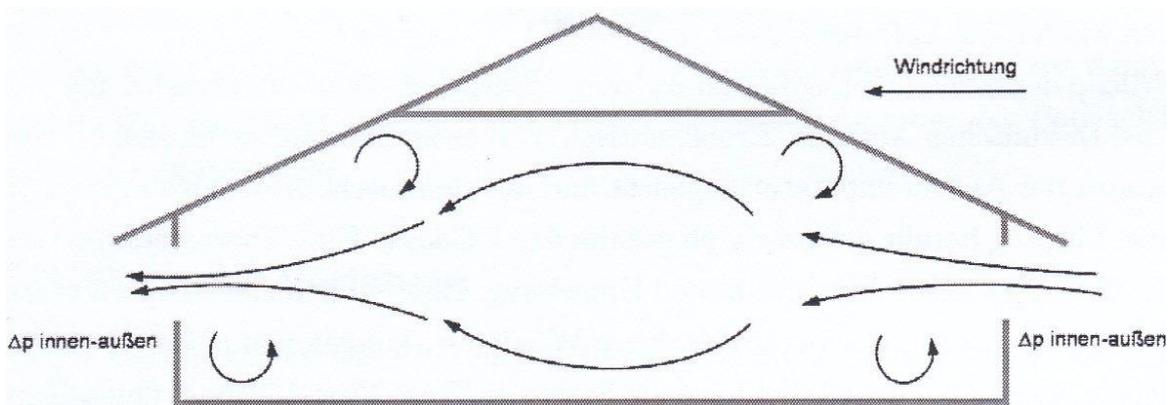


Abbildung 10: System der Querlüftung (nach Haidn & Müller, 2003)

2.10.3 Lüftungssysteme in der Geflügelhaltung

Bei der Geflügelhaltung in wärmeisolierten Ställen werden meist Zwangslüftungsverfahren eingesetzt. Im Bezug auf die Druckverhältnisse im Stall werden in der Geflügelhaltung die Unterdrucklüftung, die Tunnellüftung oder eine Kombination dieser beiden Systeme, ähnlich denen in der Schweinehaltung eingesetzte Systeme, verwendet.

In der Bodenhaltung mit Volierengestellen und Auslauf im Mobilstall, sowie auch in der Putenhaltung kommt das System der freien Lüftung, wie es auch in der Milchviehhaltung eingesetzt wird, zum Tragen. Durch zusätzliche Deckenumluftventilatoren, Stützluftventilatoren und Schwenkventilatoren kann bei diesen Systemen der Luftaustausch

verbessert werden. Dies ist vor allem im Sommer bei hohen Temperaturen nötig, um Hitzestress bei den Tieren zu vermeiden (KTBL, 2006).

2.11 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Durch die Neufassung der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) vom 23. Dezember 2004 wurde ein neues gesundheitsbasiertes Grenzwert-Konzept eingeführt und durch ihr Inkrafttreten die bisher verwendete Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) durch den Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) ersetzt.

Der Arbeitsplatzgrenzwert ist als „Grenzwert für die zeitlich gewichtete durchschnittliche Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz in Bezug auf einen gegebenen Referenzzeitraum“ definiert. „Er gibt an, bei welcher Konzentration eines Stoffes akute oder chronische schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit im Allgemeinen nicht zu erwarten sind“ (GEFSTOFFV, 2010). Die Festlegung dieser Werte bezieht sich auf eine durchschnittliche Exposition von 40 Stunden pro Arbeitswoche. Die Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 900) enthalten neben zahlreichen Arbeitsplatzgrenzwerten unter anderem auch den Allgemeinen Staubgrenzwert. Dieser gilt für schwerlösliche bzw. unlösliche Stäube und darf keine Anwendung auf Stäube finden, bei denen erbgutverändernde, krebserzeugende, fibrogene, allergisierende oder sonstige toxische Wirkungen zu erwarten sind. Der Allgemeine Staubgrenzwert unterscheidet zwischen einer Obergrenze für die einatembare Fraktion, den so genannten E-Staub, bis 10 mg m^{-3} und einer Obergrenze für die alveolengängige Fraktion, den so genannten A-Staub, bis 3 mg m^{-3} (TRGS 900, 2006). Diese Grenzwerte liegen über den Maximalen Arbeitsplatzkonzentrationswerten (MAK-Werten) der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG), die weiterhin als Richt- und Orientierungswerte für die Bedenklichkeit oder Unbedenklichkeit von am Arbeitsplatz auftretenden Stoffkonzentrationen Anwendung finden. Für den Allgemeinen Staubgrenzwert ist hier eine Konzentration von 4 mg m^{-3} bzw. $1,5 \text{ mg m}^{-3}$ als Obergrenze festgesetzt (DFG, 2008 und HARTUNG, 2008).

Über diese Regelungen und Richtwerte hinaus gibt es keine berufsbezogenen Obergrenzen für Partikelinnenraumkonzentrationen in der Nutztierhaltung oder spezifische Grenzwerte für luftgetragene Mikroorganismen, Endotoxine oder andere gesundheitsgefährdende biogene Agentien (SEEDORF & HARTUNG, 2002). Auch konkrete tierbezogene Grenzwerte fehlen. So beinhaltet die Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzV)

lediglich, dass Ställe so ausgestattet sein müssen, dass der Staubgehalt der Luft in einem Bereich gehalten wird, der für die Tiere unschädlich ist (TIERSCHNUTZTV, 2006). Des Weiteren erscheint eine Anwendung der oben genannten Grenzen für die Tiere insofern nicht sinnvoll, als dass die Tiere den Belastungen durch die Bioaerosole permanent ausgesetzt sind.

Vor dem Bau einer Anlage steht laut BImSchG (2005) zunächst immer der Schutz der Gesundheit. Anforderungen gegen schädliche Umwelteinflüsse, die von einer Tierhaltungsanlage ausgehen können, stellt das Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG). Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA LUFT, 2002) konkretisiert diese.

Im Sinne der Verwaltungsvorschrift der TA Luft sind Emissionen nach Nr. 2.5 die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen. Immissionen werden nach Nr. 2.1 als auf Menschen, Tiere, Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre oder Kultur- und Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen definiert. Der Schutz vor Gefahren für die menschliche Gesundheit ist laut TA LUFT (2002) sichergestellt, wenn die in Tabelle 2.3 aufgeführten Werte an keinem Beurteilungspunkt überschritten werden.

Ein auf die EU-Rahmenrichtlinie „Luftqualität“ folgendes Gesetz legt für Feinstaub Immissionsgrenzwerte fest, die seit dem 1. Januar 2005 gelten (MÜCKE, 2002).

Tabelle 5: Immissionswerte für Feinstaub (nach TA LUFT, 2002)

Konzentration [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Ermittlungszeitraum	Zulässige kumulative Überschreitungshäufigkeit des Immissionswertes im Jahr
max. 40	12 Monate	-
max. 50	24 Stunden	35

Die Immissionswerte für Staub dürfen $40 \mu\text{g m}^{-3}$ in einem Jahr nicht überschreiten. 35-mal im Jahr darf für 24 Stunden ein Wert von $50 \mu\text{m m}^{-3}$ überschritten werden (NESER, 2006).

Erstmals wurden zum Jahre 2010 Luftqualitätswerte für die besonders gesundheits-schädlichen kleinen Feinstäube (PM_{2,5}) festgesetzt. Ab dem 1. Januar 2010 trat ein PM_{2,5}-Zielwert von 25 µg m⁻³ pro Kalenderjahr in Kraft. Der Grenzwert von 25 µg m⁻³ pro Kalenderjahr soll nach BMU (2008) mit der Frist zum 1. Januar 2015 eingehalten werden. Ein weiterer Grenzwert für PM_{2,5} von 20 µg m⁻³ pro Kalenderjahr soll bis zum 1. Januar 2020 erreicht sein; dieser ist allerdings zum Jahr 2013 erneut von der zuständigen Kommission zu prüfen (BMU, 2010).

Nach KTBL (2009) besteht neben der Festlegung von Emissionsgrenzwerten für Tierhaltungsanlagen, sofern sie unter Anlage 1 Nr. 7.1 bis 7.11, Spalte 1 des Umweltverträglichkeitsgesetz (UVPG) fallen, gemäß § 3b Abs. 1 die Verpflichtung zur Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP). Die UVP wird als Instrument der Umweltvorsorge beschrieben, bei der die direkten und indirekten Auswirkungen eines Vorhabens auf die Umwelt systematisch ermittelt, beschrieben und beurteilt werden (KTBL, 2009).

Weitere Luftqualitätsnormen bringen die nationalen Umgebungsluft-Qualitätsstandards und die Innenraum-Qualitätsstandards. Die Occupational Safety Health Administration (OSHA) bestimmt die offiziellen betrieblichen Innenraum-Qualitätsstandards (ZOO, 2008). In der Atmosphäre gibt es immer Staubpartikel in Suspension von Boden, Pollen und Samen. Laut CHOINIÈRE-FARMSTEAD (1993) schreibt die Verordnung über biologische und chemische Agenzien einen maximalen zeitlich gewichteten Durchschnitts-Messwert (Time-Weighted Average Exposure Value = TWAEV) von 4 mg m⁻³ (entspricht 400.000 Partikel l⁻¹) für Feinstaub und 10 mg m⁻³ (entspricht 1.000.000 Partikel l⁻¹) für Gesamtstaub vor.

Das National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) empfiehlt Höchstwerte gegenüber verschiedenen Schadstoffen in der Luft (ZOO, 2008):

Tabelle 6: Höchstwerte verschiedener Schadstoffe (nach Zoo, 2008)

	NH₃ (ppm)	H₂S (ppm)	CO₂ (ppm)	TSP (mg*m⁻³)
NIOSH	25	10	5000	4
OSHA	50	20	5000	15

Die Höchstwerte für NH_3 nach NIOSH entsprechen den deutschen Richtlinien.

Die Emissionsgrenzwerte für den Gesamtstaub liegen nach TA LUFT (2002) bei einem Massenstrom von $0,2 \text{ kg h}^{-1}$ und einer Massenkonzentration von $20,0 \text{ mg m}^{-3}$. Nur in Ausnahmefällen werden diese Werte in der Milchviehhaltung überschritten.

Nach der TIERSCHNUTZTV (2006) liegt der Grenzwert des einatembaren Staubes bei 10 mg m^{-3} . Weiterhin werden die Vorgaben der TierSchNutzTV im Vergleich zu den Grenzwerten der TA Luft als sehr viel strenger beschrieben. Diskutiert wird jedoch häufiger über die Gesundheitsbelastungen des Arbeitnehmers, bzw. des Landwirts.

2.12 Partikelinnenraumkonzentrationen in der Schweinehaltung

In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zu Partikelinnenraumkonzentrationen in der Schweinehaltung. Die nachfolgende Tabelle soll dazu einen Überblick verschaffen. Die Angaben sind nach dem Erscheinungsjahr geordnet. Die zum Teil recht erheblichen Unterschiede zwischen den Angaben können zum einen in unterschiedlichen Messmethoden und zum anderen in unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Haltungs- und Lüftungssystem, Klima) begründet sein.

Tabelle 7: Partikelinnenraumkonzentrationen in der Schweinehaltung (nach CAMBRA-LOPEZ ET AL., 2010)

	Konzentration [mg*m ⁻³]		Land	Haltungsabschnitt	Quelle
	Mittelwert	Bereich			
Einatembare Fraktion*	6,25	3,2 bis 15,3	Vereinigte Staaten	verschiedene Abschnitte	DONHAM et al. (1986)
	7,8	3,1 bis 14,5	Vereinigte Staaten	Endmast	HEBER et al. (1988)
	0,72	0,12 bis 2,14	Vereinigte Staaten	Mittelmast	MAGHIRAN G et al. (1997)
	-	1 bis 5	Deutschland	Mittelmast	HINZ und LINKE (1998)
	2,19	1,87 bis 2,76	verschiedene europäische Länder	Sauen, Ferkel und Mastschweine	TAKAI et al. (1998)
	0,43	-	Niederlande	Ferkelaufzucht	AARNINK et al. (1999)
	-	0,79 bis 1,91	Schweden	Mittel- bis Endmast	GUSTAFSSON (1999)
	-	0,42 bis 6,86	Vereinigte Staaten	Endmast	SCHMIDT et al. (2002)
	-	2,08 bis 5,67	Niederlande	Mittel- bis Endmast	AARNINK et al. (2004)
	-	0,05 bis 5,6	Vereinigte Staaten	Endmast	BOTTCHER et al. (2004)
	-	0,4 bis 3,7	Deutschland	Mittelmast	HAEUSSER MANN et al. (2006)
Alveolengängige Fraktion**	0,23	0,18 bis 0,26	verschiedene europäische Länder	Sauen, Ferkel und Mastschweine	TAKAI et al. (1998)
	-	0,09 bis 0,30	Schweden	Mittel- bis Endmast	GUSTAFSSON (1999)
	-	0,04 bis 0,44	Vereinigte Staaten	Endmast	SCHMIDT et al. (2002)
	-	0,16 bis 0,71	Niederlande	Mittel- bis Endmast	AARNINK et al. (2004)
	-	0,00 bis 0,85	Deutschland	Mittelmast	HAEUSSER MANN et al. (2006)

* äquivalente Betrachtung von einatembarer Fraktion und „Total Suspended Particulates“ (TSP)

**äquivalente Betrachtung von alveolengängiger Fraktion und PM₄ (gemäß EN 481 und ISO 7708) bzw. PM₅(gemäß Johannesburger Konvention)

Tabelle 8: Mittlere einatembare und alveolengängige Staubkonzentrationen in Milchviehställen (nach Takai et al., 1998)

	Anzahl der Feldmessungen	Konzentration [mg m⁻³]	Land
Einatembare Fraktion	36	0,22	England
	64	0,30	Niederlande
	63	0,39	Dänemark
	68	0,65	Deutschland
	231	0,38	Gesamt
Alveolengängige Fraktion	35	0,15	England
	62	0,09	Niederlande
	64	0,04	Dänemark
	68	0,05	Deutschland
	229	0,07	Gesamt

Tabelle 9: Mittlere einatembare und alveolengängige Staubkonzentrationen in Geflügelställen (nach Takai et al., 1998)

	Anzahl der Feldmessungen	Konzentration [mg m⁻³]	Land	Quelle
Einatembare Fraktion	48	3,31	England	TAKAI ET AL., 1998
	50	4,58	Niederlande	TAKAI ET AL., 1998
	32	4,52	Dänemark	TAKAI ET AL., 1998
	32	2,22	Deutschland	TAKAI ET AL., 1998
	162	3,60	Gesamt	TAKAI ET AL., 1998
		2,24	Deut.; Käfighaltung	LOHMANN, 2004
		3,16 – 11,61	Deut.; Bodenhaltung	LOHMANN, 2004
		8,02 – 10,99	Deut.; Volierenhaltung	LOHMANN, 2004
Alveolengängige Fraktion	43	0,51	England	TAKAI ET AL., 1998
	49	0,58	Niederlande	TAKAI ET AL., 1998
	32	0,64	Dänemark	TAKAI ET AL., 1998
	32	0,19	Deutschland	TAKAI ET AL., 1998
	156	0,45	Gesamt	TAKAI ET AL., 1998

3 Material und Methoden

3.1 Charakterisierung und Darstellung der ausgewählten Versuchsbetriebe

3.1.1 Haltungssystem Schwein

In der vorliegenden Arbeit wurden fünf verschiedene Mastschweinställe, ein Abferkelabteil sowie ein Wartestall untersucht, die sich hinsichtlich ihres baulichen Konzepts und der Zuluftführung unterschieden (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Übersicht der untersuchten Schweinställe

	Stall 1	Stall 2	Stall 3	Stall 4	Stall 5	Stall 6	Stall 7
Untersuchungszeitraum	Sept. 2010	Sept. 2010	Sept. 2010	Okt. 2010	Okt. 2010	Nov. 2010	Nov. 2010
Tierzahl	10 Mast-schweine	160 Mast-schweine	120 Mast-schweine	181 Mast-schweine	143 Mast-schweine	12 Schweine, 136 Ferkel	229 Sauen
Ø Gewicht (kg)	105	95	70	91	42	-	-
Lüftung	Offen-front	Riesel-kanal-lüftung	Gang-lüftung	Strahl-lüftungs-system	Türgang-lüftung	Rieselkanallüftung	
Aufstallung	Tief-laufstall (Stroh)	Vollspaltenboden Stall 7: planbefestigte Liegekessel					
Fütterung	Trocken-futter-automat	Breifutterautomat		Flüssigfütterung am Quertrog		Trocken-fütterungs-anlage am Einzeltrog	Abruf-fütterung
Ammoniak (ppm)	17,7	5,0	4,2	5,3	5,5	4,6	28,5
Innenraum-temperatur (°C)	18,0	25,1	25,0	23,8	23,3	22	19

Stall 1

Bei dem Maststall 1 handelt es sich um einen eingestreuten Tieflaufstall. Der Stall hat eine Länge von 10,2 m und eine Breite von 5,5 m, die Höhe beträgt 2,8 m. Dieser Stall wird als

Krankenstall für Schweine in der Endmast genutzt und bietet Platz für 30 Schweine. Die Fütterung erfolgt zweimal täglich von Hand über einen Trockenfutterautomat.

Der Stall ist ein Offenfrontsystem, welches an der Stirnseite mit Lüftungsclappen ausgestattet ist, wodurch ein Luftaustausch gewährleistet wird (STERNBERG, 2011).

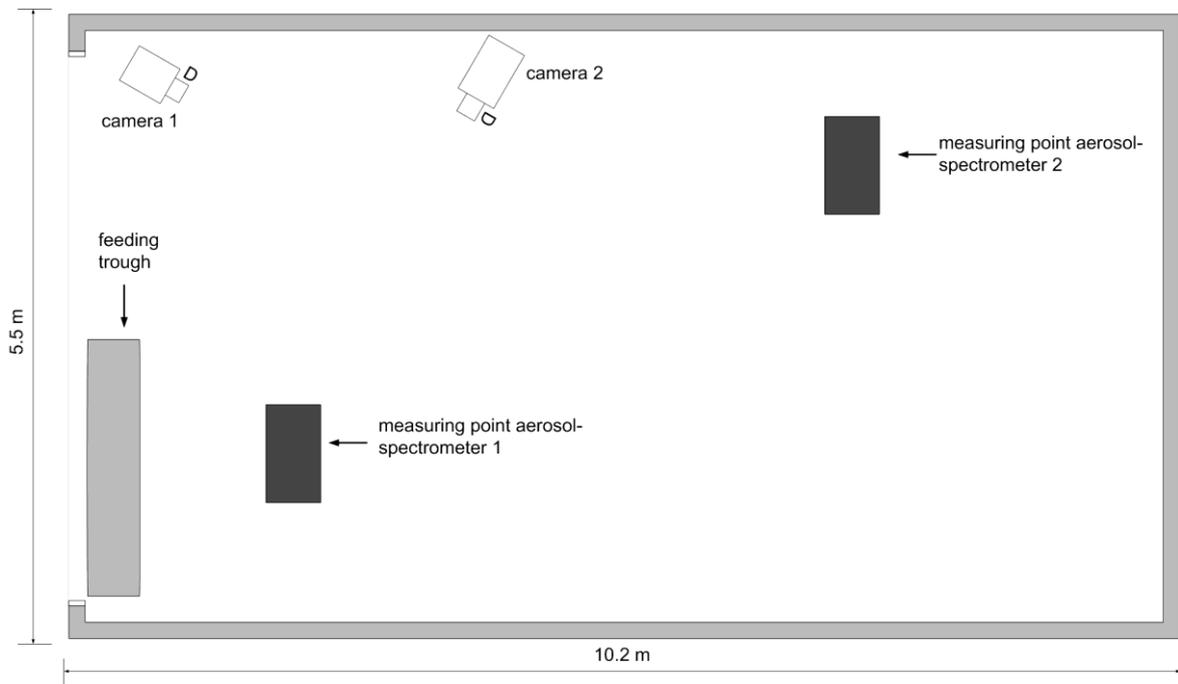


Abbildung 11: Grundriss von Maststall 1 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (STERNBERG, 2011)

Stall 2

Der zweite Stall hat eine Länge von 12,50 m und eine Breite von 11,50 m. Die Belüftung erfolgt über zwei Rieselkanäle, die quer zur Längsachse angeordnet sind. Der mittlere Abstand zwischen den Kanälen beträgt 6,75 m. Die verbrauchte Luft wird über zwei Ventilatoren abgesaugt, die einen Durchmesser von 0,60 m haben und mit Stellklappen ausgestattet sind, welche über einen Klimacomputer gesteuert werden. Die Ventilatoren befinden sich mittig zwischen den Rieselkanälen. Die Fütterung erfolgt automatisch viermal pro Tag. Der zentrale Mittelgang verläuft in Längsrichtung, der Stichgang befindet sich auf der rechten Seite zwischen der zweiten und dritten Bucht. Der Stall bietet Platz für 160 Schweine in 5 Buchten (STERNBERG, 2011).

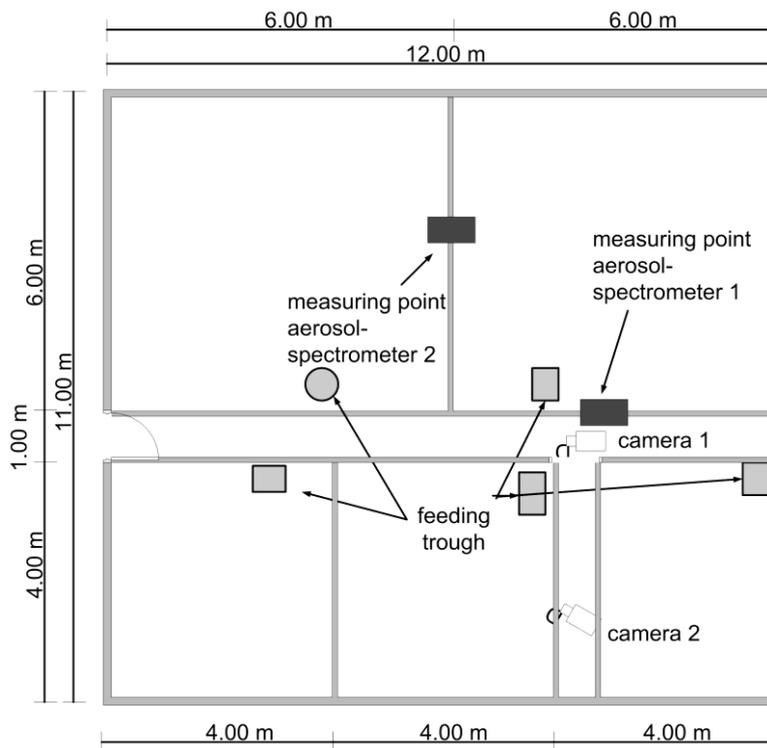


Abbildung 12: Grundriss von Maststall 2 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (STERNBERG, 2011)

Stall 3

Stall 3 ist 14,50 m lang und 8,55 m breit. Es liegt eine Ganglüftung vor, die zentral entlang der Längsachse verläuft. Abgesaugt wird die Luft an der kurzen Seite, gegenüber des Personaleingangs in einer Höhe von 2,50 m, mit jeweils einem Ventilator in der rechten und linken Bucht. Die Steuerung erfolgt über einen Lüftungscomputer. Die Fütterung erfolgt dreimal täglich automatisch in Breifutterautomaten. Stall 3 gliedert sich in fünf Buchten und bietet Platz für insgesamt 120 Schweine (STERNBERG, 2011).

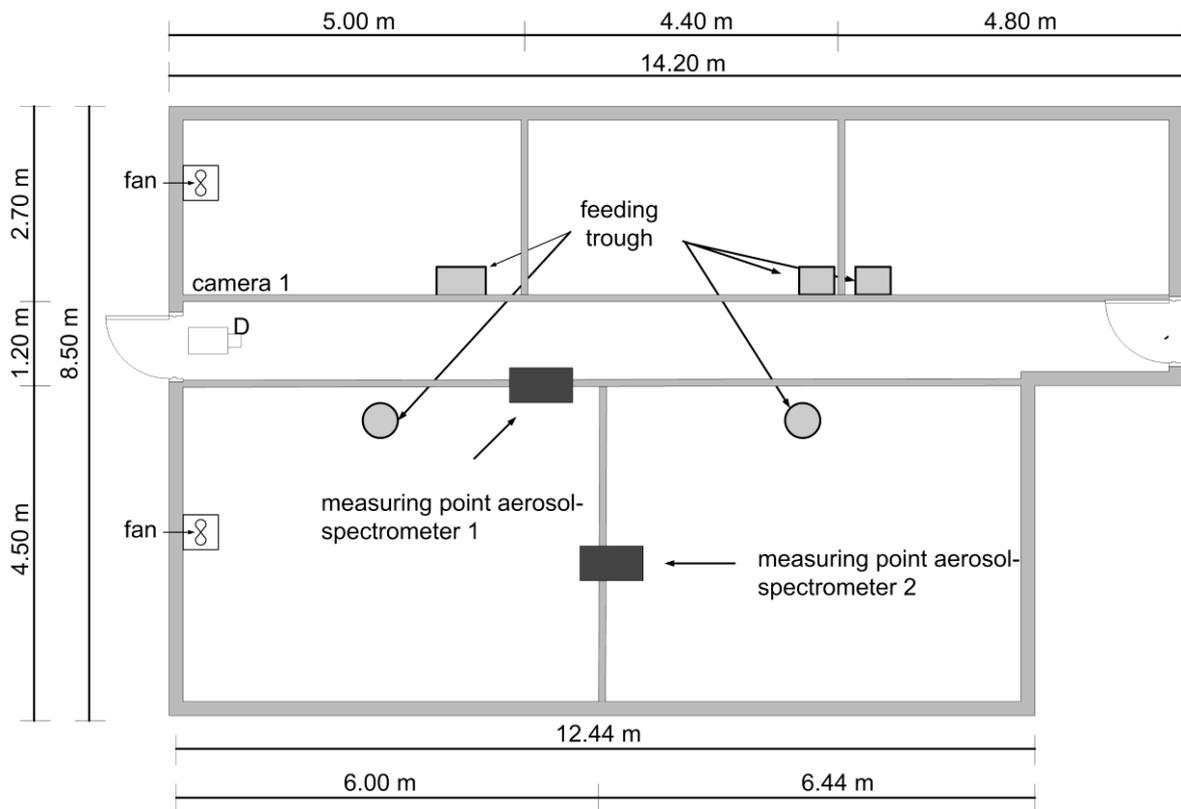


Abbildung 13: Grundriss von Maststall 3 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (STERNBERG, 2011)

Stall 4

Das Abteil im Maststall 4 ist 24,4 m lang, 8,4 m breit, 2,7 m hoch und verfügt über 200 Tierplätze. Die Buchten für die Schweine sind links und rechts vom Kontrollgang angeordnet. Immer zwei Buchten sind an einen Quertrog angegliedert und werden über eine Flüssigfütterungsanlage versorgt. Die Futtervorlage erfolgt täglich dreimal. Die zugeteilte Menge wird über eine Futterkurve angepasst. Hierbei handelt es sich um eine Phasenfütterung, bei der eine Vor- und eine Endmastmischung erstellt werden. Gehalten werden die Tiere auf einem Vollspaltenboden.

Der Stall verfügt über eine zentrale Abluftführung. Die drei Abluftpunkte befinden sich direkt nebeneinander in der Abteilmitte, ihr Querschnitt kann über Stellklappen variiert werden. Für die Frischluftversorgung wird ein Strahl Lüftungssystem verwendet. Bei Bedarf kann die Raumluft durch den Einsatz einer Gaskanone erwärmt werden (NIEHAUS, 2011).

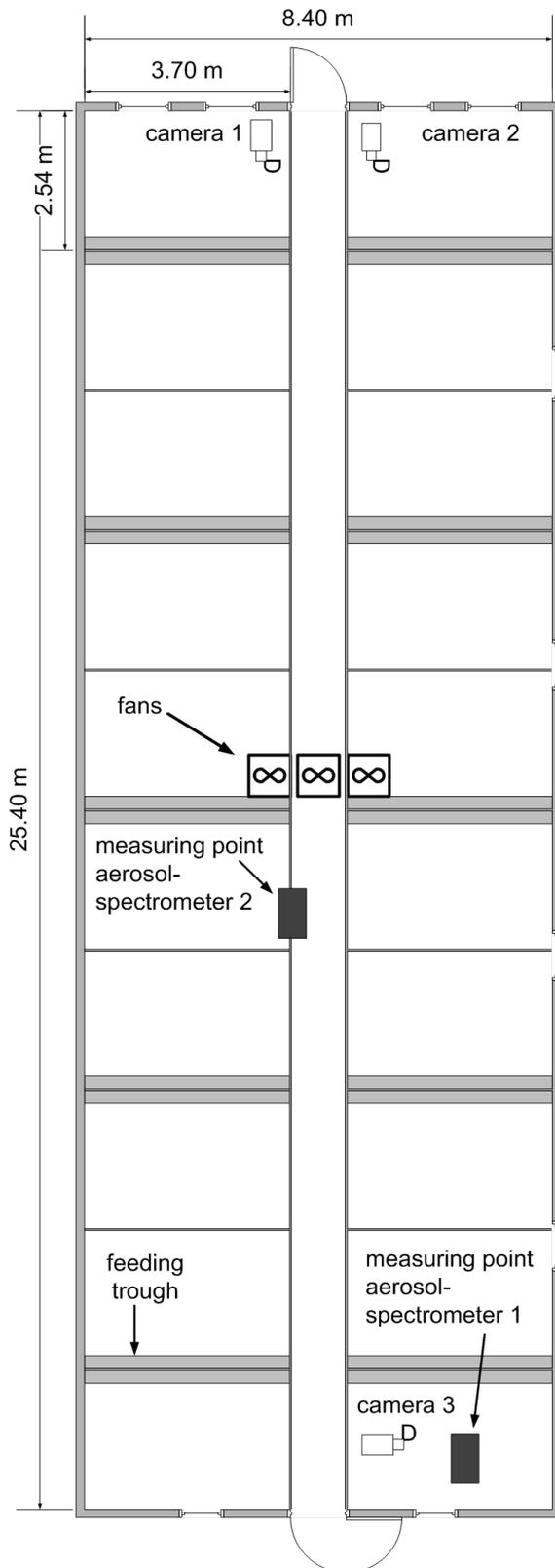


Abbildung 14: Grundriss von Maststall 4 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011)

Stall 5

Das Abteil im Maststall 5 ist 14,4 m lang, 9,6 m breit und 2,9 m hoch. In diesem Abteil finden 144 Schweine in Kleingruppen zu je 12 Tieren Platz. Die Futtervorlage erfolgt täglich in drei Mahlzeiten. Eine Flüssigfütterungsanlage versorgt zwei Buchten, die an einem Quertrog angegliedert sind. Die zugeteilte Menge wird über eine Futterkurve angepasst. Hierbei handelt es sich um eine Phasenfütterung, bei der eine Vor- und eine Endmastmischung erstellt werden. Gehalten werden die Tiere auf einem Vollspaltenboden. Der Stall verfügt über eine dezentrale Abluftführung. Abgesaugt wird die Stallluft über einen Abluftkamin mit Ventilator. Die Frischluftzufuhr wird durch eine Futterganglüftung gewährleistet. Die Frischluft strömt über den Zentralgang und eine Öffnung in der Abteiltür in den Futtergang. Außerdem kann bei Bedarf Frischluft über eine Öffnung am Gangende eingeleitet werden.

Als Heizung dient ein Gebläsekonvektor. Über ein Wickelpfalzrohr in der Abteiltür wird die erwärmte Luft in den Futtergang eingeleitet (NIEHAUS, 2011).

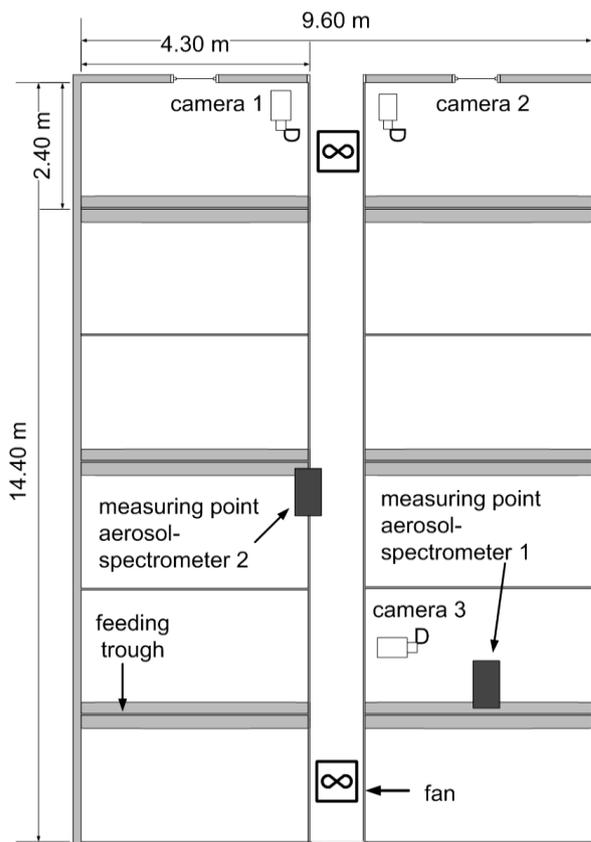


Abbildung 15: Grundriss von Maststall 5 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011)

Stall 6

Das untersuchte Abferkelabteil hat die Abmessungen 10,8 m x 5,6 m x 2,7 m (Länge x Breite x Höhe) und ist für 12 Abferkelbuchten mit den Maßen 1,8 m x 2,4 m (Breite x Länge) vorgesehen. Mit ihren diagonal angeordneten Ferkelschutzkörben liegen diese Buchten quer zum Mittelgang. Der Boden im Aktivitätsbereich der Ferkel besteht aus Kunststoffrosten.

Für eine individuelle Futterzuteilung ist über jedem Trog ein Volumendosierer angebracht, der über ein Drahtseilfördersystem mit Trockenfutter befüllt wird. Die Sauen erhalten ihr Futter in drei Mahlzeiten verteilt über den Tag. Dabei werden die Dosierer zeitgleich entleert, um Unruhe zu vermeiden.

In der gesamten Stallanlage wird auf Rieselkanäle als Zuluftsystem zurückgegriffen. Die Zuluft gelangt über Jalousien an beiden Stirnseiten des Gebäudes in den Zentralgang und wird durch den im Abteil vorherrschenden Unterdruck in die Rieselkanäle und auf diesem Wege in das Abteil gesogen. Der Querschnitt der einseitig eingespeisten Kanäle ist der jeweiligen Abteilgröße angepasst.

In dem beschriebenen Abteil sind die Rieselkanäle links und rechts vom Gang über dem Kopfbereich der Sauen installiert. Der Abluftkamin befindet sich am Ende des Futterganges.

Rund fünf Tage vor dem voraussichtlichen Abferkeltermin werden die Sauen in den Abferkelstall verbracht. Zu Beginn der Messung befanden sich 12 Sauen und 136 Ferkel im Abteil, wobei eine Sau schon am ersten Messtag ausselektiert werden musste. Zu diesem Zeitpunkt waren die Ferkel zwei bis drei Wochen alt. Generell werden in diesem Betrieb die Ferkel nach 3 bis 4 Wochen Säugezeit abgesetzt.

Für den hohen Wärmebedarf der Ferkel befindet sich im Liegebereich eine Fußbodenheizung, die mit Warmwasser betrieben wird. Zusätzlich kann ein Elektro-Infrarot-Strahler über diesem Bereich installiert werden. Auch die Zuluft kann über mit Warmwasser beheizte Twinrohre im Zentralgang erwärmt werden noch bevor sie ins Abteil gelangt (NIEHAUS, 2011).

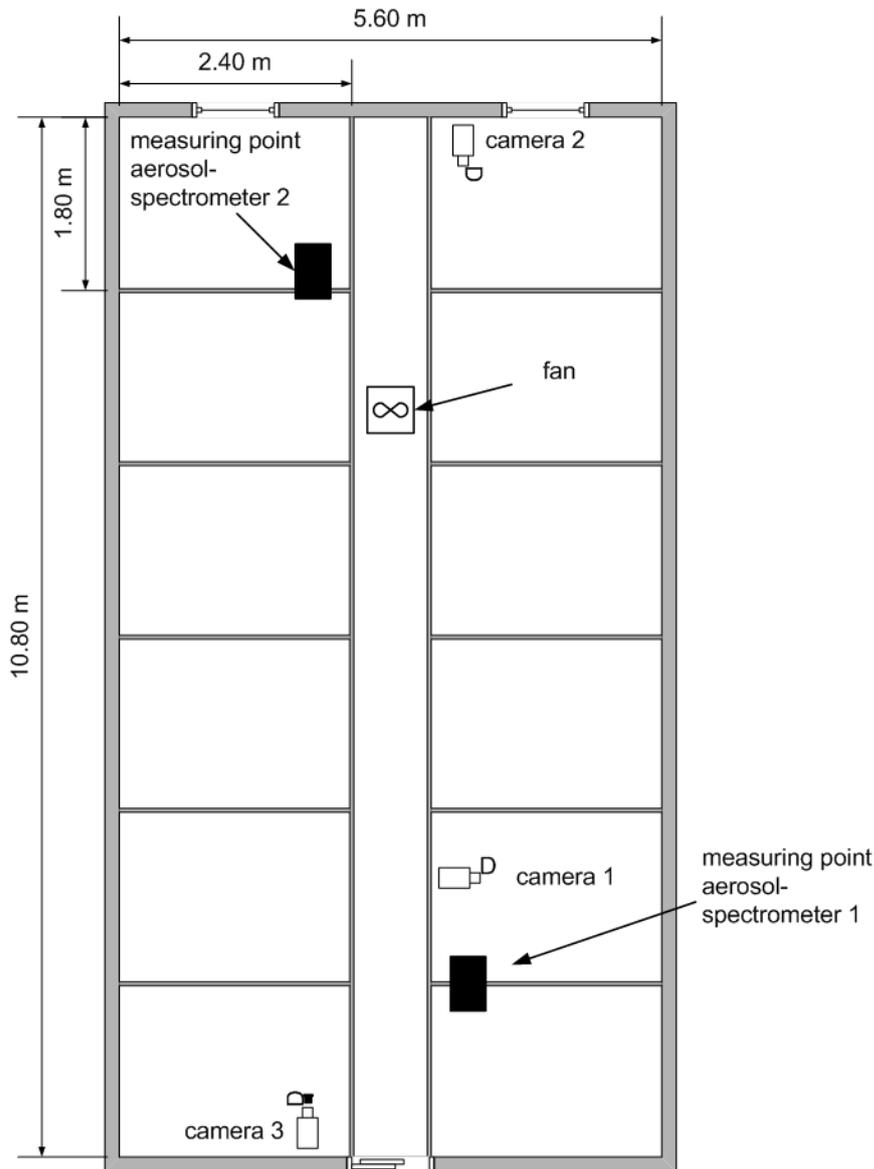


Abbildung 16: Grundriss von Stall 6 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011)

Stall 7

Bei Stall 7 handelt es sich um einen Wartestall, der eine Grundfläche von ca. 494 m² umfasst und sich durch die Anordnung von Aufstallung und Lüftungseinrichtungen in drei etwa gleich große Kompartimente teilt, zwischen denen die Sauen frei hin und her wechseln können. Der untersuchte Abschnitt des Wartestalls ist 18,8 m lang, 8,5 m breit und 2,7 m hoch. Als Ruhebereich stehen Liegekessel mit planbefestigten Böden und drei geschlossenen Seitenwänden zur Verfügung. Diese sind U-förmig angeordnet. In der Mitte befindet sich der Aktivitätsbereich, der mit Vollspaltenboden ausgestattet ist. Die

Versorgung der Tiere mit Futter wird durch vier Abrufstationen gewährleistet. Diese sind entlang einer Achse nebeneinander aufgereiht und trennen dadurch einen Bereich für Sauen ab, die aus der Gruppe ausselektiert werden sollen. Die abrufbare Futtermenge wird durch den Tierhalter nach Beurteilung von Größe und Kondition festgelegt. Jeden Abend ab 19 h stehen den trächtigen Sauen neue Futterrationen zu, die sie in mehreren Teilmengen abrufen können. Die Rieselkanäle für die Frischluftversorgung sind an der Stalldecke quer zur Längsachse des Gebäudes über den Liegeflächen angebracht. Dieser Teil der Stallanlage ist an eine zentrale Abluftführung angegliedert. Die Stallluft wird in der vorderen Hälfte des beschriebenen Teilbereiches in etwa mittig durch eine große Einströmdüse mit Stellklappen abgeführt.

Da wöchentlich niedertragende Sauen nach erfolgreicher Trächtigkeitsdiagnose in die Gruppe integriert und hochtragende Sauen zum Abferkeln aus der Gruppe herausgenommen werden, handelt es sich bei den im Wartestall befindlichen Tieren um eine dynamische Gruppe oder Wechselgruppe. Die Zahl der Sauen, die in diesem Stall gehalten werden schwankt zwischen 200 und 240 Tieren. Zu Beginn der Messung befanden sich in den drei Kompartimenten 229 Sauen (NIEHAUS, 2011).

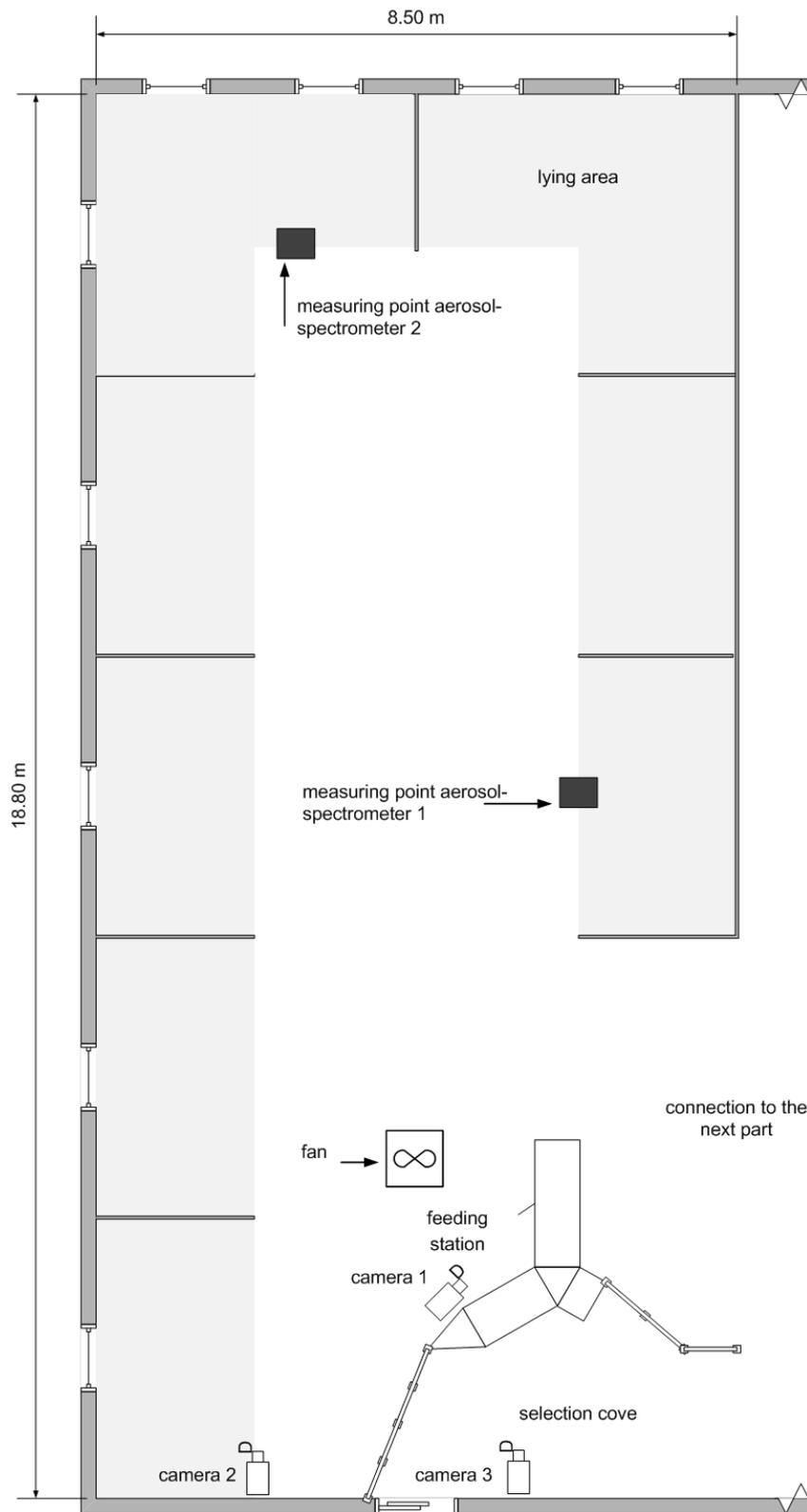


Abbildung 17: Grundriss von Stall 7 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (NIEHAUS, 2011)

3.1.2 Haltungssystem Rind

Für die folgenden Untersuchungen wurden drei Milchviehbetriebe ausgewählt, die sich hinsichtlich ihres baulichen Konzepts und des Lüftungsverfahrens unterschieden.

Tabelle 11: Übersicht der untersuchten Milchviehställe

	Stall 1	Stall 2	Stall 3
Untersuchungszeitraum	Okt. 2010	Okt.-Nov. 2010	Dez. 2010
Tierzahl	63	120	64
Lüftung	Offenfront	Trauf-First	Querlüftung
Aufstallung	Spaltenboden	Spaltenboden	Planbefestigter Boden
Fütterung	TMR	TMR	TMR
Melkzeiten	2	2	2
Ammoniak (ppm)	0,4	3,5	0,4
Innenraumtemperatur (°C)	10	14	8

Stall 1

Der Milchviehstall 1 ist ein zweireihiger Liegeboxenlaufstall (Baujahr 2000) mit einer Länge von 60,4 m und einer Breite von 8,6 m und bietet Platz für 63 Kühe. Der Stall ist nach dem Offenfront-Lüftungssystem gebaut und verfügt zusätzlich über einen Ventilator.

Bei den Liegeboxen handelt es sich um Hochboxen mit Gummiauflage. Das Einstreuen erfolgt jeden dritten Tag während der abendlichen Stallzeit mit einem Sägespäne-Kalk-Gemisch. Die Grundfuttergabe wird als TMR vorgelegt, die Kraftfutterzuteilung erfolgt per Hand im Fressgitter. Die Kühe sind dazu je nach Milchleistung farblich markiert.

Der Laufgang im Stall ist 3,5 m breit. Unter dem Spaltenboden befindet sich der Güllespeicher, welcher etwa 2 m tief ist. Nachts wird für etwa eine Stunde ein Güllemixer aktiviert. Zweimal am Tag während der Melkzeiten werden die Spalten manuell gereinigt (FEUSER, 2011).

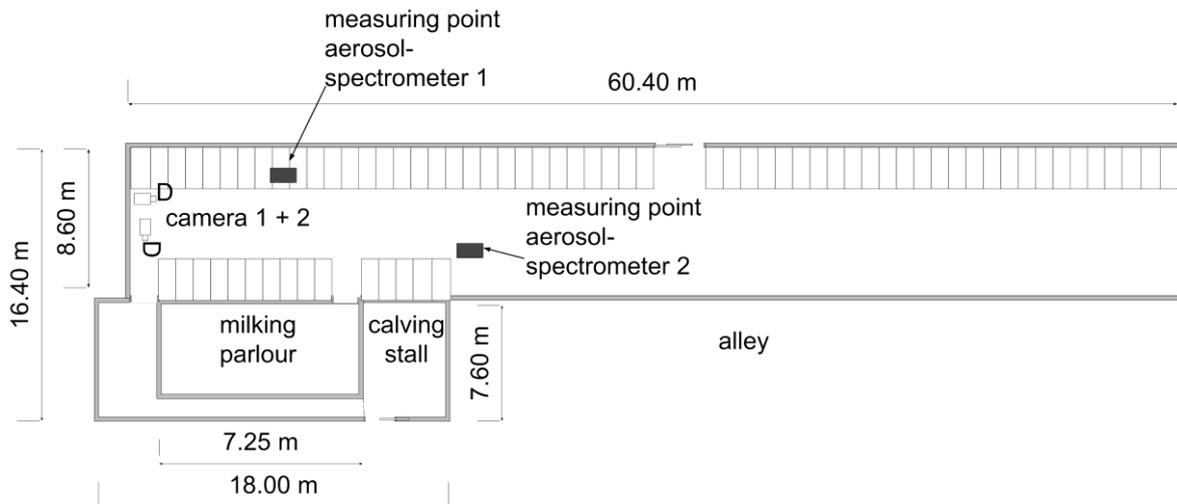


Abbildung 18: Grundriss von Milchviehstall 1 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (FEUSER, 2011)

Stall 2

Das Stallgebäude des zweiten Betriebes ist in zwei Hälften aufgeteilt. Auf der linken Seite des Futtertisches befinden sich zwei Abkalbeboxen, die gelegentlich auch als Krankenboxen genutzt werden und der Stallbereich für die Kälber und Rinder. Ebenfalls auf dieser Seite befindet sich eine Art Grube, in der Strohballen ($\varnothing 1,20$ m) zur Einstreu der Abkalbeboxen gelagert werden. Auf der rechten Seite des Gebäudes ist ein dreireihiger Liegeboxenlaufstall angelegt, in dem 120 Kühe Platz finden. Eingestreut wird hier mit einem Pferdemit-Sägespäne-Gemisch.

Der Doppel-6er-Fischgräten Melkstand grenzt direkt an den Stall. Die Kühe betreten diesen vom Spaltenboden aus und passieren vorher keinen Vorwarteraum.

Es liegt eine Tauf-First-Lüftung vor. Weiterhin wurden Spaceboards verwendet. Die Fütterung erfolgt mit Hilfe eines Hoftracks und wird von Komponente zu Komponente auf dem Futtertisch verteilt. Das Kraftfutter beziehen die Kühe über eine Kraftfutterabrufstation.

Die Arbeit in diesem Betrieb konzentrierte sich ausschließlich auf den rechten, in der Abbildung auf den unteren, Bereich des Stallgebäudes (FEUSER, 2011).

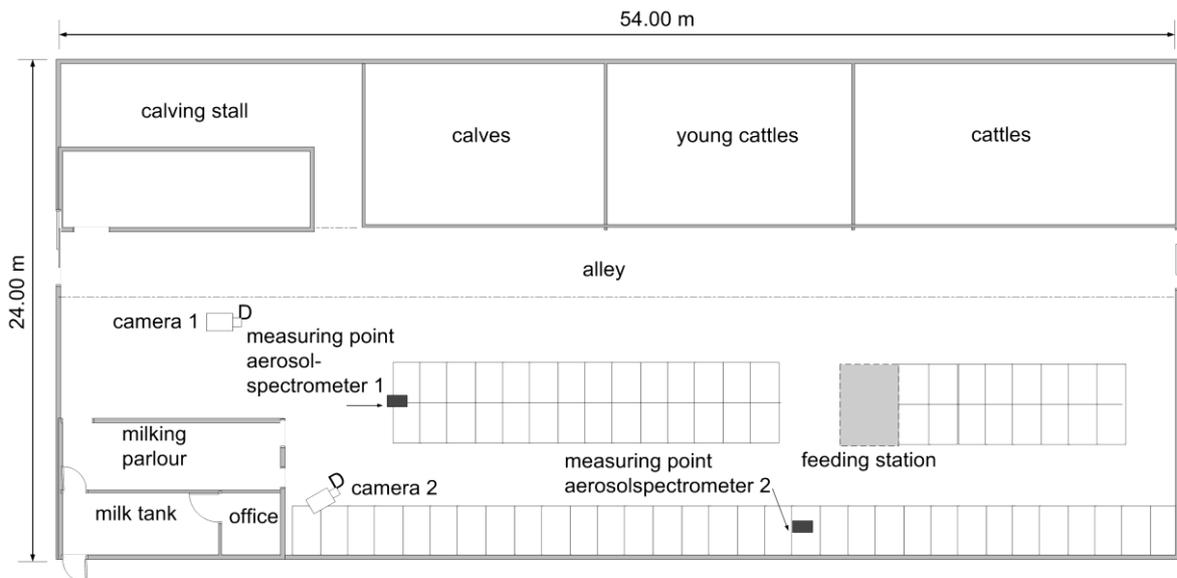


Abbildung 19: Grundriss von Milchviehstall 2 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (FEUSER, 2011)

Stall 3

Der dritte Milchviehstall ist ein zweireihiger Liegeboxenlaufstall in Stahlbauweise mit Querlüftung. Die Futtertröge befinden sich hierbei auf der rechten Seite des Stalls. Nach Erfassung der Milchkühe per Transponder, öffnet sich eine Schiene, wobei den Tieren der Zugang zum Futter gewährt wird. Die gefressene Menge an Futter wird in den Trögen gewogen, elektronisch erfasst und auf dem Betriebs-Computer gespeichert.

Der Melkstand ist in einem benachbarten Gebäude nur wenige Meter vom Stallgebäude entfernt untergebracht und sehr großzügig angelegt. Die Kühe sind während des Melkvorgangs durch Absperrungen, die nach Betreten des Melkplatzes nach jeder Kuh schließen, voneinander getrennt. Es handelt sich hierbei um einen Doppel-4er-Tandem Melkstand.

Die Futtervorlage erfolgt einmal täglich mit Hilfe eines Futtermischwagens. Das Kraftfutter beziehen die Kühe über eine Kraftfutterabrufstation.

Der Stall ist ausgestattet mit einem planbefestigten Boden mit perforierter Gummiauflage, welche beim Laufen besseren Halt bietet. Stündlich wird ein Mistschieber für etwa fünfzehn Minuten betätigt, der den Boden von Kot und Urin befreit.

Das Stallgebäude bietet Platz für 64 Kühe. Die trocken gestellten Tiere, welche nicht gemolken werden, sind ausgegliedert (FEUSER, 2011).

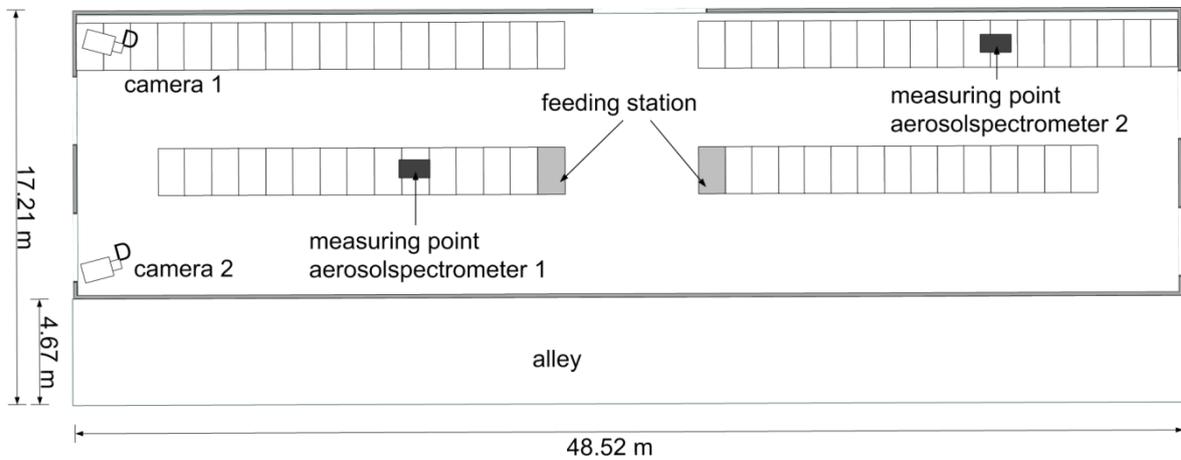


Abbildung 20: Grundriss von Milchviehstall 3 mit den Positionen für die Mess- und Überwachungstechnik (FEUSER, 2011)

3.1.3 Haltungssystem Geflügel

In Tabelle 12 sind die untersuchten Geflügelställe aufgeführt. Die Ställe unterscheiden sich in der Tieranzahl und in der Aufstallungsform.

Tabelle 12: Übersicht der untersuchten Geflügelställe

	Stall 1	Stall 2
Untersuchungszeitraum	Nov. 2008 – Jan. 2009	Mrz. - Apr. 2011
Tierzahl	46.080	25.076
Lüftung	Dezentrale Oberflurabsaugung	
Aufstallung	Kleingruppe	Volierenhaltung
Fütterung	Legemehl über Kettenförderanlage	
Ammoniak (ppm)	1,9 – 4,2 unten – oben	-
Innenraumtemperatur (°C)	22	19

Stall 1

Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurde ein praxisüblicher zwangsbelüfteter Legehennenstall ausgewählt. Die Legehennen sind in diesem Gebäude in Kleingruppenhaltung aufgestellt.

Der Versuchsstall hat eine Gesamtlänge von 65,50 m und eine Breite von 28,25 m. Die Stallgrundfläche beträgt 1.850 m². Die Traufenhöhe erreicht 3,10 m, die Firsthöhe 5,80 m. Daraus ergibt sich ein Stallvolumen von 8.234 m³.

Auf beiden Stall-Längsseiten befinden sich in 1,90 m Höhe im Tierbereich durchgehend Lüftungsschächte. Diese sind so konstruiert, dass eine Zuführung der Frischluft in den unteren und oberen Bereich der Stallanlage kontinuierlich gewährleistet ist. Die Öffnung der Lüftungsschächte wird mittels Stellmotoren über den Klimacomputer gesteuert.

Die Abluft wird über 26 Abluftkamine (Ø 650 mm) oberflurseitig abgesaugt. Diese befinden sich je zur Hälfte links und rechts versetzt entlang des Stallfirstes. Sie reichen ca. 90 cm in das Stallgebäude hinein. Jeder Abluftkamin ist mit einer Einströmdüse ausgestattet. Daran ist eine Drehklappe montiert, die als Kaminabschluss und zur Luftstromreduzierung dient. Unter jedem Abluftkamin ist zusätzlich eine Wasserauffangwanne (Ø 1,10 m) installiert. Dachseitig ist jeder Abluftkamin mit einem Diffusor ausgestattet. Zwei Abluftventilatoren werden stufenlos geregelt, die restlichen 24 Ventilatoren werden nur ein- bzw. ausgeschaltet. Die Ventilatoren werden über den Klimacomputer geregelt, die Drehklappen der Abluftkamine werden mittels Stellmotoren gesteuert.

Das zu untersuchende Stallgebäude ist mit der Kotbandanlage EUROVENT EV 625A-EU der Firma Big Dutchman International GmbH, Vechta ausgestattet. Diese vieretagige Anlage besteht aus insgesamt zehn Kleingruppenreihen. Jede Reihe ist 1,67 m breit, 2,99 m hoch und 57,89 m lang. Stirnseitig ist vor jede Reihe in einer Länge von 2,25 m ein Elevator mit Simultanübergabe installiert, der eine Übergabe der Eier aus jeder Ebene vom Sammelband auf die Quersammlung ermöglicht.

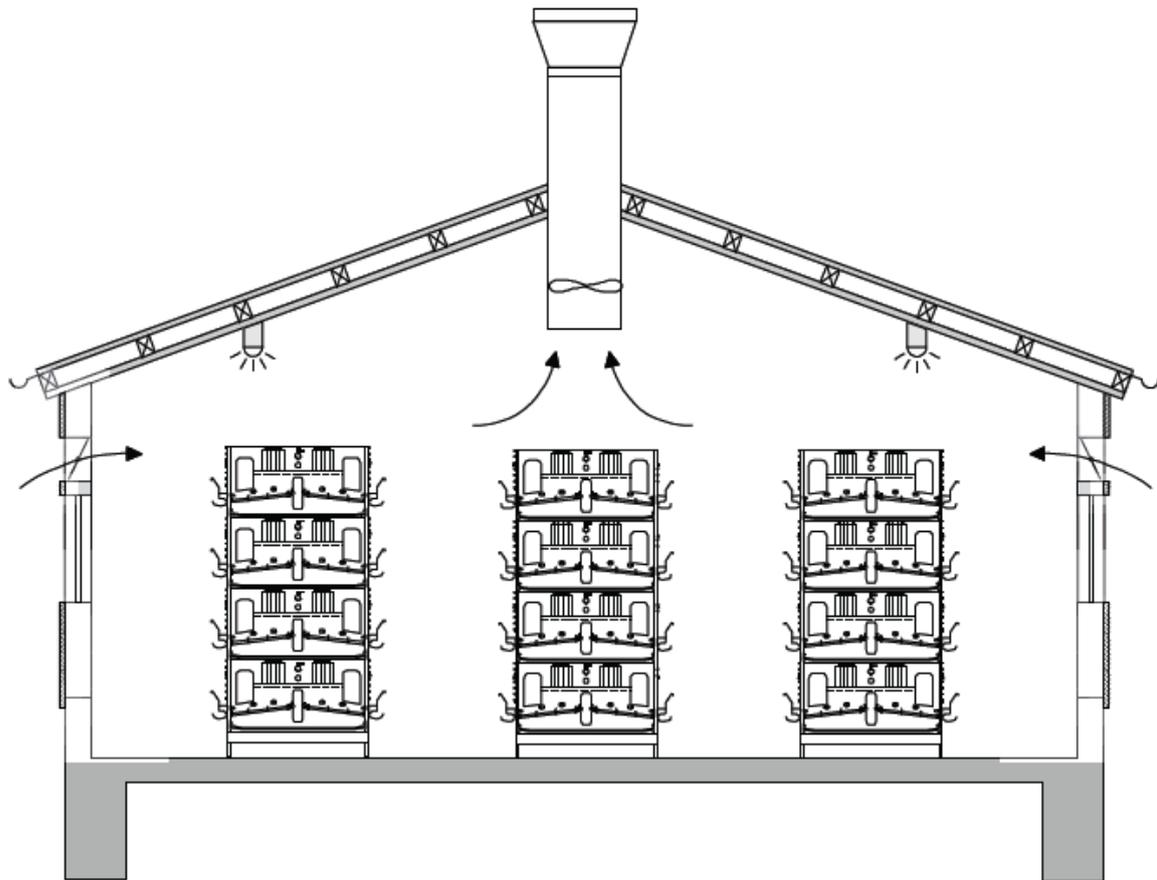


Abbildung 21: Schematischer Querschnitt des untersuchten Stallgebäudes (KTBL, 2006)

Rückseitig befindet sich die Kotbandentmischung. Diese ist in einer Länge von 2,17 m hinter jeder Kleingruppenreihe installiert. In diesem Bereich findet die Übergabe des Hühnerkotes von den Kotbändern der Kleingruppen aus allen vier Etagen auf den Kotquerkanal mit integriertem Kotförderband statt. Die Förderung des Kotes aus dem Stallgebäude hinaus geschieht in einem 0,75 m tiefen und 1,20 m breitem Kanal unterhalb des Stallbodens.

Zwischen den Anlagenreihen befinden sich Kontrollgänge für das Stallpersonal. Diese haben zum Teil unterschiedliche Breiten zwischen 0,85 m und 1,47 m. Zwei Quergänge auf der Vorder- und Rückseite des Stalles haben eine Gangbreite von je 1,25 m.

Die Stallanlage bietet Platz für insgesamt 1.280 Kleingruppen. Während des Messzeitraums waren 36 Legehennen je Kleingruppe eingestallt. Der Gesamtbestand an Legehennen betrug zum Zeitpunkt der Einstallung 46.080 Tiere.

Jede Gruppe ist mit einem abgedunkelten Gruppennest, einem Scharraum mit Einstreumatte und zwei Sitzstangen auf gleicher Ebene ausgestattet. Vor dem Futtertrog befindet sich eine Fläche zum „Krallenabnutzen“ aus Siliziumkarbid.

Die Futtermittellieferung erfolgt durch eine Kettenfütterung entlang der Gruppenlängsachse im Kontrollgangbereich für jede Etage sichergestellt. Die Wasserversorgung erfolgt mittels Nippeltränken. Diese verlaufen oberhalb des Luftkanals für die Kotbandbelüftung. Dadurch sind zehn Edelstahlrippel mit Tropfwasserauffangschalen von zwei sich gegenüberliegenden Gruppen gleichzeitig erreichbar. Abbildung 22 ermöglicht eine Übersicht über alle Funktionsbereiche des EUROVENT EV 625A-EU der Firma Big Dutchman International GmbH, Vechta (RÖSMANN, 2009).

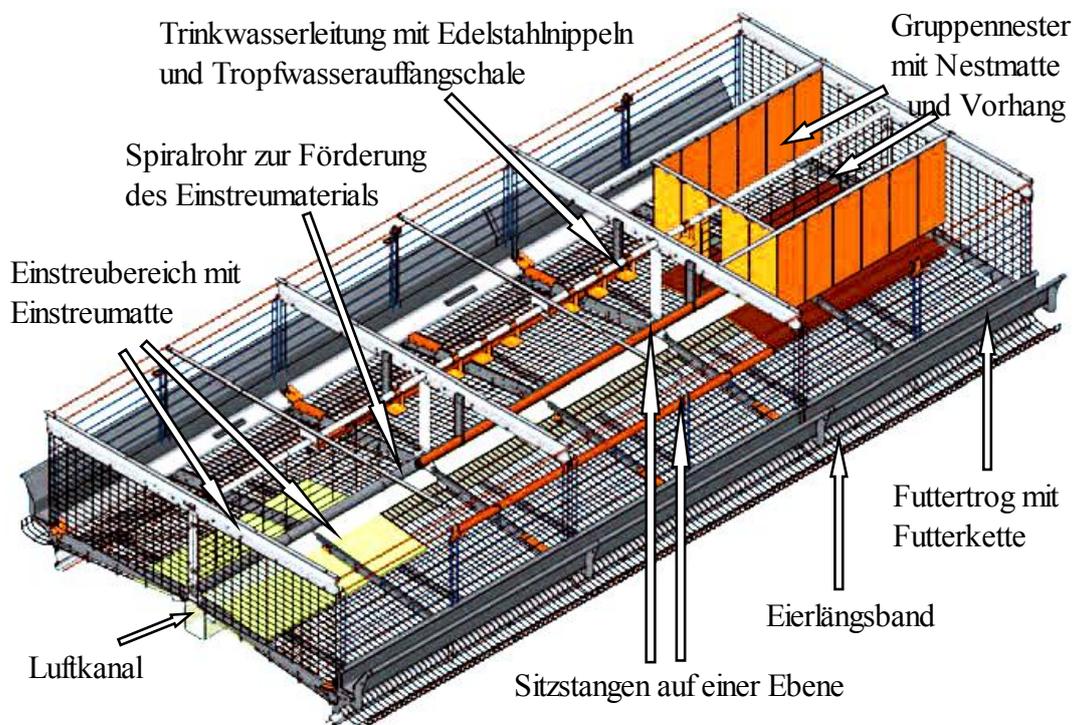


Abbildung 22: Funktionselemente des EUROVENT EV 625A-EU (verändert nach Big Dutchman International GmbH, Vechta)

Stall 2

Bei dem in den Abbildung 23 und Abbildung 24 skizzierten Untersuchungsstall handelt es sich um einen Geflügelbetrieb mit 25.076 Legehennenplätzen in Freilandhaltung. Der im August 2010 fertiggestellte Stall mit einer Länge von 108 m und einer Breite von 18 m und ist mit drei Volierenanlagen ausgestattet.

Die Haltung der Tiere erfolgt in vier Ebenen, wobei der Boden die erste Ebene ist und als Scharfläche dient. Um eine Gruppengröße von unter 6.000 Tieren zu gewährleisten, ist der Stall in fünf Abteile unterteilt, die durch Gitter voneinander getrennt sind. Über 50 Auslaufklappen haben alle Tiere Zugang zum Kaltscharraum, der sich auf der Nordseite des Stalls befindet. Dieser hat eine Fläche von 600 m² und verfügt über Zapfentränken. Über den Kaltscharraum erfolgt der Auslauf in den Freilandbereich, der mit einer Fläche von zehn Hektar bemessen ist.

Die Entmistung erfolgt über Kotbänder, die zwei Mal wöchentlich bedient werden. Auf eine Kotbandtrocknung wird verzichtet. Legemehl wird den Tieren in den Volieren in jeder Ebene mit Hilfe von automatisierten Futterketten zur Verfügung gestellt. Außerdem finden sich in allen Ebenen Sitzstangen, Legenester sowie Zapfentränken.

Die Abluftführung erfolgt dezentral über sechs Abluftkamine. Frischluft tritt über Einlassklappen an den Stalllängsseiten ein. Die Lüftungsrate kann bei Hitze durch zusätzliche Ventilatoren am hinteren Stallgiebel gesteigert werden. Kühlung kann zusätzlich über den Einsatz einer Sprühbefeuchtung erreicht werden, welche jedoch hauptsächlich der Staubbindung dient. Sie wurde über die Messperiode während des Lichttages in Halbstundenintervallen eingesetzt.

Als Einstreu werden sowohl Strohpellets als auch Strohmehl verwendet.

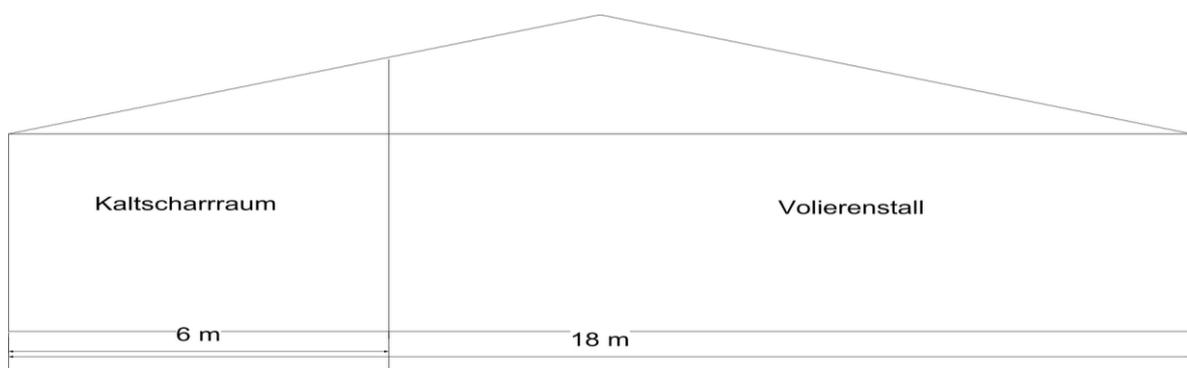


Abbildung 23: Querschnitt des Geflügelversuchsstall 2 (JAEGER, 2011)

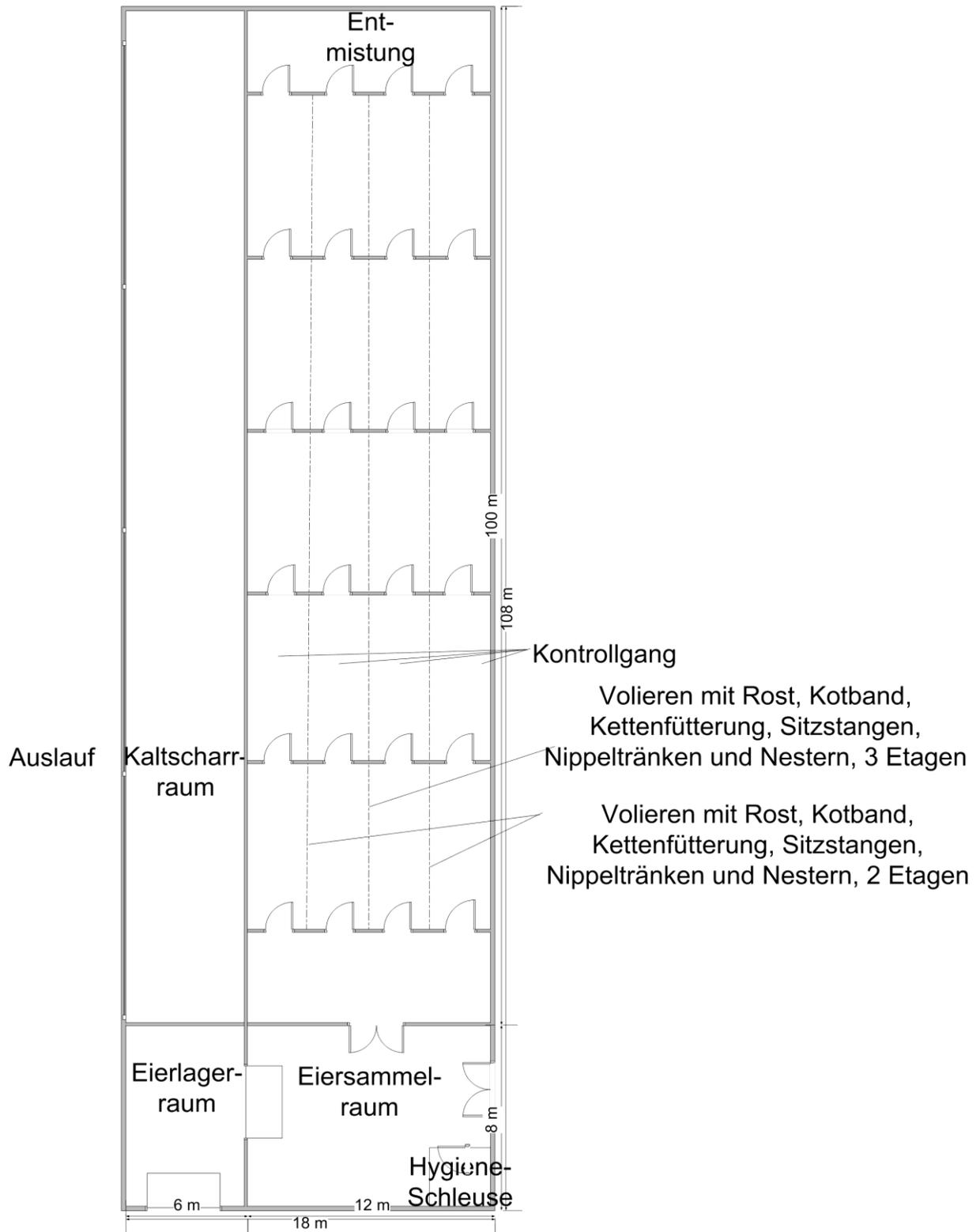


Abbildung 24: Abbildung des Geflügelversuchsstall 2 (JAEGER, 2011)

3.2 Staubsammeltechnik

Die Staubsammlung in den Tierställen bildet die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften. Um eine einwandfreie Staubprobe zu erzielen, sollte diese möglichst frei von Vogelkot oder größeren Futter- und Einstreuresten sein. Die hierfür konstruierte Horizontalsichte war schon in früheren Untersuchungen erfolgreich im Einsatz. Die Horizontalsichte (Abbildung 25) besteht aus Sperrholz. Der 167,0 cm lange Kanal besitzt eine Höhe von 20,0 cm und ist 10,0 cm breit. Im Inneren des Kanals sind sieben Prallplatten aus Holz installiert, die wechselseitig im oberen und unteren Bereich der Horizontalsichte angebracht sind. Die Probenluft wird durch einen kleinen elektrisch angetriebenen Ventilator (Modell 4412 FGL der Firma ebm Papst) mit einer Drehzahl von 1.600 U min^{-1} und einem Volumenstrom von $94 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ durch eine kleine gegenüberliegende Öffnung (1,0 cm hoch, 10,0 cm breit) geführt. Die Probenluft wird wellenförmig durch den Kanal gesogen. Die Staubpartikel stoßen hierbei gegen die eingebauten Prallplatten und lagern sich größenabhängig in die am Boden installierten Metallbehälter ab (HENSELER-PAßMANN, 2010).

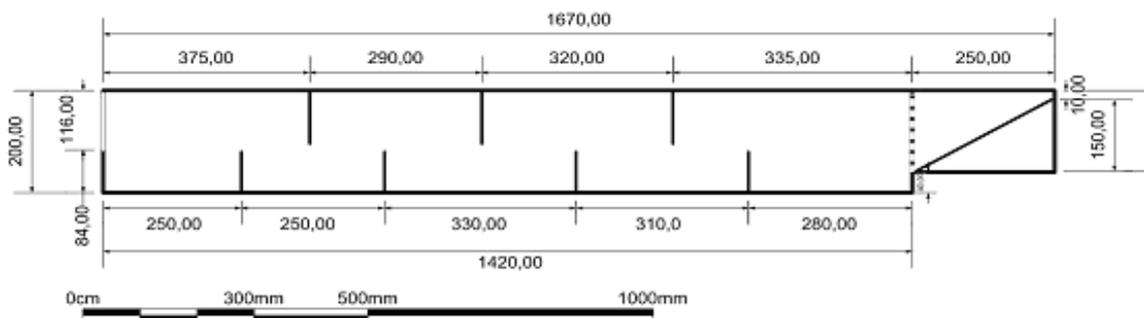


Abbildung 25: Technische Zeichnung der Horizontalsichte (HENSELER-PAßMANN, 2010)

3.3 Chemische Analyse

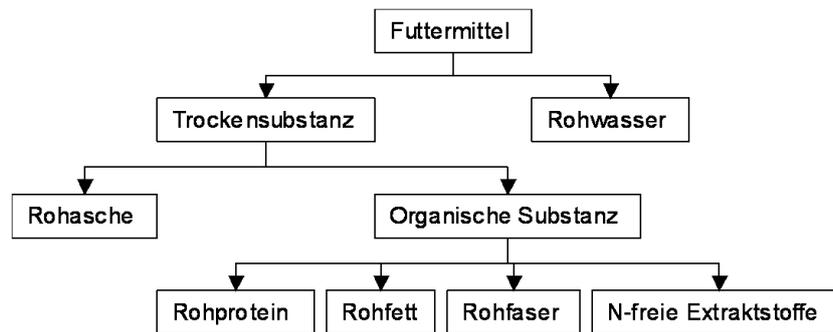


Abbildung 26: Schema der Weender-Analyse (nach WEISS et al. 2000)

Mit Hilfe der Weender-Analyse (Trennprinzip gemäß Abb. 26) soll die Herkunft des Staubes in den Tierställen näher eingegrenzt werden. Zur Quellenbeschreibung des Rinderstallstaubes erfolgte die Weender-Analyse mit Staubproben aus unterschiedlichen Tierställen am Institut für Tierwissenschaften der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Abteilung Tierernährung (INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG, 2006).

3.4 Bestimmung der Partikelinnenraumkonzentration

3.4.1 Messbedingungen

Die Feinstaubkonzentration im Innenraum wurde in den unterschiedlichen Nutztierställen immer an vier aufeinanderfolgenden Tagen bestimmt. In Tabelle 13 sind die Messzeiträume auf den verschiedenen Betrieben dargestellt. Die Versuche wurden nach der VDI Richtlinie 2463 und 2066 durchgeführt.

Tabelle 13: Untersuchungszeiträume der verschiedenen Ställe

Tierart	Betrieb	Messzeitraum
Schwein	Stall 1	01.09. – 05.09.2010
	Stall 2	06.09. – 10.09.2010
	Stall 3	10.09. – 14.09.2010
	Stall 4	02.10. – 05.10.2010
	Stall 5	06.10. – 09.10.2010
	Stall 6	15.11. – 19.11.2010
	Stall 7	15.11. – 19.11.2010
Milchvieh	Stall 1	22.10. – 25.10.2010
	Stall 2	29.10. – 01.11.2010
	Stall 3	03.12. – 06.12.2010
Geflügel	Stall 1	22.12. – 25.12.2008
	Stall 2	27.03. – 30.03.2011

3.4.2 Stallklimadaten

Die Klimaparameter Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftgeschwindigkeit wurden für den Stallinnenraum mit einem multifunktionalen Messgerät und Datenlogger der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Holzkirchen, erfasst. Das Gerät verfügt über mehrere Messeingänge, an welche unter anderem der benötigte Feuchtesensor, kombiniert mit einem Temperaturfühler, und ein Flügelradmanometer angeschlossen werden können (NIEHAUS, 2011).

3.4.3 Ammoniakmessungen

Zur quantitativen Bestimmung der Ammoniakkonzentration im Stall wurde ein Chip-Mess-System (CMS) der Dräger Safety AG & Co. KGaA, Lübeck, (Abbildung 27) verwendet.

Das opto-elektronische Auswertungssystem setzt sich im Wesentlichen aus zwei Komponenten zusammen: Zum einen aus einem stoffspezifischen Mess-Chip, der ein geeignetes Reagenzsystem für das zu untersuchende Gas enthält. Zum anderen aus einem „Analyzer“, der eine chemische Reaktion mit der Probenluft verfolgt und darauf basierend

eine Konzentration [ppm] angibt. Für die Messung der momentanen Ammoniakkonzentrationen standen mehrere Chips mit unterschiedlichen Messbereichen zur Verfügung. Die Messung erfolgte in jeden Stall an mindestens zwei Punkten auf Tierhöhe (NIEHAUS, 2011).



Abbildung 27: Dräger CMS (links), CMS Chip (rechts)

3.4.4 Videoaufzeichnungen

Um mögliche Zusammenhänge zwischen der Konzentration an luftgetragenen Partikeln und dem Geschehen im Stall knüpfen zu können, wurden vor jeder Messung drei Videokameras im jeweiligen Abteil installiert. Bei den Kameras handelt es sich um Dome-Kameras der Firma Gutkes GmbH, Hannover, die üblicherweise zur Gebäudeüberwachung eingesetzt werden. Über Koaxialkabel wird das Kamerasignal an einen Rechner übertragen, auf dem ein spezielles Programm (Digi-Protect Server Software, Version 6.261 beta; ABUS Security-Center GmbH & Co.KG, Mühlhausen) installiert ist, das die Aufnahme und Sicherung der Überwachungsdaten übernimmt. Die Verwendung eines solchen digitalen Überwachungssystems ermöglicht es, auch nach Abschluss der Messungen das Verhalten der Tiere sowie Abläufe und Prozesse mit Einflussnahme auf dieses Verhalten zeitlich zu rekonstruieren und auszuwerten. Dies ist besonders in Hinblick auf die Aktivität der Schweine wichtig. Eine kontinuierliche Beobachtung soll Aufschluss über den Beitrag der Tieraktivität an der Partikelfreisetzung liefern. Anhand der Videoüberwachung im Stall konnten die Ereignisse (Fütterung, Kontrollgang, etc.) im Stall präzise zugeordnet werden (NIEHAUS, 2011).

3.4.5 Erfassung der Feinstaubkonzentration im Innenraum

Die Erfassung der Feinstaubkonzentration im Raum erfolgte mit zwei 15-Kanal Aerosolspektrometern (Modell 1.108 der Firma Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG). Bei diesen kompakten Geräten handelt es sich um optische Partikelzähler (OPC), die nach dem Prinzip der Streulichtmessung funktionieren und eine Erfassung luftgetragener Partikel in Abhängigkeit von der Zeit ermöglichen. In dem Aerosolspektrometer dient ein Halbleiterlaser als Lichtquelle und eine Photo-Diode als Empfänger für Lichtimpulse. Passiert ein Partikel mit der Probenluft den Laserstrahl in der Messkammer, so wird das unter einem Winkel von 90° gestreute Licht durch einen Parabolspiegel gebündelt und über eine Diode detektiert. Nach einer entsprechenden Signalverstärkung erfolgt eine Einteilung der Streulichtereignisse in 15 verschiedene Größenkanäle in einem Messbereich von 0,3 bis 20 μm . Häufigkeit und Intensität der Streulichtimpulse lassen dabei Rückschlüsse auf Partikelanzahl und -größe zu. Über einen radialsymmetrischen Ansaugkopf wird die Umgebungsluft von einer Pumpe mit einem konstanten Volumenstrom von $1,2 \text{ l min}^{-1}$ in das Gerät gesaugt. Nach dem Durchqueren der Messkammer werden die detektierten Partikel in einem austauschbaren Filter gesammelt. Diese Filter können für Untersuchungen chemischer, mikroskopischer oder gravimetrischer Art herangezogen werden. Eine Kalibrierung des Gerätes erfolgt unter Verwendung von monodispersen Latexpartikeln in regelmäßigen Abständen im Labor der Firma Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG. Das Messintervall betrug eine Minute. Die Kalibrierung der Aerosolspektrometer erfolgte zuvor im Labor. Im Anhang sind die technischen Daten zum eingesetzten Messgerät (Tabelle A 3) aufgeführt.



Abbildung 28: Installation der Aerosolspektrometer im Schweinestall

Weiterhin wurden Versuche zur Homogenität der Feinstaubbelastungen im Raum durchgeführt. Hierzu wurden zwei parallele Messlinien in Längsrichtung des Stalles bestimmt. Auf diesen Messlinien wurden zehn Messpunkte in gleichmäßigen Abständen verteilt. An den einzelnen Messpunkten wurden die Aerosolspektrometer installiert und verblieben dort für jeweils zehn Minuten. Die Aerosolspektrometer zeichneten die Messdaten in einem Intervall von sechs Sekunden auf. Die Partikelmassenkonzentration der 15 Größenklassen wurde zu PM_{Gesamt} zusammengefasst. Die Messwerte der Partikelmassenkonzentration von PM_{Gesamt} wurden in Abhängigkeit der Messpunkte zu einer Matrix konvertiert. Anhand von Kontur-Farbdiagrammen konnte eine Übersicht der Feinstaubbelastung im Innenraum erstellt werden.

3.5 Belastungsunterschiede zwischen den Funktionsbereichen

Anhand der Homogenitätsuntersuchung soll die Fragestellung geklärt werden, ob es signifikante Unterschiede an unterschiedlichen Bereichen im Stall bezüglich der Feinstaubbelastung gibt. Hierzu wurden 20 Messpositionen im Stall mit dem Kruskal-Wallis-Test (KRUSKAL & WALLIS, 1952) ausgewertet. Der Kruskal-Wallis-Test ist ein nichtparametrischer Test, der auf einer unabhängigen Stichprobe basiert. Getestet wird die Verteilung zwischen den Gruppen. An jeder Messposition wurde die

Feinstaubkonzentration für PM_{2,5}, PM₁₀ und Gesamtstaub für jeweils 10 Minuten aufgezeichnet. Die Aerosolspektrometer befanden sich in 0,5 m Höhe.

Die notwendigen Berechnungen werden mithilfe des Statistik-Programmes SPSS 18.0 der IBM Deutschland GmbH, München durchgeführt.

Bei den Untersuchungen zur Wirksamkeit von Staub-Minderungsmaßnahmen im Innenraum wurden folgende Verfahren von der Arbeitsgruppe zugrunde gelegt, deren Ergebnisse mit der gleichen Methodik ermittelt wurden:

- Wirksamkeit von Innenraum-Umluftfiltern bei der Legehennenhaltung (Promotionsprojekt Mostafa¹)
- Wirksamkeit von Innraum-Maßnahmen bei der Schweinemast (Promotionsprojekt Hölscher²)
- Wirksamkeit von pelletierten Einstreumaterialien bei Pferden (Promotionsprojekt Szabo³)

Bei der Staub-Emissionsminderungen konnten die o. g. Ergebnisse vergleichend zu Untersuchungen der Arbeitsgruppe bei der Abluftreinigung gegenüber gestellt werden, die ebenfalls mit der gleichen Methodik ermittelt wurden.

- Minderung von Staub- und Ammoniakemissionen durch eine mehrstufige Abluftreinigungsanlage (Promotionsprojekt Schier⁴)

¹ Ehab MOSTAFA: Improvement of air quality in laying hens barn using different particle separation techniques, Mündliche Prüfung im August 2008, Veröffentlicht als VDI-MEG Schrift 473

² Richard HÖLSCHER: Stallinterne Maßnahmen zur Minderung der Staubbelastungen für Mastschweine Mündliche Prüfung: 20. März 2006, veröffentlicht als VDI-MEG Schrift 446

³ Edith SZABO: Experimentelle Untersuchungen luftgetragener Partikel und Schimmelpilze in Pferdeställen. Mündlichen Prüfungen im November 2007 in Bonn & Berlin

⁴ Felix SCHIER Ammoniak-Emissionsminderung durch Abluftreinigungsanlagen, Promotionsprojekt an der Landwirtschaftlichen Fakultät Bonn, Abgabe Dezember 2004, Mündliche Prüfung: 10. Februar 2006, Veröffentlicht als MEG Schrift 424

4 Ergebnisse

4.1 Chemische Analyse des gesammelten Tierstallstaubes

4.1.1 Haltungssystem Schwein

Anhand der Weender-Analyse sollte auf die Herkunft des Staubes innerhalb des Stalles geschlossen werden. Die Ergebnisse der Weender-Analyse beziehen sich auf Mastschweinestall 2 und 4. Die beiden Ställe unterscheiden sich zum einen in ihrem Zuluftsystem und zum anderen durch ihre Fütterung. Einheitlich waren zum Zeitpunkt der Staubsammlung das Tiergewicht, die Tieranzahl und der Ammoniakgehalt. Die Tabelle 14 gibt Aufschluss über die ermittelten Inhaltsstoffe.

Tabelle 14: Aufschlüsselung der Weender-Analyse für den untersuchten Mastschweinestallstaub

Inhaltsstoffe	Mastschweinestall 2	Mastschweinestall 4
TM (g/ kg)	889	867
XA (g/ kg TM)	128	130
XP (g/ kg TM)	267	336
XF (g/ kg TM)	22,2	12,7
XL (g/ kg TM)	66	79,3
NDF (g/ kg TM)	190	284
P (g/ kg TM)	12,2	15,6
Ca (g/ kg TM)	23,2	17,9
Mg (g/ kg TM)	6,7	8,2
Na (g/ kg TM)	4,2	6,1
K (g/ kg TM)	16,9	19,2

Auf Basis der Ergebnisse der Weender-Analyse kann der Staub aus Maststall 2 mit anderen Untersuchungen in der Literatur verglichen werden. Typische Alleinfuttermittel, die in der Schweinemast zu Beginn der Phasenfütterung eingesetzt werden, weisen in der Regel einen Rohproteingehalt von 17 % auf. Dieser kann schrittweise auf 13 % gesenkt

werden. Mit 29 % liegt der Rohproteingehalt der Staubprobe deutlich über dem der Futtermittel.

Dies lässt darauf schließen, dass ein beachtlicher Teil des sedimentierten Staubes in Form von Hautschuppen und Haaren auf die Tiere selbst zurückzuführen ist.

Der Gehalt der Rohasche, zu der neben den Mengenelementen weitere anorganische Substanzen zählen, liegt rund 4 % unter den übrigen Werten. Ob dies auf einen vergleichsweise geringen Abrieb an Böden und Wänden oder auf geringe Rohaschegehalte in der Futtermittel zurückzuführen ist, bleibt spekulativ. Die Menge an Rohfett in der Probe fällt verhältnismäßig hoch aus, wozu sich jedoch keine plausible Erklärung finden lässt. Bei der Aufschlüsselung einiger Mengenelemente im Stallstaub liegt Kalium dicht gefolgt von Kalzium mit 19,2 g kg⁻¹ T vorn. Eine zusätzliche Analyse von Futter- und Kotproben könnte Aufschluss über die Herkunft des Staubes im Stallinnenraum liefern und Auskunft darüber geben, an welcher Stelle Minderungsmaßnahmen am Besten greifen könnten (NIEHAUS, 2011).

4.1.2 Haltungssystem Rind

Die Ergebnisse der Weender-Analyse für den Rinderstallstaub basieren auf der Staubprobe von Stall 1 (Tabelle 15). Der Trockenmassegehalt von 94,7 % setzt sich aus der organischen und anorganischen Substanz zusammen. Bezogen auf den Trockenmassegehalt ist der größte Anteil der Staubzusammensetzung auf die Rohasche mit 623 g kg⁻¹ TM zurückzuführen. In der Rohasche sind die anorganischen Komponenten enthalten, welche unter anderem aus der Einstreu stammen. Der Rohproteingehalt, welcher alle Stickstoffverbindungen beinhaltet, beträgt 174 g kg⁻¹ TM. Der Rohfettgehalt liegt bei 61,9 g kg⁻¹ TM. Ein Rohfaseranteil von 52,3 g kg⁻¹ TM ist unter anderem den unverdaulichen Bestandteilen des Futtermittels zuzuordnen. Der Hauptbestandteil der Rohfaser stellt die Cellulose dar. In der NDF-Fraktion werden die enthaltenen Hemicellulosen, die Pektine, die Cellulose und das Lignin zusammengefasst. Der NDF-Gehalt beträgt 147 g kg⁻¹ TM. Die Stickstofffreien Extraktstoffe (4,5 g kg⁻¹ TM) umfassen lösliche Zucker, Stärke, Pektine und organische Säuren.

Die Erfassung der Mineralstoffgehalte bezogen auf die Trockenmasse zeigt, dass Calcium den höchsten Wert mit 208 g kg⁻¹ TM aufweist. Dem folgt Kalium mit 5,26 g kg⁻¹ TM, Magnesium mit 3,45 g kg⁻¹ TM, Phosphor mit 2,62 g kg⁻¹ TM und Natrium mit 1,82 g kg⁻¹ TM.

TM. Eine daraufhin folgende Analyse der Liegeboxeneinstreu ergibt Aufschluss über den auffallend hohen Gehalt an Calcium bei der Staubprobe. Die Analyse ergab bei der getrockneten Probe einen Gehalt von 976 g kg^{-1} . Der Anteil der Rohasche in der Einstreu beträgt 722 g kg^{-1} TM. Der Calcium-Gehalt weist einen Wert von $259,4 \text{ g kg}^{-1}$ TM auf. Diese Konzentrationsangaben sprechen dafür, dass ein Großteil der Partikel in der Stallluft aus der Liegeboxeneinstreu stammt (FEUSER, 2011).

Tabelle 15: Aufschlüsselung der Weender-Analyse für den untersuchten Rinderstallstaub

Inhaltsstoffe	Milchviehstall 1
TM (g/ kg)	947,0
XA (g/ kg TM)	623,0
XP (g/ kg TM)	174,0
XF (g/ kg TM)	52,3
XL (g/ kg TM)	61,9
NDF (g/ kg TM)	4,5
P (g/ kg TM)	2,6
Ca (g/ kg TM)	208,0
Mg (g/ kg TM)	3,5
Na (g/ kg TM)	1,8
K (g/ kg TM)	5,3

4.1.3 Haltungssystem Geflügel

Die Weender Analyse zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung ergab folgende Werte: Einen Trockenmassegehalt von 926 g/kg , einen Rohaschegehalt von $249,2 \text{ g/kg T}$, einen Rohproteingehalt von 838 g/kg T , einen Rohfettgehalt $51,5 \text{ g/kg T}$ sowie einen Anteil von Neutral-Detergenz-Faser von $7,72 \text{ g/kg T}$. Addiert man die Werte, erreicht man einen Wert von über 1000 g . Es muss daher mit einem Fehler in der Analyse gerechnet werden. In Tabelle 16 sind die gemessenen Werte noch einmal aufgeführt.

Tabelle 16: Aufschlüsselung der Weender-Analyse für den untersuchten Geflügelstallstaub

Inhaltsstoffe	Stall 2
TM (g/ kg)	926
XA (g/ kg TM)	249
XP (g/ kg TM)	838
XL (g/ kg TM)	52
NDF (g/ kg TM)	7,7

4.2 Belastungsunterschiede zwischen den Funktionsbereichen

4.2.1 Haltungssystem Schwein

Die Farb-Kontur-Diagramme zeigen deutliche Unterschiede hinsichtlich der Staubverteilung im Raum. Besonders die Bereiche Fütterung und Abluftführung weisen Konzentrationen auf, die um den Faktor 8 höher sind, als die geringsten Konzentrationen im Raum.

Stall 1

In Stall 1 zeigten sich die höchsten Konzentrationen dort, wo die Mistschicht am größten ist, dies ist in der Abbildung 29 Messpunkt 1. Auch die Ammoniakgehalte erreichen hier ihr Maximum (Tabelle 10). Zur Öffnung nach vorne zu den Lüftungsklappen hin, nimmt die Staubbelastung immer weiter ab, da dort der Frischluftanteil am höchsten ist (siehe Futterautomat).

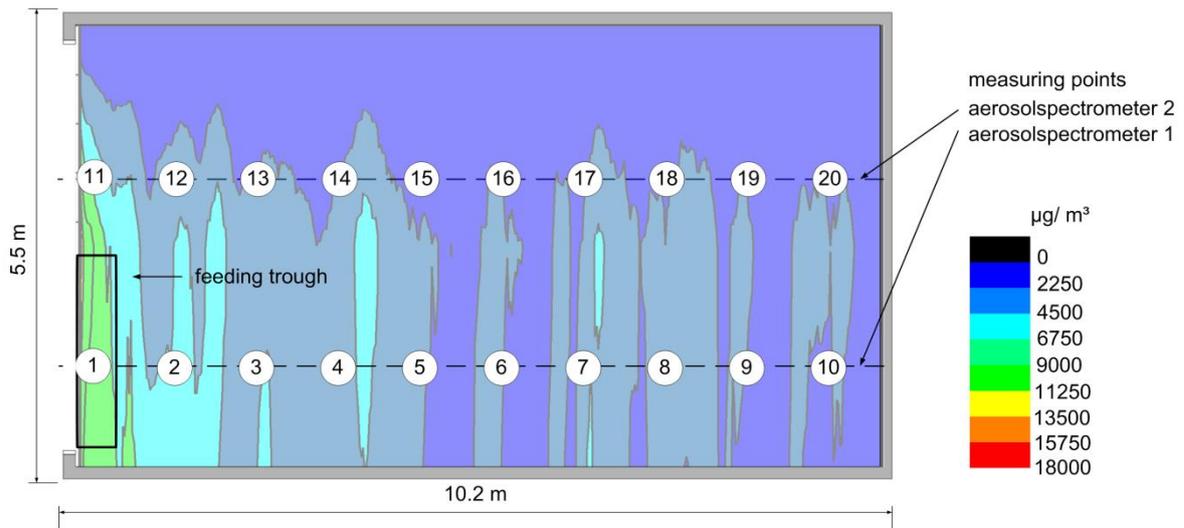


Abbildung 29: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 1

Festzuhalten ist bei Abbildung 29, dass in diesem Stall eine inhomogene Verteilung der Feinstaubkonzentration vorliegt. Im Bereich der Trockenfütterung sind um den Faktor 8 höhere Konzentrationen zu verzeichnen, als im übrigen Raum.

Um zu überprüfen, ob ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Messpunkten im Raum besteht, wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt. Die Nullhypothese besagte, dass die Verteilung von $PM_{2,5}$, PM_{10} und PM_{Gesamt} in den Kategorien von Messpunkt identisch sind. Das Signifikanzniveau lag bei 0,05. Für alle drei Größenklassen wurde die Nullhypothese abgelehnt. Hiernach kann geschlussfolgert werden, dass nicht nur signifikante Unterschiede zwischen den Größenklassen vorliegen, sondern auch zusätzlich zwischen den einzelnen Messpunkten.

In Abbildung 30 sind die Boxplot-Diagramme für die einzelnen Messpunkte in Abhängigkeit der Größenklassen dargestellt. Deutlich sind die beiden Messlinien (s. Abbildung 29) in den Boxplots wiederzuerkennen. Wobei auch hier deutliche Unterschiede in den parallelen Messlinien zu finden sind. Besonders Messpunkt 1 und 11 stechen besonders hervor. Diese Punkte liegen auf Höhe der Trockenfutterautomaten, wodurch die hohen Konzentrationen erklärt werden können. Weiterhin kann eine klare Abwärtstendenz in den hinteren Stall dargestellt werden.

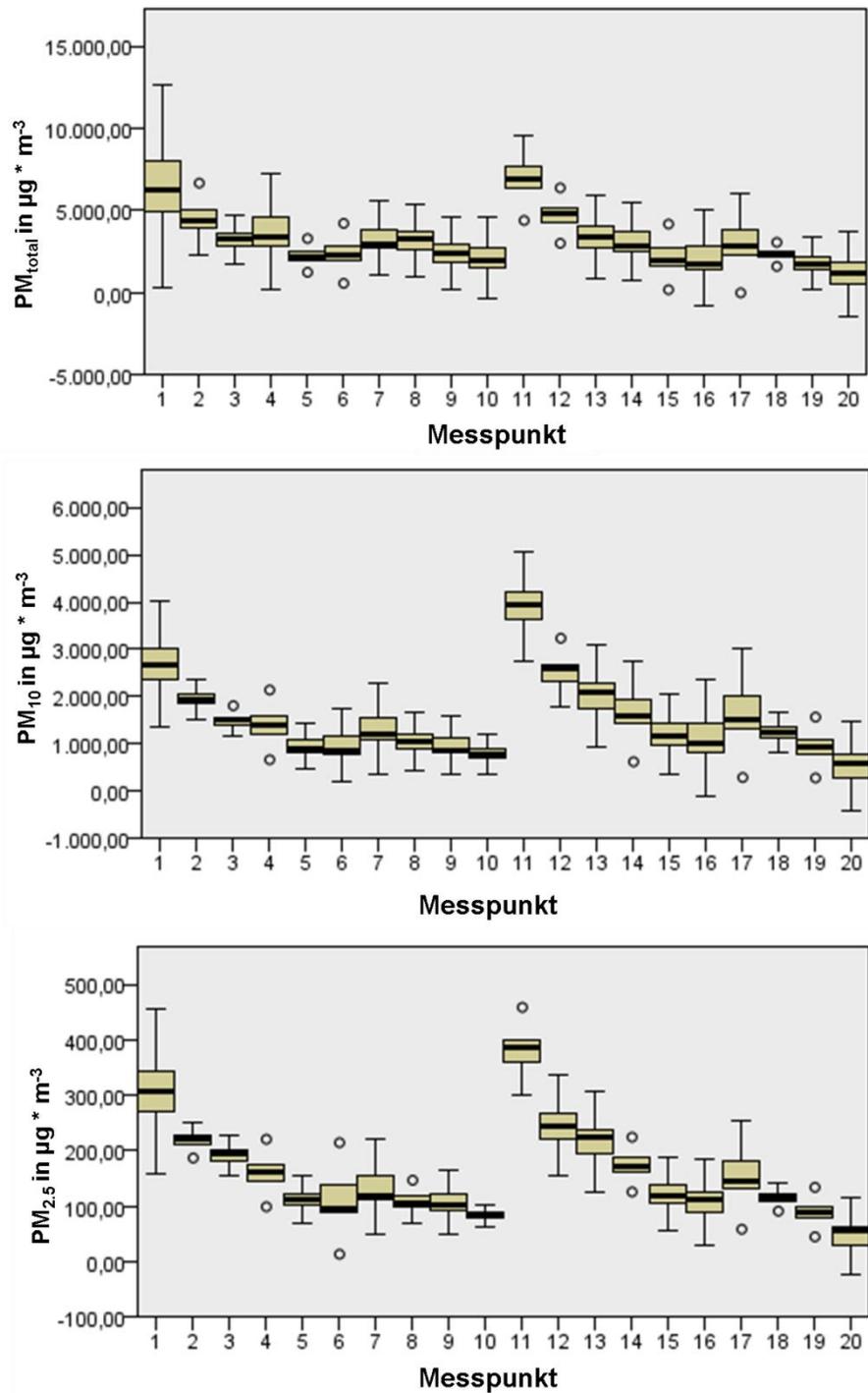


Abbildung 30: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 1

Stall 2

Das Farb-Kontur-Diagramm in Abbildung 31 zeigt Feinstaubkonzentrationen von bis zu 18 mg m^{-3} im Bereich des Abluftventilators. Ebenfalls können höhere Feinstaubkonzentrationen von bis zu $11,25 \text{ mg m}^{-3}$ im Eingangsbereich des Abteils ausfindig gemacht werden. An den Messpunkten 5 - 6 sowie 15 - 16 treten die inhomogensten Feinstaubkonzentrationen ($6,7 - 18,0 \text{ mg m}^{-3}$) im Raum auf. Die Feinstaubkonzentrationen in der Umgebung der Breifutterautomaten liegen bei ca. $4,5 \text{ mg m}^{-3}$. Die Breifutterautomaten weisen deutlich geringere Staubablagerungen auf, als der Trockenfutterautomat in Stall 1. Die Feinstaubkonzentrationen sind um den Faktor 3 im Bereich der Futterautomaten geringer als in Stall 1.

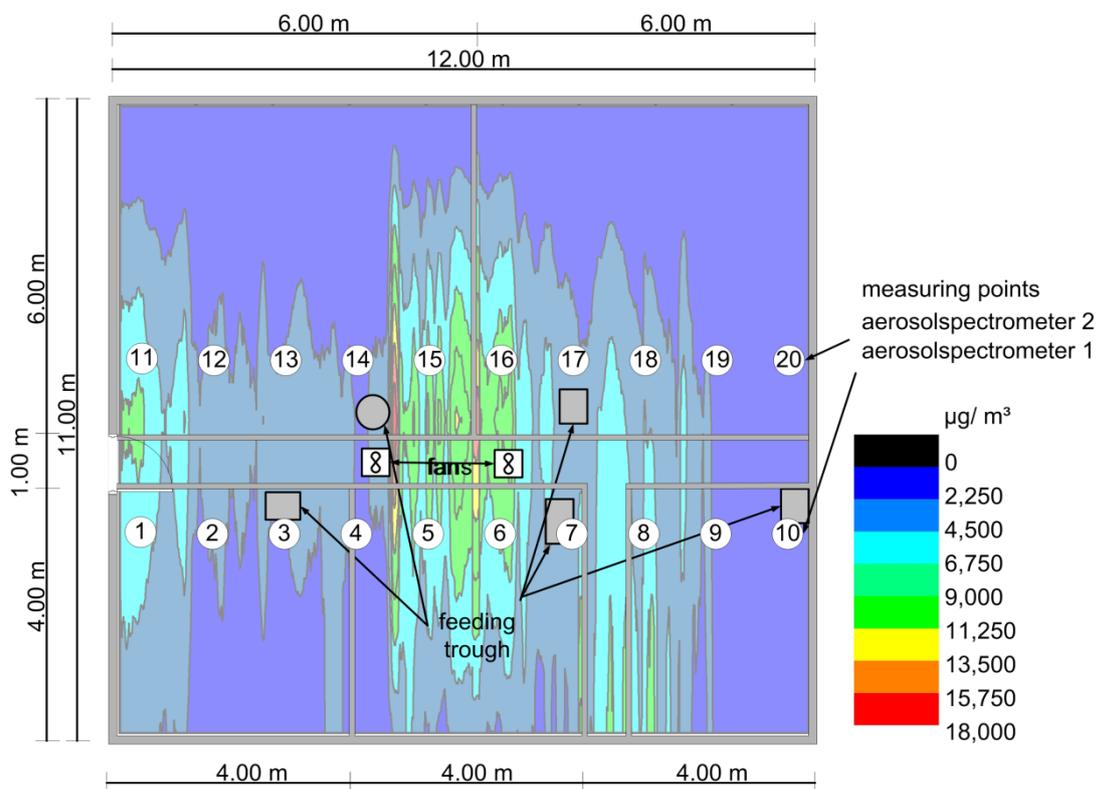


Abbildung 31: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 2 anhand eines Farb-Kontur-Diagramms

Abbildung 32 zeigt die Boxplot-Diagramme für die einzelnen Messpunkte in Stall 2 in Abhängigkeit der Größenklassen. Anders als in Stall 1 kann hier ein wellenartiger Verlauf verdeutlicht werden. Besonders die Messpunkte 5 und 6 treten deutlich in allen Größenklassen hervor. Hier wird der Einfluss der Abluftventilatoren auf die

Feinstaubkonzentration im Raum verdeutlicht. Der abgelagerte Staub wird durch die Ventilatoren angesaugt und erhöht in diesem Bereich des Abteils in Feinstaubkonzentration. Übereinstimmungen mit Abbildung 31 sieht man bei den Messpunkten 2 - 4, 9 - 10, 12 - 14, 19 - 20. Auffallend sind jedoch die sehr hohen Feinstaubkonzentrationen im Raum. Betrachtet man den Mittelwertvergleich (Anhang Tabelle A 4), so ergibt sich ein Mittelwert von $0,98 \text{ mg m}^{-3}$ für die Größenklasse $\text{PM}_{2,5}$; für PM_{10} liegt der Mittelwert bei $7,77 \text{ mg m}^{-3}$ und für den Gesamtstaub beträgt der Mittelwert $17,35 \text{ mg m}^{-3}$. Auch hier sind die Unterschiede signifikant.

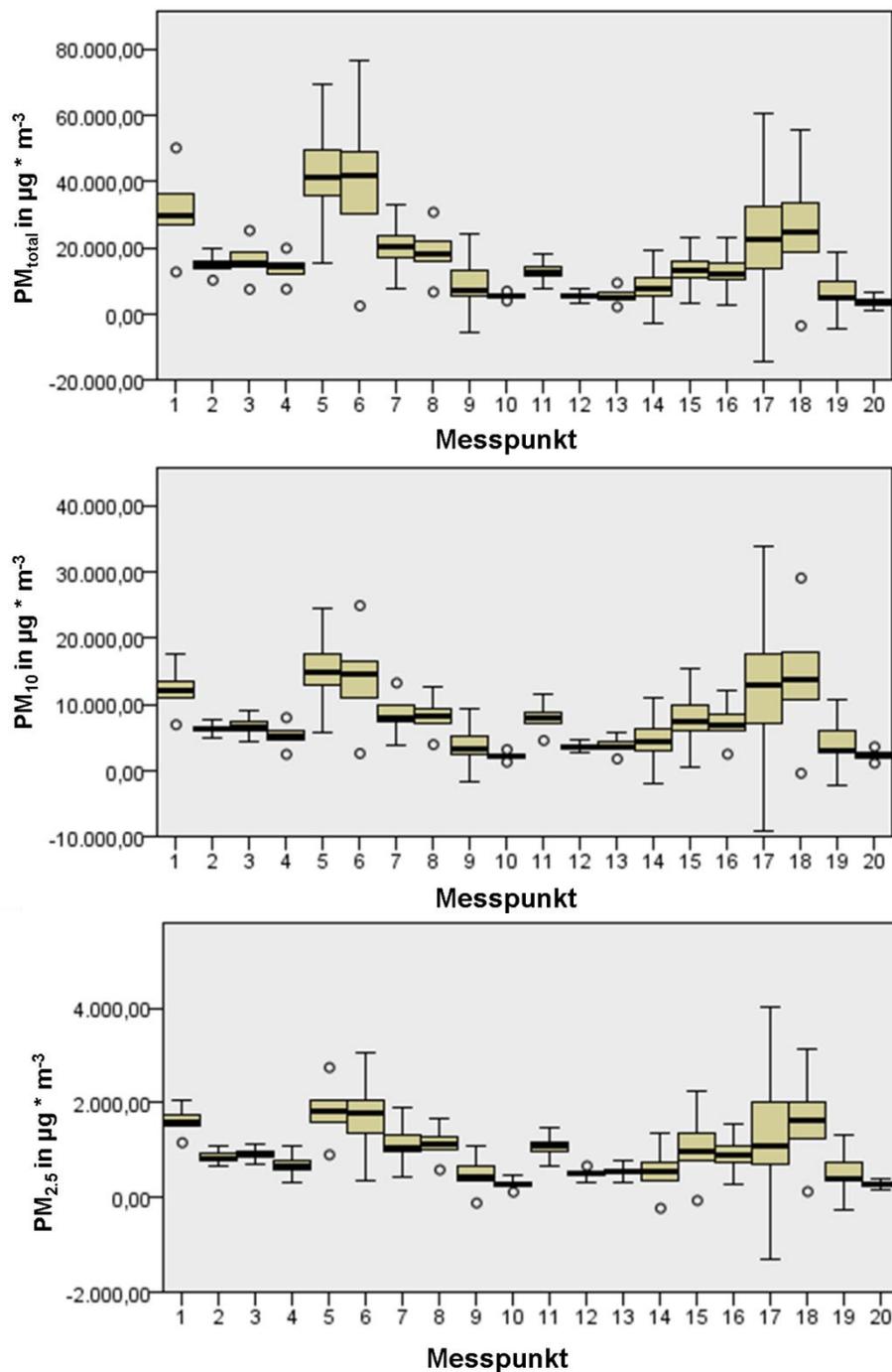


Abbildung 32: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 2

Stall 3

Abbildung 33 stellt ein Kontur Farbdigramm zur Überprüfung der Homogenität von Feinstaub im Raum dar. Stall 3 hat fünf Buchten und insgesamt Platz für 120 Schweine. Die Futterganglüftung verläuft zentral entlang der Längsachse. Abgesaugt wird die Luft an

der kurzen Seite mit jeweils einem Ventilator in der rechten und linken Bucht. Die höchste Partikelmassenkonzentration zeigt sich im Bereich der Frischluftzufuhr und im Bereich der beiden Ventilatoren. Bei Messpunkt 8 befindet sich auf dem Gang eine Entnahmestelle für Trockenfutter.

Die täglichen Kontrollgänge sowie die Fütterungszeiten bewirken einen Anstieg der Partikelmassenkonzentration im Innenraum. Anhand des Kontur Farbdigramms wird deutlich, dass in den Ställen keine homogene Feinstaubkonzentration vorliegt. Vielmehr kommt es zu höheren Konzentrationen im Bereich der Fütterungsanlagen und der Ventilatoren.

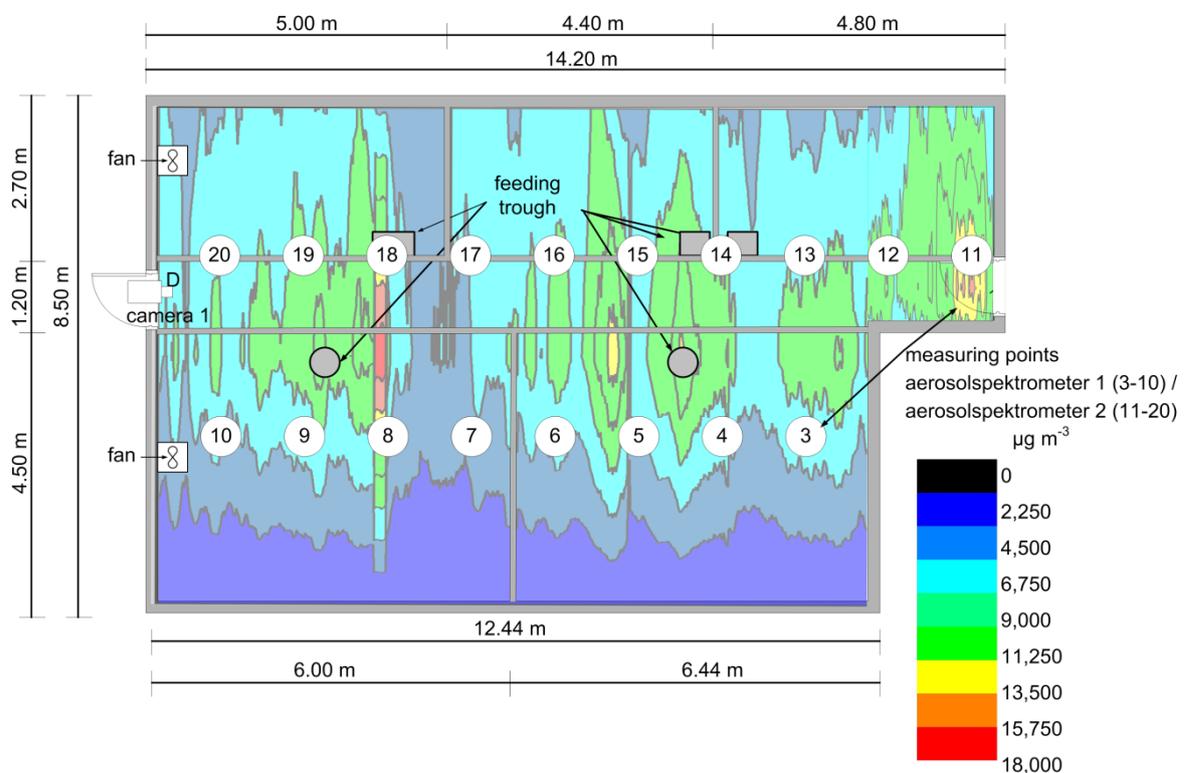


Abbildung 33: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 3

Die Boxplot-Diagramme in Abbildung 34 zeigen die Feinstaubkonzentrationsbelastung im Raum in Abhängigkeit der Größenklassen und Messpunkte. Während der Erfassung der Innenraumkonzentration wurden maximale Feinstaubkonzentrationen von unter $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ erreicht. Die höchsten Konzentrationen werden in den Größenklassen $\text{PM}_{2,5}$ und PM_{10} bei den Messpunkten 3 und 11 erzielt.

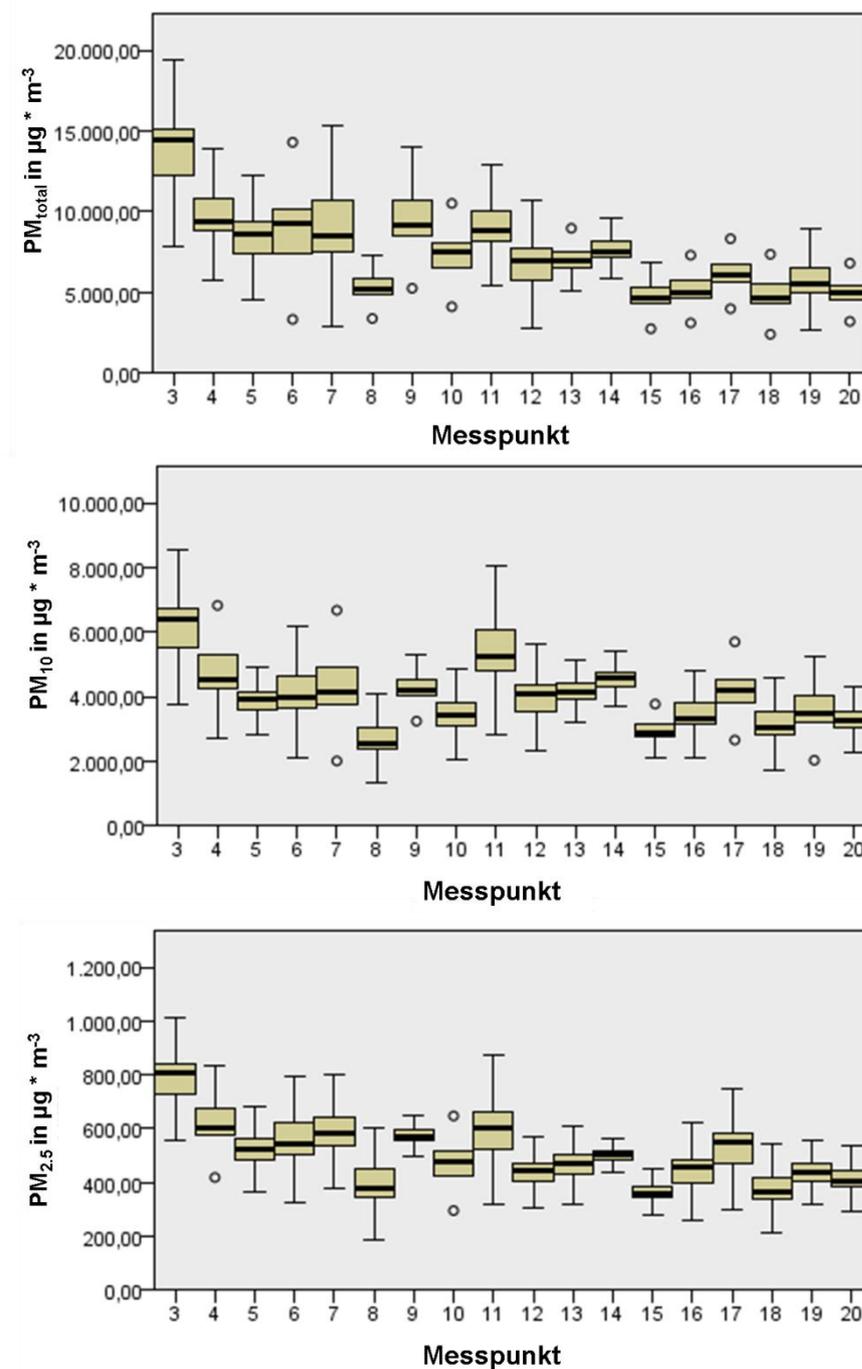


Abbildung 34: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 3

Stall 4

Die Abbildung 35 zeigt die Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 4. Auch in diesem Stall liegt eine inhomogene Verteilung der Staubbelastung im Raum vor. Den Berechnungen zufolge überschreiten die Konzentrationen entlang der

linken Abteilseite im Mittel nicht einen Wert von $2.750 \mu\text{g m}^{-3}$. In diesem Bereich sind zahlreiche Zuluftklappen in die Stalldecke eingelassen, über die Frischluft in den Raum einströmen kann. In einer verhältnismäßig kleinen Zone um die drei Abluftpunkte in der Stallmitte steigern sich die Konzentrationen kurz aufeinander folgend von $2.750 \mu\text{g m}^{-3}$ um den Faktor 8 auf bis zu $22.000 \mu\text{g m}^{-3}$. In weiten Teilen des Stalles werden Konzentrationen von $8.250 \mu\text{g m}^{-3}$ nicht überschritten. Nur im hinteren Drittel des Abteils erstreckt sich ein größerer Bereich, in dem der Staubgehalt der Luft schrittweise auf bis zu $16.500 \mu\text{g m}^{-3}$ steigt.

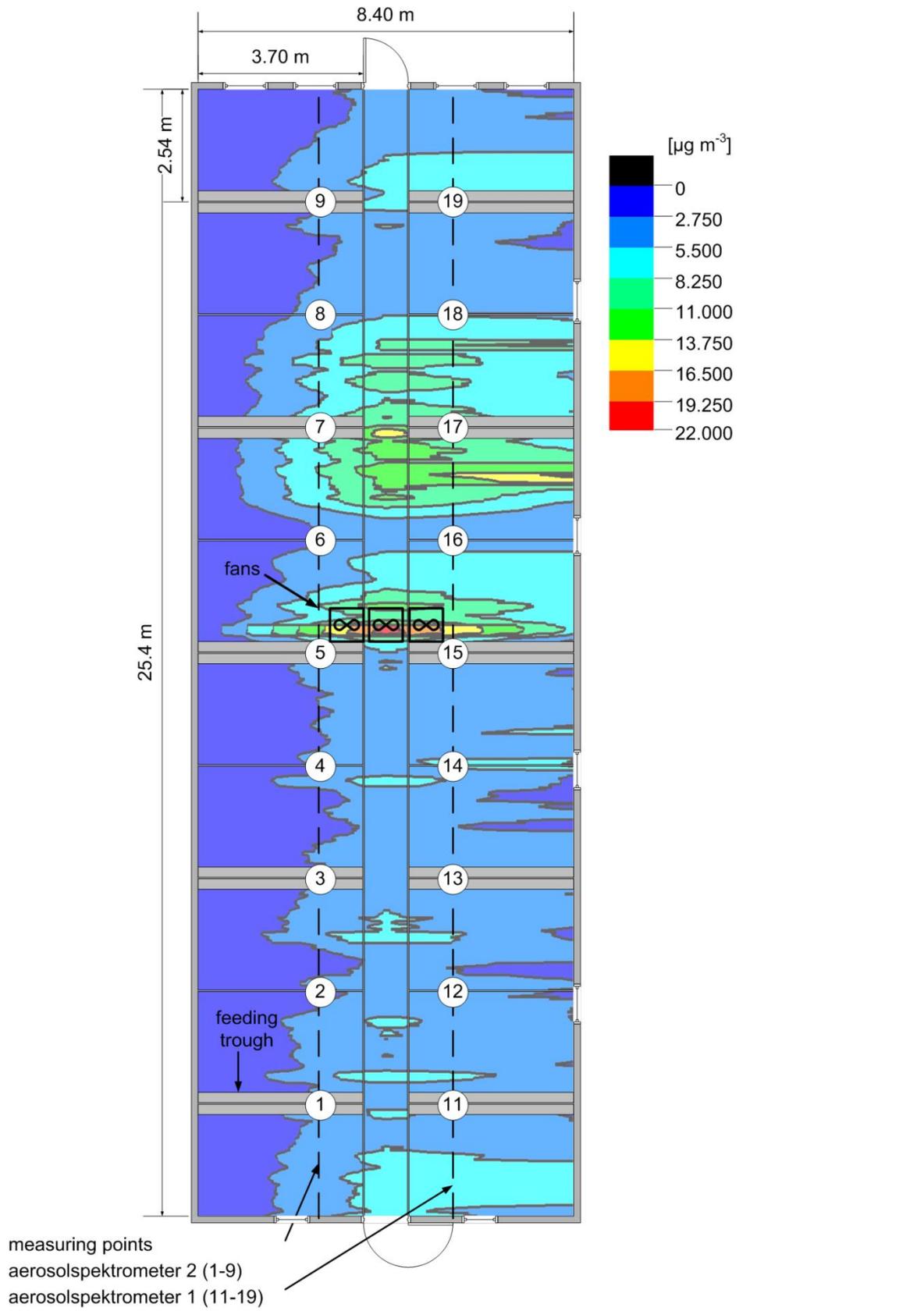


Abbildung 35: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 4

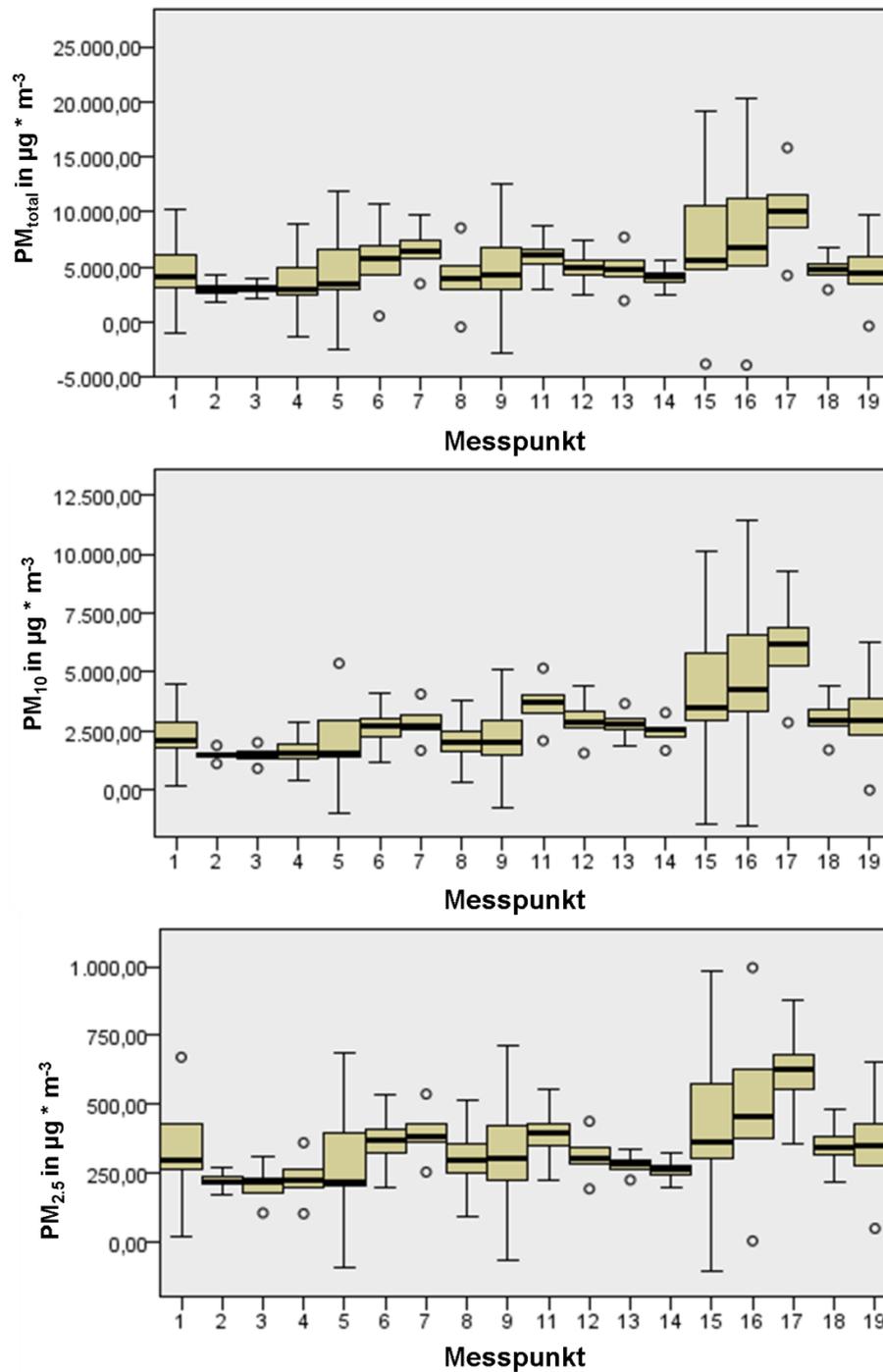


Abbildung 36: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 4

In Abbildung 36 sind die Boxplot-Diagramme für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für den untersuchten Maststall 4 dargestellt. Festzuhalten ist ein deutlicher Anstieg der Feinstaubkonzentration an den Messpunkten 15 - 19. In der

unmittelbaren Nähe von Messpunkt 15 sind die Abluftventilatoren des Abteils installiert. Betrachtet man den Mittelwertvergleich in Tabelle A 6 so liegt über alle Messpunkte verteilt der Mittelwert für die Größenklasse $PM_{2,5}$ bei $0,34 \text{ mg m}^{-3}$, für PM_{10} liegt der Mittelwert bei $2,9 \text{ mg m}^{-3}$ und für den Gesamtstaub bei $5,4 \text{ mg m}^{-3}$.

Stall 5

Die Ergebnisse der Auswertung für den Maststall 5 sind in Abbildung 37 dargestellt. Auch im Maststall 5 ist entlang der linken Abteilseite vorrangig die niedrigste Konzentrationsstufe mit $4.375 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ vorzufinden. An die beiden Abluftpunkte grenzen jeweils Bereiche, die durch mittlere bis höhere Konzentrationen gekennzeichnet sind. Besonders ausgeprägt ist diese Zone im vorderen Abteil. Die oberste Stufe umfasst einen Staubgehalt von bis zu $35.000 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$. In weiten Teilen des Raumes werden den Berechnungen zufolge Konzentrationen von $8.750 \text{ } \mu\text{g m}^{-3}$ nicht überschritten. Der Farbverteilung nach zu urteilen sind in dieser Messung höhere Staubbelastungen vor allem im vorderen Bereich des Abteils vorzufinden.

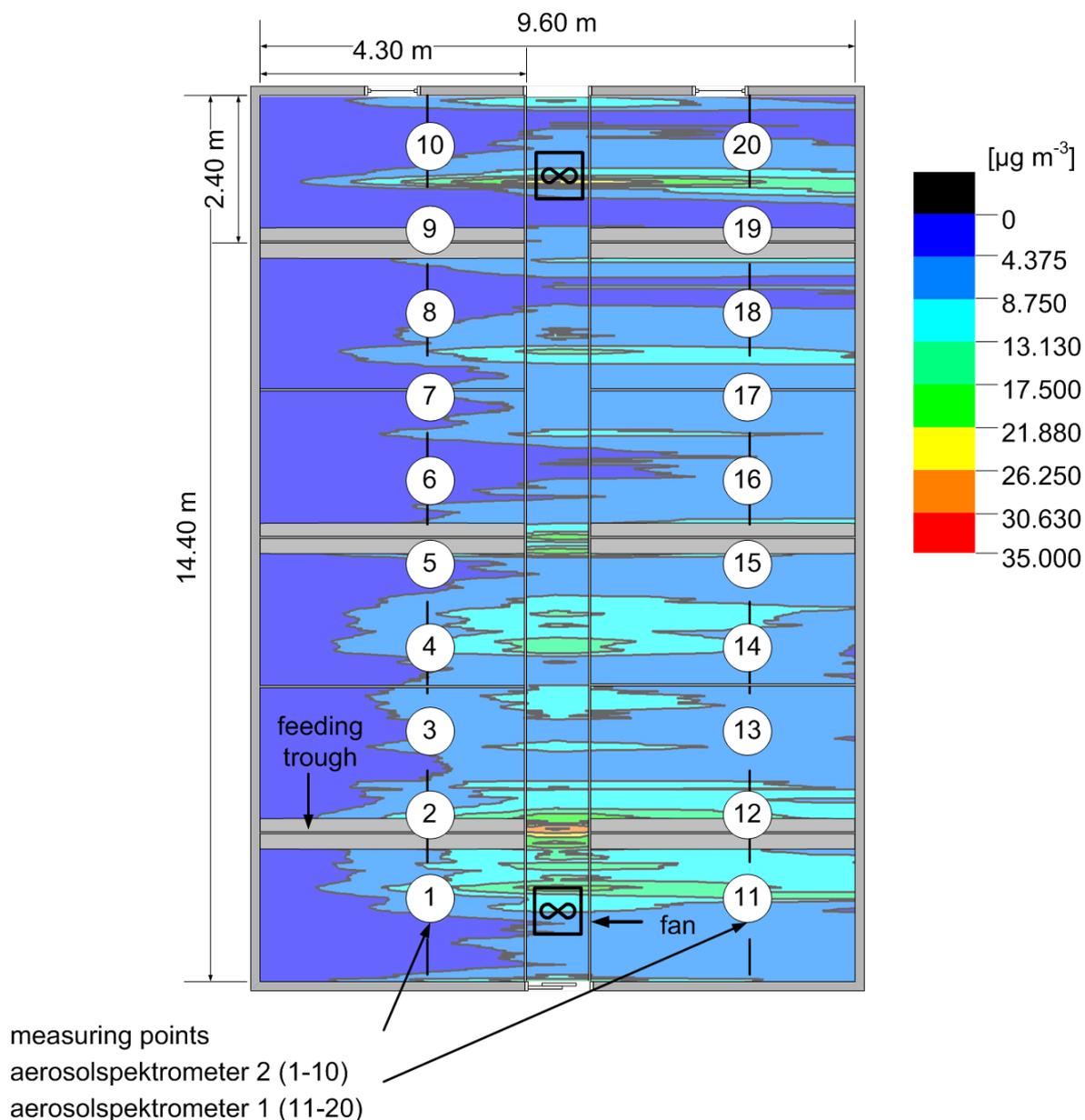


Abbildung 37: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Maststall 5

In den Boxplot-Diagrammen von Abbildung 38 sticht in allen Größenklassen der Messpunkt 2 hervor. Wie man deutlich in Abbildung 37 erkennen kann, liegt der Messpunkt in der Nähe der Breifutterautomaten. Hierdurch kann dann die hohe Konzentration im Vergleich zu den übrigen Messpunkten begründet werden.

Zieht man den Mittelwertvergleich in Tabelle A 7 hinzu, wird deutlich, dass Messpunkt 2 den höchsten Mittelwert mit $17,6 \text{ mg m}^{-3}$ aufweisen kann. Über alle Messpunkte hinweg

liegt der Mittelwert für die Größenklasse $PM_{2,5}$ bei $0,34 \text{ mg m}^{-3}$, für PM_{10} bei $3,54 \text{ mg m}^{-3}$ und für den Gesamtstaub bei $7,79 \text{ mg m}^{-3}$.

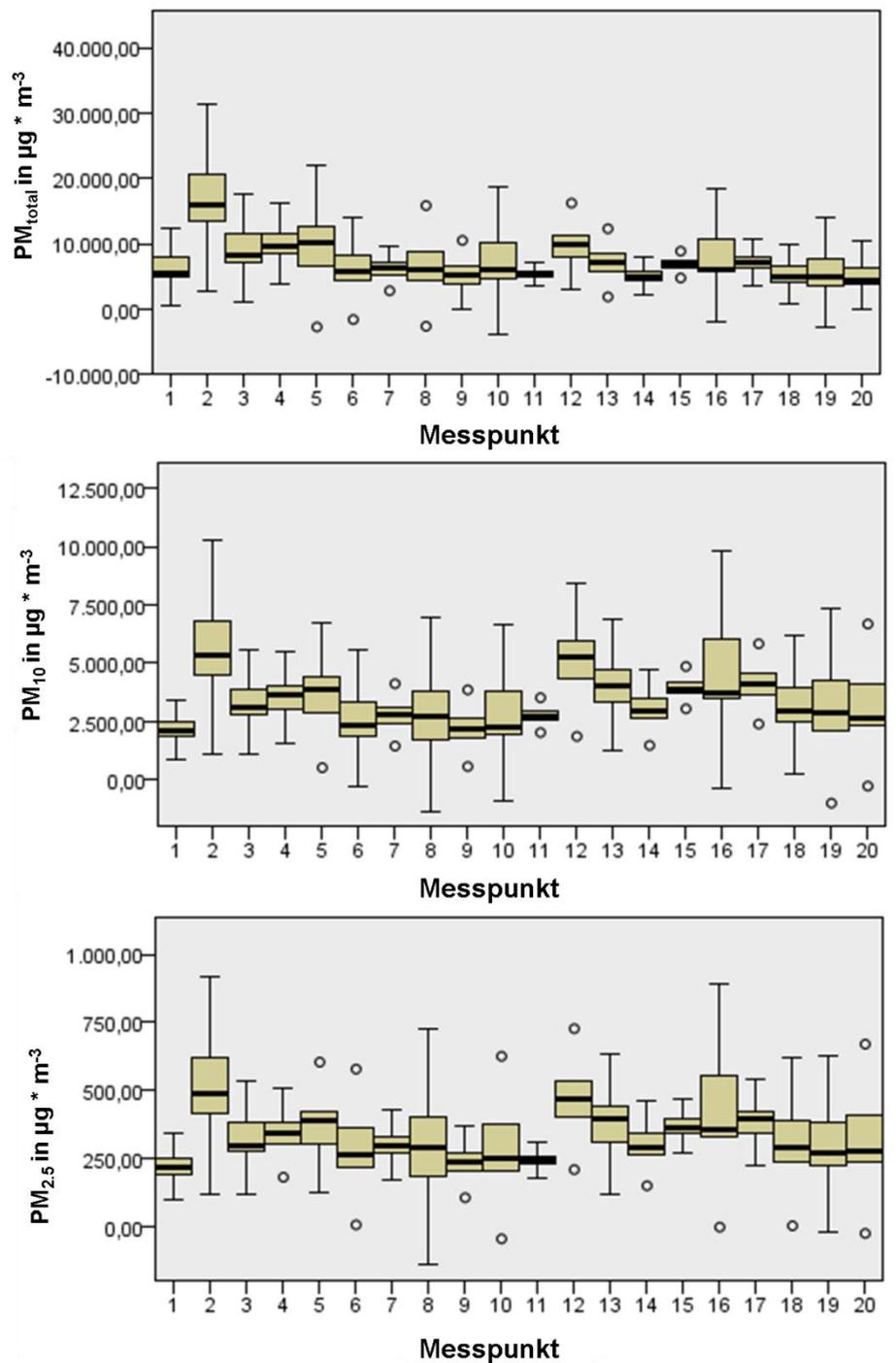


Abbildung 38: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Maststall 5

Für Stall 6 und 7 konnte keine Homogenitätsanalyse erstellt werden. Die Sauen in Stall 7 waren an den Menschen zu sehr interessiert, als dass mit der Untersuchung klare Ergebnisse hätten erzielt werden können. In Stall 6 wurde auf die zeitintensive Untersuchung verzichtet. Der Stress für die Sauen in den Abferkelabteilen wäre zu hoch gewesen, wenn die Untersuchung stattgefunden hätte.

Zwischenfazit zur Homogenitätsanalyse in Schweinemastställen

Folgende Ergebnisse lassen sich aus der Homogenitätsanalyse zusammenfassen:

- Es liegt keine homogene Verteilung der Feinstaubkonzentration im Schweinestall vor.
- Vielmehr sind im Raum Zonen zu finden, die sehr hohe Feinstaubkonzentrationen im Vergleich zum übrigen Raum aufweisen. Diese Konzentrationen können bis zu dem Faktor 8 voneinander unterschieden.
- Besonders Futterautomaten und Abluftventilatoren sind für hohe Feinstaubkonzentrationen im Raum verantwortlich.
- Es konnte statistisch nachgewiesen werden, dass sich die Messpunkte sowohl untereinander, als auch in der Größenklasse signifikant voneinander unterscheiden.

4.2.2 Haltungssystem Rind

Die Homogenitätsanalysen wurden in den drei Betrieben im Vorfeld zu den Langzeitmessungen durchgeführt. Ziel war die Darstellung der momentanen Staubpartikel-Situation im Stallgebäude. Vor Erstellen der Farbabbildungen wurden die erfassten Messwerte um Ausreißer korrigiert. Die Partikelmassenkonzentration wird ausgedrückt in $\mu\text{g m}^{-3}$ (FEUSER, 2011).

Stall 1

Der Milchviehstall 1 ist ein Offenfrontstall. Im Bereich der Messpunkte 1 - 4 und 11 - 14 ist der Stall geschlossen. Ab Messpunkt 5 bzw. 15 beginnt der Futtertisch und somit auch der Offenfrontstall. Deutlich kann man im Bereich der Messpunkte 1 - 3 und 10 - 13 höhere Feinstaubkonzentrationen verzeichnen als im übrigen Stall. Hier werden Konzentrationen von maximal $3,5 \text{ mg m}^{-3}$ erfasst. Weiterhin ist in diesem Areal eine rotierende Kuhbürste installiert, die von den Kühen sehr intensiv genutzt wird. Betrachtet

man den Bereich Fressgitter und Liegeboxen fällt die gute Durchlüftung des Stalles auf. Die Feinstaubkonzentrationen liegen hier unter $1,2 \text{ mg m}^{-3}$.

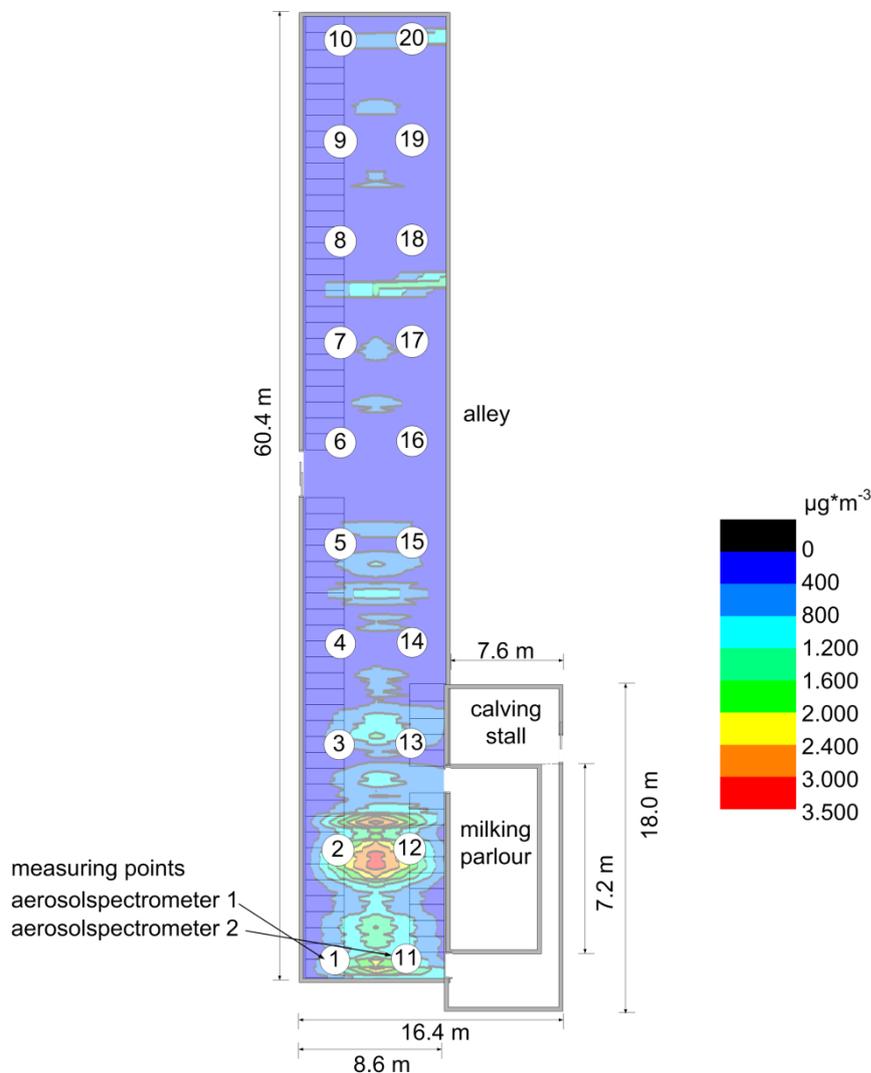


Abbildung 39: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Milchviehstall 1

Auch im Haltungssystem Rind wurde der Kruskal-Wallis-Test herangezogen, um zu überprüfen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Messpositionen und den Größenklassen $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und Gesamtstaub gibt. Die Verteilung der Größenklassen ist in den Kategorien von Messpunkt identisch. Der Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben belegt, dass die Nullhypothese mit einem Signifikanzniveau von 0,5 abgelehnt werden kann.

Die Abbildung 40 zeigt die Boxplot-Diagramme für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für die Größenklassen PM_{2,5}, PM₁₀ und Gesamtstaub. Über alle Größenfraktionen ist zu erkennen, dass Messpunkt 2 die höchsten Feinstaubkonzentrationen aufweist. Die Aussage des Farb-Kontur-Diagramms (Abbildung 39) kann somit bestätigt werden.

Die mittlere Feinstaubkonzentration über alle Messpunkte liegt für die Größenklasse PM_{2,5} bei 40,6 mg m⁻³ für PM₁₀ bei 194 mg m⁻³ und für den Gesamtstaub bei 410 mg m⁻³ (Tabelle A 8).

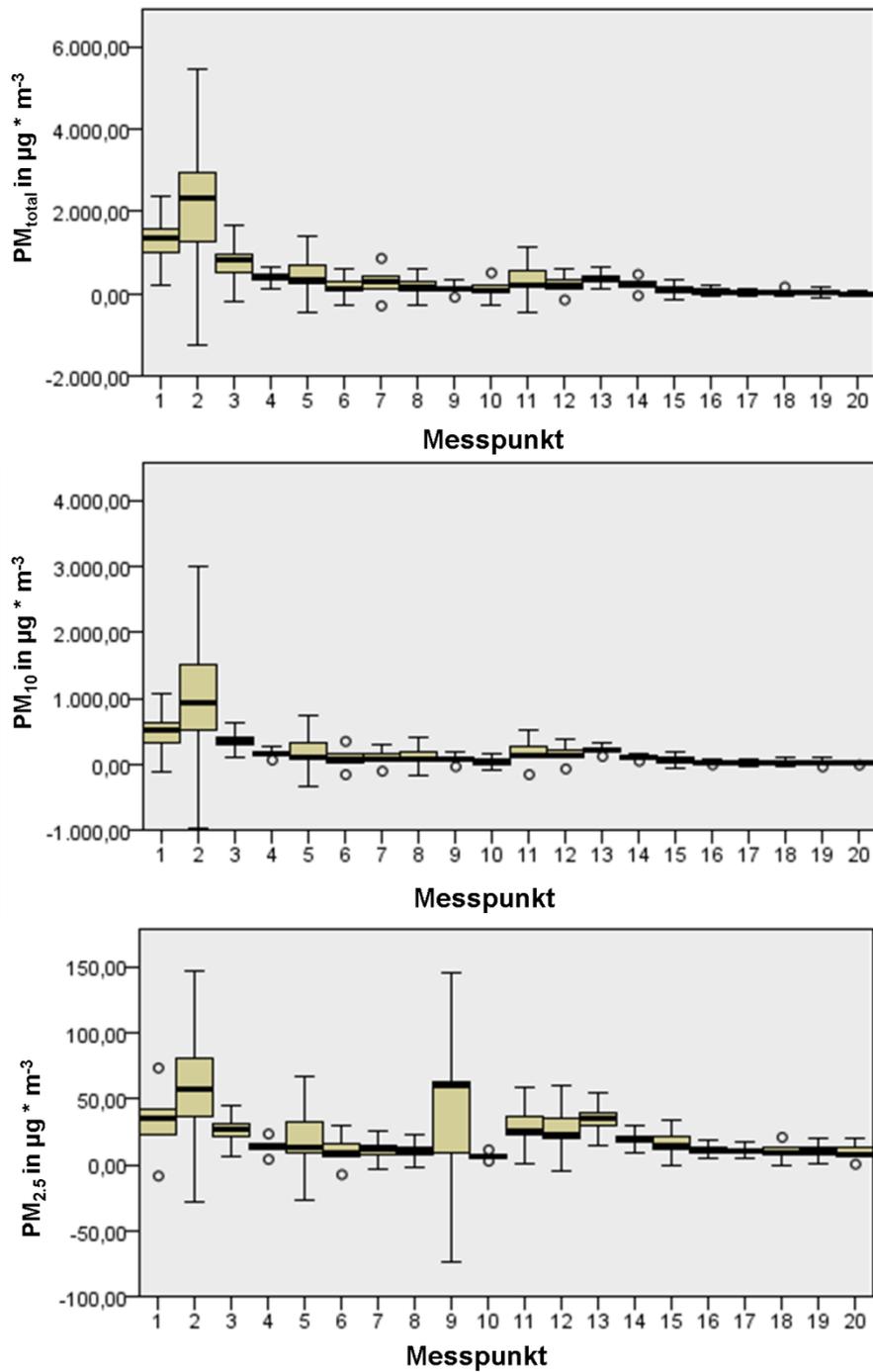


Abbildung 40: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Milchviehstall 1

Stall 2

Für die Homogenitätsmessung des zweiten Stalles wurde nur der Teil des Stalles berücksichtigt, in dem sich die Milchkühe aufhalten. Der grau gekennzeichnete Bereich zeigt in Abbildung 41 den Melkstand, das Stallbüro und den Tankraum. Die Messwerte des zweiten Aerosolspektrometers wurden somit erst ab Messpunkt 13 erfasst. Bei Betrachtung der Feinstaubverteilung fällt auf, dass die höchsten Partikelkonzentrationen ($>$ maximal $3,5 \text{ mg m}^{-3}$) im Bereich der Doppelliegeboxen zu finden sind. Ein besonderer Fokus ist allerdings auf den hinteren Bereich des Stallgebäudes zu richten. Die Windgeschwindigkeiten außerhalb des Stalles sind in diesem Fall sehr hoch und führen bei geöffnetem Hintertor zu starker Lufteinströmung und demzufolge zu Staubaufwirbelung (FEUSER, 2011).

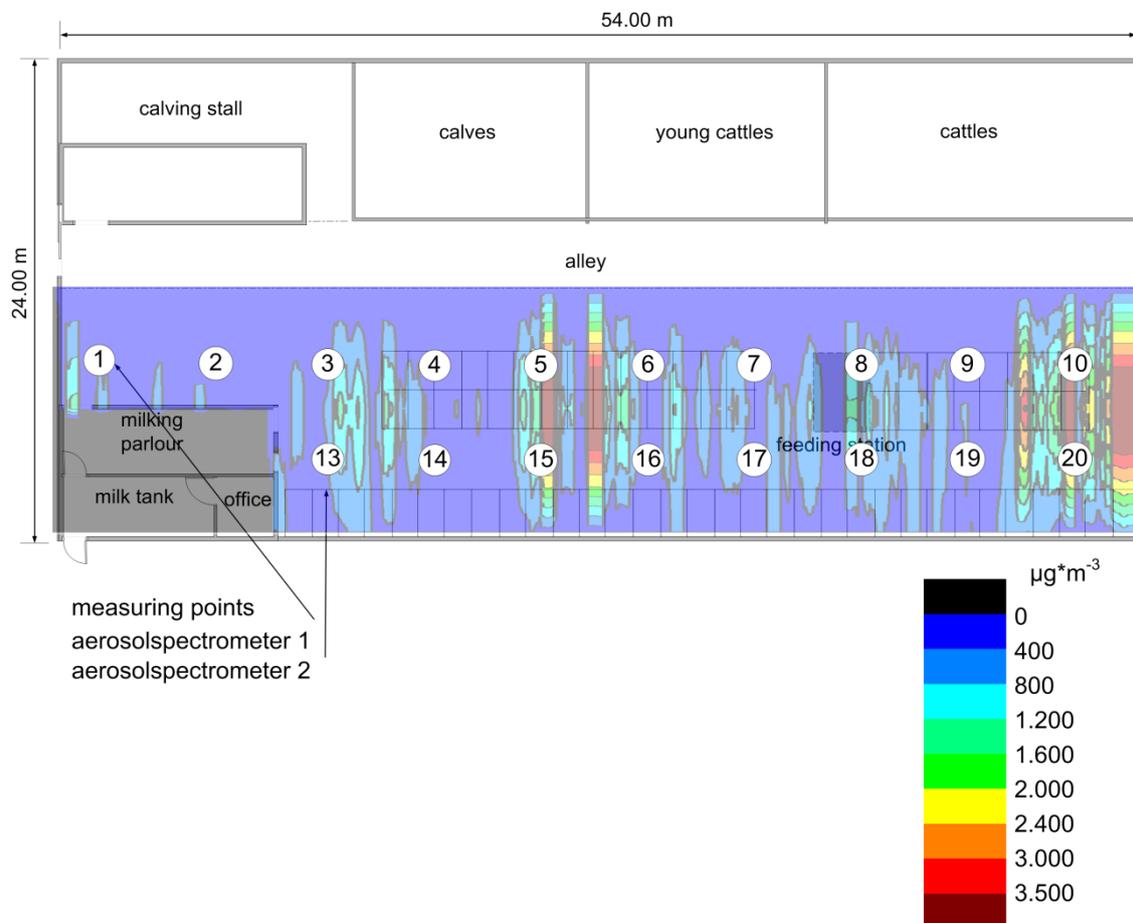


Abbildung 41: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Milchviehstall 2

Auch in diesem Stall kann die Nullhypothese abgelehnt werden, d.h. alle Kategorien (PM_{2,5}, PM₁₀ und Gesamtstaub) unterscheiden sich, sowohl in der Größenverteilung als auch in der Messposition.

Betrachtet man die Boxplot-Diagramme in Abbildung 42 so liegen die höchsten Feinstaubkonzentrationen bei den Messpunkten 8 - 10. Die Mittelwerte für die Größenklasse PM_{2,5} schwanken zwischen 31 und 116 $\mu\text{g m}^{-3}$, für PM₁₀ schwanken diese zwischen 0,5 und 3,1 mg m^{-3} , für den Gesamtstaub werden Mittelwerte zwischen 1,5 und 15 mg m^{-3} ermittelt.

Über alle Messpunkte hinweg liegt der Mittelwert für PM_{2,5} bei 25 $\mu\text{g m}^{-3}$, für PM₁₀ bei 0,4 mg m^{-3} und für den Gesamtstaub bei 1,9 mg m^{-3} . Der komplette Mittelwertvergleich ist im Anhang Tabelle A 9 zu finden.

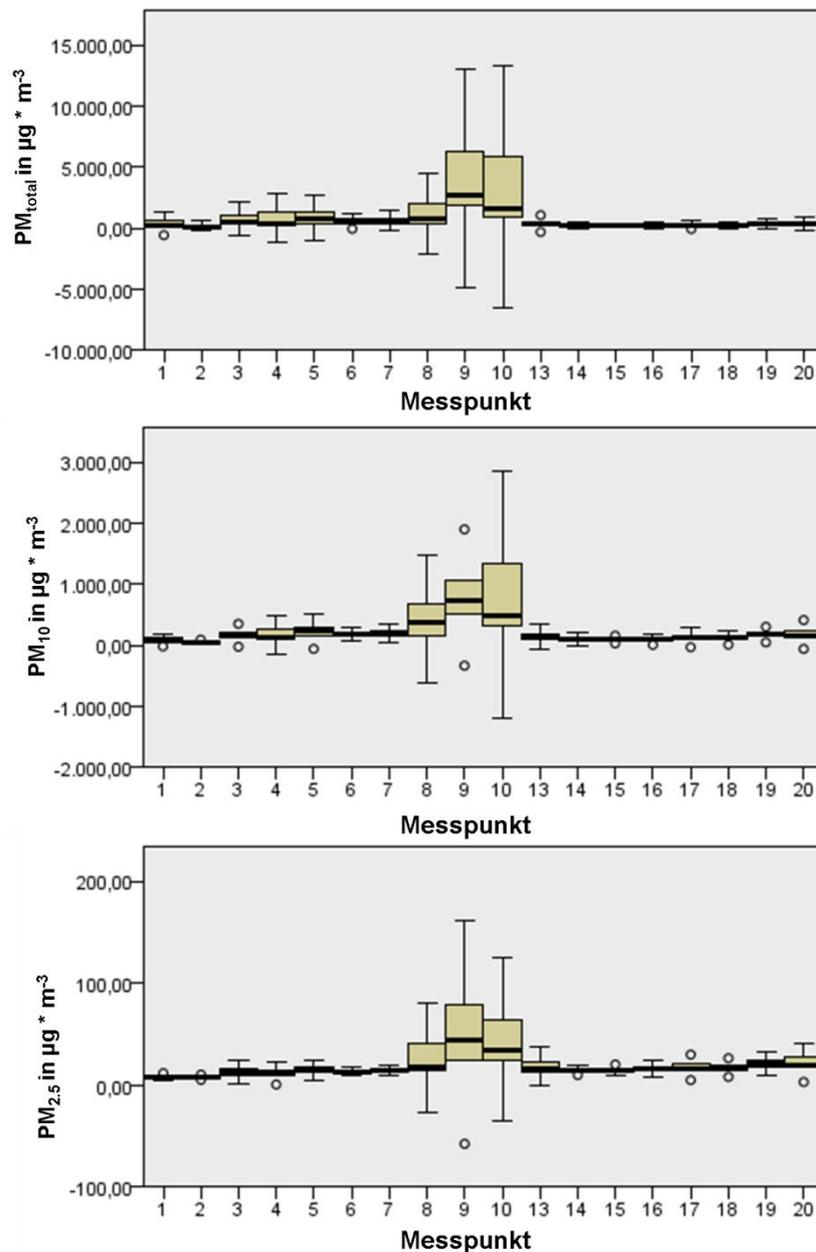


Abbildung 42: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Milchviehstall 2

Stall 3

Anhand der Homogenitätsanalyse in Stall 3 konnten sehr geringe Feinstaubkonzentrationen nachgewiesen werden. Deutlich erhöhte Konzentrationen konnten im Bereich des Futtertisches gezeigt werden. Die Messpunkte 11 - 20 weisen wesentlich höhere Werte auf als die Messpunkte, die sich im hinteren Teil des Stalles, kurz vor den Windschutznetzen befinden.

Rechts neben dem Stall befindet sich das ausgelagerte Melkhaus. Auf der rechten Seite des Stallgebäudes sind Windschutznetze eingebaut, so dass das Einströmen der Luft minimiert wird (FEUSER, 2011).

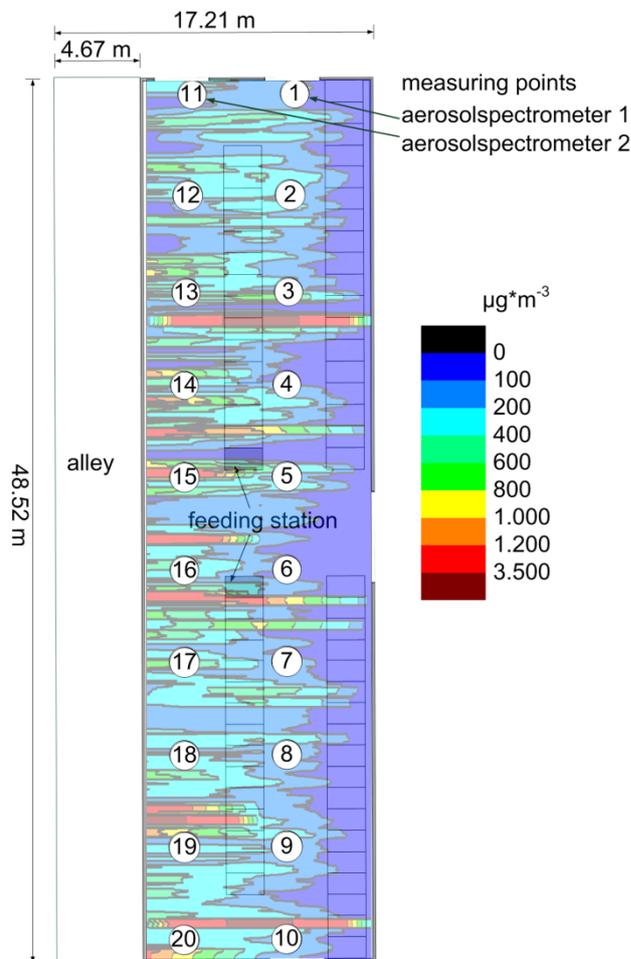


Abbildung 43: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum von Milchviehstall 3

Die Boxplot-Diagramme (Abbildung 44) spiegeln sehr gut die Ergebnisse der Farb-Kontur-Diagramme wider. Betrachtet man den Mittelwertvergleich in Tabelle A 10, so wird bei den Mittelwerten über alle Messpositionen deutlich, dass die Feinstaubkonzentrationen sehr gering sind, im Vergleich zu den übrigen untersuchten Milchviehställen. Die Werte deuten daher auf eine gute Durchlüftung des Stalles hin. Im Einzelnen bedeutet dies einen Mittelwert für $\text{PM}_{2,5}$ von $0,22 \text{ mg m}^{-3}$, für PM_{10} von $0,37 \text{ mg m}^{-3}$ und für den Gesamtstaub von $0,47$.

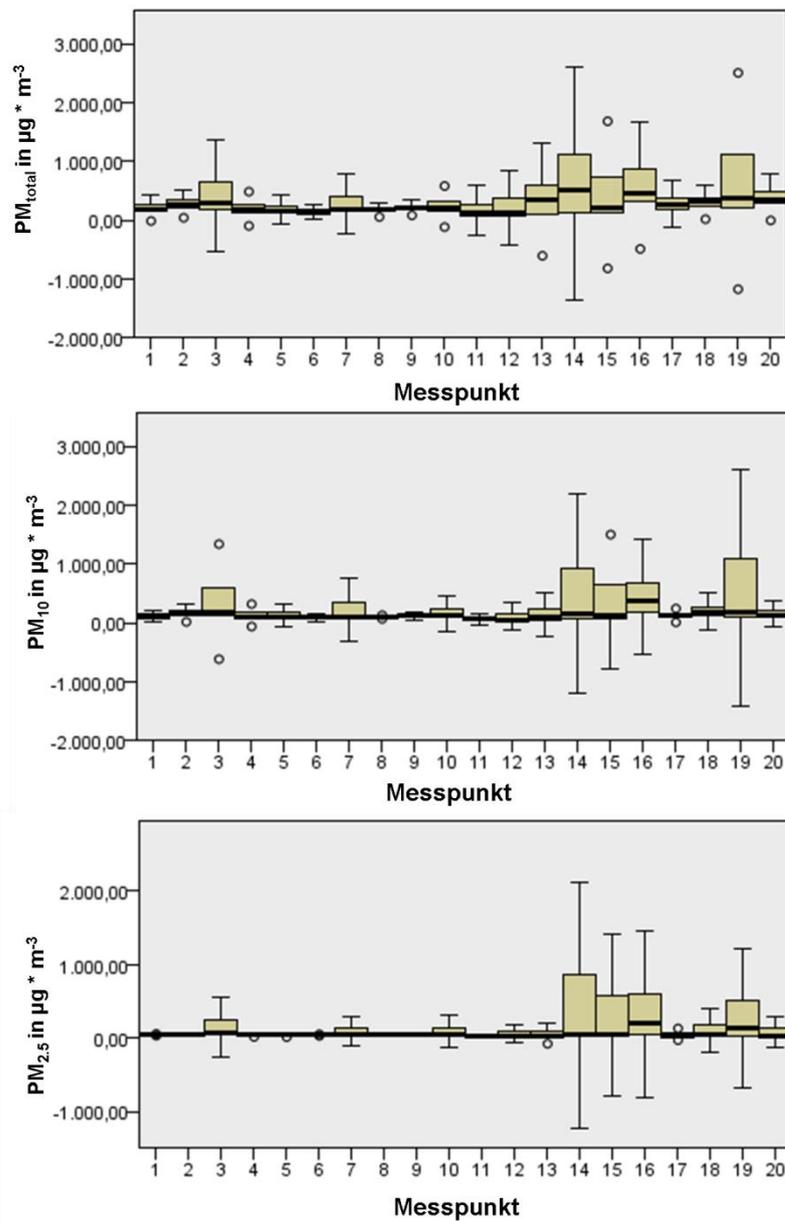


Abbildung 44: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Milchviehstall 3

Zieht man einen direkten Vergleich zwischen den Homogenitätsanalysen der drei Betriebe, werden die "HotSpots" der Partikelmassenkonzentrationen im Stallgebäude nochmals deutlich. Tabelle 17 zeigt die HotSpots der einzelnen Betriebe.

Tabelle 17: Direkter Vergleich der Homogenitätsanalysen in den Milchviehställen

Betrieb	HotSpot
Stall 1	Melkstand, Kuhbürste
Stall 2	Melkstand, Doppelliegebox, Laufgänge zwischen den Liegeboxenreihen, hinterer Stallbereich
Stall 3	Fressgitter

Zwischenfazit zur Homogenitätsanalyse in Milchviehställen

Folgende Ergebnisse lassen sich aus der Homogenitätsanalyse zusammenfassen:

- Es liegt keine homogene Verteilung der Feinstaubkonzentration im Milchviehstall vor.
- Vielmehr sind im Raum Zonen zu finden, die sehr hohe Feinstaubkonzentrationen im Vergleich zum übrigen Raum aufweisen. Diese Konzentrationen können bis zu dem Faktor 8 voneinander unterschieden.
- Besonders im Bereich der Kraftfutterabrufstationen kam es zu erhöhten Feinstaubkonzentrationen.
- Zwischen den Milchviehställen liegen erhebliche Unterschiede vor.
- Es konnte statistisch nachgewiesen werden, dass sich die Messpunkte sowohl untereinander, als auch in der Größenklasse signifikant voneinander unterscheiden.

4.2.3 Haltungssystem Geflügel

Das Raster in Abbildung 45 zeigt eine deutlich höhere Partikelmassenkonzentration im Bereich des Eingangs zum Stall. Des Weiteren sind grundsätzlich wesentlich höhere Konzentrationen im Nordgang als im Südgang zu verzeichnen, an welchem sich die Auslaufklappen zum Kaltscharrraum befinden.

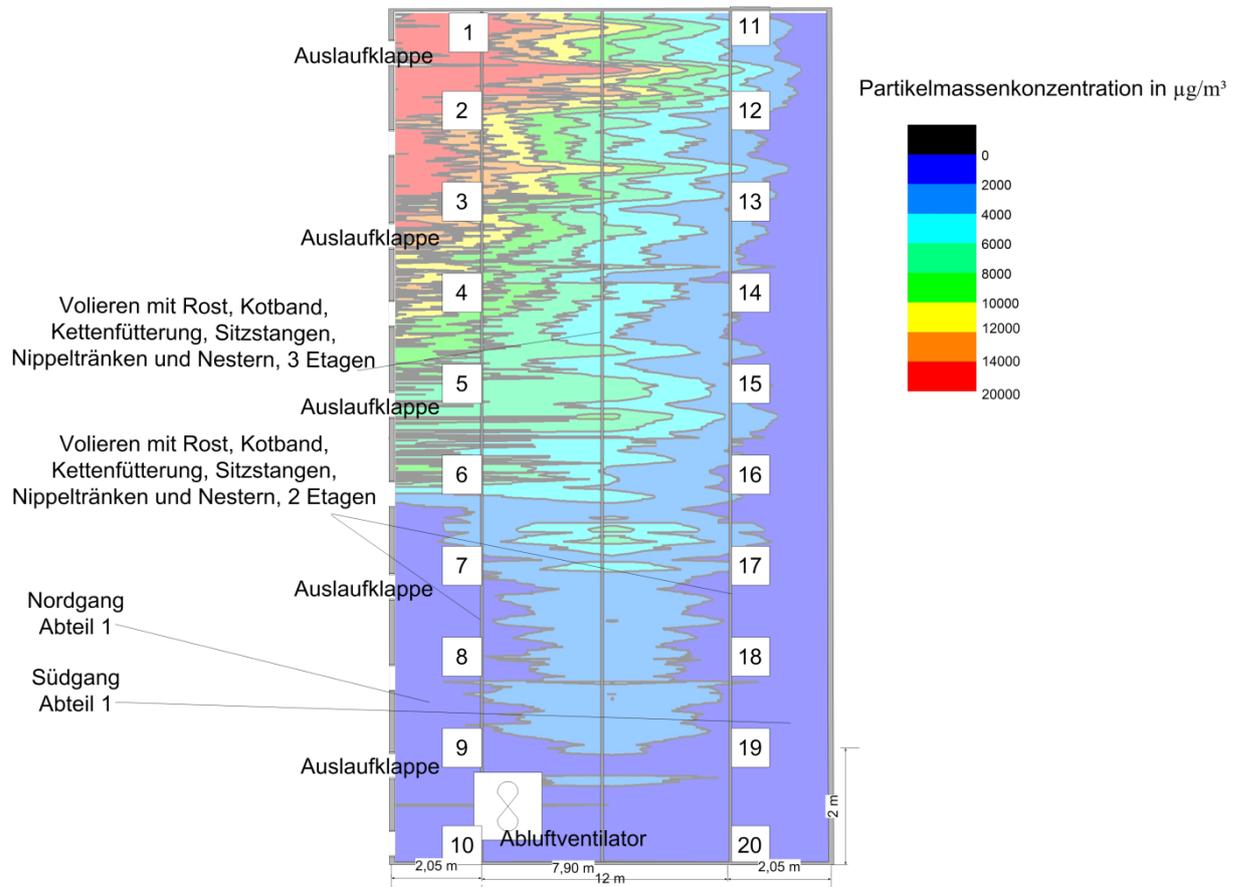


Abbildung 45: Verteilung der Feinstaubkonzentration im Innenraum im Geflügelstall 2

Abbildung 15 zeigt die Verteilung durch Boxplots visualisiert.

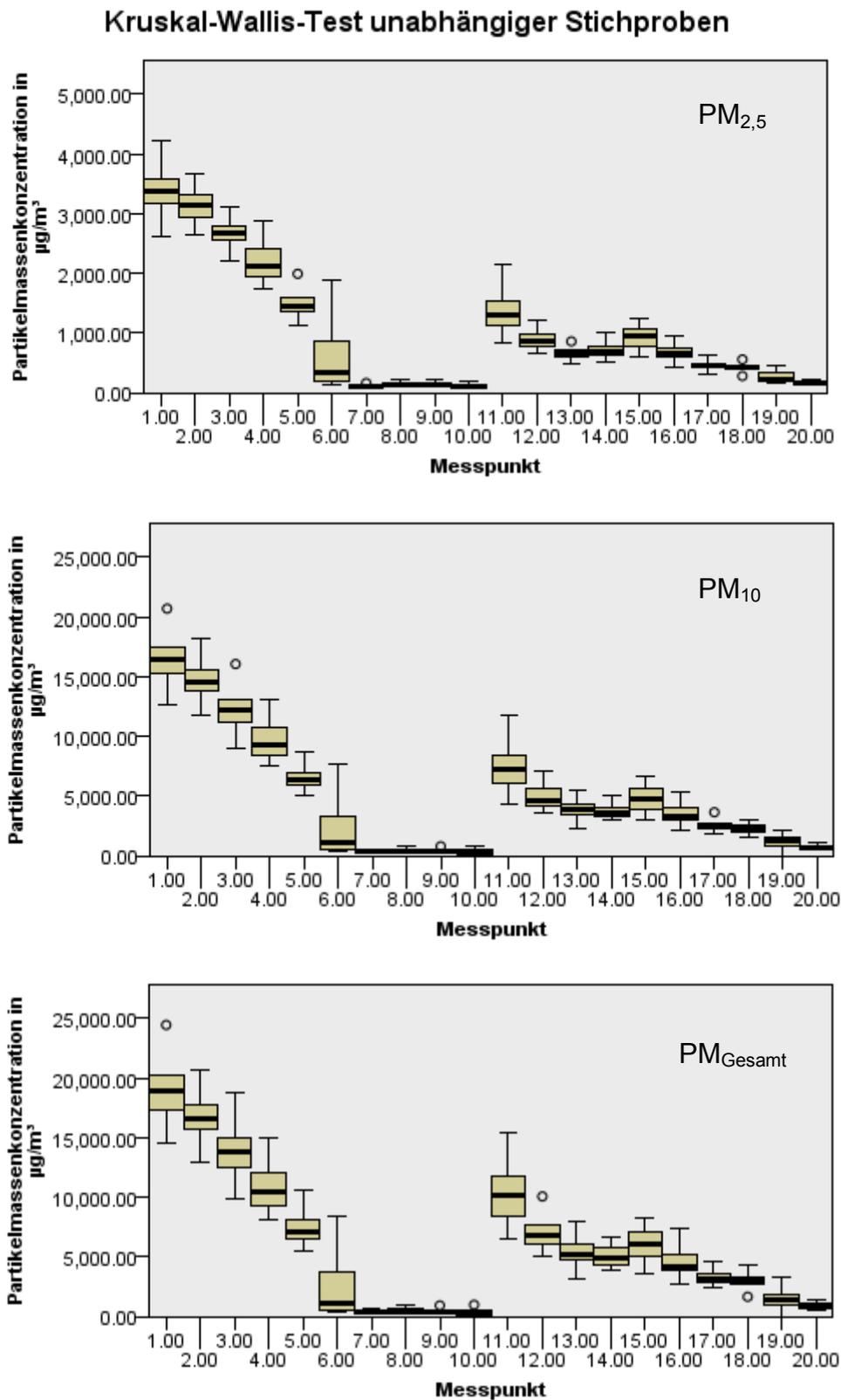


Abbildung 46: Boxplot-Diagramm für den Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben für Geflügelstall 2

4.3 Feinstaubbelastungen in Tierställen

4.3.1 Haltungssystem Schwein

In den Ställen wurden Vorgänge und Ereignisse mithilfe von Videoaufzeichnungen dokumentiert. Anhand des Videomaterials sollen mögliche Zusammenhänge zwischen Stallaktivität und Partikelmassenkonzentration im Tagesgang überprüft werden. Zu diesem Zweck werden Zeitreihen, bestehend aus Halbstundenmittelwerten, für die Größenfraktionen $PM_{2,5}$, PM_{10} und PM_{Gesamt} erstellt. Exemplarisch wird für jeden Stall der Verlauf eines typischen Tages graphisch dargestellt (NIEHAUS, 2011).

Stall 1

In Stall 1 befand sich zur Zeit der Messung, wie aus Tabelle 18 ersichtlich ist, 10 Tiere mit einem durchschnittlichen Gewicht von 105 kg. Der Ammoniakgehalt in der Luft liegt während der Messungen bei 17,7 bis 18,2 ppm.

Die Abbildung 47 zeigt die Partikelmassenkonzentration eines Tagesgangs (3.9.2010) in Stall eins. Die dargestellten PM Konzentrationen sind jeweils zu Halbstundenmittelwerten zusammengefasst. Anhand der Kameraaufzeichnungen lassen sich folgende Ereignisse mit der Veränderung der Partikelmassenkonzentration zusammenführen:

Während der Nacht sind die Schweine meistens ruhig. Der Mittelwert der Partikelmassenkonzentration am Tag liegt bei $1.782 \mu\text{g m}^{-3}$ und in der Nacht bei nur $774 \mu\text{g m}^{-3}$. Fressaktivitäten zwischen 01:00 Uhr und 02:00 Uhr lassen die Partikelmassenkonzentration jedoch auf $3.000 \mu\text{g m}^{-3}$ ansteigen. Mit beginnendem Sonnenaufgang, der zur Zeit der Untersuchung bei etwa 06:30 Uhr lag, beginnen vereinzelt Schweine aufzustehen. Dies zieht einen Anstieg der Partikelmassenkonzentration auf $1.386 \mu\text{g m}^{-3}$ nach sich. Ein starker Anstieg der Aktivität, und das Aufsuchen des Futters zeigen sich ab 09:20 Uhr. Zu der Zeit liegt die Partikelmassenkonzentration noch bei $747 \mu\text{g m}^{-3}$. Bis zur Fütterung um 10:00 Uhr steigt sie auf einen Wert von $3.497 \mu\text{g m}^{-3}$. Nach einer Stunde kommen die Schweine langsam wieder zur Ruhe. Dies spiegelt sich auch in der auf $743 \mu\text{g m}^{-3}$ (11:00 Uhr) gesunkene Partikelmassenkonzentration wieder. Zur mittags Zeit hin nimmt die Aktivität der Tiere wieder zu und sie beginnen erneut mit der Futteraufnahme. Hier erreicht die Partikelmassenkonzentration zwischen 12:55 und 13:24 Uhr einen Wert von $3.059 \mu\text{g m}^{-3}$. Nach der Aktivität in den Mittagsstunden

kommen die Tiere wieder zur Ruhe. Ein erneuter Anstieg der Aktivität und der Futteraufnahme zeichnet sich ab 17:00 Uhr ab. Mit der Fütterung am Abend um 18:30 Uhr erreichen die Aktivität und die Partikelmassenkonzentration ihr Maximum von $3.731 \mu\text{g m}^{-3}$. Danach kommen die Tiere wieder zur Ruhe und die Partikelmassenkonzentration sinkt auf ein Minimum von $121 \mu\text{g m}^{-3}$ zwischen 22:45 und 23:14 Uhr (STERNBERG, 2010).

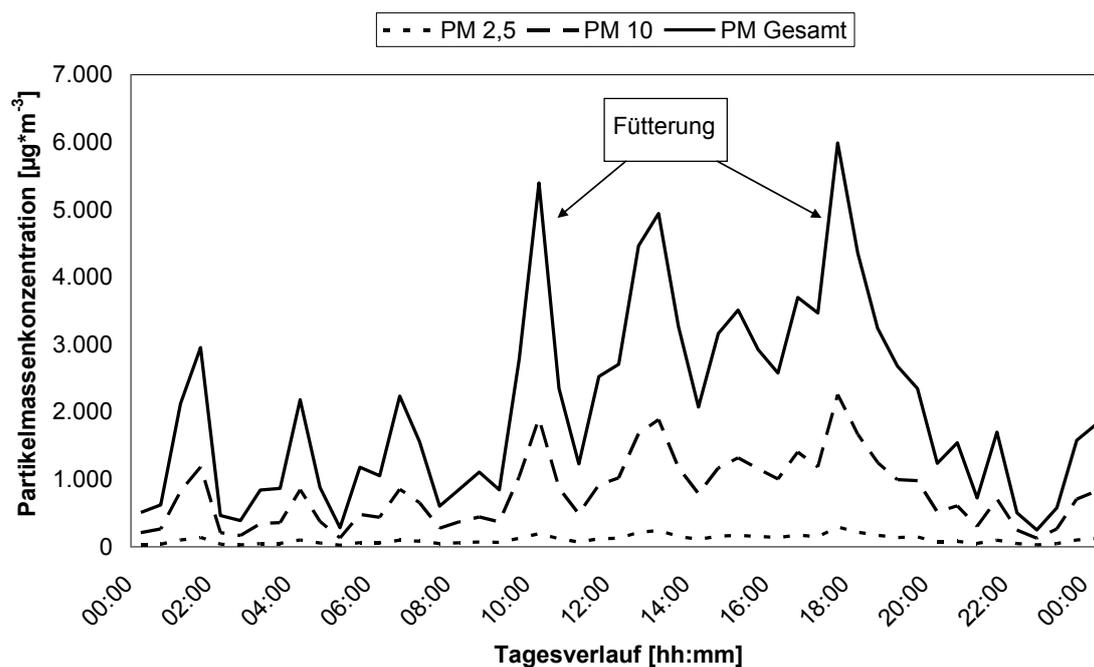


Abbildung 47: Tagesverlauf (03.09.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 1

Tabelle 18: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 1

		Größenfraktion			
		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt}	
Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Tag 1 (01.09.)	Mittelwert	120	1.003	1.846
		Standardabweichung	126	1.121	2.135
		Minimum	25	140	222
		Maximum	445	3.915	7.536
	Tag 2 (02.09.)	Mittelwert	119	973	1.764
		Standardabweichung	95	798	1.425
		Minimum	20	125	209
		Maximum	374	3.104	5.373
	Tag 3 (03.09.)	Mittelwert	105	694	1.264
		Standardabweichung	61	455	911
		Minimum	22	98	121

		Maximum	290	1.966	3.731
	Tag 4 (04.09.)	Mittelwert	139	853	1.605
		Standardabweichung	107	739	1.570
		Minimum	15	73	104
		Maximum	373	2.665	5.993
	Tag 5 (05.09.)	Mittelwert	133	944	1.940
		Standardabweichung	108	809	1.782
		Minimum	13	48	61
		Maximum	478	3.608	6.852

Stall 2

In Stall 2 befindet sich eine Fütterungsanlage, die viermal am Tag, jeweils um 06:00, 10:00, 15:00 und um 18:00 Uhr arbeitet.

Wie in Kapitel 3.1.1 bereits erwähnt, befinden sich in diesem Stall 160 Tiere mit einem durchschnittlichen Gewicht von 95 kg. Der Ammoniakgehalt in der Luft liegt bei 5,0 ppm.

In diesem Diagramm sind die Partikelmassenkonzentrationen für einen Tagesgang des zweiten Stalls als Halbstundenmittelwerte dargestellt. Für diesen Stall zeigen sich folgende Ergebnisse bei dem Vergleich mit den Kameraaufzeichnungen:

Während der Nacht verhalten sich die Schweine bis auf eine kurze Fressphase zwischen 01:35 und 03:00 Uhr recht ruhig. Die Partikelmassenkonzentration liegt zu dieser Zeit zwischen 5.978 bis $6.113 \mu\text{g m}^{-3}$, sinkt dann wieder auf etwa $2.500 \mu\text{g m}^{-3}$ ab. Erneute Aktivität geht dann mit dem Betrieb der Fütterungsanlage um 06:00 Uhr einher. Hier steigt die Partikelmassenkonzentration auf $9.936 \mu\text{g m}^{-3}$ an. Zwischen 06:34 Uhr und 08:20 Uhr kehrt dann wieder Ruhe ein und die Partikelmassenkonzentration sinkt auf ein Niveau zwischen $2.995 \mu\text{g m}^{-3}$ und $5.146 \mu\text{g m}^{-3}$. Mit der Kontrolle zwischen 08:20 Uhr und 08:25 Uhr steigen die Aktivität der Tiere und die Partikelkonzentration ebenso. Der Wert liegt bei $12.197 \mu\text{g m}^{-3}$. Nach einer Beruhigung der Tiere, beginnen einige gegen 10:20 Uhr erneut mit dem Fressen und vermehrter Aktivität, da die Fütterungsanlage ab 10:00 Uhr erneut arbeitet. Die Partikelmassenkonzentration steigt dabei auf $9.693 \mu\text{g m}^{-3}$. Dann sinkt bis 15:00 Uhr die Partikelmassenkonzentration auf $3.978 \mu\text{g m}^{-3}$. Ab 15:00 Uhr arbeitet die Fütterungsanlage erneut und die Partikelmassenkonzentration steigt auf $8.151 \mu\text{g m}^{-3}$, fällt dann bis 16:00 Uhr wieder auf $2.933 \mu\text{g m}^{-3}$. Nach dieser Ruhephase, steigt die Partikelmassenkonzentration auf $9.076 \mu\text{g m}^{-3}$ während der Kontrolle um 17:30 Uhr. Sie steigt weiter bis auf $11.672 \mu\text{g m}^{-3}$ bei dem Verladen einiger Tiere ab 18:00 Uhr. Ihr Maximum erreicht die Partikelmassenkonzentration zwischen 19:17 und 19:46 Uhr mit einem Wert von $12.510 \mu\text{g m}^{-3}$, da die Tiere durch die Kontrolle und das Auslesen der

Messgeräte eine sehr starke Aktivität zeigen. Weiterhin ist festzuhalten, dass die Fütterungsanlage ab 18:00 Uhr arbeitet. Da die Futterautomaten abends immer sehr leer sind, fällt das Futter tief hinein und somit ist die Staubentwicklung bei der Fütterung am Abend am höchsten. Ab 19:40 Uhr lassen die starke Aktivität und das Fressen allmählich nach, da das Licht ausgeschaltet wird. Durch den Rückgang der Aktivität sinkt dann auch der Staubgehalt in der Luft auf $2.408 \mu\text{g m}^{-3}$ zwischen 21:47 und 22:16 Uhr (Minimum). Gegen 23:30 Uhr suchen dann nochmal einige Tiere das Futter auf, die Partikelmassenkonzentration steigt erneut an. Der Wert liegt bei $8.493 \mu\text{g m}^{-3}$ (STERNBERG, 2010).

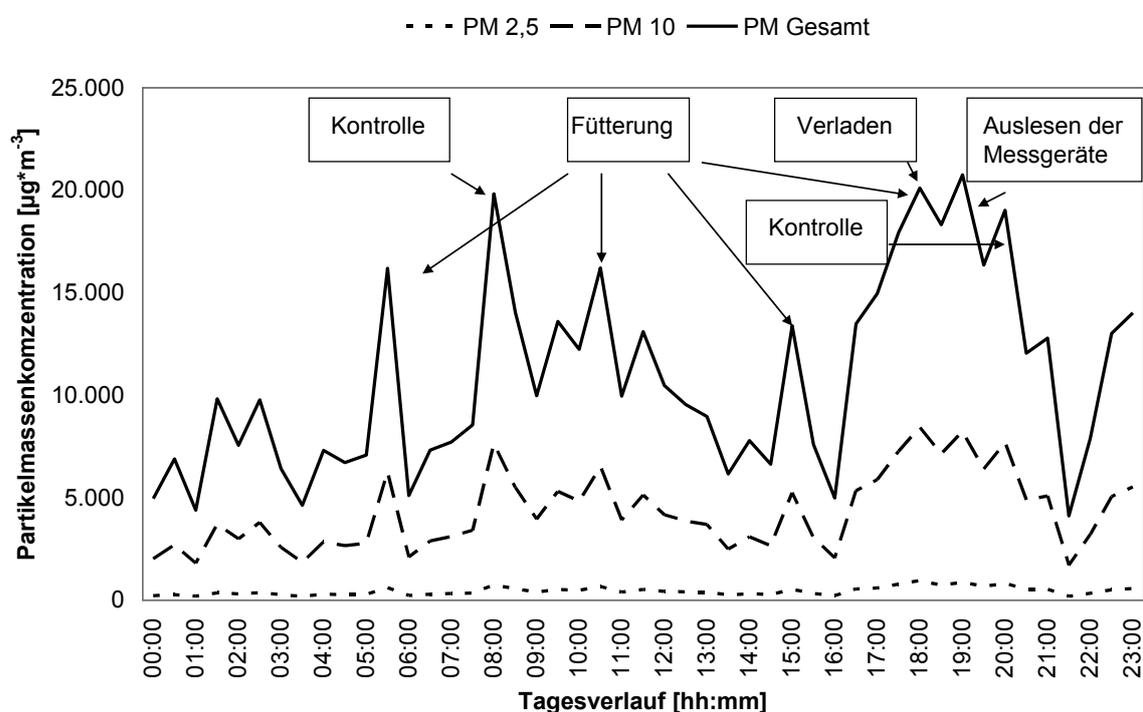


Abbildung 48: Tagesverlauf (08.09.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 2

Tabelle 19: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 2

		Größenfraktion			
		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt}	
Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Tag 1 (06.09.)	Mittelwert	579	5.402	9.784
		Standardabweichung	218	2.203	4.324
		Minimum	112	1.003	1.709
		Maximum	1.483	12.603	20.933
	Tag 2 (07.09.)	Mittelwert	476	4.283	7.608
		Standardabweichung	171	1.536	2.795

		Minimum	203	1.806	3.168
		Maximum	888	8.236	15.039
Tag 3 (08.09.)		Mittelwert	442	3.836	6.491
		Standardabweichung	195	1.662	2.840
		Minimum	190	1.508	2.409
		Maximum	954	7.478	12.511
Tag 4 (09.09.)		Mittelwert	504	4.294	7.305
		Standardabweichung	212	1.709	2.934
		Minimum	170	1.411	2.345
		Maximum	1.020	8.739	15.606
Tag 5 (10.09.)		Mittelwert	438	3.612	6.282
		Standardabweichung	134	1.186	2.205
		Minimum	161	1.114	1.760
		Maximum	718	6.000	10.818

Stall 3

In Stall 3 befindet sich zur Versorgung der 120 Schweine eine Fütterungsanlage. Diese arbeitet um 08:00, 15:00 und 19:00 Uhr. Der Ammoniakgehalt in der Luft liegt während der Messungen bei 4,2 ppm.

In diesem Diagramm sind die Halbstundenmittelwerte der Partikelmassenkonzentration, unterteilt in $PM_{2,5}$, PM_{10} und PM_{Gesamt} , dargestellt. Die Werte beziehen sich auf einen Tagesgang. Während der Nacht sind die Tiere, bis auf einzelne, kurze Aktivitäten recht ruhig. Der Mittelwert liegt in der Nacht bei $4.615 \mu g m^{-3}$. Tiefpunkte der Partikelmassenkonzentration werden zwischen 00:46 und 01:15 Uhr ($1.576 \mu g m^{-3}$, Minimum) und 02:46 und 03:15 Uhr ($1970 \mu g m^{-3}$) erreicht. Ein deutlicher Anstieg der Aktivität und das Aufsuchen des Futters zeigen sich ab 08:00 mit Beginn der Arbeit der Fütterungsanlage und der Tierkontrolle. Die Partikelmassenkonzentration erreicht zwischen 08:46 und 09:15 Uhr einen Wert von $9.333 \mu g m^{-3}$. Nach einer Beruhigung steigt die Aktivität zwischen 10:16 und 10:45 Uhr wieder, da nun die rangniederen Tiere fressen. Die Partikelmassenkonzentration erreicht einen Wert von $6.994 \mu g m^{-3}$. Anschließend sinkt die Partikelmassenkonzentration bis auf $2.773 \mu g m^{-3}$ zwischen 14:15 und 14:45 Uhr. Dann steigt die Aktivität der Tiere wieder, da um 15:00 Uhr die Fütterungsanlage erneut arbeitet. Die Partikelmassenkonzentration steigt auf $7.899 \mu g m^{-3}$. Durch das Betreten des Stalles zum Auslesen der Messgeräte, sind die Tiere aufgeregt und sehr aktiv, die Partikelmassenkonzentration erreicht ein Maximum von $11.090 \mu g m^{-3}$ (17:16 bis 17:32 Uhr). Danach kommen die Schweine wieder zur Ruhe und die Partikelmassenkonzentration sinkt ($6.492 \mu g m^{-3}$). Mit dem erneuten Start der

Fütterungsanlage um 19:00 Uhr und der Kontrolle um 19:10 Uhr steigt die Partikelmassenkonzentration wieder an ($7.790 \mu\text{g m}^{-3}$). Zwischen 20:19 und 20:48 Uhr steigt die Partikelmassenkonzentration, nach vorherigem Absinken, auf $8.186 \mu\text{g m}^{-3}$, da nun die schwächeren Tiere fressen. Ab 20:48 Uhr sinkt die Aktivität, nur noch vereinzelt Tiere fressen, da das Licht ausgeschaltet wird. Die Partikelmassenkonzentration sinkt ebenfalls (STERNBERG, 2010).

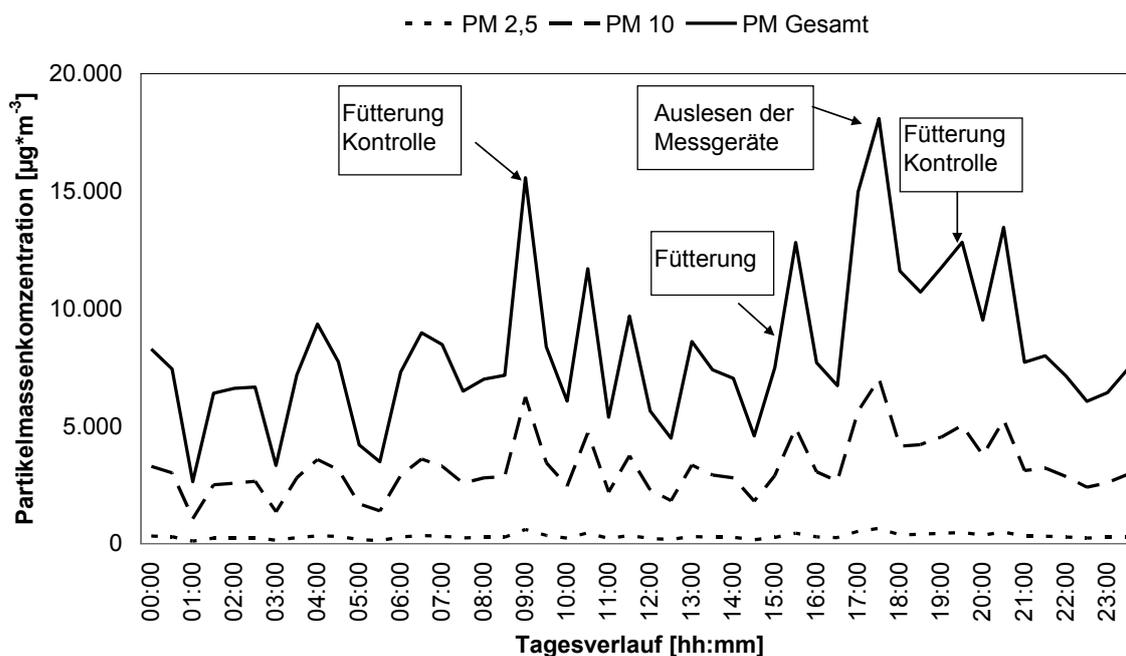


Abbildung 49: Tagesverlauf (11.09.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 3

Tabelle 20: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 3

		Größenfraktion			
		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt}	
Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Tag 1 (11.09.)	Mittelwert	307	2.932	4.993
		Standardabweichung	114	1.118	2.001
		Minimum	105	954	1.576
		Maximum	652	6.345	11.090
	Tag 2 (12.09.)	Mittelwert	333	3.071	5.010
		Standardabweichung	156	1.420	2.310
		Minimum	136	1.252	2.057
		Maximum	762	7.160	12.247
	Tag 3 (13.09.)	Mittelwert	376	3.475	5.757
		Standardabweichung	163	1.487	2.499

		Minimum	138	1.222	1.848
		Maximum	863	7.569	12.335
	Tag 4 (14.09.)	Mittelwert	306	2.867	4.688
		Standardabweichung	101	998	1.688
		Minimum	134	1.227	2.014
		Maximum	553	5.355	9.031

Stall 4

Anhand der Abbildung 50 lässt sich der tageszeitliche Verlauf der Partikelmassenkonzentration für den Maststall 4 analysieren. Deutliche Belastungsspitzen sind zu erkennen. Aus den Aufzeichnungen geht hervor, dass vor allem zum Zeitpunkt der Fütterung hohe Konzentrationen auftreten. Mit dem Einsetzen der Fütterung im Abteil sind alle Tiere auf den Beinen und konkurrieren um die besten Plätze am Trog. Tagsüber ist zwischen den Mahlzeiten zu beobachten, dass ein großer Teil der Tiere in den Buchten ruht, während die übrigen Tiere umher laufen. Höhere Partikelbelastungen im Zeitraum zwischen den Fütterungen sind verbunden mit einer gesteigerten Aktivität der Schweine. Das Auslesen der Messgeräte hat einen deutlichen Einfluss auf das Verhalten der Tiere. Durch das Betreten des Stalles erschrecken sich einige Tiere, wodurch eine allgemeine Unruhe ausgelöst wird. Besonders bei Betreten der Bucht sind die Schweine sehr aktiv und neugierig.

Ein Konzentrationsanstieg, dem ein eindeutiges Ereignis zugeordnet werden kann, ist in der Abbildung 50 entsprechend gekennzeichnet. Es wird deutlich, dass auch ohne besondere Einwirkungen von außen erhebliche Belastungsschwankungen auftreten. Am vierten Messtag wurden die Tiere um 06:30 Uhr, 13:08 Uhr und 19:00 Uhr gefüttert. Die Tierkontrolle erfolgte jeweils morgens und abends während der Fütterung. Eine Überprüfung der Aerosolspektrometer wurde gegen 17:00 Uhr durchgeführt (NIEHAUS, 2011).

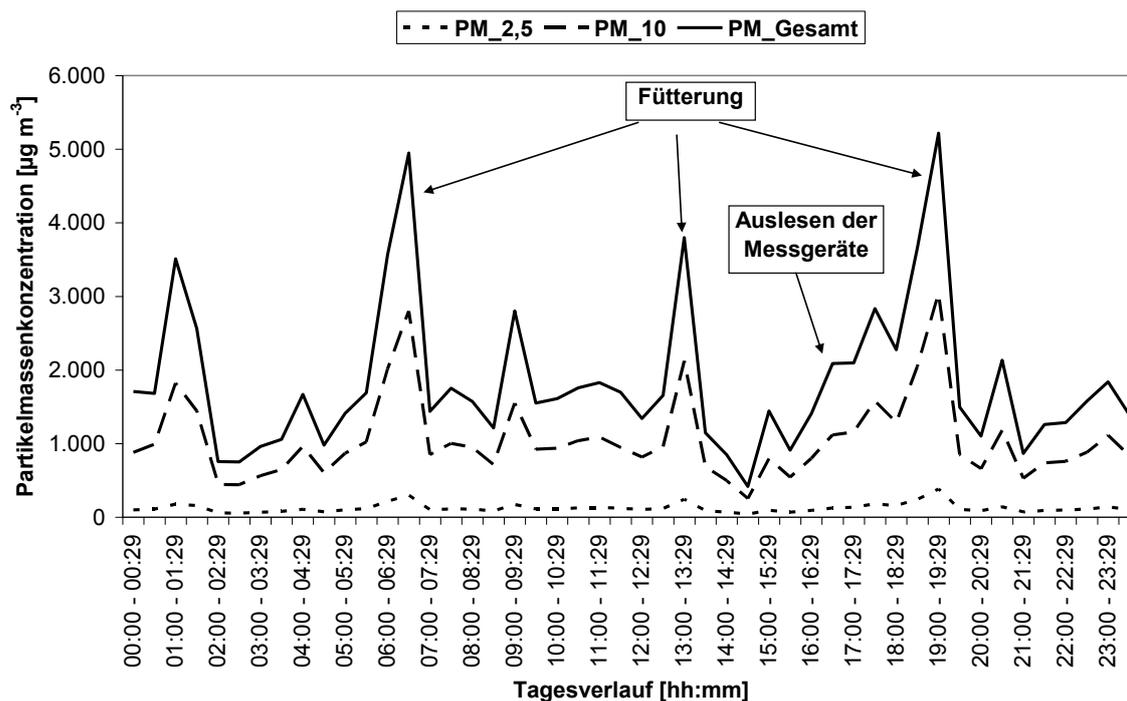


Abbildung 50: Tagesverlauf (04.10.2010) der Partikelmassenkonzentration für Maststall 4

Tabelle 21: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 4

			Größenfraktion		
			PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt} t
Partikelmassen- konzentration [µg m ⁻³]	Tag 1 (01.10.)	Mittelwert	155	1.039	1.904
		Standardabweichung	78	682	1.449
		Minimum	52	283	361
		Maximum	891	7.658	17.361
	Tag 2 (02.10.)	Mittelwert	138	1.037	1.916
		Standardabweichung	73	669	1.449
		Minimum	39	221	306
		Maximum	882	8.103	19.356
	Tag 3 (03.10.)	Mittelwert	117	958	1.667
		Standardabweichung	86	816	1.500
		Minimum	20	90	112
		Maximum	1.485	14.657	25.116
	Tag 4 (04.10.)	Mittelwert	125	1.057	1.849
		Standardabweichung	106	998	1.816
		Minimum	23	85	107
		Maximum	1.297	10.707	22.121

In der Tabelle 21 sind die Mittelwerte, Standardabweichungen sowie Minima und Maxima der einzelnen Messtage für Maststall 4 dargestellt. Mit Ausnahme des dritten Tages liegen die Mittelwerte im Vergleich über alle Fraktionen sehr nah beieinander. Etwas stärker divergiert die durchschnittliche Abweichung der Messwerte vom Mittelwert. Dies schlägt sich in verschiedenen hohen Standardabweichungen innerhalb der Größenfraktionen nieder. Die Unterschiede bei Minima und Maxima sind als eher geringfügig einzustufen (NIEHAUS, 2011).

Stall 5

Ein ähnlicher Verlauf der Partikelmassenkonzentration im Tagesgang zeigt sich für den Maststall 5 (Abbildung 51). Auch in diesem Fall treten Belastungsspitzen im Zusammenhang mit den Mahlzeiten (07:04, 12:45 und 18:13 Uhr) und dem Auslesen der Messgeräte (16:40 Uhr) auf. Während nachts nur vereinzelt Tiere aufstehen, umher laufen und sich nach kurzer Zeit wieder hinlegen, ist in den frühen Morgenstunden zu beobachten, dass viele Tiere über mehrere Buchten verteilt ihre Ruhephase unterbrochen haben und sich bewegen. Obwohl das Ausmaß der Partikelmassenkonzentration während der ersten Fütterung ähnlich hoch einzuordnen ist wie die Belastung im Zeitraum um 05.45 Uhr, ist das Verhalten der Tiere in Art und Umfang nicht direkt miteinander vergleichbar. Mit dem Einschalten der Beleuchtung und dem ersten Ertönen des pneumatischen Fütterungsventils springen schlagartig alle Tiere auf, um einen Platz möglichst nah am Futterauslass über dem Trog zu bekommen (NIEHAUS, 2011).

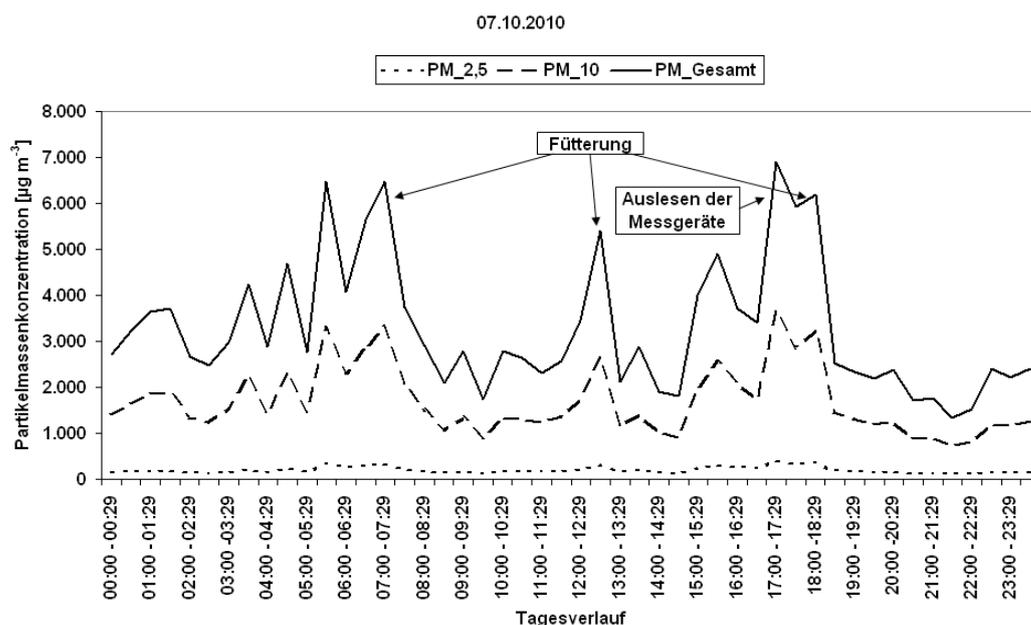


Abbildung 51: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für Maststall 5

Unterschiede zwischen den Mittelwerten der einzelnen Tage sind vor allem in den Größenfraktionen PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ auszumachen (Tabelle 22). So liegt in der Fraktion $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ der Mittelwert vom 09.10. etwa $1.600 \mu\text{g m}^{-3}$ über dem vom 07.10. (NIEHAUS, 2011).

Tabelle 22: Gegenüberstellung der Messtage für Maststall 5

		Größenfraktion			
		$\text{PM}_{2,5}$	PM_{10}	$\text{PM}_{\text{Gesamt}}$	
Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Tag 1 (06.10.)	Mittelwert	210	2.018	4.067
		Standardabweichung	111	1.177	2.709
		Minimum	46	325	687
		Maximum	1.523	18.307	36.118
	Tag 2 (07.10.)	Mittelwert	193	1.685	3.267
		Standardabweichung	96	1.020	2.213
		Minimum	72	311	504
		Maximum	1.161	13.692	24.378
	Tag 3 (08.10.)	Mittelwert	210	1.866	3.715
		Standardabweichung	111	1.190	2.681
		Minimum	50	336	562
		Maximum	1.519	17.703	39.142
	Tag 4 (09.10.)	Mittelwert	242	2.345	4.889
		Standardabweichung	142	1.498	3.616
		Minimum	59	354	608
		Maximum	1.417	17.215	44.942

Stall 6

Die Abbildung 52 gibt einen Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Abferkelstall wieder. Im Vergleich zu den anderen Ställen wird deutlich, dass beim Abferkelstall die Phasen höherer Partikelmassenkonzentration länger andauern. Während Mastscheine relativ kurzfristig nach dem Fressen wieder ihrer gewohnten Tätigkeit nachgehen bzw. ruhen, schließt sich an die Fütterung der Sauen häufig das Säugen der Ferkel an. So nimmt es einen längeren Zeitraum in Anspruch, bis Ruhe in das Abteil einkehren kann. Die erste Fütterung der Sauen erfolgt um 07:00 Uhr. Bis zum Auffüllen des Ferkelfutters gegen 10:00 Uhr sind, abgesehen von einzelnen Sauen, die vorübergehend aufstehen, wenig Aktivitäten im Stall zu verzeichnen. Über eine Stunde später, um 11:17 Uhr, erhalten die Sauen ihre zweite Mahlzeit. Um 16:39 Uhr werden die Aerosolspektrometer ausgelesen. Es schließen sich die Fütterung der Sauen um 18:26 Uhr und das Nachfüllen des Ferkelfutters um 19:16 Uhr an. Über den Tag verteilt kann immer wieder beobachtet werden, dass Sauen ihren Nachwuchs säugen oder die Ferkel um den Schutzkorb herum flitzen und kleine Rangeleien untereinander austragen.

Aufgrund der unterschiedlichen Strukturierung der einzelnen Wochenarbeitstage in der Ferkelerzeugung können die täglichen Abläufe und somit der Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration variieren (NIEHAUS, 2011).

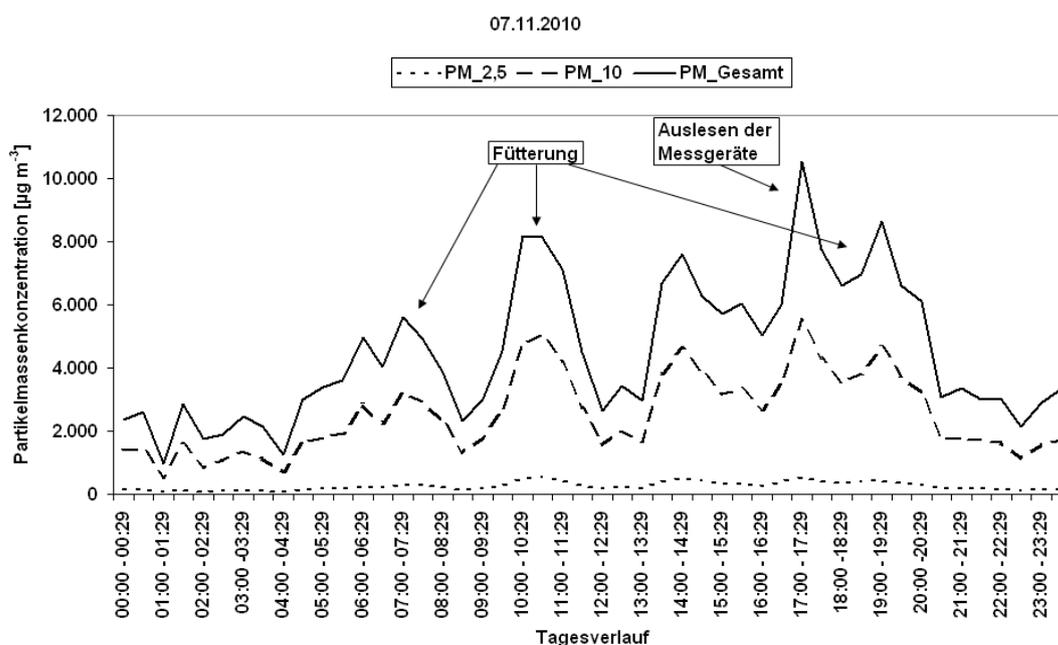


Abbildung 52: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Abferkelstall

Die Tabelle 23 zeigt, dass die Mittelwerte von Tag zu Tag ansteigen. Dies trifft auch weitgehend auf die Standardabweichung zu. Am vierten Messtag wurde ein Maximum von über 53.000 $\mu\text{g m}^{-3}$ erreicht.

Tabelle 23: Gegenüberstellung der Messtage für den Abferkelstall

		Größenfraktion			
		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt}	
Partikelmassen- konzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]	Tag 1 (05.11.)	Mittelwert	154	1.617	3.009
		Standardabweichung	113	1.531	2.773
		Minimum	18	64	93
		Maximum	932	10.180	25.937
	Tag 2 (06.11.)	Mittelwert	210	2.143	3.818
		Standardabweichung	165	1.401	2.711
		Minimum	16	185	235
		Maximum	1.946	13.412	24.955
	Tag 3 (07.11.)	Mittelwert	251	2.515	4.487
		Standardabweichung	195	1.712	3.304
		Minimum	26	239	341
		Maximum	2.071	16.028	27.815
	Tag 4 (08.11.)	Mittelwert	301	2.906	5.325
		Standardabweichung	248	2.036	4.138
		Minimum	28	222	276
		Maximum	1.880	16.514	53.150

Stall 7

Der Verlauf der Partikelmassenkonzentration im Wartestall ist durch eine Vielzahl von Belastungsspitzen gekennzeichnet (Abbildung 53). Anders als bei den zuvor betrachteten Haltungssystemen entfallen bei der Verwendung von Abrufstationen feste Fütterungszeitpunkte, die dem Tag eine bestimmte Struktur verleihen. Auffällig ist, dass im Wartestall immer wieder hohe Belastungen über den gesamten Tag verteilt auftreten. Nur im Zeitraum zwischen 12:30 und 14:30 Uhr sinkt die Konzentration auf ein niedrigeres Niveau. Aus den Videoaufzeichnungen geht hervor, dass in dieser Phase die Sauen sowohl in den Liegekesseln, als auch im Aktivitätsbereich ruhen bzw. schlafen. Die Abrufstation bleibt in dieser Zeitspanne ebenfalls unbesetzt. Nur vereinzelt bewegt sich eine Sau durch den Raum. Nachts zeigt sich ein anders Bild. Zwar ruht auch in diesem Zeitabschnitt ein überwiegender Teil der Tiere, aber zwischenzeitlich sind immer wieder kleine Gruppen unterwegs und es herrscht ein reges Treiben am Engpass zwischen Abrufstation und Liegekessel. Die Abrufstation ist nahezu pausenlos besetzt. Gegen Mittag

hat eine Vielzahl der Sauen bereits ihre Tagesration abgerufen, was daran zu erkennen ist, dass die Tiere keinen Einlass in die Station erhalten bzw. diese wieder schnell verlassen. Ab 19:00 Uhr steht den Tieren eine neue Futterration für die nächsten 24 Stunden zur Verfügung. Dies erklärt eine Verschiebung der Aktivitäten in die Nachtstunden. An dem exemplarisch vorgestellten Tag erfolgte morgens gegen 07:30 Uhr eine Kontrolle im Tierbestand. Nachmittags gegen 17:00 Uhr wurden die Daten der Aerosolspektrometer gesichert. Im Gegensatz zu den Mastschweinen reagieren die Sauen auf ein Betreten des Tierbereiches kaum hektisch. Erst nach wenigen Minuten Aufenthalt im Stall sind mehrere Tiere im Aktivitätsbereich unterwegs (NIEHAUS, 2011).

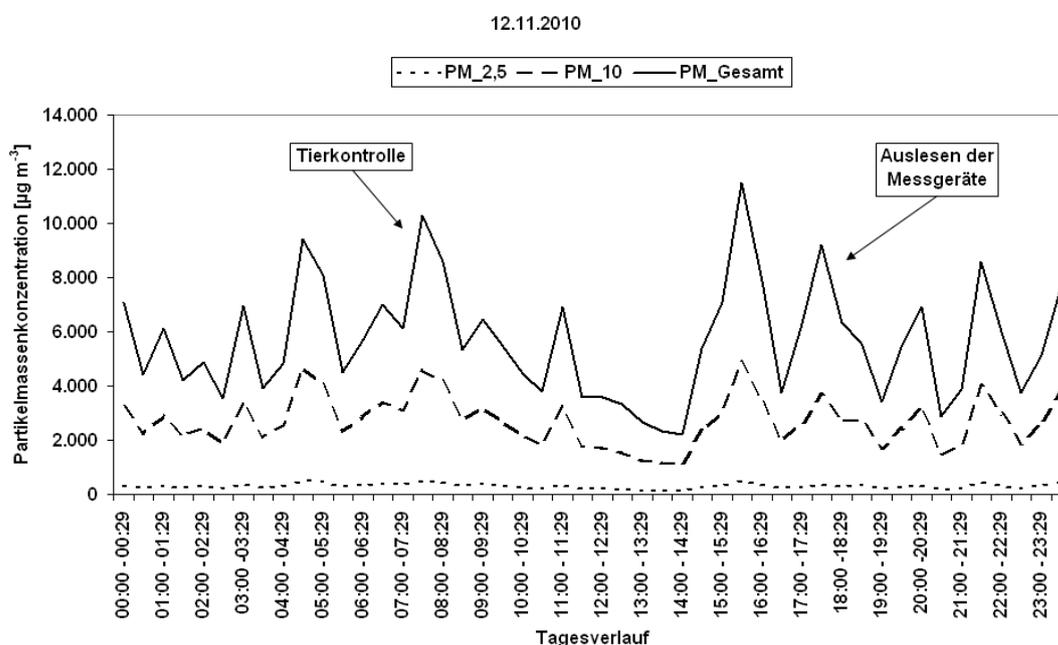


Abbildung 53: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Wartestall

Aus der Gegenüberstellung der einzelnen Messtage für den Wartestall (Tabelle 24) geht hervor, dass zwischen den Mittelwerten in der Fraktion PM_{10} eine Spanne von rund $800 \mu\text{g m}^{-3}$ und in der Fraktion PM_{Gesamt} eine Spanne von rund $1.500 \mu\text{g m}^{-3}$ besteht. Insgesamt liegen die errechneten Werte für Mittelwert und Standardabweichung auf einem höheren Niveau als bei den anderen Ställen. An jedem Messtag konnte ein Maximum um $40.000 \mu\text{g m}^{-3}$ und größer in der Größenfraktion PM_{Gesamt} erfasst werden (NIEHAUS, 2011).

Tabelle 24: Gegenüberstellung der Messtage für den Wartestall

		Größenfraktion			
		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt}	
Partikelmassen- konzentration [µg m⁻³]	Tag 1 (10.11.)	Mittelwert	311	2.670	5.248
		Standardabweichung	151	1.330	3.485
		Minimum	94	887	1.133
		Maximum	1.692	13.206	40.595
	Tag 2 (11.11.)	Mittelwert	366	3.219	6.531
		Standardabweichung	192	1.782	4.923
		Minimum	96	669	1.017
		Maximum	1.702	18.611	58.093
	Tag 3 (12.11.)	Mittelwert	300	2.707	5.682
		Standardabweichung	172	1.596	4.288
		Minimum	71	468	673
		Maximum	2.285	18.976	39.696
	Tag 4 (13.11.)	Mittelwert	266	2.398	4.984
		Standardabweichung	172	1.515	3.876
		Minimum	60	532	805
		Maximum	2.118	16.716	42.610

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Schweinemastställe dargestellt. Festzuhalten ist hierbei, dass bei den Ställen 2 und 3 die höchsten Feinstaubkonzentrationen erzielt wurden. Grund hierfür sind wahrscheinlich die Breifutterautomaten.

Tabelle 25: Gegenüberstellung der Feinstaubkonzentrationen in den untersuchten Mastschweineställen

	Stall 1	Stall 2	Stall 3	Stall 4	Stall 5
Untersuchungszeitraum	Sept. 2010	Sept. 2010	Sept. 2010	Okt. 2010	Okt. 2010
Tierzahl	10	160	120	181	143
Ø Gewicht [kg]	105	95	70	91	42
Lüftung	Offenfront	Rieselkanallüftung	Ganglüftung	Strahl- lüftung	Türgang- lüftung
Aufstallung	Tieflaufstall	Vollspaltenboden			
Fütterung	Trocken- futter- automat	Breifutterautomat		Flüssigfütterung am Quertrog	
Ammoniak [ppm]	17,7	5,0	4,2	5,3	5,5
Innenraum- temperatur [°C]	18	25	25	23	23
PM_{2,5} [µg m⁻³]	123	488	331	107	171
PM₁₀ [µg m⁻³]	893	4.285	3.086	1.023	1.979
Gesamtstaub [µg m⁻³]	1.684	7.494	4.090	1.834	3.985

In Abbildung 54 ist die Verteilung der Partikelmassenkonzentration in den verschiedenen Ställen dargestellt. Die deskriptive Statistik zu diesem Kapitel befindet sich im Anhang (Tabelle A 11 bis Tabelle A 16).

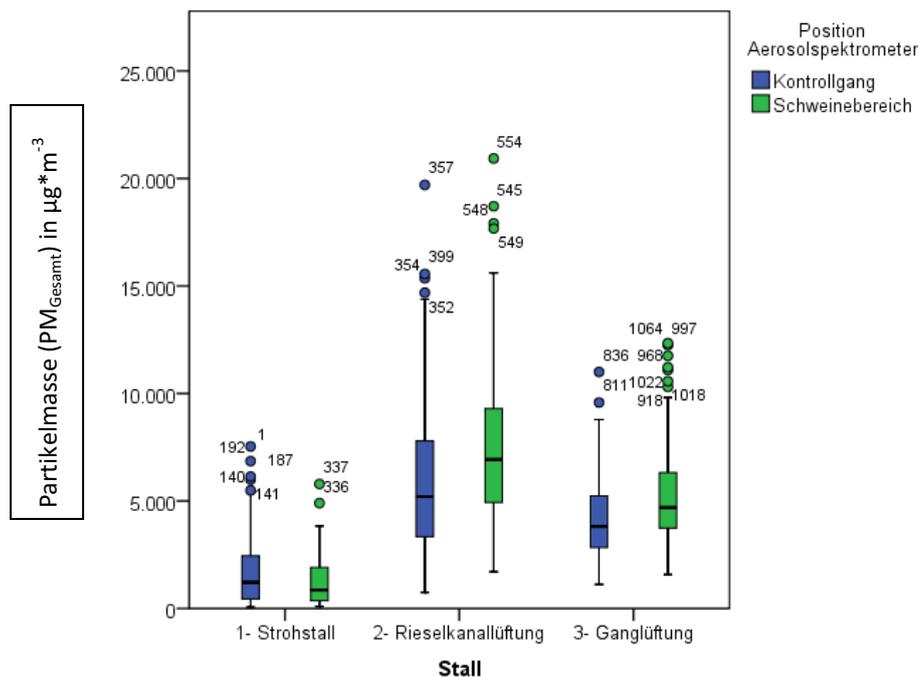


Abbildung 54: Vergleich der Partikelmassenkonzentrationen in den untersuchten Ställen an verschiedenen Positionen (Sternberg, 2011)

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Partikelmassenkonzentration im Schweinebereich höher ist, als im Kontrollgang. Die Ausnahme zeigt der Strohhall (1). Der Grund dafür ist, dass das Aerosolspektrometer, welches im Kontrollbereich installiert war, sich auch gleichzeitig in unmittelbarer Nähe des Futterautomaten befand.

Insgesamt sind die Partikelmassenkonzentrationen im frei belüfteten Strohhall (1) am geringsten und in Schweinestall 2 (Rieselkanallüftung) am höchsten. Das deckt sich mit der Tierzahl, die in Schweinestall 1 am geringsten und in Schweinestall 2 am größten ist (s. Tabelle 10). Bezieht man die Mittelwerte der Partikelmassenkonzentrationen auf die im Stall befindlichen Tiere, so ändern sich die Partikelmassenkonzentrationen in den Ställen (Tabelle A 11, Tabelle A 13).

Wird die Partikelmassenkonzentration auf die Anzahl der Tiere bezogen, wird deutlich, dass, im Strohhall (1) pro TP (Tierplatz), am meisten Staub anfällt. Zwischen Schweinestall 2 (Rieselkanallüftung) und Schweinestall 3 (Ganglüftung) besteht kein nennenswerter Unterschied.

In allen drei Ställen liegt der Mittelwert am Tag über dem Mittelwert in der Nacht. Hier wurde für den Tag eine Zeitspanne von 06:00 bis 18:00 Uhr und für die Nacht eine Zeitspanne von 18:00 bis 06:00 Uhr definiert (Tabelle A 11 bis Tabelle A 16).

4.3.2 Haltungssystem Rind

Stall 1

In Stall 1 lässt sich ein 3-Stunden-Rhythmus der Herde in den Peaks der Grafik erkennen, der sowohl tagsüber als auch nachts gegeben ist. Dieser Rhythmus ist für alle Untersuchungstage und für beide Geräte gleich, was auf eine routinierte Arbeitsweise schließen lässt. Abbildung 55 zeigt die Tagesverlauf-Kurve des zweiten Untersuchungstages.

Vor Beginn der Melkzeit, etwa um 6:00 Uhr, und während der Melkzeit selbst wurden die höchsten Partikelmassenkonzentrationen erfasst. Ab dieser Zeit bewegen sich die ersten Kühe in Richtung Vorwarteraum des Melkstandes, wobei die morgendliche Melkzeit erst um 7:00 Uhr beginnt. Dass die Konzentrationen morgens deutlicher ausgeprägt sind als abends, lässt sich mit dem Verhalten der Milchkühe erklären. Zwischen dem abendlichen und morgendlichen Melken liegt ein Zeitfenster von 14 Stunden, welches somit 4 Stunden länger ist als das Zeitfenster zwischen der morgendlichen zur abendlichen Melkzeit. Während der Körperpflege der Kühe, besonders bei Betätigung der Kuhbürste, treten ebenfalls erhöhte Partikelinnenraumkonzentrationen auf. Die erfassten Messwerte unterscheiden sich kaum von denen, die während der Melkzeiten entstehen.

Die $PM_{2,5}$ -Fraktion zeigt auf der Grafik (Abbildung 55) eine Partikelmassenkonzentration von $90 \mu\text{g m}^{-3}$. Bei PM_{10} weist die niedrigste Konzentration eine Partikelmasse von $56 \mu\text{g m}^{-3}$ auf, die höchste Konzentration $1.295 \mu\text{g m}^{-3}$. Die erfassten Daten wurden vor Erstellen der Grafik zu Halbstundenmittelwerten zusammengefasst. Dadurch werden die Maxima (Tabelle 26) relativiert und die Grafik zeigt wesentlich niedrigere Messwerte (FEUSER, 2011).

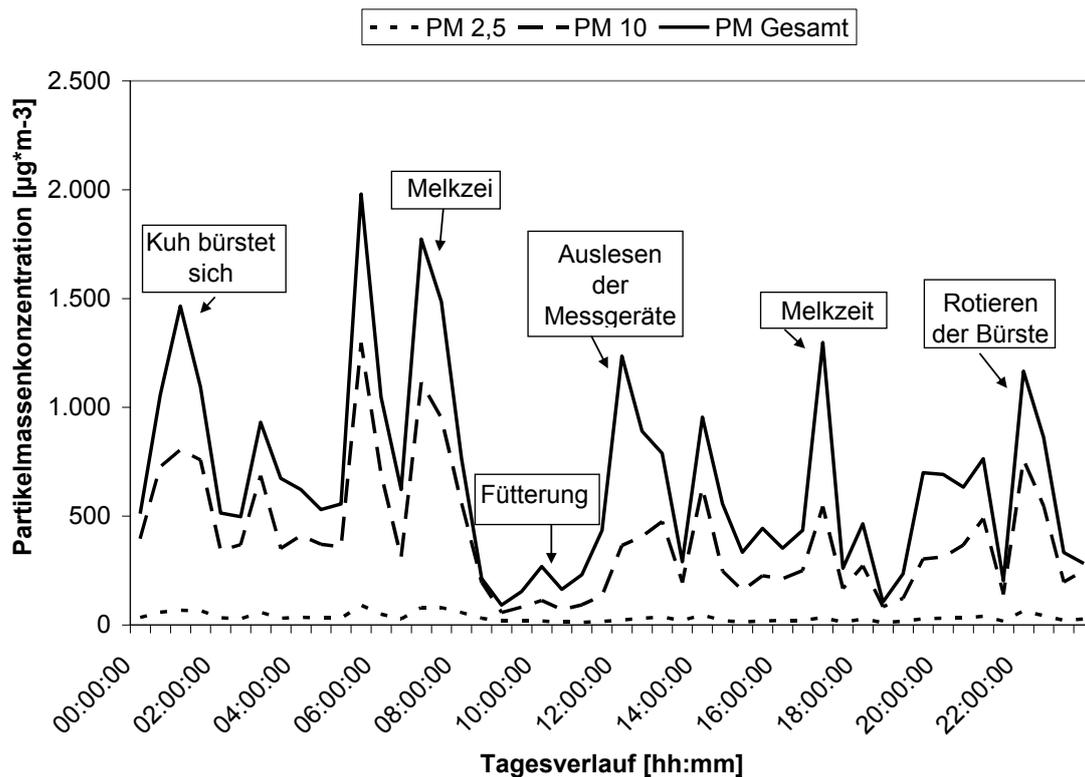


Abbildung 55: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Milchviehstall 1

Tabelle 26: Gegenüberstellung der Messtage für den Milchviehstall 1

			Größenfraktion		
			PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt}
Partikelmassenkonzentration [µg m ⁻³]	Tag 1 (22.10.)	Mittelwert	76	853	1.289
		Standardabweichung	137	1.336	1.650
		Minimum	9	29	34
		Maximum	2.364	19.267	21.500
	Tag 2 (23.10.)	Mittelwert	45	486	783
		Standardabweichung	143	1.79	1.717
		Minimum	4	6	6
		Maximum	3.030	30.228	36.979
	Tag 3 (24.10.)	Mittelwert	44	458	703
		Standardabweichung	84	874	1.095
		Minimum	7	21	21
		Maximum	1.554	17.203	20.217
	Tag 4 (25.10.)	Mittelwert	61	320	722
		Standardabweichung	128	386	861
		Minimum	5	7	7
		Maximum	972	1.869	4.403

Stall 2

Im Gegensatz zum ersten Stall, lässt sich bei Stall 2 kein bestimmter Rhythmus der Herde feststellen. Die Verlaufskurve des Tagesgeschehens ist Abbildung 56 zu entnehmen. Die Grafik zeigt, dass der marginale Peak von PM_{Gesamt} lediglich eine Partikelmassenkonzentration von $878 \mu\text{g m}^{-3}$ erreicht und deutlich unter der marginalen Konzentration des ersten Stalles liegt. Tabelle 27 bestätigt geringere Messwerte in allen Partikelfractionen im Vergleich zu Stall 1. Die Peaks sind bei der Konkurrenz um Futterplätze zu erwarten. Eine deutlich erhöhte Partikelinnenraumkonzentration findet man während des Treibens der Kühe zum Melkstand um 17:33 Uhr. Es ist deutlich zu erkennen, dass die PM_{10} -Fraktion den ausschlaggebenden Anteil von PM_{Gesamt} ausmacht. Die höchste Konzentration der $PM_{2,5}$ -Fraktion liegt bei $33 \mu\text{g m}^{-3}$ (FEUSER, 2011).

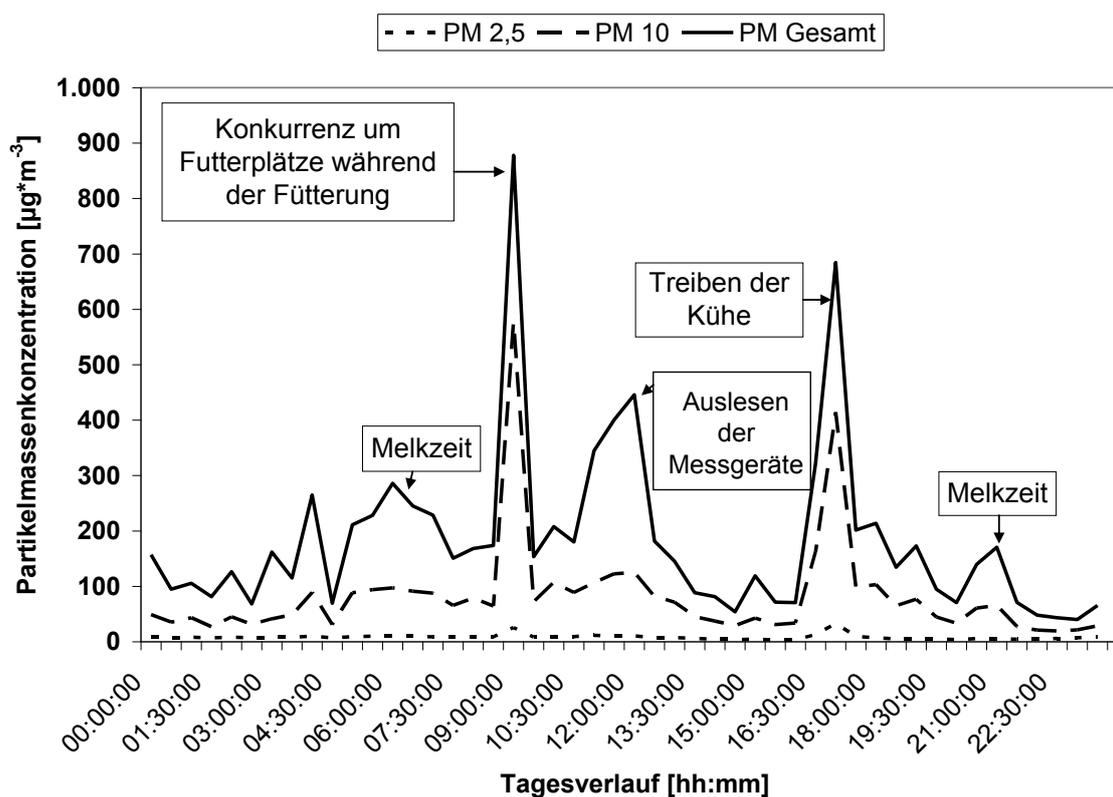


Abbildung 56: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Milchviehstall 2

Tabelle 27: Gegenüberstellung der Messtage für den Milchviehstall 2

		Größenfraktion			
		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt} t	
Partikelmassen- konzentration [µg m ⁻³]	Tag 1 (29.10.)	Mittelwert	21	73	181
		Standardabweichung	10	75	224
		Minimum	6	13	13
		Maximum	78	1.519	3.383
	Tag 2 (30.10.)	Mittelwert	8	84	182
		Standardabweichung	13	317	505
		Minimum	2	4	4
		Maximum	264	8.528	12.100
	Tag 3 (31.10.)	Mittelwert	14	65	116
		Standardabweichung	12	201	263
		Minimum	3	5	5
		Maximum	258	6.409	8.161
	Tag 4 (01.11.)	Mittelwert	34	76	106
		Standardabweichung	4	36	86
		Minimum	26	32	34
		Maximum	57	336	741

Stall 3

In Stall 3 ist an jedem Messtag bei beiden Aerosolspektrometern eine deutlich erhöhte Partikelkonzentration zu etwa gleichen Zeiten (zwischen 16:00 und 16:30 Uhr) zu beobachten, die entscheidend von den restlichen über den Tag gemessenen Werten abweicht. Die Partikelinnenraumkonzentration von etwa 3.800 µg m⁻³ wird hervorgerufen durch dichtes Gedränge am Fressgitter während der Futtermittelaufgabe mittels TMR. Im Tagesverlauf erreicht PM_{ges} laut der Grafik einen marginalen Messwert von 700 µg m⁻³. Die Partikelinnenraumkonzentration wurde teilweise in einem Messbereich nahe der Nulllinie ermittelt. Tabelle 28 zeigt für den zweiten Untersuchungstag bei PM_{2,5} Messwerte von 4 µg m⁻³. Auf der Grafik (Abbildung 57) ist sehr gut zu erkennen, dass der Anteil der PM₁₀-Fraktion am Gesamtstaub-Aufkommen sehr viel höher ist, als der Anteil der PM_{2,5}-Fraktion. Ausschlaggebend sind hier vermutlich zum einen das Halungsverfahren und zum anderen das gute Stallmanagement, so dass der Feinstaub im Anteil nur geringfügig vertreten ist. Der Stall bei Stall 3 ist sehr großzügig angelegt, so dass die Kühe im Laufbereich ausreichend Fläche zur Verfügung haben, sich bei eventuellen Konfrontationen aus dem Weg zu gehen. Das Melkhaus ist außerhalb der Stallanlage gelegen, so dass dies durch die Wartezeiten vor dem Melken, wo die Tiere in der Regel (i.d.R.) dicht gedrängt auf einer relativ kleinen Fläche stehen, nicht zu erhöhten

Partikelinnenraumkonzentrationen führt. Der Peak während der täglichen Futtermalage weicht erheblich von den anderen im Tagesverlauf gemessenen Werten ab, da für die Herde nicht ausreichend Fressplätze zur Verfügung stehen. Die Kameraaufzeichnungen zeigten eine starke Konkurrenz um den Platz im Fressbereich (FEUSER, 2011).

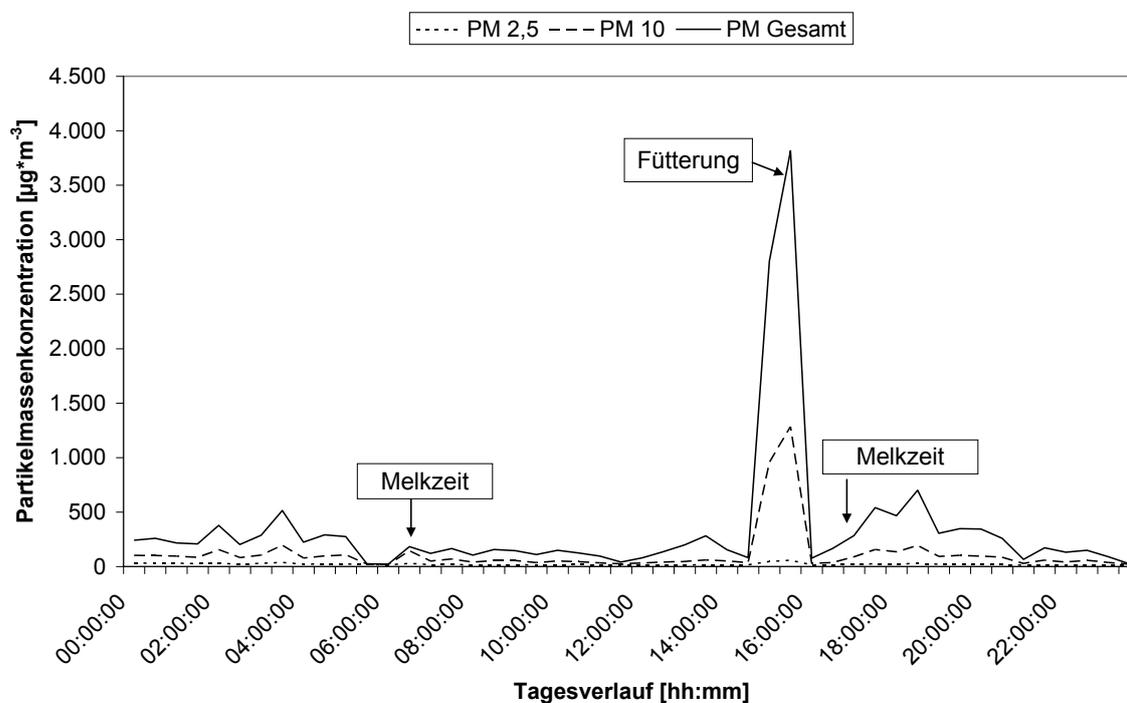


Abbildung 57: Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration für den Milchviehstall 3

Tabelle 28: Gegenüberstellung der Messtage für den Milchviehstall 3

		Größenfraktion			
		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{Gesamt} t	
Partikelmassenkonzentration [µg m ⁻³]	Tag 1 (03.12.)	Mittelwert	99	477	983
		Standardabweichung	255	3.888	11.361
		Minimum	9	35	37
		Maximum	4.580	136.667	416.487
	Tag 2 (04.12.)	Mittelwert	20	98	281
		Standardabweichung	31	808	2.346
		Minimum	9	10	10
		Maximum	1.109	29.706	85.936
	Tag 3 (05.12.)	Mittelwert	25	171	365
		Standardabweichung	96	700	1.182
		Minimum	4	4	4
		Maximum	1.643	11.263	24.838

	Tag 4 (06.12.)	Mittelwert	145	670	807
		Standardabweichung	546	2.951	3.031
		Minimum	9	15	15
		Maximum	7.808	40.025	40.117

Tabelle 29: Gegenüberstellung der Feinstaubkonzentrationen in den untersuchten Milchviehställen

	Stall 1	Stall 2	Stall 3
Untersuchungszeitraum	Okt. 2010	Okt. 2010	Dez. 2010
Tierzahl	63	120	64
Lüftung	Offenfront	Trauf-First-Lüftung	Querlüftung
Aufstallung	Spaltenboden	Spaltenboden	Planbefestigt
Ammoniak [ppm]	0,41	3,5	0,4
PM_{2,5} [$\mu\text{g m}^{-3}$]	57	19	72
PM₁₀ [$\mu\text{g m}^{-3}$]	529	75	354
Gesamtstaub [$\mu\text{g m}^{-3}$]	874	146	609

4.3.3 Haltungssystem Geflügel

Stall 1

In diesem Untersuchungspaket sind Partikelmassen- und Partikelanzahlkonzentrationen in mehreren 24-Stunden-Messungen für Legehennen in Kleingruppenhaltung ermittelt worden.

Die eingesetzten Aerosolspektrometer detektieren die Partikelanzahlkonzentrationen. Durch Multiplikation eines geräteinternen Massenfaktors, der auf Basis eines Standardstaubes bestimmt ist, kann das Aerosolspektrometer eine Partikelmasse für den Beprobungszeitraum berechnen.

Die Dichten der gemessenen Partikel in der Legehennenhaltung weichen jedoch in den unterschiedlichen Partikelgrößenklassen von der des Standardstaubes ab. Dadurch entstehen große Fehler bei der Berechnung der vom Aerosolspektrometer bestimmten

Partikelmasse. Durch die Bestimmung des gravimetrischen Korrekturfaktors wird dieser Fehler behoben. Dieser ist in Tabelle 30 als Gravimetriefaktor I (Gf I) angegeben. Dieser Tabelle ist ein mittlerer Korrekturfaktor für das Aerosolspektrometer II von 0,39 zu entnehmen.

Tabelle 30: Bestimmung der Gravimetriefaktoren I und II anhand der vorliegenden Messergebnisse für das Aerosolspektrometer II

	Aerosolspektrometer	Aerosolspektrometer		Gravimetriesammler	
Datum:	kM [mg m^{-3}]	gM [mg m^{-3}]	Gf I*	gM [mg m^{-3}]	Gf II**
21.12.08	2,54	1,03	0,40	1,79	0,70
22.12.08	2,65	0,82	0,31	1,83	0,69
23.12.08	2,70	1,14	0,42	1,85	0,68
24.12.08	2,77	1,00	0,36	1,80	0,65
25.12.08	2,90	1,22	0,42	1,86	0,64
26.12.08	2,92	1,01	0,35	1,88	0,65
21.01.09	3,51	1,48	0,42	2,34	0,67
22.01.09	3,11	1,31	0,42	2,35	0,76
23.01.09	3,14	1,26	0,40	2,35	0,75
24.01.09	3,37	1,40	0,42	2,36	0,70
Mittelwert:	2,96	1,17	0,39	2,04	0,69

* = gewogene Masse Aerosolspektrometer / kalkulierte Masse Aerosolspektrometer

** = gewogene Masse Gravimetriesammler / kalkulierte Masse Aerosolspektrometer

Der Gravimetriefaktor II (Gf II) ermöglicht eine Umrechnung von der kalkulierten Masse des Aerosolspektrometers II auf die gravimetrisch bestimmte Masse des Gravimetriesammlers und umgekehrt. Der Gf II wird mit dem Mittelwert 0,69 angegeben.

Abbildung 58 stellt die Ergebnisse von drei unterschiedlichen Methoden zur Ermittlung der Partikelmassenkonzentrationen [mg m^{-3}] während des gesamten Messzeitraumes graphisch dar. Es fällt auf, dass die Partikelmassenkonzentrationen im Versuchsstall innerhalb eines Monats bei allen drei Methoden um den Faktor 1,2 angestiegen sind. Es ist weiterhin zu erkennen, dass die höchsten Massenkonzentrationen vom Aerosolspektrometer II kalkuliert werden. Die geringsten Partikelmassenkonzentrationen werden dann ermittelt, wenn der Quotient aus gewogener Filtermasse und angezeigtem

Probenluftvolumen des Aerosolspektrometers berechnet wird. Innerhalb der Messperioden 1 und 2 bleiben die durch 24-Stunden-Messungen ermittelten Massenkonzentrationen mit dem Gravimetriesammler relativ konstant.

Alle Filter sind vor der Wiegung getrocknet worden. Die Massendifferenzen der gewogenen Filtermassen der beiden verschiedenen Messmethoden stehen unter anderem mit den unterschiedlichen Ansaugsonden im Zusammenhang. Das Aerosolspektrometer kann im Gegensatz zum Gravimetriesammler große Partikel $> 20 \mu\text{m}$ nicht durch die Probenluftsonde ansaugen.

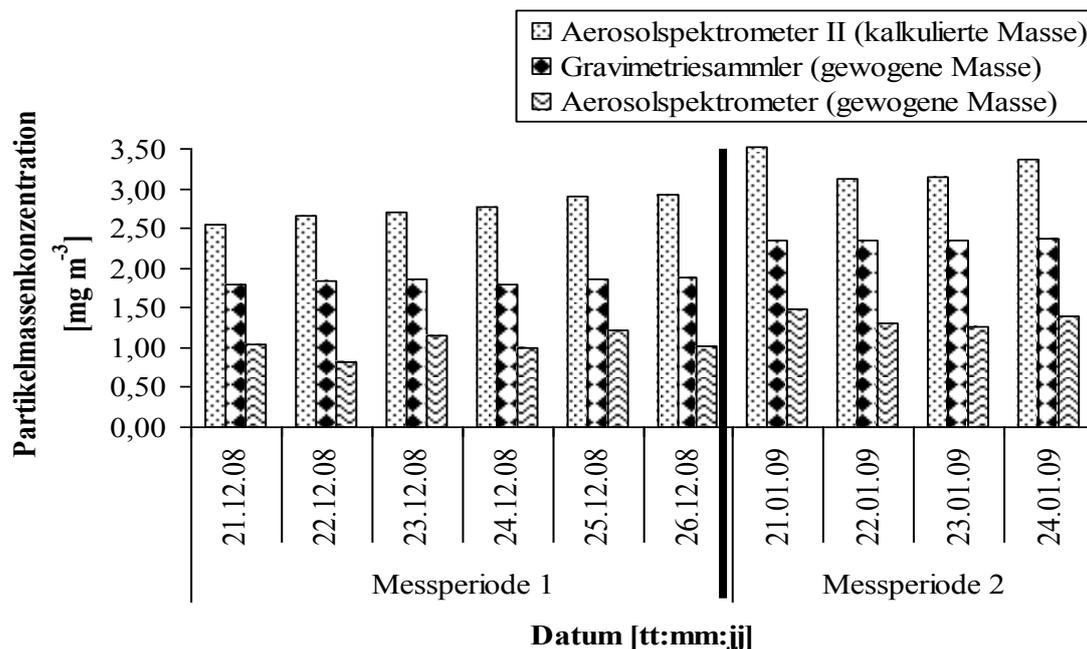


Abbildung 58: Vergleich drei unterschiedlicher Methoden zur Bestimmung der Partikelmassenkonzentrationen in der Haltung von Legehennen in Kleingruppen

Die in Abbildung 59 dargestellte Partikelgrößenverteilung beschreibt den Anteil der Partikelanzahl- und Massenkonzentration je m^3 Probenluft in 15 verschiedenen Größenklassen. Diese wurden mit dem Aerosolspektrometer II in den Partikelgrößenklassen zwischen $0,30$ bis $> 20 \mu\text{m}$ in 24-Stunden-Messungen ermittelt. Weiterhin sind für die Partikelanzahl und Partikelmasse Standardabweichungen angegeben, die aus insgesamt 10 Messtagen im Winter berechnet wurden.

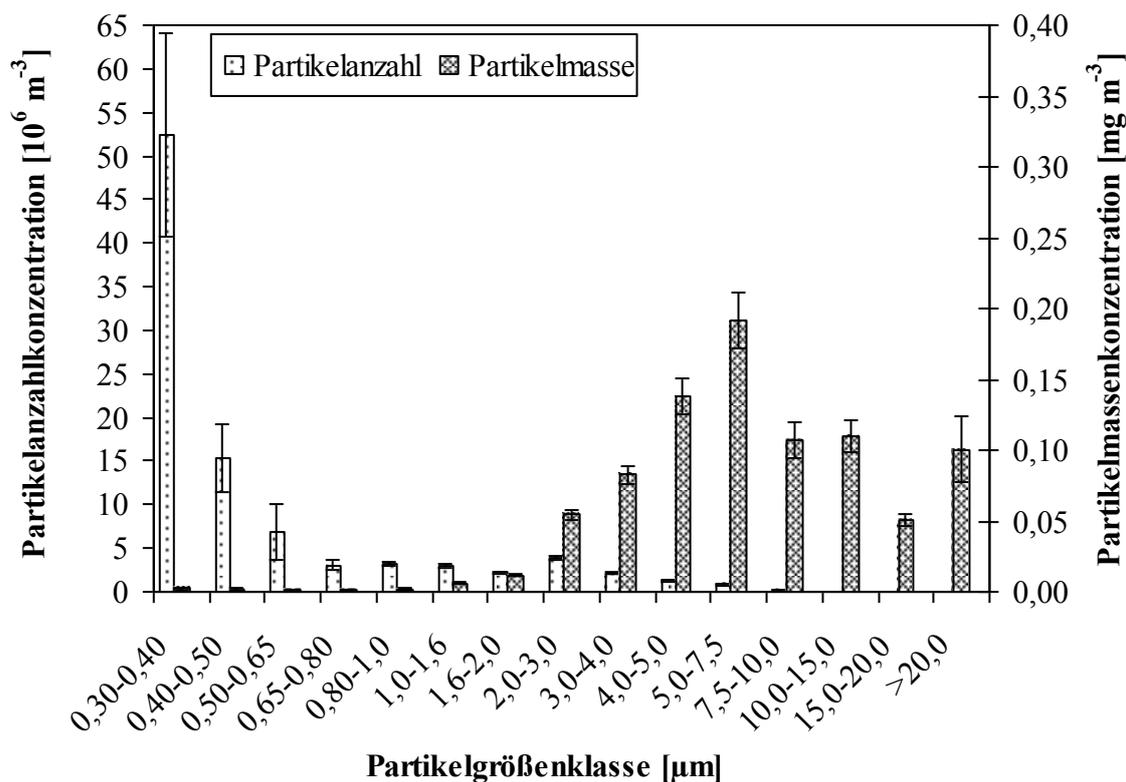


Abbildung 59: Typische Partikelgrößenverteilung nach Partikelmassen- und Partikelanzahlkonzentrationen in der Kleingruppenhaltung

Es ist festzustellen, dass die sehr große Partikelanzahl in den Partikelgrößenklassen bis $2,0 \mu\text{m}$ eine untergeordnete Rolle bei der Partikelmasse spielt. Auf der anderen Seite macht die geringe Partikelanzahl in den Größenklassen zwischen $2,0 - 20 \mu\text{m}$ eine sehr große Partikelmasse aus.

Mit über 52 Millionen detektierten Partikeln nimmt die Größenklasse $0,30 - 0,40 \mu\text{m}$ die größte Partikelanzahl je m^3 Luft ein. Die Partikel der Größenklasse $5,0 - 7,5 \mu\text{m}$ weisen hingegen mit ca. $0,2 \text{ mg m}^{-3}$ Luft den größten Anteil an der Partikelmasse auf. Typische Massenkonzentrationen [mg m^{-3}] im Tagesverlauf werden in Abbildung 60 und Abbildung 61 dargestellt. Diesen sind die tageszeitlichen Schwankungen zu entnehmen.

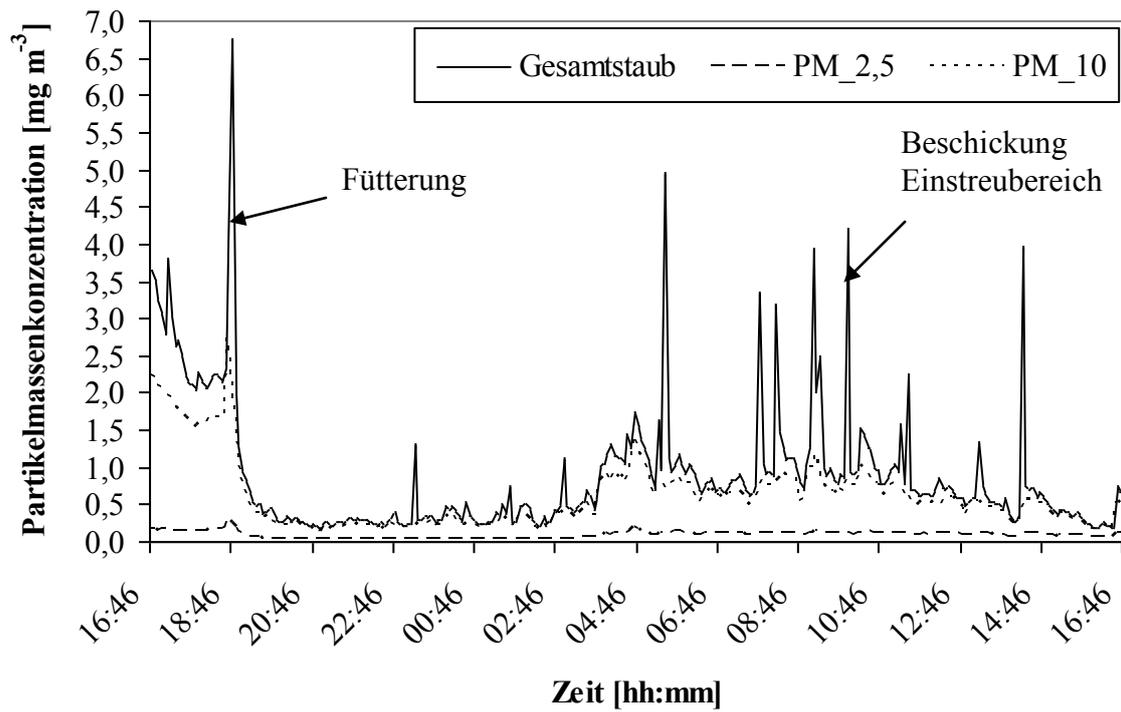


Abbildung 60: Gemessene Massenkonzentrationen im Bereich der Abluftkamine im Tagesverlauf für die Partikelgrößenfraktionen PM_{2,5}, PM₁₀ und Gesamtstaub am 22./23.01.2009

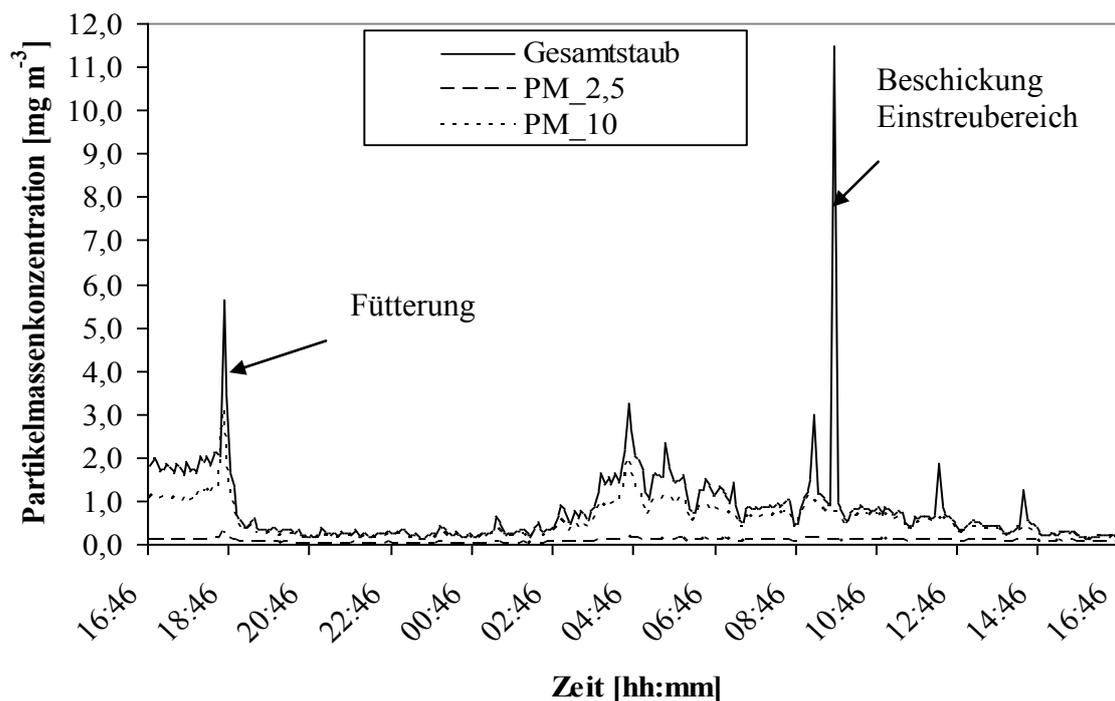


Abbildung 61: Gemessene Massenkonzentrationen im Bereich des Arbeitsplatzes im Tagesverlauf für die Partikelgrößenfraktionen PM_{2,5}, PM₁₀ und Gesamtstaub am 22./23.01.2009

Die Abbildungen umfassen jeweils 3 Staubfraktionen, PM_{2,5}, PM₁₀ und die Gesamtstaubfraktion. Beide Tagesverläufe wurden zeitgleich am 22./23. 01.2009 mit den Aerosolspektrometern I (Arbeitsplatzkonzentration) und II (Bereich der Abluftkamine) über 24 Stunden in einem Messintervall von fünf Minuten als Partikelanzahlkonzentrationen gemessen. Anschließend wurde die Partikelanzahl jeder Größenklassen mit den Massenfaktoren multipliziert.

Die Massenkonzentrationen befinden sich in der Kleingruppenhaltung in einem Bereich zwischen 0,3 und 11,0 mg m^{-3} Luft. Die Hochplateaus werden jedoch nur kurzzeitig erreicht. Der überwiegende Teil der Messergebnisse liegt in einem Konzentrationsbereich zwischen 0,3 und 2,0 mg m^{-3} Luft.

Ein tageszeitlicher Einfluss auf die Partikelmassenkonzentrationen ist in den Abbildung 60 und Abbildung 61 deutlich zu erkennen. Die geringsten Staubmassen werden in den Nachtstunden zwischen 19:00 und 03:00 Uhr gemessen. Zu dieser Zeit sind auch die geringsten Schwankungen festzustellen. Dieses Phänomen kann auf eine geringere

Tieraktivität in den Nachtstunden zurückgeführt werden. Die große Streuung der Werte tagsüber resultiert aus der Tierkontrolle, der Fütterung, der Beschickung des Scharraumes etc., was zu Unruhen in der Tierherde führt und die Tieraktivität steigert.

Die $PM_{2,5}$ Massenkonzentrationen sind an beiden Messorten mit etwa 0,1 bis 0,3 $mg\ m^{-3}$ auf gleichem Niveau und unterliegen nur leichten Schwankungen. PM_{10} und Gesamtstaub folgen einem gleichen Kurvenverlauf mit jeweils unterschiedlichen Massenkonzentrationen.

Vergleicht man Abbildung 60 mit Abbildung 61 wird deutlich, dass die Arbeitsplatzkonzentrationen, die mit dem Aerosolspektrometer I ermittelt wurden, geringeren Schwankungen unterliegen als die Partikelmassenkonzentrationen, die über der 4. Etage im Bereich der Abluftkamine mit dem Aerosolspektrometer II festgestellt worden sind.

Der Vergleich der Partikelmassenkonzentrationen im Bereich der Abluftkamine und des Arbeitsplatzes wird in dieser Arbeit gravimetrisch durchgeführt. Dafür wurden für die Messperioden 1 und 2 die Filtermassen der Aerosolspektrometer I und II ausgewogen und anschließend der Quotient aus Filtermasse und Probenluftvolumen gebildet. Die Ergebnisse sind als Partikelmassenkonzentration [$mg\ m^{-3}$] in Abbildung 62 dargestellt.

Während des gesamten Messzeitraumes lagen die Partikelmassenkonzentrationen im Arbeitsplatzbereich mit 0,5 - 0,99 $mg\ m^{-3}$ kontinuierlich unterhalb der gemessenen Massenkonzentrationen, die mit dem Aerosolspektrometer II im Bereich der Abluftkamine ermittelt wurden. Diese unterliegen einer Streuung zwischen 0,96 - 1,48 $mg\ m^{-3}$. Die Massenkonzentrationen am Arbeitsplatz sind im Mittel um den Faktor 1,53 geringer als im Bereich der Abluftkamine. Weiterhin ist zu erkennen, dass während der Messperiode 2 vom Aerosolspektrometer II höhere Massenkonzentrationen gemessen wurden als in Messperiode 1. Für den Arbeitsplatzbereich konnten in der Messperiode 2 geringere Partikelmassenkonzentrationen festgestellt werden als in Messperiode 1.

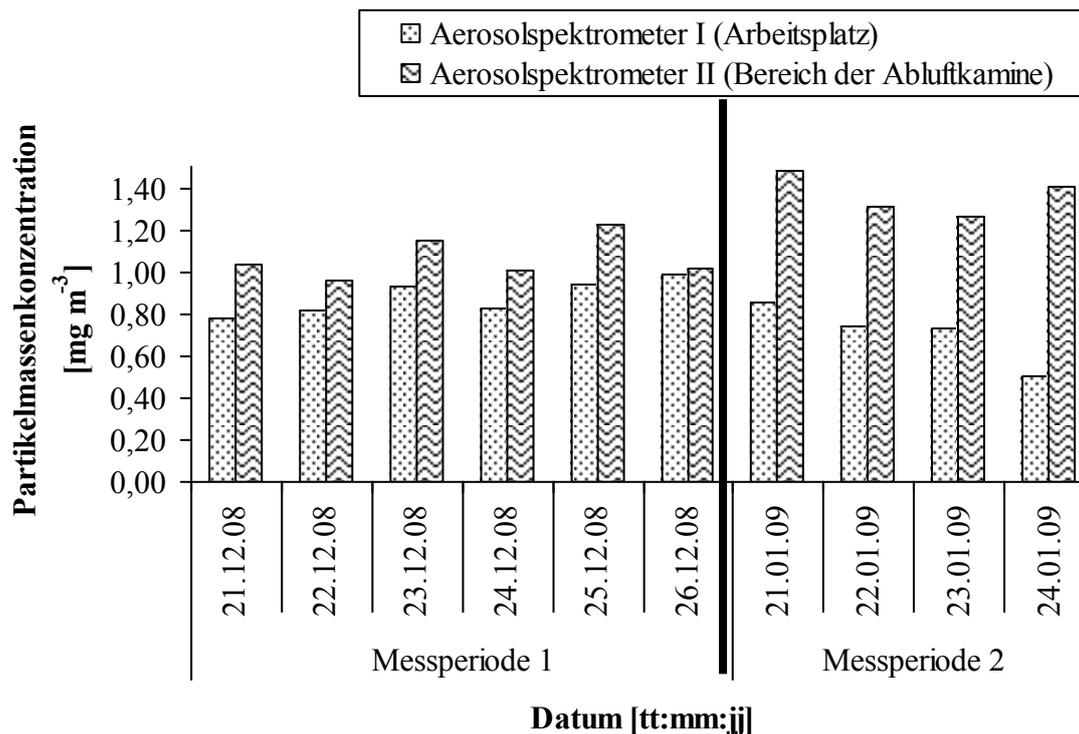


Abbildung 62: Vergleich der gravimetrisch bestimmten Partikelmassenkonzentrationen am Arbeitsplatz und im Bereich der Abluftkamine für die Messperioden 1 und 2

Die Auswertung der Partikelmassenfraktionen für PM_{2,5}, PM₁₀ und Gesamtstaub in einem 48-Stunden-Verlauf soll eine Identifizierung von typischen, sich tageszeitlich wiederholenden Hochplateaus ermöglichen. In Abbildung 63 ist ein solcher zweitägiger Tagesverlauf graphisch für den Zeitraum vom 22.01. bis zum 24.01.2009 abgebildet. Dieser wurde mit dem Aerosolspektrometer II im Bereich der Abluftkamine in einem Messintervall von fünf Minuten ermittelt. Die Staubfraktionen folgen dem bereits in Abbildung 60 und Abbildung 61 beschriebenen Verläufen. In der Abbildung sind drei länger anhaltende Hochplateaus zu erkennen. Diese befinden sich jeweils im Zeitraum zwischen 15:30 Uhr und 19:00 Uhr. Sie stehen vermutlich in unmittelbarem Zusammenhang mit dem täglichen Auslesen und Filterwechsel des Aerosolspektrometers. Während dieser Zeit waren die Legehennen in der näheren Umgebung besonders schreckhaft und setzten mit ihren Flügelschlägen vermehrt Staub frei. Des Weiteren zeigt sich, dass zu Beginn der Nachtphase gegen 19:00 Uhr die Staubkonzentrationen ihren niedrigsten Punkt erreichen. Diese halten ohne größere Schwankungen bis 03.00 Uhr an.

Mit einsetzender Beleuchtungsphase gegen 04:00 Uhr steigen die Staubkonzentrationen mit einsetzender Tieraktivität auf ein Niveau von etwa $1,0 \text{ mg m}^{-3}$ Gesamtstaub an.

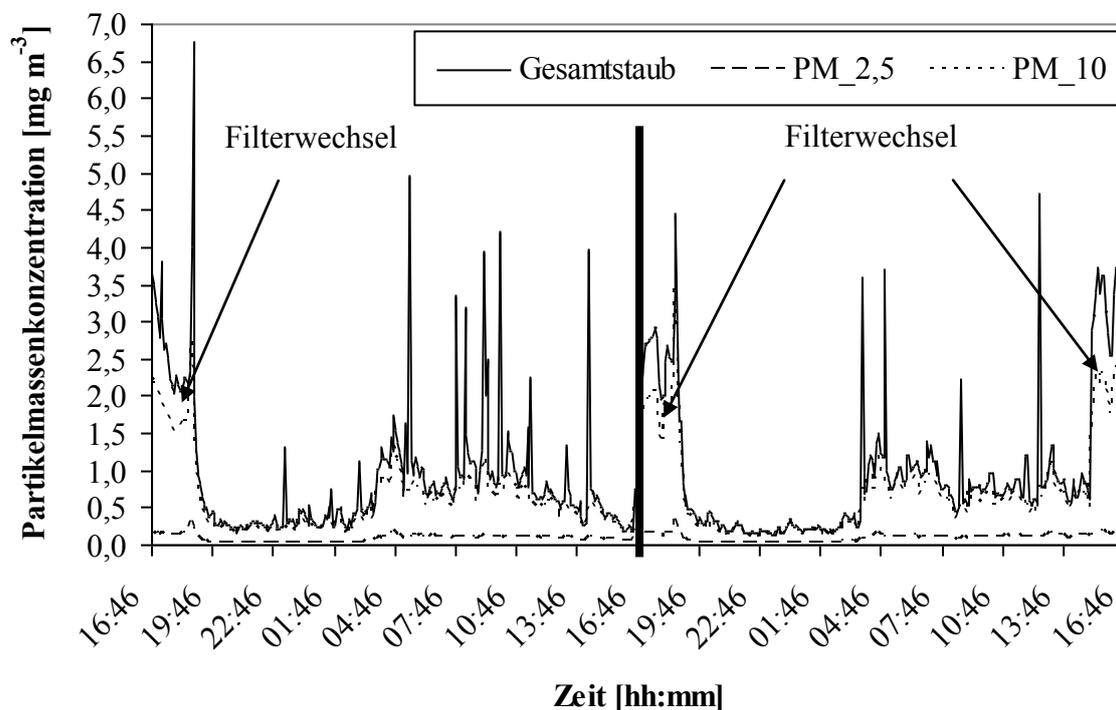


Abbildung 63: Gemessene Partikelmassenkonzentrationen im Bereich der Abluftkamine für die Partikelgrößenfraktionen $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und Gesamtstaub im 48-Stunden-Verlauf vom 22. bis 24.01.2009

Stall 2

Im Tagesverlauf weisen die Partikelmassenkonzentrationen hohe Schwankungen auf. In 1,2 m Höhe (Abbildung 64), „Kontrollgang“ genannt, beginnt die Partikelmassenkonzentration zu Beginn des Lichttages. Dieser beginnt um 3:00 Uhr, sehr stark anzusteigen und bleibt bis 8:30 Uhr nahezu konstant. Werden die Auslaufklappen zum Kaltscharraum geöffnet, steigt die Konzentration erneut. Das Tagesmaximum für $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ stellt sich nach dem Kontrollgang ein. Die Gesamtpartikelmassenkonzentration erreicht währenddessen einen Wert von über $12.000 \mu\text{g m}^{-3}$. Ab 12:00 Uhr beginnt die Konzentration rapide abzusinken und fällt bis etwa 19:00 Uhr, was mit dem Ende des Lichttages einhergeht. In der Dunkelphase sind kaum höhere Feinstaubkonzentrationen zu verzeichnen als $500 \mu\text{g m}^{-3}$.

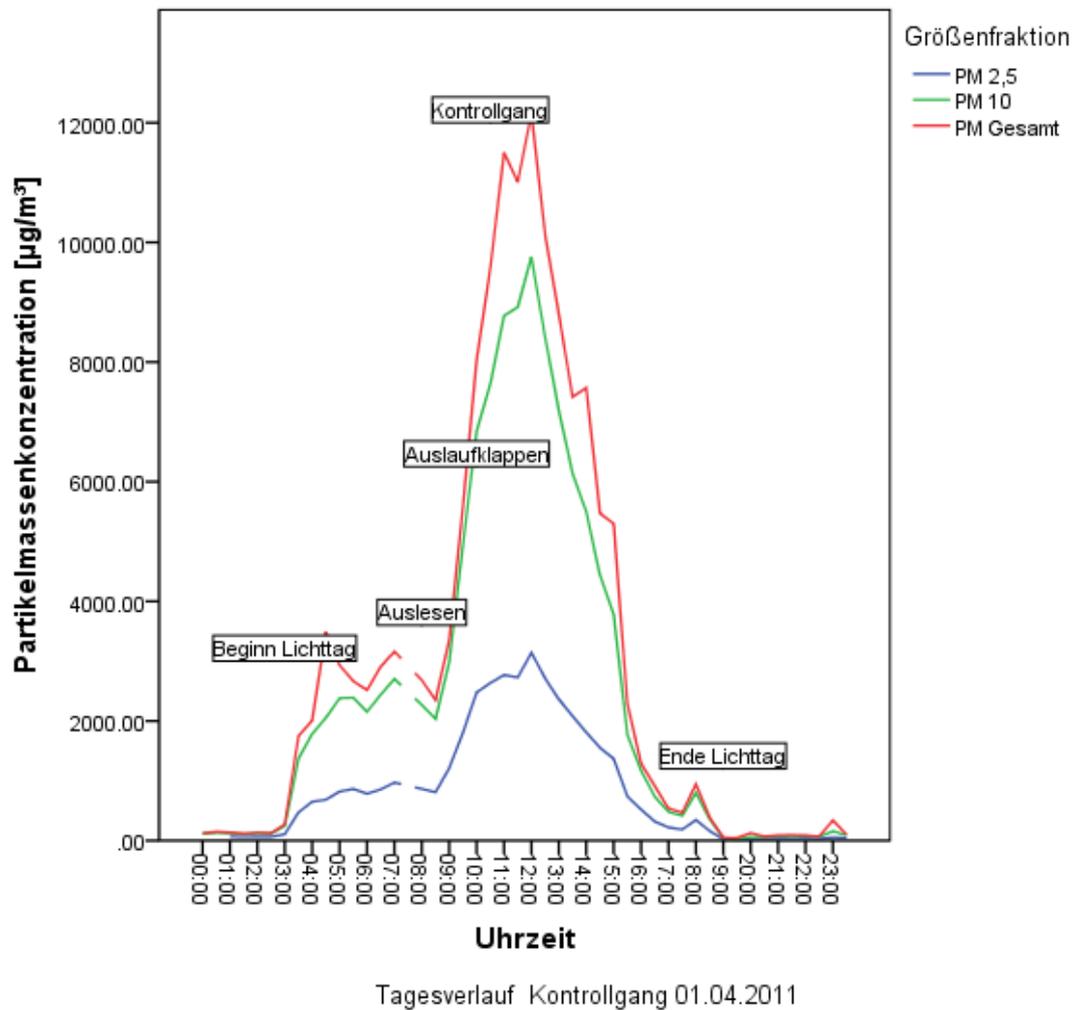


Abbildung 64: Partikelmassenkonzentration in $\mu\text{g m}^{-3}$ für $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ am 01.04.2011 in 1,20 m Höhe

Tabelle 31 zeigt Mittelwerte, sowie Standardabweichungen, Minima, Maxima für $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ über fünf Messtage im Kontrollgang. Die Werte übersteigen für $\text{PM}_{2,5}$ nur an einem Tag den Wert von $2.000 \mu\text{g m}^{-3}$ und liegen im Mittel zwischen $162,17$ und $927,01 \mu\text{g m}^{-3}$. Bei PM_{10} sind anhand der Standardabweichung noch größere Schwankungen erkennbar. Auffällig ist diese am 01.04.2011 mit einem Wert von $2.914,44 \mu\text{g m}^{-3}$. Konzentrationen von $10.000 \mu\text{g m}^{-3}$ werden nicht überschritten. Im Mittel liegt die Konzentration für PM_{10} über die fünf Messtage zwischen $711,45$ und $2.632,47 \mu\text{g m}^{-3}$. Für $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ sind dagegen Mittelwerte zwischen $988,36$ und $3.566,56 \mu\text{g m}^{-3}$ zu verzeichnen. Konzentrationen von $12.152,77 \mu\text{g m}^{-3}$ werden nicht überschritten. Wieder ist die Standardabweichung mit $3.633,99 \mu\text{g m}^{-3}$ am 01.04.2011 am höchsten.

Tabelle 31: Deskriptive Statistik für die Partikelmassenkonzentrationen im Kontrollgang in 1,20 m Höhe

		Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]			
		PM _{2,5}			
		Größenfraktion			
		Mittelwert	Standard- Abweichung	Minimum	Maximum
Datum	03.3.2011	161.17	103.63	72.30	315.80
	04.3.2011	243.31	318.68	14.26	1448.84
	05.3.2011	104.44	69.18	16.41	176.96
	31.3.2011	638.39	632.71	49.59	1985.48
	01.4.2011	880.74	955.37	14.45	3141.48
	02.4.2011	927.01	634.22	52.37	1964.64

		Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]			
		PM ₁₀			
		Größenfraktion			
		Mittelwert	Standard- Abweichung	Minimum	Maximum
Datum	03.3.2011	1524.57	1372.42	109.56	4618.49
	04.3.2011	1137.56	1184.54	57.66	5045.10
	05.3.2011	711.45	512.69	44.79	1400.42
	31.3.2011	1827.43	1756.73	91.31	5720.70
	01.4.2011	2432.05	2914.44	23.57	9760.80
	02.4.2011	2632.87	1876.26	109.59	6092.62

		Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]			
		PM _{Gesamt}			
		Größenfraktion			
		Mittelwert	Standard- Abweichung	Minimum	Maximum
Datum	03.3.2011	1986.04	1889.94	123.51	6486.75
	04.3.2011	1541.29	1609.26	68.92	6497.29
	05.3.2011	988.36	725.63	50.79	1935.93
	31.3.2011	2240.55	2102.21	97.51	7051.93
	01.4.2011	3007.13	3633.99	44.20	12152.77

		Partikelmassenkonzentration [$\mu\text{g m}^{-3}$]			
		PM _{Gesamt}			
		Größenfraktion			
		Mittelwert	Standard- Abweichung	Minimum	Maximum
Datum	03.3.2011	1986.04	1889.94	123.51	6486.75
	04.3.2011	1541.29	1609.26	68.92	6497.29
	05.3.2011	988.36	725.63	50.79	1935.93
	31.3.2011	2240.55	2102.21	97.51	7051.93
	01.4.2011	3007.13	3633.99	44.20	12152.77
	02.4.2011	3566.56	2522.92	131.15	8671.17

Im Kaltscharraum werden im Gegensatz zum Kontrollgang des Volierenstalls für PM_{Gesamt} nicht einmal Werte von $10.000 \mu\text{g m}^{-3}$ erreicht. Das Tagesmaximum stellt sich jedoch ebenfalls um die Mittagszeit im Zusammenhang mit dem Kontrollgang ein. Bemerkenswert ist, dass die feinen Partikel, also PM_{2,5} nicht einmal Konzentrationen von $1.000 \mu\text{g m}^{-3}$ erreichen. Ein sehr starker Anstieg der Partikelmassenkonzentration ist beim Öffnen der Auslaufklappen zu verzeichnen. Werden diese geschlossen, sinkt die Konzentration im leeren Kaltscharraum auch ebenso schnell wieder.

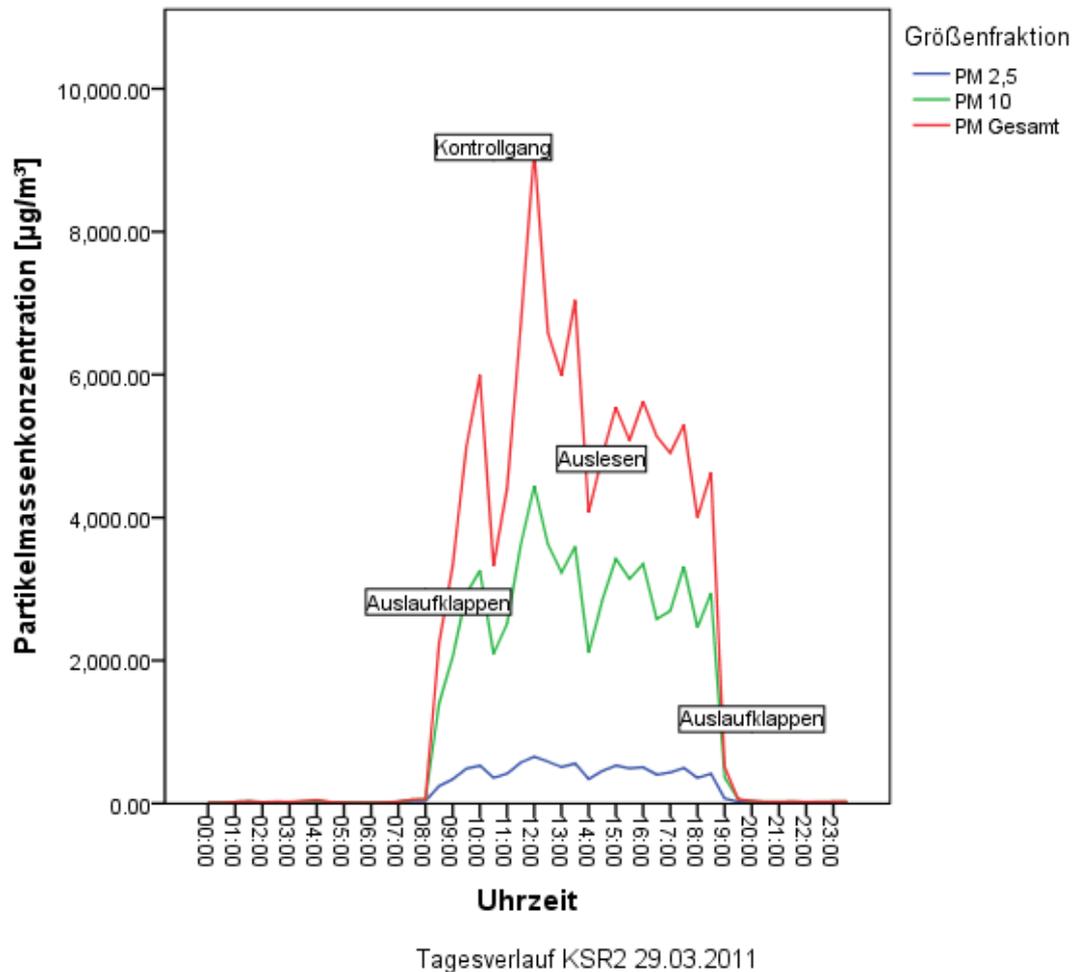


Abbildung 65: Partikelmassenkonzentration in $\mu\text{g m}^{-3}$ für $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ am 29.03.2011 im Kaltscharraum

Mit dem Mann-Whitney-U-Test wurden die beiden Messpositionen in der Voliere, genannt Tierbereich und Kontrollgang, auf Unterschiede in der Verteilung der Partikelmassenkonzentrationen jeweils für $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ überprüft. Abbildung 66 gibt diese mit Hilfe von Boxplots wieder. Deutlich wird, dass die 25-, 50- und 75%-Quartile für beide Messpositionen in ähnlichen Bereichen liegen. Der durchgeführte Test hat ergeben, dass die Nullhypothese, die die Verteilung der Partikelmassenkonzentrationen für $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ angibt, über beide Messpositionen bei einem Signifikanzniveau von 0,05 gleich ist.

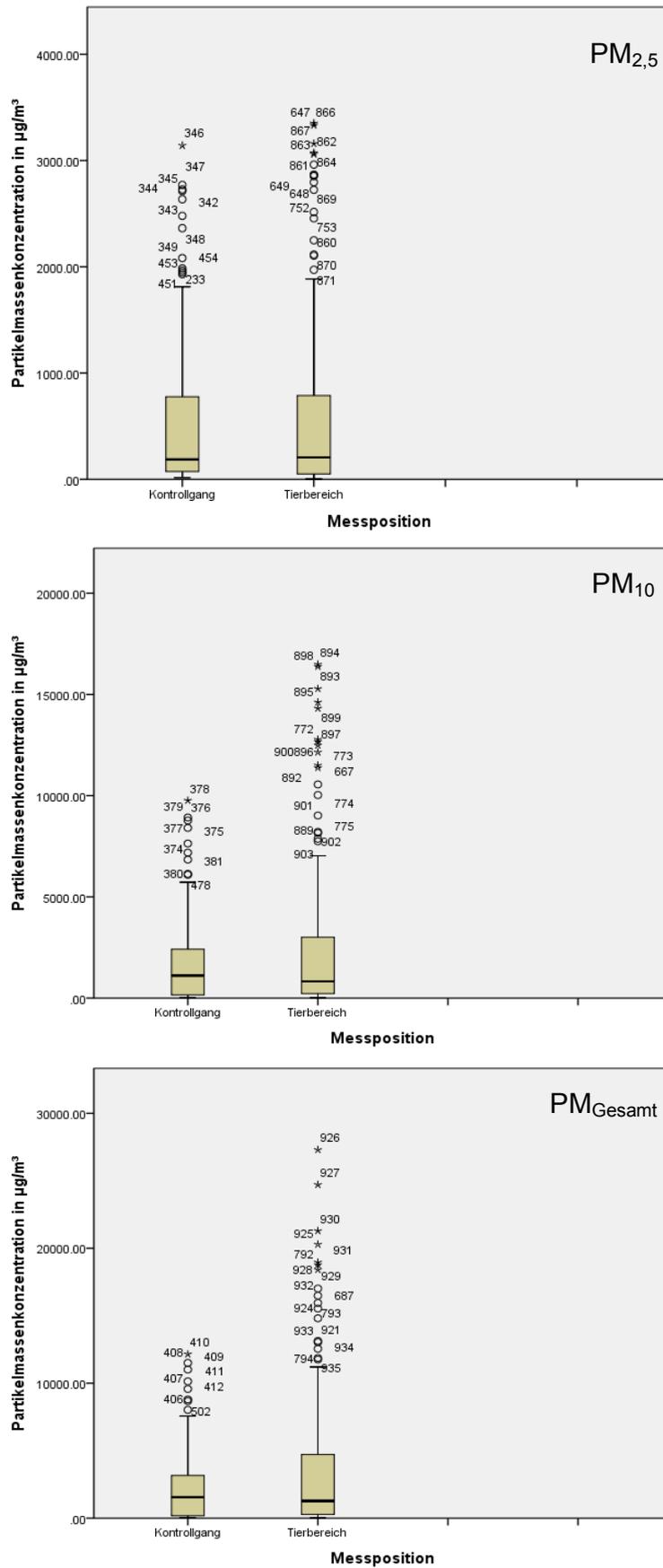


Abbildung 66: Verteilung der Partikelmassenkonzentration für PM_{2,5}, PM₁₀ und PM_{Gesamt}

4.4 Minderungsmaßnahmen

4.4.1 Haltungssystem Schwein

Im Vorfeld der Untersuchungen von HÖLSCHER (2006) wurde eine Analyse der technischen Möglichkeiten zur Nachrüstung von emissionsmindernden Maßnahmen in Schweineställen durchgeführt, deren Ergebnis hier kurz dargestellt werden soll (Abbildung 67).

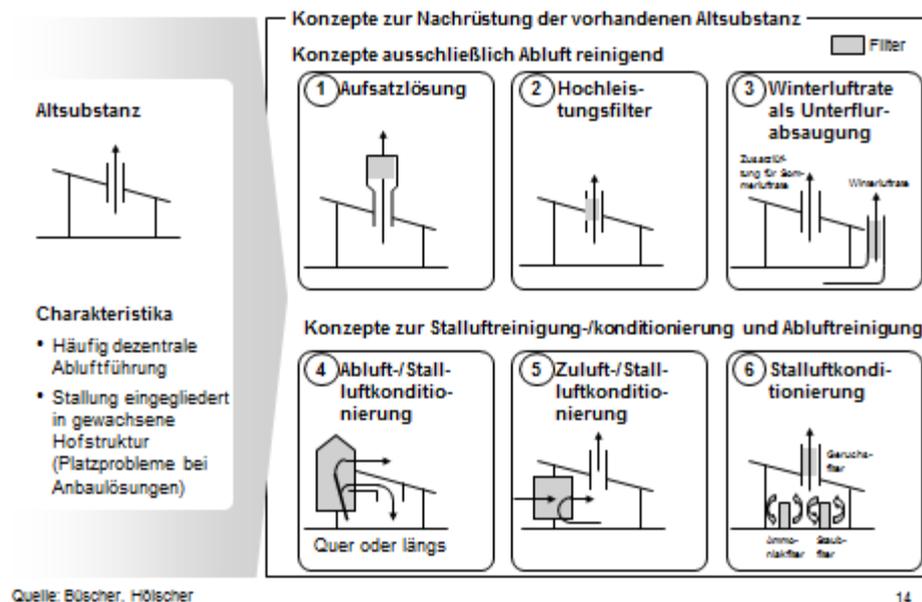


Abbildung 67: Übersicht der technischen Möglichkeiten zur Nachrüstung von emissionsmindernden Maßnahmen in Schweineställen (nach HÖLSCHER (2006))

Ausgehend von dieser Analyse lassen sich die Maßnahmen in „indoor-„ und „end of the pipe- Technologien“ einteilen. Bei den indoor-Maßnahmen wurden Versuche in Schweineställen mit einem Umluftfilter und mit der Vernebelung von Öl durchgeführt. Das Funktionsprinzip der Minderungstechnik und die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Abbildung 68 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in der Schweinemast beide Maßnahmen sehr wohl in der Lage waren, die Raumluftbelastung mit Stäuben erheblich zu senken. Auch die abluftseitige Emissionsminderung (zumindest bei Stäuben) ist bei beiden Techniken beträchtlich. Somit bestehen durchaus Möglichkeiten, auch im Innenraum die Belastungen mit hohen Staubkonzentrationen zu mindern. Ob diese

Ergebnisse auch auf die Ferkelaufzucht übertragbar sind, wird derzeit noch im Rahmen einer Masterarbeit überprüft.

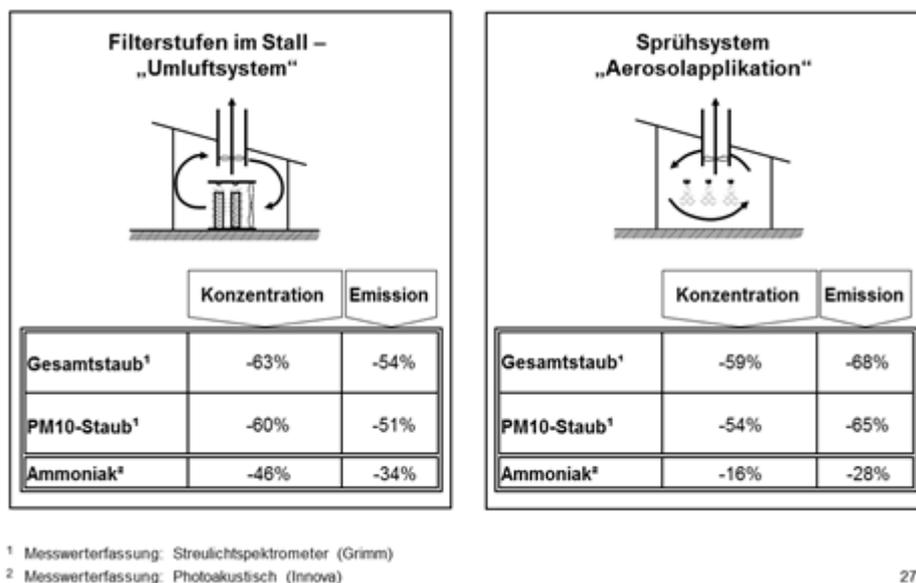


Abbildung 68: Funktionsprinzip der Minderungsmaßnahmen „Umluftfilterung“ und „Öl-Sprüh-Technik“ sowie deren Minderungseffekt auf Staub und Ammoniak in der Stall- und Abluft (HÖLSCHER, 2006)

4.4.2 Haltungssystem Geflügel

Zahlreiche Untersuchungen zur Minderungswirkung von indoor-Maßnahmen in der Geflügelhaltung haben dänischen Wissenschaftler in den 80er- und 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt. Dabei wurden nicht nur technische Maßnahmen berücksichtigt, es wurden auch Verfahrensumstellungen, wie der Wechsel der Einstreu oder der Wechsel der Zuluftführung betrachtet (siehe Abbildung 69).

In einer Überblickspublikation berichtet PEDERSEN (2004) über die Wirksamkeit der verschiedenen Maßnahmen im Bezug auf die zu erwartende Minderungswirkung und deren Bandbreite.

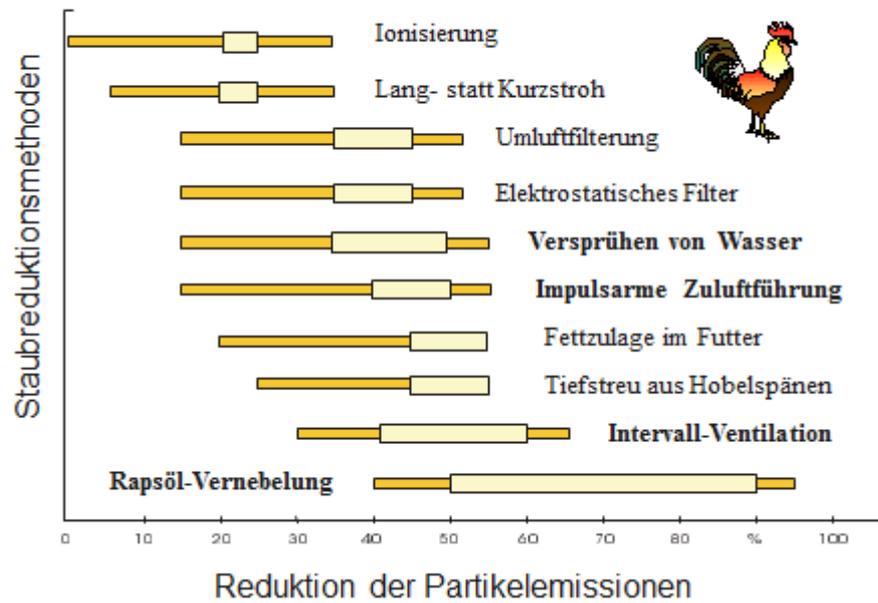


Abbildung 69: Übersicht über die Untersuchungsergebnisse der Dänischen Arbeitsgruppe zur Minderung der Staubemissionen durch Indoor-Maßnahmen nach PEDERSEN (2004)

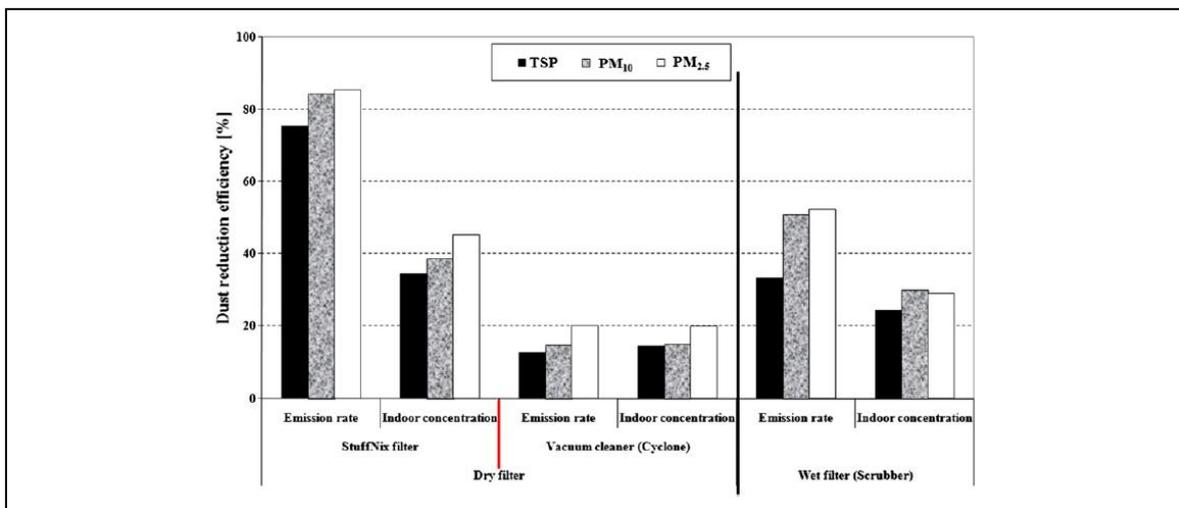


Abbildung 70: Wirksamkeit der trockenen und nassen Umluft-Filterung auf die verschiedenen Staubkonzentrationen im Innenraum in einem Legehennenstall (Gesamtstaub, PM₁₀ und PM_{2,5}) (MOSTAFA, 2011)

In den Untersuchungen von MOSTAFA (2011) hatte das Industrie-Trockenfilter (STUFNIX der Firma Big Dutchman) die größte Wirksamkeit gegenüber einer konventionellen Staubsaugertechnik und einem Nass-Umluftfilter.

Vergleicht man die Indoor-Maßnahmen mit der Abluftreinigung wird deutlich, dass die Minderungswirkung bei ein- oder mehrstufigen Abluftreinigungsanlagen wesentlich größer ist. So erreichte SCHIER (2004) bei seinen Messungen bei Gesamtstaub einen Wirkungsgrad von 96 % und bei PM_{10} einen von 92 %. Natürlich ist dabei systembedingt keine Wirkung auf die Innenraum-Luftqualität verbunden. Setzt man die Abluftreinigung als Referenzverfahren, muss klar sein, dass man nur von einer Umweltwirkung im Sinne einer Emissionsminderung sprechen kann. Wirkungen auf die Raumluft für die Tiere und die im Stall arbeitenden Menschen sind mit der Abluftreinigung nicht verbunden.

5 Diskussion und Handlungsempfehlung

5.1 Auswahl der untersuchten Stallsysteme

Die Auswahl der untersuchten Ställe wurde unter mehreren Gesichtspunkten durchgeführt. Alle untersuchten Haltungssysteme sind in der KTBL-Schrift 446 (KTBL, 2006) beschrieben und werden praxisüblich betrieben.

Bei der Betrachtung verschiedener Schweinehaltungssysteme wurden Stallungen mit einer Besatzstärke von 10 bis 229 Tieren untersucht. Die Haltungssysteme verfügten über unterschiedliche Lüftungs- und Fütterungssysteme, sodass Einwirkungen unterschiedlicher Haltungsverfahren verglichen werden konnten.

Für die Untersuchungen im Milchviehbereich wurden gezielt Stallungen ausgewählt, die mit unterschiedlichen Lüftungsverfahren arbeiten. In Haltungssystemen, die nach dem Prinzip der freien Lüftung funktionieren, besteht die Herausforderung der Partikelbestimmung in den variierenden Luftwechselraten, die großen Einfluss auf die Verteilung haben.

Als Beispiel für die Charakterisierung der Partikelemissionen und physikalischen Feinstaub-Kennwerte in der Kleingruppenhaltung von Legehennen in Geflügelstall 1 steht die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf praxisübliche Legehennenbetriebe im Vordergrund.

Der untersuchte Praxisbetrieb wird zwangsbelüftet und zeichnet sich besonders dadurch aus, dass er mit dem Aufstallungssystem Eurovent EV 625A-EU für die Haltung von Legehennen in Kleingruppen ausgestattet ist. Weitere Vorteile dieser Stallanlage sind die für diese Art der Legehennenhaltung typische Stalldimension und die Legehennenbesatzdichte. Das Produktionsmanagement (Lüftung, Fütterung, Tierkontrolle, Beschickung des Scharrbereichs, Lichtprogramm, Entmistung, etc.) entspricht der guten fachlichen Praxis. Ergebnisse dieser Untersuchung sind somit auf andere Geflügelbetriebe mit Kleingruppenhaltung übertragbar.

5.2 Bewertung der eingesetzten Messmethodik

5.2.1 Staubsammeltechnik

Bei den Versuchsdurchführungen zur Ermittlung der Staubbelastung in den Schweinestallungen wurden die Aerosolspektrometer mit Gitterkäfigen vor Beschädigungen geschützt. Eine Installation der Messgeräte im unmittelbaren Tierbereich konnte daher nicht gewährleistet werden. Die Aerosolspektrometer im Kontrollbereich

wurden in Kopfhöhe des Menschen angebracht. Die gemessenen Partikelmassenkonzentrationen sind somit repräsentativ für die Arbeitsplatzbedingungen. Es sollte beachtet werden, dass die Messungen in den Schweinestallungen 1 bis 3 nur während der Sommerzeit durchgeführt wurden. Durch die hohen Luftgeschwindigkeiten liegen die Staubkonzentrationen zu dieser Zeit erfahrungsgemäß unterhalb der Konzentrationen im Winter. Damit die höhere Staubkonzentration im Winter quantifiziert werden kann, sollten vergleichbare Untersuchungen zusätzlich im Winter gemacht werden (STERNBERG, 2011).

In den Messungen der Milchviehstallungen 1 bis 3 wurde die modifizierte Horizontalsichte aus der Erfahrung vorheriger Studien mit einer Heizfolie ausgestattet. Während der Sammlung des Rinderstallstaubes traten somit keine Verklumpungen der Partikel oder Kondenswasserbildung in der Sammeltechnik auf. Ein Problem stellt bei dieser Methode der Sammlung die benötigte Zeit dar. Während in Geflügel- und Schweineställen eine relativ große Menge an Staub in geringer Zeit gewonnen werden kann, fällt die Sammelperiode in einem Milchviehstall sehr viel länger aus. Die Horizontalsichte wurde für einen Zeitraum von etwa zwei Monaten im Stall installiert. In Ställen von anderen Nutztieren wäre die Menge mindestens drei- bis viermal so hoch ausgefallen. Mit dem sogenannten Standard-PM_{2,5}-Partikelsammler (z. B. Ruprecht & Pataschnik, Partisol Plus 2025) ist es laut ZIMMERMANN (2002) bei 1 m³ h⁻¹ Probenahmefluss pro Probenahmetag möglich, etwa 0,5 bis 1 mg Partikelmasse aus dem ambienten Aerosol zu gewinnen. Da für die Auswertung der Probe eine relativ große Menge an Staub gewonnen werden muss, wäre der Zeitaufwand auch bei diesem Gerät relativ hoch.

Die angewandte Sammeltechnik ist durch ihre Größe und vor allem durch ihr Gewicht sehr schwer zu handhaben. Außerdem sollte die Horizontalsichte in ausreichender Höhe platziert werden, damit eine Beschädigung durch die Tiere ausgeschlossen werden kann. (FEUSER, 2011).

Die eingesetzten Aerosolspektrometer für die Langzeitmessung in Geflügelstall 2 mit Volierenhaltung waren nur bedingt geeignet. Trotz eines täglichen Auswechslens der Filter traten Probleme durch Verstopfungen auf. Ein tägliches Auslesen der Geräte war somit unerlässlich. Dadurch entstand ein hoher Zeitaufwand, besonders für das Messgerät, das in der vierten Ebene der Voliere in 2,50 m Höhe angebracht war. Aufwendig war außerdem die Stromversorgung, da für die Langzeitmessung keine geeigneten Akkus zur Verfügung

standen. Die Rastermessung, die mit den identischen Geräten durchgeführt wurde, und eine Ammoniakkonzentrationsmessung mit Dräger CMS verlief unproblematisch (JAEGER, 2011).

5.2.2 Partikelmesstechnik

Für die Messungen wurden zwei Messtechniken zur Erfassung der Partikelkonzentrationen (Gravimetriesammler, Aerosolspektrometer) eingesetzt, die sich durch unterschiedliche Vor- und Nachteile auszeichneten.

Der Gravimetriesammler ist eine einfache und sichere Methode zur Bestimmung von Partikelmassenkonzentrationen. Eine kontinuierliche Erfassung von Tagesverläufen oder Partikelanzahlkonzentrationen ist nicht möglich. Dieses standardisierte Verfahren zeichnet sich durch die Gewinnung von wiederholbaren Ergebnissen aus. Die mit dem Gravimetriesammler ermittelten Partikelmassen unterliegen innerhalb der Messperioden nur sehr geringen Schwankungen (vgl. Abbildung 58). Die Installation des großen und relativ schweren Gravimetriesammlers ist allerdings aufwendig. Die Anlage ist für die Probennahme möglichst dezentral, evtl. in einem Nebenraum der Stallanlage zu platzieren. Dadurch können Geräuschbelastungen im Tierbereich vermieden werden. Die Verlegung des Ansaugschlauchs bis an den Ort der Probennahme ist zeitaufwendig und eine ordnungsgemäße Installation des Schlauchs ist nur bei langen Messperioden sinnvoll. Für Kurzzeitmessungen sind andere Methoden dem Gravimetriesammler vorzuziehen.

Die Einstellung des Probenluftvolumenstroms ist einfach und die Nachjustierung kann vom Stallpersonal durchgeführt werden. Sie wird erforderlich, weil die gesammelten Staubpartikel im radialsymmetrischen Sammelkopf den Strömungswiderstand erhöhen und der für diese Probennahme erforderliche konstante Probenluftvolumenstrom von $2,7 - 2,8 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ regelmäßig manuell nachgeregelt werden muss (VDI 2463) (RÖSMANN, 2009).

Die eingesetzten Aerosolspektrometer der Firma GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG zur Bestimmung der Partikelanzahl- und Partikelmassenkonzentrationen zeichnen sich vor allem durch ihre einfache Handhabung aus. Die kompakte Größe ermöglichte eine einfache Messung während der Homogenitätsuntersuchungen.

Ein großer Vorteil dieser Messtechnik besteht in der kontinuierlichen Messung mit der sich daraus ergebenden Möglichkeit, Konzentrationsverläufe zu erfassen und verschiedene Partikelgrößenklassen zeitgleich zu quantifizieren. Das Aerosolspektrometer zeigt durch

den möglichen Akkubetrieb und die kompakte Bauweise eine hohe Flexibilität und ist für Kurzzeitmessungen sehr geeignet. Positiv ist ebenfalls, dass die Geräte so konzipiert sind, dass sie sich bei Stromausfall einer erneuten Prüfung unterziehen und nach einiger Zeit neu starten.

Während der Langzeitmessungen in den Milchviehstallungen traten allerdings teilweise Probleme während des Akku-Betriebes auf. Aufgrund zu geringer Akkuleistung wurden die Messungen zeitweise vor dem Ablauf der 24-Stunden-Aufzeichnung unterbrochen. Während des Netzbetriebes waren keine Ausfälle zu verzeichnen. Das Verlegen und Fixieren der Stromleitungen bedarf allerdings eines gewissen Zeitaufwandes (FEUSER, 2011).

Die interne Speicherkarte ermöglichte die Aufzeichnung von fünf Minuten Messwerten in fünfzehn Partikelgrößenfraktionen zwischen 0,3 und $> 20 \mu\text{m}$ während der Messungen. Ein zwischenzeitiges Auslesen der Speicherkarte war nicht erforderlich.

Die gravimetrische Bestimmung der Partikelmassenkonzentrationen ist mit diesem Gerät nicht möglich, da es die Partikelmassen unter Verwendung einer auf Kalibrierstaub (Microdolomit DR 80) basierenden Standarddichte für alle Partikelgrößenfraktionen berechnet. Diese interne Partikelmassenberechnung führt zu erheblichen Fehlern (vgl. Abbildung 58).

Ein zentrales Ergebnis der Untersuchungen ist die Ermittlung tierartspezifischer Partikeldichten der Partikelgrößenklassen (vgl. Abbildung 58). Die Verwendung dieser tierartspezifischen Partikeldichten für die interne Partikelmassenberechnung des Aerosolspektrometers könnte zukünftig die aufwendige Bestimmung des Gravimetriefaktors erübrigen.

Ein mit ausreichender Genauigkeit bestimmter Gravimetriefaktor kann nur durch mehrere 24-Stunden-Messungen ermittelt werden (vgl. Tabelle 30). Nur so kann eine ausreichende Menge Staub auf dem Filter gesammelt und ausgewogen werden. Der ermittelte Gravimetriefaktor ermöglicht eine Aussage über die tatsächlichen Partikelmassenkonzentrationen. Eine Aussage über die Partikelmassen in den einzelnen Partikelgrößenklassen ist jedoch bei der Verwendung eines Gravimetriefaktors für alle Partikelgrößenklassen aufgrund der unterschiedlichen Dichten zu ungenau. Für

Massenkonzentrationsverläufe muss die Partikelmasse für jede Partikelgrößenklasse auf Basis der entsprechenden Partikeldichten berechnet werden.

Das Aerosolspektrometer detektiert die Partikel aufgrund ihrer optischen Eigenschaften und teilt sie in entsprechende Größenfraktionen ein. Dieses hochsensible Messverfahren reagiert bei kleinen Verschmutzungen der Probenluftsonde oder des Messkanals mit extrem schwankenden Messwerten.

So kam es bei den Messperioden 1 und 2 in Geflügelstall 1 vor, dass große Partikel wie z. B. Federbruchstücke die Probenluftsonde zum Teil verstopften und vom Aerosolspektrometer keine oder viel weniger Partikel vor allem in den großen Partikelklassen detektiert wurden. Aus diesem Grund sind die gewonnenen Daten vor der Auswertung immer einer Plausibilitätskontrolle zu unterziehen und gegebenenfalls zu verwerfen (RÖSMANN, 2009).

5.2.3 Bewertung der ausgewählten Messpunkte

Bei der Wahl der Messpunkte war für die zu ermittelnden Parameter der Luftqualität das Ziel, die Ergebnisse der stichprobenartigen Messungen auf das gesamte Stallgebäude übertragen zu können. Dabei sollten typische Arbeitsplatz- und Abluftkonzentrationen sowie die Schadgaskonzentrationen im Tierbereich ermittelt werden.

Als Messort wurde deshalb die Stallmitte festgelegt, da in diesem Bereich die geringsten Verdünnungseffekte durch die Lüftungsschächte an den beiden Längsseiten des Stallgebäudes zu erwarten waren. Als einen weiteren Vorteil bei der Wahl dieses Messortes erwies sich z. B. im Geflügelstall 1, dass die Abluftventilatoren entlang des Dachfirstes installiert sind und das der Aerosolspektrometer II und der Gravimetriesammler somit im Bereich der Abluft installiert werden konnten. Das Aerosolspektrometer I wurde im typischen Aufenthaltsbereich des Stallpersonales in der Kontrollgangmitte in einer Höhe von 1,50 m aufgestellt.

Trotz der sorgfältig ausgewählten Messpunkte gilt es zu beachten, dass die ermittelten Partikelkonzentrationen innerhalb des Stallgebäudes erheblich abweichen können. Es kann vermutet werden, dass zum einen die Luftqualitäten in den jeweils ersten Kleingruppenreihen entlang der Lüftungsschächte aufgrund der Verdünnungseffekte der Frischluft besser sind als bei den weiter zur Stallmitte liegenden Kleingruppen. Zum anderen kann es durch die gruppenweise Steuerung der Abluftkamine zu unterschiedlichen

Luftqualitäten innerhalb des Stallgebäudes hinsichtlich Schadgas- und Partikelkonzentrationen kommen.

5.2.4 Bewertung der Kameraaufzeichnungen

Vor Beginn der Langzeitmessungen wurden in jedem Betrieb Kameras installiert, die alle Bereiche der Stallgebäude abdeckten. Nach Erstellung einer Grafik für jeden Tagesgang wurden die Kameraaufzeichnungen zur Auswertung der Peaks benötigt. Die Installation der Kameras gestaltete sich zuweilen etwas schwierig. In den Milchviehstallungen mussten wegen der Deckenhöhen dementsprechend lange Leitungen für die Stromversorgung verlegt werden. Die Witterungsverhältnisse bei den freigelüfteten Milchviehstallungen ergaben im Winter gelegentliche Störungen bei der Aufzeichnung. Positiv zu vermerken ist, dass die Aufnahmesoftware nach einer Störung automatisch einen Neustart durchführt.

Schwierigkeiten traten während der Untersuchungen in den Schweinestallungen auf. Aufgrund der nächtlichen Abdunkelung, um den Biorhythmus der Tiere nicht durcheinander zu bringen, konnten die Videoaufzeichnungen nicht vollständig ausgewertet werden. Für weitere Untersuchungen sollten leistungsstarke Infrarotkameras eingesetzt werden, die eine lückenlose Aufzeichnung gewährleisten.

5.3 Bewertung der Messergebnisse

5.3.1 Chemische Analyse

Die Ergebnisse der Weender-Analyse in den Schweinestallungen können mit denen aus der Literatur (HARTUNG & SALEH, 2007) verglichen werden. Der Trockenmassegehalt ist im Tieflaufstall mit ca. 5 % höher. Die Werte für Rohprotein und Rohfaser sind fast identisch. Jedoch sind Unterschiede bei der Rohasche und den Stickstofffreien-Extraktstoffen zu erkennen, die wahrscheinlich auf den höheren Strohanteil im eingestreuten System zurückzuführen sind. Der Proteingehalt ist im Tierstallstaub generell erhöht und rangiert im Schweinestallstaub bei ca. 24 % (AENGST, 1984), im Pferdestallstaub (ZEITLER, 1988) bei ca. 26 %, im Hühnerstallstaub bei etwa 50 % (HARTUNG, 1983) und im Rinderstallstaub bei ca. 30 % (HARTUNG & SALEH, 2007).

Auf Basis der Ergebnisse der Weender-Analyse kann der Staub aus Schweinestall 5 mit anderen Untersuchungen in der Literatur (Tabelle 3) verglichen werden. Typische

Alleinfuttermittel, die in der Schweinemast zu Beginn der Phasenfütterung eingesetzt werden, weisen in der Regel einen Rohproteingehalt von 17 % auf. Dieser kann schrittweise auf 13 % gesenkt werden. Mit 29 % liegt der Rohproteingehalt der Staubprobe deutlich über dem der Futterrationsration. Dies lässt darauf schließen, dass ein beachtlicher Teil des sedimentierten Staubes in Form von Hautschuppen und Haaren auf die Tiere selbst zurückzuführen ist. Der Wassergehalt von 13 % bewegt sich im Größenrahmen der Ergebnisse in Tabelle 3. Der Gehalt der Rohasche, zu der neben den Mengenelementen weitere anorganische Substanzen zählen, liegt rund 4 % unter den übrigen Werten. Ob dies auf einen vergleichsweise geringen Abrieb an Boden und Wänden oder auf geringe Rohaschegehalte in der Futterrationsration zurückzuführen ist, bleibt ungeklärt. Die Menge an Rohfett in der Probe fällt verhältnismäßig hoch aus, wozu sich jedoch keine plausible Erklärung finden lässt. Bei der Aufschlüsselung einiger Mengenelemente im Stallstaub liegt Kalium dicht gefolgt von Kalzium mit $19,2 \text{ g kg}^{-1} \text{ TM}$ vorn. Eine zusätzliche Analyse von Futter- und Kotproben könnte weitergehenden Aufschluss über die Herkunft des Staubes im Stallinnenraum liefern und Auskunft darüber geben, an welcher Stelle Minderungsmaßnahmen am besten greifen könnten (NIEHAUS, 2011).

In HOPPENHEIDT (2002) wird beschrieben, dass die Auswahl des Abscheideverfahrens und des anschließend eingesetzten Nachweisverfahrens einen entscheidenden Einfluss auf das Resultat der Untersuchung hat. Mit jeder Kombination würden unterschiedlich große Anteile der in der Luftprobe vorhandenen biogenen Bestandteile erfasst. In HOPPENHEIDT & MÜCKE (1998) wird der Einfluss der verschiedenen Bestimmungsverfahren auf das Analyseergebnis bei der Untersuchung von Bioaerosolkomponenten ebenfalls als sehr groß eingestuft. Weiter wird beschrieben, dass bei der Verwendung standardisierter Bestimmungsverfahren eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben ist.

Einen Vergleich der eigenen Ergebnisse liefert unter anderem eine Studie von SALEH (2006), wo neben dem Staub in Geflügelstallungen auch Staub in Milchviehbetrieben untersucht wurde. Hier ergab die Einteilung der Staubprobe in ihre unterschiedlichen Bestandteile einen Trockenmasse-Gehalt von 85,8 %, einen Rohasche-Gehalt von 18,8 % und einen Rohprotein-Gehalt von 29,7 %. Sowohl der Rohfett- als auch der Rohfaser-Gehalt betragen hier 6,6 %. Die Anteile an Trockenmasse und Rohasche fielen in den eigenen Untersuchungen wesentlich höher aus. Neben Wand- und Bodenabrieb kann laut SALEH (2006) das Futter ausschlaggebend für den erhöhten Anteil an Rohasche sein.

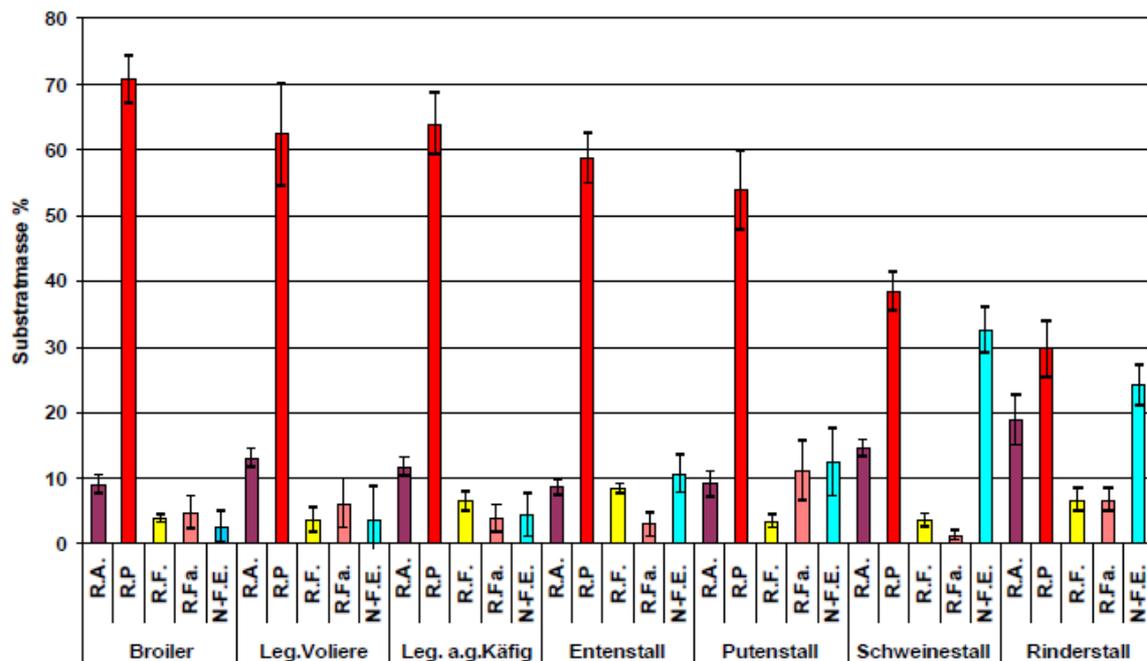


Abbildung 71: Arithmetischer Mittelwert und Standardabweichung der Substratmasse (%) der Staubinhaltsstoffe in verschiedenen Tierställen Saleh (2006)

In einer Studie von HENSELER-PABMANN (2010) zeigt einen Trockenmassegehalt von 90,2 %. Der Rohasche-Gehalt beträgt 36 %, der Rohprotein-Gehalt 38 %. Die Anteile an Rohfaser und NfE liegen unter diesen Werten. In Abbildung 71 sind vor allem die Unterschiede der Gehalte an Rohprotein und Rohasche in verschiedenen Nutztierställen zu erkennen. Die Werte in Rinderställen schwanken von Studie zu Studie. Bei den Staubanalysen spielt vor allem die Einstreu eine entscheidende Rolle, was die auf die Staubanalyse folgende Analyse der Einstreumaterialien bestätigte (FEUSER, 2011).

Die Ergebnisse der Weender-Analyse im Geflügelstall sind aufgrund des sehr hohen Rohproteingehalts, der mit über 83 % der Trockenmasse zu Buche schlägt, beachtlich. In der Literatur wurde ein Gesamtproteingehalt in Hühnerstallstaub von 50 % angegeben (HARTUNG, 1983). Der Rohproteingehalt durch das Kjeldahl-Verfahren ist immer als ein theoretischer Wert zu betrachten. Da auch andere stickstoffhaltige Substanzen enthalten sind, wird bei einem Rohproteingehalt von 79 % von Staub aus einem Putenstall davon ausgegangen, dass dieser durch hohe Harnsäureanteile im Luftstaub begründet ist.

Der Anteil der Neutral-Detergenz-Faser ist bei der Doppelbestimmung mit 13,6 beziehungsweise 7,72 g/kg T angegeben und daher nicht eindeutig. Häufig treten bei der Ermittlung dieses Bestandteils durch die Feinheit der Stäube Fehler auf. Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen wie bei Hartung & Saleh (2007) wurde der Rohfasergehalt außer Acht gelassen. Die Autoren geben im Mittel für eine Voliere einen Trockenmassegehalt von 88,8 % an, der um fast 4 % niedriger ist, als der in diesem Verfahren ermittelte. Mit 13 % ist der Rohaschegehalt um die Hälfte geringer als der gemessene Wert (JAEGER, 2011).

5.3.2 Homogenitätsanalyse

Nach VDI (1975) hängt die Staubkonzentration im Wesentlichen von der Verteilung der Luft im Raum, der relativen Lage zur Staubquelle und der Aktivität von Tier und Mensch ab. Welche Luftgeschwindigkeit an den einzelnen Messpunkten zum Zeitpunkt der Messung vorherrschten, ist nicht bekannt. Die starke Abhängigkeit der Lüftungsintensität im Innenraum von den außenklimatischen Bedingungen sollte jedoch beim Vergleich der Ställe nicht außer Acht gelassen werden. Mit Bezug auf die drei oben genannten Haupteinflussfaktoren liegt die Vermutung nahe, dass in den grün bis rot markierten Bereichen (Abbildung 29 und Abbildung 31) höhere Luftgeschwindigkeiten zu erfassen gewesen wären. Innerhalb einer Voruntersuchung waren alle Aerosolspektrometer in gleicher Höhe über den Buchten installiert. Das Verhalten der Tiere wurde so durch das Umsetzen der Geräte in gleichem Maße beeinflusst. Bei dem Vergleich der Abbildungen beider Abteile sei angemerkt, dass bei der Messung in Schweinestall 6 und 7 zum Umsetzen der Aerosolspektrometer die jeweilige Bucht betreten werden musste, wohingegen dies im anderen Fall in Schweinestall 4 und 5 vom Gang aus möglich war.

Ein Grundsätzlich höheres Konzentrationsniveau in Schweinestall 6 und 7 ist demzufolge bis zu einem gewissen Grad dem Betreten der Buchten beizumessen. Bei Schweinestall 4 und 5 erscheint es plausibel, dass die niedrigeren Staubbelastungen im Bereich entlang der linken Stallseite auf die dort befindlichen Zuluftklappen zurückzuführen sind, über die Frischluft einströmen kann. Für den Schweinestall 6 und 7 zeigt sich ein ähnliches Erscheinungsbild. Da der Kontrollgang den Raum in zwei gleich große Bereiche teilt und sich jeweils eine Zuluftöffnung und ein Abluftventilator an den beiden Enden des Ganges befinden, wäre eigentlich an dieser Stelle ein zu der Achse des Kontrollganges symmetrisches Verteilungsbild zu erwarten. Die höheren Belastungen im vorderen Bereich

von Schweinestall 6 und 7 sind möglicherweise dadurch zu erklären, dass der Lüfter am vorderen Abluftpunkt permanent läuft, während der zweite nur bei Bedarf zugeschaltet wird.

Es bleibt festzuhalten, dass die Verteilung von Staubpartikeln in einem zwangsbelüfteten Raum einem komplexen Zusammenspiel von Luftströmungen und den Aktivitäten von Mensch und Tier unterliegt. Darüber hinaus werden in der VDI-Richtlinie (1975) weitere Faktoren wie Sedimentation, Diffusion, Koagulation, Adhäsion, und Resuspension genannt. Eine genauere Beschreibung der Ursachen für die Konzentrationsverteilungen macht weitere und kausalanalytische Untersuchungen notwendig. Bei der Beurteilung der Verteilung der Partikelmassenkonzentration innerhalb der Ställe fällt sofort auf, dass besonders im Bereich um die Abluftpunkte höhere Konzentrationen vorzufinden sind. Das heißt, dass die Luft in diesem Bereich mit besonders vielen bzw. großen Partikeln beladen ist (NIEHAUS, 2011).

Die DFG (COSTA & GUARINO, 2009) gibt für PM_{Gesamt} $4,0 \text{ mg m}^{-3}$ an, die nicht überschritten werden sollen. Anhand von Tabelle A 11 als Beispiel (Werte für den Schweinebereich, PM_{Gesamt}), wird deutlich, dass der Wert in Schweinestall 1 (Strohstall) im Mittel nie erreicht wird. In Schweinestall 2 (Rieselkanallüftung) wird der Wert wie in Schweinestall 3 (Ganglüftung) deutlich überschritten, allerdings nicht so deutlich, wie in Schweinestall 2. Im Kontrollbereich fallen die Werte geringer aus als im Tierbereich. Für Feinstaub ($PM_{2,5}$) gibt die DFG nach COSTA & GUARINO (2009) eine maximale Konzentration von $1,5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ an. Dieser Wert wird in keinem der drei Ställe erreicht. In Schweinestall 1 liegt der Mittelwert bei $0,105 \text{ mg m}^{-3}$, in Schweinestall 2 bei $0,442 \text{ mg m}^{-3}$ und in Schweinestall 3 bei $0,307 \text{ mg m}^{-3}$.

Die Literatur weist darauf hin, dass die Staubkonzentrationen in eingestreuten Systemen über denen in einstreulosen Systemen liegt (HAEUSSERMANN, 2006), diese Aussage konnte durch die Messungen bestätigt werden.

Ein Vergleich von Unter- und Gleichdrucklüftung war nicht möglich, da keiner der Versuchsställe mit einer Gleichdrucklüftung ausgestattet ist. Allerdings soll eine Porendeckenlüftung ähnlich geringe Staubkonzentrationen hervorrufen, wie eine Gleichdrucklüftung (NANNEN & BÜSCHER, 2007). In den eigenen Untersuchungen lag die Partikelmassenkonzentration der, mit der Porendecke vergleichbaren Rieselkanäle (Schweinestall 2), eher über derer des Stalles mit „normaler“ Unterdrucklüftung

(Ganglüftung, Schweinestall 3). In Bereichen, in denen die Luft einströmt oder abgesaugt wird (Ventilatoren) kommt es zu erhöhten Staubkonzentrationen, dies bestätigen auch COSTA & GUARINO (2009).

Nach NESER (2006) hat die Aktivität der Tiere einen bedeutenden Einfluss auf die Staubkonzentration. Dies kann anhand der eigenen Untersuchungen ausdrücklich bestätigt werden. Auch bei TOPISIROVIC & RADIVOJEVIC (2005) wurde erwähnt, dass die Aktivität der Tiere einen großen Einfluss auf die Partikelmassenkonzentration hat. Durch Kontrollgänge oder Fütterungszeiten erhöhte sich die Aktivität der Tiere und somit auch die Staubkonzentration. Die Kontrollgänge führten auch bei COSTA et al. (2009) zu einem Anstieg der Partikelmassenkonzentration. Ein überaus großer Anstieg zeigt sich beim Verladen von Tieren. Ebenfalls zeichnet sich, wie in der Literatur erwähnt (NESER, 2006; PEDERSEN, 2004) ein Tag-Nacht-Rhythmus ab. Bei COSTA et al. (2009) zeigen sich eine erhöhte Aktivität am Tag und eine verringerte Aktivität in der Nacht. Auch diese Tatsache kann anhand der eigenen Untersuchungen bestätigt werden (Tabelle A 11 bis Tabelle A 16). NANNEN und BÜSCHER (2008) stellten fest, dass die Staubbelastung proportional zur Tierzahl ansteigt. Die höchste Konzentration tritt in Schweinestall 2 auf (160 Schweine) und die geringste Konzentration zeigt sich in Schweinestall 1 (10 Schweine). Besonders geringe Konzentrationen zeigen sich, nach den Fressphasen der Tiere. Diese Ergebnisse brachten auch die Untersuchungen von COSTA et al. (2009) hervor (STERNBERG, 2011).

Einen Zusammenhang zwischen Tieraktivität und Partikelverteilung ermittelten NANNEN & BÜSCHER (2008). Sie stellten fest, dass vor allem der Anteil der großen Partikel mit steigender Aktivität zunimmt. Vergleicht man die Aktivität der Schweine untereinander, so ist zum einen anzumerken, dass der Bewegungsradius der säugenden Sauen durch den Ferkelschutzkorb stark eingeschränkt ist. Zum anderen sind schnellere Bewegungen der Tiere im Wartestall - anders als in den Mastställen - während der Aufzeichnungen eher selten zu beobachten.

Die Erfassung zur Verteilung der Partikel in den Milchviehstallgebäuden erfolgte mit zwei Aerosolspektrometern. Die Bedienung der Messgeräte und das Einholen der Daten war praktisch und einfach zu handhaben. Die Homogenitätsanalysen fanden in den drei Betrieben jeweils einmal statt und zeigten eine Momentaufzeichnung der Belastungssituation. Wiederholungsmessungen zu anderen Jahreszeiten können durchaus

abweichende Ergebnisse ergeben. Die HotSpots in den Stallgebäuden mit dem meisten Partikelauftreten sind Tabelle 17 zu entnehmen (FEUSER, 2011).

Der Vorteil der Homogenitätsanalysen liegt in der grafischen Darstellung. Hier sind eventuelle Luftzirkulationen oder erhöhte Lufteinströmungen des Stallgebäudes gut zu erkennen (Abbildung 39, Abbildung 41 und Abbildung 43).

5.3.3 Staubzusammensetzung

In den Ergebnissen zur relativen Partikelverteilung über die einzelnen Größenklassen sind deutliche Differenzen zwischen den Schweineställen 4 und 5 wie 6 und 7 auszumachen. Innerhalb der Stallungen sind allerdings ähnliche Verteilungen zu beobachten. Da sich die untersuchten Haltungssysteme zwischen Ferkelerzeugung und Schweinemast in mehreren Gesichtspunkten voneinander unterscheiden, kann eine einzelne Ursache für die augenscheinlichen Abweichungen beider Partikelgrößenverteilungen nicht benannt werden. Vielmehr kommt ein Zusammenspiel mehrerer Einflussfaktoren in Frage. Im Hinblick auf die Staubquellen, sind differierende Auswirkungen auf die Partikelverteilung durch Unterschiede in Zusammensetzung und Beschaffenheit der Futtermittel zwischen Schweinemast und Sauenhaltung möglich. Darüber hinaus divergieren Alter und Lebendmasse der Tiere erheblich. Ein weiterer möglicher Grund für die ungleiche Partikelgrößenverteilung zwischen den Betrieben ist das Vorliegen verschiedener Lüftungssysteme. Während in Schweinestall 6 und 7 eine impulsarme Verdrängungslüftung installiert ist, verfügen die Schweineställe 4 und 5 über ein Strahl Lüftungssystem mit stärkerer Impulswirkung. Der Impuls der Raumströmungen wirkt sich auf Sedimentations- und Resuspensionsvorgänge im Stallinneren aus und kann zu einer Verschiebung der Partikelverteilung führen (ROSENTHAL et al., 2007; HENSELER et al., 2009). In Bezug auf die Partikelanzahlkonzentration des Abferkel- und Wartestalles entfallen entgegen möglicher Erwartungen anteilig mehr Partikel auf die oberen Größenklassen als es in den Mastställen der Fall ist. Obwohl nur wenige Prozent die Ergebnisse der Betriebe voneinander trennen, wäre eigentlich aufgrund der höheren Tieraktivität und der stärkeren Impulswirkung des Lüftungssystems in den Schweineställen 4 und 5 ein umgekehrtes Ergebnis zu erwarten gewesen. Dies bedeutet möglicherweise, dass die übrigen Einflussfaktoren stärker zu gewichten bzw. weitere bislang unbeachtete Aspekte in die Betrachtung mit einzubeziehen sind (NIEHAUS, 2011).

5.3.4 Langzeitmessungen

Nach Abschluss der Untersuchungen in jedem Betrieb stellten mit Microsoft Office Excel erstellte Tages-Grafiken eine gute Möglichkeit dar, die einzelnen Stallgebäude direkt miteinander zu vergleichen. Ein Vorteil für die Ausführung dieser Arbeit lag darin, einen Vergleich der Tagesgänge in jedem Betrieb zu ziehen, um festzustellen, ob die Peaks für jeden Tag des Untersuchungszeitraums identisch sind oder eventuell stark abweichen. Laut WICHMANN (2002) ist wegen einer bestehenden Korrelation zwischen den täglichen Konzentrationen von Schwebstaub und gasförmigen Luftschadstoffen die Abgrenzung der Effekte unterschiedlicher Schadstoffe einerseits schwierig, andererseits aber von großer praktischer Bedeutung. Die Überprüfung der Beziehung zwischen Staubmenge und den beiden Stallfaktoren Temperatur und relative Luftfeuchte ließ nach einer Studie von HILLIGER et al. (1984) keinen allgemeingültigen Zusammenhang erkennen. Während der Untersuchungen entstand die Vermutung, ob die einströmende Luft einen signifikanten Einfluss auf die Ausprägung der Partikelinnenraumkonzentration hat. In Milchviehstall 1 ließ sich sowohl die höchste Windgeschwindigkeit als auch die höchste Partikelinnenraumkonzentration feststellen. Laut DIN 18910-1 (2004) sollte das Lüftungssystem in zwangsbelüfteten Ställen so ausgelegt sein, dass im Tierbereich eine Luftgeschwindigkeit von $0,2 \text{ m sec}^{-1}$ (im Sommer $0,6 \text{ m sec}^{-1}$) dauerhaft nicht überschritten wird. In freibelüfteten Stallgebäuden ist die Windgeschwindigkeit nur teilweise zu regulieren. Bei den eigenen Erfassungen zur Windgeschwindigkeit, die einmal pro Messtag stattfanden, werden die von LAVES (2007) vorgeschriebenen Werte mehrmals überschritten. Ein weiterer Faktor in Bezug auf die Partikelbelastung ist sicherlich die Tieraktivität. In JUNGBLUTH et al. (2005) wird beschrieben, dass die Laufgangbreiten so bemessen sein müssen, dass ein Begegnen bei angemessener Sozialdistanz von 50 bis 100 cm hinter fressenden Tieren möglich ist. Zudem müssen rangniedere Tiere ranghöheren ausweichen können. In den Untersuchungsbetrieben war ausreichend Platz zum Ausweichen gegeben, lediglich bei Milchviehstall 2 waren unzureichend Fressplätze vorhanden, was sich in den Peaks während der Fütterungszeiten widerspiegelt (Abbildung 57). Einen Vergleich zu den eigenen Untersuchungen zeigt unter anderem eine Studie von KULLMANN et al. (1998). Hier wurden in 85 Ställen, welche vorwiegend Milchviehställe waren, Messungen durchgeführt um die Belastung von organischem Staub und Staubbestandteilen von routinemäßigen Stallarbeiten zu charakterisieren. Das geometrische

Mittel (\bar{x}) der luftübertragenen Staubkonzentration ergab einen Wert von $0,74 \text{ mg m}^{-3}$, die inhalierbaren Komponenten $1,78 \text{ mg m}^{-3}$ und der einatembare Bereich ergab eine Konzentration von $0,07 \text{ mg m}^{-3}$. Laut KTBL (2009) sollten die Partikelkonzentrationen an Gesamtstaub einschließlich Feinstaub in der Abluft einen Wert von 20 mg m^{-3} als Tagesmittelwert und 40 mg m^{-3} als Halbstundenmittelwert nicht überschreiten. Die Werte der dargestellten Tagesgänge der Untersuchungsbetriebe (Kapitel 4.3.2) überschreiten diese "Richtlinien" in keinem Punkt.

Einen weiteren Vergleich liefert HENSELER-PAßMANN (2010). Die höchsten Konzentrationen wurden hier während der Hauptaktivitätszeiten (Einstreuen des Stalles und Melken) mit bis zu $1,2 \text{ mg m}^{-3}$ erreicht. Laut HENSELER-PAßMANN (2010) liegt der Haupteinfluss auf die Staubkonzentration beim Einstreuen des Stalles. Nachts wurden Konzentrationen von unter $0,2 \text{ mg m}^{-3}$ gemessen. Für $\text{PM}_{2,5}$ wurde ein Mittelwert von $39,1 \mu\text{g m}^{-3}$, für PM_{10} $94,6 \mu\text{g m}^{-3}$ und für PM_{ges} $184,9 \mu\text{g m}^{-3}$ erfasst. Die Größenklasse $\text{PM}_{2,5}$ nimmt demnach den geringsten Anteil am Gesamtstaubaufkommen ein. In SCHRADE (2009) werden bei PM_{10} Konzentrationen von $< 10 \mu\text{g m}^{-3}$ bis $69 \mu\text{g m}^{-3}$ beschrieben. Die Mittelwerte im Tierbereich lagen hier bei $26 \mu\text{g m}^{-3}$ (FEUSER, 2011).

5.3.5 Feinstaubkonzentration im Innenraum

Eine typische Partikelgrößenverteilung über die untersuchten Tierarten nach Partikelmassen- und Partikelanzahlkonzentration in der Kleingruppenhaltung unter Winterbedingungen wird in Abbildung 59 dargestellt. Diese zeigt, dass die besonders gesundheitsgefährdende kleine Partikelgrößenklasse ($\text{PM}_{2,5}$) den Großteil der Partikelanzahl ausmacht, jedoch an der Partikelmasse nur geringfügig beteiligt ist. Für arbeitsmedizinische Fragestellungen ist aus diesem Grund die Partikelanzahl der Partikelgrößenklassen von großer Bedeutung. Die Partikelmasse spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle. Diese wird vornehmlich von den größeren Partikeln beeinflusst, die zwar inhalierbar sind aber abgehustet werden können. Für $\text{PM}_{2,5}$ trifft dies nicht zu!

Die Ergebnisse der Staubmessungen bei Legehennen aus Boden- und Volierenhaltung wurden mit einem Aerosolspektrometer ermittelt. Aus diesem Grund findet an dieser Stelle ein Vergleich zwischen der Boden-, Volieren- und Kleingruppenhaltung auf Basis der in dieser Untersuchung vom Aerosolspektrometer I detektierten Partikelanzahl am Arbeitsplatz statt.

Die in Tabelle 32 angegebenen Partikelmassen für Gesamtstaub, PM₁₀ und PM_{2,5} in der Kleingruppenhaltung wurden in dieser Untersuchung mit der partikelgrößenabhängigen Partikeldichte bestimmt.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass die Messergebnisse der Boden- und Volierenhaltung aufgrund des Messfehlers bei der Partikelmassenbestimmung beim Aerosolspektrometer mit großer Wahrscheinlichkeit auf Überschätzungen der Partikelmassenkonzentrationen zurückzuführen sind (siehe auch 5.4.3).

Tabelle 32: Vergleich der gemessenen Staubkonzentrationen in der Kleingruppenhaltung mit Literaturangaben aus der Boden- und Volierenhaltung im Arbeitsplatzbereich (Blomberg et al., 2004)

Haltungsform	Boden		Voliere		Kleingruppe EV 625A-EU Legehennenmehl
	Stroh	Sand	Stroh	Sand	
Messebene	Arbeitsplatz		Arbeitsplatz		Arbeitsplatz*1
Staubfraktion [mg m ⁻³]					
Gesamtstaub	10,5	7,2	17,1	23,5	0,4 – 3,5*2
PM ₁₀	6,8	4,4	11,4	15,1	0,3 – 3,0*2
PM _{2,5}	2,0	1,4	4,5	4,8	0,1 – 0,3*2

*1 = Massenkonzentrationsbereiche im Tagesverlauf

*2 = berechnet aus Partikelanzahl und partikelgrößenabhängiger Partikeldichte

In der Tabelle ist deutlich zu erkennen, dass in der Haltung von Legehennen in Kleingruppen mit Legehennenmehl als Einstreumaterial die geringsten Partikelmassenkonzentrationen festgestellt werden. Diese sind in der Gesamtstaubfraktion um den Faktor 10 geringer als z. B. in der Volierenhaltung mit Sandeinstreu.

Für die alveolengängige Staubfraktion (PM_{2,5}) gilt ein aktueller Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) von 3,0 mg m⁻³ Probenluft. Dieser Grenzwert wird in der Kleingruppenhaltung während der Messungen zu keiner Tageszeit weder im Arbeitsplatz- noch im Abluftbereich überschritten (vgl. Abbildung 60 und Abbildung 61). Im Tagesverlauf wurden max. 0,3 mg m⁻³ Probenluft gemessen.

In der Volierenhaltung wurden nach Literaturangaben Überschreitungen der PM_{2,5}-Konzentrationen im Arbeitsplatzbereich beobachtet. Dort wurden je nach Einstreumaterial Konzentrationen der alveolaren Staubfraktion zwischen 4,5 und 4,8 mg m⁻³ Probenluft gemessen (vgl. Tabelle 32).

Die einatembare Fraktion (PM_{10}) im Arbeitsplatzbereich erreicht nur kurzzeitig $3,0 \text{ mg m}^{-3}$ Probenluft und liegt damit bei diesem Maximalwert um das Dreifache unter dem AGW von $10,0 \text{ mg m}^{-3}$ (vgl. Abbildung 61). Sie bewegt sich hauptsächlich jedoch in einem noch niedrigeren Bereich zwischen $0,3$ und $1,3 \text{ mg m}^{-3}$ Probenluft.

Die in Abweichungen der Partikelmassenkonzentrationen zwischen den Messebenen können in der Kleingruppenhaltung beim Vergleich der gravimetrisch bestimmten Partikelmasse der Aerosolspektrometer I und II bestätigt werden (vgl. Abbildung 62). Auffällig ist, dass an allen Messtagen die Massenkonzentrationen im Abluftbereich höher sind als im Bereich des Arbeitsplatzes. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt in Messperiode 2, dort sind die gravimetrisch bestimmten Partikelmassen am Arbeitsplatz zum Teil nur halb so groß wie die Partikelmassen im Bereich der Abluft.

Diese extremen Unterschiede bei den gravimetrisch bestimmten Partikelmassen sind bei einem Vergleich der mit den Streulichtspektrometern erfassten Tagesverläufe nicht erkennbar (vgl. Abbildung 60 und Abbildung 61).

Alle Fraktionen überschreiten den AGW zu keinem Zeitpunkt. Die in diesen Untersuchungen gemessenen Staubkonzentrationen ($PM_{2,5}$, PM_{10}) folgen den von Saleh (2006) gemachten Angaben für ausgestaltete Käfige. Sie konnten in dieser Arbeit bestätigt werden (RÖSMANN, 2009).

TAKAI et al. (1998) hat in vier Ländern Untersuchungen durchgeführt, die im Mittel Partikelmassenkonzentrationen für PM_{10} von $3,6 \text{ mg m}^{-3}$ und für $PM_{2,5}$ $0,45 \text{ mg m}^{-3}$ ergaben. In Deutschland wurden jeweils die niedrigsten Wert mit $2,22 \text{ mg m}^{-3}$ für PM_{10} und $0,45$ für $PM_{2,5}$ festgestellt.

Im Mittel lagen die Konzentrationen für PM_{10} im Versuchsstall dagegen zwischen $0,71$ und $2,63 \text{ mg m}^{-3}$, für $PM_{2,5}$ zwischen $0,16$ und $0,92 \text{ mg m}^{-3}$. Somit bewegen sich die Partikelmassenkonzentrationen innerhalb dieses Rahmens und auch die Maximalen Arbeitsplatz-Konzentrationen werden im Mittel eingehalten, da sie $1,5 \text{ mg m}^{-3}$ (alveolengängig) beziehungsweise 4 mg m^{-3} (einatembare) nicht übersteigen (DFG, 2008). Nicht außer Acht zu lassen ist jedoch die Tatsache, dass es sich hierbei um Mittelwerte handelt, die nicht die Tagesmaxima einbeziehen, die um die Mittagszeit auftreten, da hier, wie MOSTAFA & BÜSCHER (2011) feststellen, die Partikelmassenkonzentration aufgrund der hohen Tieraktivität am höchsten ist. Die relative Tieraktivität steigt bis zum Mittag an und fällt dann wieder ab. Mitternachts wird ein Minimum erreicht. Mit der Abwesenheit

der Tiere fällt die Partikelmassenkonzentration ab (GUSTAFSSON, 1990). In den Versuchen wird dies durch die Messungen im Kaltscharraum ersichtlich, da beim Schließen der Auslaufklappen zum Ende des Lichttages im Stall die Partikelmassenkonzentration auf ein Minimum abfiel.

Außerdem sind die Partikelmassenkonzentrationen im Versuchsstall mit denen zu vergleichen, die ähnliche Einstreu, aber keine Minderungsmaßnahme verwenden, wie im Versuchsstall die Sprühbefeuchtung, die über alle Messtage mit Wasser verwendet wurde. GUSTAFSSON & VON WACHENFELT (2007) stellten im Mittel eine Partikelmassenkonzentration von $2,1 \text{ mg m}^{-3}$ in einem Stall mit Häckselstroh-Einstreu fest, während im Kontrollgang des Versuchsstalls ein Mittelwert von $2,3 \text{ mg m}^{-3}$ erreicht wird, allerdings mit einer Standardabweichung von $2,6 \text{ mg m}^{-3}$. Dass die Partikelmassenkonzentration im Mittel trotz Minderungsmaßnahme höher ist, kann auch mit anderen Faktoren zusammenhängen, wie der eingesetzten Messtechnik und ihrer Positionierung im Stall sowie anderen Einflüssen auf die Feinstaubkonzentration im Raum. Da die Minderungsmaßnahme an jedem der Messtage eingesetzt wurde, gibt es keine Kontrolldaten, die dem entgegen gesetzt werden können.

Die statistische Analyse mit dem Mann-Whitney-U-Test, ergab, dass die Verteilung der Partikelmassenkonzentration über beide Messpositionen im Volierenstall für $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} und $\text{PM}_{\text{Gesamt}}$ gleich sei. Das Ergebnis ist unerwartet, denn die Messpositionen wurden in zwei verschiedenen Volierenanlagen und in unterschiedlicher Höhe angebracht.

Die Partikelmassenkonzentrationen im Geflügelstall 2 variiert sehr stark. Im Bereich der Auslaufklappen, also im nördlichen Gang ist die Konzentration größer als im Südlichen und besonders hohe Werte von über 14 mg m^{-3} werden am Stalleingang, vermutlich durch erhöhte Tieraktivität, erreicht. Da die Auslaufklappen in den Kaltscharraum führen, sind dort häufiger Tiere zwischen Stall und Auslauf unterwegs (JAEGER, 2011).

5.4 Einflüsse auf die partikelförmigen Emissionen

5.4.1 Einflüsse von Luftvolumenstrom

Auf Grundlage der Voruntersuchungen konnten die Schweineställe in Bereiche unterteilt werden, die sich durch die Höhe der in der Luft bestehenden Partikelmassenkonzentration voneinander unterscheiden (unterschiedliche Farbabstufungen in den Abbildung 35 und Abbildung 37). Bei der Beurteilung der Verteilung der Partikelmassenkonzentration

innerhalb der Ställe fällt auf, dass besonders im Bereich um die Abluftpunkte höhere Konzentrationen vorzufinden sind. Das heißt, die Luft in diesem Bereich ist mit besonders vielen bzw. großen Partikeln beladen. Nach WANG et al. (2002) hängt die Staubkonzentration im Wesentlichen von der Verteilung der Luft im Raum, der relativen Lage zur Staubquelle und der Aktivität von Tier und Mensch ab. Welche Luftgeschwindigkeit an den einzelnen Messpunkten zum Zeitpunkt der Messung vorherrschten, ist nicht bekannt. Die starke Abhängigkeit der Lüftungsintensität im Innenraum von den außenklimatischen Bedingungen sollte jedoch beim Vergleich der Schweineställe 4 und 5 sowie 6 und 7 nicht außer Acht gelassen werden. Mit Bezug auf die drei oben genannten Haupteinflussfaktoren liegt die Vermutung nahe, dass in den grün bis rot markierten Bereichen (Abbildung 35 und Abbildung 37) höhere Luftgeschwindigkeiten zu erfassen gewesen waren, da innerhalb einer Voruntersuchung alle Aerosolspektrometer in gleicher Höhe über den Buchten installiert waren und das Verhalten der Tiere durch das Umsetzen der Geräte beeinflusst wurde. Bei dem Vergleich der Abbildungen beider Abteile sei angemerkt, dass bei der Messung in Schweinestall 5 zum Umsetzen der Aerosolspektrometer die jeweilige Bucht betreten werden musste, wohingegen dies im anderen Fall in Schweinestall 4 vom Kontrollgang aus möglich war. Ein Grundsätzlich höheres Konzentrationsniveau in Schweinestall 5 ist demzufolge bis zu einem gewissen Grad, dem Betreten der Buchten beizumessen. Bei Schweinestall 4 erscheint es plausibel, dass die niedrigeren Staubbelastungen im Bereich entlang der linken Stallseite auf die dort befindlichen Zuluftklappen zurückzuführen sind, über die Frischluft einströmen kann. Für den Schweinestall 5 zeigt sich ein ähnliches Erscheinungsbild.

Die eigenen Untersuchungen haben bestätigt, dass das Transportverhalten von Staubpartikeln in einem zwangsbelüfteten Raum einem komplexen Zusammenspiel von Luftströmungen und den Aktivitäten von Mensch und Tier unterliegt. Darüber hinaus nennen WANG et al. (2002) weitere Faktoren wie Sedimentation, Diffusion, Koagulation, Adhäsion, und Resuspension. Eine genauere Beschreibung der Ursachen für die Konzentrationsverteilungen macht weitere und umfangreichere Untersuchungen notwendig (NIEHAUS, 2011).

In den Wintermonaten ist aufgrund der niedrigen Außentemperaturen die Lüftungsintensität der Stallanlage bezogen auf den Jahresverlauf am geringsten. Der

geringe Luftmassenstrom soll die Heizkosten der Stallanlage senken und die Auskühlung des Stallgebäudes verhindern.

Während der Dezember- und Januarmessungen betrug die Lüftungsintensität im Mittel etwa 15 %, am 26. Dezember sogar nur 9,5 % der maximalen Lüftungsleistung.

Für die beiden Messperioden ist ein relativ konstanter Stallklimaverlauf mit nur geringen Abweichungen erkennbar. Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass die gemessenen Klimaparameter Stalltemperatur und relative Luftfeuchtigkeit die vorgegebenen Anforderungen an das Stallklima nach DIN 18910 erfüllen. Die Lüftungsintensität dieser Stallanlage im Winter ist deshalb unter Einbeziehung der eingehaltenen Schadgasgrenzwerte als ausreichend zu bewerten (RÖSMANN, 2009).

5.4.2 Einflüsse von Haltung und Management auf die Luftqualität

Tieraktivität

In Abschnitt 4.3.1 und an zahlreichen anderen Untersuchungen wurde auf ein gemeinsames Auftreten von hohen Partikelbelastungen und gesteigerter Aktivität im Stall festgestellt. Über den natürlichen Tagesrhythmus z. B. der Schweine hinausgehend, können zahlreiche Auslöser für Verhaltensänderung der Tiere ausgemacht werden. Besonders deutlich ist dies bei der Fütterung der Mastschweine zu erkennen. Da es sich bei der Flüssigfütterung im untersuchten Betrieb um ein Verfahren mit restriktiver Futterzuteilung in drei Mahlzeiten handelt, ist die Rivalität der Schweine um einen vorteilhaften Fressplatz besonders ausgeprägt. Folglich liegen die Partikelmassenkonzentrationen im Zeitraum um die Fütterung deutlich über den Tagesmittelwerten. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von COSTA et al. (2009) in norditalienischen Mastställen. Auch dort konnten die höchsten PM₁₀-Konzentrationen in Verbindung mit den Mahlzeiten gemessen werden. In ähnlicher Form löst das Betreten des Tierbereiches hektische Geschäftigkeit innerhalb der Bucht aus, da die Mastschweine den engen Kontakt mit dem Menschen nicht gewohnt sind. Diese Aufregung überträgt sich häufig auf das gesamte Abteil, sodass nur noch eine geringe Zahl der Tiere liegen bleibt. Störungen dieser Art sind ebenfalls mit einem klaren Anstieg der Partikelmassenkonzentration in der Stallluft verbunden. In diese Richtung weisende Beobachtungen konnten auch in der Sauenhaltung gemacht werden, beispielsweise bei der Ferkelimpfung. Im Abferkelstall entstand darüber hinaus der Eindruck, dass die Phasen,

die durch eine höhere Staubbelastung gekennzeichnet sind, länger andauern. Die Ursachen hierfür sind wahrscheinlich bei den Tieren und im Management, weniger aber beim Lüftungssystem zu suchen. Durch die Beobachtung der Tiere stellte sich heraus, dass die Sauen im Anschluss an das Fressen häufig noch ihre Ferkel säugen. Generell bedarf es einer gewissen Zeit, bis auch die Ferkel zur Ruhe kommen, nachdem sich das Muttertier wieder hingelegt hat. Durch ein zeitversetztes Füttern von Sauen und Ferkeln dehnt sich die Phase gesteigerter Aktivität zusätzlich aus. Neben dem Haupteinflussfaktor Tieraktivität führen sowohl NANNEN & BÜSCHER (2006), als auch COSTA et al. (2009) Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftvolumenstrom als wesentliche Einflussfaktoren auf die Partikelkonzentration in der Stallluft an. Diese Faktoren sind durch wechselseitige Beziehungen miteinander verknüpft. Wie bereits in der Literaturanalyse angeführt, besteht die Bedeutung der Tieraktivität darin, dass die Bewegungen der Tiere für die Aufwirbelung auf Oberflächen abgelagerter Staubpartikel sorgen. Die dadurch im Schwebezustand befindlichen Partikel können nun von der Luftströmung erfasst werden. Ohne die Impulse, die die Tiere durch ihre Bewegungen auslösen, sind die Kräfte, die auf die am Boden befindlichen Staubpartikel einwirken, häufig zu gering, um Partikel von den Oberflächen ablösen zu können, da in der Regel nur geringe Luftgeschwindigkeiten im bodennahen Bereich landwirtschaftlicher Stallanlagen vorherrschen (HENSELER et al., 2009). In gleicher Weise wirken sich auch die Aktivität des Stallpersonals und Vibrationen der technischen Einrichtung aus. COSTA et al. (2009) ermittelten in einer Korrelationsanalyse eine Korrelation von 99 % zwischen der Aktivität von Mastschweinen und der Staubkonzentration im Stallinnenraum. In diese Richtung weisen auch die Untersuchungen von NANNEN (2007), der einen linearen Zusammenhang zwischen relativer Tieraktivität und Partikelmassenkonzentration im Innenraum aufzeigen konnte. Wie stark die Partikelkonzentration mit der Tieraktivität in den zugrundeliegenden Untersuchungen in Wechselwirkung steht, kann nicht genau bestimmt werden, da sich eine exakte Beschreibung der Intensität der Tieraktivität als schwierig erweist. Zwar wäre es denkbar, anhand der Videoaufzeichnungen eine Skala festzulegen, die die Aktivität der Tiere beispielsweise in fünf Stufen mit „1 = alle Tiere ruhen/schlafen“ bis „5 = alle Tiere stehen/bewegen sich“ einteilt, jedoch würden bei der Umsetzung viele Probleme auftreten. Jeder Tag müsste in einzelne Zeitabschnitte unterteilt werden. Bei der Beurteilung der Tieraktivität ergibt sich zudem die Problematik, dass zu diesem Zweck nicht ausreichend

Kameras vorhanden sind, um trotz der Buchtenunterteilungen Einblick in den gesamten Stall zu erhalten. Außerdem ist die Sichtweite der Kameras bei nächtlicher Orientierungsbeleuchtung stark eingeschränkt. Die Ergebnisse einer solch subjektiven Einschätzung wären nicht hinreichend genau, um darauf aufbauende Berechnungen durchzuführen. Für eine Bestimmung der relativen Tieraktivität in Abhängigkeit von der Zeit erscheint die Verwendung spezieller Bewegungssensoren sinnvoll (NIEHAUS, 2011).

Beleuchtung

Die Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (2006) sieht in § 26, Absatz 2 für Schweine auch außerhalb der Beleuchtungszeit so viel Licht vor, wie die Tiere zur Orientierung im Raum benötigen. Da Schweine typische Dämmerungstiere sind, liegt die Annahme nahe, dass die vorgeschriebene Orientierungsbeleuchtung Auswirkungen auf die nächtlichen Aktivitäten der Tiere hat. In welcher Art und in welchem Umfang sich die nächtliche Beleuchtung im Vergleich zu vollkommener Dunkelheit auf die Tieraktivität und den Tagesverlauf der Partikelmassenkonzentration auswirkt, konnte nicht geklärt werden, da eine entsprechende technische Ausrüstung für die Überwachung der Tiere bei Dunkelheit nicht vorhanden war. Es stellt sich dennoch die Frage, ob es z. B. in einem Maststall nur zu einer zeitlichen Umverteilung der Staubbelastung kommen würde, oder ob generelle Unterschiede feststellbar wären. Für den Wartestall konnte sowohl anhand der Analyse der Partikelmassenkonzentration im Tagesgang als auch anhand der Videoaufzeichnungen eine rege nächtliche Geschäftigkeit einiger Sauen gezeigt werden. Ein Verzicht auf die Orientierungsbeleuchtung wäre vor dem Hintergrund der über den gesamten Tag hohen Auslastung der Futterabrufstation nicht sinnvoll (NIEHAUS, 2011).

Stallklima

Das im Stallinneren vorherrschende Klima hat ebenfalls Einfluss auf die Tieraktivität, insofern Schweine bei hohen Temperaturen dazu neigen, unnötige Bewegungen zu vermeiden. Darüber hinaus verändern sich die Ansprüche der Tiere an das Stallklima mit zunehmendem Alter bzw. Lebendmasse. Dies betrifft auch die Tiere in den untersuchten Haltungssystemen. Da die Messungen in den einzelnen Ställen nicht zeitgleich erfolgten, ist bei einem Vergleich der Tagesverläufe zu berücksichtigen, dass gegebenenfalls jahreszeitliche Einflüsse eingewirkt haben. So stellte NANNEN (2007) stärkere Abweichungen der relativen Tieraktivität vom Tagesmittel im Winter gegenüber dem Sommer fest, die er mit der niedrigen Wärmetoleranz von in der Endmast befindlichen

Schweinen begründete. Die Gegenüberstellung der untersuchten Haltungssysteme in Kapitel 4.3.1 zeigt, dass über alle drei Größenfraktionen betrachtet die Mittelwerte von Schweinestall 4 mit Abstand unter denen von Schweinestall 5 liegen. Mit 23,8 °C und 65 % Luftfeuchtigkeit im Schweinestall 4, sowie mit 23,4 °C und 67 % Luftfeuchtigkeit in Schweinestall 5 die Klimaparameter auf einem ähnlichen Niveau liegen. Dies gilt ebenfalls für die bestimmten Luftgeschwindigkeiten. In Hinblick auf das Stallklima waren die Schweine in beiden Ställen also vergleichbaren Belastungen ausgesetzt. Worin sich die Untersuchungen innerhalb der Stallungen 4 und 5 klar voneinander unterscheiden, ist die Lebendmasse der Tiere (88 kg bzw. 42 kg). Folglich erscheint ein Zusammenhang zwischen der geringeren Wärmetoleranz der schwereren Schweine, die wiederum die Tieraktivität beeinflusst, und dem niedrigeren Staubbelastungsniveau in Schweinestall 4 plausibel.

Der Luftvolumenstrom ist ein Maß für die von der Lüftungsanlage durch das Abteil geförderte Luftmenge pro Zeiteinheit. Dieser hat in zweierlei Hinsicht Einfluss auf die Partikelkonzentration in der Stallluft. Zum einen wirkt sich der Luftvolumenstrom auf die Staubmenge aus, die mit der Abluft aus dem Gebäude fortgetragen wird, und zum anderen auf Resuspensionsvorgänge (NANNEN, 2007). Stallinnentemperatur und -luftfeuchtigkeit sind über die Regulierung des Stallklimas mit dem Luftvolumenstrom verknüpft, denn jeder zwangsbelüftete Stall ist mit einem Klimacomputer ausgerüstet, der Lüftung und Heizung nach vorgegebenen Parametern steuert. Indem der Tierhalter bestimmte Einstellungen an den Regelgeräten vornimmt, greift dieser indirekt in Prozesse ein, die sich auf die Partikelkonzentration in der Stallluft auswirken. Neben der Stallklimaregulierung wirkt sich der Wasserdampfgehalt der Luft auf die feuchtebedingte Anhaftung von Staub an Oberflächen und auf die feuchtebedingte Vereinigung von Staubpartikeln zu Agglomeraten aufgrund von hydrostatischen Kräften aus (HENSELER-PABMANN, 2010). Durch Agglomeration vereinigte Partikel unterscheiden sich in Form und Durchmesser von den ursprünglichen Partikeln. Dies führt sowohl zu veränderten aerodynamischen Eigenschaften als auch zu einer geänderten Sedimentationsgeschwindigkeit (SCHNEIDER et al., 2006). Die ermittelte Luftfeuchtigkeit schwankt in den untersuchten Ställen zumeist zwischen 60 und 70 %. Vergleicht man die Luftfeuchtigkeit und die Tagesmittelwerte der Partikelmassenkonzentration (Tabelle 18 bis Tabelle 24) miteinander, so sind Ansätze zu erkennen, dass an Tagen mit höherer Luftfeuchtigkeit die erfassten Mittelwerte auf einem

eher niedrigen Niveau liegen. Ein solches Bild zeichnet sich für die Schweinestall 6 und 7 ab, zumal die Temperaturen der einzelnen Messtage recht nah beieinander liegen. Für die Schweineställe 4 und 5 trifft dies nicht zu. Der Versuch, deutliche Parallelen zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und der mittleren Partikelmassenkonzentration an einem Tag zu ziehen, ist aufgrund der unzureichend genauen Ermittlung der Luftfeuchtigkeit und des Einflusses zahlreicher weiterer Faktoren im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Nur Tendenzen können aufgezeigt werden. COSTA et al. (2009) ermittelten für die Partikelmassenkonzentration im Stallinnenraum eine siebzigprozentige Korrelation zur Lüftungsrate, eine Korrelation von -0,39 zur Stallluftfeuchte und eine Korrelation von 0,96 zur Stalllufttemperatur.

5.4.3 Einfluss unterschiedlicher Messtechniken auf Partikelkonzentrationen

Der Vergleich von ermittelten Partikelmassenkonzentrationen durch zwei unterschiedliche Messtechniken (Gravimetriesammler und Aerosolspektrometer) ist aufgrund der großen Abweichungen, die in der Messtechnik begründet sind, nur unter Verwendung eines zuvor bestimmten Gravimetriefaktors (Gf II) möglich (vgl. Tabelle 30). Um Messergebnisse dieser beiden Methoden vergleichen zu können, ist z. B. bei der Untersuchung in Geflügelstall 1 ein mittlerer Gravimetriefaktor von 0,69 bestimmt worden.

Die mit dem Gravimetriesammler ermittelte Partikelmasse betrug in den Messperioden im Mittel nur 69 % von der kalkulierten Partikelmasse des Aerosolspektrometers.

Der Gravimetriefaktor I ermöglicht die Umrechnung der vom Aerosolspektrometer kalkulierten Partikelmasse in die tatsächlich vorhandene Filtermasse und wird mit dem Korrekturfaktor 0,39 angegeben.

Die tatsächlich gewogene Filtermasse des Aerosolspektrometers beträgt somit nur 39 % der geräteintern berechneten Partikelmasse. Diese enorm große Massendifferenz liegt in der geräteinternen Verwendung von nur einer Standarddichte für die Umrechnung der Partikelanzahl- in die Partikelmassenkonzentrationen begründet (RÖSMANN, 2009).

5.4.4 Einflüsse zur Minderung von Partikelkonzentrationen

In Kapitel 4.4 wurden die Wirkungen verschiedener Minderungsmaßnahmen beschrieben. Betrachtet man die Wirkungsgrade, so erkennt man schnell, dass Innenraummaßnahmen zwar eine deutliche Verbesserung der Situation für die Raumnutzer (Tiere und

Arbeitspersonen) brachten, aber die Größenordnung der Umweltwirkung (Staub-Emissionen) wesentlich geringer als bei der Abluftreinigung sind.

5.5 Fazit und Ausblick

Ziel des Projektes war es, die aktuelle Belastungssituation von Feinstaub in typischen Tierställen zu erfassen und in Hinblick auf den Tier- und Arbeitsschutz zu bewerten. Der Einsatz von Aerosolspektrometern ermöglicht eine Analyse der Partikelverteilung in verschiedenen Größenklassen. Die Messungen in den Ställen geben Aufschluss über die inhomogene Verteilung von Staubpartikeln und Hinweise über die Ursachen der Konzentrationsunterschiede. Rastermessungen machten die Verteilung der Stäube im Raum deutlich. Anhand der ermittelten Tagesgänge und dem aufgezeichneten Bildmaterial wird deutlich, wie die Ereignisse mit den Partikelmassen zusammenhängen. Steigende Aktivität der Tiere, Kontrollgänge und der Betrieb der Fütterungsanlage verursacht höhere Staubkonzentrationen. Aufgrund dieser Ereignisse sollten Strategien entwickelt werden, um Staubkonzentrationen oder ihre Auswirkungen während dieser Zeit zu senken. In der Schweinehaltung sind beispielsweise geschlossene Futterautomaten nützlich, die die Staubaufwirbelung niedrig halten. Eine andere Möglichkeit der Reduzierung besteht darin, Pflanzenöl im Stall zu vernebeln. Damit kann eine Reduzierung des Schwebstaubes um 40 bis fast 100 % erreicht werden (COSTA et al., 2009; DFG, 2009; NANNEN & BÜSCHER 2007).

In den untersuchten Milchviehstallungen wurde vor allem die Konzentration von Staubpartikeln im Tagesverlauf betrachtet. Die grafische Darstellung der Tagesabläufe gab Aufschluss über die Unterschiede der einzelnen Stallsysteme. Im Vergleich zu anderen Nutztierarten ist die Partikelinnenraumkonzentration in Milchviehställen relativ gering, dennoch wird immer wieder der Aspekt der Gesundheit diskutiert. Interessant wären weitere Studien in Bezug auf die Einstreumaterialien und davon ausgehende Wirkungen auf Mensch und Tier.

Festzuhalten ist, dass bei allen Milchviehuntersuchungsbetrieben der vorliegenden Studie die Größenklasse $PM_{2,5}$ am Gesamtstaub den geringsten Anteil ausmacht. Die vorliegende Untersuchung zeigt mehrfach Maxima der Partikelinnenraum-Konzentration in der Offenfrontstallung. Ob dieses Stallsystem generell ein höheres Staubaufkommen zeigt, können nur weitergehende Untersuchungen beantworten.

Die Untersuchungen haben bestätigt, dass in Geflügelställen die Staubbelastungen und -emissionen pro Lebendmasse-Einheit am höchsten sind. Aber auch dort sind Minderungstechniken einsetzbar, die vergleichsweise gute Wirkungsgrade zeigten. Je nach Partikelgrößenklasse gelangen dem StoffNix-Filtermaterial im von MOSTAFA & BÜSCHER (2010) untersuchten Trockenfiltersystem Effizienzen von bis zu 63 %. Aufgrund der guten Ergebnisse in der Reduktion der Feinstaubemissionen, wird dieses Verfahren schon in Ställen eingesetzt.

Auch die Minderungsmaßnahme „Sprühbefeuchtung“ ist in Geflügelställen als wirkungsvoll zu betrachten. Diese Technik war in einem untersuchten Geflügelstall während der gesamten viermonatigen Messperiode ohne Störungen im Einsatz.

Für die Verbreitung staubmindernder Maßnahmen in der praktischen Landwirtschaft sind jedoch nicht nur die Wirkungsgrade von Interesse; zahlreiche andere Kriterien werden angeführt. Bei den Indoor-Maßnahmen sind einfache Verfahrensumstellungen in der Regel nicht mit großen Investitionen verbunden, z. B. der Wechsel von Häckselstroh auf Pellets. Mit der untersuchten Sprühbefeuchtung oder den Umluft-Filtertechniken sind jedoch schon deutlich Investitionen verbunden, wobei beide Techniken auch als Nachrüst-Maßnahme für bestehende Ställe möglich sind. Bei Geflügelställen kommt im Vergleich zu Schweineställen erschwerend hinzu, dass Filtersysteme sehr schnell von den Federn „verklebt“ werden, so dass eine Langzeit-Einsetzbarkeit dort ein besonderes Entscheidungskriterium für die Technik-Auswahl darstellt.

Haben die Betriebe konkrete Umweltauflagen beim Genehmigungsverfahren zu berücksichtigen, ist die Funktionssicherheit im Sinne einer „Leistungs-Garantie“ besonders wichtig gegenüber den Anwohnern und den Umwelt-Behörden.

Als Fazit der Untersuchungen lässt sich festhalten, dass sich viele Indoor-Feinstaubreduktionsmaßnahmen noch in einem Entwicklungsstand befinden und oftmals noch keine Referenzanlagen für eine Langzeitbewertung der Technik verfügbar sind. Ausgehend von dieser Unsicherheit ist es schwierig, stallspezifisch die richtigen Maßnahmen und Techniken zu empfehlen. Allerdings können interessierte Landwirte zur Verbesserung der Raumluftqualität Maßnahmen ergreifen und auf diesem Wege auch zur Emissionsminderung beitragen.

Von den aktuellen Genehmigungsproblemen getrieben, wird die Abluftreinigung derzeit wesentlich intensiver erforscht und weiter entwickelt. Da die Emissionen von Feinstaub und von Bioaerosolen in Stallbau-Genehmigungsverfahren zunehmend Beachtung finden, ist die Betrachtung sehr stark auf die Umweltproblematik fokussiert. Nutztiere und Arbeitspersonen im Stall werden hiervon leider nicht profitieren. Darüber hinaus wird die Abluftreinigung sprunghaft an Bedeutung gewinnen, wenn die aktuellen Bemühungen erfolgreich sind, sie zum „Stand der Technik“ im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes zu erklären.

6 Zusammenfassung

In den vorgestellten Untersuchungen sollte die aktuelle Stallstaub-Belastungssituation in typischen Tierställen für Schweine, Geflügel und Milchkühe in räumlicher und zeitlicher Verteilung untersucht und analysiert werden. Neben den Ursachen für die Staubbelastungen im Innenraum sollten Minderungsmöglichkeiten identifiziert und in ihrer Wirksamkeit vergleichend bewertet werden. Ausgehend von einer Literaturanalyse sollten ergänzende Untersuchungen zur Wirksamkeit der Minderungsmaßnahmen sowohl für die Bewertung der Raumluftqualität wie auch für die Emissionsminderung durchgeführt werden.

In der zur Verfügung stehenden Zeit (zwei Jahre) wurden mit gleicher messmethodischer Vorgehensweise verschiedene Tierställe in Bezug auf die räumliche und zeitliche Verteilung der Stallstaub-Konzentrationen im Innenraum untersucht. Die Messungen erfolgten in typischen Ställen für die Ferkelerzeugung und Schweinemast. Darüber hinaus wurden verschiedene Legehennenställe und verschiedene typische Milchviehställe untersucht.

Die Untersuchungen erfolgten immer nach der gleichen Vorgehensweise. Durch Rastermessungen sollte die räumliche Verteilung erfasst werden, durch 24-Stunden-Messungen zu verschiedenen Jahreszeiten der typische tageszeitliche und jahreszeitliche Einfluss. Mit Aerosol-Spektrometer wurden die Stallstäube in der Stallluft nach ihren Größenfraktionen differenziert in Bezug auf ihre Anzahl- und Massekonzentration kontinuierlich erfasst. Bei der Volumenstrom-Bestimmung wurde entweder mit kontinuierlich mit Messventilatoren gearbeitet. Bei frei belüfteten Ställen wurde alternativ die SF₆-Tracergas-Methode zur Luftwechselbestimmung eingesetzt. Die aktuellen Witterungsbedingungen wurden mit Datenloggern und programmierbaren Handgeräten kontinuierlich erfasst.

Die Ergebnisse sind sehr vielschichtig. Einerseits zeigen sich sehr große räumliche Inhomogenitäten, die auf die Staubquellen und die aktuelle Luftströmung zurück zu führen sind. Andererseits haben die Tiere selbst einen ausgeprägten Einfluss über ihren Biorhythmus auf die zeitliche Verteilung der Stallstaub-Innenraum-Konzentrationen. Dieser zweite Einfluss machte sich auch beim Emissionsgeschehen bemerkbar, so dass

abgeleitet werden kann, dass Kurzzeitmessungen weder im Innenraum noch Außerhalb ein realistisches Bild über die Belastungssituation mit Stallstäuben wiedergeben.

Insgesamt waren die Konzentrationen erwartungsgemäß beim Geflügel am höchsten, gefolgt von den Schweinen und mit deutlichem Abstand zu den Milchkühen. Die Raumluftqualität und auch die Notwendigkeit von Arbeitsschutz-Maßnahmen sind in der gleichen Reihenfolge zu betrachten. Hauptursachen für die Staubbildung sind neben den Tieren die Einstreu und die Fütterungstechnik. Belastungsspitzen treten immer auf, wenn trockene Materialien eingestreut oder gefüttert werden, was in manchen Ställen mehrfach täglich passiert. Die Konzentration von Grobstäuben steigt sprunghaft an, während die respiratorisch relevanten Feinstäube (PM_{10} und $PM_{2,5}$) sehr viel länger zur Sedimentation benötigen und deutlich länger in der Stallluft quasi „schwebend“ verweilen.

Was die Minderungstechniken angeht, ist der Handlungsbedarf in gleicher Reihenfolge zu betrachten wie die Belastungssituation. In Geflügelställen stehen Trocken- und Naßfiltersysteme zur Verfügung, die als Indoor-Maßnahme ihre Funktionalität in Versuchen bewiesen haben. Ein von der DLG-geprüftes Abluftreinigungssystem für Geflügelställe wird noch gesucht, weil die Federn bisher jedes Langzeit-Filtersystem zum Erliegen gebracht haben.

In Schweinställen gibt es ähnliche Indoor-Möglichkeiten zur Verbesserung der Raumluftqualität. Hier haben sich Sprühsysteme für Wasser und Wasser-Öl-Gemische bewährt, die auch zur Luftkühlung im Sommer Verwendung finden. Umluft-Nassfilter-Systeme wurden auch untersucht, haben aber bisher keine praktische Bedeutung erlangt. Für die Schweinehaltung stehen verschiedene ein- und mehrstufige DLG-geprüfte Abluftreinigungstechniken zur Verfügung, die eine wesentlich höheren Emissions-Minderungsgrad für Staub aufweisen, als die Indoor-Techniken (90 vs. 40 – 50 %). Bei genehmigungstechnischen Problemen haben Abluftreinigungsanlagen daher eine wesentlich stärker Verbreitung als Indoor-Maßnahmen.

Bei Milchkühen und Pferden ist die Stallstaub-Situation eher als Langzeitproblem für die Tiere zu betrachten. Insbesondere bei Pferden kommt es häufig zu Allergien, die sich nur durch einen Wechsel beim Einstreuverfahren oder beim Wechsel von Heu- auf Feuchtfütterung beheben lassen. Pelletierte Futter- und Einstreumaterialien konnten in den eigenen Untersuchungen eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität erzielen.

Hinsichtlich der Beratungsempfehlungen kann festgehalten werden, dass es zahlreiche Möglichkeiten zur Verbesserung der Raumluft und der Minderung der Staub-Emissionsfrachten gibt. Berater sollten sich intensiver mit den verschiedenen Minderungstechniken befassen, um stallspezifisch passende Lösungen ausfindig zu machen. Je nach Problemlage ist in einigen Fällen ein Wechsel in der Betriebsweise möglich (z. B. Futterwechsel), während bei chronischen Problemen nachträgliche, technische Maßnahmen (z. B. Öl-Sprühtechniken) sinnvoller erscheinen.

Kommt es zu starken Genehmigungsaufgaben, ist oft die Abluftreinigungstechnik die einzige Alternative. Allerdings sind hier die Kosten relativ hoch und nur die Umwelt profitiert von der Wirkung; Tier und Menschen im Stall haben leider keinen Nutzen davon.

7 Literaturverzeichnis

AARNINK, A.J.A.; H.H. ELLEN; 2007:

Processes and factors affecting dust emissions from livestock production.
Proceedings of Dust Conference 2007. How to Improve Air Quality. International
Conference, Maastricht, The Netherlands.

AARNINK, A.J.A.; N. STOCKHOFE-ZURWIEDEN; M.J.M. WAGEMANS; 2004:

Dust in different housing systems for growing-finishing pigs.
Technological Institut: Engineering the Future. AgEng Leuven 2004.
Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering [CD-
Rom]. Leuven (Belgium).

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

Dust sources in animal houses.
Danish Institute of Agricultural Sciences, Research Centre Bygholm: Proceedings
of the International Symposium on Dust Control in Animal Production Facilities.
Horsens (Denmark), p. 34-44. ISBN 87-88976-35-1.

AEL-HEFT 17; 2004:

Berechnungs- und Planungsgrundlagen für das Klima in geschlossenen Ställen
D- 60329 Frankfurt, 2004

AENGST, C.; 1984:

Zur Zusammensetzung des Staubes in einem Schweinestall.
Tierärztliche Hochschule Hannover. Dissertation.

AHRENDTS, F.; G. FRANKE; E. GRIMM; W. GRAMATTE; S. HÄUSER; J. HÄUSER; J. HAHNE
2006:

Abluftreinigung für Tierhaltungsanlagen. KTBL-Schrift 451, Darmstadt, ISBN
978-3-939371-15-1

ALTMANN-BREWE, J.; J. ALTMANN 1999:

Umwelt- und Gesundheitsgefahren vor allem durch Schimmelpilze und Pilzgift.
In: Arbeitsbuch Intensive Tierhaltung.

ARMBRUSTER, L. 1984:

Physikalische Grundlagen der Staubmesstechnik und moderne Verfahren.
In: DVG Tagungsbericht Dust in Animal Houses, Hannover, Nr. 898/222.

ASAY, A. 1984:

Staubentstehung und Staubgehalt in Stallungen.
In: DVG Tagungsbericht Dust in Animal Houses, Hannover, Nr. 898/222.

- ATIA, A. 2004:
Dust Control for Livestock Buildings.
In: Agri-Facts, Agdex 086-5.
- BAKUTIS, B.; E, MONSTVILIENE; G. JANUSKEVICIENE 2004:
Analysis of Airborne Contamination with Bacteria, Endotoxins and Dust in Livestock Barns and Poultry Houses.
In: Acta Vet. Brno 2004, 73: 283-289.
- BANHAZI, T.M.; J. SEEDORF; D.L. RUTLEY; W.S. PITCHFORD; 2004:
Factors affecting the concentrations of airborne bacteria and endotoxins in Australian piggery buildings.
In: Proceedings of ISAH Congress St. Malo, France, p. 197-198.
- BARBER, E.M.; J.R. DAWSON; V.A. BATTAMS 1991:
Assessment of dustfall collectors used in livestock buildings.
In: Department of Agricultural Engineering, Volume 50.
- BARDELLA, I. 2002:
Ursachen und Behandlungsmöglichkeiten von Atemwegserkrankungen bei Kälbern.
In: Nutztierpraxis Aktuell, Ausgabe 3.
- BIMSCHG 2005:
Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge.
In: BGBl I 1974.
- BLOMBERG, N.; RIEGER, M.; GAYER, P.; DAMME, K.; WANKA, U.; 2004:
Alternative Legehennenhaltung: Auswirkungen auf die Belastung
KTBL- Schrift 463, ISBN 3-7843-2186-0
- BMELV 2009:
BMELV fördert Umwelttechnologie zur Abluftreinigung in der Tierhaltung.
Pressemitteilung Nr. 142, vom 24.06.2009.
- BMU 2008:
Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft in Europa.
Amtsblatt der Europäischen Union.
- BMU 2010:
Neue EU-Luftqualitätsrichtlinie in deutsches Recht umgesetzt.
Pressemitteilung Berlin Nr. 117/10 vom 5.08.2010.

- BOTTCHER, R.W.; K.M. KEENER; R.D. MUNILLA; C.M. WILLIAMS; S.S. SCHIFFMAN; 2004:
Dust and odor emissions from tunnel ventilated swine buildings in North Carolina and comparison of different odor evaluation methods.
In: Applied Engineering in Agriculture, Vol. 20, No. 3, p. 343-347.
- CAMBRA-LOPEZ, M.; A.J.A. AARNINK; Y. ZHAO; S. CALVET; A.G. TORRES; 2010:
Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem.
In: Environmental Pollution, 58 (1), p. 1-17.
- CAMBRA-LOPEZ, M.; T. HERMOSILLA; H.T.L. LAI; M. MONTERO; A.J.A. AARNINK; N.W.M. OGINK; 2010:
Source identification and quantification of particulate matter emitted from livestock houses. In: International Symposium on Air Quality and Manure Management for Agriculture. CD-Rom Proceedings of the 13-16 September 2010 Conference.
- CHIBA, L.I.; E.R. PEO JR; A.J. LEWIS; 1987:
Use of dietary fat to reduce dust, aerial ammonia and bacterial colony forming particle concentration in swine confinement buildings.
In: Transactions of the ASABE, Vol. 30, p. 464-468.
- CHOINIÈRE-FARMSTEAD, Y. 1993:
Air Quality Inside Livestock Barns.
Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
ISSN 1198-712X, Agdex 400/717.
- COPELAND, C. 2010:
Air Quality Issues and Animal Agriculture: A Primer.
CRS Report for Congress, December 2010.
- COSTA, A.; F. BORGONOVO; T. LEROY; D. BERCKMANS; M. GUARINO; 2009:
Dust concentration variation in relation to animal activity in a pig barn.
In: Biosystems Engineering, 104, p. 118-124.
- COSTA, A.; M. GUARINO 2009:
Definition of yearly emission factor of dust and greenhouse gases through continuous measurements in swine husbandry.
Atmospheric Environment 43, 1548-1556.
- DAWSON, J.R.; 1990:
Minimizing Dust in Livestock Buildings: Possible Alternatives to Mechanical Separation.
In: Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, Vol. 47, p. 235-248.
- DESTA, T. Z.; K. JANSSENS; A. VAN BRECHT; J. MEYERS; M. BAELMANS; D. BERCKMANS 2004:
CFD for model-based controller development. Building and Environment 2004; 39 (6): 621-633.

DFG 2009:

MAK- und BAT-Wert-Liste 2009.
Deutsche Forschungsgemeinschaft, Senatskommission zur Prüfung
gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe.
Mitteilung 45 Wiley-VCH Verlag, Weinheim.

DFG; 2006:

MAK- und BAK-Wert-Liste 2006.
Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, Mitteilung
42. Wiley-VCH Verlagsgesellschaft mbh, Weinheim.

DFG; 2008:

MAK- und BAT Werte- Liste 2008. Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen und
Biologische Arbeitsstofftoleranzwerte. Senatskommission zur Prüfung
gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Mitteilung 44. Weinheim: Wiley-VCH
Verlag.

DIEZ, M.; 1977:

Untersuchungen über die quantitative Zusammensetzung der aeroben
Bakterienflora von Stallstaub unterschiedlicher Herkunft.
Dissertation, Universität Gießen.

DIN 18910-1; 2004:

Wärmeschutz geschlossener Ställe - Wärmedämmung und Lüftung- Teil 1:
Planungs- und Berechnungsgrundlagen für geschlossene zwangsbelüftete Ställe

DIN EN 481; 1993:

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

DONHAM, K.J.; L.J. SCALLON; W. POPENDORF; M.W. TREUHAFT; R.C. ROBERTS; 1986:

Characterization of dusts collected from swine confinement buildings.
In: American Industrial Hygiene Association Journal, 47, p. 404-410.

EMISSION INVENTORY GUIDEBOOK; 2006:

Particle Emissions from Animal Husbandry.

EN 481; 1993:

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

FEUSER, A.; 2011:

Vergleichende Untersuchungen zur Partikelinnenraumkonzentration in der
Milchviehhaltung. Diplomarbeit. Universität Bonn.

- GAIL, L.; H.-P. HORTIG (Hrsg.); 2004:
Reinraumtechnik. 2. Auflage. Berlin: Springer Verlag. ISBN 3-540-20542-X.
- GALLMANN, E.; 2003:
Vergleich von zwei Haltungssystemen für Mastschweine mit unterschiedlichen Lüftungsprinzipien – Stallklima und Emissionen.
Dissertation, VDI-MEG Schrift 404, ISSN 0931-6264.
- GEFAHRSTOFFVERORDNUNG (GefStoffV); 2010:
Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen. In der Fassung vom 26. November 2010.
- GESUNDHEITS- UND UMWELTDEPARTEMENT DER STADT ZÜRICH; 2011:
Ablagerung von Feinpartikeln im menschlichen Atemtrakt.
<http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18796/>, zuletzt am 15.04.2011.
- GRIMM AEROSOL TECHNIK GMBH & Co. KG; 2011:
Indoor air monitoring. Datenblatt.
http://www.grimm-aerosol.com/downloads/datasheets/de/GrimmAerosolTechnik_IAQ_GeneralCatalogue.pdf, zuletzt am 28.03.2011.
- GRIMM AEROSOL TECHNIK GmbH & Co. KG; 2004:
Handbuch Grimm Streulichtspektrometer
D-83404 Ainring
- GRIMM TECHNOLOGIES, INC.; 2011:
How the 1100 Aerosol Spectrometer Series works.
<http://www.dustmonitor.com/General/principles.htm#1100s>, zuletzt am 28.03.2011.
- GRIMM; 2011:
General Catalogue IAQ 2011.
www.grimm-aerosol.com, zuletzt aufgerufen am 7.04.2011
- GUSTAFSSON, G.; MARTENSSON, L. 1990:
Gaser och damm i fjäderfästallar (Gases and dust from poultry houses). Swedish University of Agricultural Sciences-Department of Farm Buildings, Lund, Sweden: Swedish Univ. Agric. Sciences. 68
- GUSTAFSSON, G.; 1997:
Investigations of factors affecting air pollutants in animal houses.
In: Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 4, p. 203-215.
- GUSTAFSSON, G.; 1999:
Factors affecting the release and concentration of dust in pig houses.
In: Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, Vol. 74, No. 4, p. 379-390.

- GUSTAFSSON, G.; VON WACHENFELT, E. 2007:
Airborne dust control for floor housing systems for laying hen. Particulate Matter in and from Agriculture. 135-140, (Hrsg.) Hinz, T. und Tamoschat-Depolt, K., Hannover.
- HAEUSSERMANN, A.; 2006:
Minderungsmaßnahmen in der Mastschweinehaltung.
In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.: Emissionen der Tierhaltung. Messung, Beurteilung und Minderung von Gasen, Stauben und Keimen. KTBL-Schrift 449. Darmstadt: KTBL-Verlag, S. 192-210. ISBN 3-939371-19-X.
- HAEUSSERMANN, A.; D. FISHER; T. JUNGBLUTH; J. BAUR; E. HARTUNG; 2006:
Aerosol indoor concentration and particulate emission in fattening pigs husbandry.
In: Proceedings of Agricultural Engineering for a Better World. AgEng 2006, Bonn (Germany).
- HAEUSSERMANN, A.; M. GOTZ; E. HARTUNG; 2007:
Particulate emissions from deep-bedded growing-finishing pigs.
In: Proceedings of Dust Conference 2007. How to Improve Air Quality. International Conference, Maastricht, The Netherlands. 12 p.
- Haidn, B.; H.-J. MÜLLER; 2003:
Verfahren der freien Lüftung.
In: Lüftung von Schweineställen.
DLG-Arbeitsunterlage, 3. überarbeitete Fassung, Herbst 2003
- HARTUNG, J.; 1983:
Spurengase im Hühnerstallstaub
15. Kongress d. dtsh. Veterinärmed. Ges.,
Ber. Fortschr. Vet. Med. 37: 246 - 250
Bad Nauheim, 1983
- HARTUNG, E.; 2004:
Messung von Gasen und Partikeln – Maßnahmen zur Qualitätssicherung.
In: KTBL-Schrift 436: Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall. 74-91, ISBN 3-7843-2186-0, Hannover.
- HARTUNG, E.; K. OLLESCH; A. HAEUSSERMANN; M.A. RIEGER; H. DIEFENBACH; A. SUNDRUM; M. EBKE; M. LOHMEYER; 2004:
Airborne biological hazards and dust in fattening pig facilities with and without straw. In: Technological Institute: Engineering the Future. AgEng Leuven 2004. Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering [CD-Rom]. Leuven (Belgium).

- HARTUNG, J.; 2004:
Luftverunreinigungen in der Nutztierhaltung.
In: KTBL-Schrift 436: Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall. 7-19, ISBN 3-7843-2186-0, Hannover.
- HARTUNG, J.; 2005:
Beurteilung von Bioaerosol-Emissionen und –Immissionen aus der Tierhaltung.
TiHo Hannover, Institut für Tierhygiene, Tierschutz und Nutztierethologie.
- HARTUNG, J.; B. SPINDLER; 2008:
Beschäftigungsmaterial und Einstreu versus Partikelbelastung in der Nutztierhaltung - Probleme und Lösungsansätze.
In: Nutztierschutztagung 2008. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, Irdning, S. 55-61.
- HARTUNG, J.; M. SALEH; 2007:
Composition of dust and effects on animals.
In: Particulate matter in and from Agriculture. S. 111- 116, FAL Sonderheft 308, ISBN 978-3-86576-032-6, Braunschweig.
- HEBER, A.J.; C.R. MARTIN; 1988:
Effect of additives on aerodynamic segregation of dust from swine feed.
In: Transactions of the ASABE, Vol. 31, p. 558-563.
- HEBER, A.J.; M. STROIK; J.L. NELSEN; D.A. NICHOLS; 1988:
Influence of environmental factors on concentrations and inorganic content of aerial dust in swine finishing buildings.
In: Transactions of the ASAE, Vol. 31, No. 3, p. 875-881.
- HELLER, D.; B. KÖLLNER; 2007:
Bioaerosole im Umfeld von Tierhaltungsanlagen- Untersuchungsergebnisse aus Nordrhein-Westfalen.
Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz.
- HENSELER, J.; E. ROSENTHAL; P. LODOMEZ; C. NANNEN; B. DIEKMANN; W. BÜSCHER; 2009:
Resuspension von Partikeln aus Tierställen.
In: Landtechnik, 64, H. 3; S. 198-201.
- HENSELER-PABMANN, J.; 2010:
Untersuchungen zur Emission und Transmission von Feinstäuben aus Rinderställen.
Dissertation, Universität Bonn, VDI-Meg Schrift 490, ISSN 0931-6264.
- HILLIGER, H.G.; 1984:
Einleitung. In: DVG Tagungsbericht Dust in Animal Houses, Hannover, Nr. 898/222.

- HILLIGER, H.G.; C. AENGST; H.-H. ACKEMANN; 1984:
Minderung des Bakterien-gehaltes von Stallstaub unter dem Einfluss langfristiger Lagerung.
In: DVG Tagungsbericht Dust in Animal Houses, Hannover, Nr. 898/222.
- 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
- HÖLSCHER, R. : 2006:
Nachrüstlösungen zur Emissionsminderung dezentral entlüfteter Stallungen zur Schweinemast. Dissertation, Universität Bonn, VDI-MEG Schrift 446, ISSN 0931-6264.
- HOPPENHEIDT, K.; 2002:
Bioaerosole als Bestandteile von Feinstäuben.
BifA GmbH, Augsburg, ISBN 3-932108-15-9.
- HOPPENHEIDT, K.; W. MÜCKE; 1998:
Bioaerosole in Innenräumen.
BifA GmbH.
- INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG; 2006:
Laborinformation des Instituts für Tierernährung der Universität Bonn.
Erstellungsdatum 6.11.2006, Bonn.
- ISO 7708; 1995:
Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme.
Beuth-Verlag
- JAEGER, J.; 2011:
Feinstaubbelastung in der Volierenhaltung – Belastungssituation und Stand der Technik der Minderungsmaßnahmen. Bachelorarbeit. Universität Bonn.
- JUNGBLUTH, T.; W. BÜSCHER; M. KRAUSE; 2005:
Technik Tierhaltung: Grundwissen Bachelor
Verlag Eugen Ulmer Stuttgart,
ISBN 3-8252-2641-7

- 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
- KECK, M.; K. ZEYER; L. EMMENEGGER; 2004:
Emissions of NH₃ and PM₁₀ from closed housing and housing combined with open exercise yards for growing-finishing pigs.
In: Technological Institute: Engineering the Future. AgEng Leuven 2004.
Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering [CDRom].
Leuven (Belgium).
- KIRCHGEBNER ,M.; 2004:
Tierernährung. 11. Auflage. DLG-Verlag, ISBN 3-7690-0594-5, 2004.
- KISTNER, R.;2005:
Berufskrankheiten-Statistik der landwirtschaftlichen Unfallversicherungen - Erfassung und Auswertung.
In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.:
Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall.
Herkunft, Erfassung, Wirkung, Maßnahmen.
KTBL-Schrift 436. Darmstadt: KTBL-Verlag, S. 52-60. ISBN 3-7843-2186-0.
- KRAUSE, K.H.: H.-J. MÜLLER; 2007:
Flow Simulation for Design of Ventilation Systems in Animal Houses,
Proceedings: Building Simulation 2007. S. 932-936
- KRUSKAL, W.H.; WALLIS, W.A.; 1952:
Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association, Vol. 47, No. 260, pp. 83-621
- KTBL (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT); 2006:
Nationaler Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren
KTBL Schrift 446, ISBN 3-939371-13-0, Ausgabe 2006
- KTBL (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT); 2009:
Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Auflage. Darmstadt: KTBL-Verlag.
ISBN 978-3-939371-91-5.
- KTBL-SCHRIFT 447; 2006:
Handhabung der TA Luft bei Tierhaltungsanlagen- Ein Wegweiser für die Praxis.
1. Auflage. KTBL-Verlag, ISBN 13: 978-3-939371-14-4, Darmstadt.

- KTBL-SCHRIFT 477; 2009:
Umweltverträglichkeitsprüfung bei Tierhaltungsanlagen- Ein Wegweiser für die Praxis. KTBL-Verlag, ISBN 978-3-939371-78-8, Darmstadt.
- KULLMAN, G.; P. THORNE; P. WALDRON; 1998:
Organic dust exposures from work in dairy barns.
AHIA Journal, Band 59, Artikel 6.
- LAVES TIERSCHUTZDIENST; 2007:
Tierschutzleitlinie für die Milchkuhhaltung.
Arbeitsgruppe Rinderhaltung, Niedersachsen.
- LI, X.; J.E. OWEN; C.C. PEARSON; 1992:
Dust from animal feeds.
In: Proceedings of the Seminar on the 2nd. Technical section of the CIGR: Energy and Environmental Aspects of Livestock housing. Wroclaw (Poland).
- LKV; 2008:
Landesverband Baden-Württemberg, Leistungs- und Qualitätsprüfung in der Tierzucht. Statistische Daten der Erzeugerringe in B.-W., Beratung und Service-Schrift
- LOHMANN, L.; 2004:
Ergebnisse von Staubmessungen in verschiedenen Stallungen Nordrhein-Westfalens.
In: KTBL-Schrift 436: Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall. 122-127, ISBN 3-7843-2186-0, Hannover.
- MAGHIRANG, R.G.; M.C. PUMA; Y. LIU; P.CLARK; 1997:
Dust concentrations and particle size distribution in an enclosed swine nursery.
In: Transactions of the ASAE, Vol. 40, No. 3, p. 749-754.
- MOSTAFA, E.; 2008:
Improvement of air quality in laying hens barn using different particle separation techniques. Dissertation, Universität Bonn, VDI-MEG Schrift 473, ISSN 0931-6264
- MOSTAFA, E.; BÜSCHER, W.; 2011:
Indoor air quality improvement from particle matters for laying hen poultry houses. Biosystems Engineering 109, 22-36
- MÜCKE, W.; 2002:
Wirkung und Erfassung von Fein- und Ultrafeinstäuben.
Institut für Toxikologie und Umwelthygiene der Technischen Universität München, ISBN 3-932108-15-9.

- 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, W.; P. WIESER; H. KUHME; 1977:
Zur Größe Kolonien-bildender Einheiten in der Stallluft. In: Berliner und
Münchener Tierärztliche Wochenzeitschrift, 90, S. 6-11.
- NANNEN, C., W. BÜSCHER; 2007:
Analyse der Zusammensetzung von Staubemissionen aus Ställen verschiedener
Nutztierarten und Bestimmung des Gravimetriefaktors.
USL-Bericht 144.
- NANNEN, C.; 2005:
Mikroskopische Untersuchungen von Staubpartikeln in Mastschweinställen
Landtechnik, Heft 4, 2006, S. 60 - 61
- NANNEN, C.; 2007:
Staubemissionen aus Schweineställen- Bestimmung von Einflussfaktoren auf die
Partikelfreisetzung und deren Zusammensetzung.
Dissertation, Universität Bonn, VDI-MEG Schrift 461, ISSN 0931-6264.
- NANNEN, C.; G. SCHMITT-PAUKSZTAT; W. BÜSCHER; 2005:
Mikroskopische Untersuchungen von Staubpartikeln in Mastschweinställen.
Unterschiede zwischen Flüssig- und Trockenfütterung.
In: Landtechnik, 2005, Jg. 60, H. 4, S. 218-219.
- NANNEN, C.; W. BÜSCHER; 2006:
Einfluss der Tieraktivität auf Staubfreisetzung und Partikelemissionen.
Untersuchungen in Mastschweine-Ställen.
In: Landtechnik, 61, H. 1, S. 36-37.
- NANNEN, C.; 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.
- NANNEN, C.; W. BÜSCHER; 2007:
Particle emissions from German livestock buildings-influences and fluctuation
factors.
In: Particulate Matter in and from Agriculture. S. 39 – 44, FAL Sonderheft 308,
ISBN 978-3-86576-032-6, Braunschweig.

- NANNEN, C.; W. BÜSCHER; 2008:
Einfluss der Tieraktivität auf die Partikelmassenzusammensetzung in verschiedenen Haltungssystemen der Schweinemast.
In: Landtechnik, 63, H. 3, S. 170-171.
- NESER, S.; 2006:
Partikelemissionen aus der Nutztierhaltung.
In: KTBL-Schrift 449 Emissionen der Tierhaltung. S. 94-103, Bildungszentrum Kloster Banz, 5.-7.12.2006, ISBN 13: 978-3-939371-19-9.
- NIEHAUS, B.; 2011:
Partikelinnenraumkonzentrationen in der Schweinehaltung – Untersuchungen zur Belastungssituation in zwangsbelüfteten Ställen.
Diplomarbeit. Universität Bonn.
- 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.; 1993:
Time based variation in airborne dust in respect to animal activity.
Proceedings of the 4th International Symposium „Livestock Environment IV“ in Coventry, 6. - 9. Juli 1993, England, S. 718 - 725
- PEDERSEN, S.; 1998:
Staubreduzierung in Schweineställen.
Deutsche Tierärztliche Wochenschrift, 105, S. 247-250.
- PEDERSEN, S.; 2004:
Maßnahmen zur Minderung der Partikelbelastung in Ställen.
In: KTBL-Schrift 436: Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall. S. 174-181, ISBN 3-7843-2186-0, Hannover.
- 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
- RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND RATES
vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa; 2008:
Amtsblatt der Europäischen Union (2008) Nr. L 152, S. 1-44.
- ROSENTHAL, E.; T. SCHNEIDER; W. BÜSCHER; B. DIEKMANN; 2007:
Sedimentation von tierartspezifischen Stäuben im Stallinnenraum.
In: Landtechnik, 62, H. 2, S.102-103.

- RÖSMANN, P.; 2009:
Untersuchungen zur Luftqualität und zu den physikalischen Feinstaub-Kennwerten in der Kleingruppenhaltung für Legehennen „Eurovent EV 625A-EU“
Diplomarbeit. Universität Bonn.
- SALEH, M; 2006:
Untersuchungen zur Luftqualität in verschiedenen Systemen der Geflügelhaltung mit besonderer Berücksichtigung von Staub und Luftkeimen.
Dissertation, Hannover.
- SCAIFE, H.; 2008:
PPC bioaerosols (dust and particulates) potentially emanating from intensive agriculture and potential effects on human health.
Environment Agency, ISBN 978-1-84432-878-9.
- SCHIER, F.; 2004:
Verfahrenstechnische Bewertung mehrstufiger Abluftreinigungssysteme in der Mastschweinehaltung und deren Zertifizierbarkeit. Dissertation, Universität Bonn, VDI-MEG Schrift 428, ISSN 0931-6264
- SCHMIDT, D.; L.D. JACOBSON; K.A. JANNI; 2002:
Continuous monitoring of ammonia, hydrogen sulfide and dust emissions from swine, dairy and poultry barns. In: Proceedings of 2002 ASAE Annual International Meeting/ CIGR XVth World Congress. Chicago, Illinois (USA).
- SCHMITT, G.; O. WALLENFANG; W. BÜSCHER; B. DIEKMANN; 2004:
Partikelkonzentrationen in der Stallabluft. Ein Vergleich mit der Innenraumkonzentration.
In: Landtechnik, 59, H. 6, S.334-335.
- SCHNEIDER, T.; 2006:
Untersuchungen zur Partikelemission eines frei gelüfteten Putenstalles mit Hilfe der Tracergasmethode. VDI-MEG-Schrift 439, ISSN 0931-6264
- SCHNEIDER, T.; E. ROSENTHAL; W. BÜSCHER; B. DIEKMANN; 2006:
Einflussgrößen auf Emission, Transmission und Immission von Partikeln.
In: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.: Emissionen der Tierhaltung. Messung, Beurteilung und Minderung von Gasen, Stäuben und Keimen.
KTBL-Schrift 449. Darmstadt: KTBL-Verlag, S. 104-114. ISBN 3-939371-19-X
- SCHRADE, S.; 2009:
Ammoniak- und PM10-Emissionen im Laufstall für Milchvieh mit freier Lüftung und Laufhof anhand einer Tracer-Ratio-Methode.
Dissertation, Universität Kiel, VDI-Meg-Schrift 483.

- SEEDORF, J.; J. HARTUNG; 2000:
Emission of Airborne Particulates from Animal Production.
Conference in School of veterinary Medicine Hannover, 28.-29.9.2000
- SEEDORF, J.; J. HARTUNG; 2002:
Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung.
KTBL-Schrift 393, KTBL-Verlag, ISBN 3-7843-2145-3, Darmstadt.
- SHEFFIELD, R.E.; M. MARTI; 2011:
Air Quality in a Low Profile Cross Ventilated Dairy Barn.
Louisiana State University, www.asi.k-state.edu. Zuletzt aufgerufen am
10.03.2011.
- STERNBERG, L.; 2011:
Rastermessungen zur Überprüfung der Feinstaubbelastung in unterschiedlichen
Schweinemastställen. Bachelorarbeit. Universität Bonn.
- SZABO, E. 2007:
Experimentelle Untersuchungen luftgetragener Partikel und Schimmelpilze in
Perdeställen. Berichte aus Forschungsprojekten der Mehl-Mühlens-Stiftung.
Cuvillier Verlag, Göttingen ISBN 978-3-86727-616-0
- 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.
- TAKAI, H.; L.D. JACOBSON; S. PEDERSEN ; 1996:
Reduction of dust concentration and exposure in pig buildings by adding animal fat
in feed.
In: Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 63, p. 113-120.
- TAKAI, H.; S. PEDERSEN; 2000:
Dust Control Methods in Pig Confinement Buildings.
In: Proceedings of the XIV Memorial CIGR World Congress 2000 [CD-Rom].
- TA-LUFT; 2002:
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz.
Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft.
- THALER, R.C.; A.J.A. AARNINK; T.E. SAUBER; 2002:
Effect of grain type, milking method, and diet form on dust production in a
laboratory dust generator.
In: Journal of Animal Science, Vol. 80, p. 178.

- THANH, V.T.; E. VRANKEN; A. AN BRECHT; D. BERKMANS 2007:
Data-based mechanistic modeling for controlling in three dimensions the temperature distribution in a room filled with obstacles. *Biosystems Engineering*, 98, 54 – 65
- TIERSCHUTZ-NUTZTIERHALTUNGSVERORDNUNG; 2006:
Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung.
Bekanntmachung 22.08.2006 (BGBl I 06,2043).
- TOPISIROVIC, G.; D. RADIVOJEVIC; 2005:
Influence of ventilation systems and related energy consumption on inhalable dust concentrations in fattening pigs confinement buildings.
Energy and buildings 37, 1241-1249.
- VDI-RICHTLINIE 2066, BLATT 1; 1975:
Messungen von Partikeln – Staubmessungen in strömenden Gasen -
Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung – Übersicht. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin.
- VDI-RICHTLINIE 2463, BLATT 1; 1999:
Messen von Partikeln - Gravimetrische Bestimmung der Massenkonzentration von Partikeln in der Außenluft - Grundlagen. Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag, Berlin.
- WANG, X. Y. ZHANG; G.L. RISKOWSKI; M. ELLIS; 2002:
Measurement and Analysis of Dust Spatial Distribution in a Mechanically Ventilated Pig Building.
In: *Biosystems Engineering*, Vol. 81, No. 2, p. 225-236.
- WEISS, J. ; PABST, W. ; STRACK, K. E. ; GRANZ, S.; 2000:
Tierproduktion. 12.Auflage. Parey Buchverlag, ISBN 3-8263-3217-2, Berlin.
- WICHMANN, H.-E.; 2002:
Epidemiologische Erfahrungen zur Wirkung von Fein- und Ultrafeinstäuben.
Institut für Epidemiologie, LMU München, ISBN 3-932108-15-9.
- WÜRBS, R.; 2005:
Rechtliche Rahmenbedingungen – autonomes Recht. In *KTBL-Schrift 436*
„Luftgetragene biologische Belastungen und Infektionen am Arbeitsplatz Stall“.
Darmstadt. ISBN-3-7843-2186-0
- ZEITLER, M.H.; 1988:
Hygienische Bedeutung des Staub- und Keimgehaltes der Stallluft.
In: *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt*, 65, S. 151-165.

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 Mastschweineeställen

Deutsche Tierärztl. Wochenschrift 1987, Vol. 94(7), S. 420 – 424.

ZOO, L.; T. COMBS; J.N. RAUSCH; 2008:

Air Quality in New Free-Stall Dairy Facilities.

AEX-732-08.

ZUCKER, B.-A.; H. BONIN; W. MÜLLER; 2005:

Relationship between the concentration of different air contaminants and the hygienic condition in two pig fattening houses.

In: ISAH 2005. Warsaw (Poland). p. 380-382.

8 Anhang

Tabelle A 1: Technische Daten des Aerosolspektrometers Grimm Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 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), Auflösung 10 Bit (ca. 10mV)
Datenschnittstelle	RS-232 (9600 Bd, 8 Bit, keine Parität, 1 Stop-Bit)
Datenspeicherkarte	512 Kbyte-1Mbyte
Stromversorgung	Batterie 12 V/ 2,3 Ah, Typ LC-SA 122R3B6 Panasonic vollgeladen für 7-8 Stunden Dauerbetrieb, 18 V-Netzteil: MI2818, AC 95-250V, 47-63 Hz, Schutzklasse 2 (schutzisoliert)
Betriebstemperatur	0 bis +40 °C, r.F. <95 % (nicht kondensierend)
Probenluft	+4 bis +40 °C, r.F. <95 % (nicht korrosiv)

Tabelle A 2: Kalibrierfaktoren des Aerosolspektrometers I zum Referenzgerät

Partikelgrößenklassen [µm]														
>0,30	>0,40	>0,50	>0,65	>0,80	>1,00	>1,60	>2,00	>3,00	>4,00	>5,00	>7,50	>10,0	>15,0	>20,0
1,45	1,03	0,94	0,97	1,15	1,04	1,06	1,04	1,03	0,91	0,88	1,07	0,73	0,75	1,65

Tabelle A 3: 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 Feuchtfühler (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 4: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 4

Messpunkt		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{total}
1,00	Mittelwert	1588,7483	12257,6615	30754,9107
	N	89	89	89
	Standardabweichung	148,79093	1502,87627	5119,53670
	Minimum	1291,92	9516,60	22182,19
	Maximum	1814,43	14653,66	38978,08
	Varianz	22138,740	2258637,093	2,621E7
2,00	Mittelwert	884,9397	6435,8310	15054,7832
	N	90	90	90
	Standardabweichung	108,71999	699,52217	1852,16398
	Minimum	747,96	5433,95	11796,40
	Maximum	1204,01	8648,43	20773,28
	Varianz	11820,036	489331,273	3430511,420
3,00	Mittelwert	922,1227	6687,9586	16284,3736
	N	90	90	90
	Standardabweichung	82,89628	758,91366	2555,80719
	Minimum	772,94	5572,42	13189,52
	Maximum	1150,19	8657,23	22717,26
	Varianz	6871,794	575949,939	6532150,414
4,00	Mittelwert	743,7131	6133,9026	19117,5400
	N	90	90	90
	Standardabweichung	279,51919	3819,71466	18455,15683
	Minimum	452,35	3277,63	7619,33
	Maximum	1750,27	20500,09	89391,54
	Varianz	78130,979	1,459E7	3,406E8
5,00	Mittelwert	1845,0322	15236,6560	43049,8574
	N	91	91	91
	Standardabweichung	344,45637	2833,99982	8915,40812
	Minimum	1215,97	10159,36	26922,50
	Maximum	2555,35	20774,98	73746,25
	Varianz	118650,193	8031554,989	7,948E7
6,00	Mittelwert	1757,6067	14267,0698	41811,1393
	N	90	90	90
	Standardabweichung	391,41156	3382,70076	13945,81828
	Minimum	1162,27	8929,66	21017,75
	Maximum	2474,98	20680,90	75704,76

	Varianz	153203,008	1,144E7	1,945E8
7,00	Mittelwert	1142,8664	8670,1668	20960,8729
	N	90	90	90
	Standardabweichung	238,03113	1800,19547	4635,23345
	Minimum	841,23	6482,39	14389,38
	Maximum	1755,16	13325,75	30478,08
	Varianz	56658,820	3240703,737	2,149E7
8,00	Mittelwert	1155,0291	8442,2390	18753,4500
	N	88	88	88
	Standardabweichung	249,35178	1902,49980	4024,85042
	Minimum	745,03	4679,19	10285,74
	Maximum	1728,54	12628,45	27783,88
	Varianz	62176,309	3619505,501	1,620E7
9,00	Mittelwert	484,8577	3791,3268	9497,0631
	N	90	90	90
	Standardabweichung	150,33641	1376,17696	4789,77977
	Minimum	307,77	2124,35	4258,18
	Maximum	729,44	7191,43	25943,57
	Varianz	22601,036	1893863,019	2,294E7
10,00	Mittelwert	284,0856	2202,2959	5346,7203
	N	68	68	68
	Standardabweichung	45,08556	349,80858	899,70882
	Minimum	210,13	1590,16	3329,88
	Maximum	363,70	2865,12	7097,98
	Varianz	2032,708	122366,040	809475,954
11,00	Mittelwert	1065,0280	7985,4129	13059,3937
	N	89	89	89
	Standardabweichung	121,98103	1063,74459	1875,33083
	Minimum	735,63	5505,62	8874,10
	Maximum	1276,38	9889,27	17813,81
	Varianz	14879,372	1131552,548	3516865,725
12,00	Mittelwert	497,2792	3608,6429	5490,4840
	N	90	90	90
	Standardabweichung	54,86739	410,21481	718,21873
	Minimum	354,45	2680,56	3935,91
	Maximum	594,58	4570,59	7121,83
	Varianz	3010,430	168276,187	515838,140
13,00	Mittelwert	587,5455	4044,3525	6227,9095
	N	90	90	90

	Standardabweichung	155,01092	1363,03636	2601,48673
	Minimum	453,09	2882,63	3929,22
	Maximum	1185,41	8782,59	14397,46
	Varianz	24028,386	1857868,125	6767733,216
14,00	Mittelwert	610,2444	4859,6530	8383,0325
	N	90	90	90
	Standardabweichung	255,37199	2071,94831	3665,71142
	Minimum	318,23	2329,95	3764,27
	Maximum	1199,13	9568,78	16555,63
	Varianz	65214,853	4292969,793	1,344E7
15,00	Mittelwert	1051,1830	7921,7636	13512,3060
	N	90	90	90
	Standardabweichung	287,22366	2030,54443	3476,90602
	Minimum	629,29	4560,83	7365,67
	Maximum	1465,28	12626,55	24007,99
	Varianz	82497,428	4123110,676	1,209E7
16,00	Mittelwert	927,8028	7191,9370	12598,2889
	N	91	91	91
	Standardabweichung	220,23397	1609,33624	3427,01815
	Minimum	550,84	4240,61	6664,58
	Maximum	1368,86	10033,98	20561,43
	Varianz	48503,002	2589963,149	1,174E7
17,00	Mittelwert	1306,7420	12324,4129	24244,2536
	N	90	90	90
	Standardabweichung	653,78374	5496,75447	11852,78820
	Minimum	552,36	4466,57	7398,99
	Maximum	2482,10	20413,12	50951,06
	Varianz	427433,181	3,021E7	1,405E8
18,00	Mittelwert	1670,6054	14295,0348	26161,2301
	N	88	88	88
	Standardabweichung	527,84634	4502,25954	9027,20116
	Minimum	816,53	7591,98	12614,49
	Maximum	2767,20	24369,65	43698,50
	Varianz	278621,764	2,027E7	8,149E7
19,00	Mittelwert	515,9196	4110,5897	6699,6530
	N	90	90	90
	Standardabweichung	203,82685	1750,33513	3084,43144
	Minimum	316,81	2316,12	3357,35
	Maximum	901,85	7586,95	12871,32

	Varianz	41545,384	3063673,081	9513717,337
20,00	Mittelwert	280,3950	2292,4277	3793,1157
	N	68	68	68
	Standardabweichung	40,65757	332,09298	800,03843
	Minimum	209,12	1698,43	2832,37
	Maximum	368,22	2836,82	5564,54
	Varianz	1653,038	110285,745	640061,492
Insgesamt	Mittelwert	982,3096	7766,0772	17347,5811
	N	1752	1752	1752
	Standardabweichung	539,28063	4621,00869	13209,16509
	Minimum	209,12	1590,16	2832,37
	Maximum	2767,20	24369,65	89391,54
	Varianz	290823,601	2,135E7	1,745E8

Tabelle A 5 Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 5

		Bericht		
Messpunkt		PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{total}
3,00	Mittelwert	761,4707	5904,4854	13299,2450
	N	99	99	99
	Standardabweichung	138,66018	1204,60649	2605,84609
	Minimum	303,84	1910,37	3110,46
	Maximum	928,87	7128,87	16327,55
	Varianz	19226,646	1451076,800	6790433,842
4,00	Mittelwert	625,1487	4716,6348	9847,5079
	N	100	100	100
	Standardabweichung	69,22911	605,05007	1433,24849
	Minimum	505,56	3844,66	7899,54
	Maximum	771,99	5934,41	13163,23
	Varianz	4792,669	366085,581	2054201,222
5,00	Mittelwert	526,3310	3875,7464	8419,9383
	N	100	100	100
	Standardabweichung	47,89325	359,09436	1147,95189
	Minimum	426,74	3144,40	6162,39
	Maximum	610,99	4521,25	10549,29
	Varianz	2293,764	128948,761	1317793,546
6,00	Mittelwert	554,5222	4131,0498	9175,1322

	N	99	99	99
	Standardabweichung	77,50255	666,77586	1840,21851
	Minimum	435,75	3168,33	6215,23
	Maximum	726,47	5607,49	13351,33
	Varianz	6006,646	444590,047	3386404,148
7,00	Mittelwert	588,1886	4325,8555	9180,2948
	N	91	91	91
	Standardabweichung	70,15398	682,10321	2160,87981
	Minimum	471,75	2988,16	4268,97
	Maximum	736,00	5817,32	14229,51
	Varianz	4921,581	465264,794	4669401,543
8,00	Mittelwert	401,5695	2750,0860	5547,6329
	N	100	100	100
	Standardabweichung	62,61399	476,16621	1037,37354
	Minimum	319,16	2161,78	4041,56
	Maximum	527,42	3804,34	8214,16
	Varianz	3920,511	226734,260	1076143,862
9,00	Mittelwert	563,6312	4237,5303	10125,1773
	N	100	100	100
	Standardabweichung	59,87476	687,20166	3365,35736
	Minimum	380,09	2574,74	5249,47
	Maximum	655,89	5676,07	19526,64
	Varianz	3584,987	472246,120	1,133E7
10,00	Mittelwert	479,0989	3447,4211	7329,4913
	N	100	100	100
	Standardabweichung	65,72166	495,62174	1178,81352
	Minimum	370,88	2548,61	4824,78
	Maximum	602,91	4314,30	9639,85
	Varianz	4319,337	245640,909	1389601,304
11,00	Mittelwert	589,8317	5406,6376	9032,9695
	N	99	99	99
	Standardabweichung	71,58374	731,62814	1123,56272
	Minimum	467,96	4321,85	7238,19
	Maximum	696,14	6727,15	11265,46
	Varianz	5124,232	535279,734	1262393,178
12,00	Mittelwert	451,4819	4083,7147	6978,0481
	N	100	100	100
	Standardabweichung	51,89071	568,04312	1320,03293
	Minimum	380,46	3357,04	5216,16

	Maximum	568,86	5301,83	9674,45
	Varianz	2692,646	322672,988	1742486,947
13,00	Mittelwert	465,3103	4113,1536	6921,8599
	N	99	99	99
	Standardabweichung	44,77872	468,11502	810,69458
	Minimum	383,47	3137,60	5100,80
	Maximum	539,07	4932,89	8346,43
	Varianz	2005,134	219131,672	657225,694
14,00	Mittelwert	508,0621	4565,4483	7702,4524
	N	100	100	100
	Standardabweichung	37,08893	326,69238	693,26702
	Minimum	442,98	3974,09	6637,63
	Maximum	598,15	5276,30	9122,77
	Varianz	1375,589	106727,912	480619,163
15,00	Mittelwert	364,9296	3013,2007	4889,6650
	N	100	100	100
	Standardabweichung	30,72165	378,69584	767,06342
	Minimum	313,68	2460,71	3600,58
	Maximum	440,74	3892,21	6505,13
	Varianz	943,820	143410,542	588386,285
16,00	Mittelwert	440,5990	3418,0331	5157,7451
	N	99	99	99
	Standardabweichung	49,44175	388,42111	643,43927
	Minimum	324,68	2423,06	3526,10
	Maximum	509,76	4053,86	6426,70
	Varianz	2444,487	150870,959	414014,092
17,00	Mittelwert	533,4070	4162,7728	6122,7932
	N	91	91	91
	Standardabweichung	67,29928	569,78923	944,24263
	Minimum	415,72	3036,80	4141,87
	Maximum	639,88	5191,59	7961,76
	Varianz	4529,193	324659,761	891594,141
18,00	Mittelwert	380,0790	3158,5670	4909,3065
	N	100	100	100
	Standardabweichung	43,37648	375,54203	680,13528
	Minimum	326,05	2622,50	3923,45
	Maximum	459,85	3832,62	6143,60
	Varianz	1881,519	141031,818	462583,994
19,00	Mittelwert	429,9556	3556,9977	5736,6458

	N	100	100	100
	Standardabweichung	46,67547	473,39187	883,01320
	Minimum	322,84	2666,09	4542,78
	Maximum	516,84	4514,19	7828,02
	Varianz	2178,600	224099,858	779712,305
20,00	Mittelwert	411,7997	3284,5376	5001,8859
	N	100	100	100
	Standardabweichung	38,52900	305,22788	530,56874
	Minimum	332,56	2639,93	3939,98
	Maximum	474,59	3847,95	6004,12
	Varianz	1484,484	93164,060	281503,192
Insgesamt	Mittelwert	503,4528	4004,3985	7516,2996
	N	1777	1777	1777
	Standardabweichung	116,54518	981,43340	2677,05705
	Minimum	303,84	1910,37	3110,46
	Maximum	928,87	7128,87	19526,64
	Varianz	13582,780	963211,527	7166634,428

Tabelle A 6: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 6

Messpunkt		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{total}
1,00	Mittelwert	331,1753	2256,8253	4450,7390
	N	115	115	115
	Standardabweichung	83,30811	591,45801	1496,03806
	Minimum	227,59	1444,81	2243,42
	Maximum	482,87	3327,35	7385,38
	Varianz	6940,242	349822,574	2238129,885
2,00	Mittelwert	223,0314	1507,8622	3004,0215
	N	115	115	115
	Standardabweichung	22,97505	158,07623	469,74700
	Minimum	168,29	1043,81	1736,37
	Maximum	284,72	1865,82	4071,55
	Varianz	527,853	24988,094	220662,240
3,00	Mittelwert	208,8419	1455,4548	3011,9857
	N	115	115	115
	Standardabweichung	29,91004	201,50027	480,80311

	Minimum	153,94	1036,72	1757,03
	Maximum	271,82	1890,49	4160,04
	Varianz	894,610	40602,360	231171,626
4,00	Mittelwert	240,4047	1741,1471	3881,1260
	N	115	115	115
	Standardabweichung	54,23085	495,56261	1771,78026
	Minimum	180,79	1155,29	1990,92
	Maximum	399,63	3119,83	8548,24
	Varianz	2940,985	245582,300	3139205,292
5,00	Mittelwert	276,6409	1997,5504	4458,2286
	N	115	115	115
	Standardabweichung	94,65693	766,25966	1772,39377
	Minimum	173,17	1155,52	2308,75
	Maximum	426,13	3194,65	7680,04
	Varianz	8959,935	587153,865	3141379,672
6,00	Mittelwert	390,0128	2866,6942	6768,5984
	N	115	115	115
	Standardabweichung	91,84565	890,59466	3611,49448
	Minimum	276,41	1655,45	2863,63
	Maximum	593,19	5006,83	17362,71
	Varianz	8435,624	793158,857	1,304E7
7,00	Mittelwert	397,0844	2895,2099	6832,7958
	N	115	115	115
	Standardabweichung	52,11023	415,03121	1307,42359
	Minimum	322,30	2407,09	5110,03
	Maximum	532,09	3985,29	11097,23
	Varianz	2715,476	172250,906	1709356,440
8,00	Mittelwert	303,1227	2092,0770	4242,7757
	N	115	115	115
	Standardabweichung	61,19098	494,58023	1512,72428
	Minimum	202,68	1360,61	2162,21
	Maximum	441,19	3256,80	8020,71
	Varianz	3744,336	244609,601	2288334,747
9,00	Mittelwert	308,7991	2130,8269	4846,7926
	N	126	126	126
	Standardabweichung	100,25860	747,36251	2033,36701
	Minimum	45,72	415,15	1803,54
	Maximum	460,58	3330,38	8631,70
	Varianz	10051,787	558550,722	4134581,395

11,00	Mittelwert	384,5884	3593,4545	5939,9415
	N	115	115	115
	Standardabweichung	52,38601	498,65796	898,11046
	Minimum	264,64	2386,99	4001,88
	Maximum	460,10	4309,09	7689,47
	Varianz	2744,294	248659,765	806602,404
12,00	Mittelwert	314,8984	2962,8795	5008,3263
	N	115	115	115
	Standardabweichung	44,75993	478,13920	982,24724
	Minimum	226,12	2081,39	3309,72
	Maximum	399,51	4008,81	7600,03
	Varianz	2003,451	228617,093	964809,648
13,00	Mittelwert	276,3523	2758,5967	4886,6325
	N	115	115	115
	Standardabweichung	26,61596	389,65903	1111,53885
	Minimum	205,10	1913,52	3090,46
	Maximum	319,35	3607,77	8046,95
	Varianz	708,409	151834,160	1235518,623
14,00	Mittelwert	264,3029	2532,4103	4257,9390
	N	115	115	115
	Standardabweichung	22,99527	314,35068	851,54697
	Minimum	223,58	2043,60	3183,84
	Maximum	319,78	3321,33	6971,32
	Varianz	528,782	98816,351	725132,250
15,00	Mittelwert	450,8848	4548,8842	8094,1049
	N	115	115	115
	Standardabweichung	170,94520	2109,85795	4668,77308
	Minimum	244,19	2370,44	3769,05
	Maximum	856,42	10088,64	20793,41
	Varianz	29222,263	4451500,564	2,180E7
16,00	Mittelwert	497,4854	4790,9804	7816,7003
	N	115	115	115
	Standardabweichung	136,39593	1613,34599	2991,63551
	Minimum	317,56	2791,31	4069,25
	Maximum	773,00	7796,43	13162,44
	Varianz	18603,851	2602885,293	8949883,019
17,00	Mittelwert	631,7742	6203,3406	10261,1630
	N	115	115	115
	Standardabweichung	101,93778	1077,20708	1897,72282

	Minimum	473,78	4518,37	7590,06
	Maximum	900,98	8711,88	14901,56
	Varianz	10391,311	1160375,103	3601351,920
18,00	Mittelwert	353,6969	3141,6380	4962,0276
	N	115	115	115
	Standardabweichung	51,14392	558,78559	1055,58576
	Minimum	284,66	2384,94	3559,13
	Maximum	501,79	4651,46	7691,76
	Varianz	2615,701	312241,332	1114261,292
19,00	Mittelwert	330,5290	2937,6298	4454,0903
	N	126	126	126
	Standardabweichung	126,01509	1188,73600	1807,44839
	Minimum	10,20	42,96	83,53
	Maximum	485,65	4412,55	7352,29
	Varianz	15879,804	1413093,268	3266869,690
Insgesamt	Mittelwert	343,2837	2907,8877	5390,9075
	N	2092	2092	2092
	Standardabweichung	132,05487	1474,98358	2712,03930
	Minimum	10,20	42,96	83,53
	Maximum	900,98	10088,64	20793,41
	Varianz	17438,487	2175576,556	7355157,177

Tabelle A 7: Mittelwertvergleich der Homogenitätsanalyse von Schweinemaststall 7

Messpunkt		PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{total}
1,00	Mittelwert	217,9738	2150,8334	6588,3898
	N	128	128	128
	Standardabweichung	86,40880	830,68936	3362,14301
	Minimum	7,88	26,81	94,21
	Maximum	405,11	3594,76	16716,55
	Varianz	7466,482	690044,810	1,130E7
2,00	Mittelwert	522,9494	5708,9971	17576,7358
	N	128	128	128
	Standardabweichung	130,66955	1554,91790	5440,18062
	Minimum	277,78	3089,55	9562,93
	Maximum	797,00	8972,98	31580,59
	Varianz	17074,531	2417769,670	2,960E7

3,00	Mittelwert	330,5233	3430,8496	9348,3199
	N	128	128	128
	Standardabweichung	70,70434	783,34386	2434,99617
	Minimum	262,54	2584,05	6577,00
	Maximum	540,69	6013,11	16819,56
	Varianz	4999,103	613627,605	5929206,371
4,00	Mittelwert	360,5288	3712,8332	10285,1021
	N	128	128	128
	Standardabweichung	64,70186	767,39737	2620,09433
	Minimum	270,90	2595,62	6559,07
	Maximum	513,36	5417,14	16364,39
	Varianz	4186,331	588898,720	6864894,299
5,00	Mittelwert	374,6388	3761,0612	10113,2902
	N	128	128	128
	Standardabweichung	72,70632	969,42256	3985,53957
	Minimum	268,49	2414,28	4606,81
	Maximum	536,72	6183,25	20549,73
	Varianz	5286,209	939780,093	1,588E7
6,00	Mittelwert	316,1988	2971,3644	7315,6368
	N	128	128	128
	Standardabweichung	118,89064	1359,19676	4349,50115
	Minimum	186,46	1545,94	3104,97
	Maximum	600,02	6356,28	19839,44
	Varianz	14134,984	1847415,826	1,892E7
7,00	Mittelwert	295,2622	2761,0480	6357,1115
	N	128	128	128
	Standardabweichung	47,47639	527,65711	1426,61002
	Minimum	179,73	1465,69	2987,33
	Maximum	428,84	3958,39	10311,20
	Varianz	2254,008	278422,026	2035216,149
8,00	Mittelwert	313,5554	2945,5227	7082,5716
	N	128	128	128
	Standardabweichung	129,12350	1240,66071	3257,71481
	Minimum	155,93	1441,41	3371,26
	Maximum	562,10	5590,63	15079,52
	Varianz	16672,879	1539238,995	1,061E7
9,00	Mittelwert	251,2201	2364,6954	5790,2276
	N	128	128	128
	Standardabweichung	75,27764	874,30337	2917,39310

	Minimum	170,71	1562,08	3141,77
	Maximum	671,65	7240,90	21586,32
	Varianz	5666,723	764406,376	8511182,502
10,00	Mittelwert	306,3786	3023,8144	8040,9297
	N	128	128	128
	Standardabweichung	149,37802	1722,85149	5313,74987
	Minimum	63,85	908,43	3515,12
	Maximum	771,24	8694,15	26490,43
	Varianz	22313,792	2968217,255	2,824E7
11,00	Mittelwert	244,7405	2777,0618	5745,9463
	N	128	128	128
	Standardabweichung	25,73743	304,01381	2129,95001
	Minimum	179,86	2038,44	3584,71
	Maximum	310,31	3612,55	16356,13
	Varianz	662,415	92424,397	4536687,052
12,00	Mittelwert	465,2765	5240,3418	9924,7224
	N	128	128	128
	Standardabweichung	80,14395	1080,10066	2596,79339
	Minimum	320,38	3380,30	5677,21
	Maximum	602,97	7262,19	16172,78
	Varianz	6423,054	1166617,435	6743335,892
13,00	Mittelwert	387,0267	4149,9374	7280,2111
	N	128	128	128
	Standardabweichung	86,48823	1004,10931	1982,50079
	Minimum	251,94	2541,80	4082,23
	Maximum	562,73	6194,31	11592,99
	Varianz	7480,213	1008235,503	3930309,383
14,00	Mittelwert	304,6897	3081,8402	5085,9938
	N	128	128	128
	Standardabweichung	43,95769	483,67463	952,42677
	Minimum	238,93	2379,90	3777,77
	Maximum	402,10	4285,65	7607,61
	Varianz	1932,279	233941,147	907116,755
15,00	Mittelwert	379,6829	4073,4851	7127,3596
	N	128	128	128
	Standardabweichung	65,65903	689,76390	1528,95429
	Minimum	280,53	2686,88	4550,41
	Maximum	775,96	8159,09	15757,31
	Varianz	4311,109	475774,241	2337701,232

16,00	Mittelwert	431,9343	4515,0944	7755,5565
	N	128	128	128
	Standardabweichung	147,39198	1547,30563	3010,03139
	Minimum	292,70	3069,45	4985,90
	Maximum	813,54	8463,85	15503,42
	Varianz	21724,395	2394154,709	9060288,974
17,00	Mittelwert	383,5685	4065,8769	7022,0768
	N	128	128	128
	Standardabweichung	47,46005	548,56425	1137,85611
	Minimum	283,82	2873,04	4657,75
	Maximum	494,15	5251,82	9054,46
	Varianz	2252,457	300922,737	1294716,534
18,00	Mittelwert	316,8119	3270,5608	5534,1486
	N	128	128	128
	Standardabweichung	94,87280	984,38895	1760,11542
	Minimum	192,42	1894,68	2930,09
	Maximum	518,03	5453,99	9487,16
	Varianz	9000,847	969021,602	3098006,304
19,00	Mittelwert	341,3061	3621,3380	6459,9140
	N	128	128	128
	Standardabweichung	164,95513	1899,69745	3802,78400
	Minimum	209,20	1835,71	2853,77
	Maximum	774,70	8281,29	14731,49
	Varianz	27210,196	3608850,416	1,446E7
20,00	Mittelwert	324,9246	3258,6992	5486,7044
	N	128	128	128
	Standardabweichung	170,60354	1791,90758	3023,58019
	Minimum	15,78	95,88	222,96
	Maximum	735,37	7877,08	14049,62
	Varianz	29105,569	3210932,779	9142037,182
Insgesamt	Mittelwert	343,4595	3544,2628	7796,0474
	N	2560	2560	2560
	Standardabweichung	124,83349	1437,05008	4120,92201
	Minimum	7,88	26,81	94,21
	Maximum	813,54	8972,98	31580,59
	Varianz	15583,401	2065112,927	1,698E7

Tabelle A 8: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Milchviehstall 1

Messpunkt		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{total}
1,00	Mittelwert	32,3772	479,1428	1336,6646
	N	61	61	61
	Standardabweichung	12,83097	183,01684	533,46473
	Minimum	10,38	154,76	225,73
	Maximum	51,21	736,89	2628,98
	Varianz	164,634	33495,165	284584,620
2,00	Mittelwert	58,1241	1003,5797	2152,7584
	N	61	61	61
	Standardabweichung	24,32048	494,67071	911,35927
	Minimum	17,72	255,75	626,65
	Maximum	103,57	1851,34	3452,37
	Varianz	591,486	244699,110	830575,723
3,00	Mittelwert	27,0008	352,8681	794,7895
	N	62	62	62
	Standardabweichung	5,77422	74,34981	274,60540
	Minimum	19,13	230,02	323,29
	Maximum	41,36	491,05	1330,26
	Varianz	33,342	5527,894	75408,124
4,00	Mittelwert	14,1865	170,9655	403,6439
	N	62	62	62
	Standardabweichung	2,75029	40,39857	83,52607
	Minimum	9,31	81,41	238,48
	Maximum	19,48	255,55	564,96
	Varianz	7,564	1632,044	6976,605
5,00	Mittelwert	75,9143	202,7552	424,4425
	N	61	61	61
	Standardabweichung	140,24587	171,99967	256,88912
	Minimum	5,33	19,48	23,58
	Maximum	390,24	533,04	907,63
	Varianz	19668,904	29583,886	65992,018
6,00	Mittelwert	35,7645	99,1419	194,7145
	N	62	62	62
	Standardabweichung	62,89326	77,41472	150,36267
	Minimum	5,73	23,67	30,03
	Maximum	272,03	326,75	589,59
	Varianz	3955,563	5993,039	22608,932
7,00	Mittelwert	40,5828	114,0633	302,0123
	N	61	61	61

	Standardabweichung	83,62025	87,32293	148,16911
	Minimum	5,37	20,31	95,24
	Maximum	271,68	333,03	595,87
	Varianz	6992,346	7625,294	21954,085
8,00	Mittelwert	25,2570	103,0595	325,0828
	N	61	61	61
	Standardabweichung	35,13283	79,02330	420,72416
	Minimum	6,03	20,48	23,26
	Maximum	106,87	243,03	1269,63
	Varianz	1234,316	6244,682	177008,817
9,00	Mittelwert	38,8892	71,8356	126,7231
	N	62	62	62
	Standardabweichung	27,06677	35,20855	84,29568
	Minimum	5,15	9,92	12,18
	Maximum	63,64	115,34	322,34
	Varianz	732,610	1239,642	7105,762
10,00	Mittelwert	11,5337	40,0130	168,7787
	N	60	60	60
	Standardabweichung	15,21990	30,58559	206,76778
	Minimum	5,42	6,54	6,54
	Maximum	63,07	103,68	586,24
	Varianz	231,645	935,479	42752,916
11,00	Mittelwert	105,2091	228,6848	352,7888
	N	61	61	61
	Standardabweichung	178,33179	224,02206	304,38757
	Minimum	15,68	61,77	84,27
	Maximum	647,95	878,95	1133,91
	Varianz	31802,227	50185,883	92651,793
12,00	Mittelwert	28,5963	175,5321	286,2035
	N	61	61	61
	Standardabweichung	14,00305	114,93630	209,44068
	Minimum	16,09	67,80	97,65
	Maximum	61,93	434,56	759,30
	Varianz	196,085	13210,354	43865,397
13,00	Mittelwert	35,5435	227,9973	383,9283
	N	62	62	62
	Standardabweichung	7,04351	33,59602	88,46315
	Minimum	24,24	174,66	280,52
	Maximum	52,90	312,16	636,07

	Varianz	49,611	1128,692	7825,730
14,00	Mittelwert	20,0359	116,6162	216,9731
	N	62	62	62
	Standardabweichung	4,08596	28,98010	70,79548
	Minimum	14,34	74,76	97,48
	Maximum	29,33	188,71	342,15
	Varianz	16,695	839,846	5012,001
15,00	Mittelwert	23,7009	78,2865	113,6800
	N	61	61	61
	Standardabweichung	19,72217	40,25441	61,24690
	Minimum	10,79	36,40	41,60
	Maximum	72,01	170,71	239,31
	Varianz	388,964	1620,418	3751,183
16,00	Mittelwert	11,7519	41,6433	76,5337
	N	62	62	62
	Standardabweichung	3,56168	12,91274	48,20830
	Minimum	8,58	22,61	26,71
	Maximum	22,73	70,86	170,38
	Varianz	12,686	166,739	2324,040
17,00	Mittelwert	10,5988	31,9281	41,8905
	N	61	61	61
	Standardabweichung	2,19460	16,12728	25,39744
	Minimum	6,78	15,19	16,29
	Maximum	15,44	78,14	115,73
	Varianz	4,816	260,089	645,030
18,00	Mittelwert	20,8627	128,4912	252,6626
	N	61	61	61
	Standardabweichung	26,41603	221,78968	476,99217
	Minimum	6,14	10,92	10,92
	Maximum	82,30	665,47	1372,79
	Varianz	697,807	49190,664	227521,527
19,00	Mittelwert	29,3391	48,7075	65,3546
	N	62	62	62
	Standardabweichung	45,00984	48,27935	59,03450
	Minimum	7,36	8,18	8,18
	Maximum	131,60	155,26	194,57
	Varianz	2025,886	2330,895	3485,072
20,00	Mittelwert	170,9770	177,4228	180,4828
	N	60	60	60

	Standardabweichung	365,26800	365,44637	364,18544
	Minimum	6,91	8,43	8,43
	Maximum	981,35	988,63	988,63
	Varianz	133420,713	133551,048	132631,034
Insgesamt	Mittelwert	40,6370	194,4283	409,5595
	N	1226	1226	1226
	Standardabweichung	105,72916	273,41688	584,57122
	Minimum	5,15	6,54	6,54
	Maximum	981,35	1851,34	3452,37
	Varianz	11178,656	74756,790	341723,510

Tabelle A 9: Mittelwertvergleich der Homogenitätsanalyse von Milchviehstall 2

Messpunkt		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{total}
1,00	Mittelwert	8,1414	113,6965	984,3156
	N	97	97	97
	Standardabweichung	1,72361	111,55746	2071,05417
	Minimum	5,08	31,99	50,57
	Maximum	14,48	718,97	11851,28
	Varianz	2,971	12445,068	4289265,370
2,00	Mittelwert	7,7878	52,7776	206,0714
	N	96	96	96
	Standardabweichung	1,39438	26,57433	180,80947
	Minimum	5,81	23,07	31,06
	Maximum	12,16	135,59	647,16
	Varianz	1,944	706,195	32692,065
3,00	Mittelwert	17,6753	169,1503	680,8343
	N	97	97	97
	Standardabweichung	16,22382	67,06108	397,36793
	Minimum	7,53	59,54	78,08
	Maximum	65,40	304,80	1403,07
	Varianz	263,212	4497,189	157901,272
4,00	Mittelwert	12,1182	195,8374	1084,2448
	N	98	98	98
	Standardabweichung	4,27341	166,27415	1523,62289
	Minimum	7,46	72,41	152,94
	Maximum	23,48	698,39	6037,06

	Varianz	18,262	27647,094	2321426,725
5,00	Mittelwert	15,3718	276,4535	1819,7995
	N	97	97	97
	Standardabweichung	4,04182	193,36201	3062,53385
	Minimum	8,82	91,70	221,62
	Maximum	28,26	922,67	11670,22
	Varianz	16,336	37388,866	9379113,597
6,00	Mittelwert	13,9436	195,1365	543,9738
	N	97	97	97
	Standardabweichung	2,98859	63,91086	193,10844
	Minimum	9,92	95,92	149,62
	Maximum	22,38	394,89	993,46
	Varianz	8,932	4084,598	37290,871
7,00	Mittelwert	14,7388	191,6956	646,9031
	N	97	97	97
	Standardabweichung	1,99914	51,59669	311,48971
	Minimum	10,74	117,54	223,37
	Maximum	18,90	332,26	1351,50
	Varianz	3,997	2662,218	97025,838
8,00	Mittelwert	30,8305	542,4847	1467,4254
	N	98	98	98
	Standardabweichung	28,12470	567,23775	1510,04819
	Minimum	11,37	112,21	152,09
	Maximum	144,34	2490,89	5839,99
	Varianz	790,999	321758,667	2280245,529
9,00	Mittelwert	115,8566	3107,9771	15303,6780
	N	97	97	97
	Standardabweichung	183,79871	6629,18776	33272,54215
	Minimum	8,60	59,76	92,85
	Maximum	716,34	24861,98	123950,07
	Varianz	33781,965	4,395E7	1,107E9
10,00	Mittelwert	59,5250	1039,7478	7177,4956
	N	93	93	93
	Standardabweichung	65,12377	1427,28501	13447,92418
	Minimum	16,09	125,59	153,72
	Maximum	437,70	10153,65	44071,01
	Varianz	4241,105	2037142,492	1,808E8
13,00	Mittelwert	20,1114	145,4193	360,3802
	N	81	81	81

	Standardabweichung	11,99403	63,54760	188,95225
	Minimum	11,60	62,89	97,75
	Maximum	86,57	398,81	813,26
	Varianz	143,857	4038,298	35702,951
14,00	Mittelwert	15,4164	96,9065	192,0885
	N	81	81	81
	Standardabweichung	2,62622	32,78198	80,69044
	Minimum	11,30	44,51	68,90
	Maximum	22,39	147,80	349,24
	Varianz	6,897	1074,658	6510,947
15,00	Mittelwert	14,8195	95,9409	197,3880
	N	81	81	81
	Standardabweichung	1,88463	25,09121	64,02489
	Minimum	10,33	66,09	119,58
	Maximum	18,32	163,82	398,89
	Varianz	3,552	629,569	4099,186
16,00	Mittelwert	16,3390	105,9889	210,9725
	N	81	81	81
	Standardabweichung	3,88876	43,95902	114,84801
	Minimum	10,81	56,53	99,16
	Maximum	26,89	230,88	516,73
	Varianz	15,122	1932,396	13190,065
17,00	Mittelwert	17,5632	128,6028	261,5979
	N	81	81	81
	Standardabweichung	3,94885	47,10346	103,97539
	Minimum	12,65	54,86	110,74
	Maximum	26,94	222,42	488,98
	Varianz	15,593	2218,736	10810,882
18,00	Mittelwert	17,0319	130,2540	276,3223
	N	81	81	81
	Standardabweichung	2,79324	41,21205	119,95722
	Minimum	12,46	75,02	133,37
	Maximum	23,26	220,28	562,36
	Varianz	7,802	1698,433	14389,736
19,00	Mittelwert	20,9004	181,9257	386,1686
	N	81	81	81
	Standardabweichung	3,28667	55,81668	137,20977
	Minimum	15,60	102,95	166,03
	Maximum	28,26	309,20	695,43

	Varianz	10,802	3115,502	18826,522
20,00	Mittelwert	22,1072	172,3232	351,5943
	N	82	82	82
	Standardabweichung	5,51463	60,54477	142,51950
	Minimum	15,71	91,86	141,35
	Maximum	32,17	267,01	651,10
	Varianz	30,411	3665,669	20311,809
Insgesamt	Mittelwert	24,8871	404,1992	1891,6303
	N	1616	1616	1616
	Standardabweichung	54,61941	1808,91570	9552,06238
	Minimum	5,08	23,07	31,06
	Maximum	716,34	24861,98	123950,07
	Varianz	2983,280	3272175,994	9,124E7

Tabelle A 10: Mittelwertevergleich der Homogenitätsanalyse von Milchviehstall 3

Messpunkt		PM _{2,5}	PM ₁₀	PM _{total}
1,00	Mittelwert	55,9661	142,6225	231,5323
	N	95	95	95
	Standardabweichung	43,44357	88,79557	101,19808
	Minimum	34,66	75,98	116,98
	Maximum	190,19	424,01	518,00
	Varianz	1887,344	7884,653	10241,051
2,00	Mittelwert	67,2048	171,9759	277,5626
	N	95	95	95
	Standardabweichung	59,05765	57,56823	75,36215
	Minimum	38,22	105,06	157,32
	Maximum	240,02	328,24	430,37
	Varianz	3487,806	3314,101	5679,454
3,00	Mittelwert	703,3428	1453,0534	1514,5725
	N	96	96	96
	Standardabweichung	1632,11836	3270,11372	3276,60681
	Minimum	34,24	58,74	64,37
	Maximum	6054,71	11852,89	11955,92
	Varianz	2663810,346	1,069E7	1,074E7
4,00	Mittelwert	126,9150	202,5874	270,4717
	N	96	96	96

	Standardabweichung	251,64256	253,06624	257,52517
	Minimum	35,11	67,01	81,81
	Maximum	863,35	949,84	1034,09
	Varianz	63323,976	64042,522	66319,215
5,00	Mittelwert	52,1785	127,3415	209,0922
	N	95	95	95
	Standardabweichung	29,92197	66,75772	128,74034
	Minimum	32,91	56,25	67,36
	Maximum	134,36	281,38	538,89
	Varianz	895,324	4456,593	16574,076
6,00	Mittelwert	161,0331	208,4081	252,0438
	N	95	95	95
	Standardabweichung	360,63526	360,44570	355,55169
	Minimum	33,55	59,52	78,82
	Maximum	1207,68	1255,62	1297,10
	Varianz	130057,790	129921,101	126417,008
7,00	Mittelwert	122,3022	219,0847	278,5774
	N	114	114	114
	Standardabweichung	175,37114	221,50549	218,82046
	Minimum	34,93	67,16	83,88
	Maximum	631,07	815,57	852,52
	Varianz	30755,036	49064,682	47882,394
8,00	Mittelwert	39,7783	107,9710	201,7821
	N	77	77	77
	Standardabweichung	2,28796	28,40821	77,65327
	Minimum	37,06	86,70	116,39
	Maximum	45,81	187,32	413,26
	Varianz	5,235	807,026	6030,030
9,00	Mittelwert	55,4854	130,6922	215,2619
	N	96	96	96
	Standardabweichung	31,30182	39,25785	55,57700
	Minimum	36,67	83,33	126,87
	Maximum	150,30	250,49	375,76
	Varianz	979,804	1541,178	3088,803
10,00	Mittelwert	553,7642	631,6445	711,3181
	N	96	96	96
	Standardabweichung	1382,57800	1407,14792	1419,40235
	Minimum	33,70	66,59	90,62
	Maximum	4623,60	4777,39	4887,83

	Varianz	1911521,936	1980065,280	2014703,032
11,00	Mittelwert	26,2321	71,6337	216,9062
	N	95	95	95
	Standardabweichung	1,94690	31,27171	199,36638
	Minimum	24,12	33,19	33,19
	Maximum	31,22	160,99	804,36
	Varianz	3,790	977,920	39746,954
12,00	Mittelwert	65,9494	130,2132	222,4754
	N	95	95	95
	Standardabweichung	71,41641	132,52519	212,39825
	Minimum	24,59	30,37	30,37
	Maximum	241,34	412,62	834,47
	Varianz	5100,303	17562,925	45113,015
13,00	Mittelwert	101,5784	169,8080	382,6494
	N	96	96	96
	Standardabweichung	141,62784	150,76050	291,69946
	Minimum	24,04	37,75	47,13
	Maximum	478,30	555,12	939,63
	Varianz	20058,444	22728,728	85088,573
14,00	Mittelwert	372,0823	469,4148	618,8776
	N	96	96	96
	Standardabweichung	418,35196	463,93544	478,70346
	Minimum	24,77	29,14	29,14
	Maximum	1339,26	1429,33	1502,51
	Varianz	175018,365	215236,092	229156,998
15,00	Mittelwert	417,8651	516,8770	572,5977
	N	95	95	95
	Standardabweichung	674,62628	728,38512	727,70983
	Minimum	26,06	56,90	66,18
	Maximum	2438,85	2717,25	2732,66
	Varianz	455120,620	530544,884	529561,597
16,00	Mittelwert	548,4154	819,1410	945,7405
	N	95	95	95
	Standardabweichung	846,35729	951,05494	991,56189
	Minimum	26,77	78,80	138,33
	Maximum	2959,90	3078,98	3299,74
	Varianz	716320,671	904505,501	983194,977
17,00	Mittelwert	94,6909	180,2458	333,7327
	N	114	114	114

	Standardabweichung	134,06429	156,18535	206,40309
	Minimum	26,62	67,88	103,83
	Maximum	531,03	627,96	780,19
	Varianz	17973,233	24393,863	42602,236
18,00	Mittelwert	128,0285	219,9787	331,5248
	N	77	77	77
	Standardabweichung	139,08078	151,83333	158,65496
	Minimum	26,61	72,55	111,05
	Maximum	451,89	606,34	785,34
	Varianz	19343,463	23053,360	25171,396
19,00	Mittelwert	589,0501	1093,6919	1203,2277
	N	96	96	96
	Standardabweichung	963,77733	1962,74281	1947,94801
	Minimum	26,74	56,10	100,85
	Maximum	3110,29	6802,56	6915,22
	Varianz	928866,741	3852359,342	3794501,461
20,00	Mittelwert	124,1045	194,3957	428,9787
	N	73	73	73
	Standardabweichung	235,19113	236,47503	262,18689
	Minimum	26,93	71,71	168,68
	Maximum	965,05	1049,60	1336,90
	Varianz	55314,869	55920,438	68741,964
Insgesamt	Mittelwert	222,2794	366,3660	472,8729
	N	1887	1887	1887
	Standardabweichung	638,69656	1033,25158	1038,36853
	Minimum	24,04	29,14	29,14
	Maximum	6054,71	11852,89	11955,92
	Varianz	407933,299	1067608,824	1078209,210

Tabelle A 11: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Schweinebereich in Schweinestall 1

PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt
Datum	1.9.10	1.9.10	1.9.10	2.9.10	2.9.10	2.9.10	3.9.10	3.9.10	3.9.10
Mittelwert	120,306909	1002,55327	1845,77913	119,109136	972,75233	1763,6576	105,135152	693,6636757	1264,410281
Minimum	24,4923532	139,602452	222,225989	19,9978124	125,227624	208,520247	22,4500187	97,50906104	121,1023312
Maximum	444,472046	3915,36558	7536,21111	373,940412	3104,23219	5373,28361	289,532585	1965,818564	3731,455777
Tag Mittelwert	0	0	0	149,253958	1281,23831	2315,87211	137,856339	938,2277294	1781,571427
Nacht Mittelwert	120,306909	1002,55327	1845,77913	84,6579106	620,196929	1132,5553	74,4584738	462,1742923	774,2874466
Standardabweichung	125,932756	1121,18272	2134,46752	95,3165883	798,445965	1425,31129	61,1565195	455,2502187	910,9279229
Tierzahl	10	10	10	10	10	10	10	10	10
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	12,0306909	100,255327	184,577913	11,9109136	97,275233	176,36576	10,5135152	69,36636757	126,4410281
Mittelwert/ GV	85,9335063	716,109481	1318,41366	85,0779543	694,823093	1259,75543	75,0965369	495,4740541	903,1502006
PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt
Datum	4.9.10	4.9.10	4.9.10	5.9.10	5.9.10	5.9.10	gesamt	gesamt	gesamt
Mittelwert	139	853	1.605	133	944	1.940	123	893	1.684
Minimum	15	73	104	13	48	61	13	48	61
Maximum	373	2.665	5.993	478	3.608	6.852	478	3.915	7.536
Tag Mittelwert	191	1.161	2.184	139	1.002	2.099	154	1.095	2.095
Nacht Mittelwert	82	517	973	125	866	1.727	97	693	1.290
Standardabweichung	107	739	1.570	108	809	1.782	24	237	452
Tierzahl	10	10	10	10	10	10	10	10	10
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	14	85	160	13	94	194	12	89	168
Mittelwert/ GV	99	609	1.146	95	674	1.385	88	638	1.203

Tabelle A 12: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Kontrollbereich in Schweinestall 1

PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt
Datum	1.9.10	1.9.10	1.9.10	2.9.10	2.9.10	2.9.10	3.9.10	3.9.10	3.9.10
Mittelwert	109,603918	746,783736	993,254707	102,112389	714,205451	971,982821	122,428307	885,656443	1213,7736
Minimum	33,5554055	154,751939	185,817029	23,6516585	86,6629739	108,540873	18,2292745	78,2427377	89,5285017
Maximum	221,927215	1535,06683	2071,26836	252,50406	1961,84942	2832,48314	335,582465	2514,125	3437,13547
Tag Mittelwert	0	0	0	134,210317	961,717159	1317,33908	157,480974	1156,21957	1600,62933
Nacht Mittelwert	109,603918	746,783736	993,254707	63,0168901	415,010113	557,949109	84,1890341	590,496665	791,749159
Standardabweichung	75,4104855	564,926328	777,203443	62,1790294	499,044978	699,32535	94,8524799	734,243265	1009,45588
Tierzahl	13	13	13	10	10	10	10	10	10
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	8,43107063	57,4449028	76,4042082	10,2112389	71,4205451	97,1982821	12,2428307	88,5656443	121,37736
Mittelwert/ GV	78,288513	533,416954	709,467648	72,9374205	510,146751	694,273443	87,4487909	632,611745	866,981142
PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt			
Datum	4.9.10	4.9.10	4.9.10	gesamt	gesamt	gesamt			
Mittelwert	158,587133	1162,60693	1619,99034	123,182937	877,313141	1199,75037			
Minimum	16,6340004	90,3805329	118,896783	16,6340004	78,2427377	89,5285017			
Maximum	460,166869	3730,70361	5788,44459	460,166869	3730,70361	5788,44459			
Tag Mittelwert	175,44864	1297,8141	1780,43423	155,71331	1138,58361	1566,13422			
Nacht Mittelwert	132,798947	955,819505	1374,60555	97,4021974	677,027505	929,389632			
Standardabweichung	129,772683	950,066677	1380,86422	29,3884728	201,382766	305,918408			
Tierzahl	10	10	10	10	10	10			
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4			
Mittelwert/ Tier	15,8587133	116,260693	161,999034	12,3182937	87,7313141	119,975037			
Mittelwert/ GV	113,276524	830,433525	1157,13595	87,9878121	626,652244	856,964547			

Tabelle A 13: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Schweinebereich in Schweinestall 2

PM	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt
Tag	6.9.10	6.9.10	6.9.10	7.9.10	7.9.10	7.9.10	8.9.10	8.9.10	8.9.10
Mittelwert	579,451408	5402,42352	9784,08498	476,332079	4282,97404	7608,10344	442,435451	3836,39112	6491,08413
Minimum	112,211569	1002,67773	1709,48789	203,401412	1805,81705	3168,2317	189,568558	1507,70934	2408,77347
Maximum	1483,46556	12603,2988	20933,3119	887,721295	8235,99878	15038,8325	954,092523	7477,68212	12510,6984
Tag Mittelwert	418,012839	4089,85167	7656,21072	488,268472	4412,97117	7939,16139	441,291987	3853,84661	6516,8281
Nacht Mittelwert	727,436762	6605,61438	11734,6364	464,398686	4152,9769	7277,04548	443,578916	3818,93563	6465,34016
Standardabweichung	218,479211	2202,6399	4324,03951	171,232942	1536,12164	2794,69017	195,327747	1662,25988	2839,67277
Tierzahl	160	160	160	160	160	160	160	160	160
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	3,6215713	33,765147	61,1505312	2,97707549	26,7685877	47,5506465	2,76522157	23,9774445	40,5692758
Mittelwert/ GV	413,893863	3858,87394	6988,63213	340,237199	3059,26717	5434,3596	316,025322	2740,27937	4636,48866
PM	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt
Tag	9.9.10	9.9.10	9.9.10	10.9.10	10.9.10	10.9.10	gesamt	gesamt	gesamt
Mittelwert	504,1483	4294,39446	7304,99388	438,350062	3611,9622	6281,97566	488,14346	4285,62907	7494,04842
Minimum	169,701174	1410,91936	2344,81389	161,308718	1114,45879	1760,01016	112,211569	1002,67773	1709,48789
Maximum	1020,1226	8739,30762	15605,8838	717,737992	6000,32006	10818,3375	1483,46556	12603,2988	20933,3119
Tag Mittelwert	481,028065	4199,77991	7232,46861	478,147304	3964,41514	6924,22544	461,349133	4104,1729	7253,77885
Nacht Mittelwert	528,273763	4393,12268	7380,67242	383,246189	3123,95043	5392,70673	509,386863	4418,92001	7650,08024
Standardabweichung	211,705381	1708,94713	2934,13304	133,650965	1185,59138	2204,81723	34,5004663	366,491622	783,533047
Tierzahl	160	160	160	160	160	160	160	160	160
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	3,15092688	26,8399654	45,6562117	2,73968789	22,5747638	39,2623479	3,05089663	26,7851817	46,8378026
Mittelwert/ GV	360,105929	3067,42461	5217,85277	313,107187	2579,973	4487,12547	348,6739	3061,16362	5352,89173

Tabelle A 14: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Kontrollbereich in Schweinestall 2

PM	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt
Tag	6.9.10	6.9.10	6.9.10	7.9.10	7.9.10	7.9.10	8.9.10	8.9.10	8.9.10
Mittelwert	395,963698	3076,35023	7812,68422	399,905929	2870,37145	6486,30825	366,457758	2473,92852	5507,35901
Minimum	54,7710975	375,898708	744,55573	130,622269	892,686027	1804,7085	140,612152	928,479444	1811,54013
Maximum	1007,29695	7540,01405	19699,474	1019,14568	6920,94338	15557,1425	815,940017	5627,00722	12834,4918
Tag Mittelwert	227,827536	1794,03867	4389,13527	390,832907	2865,02859	6468,94367	370,71913	2517,19604	5752,6715
Nacht Mittelwert	550,088513	4251,80249	10950,9374	408,97895	2875,71431	6503,67283	362,196387	2430,66101	5262,04652
Standardabweichung	250,813092	1934,73157	5146,47336	212,683544	1508,65965	3489,55287	165,809909	1150,61428	2806,18971
Tierzahl	160	160	160	160	160	160	160	160	160
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	2,47477311	19,2271889	48,8292764	2,49941205	17,9398216	40,5394266	2,29036099	15,4620533	34,4209938
Mittelwert/ GV	282,831213	2197,39302	5580,48873	285,647092	2050,26532	4633,07732	261,755542	1767,0918	3933,82786
PM	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt	PM2,5	PM10	PM Gesamt
Tag	9.9.10	9.9.10	9.9.10	10.9.10	10.9.10	10.9.10	gesamt	gesamt	gesamt
Mittelwert	370,154822	2411,93973	5383,05837	347,16761	2408,78102	5373,93191	375,929963	2648,27419	6112,66835
Minimum	135,248797	856,029198	1506,70196	165,557359	1050,88172	2091,83809	54,7710975	375,898708	744,55573
Maximum	877,688043	5685,24597	14386,3241	646,388625	4881,60373	11533,3945	1019,14568	7540,01405	19699,474
Tag Mittelwert	346,863147	2266,67132	5022,96292	362,094191	2536,90922	5711,3749	339,667382	2395,96877	5469,01765
Nacht Mittelwert	393,446497	2557,20813	5743,15381	324,777739	2216,58872	4867,76743	407,897617	2866,39493	6665,5156
Standardabweichung	165,292882	1085,42749	2773,81993	130,373846	987,207885	2380,3475	47,0063513	389,572054	1096,58686
Tierzahl	160	160	160	160	160	160	160	160	160
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	2,31346764	15,0746233	33,6441148	2,16979756	15,0548814	33,5870744	2,34956227	16,5517137	38,2041772
Mittelwert/ GV	264,396301	1722,81409	3845,04169	247,976864	1720,55787	3838,52279	268,521402	1891,62442	4366,19168

Tabelle A 15: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Schweinebereich in Schweinestall 3

PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt
Tag	40431	40431	40431	40432	40432	40432	40433	40433	40433
Mittelwert	428,76286	3981,55484	6741,71629	307,061325	2932,22723	4992,56422	333,340911	3070,87907	5009,85595
Minimum	209,236106	1888,92807	3083,15081	104,675975	953,658215	1576,4873	136,482422	1252,35855	2056,60585
Maximum	863,48257	7568,96806	12335,2822	651,885732	6345,15646	11090,2884	762,385957	7160,44055	12247,4201
Tag Mittelwert	570,035532	5368,60892	9495,4465	325,993	3135,25425	5369,40674	341,849787	3183,19146	5229,6511
Nacht Mittelwert	381,671969	3519,20349	5823,80622	288,12965	2729,20022	4615,72169	323,671734	2943,25136	4760,08874
Standardabweichung	155,615803	1445,38246	2570,72186	114,166606	1117,61163	2001,16813	156,445443	1420,46559	2310,06418
Tierzahl	120	120	120	120	120	120	120	120	120
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	3,57302383	33,1796237	56,1809691	2,55884438	24,4352269	41,6047018	2,77784093	25,5906589	41,7487996
Mittelwert/ GV	306,259186	2843,96775	4815,51164	219,329518	2094,44802	3566,1173	238,100651	2193,48505	3578,46854
PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt
Tag	40434	40434	40434	40435	40435	40435	gesamt	gesamt	gesamt
Mittelwert	375,811519	3475,29132	5757,21038	305,753128	2866,99721	4687,78798	350,145949	3265,38993	5437,82697
Minimum	137,856157	1222,09926	1848,00301	133,500518	1226,27353	2013,57387	104,675975	953,658215	1576,4873
Maximum	863,48257	7568,96806	12335,2822	552,957356	5354,79061	9031,35631	863,48257	7568,96806	12335,2822
Tag Mittelwert	411,791401	3771,96733	6254,55152	331,274426	3103,22029	5068,36417	396,188829	3712,44845	6283,48401
Nacht Mittelwert	339,831636	3178,61531	5259,86924	273,851506	2571,71835	4212,06775	321,431299	2988,39775	4934,31073
Standardabweichung	162,509106	1486,85554	2498,67166	101,416366	998,243827	1687,52067	28,0964205	220,617096	367,42141
Tierzahl	120	120	120	120	120	120	120	120	120
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	3,13176266	28,960761	47,9767532	2,54794273	23,8916434	39,0648999	2,91788291	27,2115828	45,3152247
Mittelwert/ GV	268,436799	2482,35094	4112,29313	218,395092	2047,85515	3348,41999	250,104249	2332,42138	3884,16212

Tabelle A 16: Deskriptive Statistik für die gemessenen Partikelmassen [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$] im Kontrollbereich in Schweinestall 3

PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt
Tag	10.9.10	10.9.10	10.9.10	11.9.10	11.9.10	11.9.10	12.9.10	12.9.10	12.9.10
Mittelwert	313,137668	2380,52833	5088,36523	219,929111	1718,16535	3722,59767	234,79208	1797,03934	3846,96102
Minimum	154,256547	1120,59249	2117,66065	94,8657995	704,194153	1361,22183	79,0716282	573,866671	1120,55673
Maximum	465,487363	3487,05324	7972,19738	469,226785	3503,09589	7991,09393	565,697994	4509,45957	11001,8091
Tag Mittelwert	421,033673	3273,20991	7397,46	236,204225	1824,13843	3889,24831	246,427366	1932,85926	4147,22707
Nacht Mittelwert	277,172333	2082,96781	4318,66698	204,332126	1616,60782	3562,8908	223,156794	1661,21942	3546,69498
Standardabweichung	115,564329	893,015779	2096,95444	80,1864474	632,831946	1508,03246	103,75222	770,09591	1824,58321
Tierzahl	120	120	120	120	120	120	120	120	120
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	2,60948057	19,8377361	42,4030436	1,83274259	14,3180446	31,0216472	1,95660067	14,9753279	32,0580085
Mittelwert/ GV	223,669763	1700,37738	3634,5466	157,092222	1227,26097	2658,99833	167,708629	1283,59953	2747,8293
PM	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt	PM 2,5	PM 10	PM Gesamt
Tag	13.9.10	13.9.10	13.9.10	14.9.10	14.9.10	14.9.10	gesamt	gesamt	gesamt
Mittelwert	271,205825	2085,53162	4612,76986	249,542973	1936,45487	4307,86419	257,721531	1983,5439	4315,71159
Minimum	111,835588	854,316245	1890,68487	109,048449	762,803725	1512,52189	79,0716282	573,866671	1120,55673
Maximum	542,554426	3952,00749	8783,29699	494,542731	3874,96046	8537,97546	565,697994	4509,45957	11001,8091
Tag Mittelwert	289,786027	2253,64014	5036,55845	271,002525	2102,58193	4711,64358	292,890763	2277,28594	5036,42748
Nacht Mittelwert	252,625623	1917,42309	4188,98127	222,718532	1728,79604	3803,13994	236,001082	1801,40284	3884,07479
Standardabweichung	99,0032406	728,659628	1611,00122	1985,8404	1773,81076	1730,39019	843,636689	464,595308	225,890272
Tierzahl	120	120	120	120	120	120	120	120	120
GV	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Mittelwert/ Tier	2,26004854	17,3794301	38,4397488	2,07952477	16,1371239	35,8988682	2,14767943	16,5295325	35,9642633
Mittelwert/ GV	193,718446	1489,66544	3294,83561	178,24498	1383,18205	3077,04585	184,086808	1416,81707	3082,65114

Die GV-Daten für Tabelle A 11 bis A 16 sind KTBL (2005) entnommen.

9 Kurzfassung in Deutsch und Englisch

In den Untersuchungen sollte die aktuelle Stallstaub-Belastungssituation in typischen Tierställen für Schweine, Geflügel und Milchkühe in räumlicher und zeitlicher Verteilung untersucht und analysiert werden. Neben den Ursachen für die Staubbelastungen im Innenraum sollten Minderungsmöglichkeiten identifiziert und in ihrer Wirksamkeit vergleichend bewertet werden. Ausgehend von einer Literaturanalyse sollten ergänzende Untersuchungen zur Wirksamkeit der Minderungsmaßnahmen sowohl für die Bewertung der Raumluftqualität, wie auch für die Emissionsminderung durchgeführt werden.

Die Messungen erfolgten nach der gleichen methodischen Vorgehensweise in typischen Ställen für die Ferkelerzeugung und Schweinemast. Darüber hinaus wurden verschiedene Legehennenställe und verschiedene typische Milchviehställe untersucht. Durch Rastermessungen konnte die räumliche Verteilung erfasst werden, durch 24-Stunden-Messungen zu verschiedenen Jahreszeiten der typische tageszeitliche und jahreszeitliche Einfluss. Mit Aerosol-Spektrometern wurden die Stallstäube kontinuierlich in der Stallluft nach ihren Größenfraktionen differenziert und in Bezug auf ihre Anzahl- und Massekonzentration erfasst. Bei der Volumenstrom-Bestimmung wurde entweder kontinuierlich mit Messventilatoren gearbeitet; bei frei belüfteten Ställen wurde alternativ die SF₆-Tracergas-Methode zur Luftwechselbestimmung eingesetzt. Die aktuellen Witterungsbedingungen wurden mit Datenloggern und programmierbaren Handgeräten ebenfalls kontinuierlich erfasst.

Die Ergebnisse sind sehr vielschichtig. Einerseits zeigen sich sehr große räumliche Inhomogenitäten, die auf die Staubquellen und die aktuelle Luftströmung zurück zu führen sind. Andererseits haben die Tiere selbst einen ausgeprägten Einfluss über ihren Biorhythmus auf die zeitliche Verteilung der Stallstaub-Innenraum-Konzentrationen. Insgesamt waren die Konzentrationen erwartungsgemäß beim Geflügel am höchsten, gefolgt von den Schweinen und mit deutlichem Abstand zu den Milchkühen. Die Raumluftqualität und auch die Notwendigkeit von Arbeitsschutz-Maßnahmen sind in der gleichen Reihenfolge zu betrachten. Hauptursachen für die Staubbildung sind neben den Tieren die Einstreu und die Fütterungstechnik. Belastungsspitzen treten immer auf, wenn trockene Materialien eingestreut oder gefüttert werden.

Minderungstechniken stehen für den Innenraum (indoor) wie auch als Abluftreinigung bei zwangsbelüfteten Ställen zur Verfügung. Indoor haben sich Sprühsysteme für Wasser und Wasser-Öl-Gemische bewährt, die auch zur Luftkühlung im Sommer Verwendung finden. DLG-geprüfte Abluftreinigungstechniken weisen einen wesentlich höheren Emissionsminderungsgrad für Staub auf, als die Indoor-Techniken (90 vs. 40 – 50 %).

Abstract

The goals of the investigations were the description of the dust loads in typical animal house for pigs, poultry and dairy cattle. The dust distribution inside the buildings should be investigated as well as the daily pattern of dust concentrations. Not only the sources of dust generation should be identified, also the efficiency of technical means for dust reduction (inside and in the outgoing air) has to be tested. On the basis of a literature analysis additional investigations should be done to compare the reduction efficiency related to the indoor air quality and the mitigation of environmental loads (emissions).

The measurements were done by the same methodical schedule in typical animal houses for piglet rearing, pig fattening, different types of laying hens houses and in two dairy barns without forced ventilation systems. To describe the spatial distribution measurements were done with a constant grid. For recording the daily pattern 24-hours measurements were made under different seasonal conditions. With a laser aerosol-spectrometer the dust particles in the air were registered with different sizes (diameter fractions). The concentration of dust can be recorded by the spectrometer in relation to “particle amount” and “particle mass”. The air volume flow was registered by measuring fans continuously. In free ventilated barns the SF₆-tracer-method was used alternatively to calculate the air exchange rate as spot information every 30 minutes. The actual weather conditions were recorded also continuously by loggers for temperature and air humidity and by programmable hand terminals.

The results are complex. In all animal houses a wide variation of concentration differences could be shown. On one hand the spatial variations are induced by dust sources (feeding, bedding). But also the animals have a typical daily activity pattern (mainly caused by the light) which effects dust generation into the air. Seasonal effects are mainly given by the intensity of the ventilation system. As expected the dust concentrations in poultry were the highest. Pig houses had the second level and the lowest dust concentrations were measured in dairy barns. In consequence the air quality had the same sequence and also the demand of respiratory protection means for the care takers. Main reasons for high indoor concentrations of dust are litter, feeding materials and animal activity. Dust concentration peaks in the indoor air are always measurable directly after littering and feeding when dry materials (e. g. straw and flour) are used.

In animal houses with forced ventilation dust-reduction technologies are available for increase the indoor air quality and outgoing air (emission mitigation). Indoor spraying systems for water and water-oil suspensions are proven. These systems are also used for heat stress reduction. Air purification systems (certificated by the DLG) have much higher dust reduction efficiencies (emission) than indoor techniques (90 vs. 40 – 50 %).