

Aus dem Department für Nutztierwissenschaften
-Abteilung Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft-
der Georg-August-Universität Göttingen

**Evaluierung verschiedener prozesstechnischer Handlungsoptionen zur
Reduktion luftgetragener Partikel beim Einsatz von Einstreumaterialien
und der Vorlage von Rau- und Krafftuttermitteln in der Pferdehaltung**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von
Felix Garlipp
geboren in Leipzig

Göttingen, Februar 2011

D 7

Referent: Prof. Dr. Ir. H. F. A. Van den Weghe

Korreferent: Prof. Dr. Dr. M. Gauly

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Februar 2011

Inhaltsverzeichnis

Kapitel	Seite
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole	V
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Stand des Wissens	3
2.1 Definition von luftgetragenen Partikeln	3
2.2 Physikalische Partikeleigenschaften	4
2.2.1 Partikelgröße und Größenverteilung	5
2.2.2 Sedimentation	7
2.2.3 Partikelform und -dichte	10
2.3 Gesundheitliche Bedeutung von luftgetragenen Partikeln	11
2.3.1 Recurrent Airway Obstruction (RAO)	13
2.3.2 Weitere respiratorische Erkrankungen	13
2.3.3 Finanzielle Bedeutung respiratorischer Erkrankungen beim Pferd	15
2.4 Konzentrationen und Quellen luftgetragener Partikel in der Pferdehaltung	16
2.4.1 Einstreumaterialien und Raufuttermittel	16
2.4.2 Kraftfuttermittel	18
2.5 Einflussgrößen auf die Konzentration an luftgetragenen Partikeln in einem Haltungssystem	19
2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen	22
2.7 Minderungsoptionen luftgetragener Partikel	24
2.7.1 Technische Möglichkeiten	24
2.7.2 Möglichkeiten der Partikelreduzierung durch Verbesserung des Stallmanagements	26
2.7.2.1 Stallarbeiten (Entmistung, Einstreuen, Fütterung)	27
2.7.2.2 Auswahl hygienisch hochwertiger Einstreumaterialien und Futtermittel	29
2.7.2.3 Futterzusatzstoffe	32
2.8 Messprinzipien und -techniken luftgetragener Partikel in Nutztierställen	34
2.8.1 Optische Messprinzipien	35
2.8.2 Gravimetrische Messprinzipien	37
2.8.2.1 Impaktion („Aufprallverfahren“) - Andersen-Kaskaden-Impaktor	37
2.8.2.2 Filtration - Tapered-Element Oscillating Microbalance (TEOM)	39
3 Beiträge mit Begutachtung	42
3.1 Generation of airborne particles from horse feeds depending on type and processing	42
3.2 The influence of a particle separation technology on the generation of airborne particles from different roughages and bedding materials used for horses	53
3.3 The effects of three different liquid additives mixed with oats (whole or rolled) for horses on the generation of airborne particles	69

3.4 Characteristics of gas generation (NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, CO ₂ , H ₂ O) from horse manure added to different bedding materials used in deep litter bedding systems	93
4 Diskussion.....	122
4.1 Evaluierung materialspezifischer Einflussfaktoren und verfahrenstechnischer Ansätze zum Abscheiden luftgetragener Partikel ...	122
4.2 Bewertung des angewandten Versuchsdesigns	132
5 Zusammenfassung	135
6 Summary	139
7 Literaturverzeichnis.....	143
8 Anhang	152
8.1 Lebenslauf.....	152
8.2 Veröffentlichungen	154
8.2.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Begutachtung	154
8.2.2 Tagungsbeiträge	154
8.2.3 Sonstige Veröffentlichungen	154

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Komponenten eines Bioaerosols (Nannen und Büscher, 2007).....	4
Abbildung 2: Schematische Gegenüberstellung der Atemwegsgängigkeit von unterschiedlich großen Partikeln (DIN EN 481, 1993).	6
Abbildung 3: Staubfraktionen und ihre Eindringtiefen in den Respirationstrakt des Pferdes (Art et al., 2002).	7
Abbildung 4: Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Stäube in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und der Herkunft (Schmitt-Pauksztat et al., 2005).....	9
Abbildung 5: Deposition von Partikeln unterschiedlicher Größe bei Mundatmung in der Lunge (Heyder et al., 1986).	11
Abbildung 6: Schwebstaubgenerierung (PM ₁₀) ausgehend von verschiedenen Einstreumaterialien für Pferde (Fleming et al., 2008).....	17
Abbildung 7: Schwebstaubkonzentrationsverlauf (PM ₁₀) über 24 Stunden in einem Pferdestall in Abhängigkeit vom Einstreumaterial (Weizenstroh, Strohpellets, Holzspäne) (Fleming et al., 2008).	20
Abbildung 8: Mittlere Schwebstaubkonzentration im Pferdestall im Temperaturbereich von 20-24°C in Abhängigkeit von der Ventilatoreneinstellung (Hörmann, 2006).....	21
Abbildung 9: Trauf-First-Lüftung in einem Pferdestall (KTBL, 2000).....	25
Abbildung 10: Unterdrucklüftung in einem Pferdestall (KTBL, 2000).	26
Abbildung 11: Mittlere Schwebstaubkonzentration (a = PM ₂₀ und PM ₁₀ ; b = PM _{2,5} und PM ₁) ausgehend von verschiedenen Einstreumaterialien (Fleming, 2008).	31
Abbildung 12: Ansicht des Aerosolspektrometers 1.109 der Firma GRIMM (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 2010).	36
Abbildung 13: Prinzip des Streulichtverfahrens (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 2010).	36
Abbildung 14: Aufbau und Prinzip eines einfachen Impaktors (Mitchell, 1995).....	38
Abbildung 15: TEOM 1400a und Hohnadel mit Filter (Patashnick und Rupprecht, 1991).	40
Abbildung 16: TEOM1400a mit Messkopf PM ₁₀ (Fleming, 2004).....	40

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Definierte Partikelfractionen anhand der Partikelgrößen nach DIN EN 481 (1993).....	6
Tabelle 2: Sedimentationsgeschwindigkeit luftgetragener Partikel in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser (Mehlhorn, 1979).....	8
Tabelle 3: Behandlungskosten von Atemwegserkrankungen beim Pferd gemäß Tierärztegebührenordnung (GOT, 2008).	15
Tabelle 4: Richtwerte für das Pferdestallklima (BMELV, 2009).....	22
Tabelle 5: Mittlere Ammoniak- (NH ₃), Kohlenstoffdioxid- (CO ₂), Lachgas- (N ₂ O) und Methankonzentration (CH ₄) in Abhängigkeit von der Entmistungsvariante (Fleming et al., 2009).....	28
Tabelle 6: Ersteinstreu und Gesamtverbrauch pro Pferd und Jahr sowie die Kosten pro Pferd und Jahr für handelsübliche Einstreumaterialien bei ganzjähriger Stallhaltung (Fleming, 2008).	124

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole

BlmSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BlmSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BMELV	Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
bzw.	beziehungsweise
COB	Chronisch Obstruktive Bronchitis
d_{ae}	aerodynamischer Durchmesser
DFG	Deutschen Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
et al.	et alii
EU	Europäische Union
GefStoffV	Gefahrstoffverordnung
GOT	Gebührenverordnung Tierärzte
GV	Großvieheinheit
IAD	Inflammatory Airway Disease
ISO	International Organization for Standardization
KRdL	Kommission Reinhaltung der Luft
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
MAK	Maximale Arbeitsplatz Konzentration
mm	Millimeter
NH_3	Ammoniak
PM	Particulate matter
ppm	parts per million
RAO	Recurrent Airway Obstruction
SO_2	Schwefeldioxid
Tab.	Tabelle
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance
U/min	Umdrehung pro Minute
UBA	Umweltbundesamt
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
z.B.	zum Beispiel
μm	Mikrometer

1 Einleitung und Zielsetzung

Der gesamte Respirationstrakt des Pferdes stellt gegenüber allen anderen Organen die größte und empfindlichste Kontaktfläche für potenziell irritierende Substanzen aus der Luft dar, welche in einem vielfältigen Gemisch aus Schadgasen (Ammoniak, Lachgas) und luftgetragenen Partikeln auftreten (Seedorf und Hartung, 2002). Dabei reagiert der Respirationstrakt des Pferdes sehr empfindlich auf Schwebstaub, welcher in Tierställen ein Gemisch aus organischem Material (u.a. Bakterien, Schimmelpilzsporen, Urin, Kot, Pollen, Hautschuppen, Härchen) darstellt (Cargill, 2000).

Über die Auswirkungen erhöhter Schwebstaubkonzentrationen in der Stallluft auf die Gesundheit von Pferden wurden zahlreiche Studien durchgeführt (Webster et al., 1987; Woods et al., 1993). Die am häufigsten, teilweise schon als „Berufskrankheiten“ von Sportpferden bezeichneten, auftretenden respiratorischen Erkrankungen stellen die COB (chronisch obstruktive Bronchitis) bzw. die RAO (rekurrente Atemwegserkrankung) dar, welche zu früheren Zeiten als Dämpfigkeit bekannt waren, sowie die IAD (infektiöse Entzündungen der Atemwege) (Mehlhorn, 1979; Robinson, 2001). Dabei ist nicht ausschließlich die Höhe der Schwebstaubkonzentration ausschlaggebend. Die Größe der jeweiligen Partikel hat einen entscheidenden Einfluss auf das respiratorische Erkrankungspotenzial, wobei vor allem die thorakale (PM_{10}) und die alveolare Partikelfraktion (PM_4) (Partikel, die einen nach Größen selektierenden Lufteinlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 μm bzw. 4 μm einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist) relevant sind. Partikel dieser Größe können bis in die kleinsten Funktionseinheiten (Alveolen) des Respirationstraktes eindringen und diesen schädigen (Seedorf und Hartung, 2002).

Aufgrund der Tatsache, dass mehr als eine Million Pferde in Deutschland leben, von denen der größte Anteil, sowohl im Sport- als auch im Zucht- und Freizeitbereich in geschlossenen Haltungssystemen aufgestellt wird, hat die Qualität der Stallluft einen entscheidenden Einfluss auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Pferdes (Korries, 2003; Deutsche Reiterliche Vereinigung, 2003). In Bezug auf die Reduzierung luftgetragener Partikel in der Pferdehaltung muss dementsprechend primär die Behandlung der Hauptkontaminationsquellen von Schwebstaub im Vordergrund stehen, welche verschiedene Einstreumaterialien (Weizenstroh, Späne, Flachs, Hanf), Raufuttermittel (Heu, Heulage) und diverse Kraffuttermittel (Hafer, Gerste, Mischfuttermittel) darstellen (Seedorf und Hartung, 2002).

Maßnahmen zur Schwebstaubreduzierung in der Stallluft wurden bisher hauptsächlich in der Schweine- und Geflügelhaltung angewendet und konzentrierten sich hauptsächlich auf den Einsatz von Ventilatoren, Filtersystemen oder Berieselungssystemen (Wang et al., 2000; Perderson, 2004).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss verschiedener verfahrenstechnischer Ansätze zum Abscheiden luftgetragener Partikel aus verschiedenen Einstreumaterialien, Rau- und Kraftfuttermitteln für Pferde unter standardisierten Bedingungen zu analysieren sowie den Abscheidegrad material- und anlagenspezifisch zu bewerten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde einerseits der Einfluss der Bearbeitungsweise (Reinigung, Quetschen) verschiedener herkömmlicher Kraftfuttermittel (Hafer, Gerste), sowie die Art des Kraftfuttermittels (Pellet-, Müsli- und Raufuttermittel) auf die Generierung von Schwebstaubpartikeln untersucht; als zweiter Aspekt wurde der Einfluss des Zumischens verschiedener Flüssigzusätze in verschiedenen Konzentrationen bei Hafer auf die Generierung von Schwebstaubpartikeln in verschiedenen Partikelfractionen analysiert. Zusätzlich war es Bestandteil dieser Arbeit, den Einfluss einer neu entwickelten Technologie zur Abscheidung luftgetragener Partikel aus verschiedenen Einstreumaterialien und Raufuttermitteln zu analysieren. Dabei wurde außerdem der Effekt einer achtwöchigen losen und gepressten Lagerung der zuvor behandelten Materialien auf die Höhe der Schwebstaubgenerierung untersucht.

Um praxisrelevante Aussagen treffen zu können, wurde in dieser Studie der Abscheidegrad luftgetragener Partikel anhand handelsüblicher Einstreumaterialien (Weizenstroh, entstaubte Späne, Flachs, Hanf), Raufuttermittel (Heu, Heulage) und Kraftfuttermittel (Hafer ganz und gequetscht, Gerste ganz und gequetscht, Müsli- und Pelletfuttermittel) untersucht.

2 Stand des Wissens

2.1 Definition von luftgetragenen Partikeln

Einführend werden grundlegende Definitionen zur Staubproblematik gegeben, wie sie in dieser Arbeit zum Tragen kommen.

Als **Aerosole** werden im Allgemeinen kleinste Teilchen im festen oder flüssigen Aggregatzustand definiert, welche in einem gasförmigen Medium suspensieren. Sie entstehen durch Zerstäubung oder Pulverisierung von flüssigen oder festen Stoffen (Hinds, 1998).

Bioaerosole sind komplexe luftgetragene Partikel biologischer Herkunft, welche im Allgemeinen in *belebte* und *unbelebte* Partikel unterteilt werden. **Belebte Partikel** stellen dabei die Gesamtheit der Luftinhaltsstoffe mit biologischem Ursprung menschlicher, tierischer, pflanzlicher und mikrobieller Herkunft dar (Bakterien, Pilze, Viren, Milben, Hefen, Protozoen, Endotoxine). Diese können je nach Herkunft allergische, toxische und infektiöse Reaktionen des Organismus herbeiführen (Hartung, 1995). **Stäube** stellen den unbelebten Anteil dar und werden als disperse Verteilungen fester Stoffe in Gasen, die durch mechanische Prozesse oder durch Aufwirbelung entstehen können, definiert (DFG, 2009). Nach Seedorf und Hartung (2002) bilden belebte und unbelebte Partikel gemeinsame Agglomerate, wobei ca. 80% der luftgetragenen Mikroorganismen an Partikel angelagert sind. Dieser Zusammenschluss wird auch als Cluster bezeichnet, wobei Staub die Rolle eines "Carriers" einnimmt, da sich die belebten Bestandteile des Bioaerosols an die Staubpartikel heften. Des Weiteren werden auch *Rauche* (Feststoffaerosole, die durch Kondensation entstanden sind) und *Nebel* (Aerosole mit flüssigen Teilchen) als unbelebter Anteil eines Bioaerosols definiert. Abbildung 1 stellt die Komponenten eines Bioaerosols grafisch dar.

Als **Schwebstaub** wird der Teil des Staubes bezeichnet, der aufgrund der geringen Partikelgröße nicht oder sehr langsam sedimentiert und inhalativ aufgenommen wird. Nach VDI 2463, Blatt 1 (1999) wird die Größenfraktion bis zu einem Durchmesser von etwa 30 µm als Schwebstaub definiert. Da es nicht das Ziel dieser Arbeit ist, verschiedene Bioaerosole zu charakterisieren, sondern vielmehr partikuläre Gesamtkonzentrationen zu erfassen, ist im weiteren Verlauf dieser Arbeit von Partikeln die Rede.

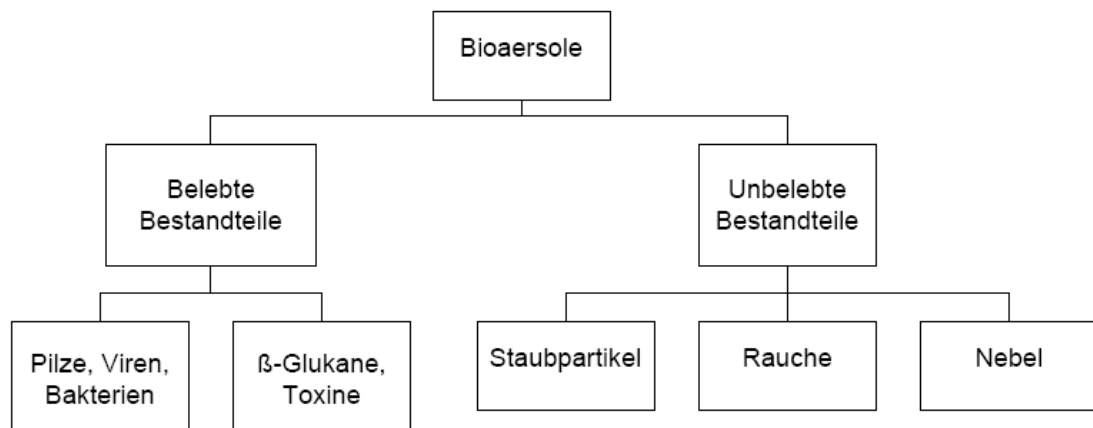


Abbildung 1: Komponenten eines Bioaerosols (Nannen und Büscher, 2007).

Laut Umweltbundesamt (UBA, 2010) gehen ca. 2/10 der in Deutschland anfallenden Staubemissionen (PM_{10}) von der Landwirtschaft (Ackerbau und Viehhaltung) aus. Laut Seedorf und Hartung (2002) stellt dabei die Tierhaltung die größte PM-Quelle in der Landwirtschaft dar, wobei die wichtigsten Emissionsquellen die Fütterung, der Trockenkot (vor allem in der Geflügelhaltung) sowie die Einstreu sind. Zudem sind laut UBA (2010), „[...] Emissionen für Schüttgutumschläge bei der Ernte, PM-Emissionen aus dem Energieverbrauch (Verbrennung) für Transporte und für Heizaggregate in Ställen, in Trocknungseinrichtungen oder Ähnlichem zu berücksichtigen [...]“.

2.2 Physikalische Partikeleigenschaften

Die physikalischen Eigenschaften von Partikeln, wie etwa der Größe, der Masse oder der Form als auch die partikelspezifischen Sedimentationseigenschaften unterliegen nach Cox (1995) sowie Seedorf und Hartung (2002) bestimmten aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten. Vor allem für die Fragestellung dieser Arbeit, in Hinblick auf die Reduzierung luftgetragener Partikel, sind die physikalischen Partikeleigenschaften von Bedeutung. Auch für die Gesundheit des Pferdes spielen die physikalischen Partikeleigenschaften eine wichtige Rolle, da die Lunge als eine Art Filter fungiert, was vor allem die Alveolen davor bewahrt, mit eingeatmeten Partikeln benetzt zu werden. Obwohl eine Vielzahl der eingeatmeten Partikel durch die Schleimhäute des Respirationstraktes abgeschieden werden, können Partikel abhängig von deren Größe, chemischen Eigenschaften (hydrophil oder hydrophob), Form und Dichte bis in die Alveolen penetrieren (Art et al., 2002).

2.2.1 Partikelgröße und Größenverteilung

Die Größe eines Partikels wird hauptsächlich anhand des *aerodynamischen Durchmessers* (d_{ae}) definiert, welcher den Durchmesser einer Kugel mit der Dichte von 1 (1 g/cm^3), die die gleiche Sinkgeschwindigkeit in ruhender oder strömender Luft besitzt, beschreibt (Drewnick, 2005). Dieser Zusammenhang ist gültig für Partikel mit einem $d_{ae} > 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ (DFG, 2009). Des Weiteren kann auch der *Äquivalentdurchmesser* für die Größenangaben von Partikeln genutzt werden, welcher den Durchmesser eines Kreises beschreibt, der unter gleichen physikalischen Bedingungen denselben Durchmesser hat wie die betrachteten Partikel (Müller, 2002). Die Einteilung der Partikel in Fraktionen orientiert sich in der Literatur hauptsächlich an dem aerodynamischen Partikeldurchmesser.

Die Größe eines Partikels stellt eine entscheidende gesundheitliche Relevanz für Mensch und Tier dar, wonach Partikel anhand des aerodynamischen Partikeldurchmessers in Fraktionen unterteilt werden. Die Einteilung der Partikel in Fraktionen ist in der Literatur vielfach unterschiedlich definiert worden. In der Vergangenheit wurde zwischen folgenden Fraktionen unterschieden (Mehlhorn, 1979):

- Grobstaub (50 - 500 μm)
- Mittelstaub (10 - 50 μm)
- Feinstaub (0,5 - 10 μm)
- Feinststaub (0,1 - 0,5 μm)

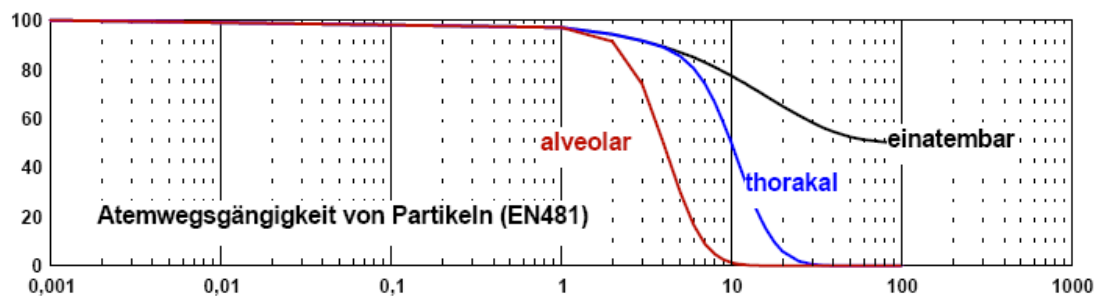
Eine weitere Einteilung erfolgt auf Basis der DIN EN 481 (1993), wonach Partikelfractionen anhand der respiratorischen Eindringtiefe der Partikel in den menschlichen Atemtrakt definiert werden, welches der gesundheitlichen Relevanz Rechnung trägt. Die definierten Partikelfractionen nach DIN EN 481 (1993) sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Definierte Partikelfractionen anhand der Partikelgrößen nach DIN EN 481 (1993).

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

* thoracal - alveolengängig

Abbildung 2 stellt schematisch die Atemwegsgängigkeit von Partikeln unterschiedlicher Größe dar.

**Abbildung 2:** Schematische Gegenüberstellung der Atemwegsgängigkeit von unterschiedlich großen Partikeln (DIN EN 481, 1993).

Eine weitere Einteilung erfolgt in Zusammenhang mit Angaben zu Emissionsfaktoren oder Massenkonzentrationen. Hierbei spricht man von PM (Particulate Matter), wobei PM₁₀ und PM_{2,5} alle Partikel beinhalten, die durch eine Trennkurve mit einem Abscheidegrad von 50% (Partikel, die einen nach Größen selektierenden Lufterlass passieren, der für einen aerodynamischen Durchmesser von 10 µm bzw. 2,5 µm einen Abscheidegrad von 50 Prozent aufweist) unterhalb von 10 µm bzw. 2,5 µm beschrieben werden. Nach ISO 7708 (1995) ist die PM₁₀-Fraktion mit der thoracalen Fraktion (DIN EN 481) gleichzusetzen. Abbildung 3 stellt schematisch die Staubfraktionen und ihre Eindringtiefen in den Respirationstrakt des Pferdes dar.

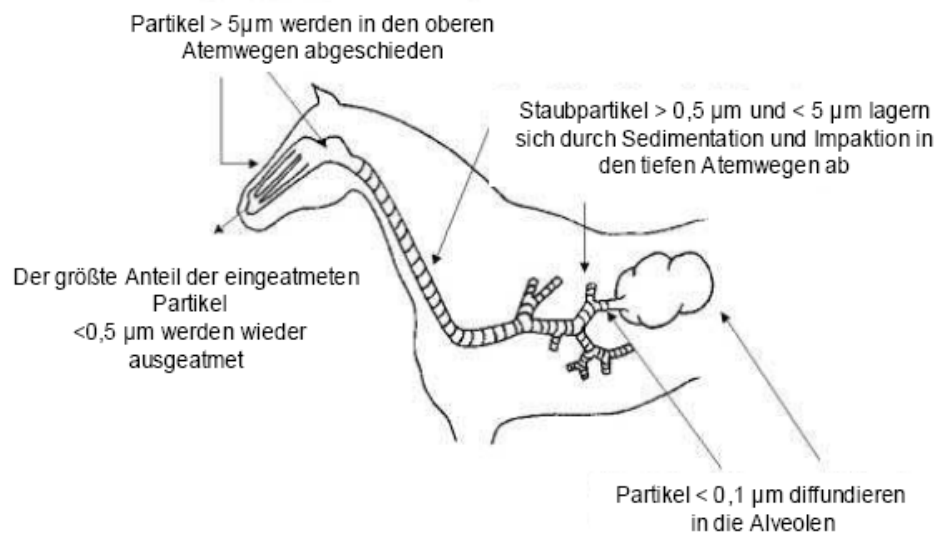


Abbildung 3: Staubfraktionen und ihre Eindringtiefen in den Respirationstrakt des Pferdes (Art et al., 2002).

In Hinblick auf die Reduzierung luftgetragener Partikel, ist die Größe der Partikel ein essentielles Kriterium. Nach Seedorf und Hartung (2002) sind Partikel hygroskopisch, das heißt, sie sind in der Lage, Wasserstoffmoleküle zu binden. Diese Eigenschaft wird durch die relative Luftfeuchte und die Temperatur beeinflusst. Nach Butera et al. (1991) bilden bei einem erhöhten Feuchtegehalt primär Grobstaubpartikel so genannte Cluster, welche durch Sedimentation dem Gesamtstaubgehalt der Luft entzogen werden. Vor allem bei dem Einsatz von Flüssigzusatzmitteln (Berieselung, Mischen) zur Reduzierung luftgetragener Partikel, könnte diese Eigenschaft von Bedeutung sein.

2.2.2 Sedimentation

Neben der eigentlichen Bedeutung der Größe (aerodynamischer Durchmesser) luftgetragener Partikel, hat diese einen entscheidenden Einfluss auf die Sedimentationsgeschwindigkeit von Partikeln (Seedorf und Hartung, 2002), wonach auch von den partikulären Sedimentationseigenschaften eine erhebliche Bedeutung für die Reduzierung luftgetragener Partikel ausgehen könnte.

Nach Tucker (1985) versteht man unter dem Begriff Sedimentation den Zustand der stationären Fallgeschwindigkeit eines Partikels in einer unendlich ausgedehnten kontinuierlich ruhenden Phase unter Wirkung von Massen- (Trägheits- und Zentrifugalkräfte) und Oberflächenkräften (Auftriebskraft). Pedersen (1992) untersuchte die Sedimentationsgeschwindigkeit von Partikeln in Abhängigkeit des aerodynamischen Durchmessers, wonach Partikel der Größe $20\ \mu\text{m}$ eine Sinkgeschwindigkeit

von ca. 12 mm/s aufwiesen. Partikel der Größe 10 μm sedimentierten mit einer dreimal niedrigeren Geschwindigkeit (ca. 4 mm/s) gegenüber 20 μm großen Partikeln, wohingegen Partikel $< 2 \mu\text{m}$ kein Sedimentationsverhalten zeigten. Auch Mehlhorn (1979) untersuchte die Sinkgeschwindigkeit von Partikeln. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Sedimentationsgeschwindigkeit luftgetragener Partikel in Abhängigkeit vom Teilchendurchmesser (Mehlhorn, 1979).

Teilchendurchmesser [μm]	Sinkgeschwindigkeit [$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$]
500 - 50	300 - 15
50 - 10	15 - 0,6
10 - 0,5	0,6 - 2×10^{-3}
0,5 - 0,1	2×10^{-4} - 2×10^{-4}

Entsprechend der Sedimentationsgeschwindigkeit luftgetragener Partikel verändert sich auch die Verweildauer in der Luft in Abhängigkeit von der Partikelgröße. Müller et al. (1977) konnten für Partikel der Größe 10 μm eine Verweildauer von 25 Minuten in der Luft analysieren. Teilchen der Größe 5 μm verweilten ca. 100 Minuten.

Nach Szabo (2007) hat das Sedimentationsverhalten von Partikeln unterschiedlicher Größe eine enorme gesundheitliche Bedeutung, wonach der Prozess der Ablagerung von Partikeln im Respirationstrakt der Sedimentation unterliegt. Partikel sedimentieren mit einer Geschwindigkeit proportional zu ihrer Dichte und zu ihrem Durchmesser, wonach kleinere Partikel (0,5 - 5 μm) durch Sedimentation bis in die Alveolen abgelagert werden.

Des Weiteren hat, auch im Hinblick einer Reduzierung luftgetragener Partikel, die von Hilliger (1990) beschriebene Agglomeratbildung von Partikeln eine Bedeutung. Demnach bilden Partikel aufgrund ihrer permanenten ungeordneten Bewegung in der Luft und den daraus resultierenden Kollisionen, Agglomerate. Daraus resultiert eine Zunahme der Fraktion an größeren Partikeln, welche aufgrund ihrer Größe schneller sedimentieren. Das Ausnutzen dieser Eigenschaft könnte für die Reduzierung luftgetragener Partikel von Bedeutung sein.

Nicht nur die Größe der Partikel, auch die Herkunft dieser beeinflusst das Sinkverhalten, wonach Tierstäube aus unterschiedlichen Haltungssystemen andere Sinkgeschwindigkeiten aufweisen (Schmitt-Paukzstat et al., 2005). Abbildung 4 stellt die Analysen von Schmitt-Paukzstat et al. (2005) bezüglich der Sinkgeschwindigkeiten von Stäuben aus unterschiedlichen Tierställen grafisch dar. Dabei fällt auf, dass die

Sinkgeschwindigkeiten von Dolomitstaub, sowie dem Staub aus der Schweine- und Geflügelhaltung voneinander abweichen.

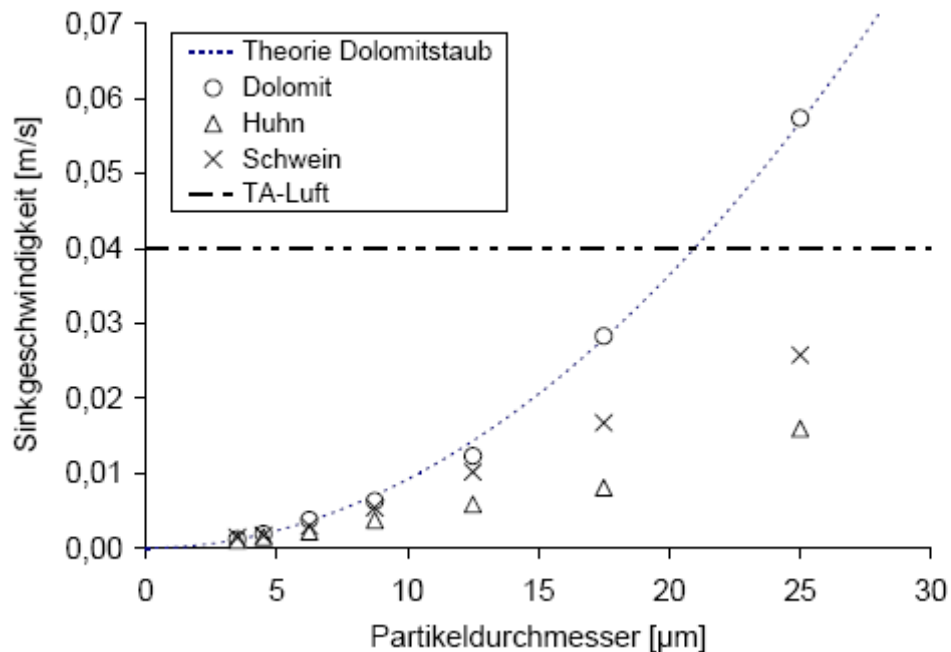


Abbildung 4: Sinkgeschwindigkeiten verschiedener Stäube in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers und der Herkunft (Schmitt-Paukstat et al., 2005).

Auch anhand der Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit v_s wird deutlich, welche Vielzahl von Faktoren einen Einfluss auf diese haben können. Nachfolgend wird die Formel zur Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit (Gesetz von Stokes) dargestellt.

Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit v_s (Gesetz von Stokes)

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

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

2.2.3 Partikelform und -dichte

In den meisten Partikelkollektiven hat nach Stieß (2007) jeder einzelne Partikel eine unterschiedliche Form, was es „[...] aussichtslos erscheinen lässt, aussagefähige Massenzahlen zu finden [...]“. Beispiele für Formfaktoren, welche in der Historie weiter zurückliegen, sind Definitionen nach Walz oder Wadell, die die Partikelformen mit einer Kugel vergleichen (Nannen und Büscher, 2007). Untersuchungen zur Partikelform von Stäuben aus der Pferdehaltung wurden bisher kaum vorgenommen. Formfaktoren einzelner Partikel werden durch mikroskopische Bilder erfasst. Nach Seedorf und Hartung (2002) stellen sich Partikel faserartig gestreckt oder gekrümmt, schuppenförmig oder polymorph dar. Die Partikelform beeinflusst deren Sedimentationsgeschwindigkeit, wonach unterschiedlich geformte Partikel entsprechend ihrer Sedimentationseigenschaften unterschiedlich tief in den Respirationstrakt penetrieren. Nach Art et al. (2002) penetrieren längliche/faserartige Partikel tiefer in die Lunge als sphärisch geformte Partikel mit demselben Durchmesser.

Neben verschiedenen Formen weisen Partikel in Abhängigkeit von der Größe auch unterschiedliche Dichtegrade auf. Nach Nannen und Büscher (2007) ist die Dichte von Partikeln abhängig von ihrer Größenklasse und Herkunft (Haltungssystem). Die Dichte von Partikeln gilt als ein wichtiger Parameter von Massenverteilungsberechnungen einer Partikelprobe. Demnach kann die Dichte von Partikeln physikalisch von der jeweiligen Partikelform und der Sedimentationsgeschwindigkeit berechnet werden (Drewnick, 2005). Nach Voshaar et al. (2005) hat auch die Dichte von Partikeln einen Einfluss auf deren Sedimentation und demnach auf die Deposition im Respirationstrakt, wonach große Partikel mit kleiner Dichte mit derselben Geschwindigkeit sedimentieren können wie kleine Partikel mit großer Dichte.

2.3 Gesundheitliche Bedeutung von luftgetragenen Partikeln

Luftgetragene Partikel haben eine direkte Einwirkung auf die äußere Haut und die zugänglichen Schleimhäute, auf das bronchopulmonale System und auf den Gastrointestinaltrakt (Stetzenbach, 1997; Kappos et al., 2003). Auch Mehlhorn (1979) ordnet luftgetragenen Partikeln verschiedene gesundheitsbeeinträchtigende Wirkungen zu. Aus medizinischer Sicht ist dabei die Einwirkung auf den Atemtrakt am bedeutendsten, wobei die Deposition von Partikeln im Respirationstrakt des Pferdes verschiedenen Mechanismen, wie der bereits beschriebenen Sedimentation, der Impaktion (entsteht, wenn der Luftvolumenstrom seine Richtung und Geschwindigkeit ändert) und der Diffusion unterliegt (Mehlhorn, 1979). Abbildung 5 stellt die Deposition von Partikeln unterschiedlicher Größe bei Mundatmung in der Lunge sowie deren verantwortliche Mechanismen grafisch dar.

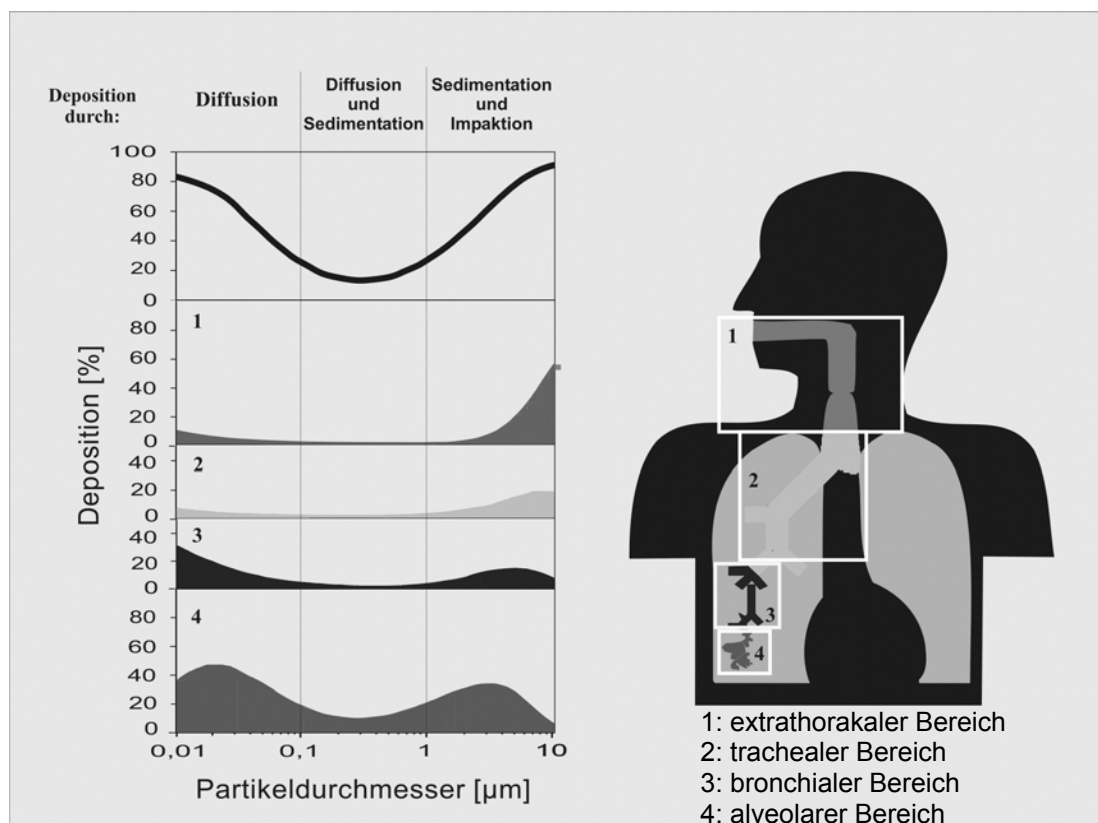


Abbildung 5: Deposition von Partikeln unterschiedlicher Größe bei Mundatmung in der Lunge (Heyder et al., 1986).

Bitterle (2004) beschreibt als Ort der Deposition für Partikel der Größe 10 µm vor allem den Hals-Rachen-Bereich (Impaktion). Auch nach Seedorf und Hartung (2002) wird die Mehrzahl der großen Partikel mit einem Durchmesser > 5 µm durch

Impaktion im oberen Bereich des Respirationstraktes abgesondert. Feine Partikel können hingegen in tiefe Regionen des Respirationstraktes eindringen, wobei die feine Fraktion ($< 5 \mu\text{m}$) durch Sedimentation und Impaktion dort deponiert wird. Nach Art et al. (2002) wird die Mehrzahl an Partikeln der Größe $< 0,5 \mu\text{m}$ durch Expiration aus dem Atemtrakt abgesondert, wobei durch Diffusion kleinere Partikel ($< 0,1 \mu\text{m}$) von den Bronchiolen in das angrenzende Gewebe gelangen.

Sowohl die Konzentration von Partikeln verschiedener Größenfraktionen in der Atemluft als auch die Expositionsdauer von luftgetragenen Partikeln, stellen die größten Gefahrenpotentiale für die Gesundheit dar. Zeitler (1988) stuft vor allem die von Staubpartikeln transportierten Luftkeime als besonders gefährlich für die Tiergesundheit ein, weil diese infektiöse, toxische oder allergisierende Wirkungen haben können. Die Autorin führt eine mögliche Überlastung der mukoziliären Clearance-Leistungen (unspezifische Abwehrvorgänge der Atemwege des Respirationstraktes) auf die permanente mechanische Reizwirkung von Partikeln zurück. Bei einer Überlastung dieser kann es zur Beeinträchtigung der Zilien (5 - 10 μm lange Zellfortsätze) bis hin zu deren Verlust kommen. Die Konsequenz, welche sich daraus ergibt, ist die Herabsetzung der Resistenz der Atemwege, wodurch nach Mayr (1999) sogar fakultativ pathogene Keime Krankheitssymptome auslösen und zu einem unspezifischen Husten führen können.

In vielen Berichten werden respiratorische Erkrankungen schon als „Berufskrankheiten“, primär von Sportpferden, bezeichnet. Aufgrund der Tatsache, dass die Vielzahl aller Sportpferde in Deutschland in einer konventionellen Boxenhaltung eingestallt wird, ist ein direkter Zusammenhang zwischen dem Stallklima (u.a. permanente mechanische Reizwirkung von Partikeln) und dem Auftreten respiratorischer Krankheitsbilder zu erkennen (Korries, 2003). Verschiedene Studien haben ergeben, dass eine Unbrauchbarkeit des Pferdes für den Reitsport bei über 30% der untersuchten Pferde durch chronische Veränderungen der Atemorgane hervorgerufen wurde und wiederum andere Untersuchungen prognostizieren, dass etwa 80% der in Ställen gehaltenen Pferde symptomatische Schäden der Atemwege aufweisen (McPherson und Thomson, 1983; Pick, 1986; Schlichting, 2001).

Umgangssprachlich ist die so genannte Dämpfigkeit (reversible Verengung der Atemwege) den meisten Menschen als respiratorische Erkrankung beim Pferd bekannt. Wissenschaftlich betrachtet wird unter dem Begriff Dämpfigkeit die chronisch obstruktive Bronchitis - COB - (englisch COPD - chronic obstructive pulmonary disease) verstanden, welche Dahme und Weiss (2007) als die häufigste respiratorische Erkrankung adulter Pferde in Stallhaltung bezeichnen. Aufgrund der Tatsache, dass der Begriff COPD aus dem humanmedizinischen Bereich stammt und ein

spezifisches, meist mit Rauchen assoziiertes Krankheitsbild (Asthma) beim Menschen beschreibt, deckt die Bezeichnung COB bzw. COPD das Krankheitsspektrum des Pferdes nicht ab. Dementsprechend wird seit dem Jahr 2001 international von der RAO (recurrent airway obstruction) als Synonym für die Dämpfigkeit gesprochen (Robinson, 2001).

2.3.1 Recurrant Airway Obstruction (RAO)

RAO betrifft erwachsene Pferde mit Atemwegsobstruktion, die durch Haltungsumstellung oder den Einsatz von Bronchodilatoren beseitigt oder erheblich gelindert werden kann (Traub, 2005). Cook (1976) ordnet diese Erkrankung hauptsächlich Pferden in Stallhaltung zu. Es handelt sich dabei um eine wiederkehrende Atemwegsobstruktion, die einen Reizzustand der Lunge darstellt, resultierend aus einer Allergie, wobei zwischen infektiösen Agenzien (Bakterien, Viren und Lungenparasiten), Umweltantigenen (Schimmelpilzsporen, Pollen, Milben, sowie Staub aus Heu und Stroh) und chemisch-physikalischen Reizen (Schadgase, Staubpartikel) differenziert werden muss (Heüveldop, 2002, Laboklin, 2008). Welcher dieser Faktoren eine übergeordnete Gewichtung zuzuordnen ist, ist bisher nicht eindeutig erforscht worden (Marti et al., 2005), wobei Seedorf und Hartung (2002) den Ursprung der Erkrankung bei einer allergischen Reaktion, primär auf Schimmelpilzsporen und luftgetragenen Partikeln aus Heu und Stroh, sehen. Dass die Erkrankung in einem direkten Zusammenhang mit dem Gehalt an luftgetragenen Partikeln steht, konnten Thomson und McPherson (1984) bereits belegen, wobei die Reduktion luftgetragener Partikel in der Stallluft durch das Verwenden einer strohlosen Einstreu zu einer deutlichen Linderung der Symptome bis hin zu einem symptomlosen Zustand führte.

Auftretende Symptome sind eine deutliche Leistungsminderung sowie eine erhöhte Atemfrequenz, ein erhöhtes Atemminutenvolumen (Schweratmigkeit) und hauptsächlich chronischer Husten, welcher primär bei einer Staubexposition auftritt (Marti et al., 2005). Eine voranschreitende RAO kann durch einen spontanen Verschluss im Bereich der kleinen Bronchien charakterisiert sein, dessen Grund eine Schleimansammlung in der Lunge ist, wodurch die Bronchiolen verkleben (Deegen und Müller, 1983). Das Endstadium einer RAO ist durch ein irreversibles Lungenemphysem gekennzeichnet, was als Dämpfigkeit bezeichnet wird.

2.3.2 Weitere respiratorische Erkrankungen

Sowohl luftgetragene Partikel, als auch Schimmelpilzsporen können ursächlich für eine Vielzahl weiterer Erkrankungen des Atemtraktes sein. Dazu zählt auch die **Luftsackmykose** (Entzündung des Luftsackes), welche nach Markus (2002) primär

durch die Schimmelpilzgattungen *Aspergillus*, *Penicillium* und *Candida* hervorgerufen wird. Als Ursache der akut bis chronisch verlaufenden Entzündung kann nach Franz (2003) auch das Eindringen von Fremdkörpern sowie größerer Staubpartikel angesehen werden. Grabner (1987) beschreibt die Ursache für eine Luftsackmykose etwas detaillierter. Er konstatiert, dass der Eintritt der Schimmelpilze durch die Tubenklappen, die sich bei jedem Schluckakt öffnen, verantwortlich sei. Er stellt die Hypothese auf, dass die Besiedlung des Luftsackes sowohl vom Schimmelpilzbefall des Futtermittels als auch von stallspezifischen Bedingungen abhängig wäre.

Diese im deutschsprachigen Raum relativ selten auftretende Erkrankung der Atemwege verursacht Blutungen im Respirationstrakt, was im schlimmsten Fall zum Verbluten führen kann. Die Mykosen werden mit dem Stallstaub aufgenommen, wobei der sich anlagernde Pilz das Gewebe zerstört und zu Nervenschädigungen führen kann. Eine Therapie kann je nach Konstitution des Pferdes erfolgreich sein (Markus, 2002).

Eine weitaus häufiger vorkommende Erkrankung der Atemwege ist die **Laryngitis** (Kehlkopfentzündung), welche in akutem Zustand hochgradig ansteckend ist. Sie geht oft mit einer *Rhinitis* oder *Bronchitis* einher. Neben Viren und Bakterien als häufigste Ursache, gelten auch alle Fremdkörper, die zu einer Reizung des Kehlkopfes führen, als Auslöser einer Kehlkopfentzündung. Der Reiz kann von Stäuben, Rauchen, Gasen sowie von operativen Eingriffen ausgehen. Die Folge ist eine Lähmung der Kehlkopfnerve, was zu einer Dysfunktion des Kehlkopfes führt und Kehlkopfpfeifen verursachen kann. Eine Therapie ist sehr schwierig und kann von einer medikamentösen Behandlung, bis hin zu einem Luftröhrenschnitt reichen (Arndt, 2001; Heüveldop, 2002).

Die bereits angesprochene **Rhinitis** beschreibt eine Entzündung der Nasenschleimhaut (Mansfield, 1998; Heüveldop, 2002). In seltenen Fällen kann sie auch durch eine Reizung der Nasenschleimhaut entstehen. Durch die Beseitigung der Ursache heilt eine Rhinitis von selbst aus. Betroffene Tiere können nach Seedorf und Hartung (2002) jedoch auch nach der Rhinitis anfälliger gegenüber Pilzen oder Bakterien sein.

Die Entzündung der Schleimhäute von Kiefer- und Stirnhöhle stellt ebenfalls eine Atemwegserkrankung dar, welche als **Sinusitis** bezeichnet wird und meist als Folge anderer Erkrankungen der Atemwege (chronischen Rhinitis, Kehlkopf- und Schlundentzündung) auftritt (Henninger et al., 2003). Blutiger und eitriger Nasenausfluss sowie im Extremfall das Aufweichen der Schädelknochen, sind typische

Symptome. Eine Therapie erfordert auf Grund des schweren Zugangs zur Kiefer- und Stirnhöhle einen chirurgischen Eingriff (Heüveldop, 2002).

2.3.3 Finanzielle Bedeutung respiratorischer Erkrankungen beim Pferd

Die unter *Gliederungspunkt 2.3* aufgeführten respiratorischen Erkrankungen sind nicht vollständig zu heilen. Teure Medikamente und Therapien können nur das Schlimmste verhindern oder die Krankheitssymptome lindern. Nachfolgend werden gemäß der Tierärztegebührenordnung (GOT, 2008) (zuletzt durch die Verordnung vom 30. Juni 2008 [BGBl. I S. 1110] geändert) exemplarisch Kosten für das Behandeln respiratorischer Erkrankungen aufgeführt. Je nach Standort und Kompetenz des behandelnden Arztes, können die nachfolgend dargestellten finanziellen Aufwendungen (Mindestbeträge) unterschiedlich hoch ausfallen. Zudem fallen bei jeder Behandlung allgemeine Untersuchungs- mit Beratungskosten von 17,18 € an. Folgeuntersuchungen im gleichen Behandlungsfall werden mit 13,74 € angesetzt. Bei schwereren Eingriffen muss zusätzlich die Unterbringung (Klinik) mit Überwachung finanziell honoriert werden. Für die stationäre Unterbringung können laut GOT (2008) pro Tag (ohne Behandlung und ohne Futterkosten) 20,05 € veranschlagt werden, wobei zusätzliche Kosten in Höhe von 17,18 € (Tag) bzw. 34,36 € (Nacht) für die Überwachung von Intensivpatienten erhoben werden können. Des Weiteren besagt die GOT (2008), dass für die Anwendung von Apparaten mit außergewöhnlichem Beschaffungsaufwand angemessene Zuschläge zulässig sind.

Tabelle 3: Behandlungskosten von Atemwegserkrankungen beim Pferd gemäß Tierärztegebührenordnung (GOT, 2008).

Behandlung	Kosten [€]
Endoskopie Rhino-, Vagino-, Laryngo-, Tracheoskopie	85,89 (3-fach 257,67 €)
Bronchoskopie	171,80 (3-fach 515,40 €)
Endoskopie, je Luftsack	17,18 (3-fach 51,54 €)
Operation am thorakalen Teil der Luftröhre und Lunge	400,85 € (3-fach 1.202,55 €)

In Anbetracht der anfallenden Kosten infolge respiratorischer Erkrankungen, welche hauptsächlich durch erhöhte Konzentrationen an luftgetragenen Partikeln und Schimmelpilzsporen hervorgerufen werden, wird die Bedeutung der Reduzierung luftgetragener Partikel in der Pferdehaltung deutlich.

2.4 Konzentrationen und Quellen luftgetragener Partikel in der Pferdehaltung

In einer Vielzahl wissenschaftlicher Studien wurden die Quellen von Staub bzw. partikulärer Emissionen in diversen Tierställen untersucht (Woods et al., 1993; Ferro et al., 2000; Banhazi et al., 2002). Dabei sind die Kontaminationsquellen in allen Tierställen annähernd die gleichen, wobei die Relevanz der jeweiligen Kontaminationsquellen tierartenspezifisch differenziert werden muss (Hartung, 1995). In Pferde­ställen wird die Einstreu als signifikante Größe zur Beeinflussung der Staubkonzentration angegeben, gefolgt von Rauffuttermitteln wie z.B. Heu (Hilliger, 1990). Des Weiteren gelten auch diverse Kraffuttermittel sowie baulich-technische Gegebenheiten als Quellen für Schwebstaub (Kamphues et al., 1989). Nachfolgend wird auf die einzelnen Quellen detaillierter eingegangen.

2.4.1 Einstreumaterialien und Rauffuttermittel

In Bezug auf die Art der Einstreu untersuchten Woods et al. (1993) den Staubgehalt in Pferdeställen mit unterschiedlichen Einstreumaterialien und Rauffuttermitteln. Dabei wurde zum einen ein Stall bei Verwendung von Stroh und Heu (Stall a) und zum anderen ein Stall bei dem Späne und pelletiertes Futter (Stall b) verwendet wurden, untersucht. Dabei wurden die Staubkonzentrationen in der Pferdebox (Andersen Kaskadenimpaktor) sowie im direkten Einatembereich des Pferdes (Personal Sampler) gemessen. In Bezug auf den Gesamtstaubgehalt (PM_{20}) konnten in Stall a ca. vierfach höhere Konzentrationen ($2,55 \text{ mg/m}^3$) als in Stall b ($0,70 \text{ mg/m}^3$) gemessen werden. In Anbetracht der alveolargängigen Partikelfraktion $PM_{2.5}$ konnte ebenfalls in Stall a ($0,44 \text{ mg/m}^3$) eine höhere Konzentration gegenüber Stall b ($0,20 \text{ mg/m}^3$) gemessen werden, wobei die Differenz zwischen beiden deutlich geringer im Vergleich zur Partikelfraktion PM_{20} ausfiel. Im direkten Einatembereich der Pferde konnten Konzentrationen von $17,51 \text{ mg/m}^3$ (PM_{20}) bzw. $9,28 \text{ mg/m}^3$ ($PM_{2.5}$) gemessen werden (Stall a). Dies verdeutlicht, welche Bedeutung der Schwebstaubgenerierung im direkten Einatembereich zukommt, welche sowohl vom Rau- als auch vom Kraffuttermittel ausgehen kann.

Neuere Untersuchungen von Fleming et al. (2008) bestätigen das Ergebnis von Woods et al. (1993). Dabei untersuchten die Autoren die Schwebstaubkonzentration (TEOM 1400a) in einem Pferdestall und konnten über einen Zeitraum von 14 Tagen eine mittlere Schwebstaubkonzentration (PM_{10}) von $111,2 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ in einem mit Spänen eingestreuten Pferdestall analysieren. Unter gleichen Bedingungen konnte in einem mit Weizenstroh eingestreuten Pferdestall eine mittlere Schwebstaubkonzentration (PM_{10}) von $227,5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ gemessen werden. Die gleichen Autoren

untersuchten den Einfluss verschiedener Einstreumaterialien auf die Schwebstaubgenerierung in standardisierten Laborversuchen. Abbildung 6 stellt die Ergebnisse im zeitlichen Verlauf dar. Dabei fällt auf, dass von Weizenstroh die höchste Schwebstaubgenerierung ausgeht, wohingegen Strohpellets ca. 4 bis 5-fach niedrigere Konzentrationen generieren. Auffällig ist weiterhin, dass Hanf (alternatives Einstreumaterial), welches primär für die Aufstallung von Allergikern empfohlen wird, annähernd die gleiche Konzentration von ca. 14.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ generiert wie Weizenstroh. Nach Woods et al. (1993) kann die Staubkonzentration durch alternative Einstreu drastisch gesenkt werden.

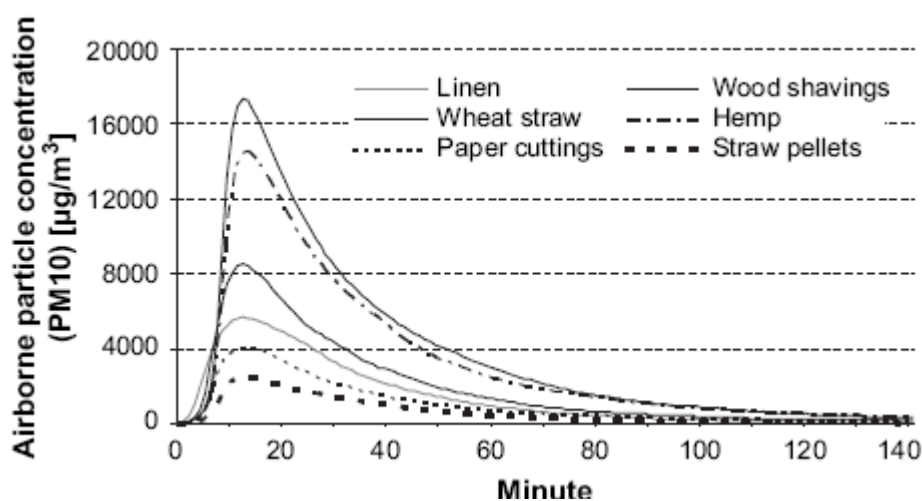


Abbildung 6: Schwebstaubgenerierung (PM_{10}) ausgehend von verschiedenen Einstreumaterialien für Pferde (Fleming et al., 2008).

Laut Untersuchungen von Kirschvink et al. (2002) zur Generierung luftgetragener Partikel, ausgehend von verschiedenen konventionellen und alternativen Einstreumaterialien, konnte der höchste Gehalt an einatembaren Partikeln bei Spänen (alternatives Material) gemessen werden. Weizen- und Leinstroh wiesen im Vergleich dazu 3- bis 4-fach geringere Werte auf.

Untersuchungen von Bartz (1992) zum Staubgehalt im Einatembereich des Pferdes (personal samplers) ergaben Konzentrationen von 1,25 mg/m^3 bis 2,72 mg/m^3 (PM_{20}). In Bezug auf die Generierung von Partikeln der Größe $< 10 \mu\text{m}$ konnte Bartz (1992) bei der Fütterung von trockenem Heu und Stroh Konzentration im direkten Einatembereich messen, welche ca. doppelt so hoch ausfielen wie die bei der stationären Messung in der Pferdebox. Des Weiteren untersuchte der Autor eine Möglichkeit der Staubreduzierung, indem er vor der Fütterung das Heu in Wasser einweichte und Hobelspäne als Einstreu verwendete. Die Messung der Fraktion PM_{10} ergab eine deutlich niedrigere Konzentration im Einatembereich von 0,38 mg/m^3 .

Entgegen der Meinung vieler Autoren, die Einstreu stelle die Hauptkontaminationsquelle für luftgetragene Partikel in einem Pferdestall dar, behaupten Zeitler et al. (1987), dass Heu die größte Quelle luftgetragenen Staubes darstellt. Auch Bartz (1992) stellt die gleiche These auf und begründet diese durch Staubmessungen, welche er in einer offenen Box und Haltung auf Stroh und Spänen bzw. einstreuloser Aufstallung durchführte. Als Ergebnis führte er an, dass Heu hinsichtlich des Staubgehaltes der Stallluft einen größeren Einfluss hat als Einstreu. Auch Kamphues et al. (1989) führen an, dass Heu vor allem feine Samen von Gräsern sowie einen hohen Anteil (> 80 %) an Milben unterschiedlicher Arten, sowie Käfer und Insekten bzw. deren Stoffwechselprodukte enthält, wohingegen Stroh deutlich weniger Milben enthält und der Feinanteil hauptsächlich aus sandigen Verunreinigungen und feinsten Spreu besteht.

Die Verfütterung von Silage oder Heulage könnte bereits als eine Maßnahme zur Reduzierung luftgetragener Partikel bezeichnet werden. In Untersuchungen von Schütz und Sasse (1998) wie auch Vandenput und Lekeux (1996) führte die Fütterung von Silage zu einer deutlich geringeren Generierung luftgetragener Partikel gegenüber trockenem Heu. Die Autoren führen dies auf den höheren Feuchtegehalt zurück.

2.4.2 Kraftfuttermittel

Bisher liegen nur wenige Studien vor, welche sich direkt mit der Staubgenerierung aus Krippen- bzw. Kraftfuttermitteln thematisch beschäftigt haben. Dementsprechend gibt es bislang keine genauen Angaben darüber, wie hoch die Konzentrationen [mg/m^3] luftgetragener Partikel unterschiedlicher Fraktionierungen, ausgehend von verschiedenen Krippenfuttermitteln, wirklich sind. Zweifellos steht fest, dass die von diesen Futtermitteln ausgehende Staubgenerierung im direkten Einatembereich des Pferdes stattfindet.

Haake (1992) konnte nachweisen, dass auch von Krippenfuttermitteln wie Hafer und Gerste, sowie von industriell hergestelltem Müsli oder Pellet eine Kontamination der Stallluft mit Mikroorganismen und Staub ausgeht. Der Autor untersuchte die Staubgenerierung ausgehend von ungereinigtem Hafer, gereinigtem Hafer, gequetschtem und gereinigtem gequetschten Hafer. In Bezug auf Staubpartikel der Größe 0,5 mm bis 0,1 mm ergaben sich deutliche Unterschiede, wobei der gereinigte Hafer und der gereinigte gequetschte Hafer deutlich geringere Staubgehalte im Vergleich zum ungereinigten Hafer aufwiesen. Der ungereinigte Hafer und der ungereinigte gequetschte Hafer wiesen nahezu identische Staubgehalte auf. Das Reinigen von Hafer führt zu einer deutlichen Reduzierung des Staubgehaltes, wobei zu

beobachten war, dass der gereinigte Hafer im Vergleich zu dem gequetschten gereinigten Hafer weniger Staubpartikel generierte. Der Einsatz der Haferreinigungsanlage führt zu einer Reduzierung der Staubgenerierung um 84,4%. Die hierbei gemessenen Staubfraktionen werden dem Gesamtstaub zugeordnet, welcher nicht als alveolargängig klassifiziert wird.

Meyer und Coenen (2002) stellen speziell die Gefahr bei zu feucht eingelagerten Krippenfuttermitteln dar, welche zu einem erhöhten Besatz mit Mikroorganismen und Parasiten sowie deutlich erhöhten Gehalten an Bakterien, Schimmelpilzen und Milben neigen. Des Weiteren stellen die Autoren dar, dass die Fütterung von industriell hergestelltem Pelletfutter auf Grund einer höheren Komprimierung essentieller Nährstoffe und deutlich reduzierten Staubgehalten immer mehr Zuspruch findet. Nach Haake (1992) führt die Pelletierung von Futter zu einer deutlichen Reduzierung (> 50%) des Staubgehaltes. Zeitler-Feicht (1994) verglich verschiedene zerkleinerte Mischfutter mit pelletiertem Futter und konnte beweisen, dass die Verfütterung von Pellets zu signifikant weniger lungengängigen Partikeln in der Stallluft führte. Arndt (2001) führt die Staubgenerierung ausgehend von Pelletfutter auf die Entstehung von Kleinstpartikeln bei Abriebprozessen während des Transportes zurück.

2.5 Einflussgrößen auf die Konzentration an luftgetragenen Partikeln in einem Haltungssystem

Der Gehalt an luftgetragenen Partikeln in der Stallluft unterliegt großen Schwankungen, vor allem in Ställen, in denen viel Aktivität zu verzeichnen ist. Unter dem Parameter Aktivität werden zwei verschiedene Einflussgrößen betrachtet. Zum einen die vom Tier und zum anderen die vom Menschen (Stallarbeit) ausgehende Aktivität. Nach einer Studie von Crichlow et al. (1980) besteht eine deutliche Abhängigkeit von den Aktivitäten im Stall, wobei die höchsten Werte beim Ausmisten und Einstreuen gemessen wurden. Mehrere Autoren beschreiben, dass die Prozesse des Ausmistens, des Einstreuens und des Fütterns den größten Einfluss auf die Konzentration an luftgetragenen Partikeln in der Stallluft haben (Clarke, 1987; Woods et al., 1993; Zeitler, 1985). Auch in einer Studie von Fleming et al. (2008) konnten signifikant höhere Staubkonzentrationen in der Zeit der Stallarbeit und des Fütterns nachgewiesen werden. Die mittlere Schwebstaubkonzentration war in diesem Zeitblock mehr als doppelt so hoch wie zu den restlichen Zeiten. Es wurden zum Zeitpunkt des täglichen Einstreuens Werte bis zu 700,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ analysiert. Abbildung 7 stellt den zeitlichen Verlauf (24 Stunden) der Schwebstaubgenerierung in Abhängigkeit vom Einstreumaterial in einem Pferdestall grafisch dar. Zeitler et al. (1984) haben bei Messungen in der Nacht Werte um 0,4 mg/m^3 und während der Stallarbeit am Tag bis zu 2,3 mg/m^3 gemessen.

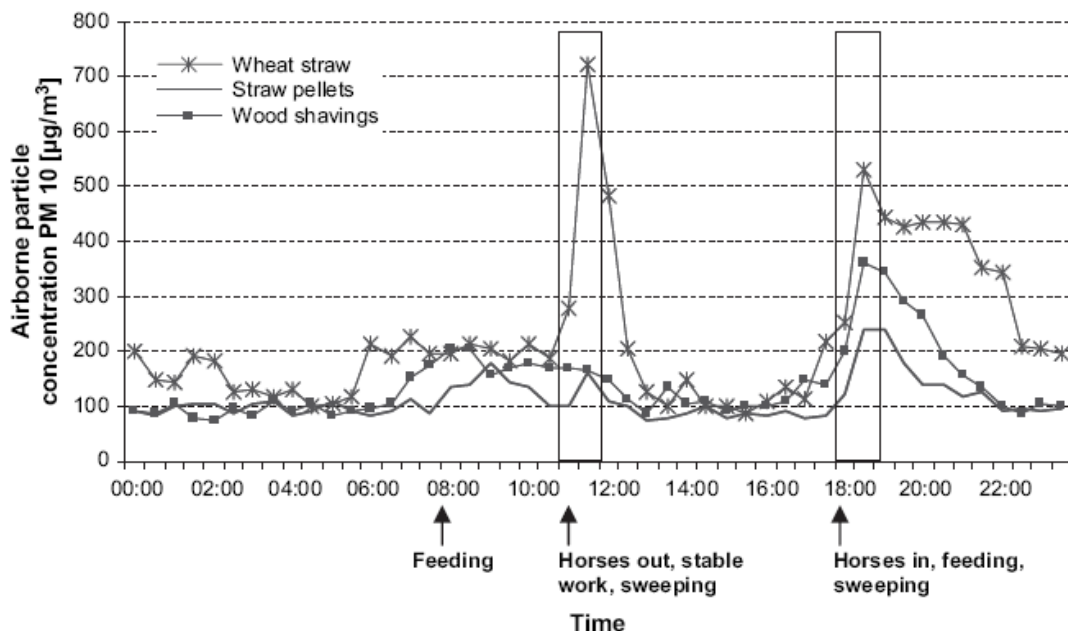


Abbildung 7: Schwebstaubkonzentrationsverlauf (PM₁₀) über 24 Stunden in einem Pferde-stall in Abhängigkeit vom Einstreumaterial (Weizenstroh, Strohpellets, Holz-späne) (Fleming et al., 2008).

Des Weiteren besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Partikelgröße und der Aktivität, wobei der Anteil der lungengängigen Partikel am Gesamtstaub in der Nacht deutlich höher als am Tag ist. Während einer erhöhten Aktivität am Tag dominieren vor allem Staubpartikel mit einem Durchmesser ab 10 µm in der Stallluft (Zeitler et al., 1984). Des Weiteren gibt Zeitler (1985) das Kehren der Stallgasse als einen Haupteinflussfaktor für eine erhöhte Schwebstaubkonzentration an, wobei Werte von 2,25 mg/m³ (Gesamtstaub) ermittelt wurden.

Pedersen (2004) fand ebenfalls eine hohe Korrelation zwischen der Tieraktivität und der Staubkonzentration in einem Schweinestall. Die Aktivität der Tiere in einem Haltungssystem wird entscheidend vom Alter der Tiere beeinflusst. Je jünger die Tiere sind, desto höher ist das Aktivitätsniveau bezogen auf die vom Tier eingenommene Fläche. Auch Zeitler-Feicht (1994) stellt heraus; je mehr Tiere sich in einem Stall befinden, desto mehr Quellen für Staub (Tieraktivität, Haaren, Schuppen) existieren. Diesbezüglich rät die Autorin eine Überbelegung zu vermeiden.

Weitere Einflussgröße stellen die in einem Stall vorhandene Luftfeuchtigkeit und Temperatur dar. Partikel haben eine hygroskopische Wirkung, wonach diese Feuchtigkeit aus der Umgebung (aus der Luftfeuchtigkeit) binden. Butera et al. (1991) beschreiben eine positive Korrelation zwischen dem prozentualen Anteil des alveolargängigen Feinstaubes (< 2,5 µm) und der relativen Feuchtigkeit, wobei größere

Partikel durch feuchtebedingte Agglomeration sedimentieren und der prozentuale Anteil des Feinstaubes zunimmt. Die relative Luftfeuchte beeinflusst außerdem die Größe, Masse, Dichte und Form der Aerosolpartikel (Seedorf und Hartung, 2002).

Auch die Art der Belüftung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der Schwebstaubkonzentration in der Stallluft. Hörmann (2006) konnte signifikante Unterschiede im Schwebstaubgehalt durch den Einsatz von Ventilatoren feststellen. Bei eingeschalteten Ventilatoren war die Staubkonzentration im Stall signifikant um 30% niedriger. Es konnte ein Konzentrationsunterschied von $0,0057 \text{ mg/m}^3$ nachgewiesen werden. Abbildung 8 stellt die Konzentrationsunterschiede bei angeschaltetem und ausgeschaltetem Ventilator grafisch dar (Hörmann, 2006). Zu annähernd dem gleichen Ergebnis kommt Webster (1987).

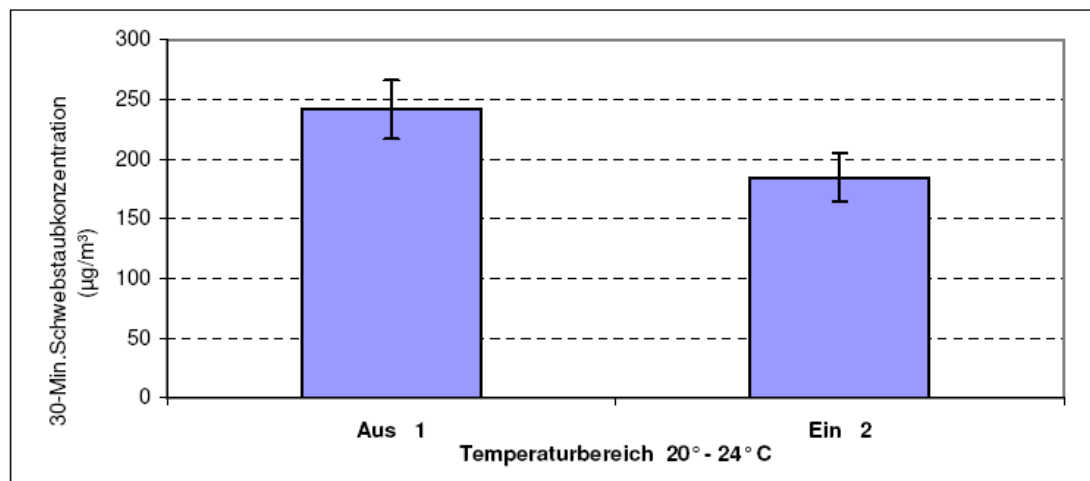


Abbildung 8: Mittlere Schwebstaubkonzentration im Pferdestall im Temperaturbereich von 20-24°C in Abhängigkeit von der Ventilatoreneinstellung (Hörmann, 2006).

Zu einer Reduktion der Staubkonzentrationen trägt ebenfalls eine angemessene Luftzirkulation im Stall bei. Fleming (2004) konnte eine deutliche Reduzierung der Schwebstaubkonzentration bei geöffnetem Fenster und einem damit verbundenen erhöhten Luftvolumenstrom nachweisen. Die geöffneten Fenster bewirkten besonders bei einem extremen Konzentrationsanstieg während der morgendlichen Stallarbeit eine Verringerung des Staubgehaltes um annähernd 50%.

2.6 Rechtliche Rahmenbedingungen

In Anbetracht der gesundheitlichen und der damit einhergehenden ökonomischen Relevanz von luftgetragenen Partikeln in der Pferdehaltung, müsste davon ausgegangen sein, dass eine rechtlich verbindliche Gesetzgebung bzw. eine Richtlinie existiert, welche eindeutige Grenz- bzw. Richtwerte für die Konzentrationen von Schwebstaub unterschiedlicher Partikelfractionen in einem Pferdestall definiert. Die vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) 2009 veröffentlichten „Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutzgesichtspunkten“ greifen das Thema Staub wie folgt auf:

„[...] Pferdeställe sollen deshalb so gebaut, betrieben und belüftet werden, dass eine der Außenluft entsprechende Qualität angestrebt wird. Das bedeutet, dass im Stall eine ausreichende Frischluftversorgung und angemessene Luftzirkulation sicherzustellen ist und **Staub-** sowie Keimgehalt, relative Luftfeuchtigkeit und Schadgaskonzentrationen in einem Bereich gehalten werden, der für die Pferdegesundheit unbedenklich ist [...]“. In Anbetracht dieser Definition, stellt sich die Frage: Welcher Bereich ist für die Pferdegesundheit unbedenklich?

Für die Konzentrationen z.B. an Ammoniak und Kohlendioxid im Pferdestall sind klar definierte Richtwerte in den „Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutzgesichtspunkten“ aufgeführt, welche in Tabelle 4 dargestellt sind (BMELV, 2009). Allgemein gültige Grenz- bzw. Richtwerte für Partikelkonzentrationen in Pferdeställen sind nicht definiert.

Tabelle 4: Richtwerte für das Pferdestallklima (BMELV, 2009).

Merkmal	Richtwert
Lufttemperatur	Stalltemperatur soll Außentemperatur gemäßigt folgen
Relative Luftfeuchtigkeit	60 – 80 %
Luftgeschwindigkeit im Tierbereich	≥ 0,2 m/s
Kohlendioxidgehalt der Luft	< 1.000 ppm
Ammoniakgehalt der Luft	< 10 ppm
Schwefelwasserstoffgehalt der Luft	0 ppm

ppm = parts per million; m/s = Meter pro Sekunde

Das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) geht in dem „Leitsatz: Bauliche Anlagen für die Pferdehaltung“ aus dem Jahr 2000 ebenfalls auf Richt- bzw. Grenzwerte für Lufteigenschaften im Pferdestall ein und beruft sich dabei auf Untersuchungen von Zeitler-Feicht (1994). Dementsprechend wird unter anderem ein Richtwert für den Feinstaubgehalt im Pferdestall von 4 mg/m^3 angegeben.

MAK-Liste

Die MAK-Liste wurde von der Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG, 2009) erlassen und definiert Grenzwerte unter anderem für Partikelkonzentrationen am menschlichen Arbeitsplatz. Die „Maximale Arbeitsplatz Konzentration“ (MAK) definiert einen Grenzwert eines bestimmten Stoffes in der Luft und bezieht sich dabei auf einen täglich achtstündigen Arbeitstag, bei dem die Gesundheit des Arbeitnehmers nicht beeinträchtigt werden soll und beruft sich auf die Gefahrstoffverordnung (GefStoffV, 2004) zum Schutz vor Gefahrstoffen. Folgende Grenzwerte gelten:

- einatembare Fraktion (PM_{10}) maximale Konzentration 4 mg/m^3
- alveolengängige Fraktion ($\text{PM}_{2.5}$) maximale Konzentration $1,5 \text{ mg/m}^3$

Dabei handelt es sich um Mittelwerte, einen achtstündigen Arbeitstag betreffend. Bei Einhaltung dieses Grenzwertes ist laut DFG (2009) nicht mit einer Gesundheitsgefährdung zu rechnen, wenn es sich nicht um Staub handelt, der gentoxische, krebserzeugende, fibrogene, allergisierende oder sonstige toxische Wirkungen hat. Bei Nichteinhaltung der Grenzwerte sind Schutzmaßnahmen zu ergreifen, die die Raumbelastung mindern können. In Bezug auf mögliche Richtwerte für die Pferdehaltung, wird sich in der Literatur oftmals dieser Werte (MAK-Liste) bedient.

2.7 Minderungsoptionen luftgetragener Partikel

In Bezug auf mögliche Minderungsoptionen luftgetragener Partikel muss zwischen zwei Arten unterschieden werden, zum einen muss der Minderung der Staubkonzentrationen durch technische Anwendungen Bedeutung beigemessen werden und zum anderen interessieren Maßnahmen zur Verbesserung des Stallmanagements.

2.7.1 Technische Möglichkeiten

In der Pferdehaltung werden selten technische Einheiten wie Filtersysteme oder Luftumwälzer zur Partikelreduzierung angewendet. Diese werden zum Teil in Schweine- und Geflügelställen eingesetzt. Der technische Einsatz von Lüftungssystemen findet auch in der Pferdehaltung Anwendung, weswegen im weiteren Verlauf der Arbeit darauf eingegangen wird.

Lüftungssysteme

Die Abfuhr von luftgetragenen Partikeln aus der Stallluft stellt eine Minderungsoption für luftgetragene Partikel in der Stallluft dar. Webster et al. (1987) beschreiben die Belüftung von Pferdeställen als die wichtigste Eliminationsmöglichkeit für Fein- und Feinststäube. Dabei sollte der Luftaustausch aus gesundheitlichen Aspekten nicht zu hoch angesetzt werden (Zugluft). Zur Sicherung eines geeigneten Stallklimas sollte je nach Jahreszeit ein stündlicher Luftwechsel zwischen 100 (Winter) und 250 bis 300 m³/Pferd erfolgen (KTBL, 2000). In der Praxis werden die meisten Pferdeställe durch das einfache Öffnen der Fenster gelüftet. Fleming (2004) konnte nachweisen, dass das Öffnen der Fenster, besonders bei einem extremen Konzentrationsanstieg während der morgendlichen Stallarbeit, eine Verringerung des Staubgehaltes um annähernd 50% bewirkte. Zeitler-Feicht (1994) gibt als eine optimale Luft-rate in Pferdeställen eine Mindestgeschwindigkeit von 0,2 m/s an, wobei im Sommer Werte von 0,8 m/s vorherrschen sollten.

In vielen Pferdeställen wird oftmals mit einer Trauf-First-Lüftung der Luftaustausch vollzogen, wobei durch Traufschlitze die Zuluft über Luftleitplatten in den Stall geführt wird. Die Abluft entweicht durch den offenen Firstschlitz (KTBL, 2000; Jungbluth et al., 2005). Abbildung 9 stellt eine Trauf-First-Lüftung in einem Pferdestall grafisch dar.

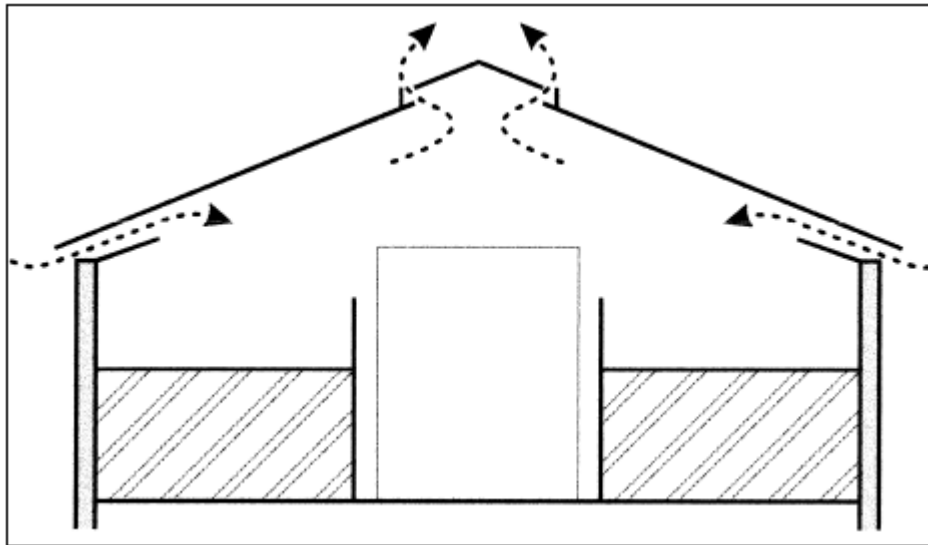


Abbildung 9: Trauf-First-Lüftung in einem Pferdestall (KTBL, 2000).

Das Prinzip einer Trauf-First-Lüftung beruht auf einem Luftaustausch mit Hilfe der Schwerkraft. Aufgrund eines Temperatur- und Dichteunterschiedes, der zwischen der Stall- und der Außenluft besteht, strömt kalte Luft in den Stall und verdrängt die wärmere Luft nach oben, welche über den First entweicht. Der Nachteil besteht darin, dass eine Temperaturdifferenz von mehr als 5 Grad zwischen Außen- und Innenluft vorherrschen muss. Marten (2004) beschreibt diese Art der Lüftung als unzureichend, vor allem in den Sommermonaten.

Eine effizientere Art der Lüftung, welche jedoch gegenüber einer Trauf-First-Lüftung teurer ausfällt, stellt die Zwangslüftung mit Hilfe von Ventilatoren dar. Laut KTBL (2000) ist eine Zwangslüftung bei mehrreihigen und sehr tiefen Ställen bzw. bei Ställen, die an ein größeres Gebäude angeschleppt sind, erforderlich. Sainsbury (1981) empfiehlt den Einsatz einer Zwangslüftung mit Luftraten von 100 m^3 pro Stunde und Pferd. Das am weitesten verbreitete System stellt die Unterdrucklüftung dar, bei der die Ventilatoren die Stallluft absaugen und durch Dachöffnungen ausblasen (Jungbluth et al., 2005). Abbildung 10 stellt diese Art der Lüftung grafisch dar.

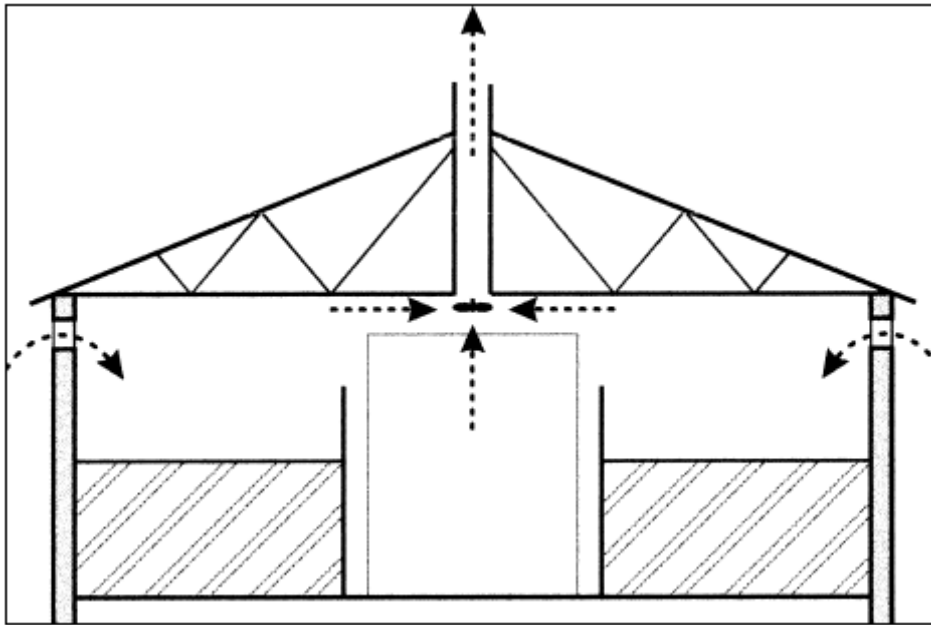


Abbildung 10: Unterdrucklüftung in einem Pferdestall (KTBL, 2000).

Bei Untersuchungen zur staubmindernden Wirkung durch eine Unterdrucklüftung, kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass eine gute Ventilation zwar den Gesamtstaub im Stall verringert, die Effekte auf den direkten Einatmungsbereich jedoch minimal ausfallen (Woods et al., 1993; Clarke, 1993). In diesem Bereich greift vor allem die DIN 18910 Teil 1 (2004), welche Planungs- und Berechnungsgrundlagen für die Bemessung der Belüftungsanlage zur Optimierung des Stallklimas liefert.

Untersuchungen zur Partikelminderung haben verstärkt in Schweine- und Geflügelställen stattgefunden, wo unter anderem eine Korrelation von $r^2 = 0,95$ zwischen der Ventilatorleistung und der Partikelkonzentration im Stall analysiert wurde (Kovacs und Rafai, 1984). Des Weiteren konnten die Autoren eine 43% niedrigere Partikelkonzentration in zwangsbelüfteten Ställen im Vergleich zu natürlich belüfteten nachweisen.

2.7.2 Möglichkeiten der Partikelreduzierung durch Verbesserung des Stallmanagements

Geeignete Minderungsmaßnahmen für Partikelkonzentrationen in Pferdeställen wären z.B. die Optimierung der Entmistung, der Fütterung, des Einstreuens sowie der Sauberkeit im Stall. Da die Hauptkontaminationsquellen luftgetragener Partikel in Pferdeställen hauptsächlich die Einstreu sowie Rau- und Kraffuttermittel darstellen, wird im weiteren Verlauf der Arbeit speziell darauf eingegangen.

Zum Stallmanagement zählt auch die Lagerung der Einstreumaterialien bzw. der Raufuttermittel, welche einen Einfluss auf die Partikelkonzentration im Stall haben kann. In älteren Pferdeställen erfolgt die Lagerung von Heu- und Strohballen oberhalb der Pferdeboxen (Dachboden). Dabei besteht die Gefahr, dass Staubpartikel verstärkt durch die Decke in den Stall gelangen. Demzufolge sollte die Lagerung in einem Mindestabstand von 46 m zum Stall erfolgen (Thomson und McPherson, 1983).

Der Einfluss der relativen Luftfeuchte auf den Staubgehalt der Luft ist von mehreren Autoren untersucht worden. Nach Mehlhorn (1979) ist eine verminderte Staubbildung bei erhöhter Luftfeuchte zu verzeichnen. Demnach kann auch die Regulation der relativen Luftfeuchte als eine schwebstaubmindernde Maßnahme angesehen werden. Diese sollte in einem Pferdestall laut KTBL (2000), wie auch Zeitler-Feicht et al. (2004) bemerken, zwischen 60 und 80% liegen, wobei eine dauerhafte Luftfeuchtigkeit von mehr als 80% zu respiratorischen Erkrankungen führen kann. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaft von Partikeln, sind diese in der Lage, Wasser zu binden (Seedorf und Hartung, 2002). Bei einer hohen Luftfeuchte kommt es zur Clusterbildung größerer Partikel, welche durch Sedimentation dem Gesamtstaubgehalt der Luft entzogen werden. Bei einer relativen Luftfeuchte von unter 60% bei gleichzeitigem Auftreten erhöhter Staubgehalte in der Luft, kann es nach Zeitler-Feicht (1994) zu einer dauerhaften Reizung der Atemwege kommen.

2.7.2.1 Stallarbeiten (Entmistung, Einstreuen, Fütterung)

Zu den Stallarbeiten, welche einen Einfluss auf den Partikelgehalt in der Stallluft haben können, zählen hauptsächlich die Entmistung, das Einstreuen und die Fütterung. Diese Prozesse gilt es zu optimieren, um die Schwebstaubkonzentration im Stall zu reduzieren.

Der Einfluss der Entmistung auf die Gehalte luftgetragener Partikel in der Stallluft war bisher nur selten Gegenstand wissenschaftlicher Studien und beschränkte sich hauptsächlich auf Ställe anderer Nutztierarten (Schwein, Geflügel). Die Optimierung der Entmistung spielt nach Eckardt (2008) hauptsächlich für die Minderung luftgetragener Endotoxine, welche hauptsächlich aus dem Kot stammen, eine entscheidende Rolle. Als Maßnahme führt die Autorin eine schnelle Fäkalienentfernung aus dem Stall sowie eine Fäkalienbehandlung oder -aufarbeitung an. Fleming et al. (2009) untersuchten den Einfluss verschiedener Entmistungsvarianten (Mistmatratze, tägliches Ausmisten komplett, tägliches Absammeln des Pferdekots) auf den Gehalt an luftgetragenen Partikeln (PM₁₀) in der Stallluft. Dabei traten zwischen den Varianten des täglichen kompletten Ausmistens (248,86 µg/m³) und des täglichen

Absammeln des Pferdekots ($281,68 \mu\text{g}/\text{m}^3$) keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Schwebstaubkonzentration in der Stallluft auf (mittlere Konzentration über 14 Tage). Bei der Variante der Mistmatratze konnte gegenüber beiden anderen Varianten eine signifikant niedrigere mittlere Schwebstaubkonzentration von $124,36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}) analysiert werden. Die Messungen fanden über einen Zeitraum von 2 Wochen ($n = 3$) statt, wobei in allen Varianten Weizenstroh verwendet wurde. In anderen Tierställen empfehlen Pearson und Sharples (1995) eine Nassreinigung der Oberfläche zur Partikelreduzierung nach dem Entmisten.

In Bezug auf die Reduzierung luftgetragener Partikel scheint der Entmistung keine große Bedeutung zuzukommen. Vielmehr wird diese ein entscheidendes Kriterium für die Gasgenerierung von z.B. Ammoniak und Methan darstellen. Tabelle 5 stellt die Werte der Gasgenerierung aus den unterschiedlichen Entmistungsvarianten (Mistmatratze, tägliches Ausmisten komplett, tägliches Absammeln des Pferdekots) nach Fleming et al. (2009) dar.

Tabelle 5: Mittlere Ammoniak- (NH_3), Kohlenstoffdioxid- (CO_2), Lachgas- (N_2O) und Methankonzentration (CH_4) in Abhängigkeit von der Entmistungsvariante (Fleming et al., 2009).

Mittlere Gaskonzentration [mg/m^3] (14 Tage)				
Entmistungsvariante	NH_3	CO_2	N_2O	CH_4
Mistmatratze	$1,93 \pm 0,03$	$1.217,9 \pm 21,2$	$0,63 \pm 0,002$	$3,30 \pm 0,11$
komplett Ausmisten	$2,17 \pm 0,02$	$1.250,9 \pm 13,9$	$0,68 \pm 0,002$	$4,28 \pm 0,07$
tägliches Absammeln	$1,62 \pm 0,04$	$1.518,0 \pm 25,5$	$0,68 \pm 0,002$	$5,51 \pm 0,13$

Im Vergleich zum Entmisten, hat das Einstreuen der Pferdebox sicherlich einen höheren Einfluss auf die Partikelkonzentration in der Stallluft, wobei die Wahl des Einstreumaterials ebenfalls von Bedeutung ist (s. Gliederungspunkt 2.7.2.2). In Untersuchungen von Jaggy (1996) konnten dort die höchsten Staubgehalte während des Einstreuens gemessen werden, wo die Einstreu in der Box aufgeschüttelt wurde. Um Pferde nicht diesen Konzentrationsspitzen auszusetzen, empfehlen Clarke (1987) wie auch Haake (1992) diese während des Einstreuens aus dem Stall zu nehmen. Die Zeitspanne, bis die Schwebstaubkonzentration, welche beim Einstreuprozess in die Stallluft generiert, annähernd das Niveau der Konzentration vor dem Einstreuen erreicht hat, untersuchte Haake (1992). Dabei dauerte dieser Prozess bei Stroh zwanzig Minuten, bei Spänen vierzehn Minuten und bei Papier zehn Minuten. Der Autor führt weiterhin an, dass zum einen die Ausgangskontamination,

zum anderen aber auch die Menge des eingestreuten Materials einen entscheidenden Einfluss haben.

Dass auch die Art der Fütterung einen großen Einfluss auf die Schwebstaubkonzentration im Stall hat, konnten Kamphues et al. (1989) nachweisen. Demnach würde eine Nassfütterung entscheidend zur Partikelreduzierung beitragen. Dabei entsteht allerdings der Nachteil, dass durch das Befeuchten ein optimales Nährmedium für Schimmelpilze geschaffen wird (Meyer und Coenen, 2000). Das bedeutet, dass das nasse Futter nach der Befeuchtung direkt verfüttert werden muss, was wiederum einen zusätzlichen Arbeitsaufwand vor der Fütterung bedeutet. An dieser Stelle könnte die Verfütterung von Silage als schwebstaubmindernde Maßnahme aufgeführt werden, welche nach Schütz und Sasse (1998) weniger inhalierbare Partikel als trockenes Heu enthält. Vor allem in kleinen Ställen ergibt sich der Nachteil, dass ein angebrochener Ballen Silage zeitnah verfüttert werden muss (Clarke, 1987).

Da auch das Fegen der Stallgasse einen entscheidenden Einfluss auf den Gehalt an luftgetragenen Partikeln in der Stallluft hat, kann aus Sicht der Schwebstaubreduzierung die Stallgasse vor dem Fegen mit Wasser befeuchtet werden. Zeitler-Feicht (1994) konnte eine 10-fach niedrigere Schwebstaubkonzentration in der Stallluft beim Nassfegen im Vergleich zum Trockenfegen analysieren. In anderen Bereichen der Nutztierhaltung wurde die Art der Futtergabe untersucht. Dabei wurden deutlich höhere Schwebstaubkonzentrationen in der Stallluft bei ad libitum Fütterung gegenüber der Futtervorlage auf dem Futtertisch gemessen (Bundy und Hazen, 1975; Honey und McQuitty, 1979).

2.7.2.2 Auswahl hygienisch hochwertiger Einstreumaterialien und Futtermittel

Wie in den vorherigen Gliederungspunkten detailliert beschrieben worden ist, stellen die Prozesse des Einstreuens und der Futtervorlage die Haupteinflussfaktoren auf die Konzentration an luftgetragenen Partikeln in einem Pferdestall dar. Dabei hat, nach Ferro et al. (2000), auch die Wahl der Einstreu einen signifikanten Einfluss auf die Staubkonzentration in der Stallluft. Grundlegend sollte diese sauber und staubarm sein (Clarke, 1987). Meyer und Coenen (2002) stellen im Hinblick auf die Vermeidung von Atemwegserkrankungen drei Mindestanforderungen an die Einstreu: gute Flüssigkeitsaufnahme, Vermeidung der Keimvermehrung, arm an Staub und allergenen Stoffen.

Aus Sicht der Partikelreduzierung, stellt die Wahl des Einstreumaterials ein viel diskutiertes Thema dar. In einer Vielzahl von Studien wird zu der Verwendung alternativer Einstreumaterialien, wie z.B. von Späne oder Strohpellets, geraten. So konnten

Woods et al. (1993) zeigen, dass die Staubkonzentration in Pferdeställen durch die Verwendung von Spänen anstelle von Stroh deutlich gemindert werden kann. Dies bestätigen auch Webster et al. (1987), welche eine signifikant höhere Konzentration von lungengängigem Staub beim Einstreuen von Stroh gegenüber Spänen und Papier analysierten. In Bezug auf Papier als Einstreumaterial für Pferdeboxen führt auch Haake (1992) an, dass dieses am wenigsten die Stallluftqualität durch Schwebstaubpartikel beeinträchtigt. Dies bestätigen auch Fleming et al. (2008), die bei Analysen zur Schwebstaubgenerierung, ausgehend von verschiedenen Einstreumaterialien unter Laborbedingungen, eine signifikant niedrigere mittlere Schwebstaubkonzentration (PM_{20} , PM_{10}), ausgehend von Papierschnitzeln gegenüber Spänen und Weizenstroh, analysieren konnten. Die Ergebnisse aus dieser Untersuchung sind in Abbildung 11 grafisch dargestellt. Dabei wurden die Materialien (1 kg) über zwei Stunden in einer Staubkammer rotiert (14 U/min).

Anhand der Abbildung 11 fällt weiterhin auf, dass in allen Partikelfractionen von Spänen eine signifikant höhere Schwebstaubkonzentration im Vergleich zu Weizenstroh ausgeht. Dies widerspricht sich mit den zuvor dargestellten Ergebnissen von Woods et al. (1993) wie auch Webster et al. (1987). Dem entgegen konnte auch Bartz (1992) eine hohe Feinstaubentwicklung durch das alternative Einstreumaterial Späne analysieren. Auch Ferro et al. (2000) ermittelten höhere Feinstaubgehalte in Spänen als in Stroh.

Des Weiteren gelten auch Hanf und Flachs als alternative Einstreumaterialien, welche von verschiedenen Herstellern, speziell für die Aufstallung von Pferden mit respiratorischen Erkrankungen, empfohlen werden. Wie in der Abbildung 11 (Fleming et al., 2008) zu sehen ist, generieren genau diese Einstreumaterialien in allen Partikelfractionen signifikant höhere Schwebstaubkonzentrationen im Vergleich zu Weizenstroh, Spänen, Strohpellets und Papierschnitzeln.

Die Wahl des Einstreumaterials hat einen signifikanten Einfluss auf den Gehalt luftgetragener Partikel in der Stallluft und kann entscheidend zur Reduzierung dieser beitragen. Dennoch ist nicht eindeutig zu klären, welches Einstreumaterial die signifikant niedrigsten Partikelkonzentrationen generiert. Demnach wäre eine Behandlung der Einstreumaterialien vor dem Einstreuprozess als eine mögliche Option zur Partikelreduzierung zu nennen. Clarke und Mandelin (1987) empfehlen den Einsatz von mechanischen Entstäubern.

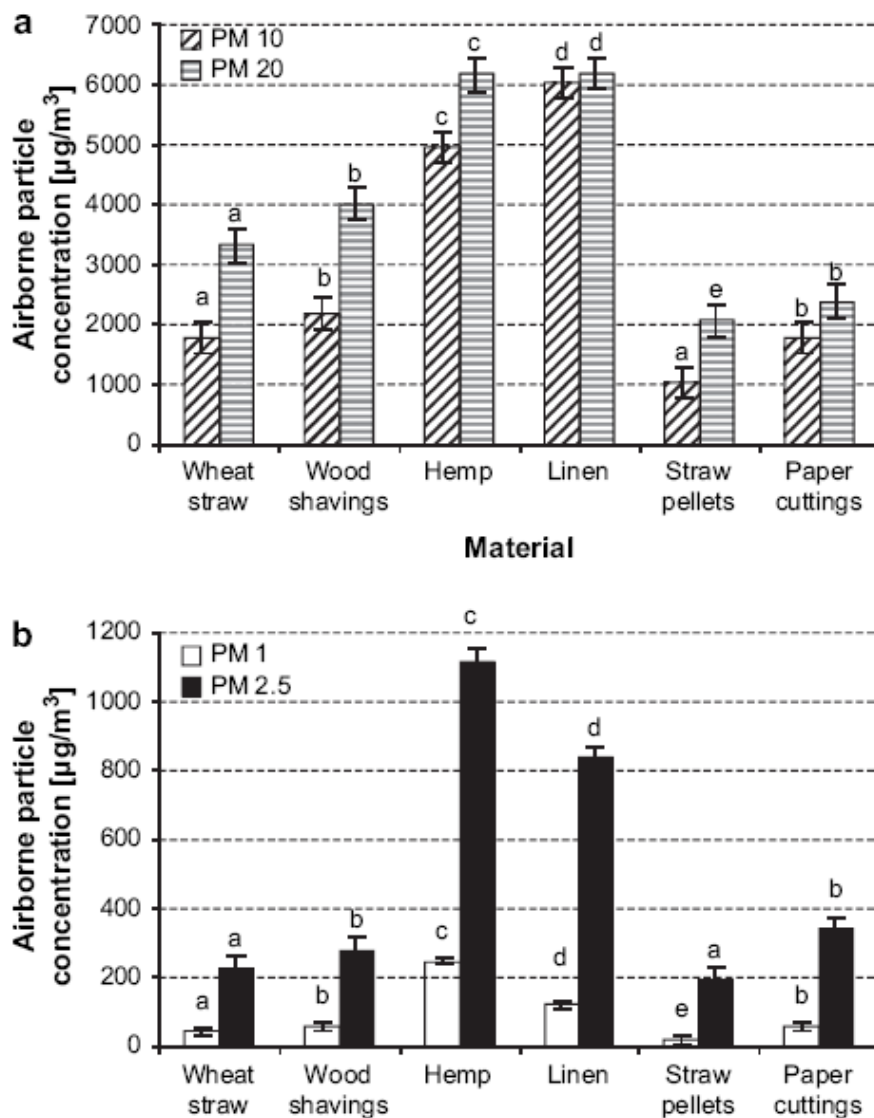


Abbildung 11: Mittlere Schwebstaubkonzentration (a = PM₂₀ und PM₁₀; b = PM_{2.5} und PM₁) ausgehend von verschiedenen Einstreumaterialien (Fleming, 2008).

a, b, c, d, e = Mittelwerte in einer Partikelfraktion mit unterschiedlichen Buchstaben, unterscheiden sich signifikant voneinander (P < .05).

Auch von Kraftfuttermitteln geht eine Partikelgenerierung aus, welche im direkten Einatembereich des Pferdes stattfindet. Dementsprechend kann die Behandlung dieser als eine Option zur Schwebstaubminderung betrachtet werden. Untersuchungen von verschiedenen Kraftfuttermitteln auf ihre Bestandteile zeigten, dass staubreiche Getreideproben Kleinstpartikel enthalten, welche sich aus der Spelze, Schale, Grannenbruchstücken, Unkrautteilchen und -samen und Vorratsschädlingen (Milben bzw. deren Exkremete) zusammensetzen (Kamphues et al., 1989). Auf die Behandlung von Kraftfuttermitteln mit Hilfe von Zusatzmitteln wird unter

Gliederungspunkt 2.7.2.3 detailliert eingegangen, aber bereits die Trockenreinigung von Kraftfuttermitteln kann als eine schwebstaubmindernde Maßnahme betrachtet werden. Haake (1992) untersuchte die Staubgenerierung ausgehend von ungereinigtem und gereinigtem Hafer, wobei dieser technisch gereinigt wurde (Staubmaster, Egon Sommer Maschinenbau GmbH & Co. KG, Germany). Die Behandlung erfolgte ohne den Zusatz von Flüssigkeiten. Die Partikel werden bei diesem Prozess lediglich durch ein Filtergebläse aus dem Hafer entfernt. In Bezug auf Staubpartikel der Größe 0,5 mm bis 0,1 mm ergaben sich deutliche Unterschiede, wobei der gereinigte Hafer deutlich geringere Staubgehalte im Vergleich zum ungereinigten Hafer aufwies. Der Einsatz der Haferreinigungsanlage führte zu einer Reduzierung der Staubgenerierung um 84,4%. Die hierbei gemessenen Staubfraktionen werden dem Gesamtstaub zugeordnet.

Auch die Wahl des Kraftfuttermittels kann als schwebstaubmindernde Maßnahme betrachtet werden. In mehreren Studien konnte nachgewiesen werden, dass die Verfütterung von mehl- bzw. schrotförmigen Futtermitteln zu deutlich höheren Gehalten an lungengängigen Partikeln in der Stallluft führt als durch die Verfütterung von pelletiertem Futter (Zeitler et al., 1987; Kamphues et al., 1989). Studien in Schweineställen zeigten, dass die Flüssigfütterung die geringste Staubfreisetzung bewirkt (Kamphues et al., 1989).

2.7.2.3 Futterzusatzstoffe

Das Vermischen von flüssigen Zusatzstoffen mit Rau- oder Kraftfuttermitteln ist in Bereichen der Schweine- und Geflügelfütterung vielfach untersucht worden (Gast und Bundy, 1986; Heber und Martin, 1988). Heber und Martin (1988) konnten durch die Zugabe von 1% Sojabohnenöl zu schrotförmigem Schweinefutter eine signifikante Schwebstaubreduzierung in der Stallluft von 29% analysieren. Untersuchungen von Welford et al. (1992) ergaben eine 31%-ige Schwebstaubreduzierung (PM₂₀) durch die Zugabe von 2% Öl zu Schweinefutter. Khol-Parisini et al. (2007) untersuchten den Effekt des Zumischens von zwei unterschiedlichen Ölarten zu Heu und Hafer bei Pferden mit Symptomen einer RAO. Es konnten keine Veränderungen der klinischen Symptome festgestellt werden. In Schweine- und Geflügelställen wird oftmals ein Gemisch von Öl und Wasser zur Besprenkelung des gesamten Stallbereiches eingesetzt. Dabei konnten Takai et al. (1995) wie auch Zhang et al. (1996) eine 70%-ige Reduzierung der Partikelkonzentration (PM₁₀) in der Stallluft analysieren. Untersuchungen unter Anwendung dieser Methode in Pferdeställen sind nicht bekannt.

In der Pferdehaltung werden oftmals Heurationen vor dem Verfüttern eingeweicht, wodurch Raymond et al. (1997) eine ca. 30-fach geringere Generierung von Staubpartikeln im Vergleich zur Trockenfütterung von Heu nachweisen konnte. Clarke und Madelin (1987) zeigten, dass das komplette Durchnässen des Heus essentiell ist und das bloße Besprenkeln nicht ausreicht, um die Keim- und Staubbelastung effektiv zu reduzieren. Dies bestätigt auch Haake (1992), der ein halbstündiges komplettes Eintauchen des geschlossenen Ballens in Wasser empfiehlt. Als präventive Maßnahme gegen chronische Atemwegserkrankungen scheint diese Methode durchaus eine Wirkung zu erzielen, wobei Dixon et al. (1995) zu der Schlussfolgerung kommen, dass bei hochgradigen respiratorischen Erkrankungen diese Methode nicht ausreicht. Solche Pferde sollten nach der Meinung der Autoren gänzlich mit Silage gefüttert werden.

In einer Studie von Hartung et al. (1989) wurde die Staubminderung durch das Einsetzen eines Staubbindemittels (Revesto pur®) untersucht, welches vor dem Verfüttern auf das Heu gesprüht wurde. Bei dem Einsatz des Bindemittels konnten Konzentrationen in der Stallluft (nachts) von $0,03 \text{ mg/m}^3$ (PM_{10}) gemessen werden. In dem gleichen Stall wurden zuvor (kein Einsatz des Bindemittels) Konzentrationen von $0,05 \text{ mg/m}^3$ gemessen, was beweist, dass durch das Bindemittel eine geringfügige Minderung eintrat. Der Gesamtstaubgehalt über 24 Stunden stieg nach Aufsprühen des Bindemittels hingegen von $0,07 \text{ mg/m}^3$ auf $0,12 \text{ mg/m}^3$ in der Kontrollwoche. Die Autoren empfehlen daher, das Einsprühen nach Möglichkeit außerhalb der Stallungen vorzunehmen. Des Weiteren sei anzumerken, dass dieses Verfahren mit einem hohen Zeitaufwand verbunden ist.

2.8 Messprinzipien und -techniken luftgetragener Partikel in Nutztierställen

Die von der Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) erarbeiteten VDI-Richtlinien sowie die DIN- und EN-Normen, welche den Stand der Technik und der Wissenschaft beschreiben, definieren den Einsatz bestimmter Prinzipien und Techniken für das Messen luftgetragener Partikel in Nutztierställen. Konzentrationsangaben von Staubpartikeln können sowohl massenspezifisch (mg/m^3) als auch durch die Anzahl der Partikel pro Volumeneinheit wiedergegeben werden ($\text{Partikel}/\text{m}^3$) (Seedorf und Hartung, 2002). Für die Erfassung von luftgetragenen Partikeln ist es wünschenswert, dass die Messgeräte die Partikelmassenkonzentration, Partikelgröße, Partikelanzahlkonzentration und die Partikelgrößenverteilung analysieren. Da nicht alle Systeme alle vier Parameter aktiv bestimmen können, kann mit Hilfe partikulärer Eigenschaften (Dichte) von der Partikelanzahl auf die Masse geschlossen werden. Im Allgemeinen wird bei den Messprinzipien zwischen der gravimetrischen und optischen Bestimmung des Staubes unterschieden (Müller und Wieser 1987; Henseler-Paßmann, 2010). Beide Messprinzipien werden im Folgenden anhand ausgewählter Messsysteme detailliert erläutert.

Unabhängig vom jeweiligen Messprinzip (optisch oder gravimetrisch) wird bei Partikelmessungen zwischen **kontinuierlichem** und **diskontinuierlichem** Verfahren unterschieden. Nach Brauer (1995) werden heutzutage hauptsächlich Staubmessgeräte verwendet, welche nach dem kontinuierlichen Messverfahren arbeiten.

Kontinuierliche Verfahren

Geräte, welche nach diesem Verfahren messen, ermöglichen eine fortlaufende Messung und Beobachtung der Luftverunreinigungssituation, wodurch es möglich ist, kleinste Konzentrationsänderungen und -schwankungen zeitlich genau zu analysieren. Driemer und Van den Weghe (1997) nutzten ein kontinuierlich arbeitendes Schwebstaubmessgerät (TEOM 1400a) für die Analyse der Staubsituation in verschiedenen Tierställen (Broiler- und Mastschweine Stall). Die Autoren stellen vor allem die präzise Analyse kurzfristig auftretender Konzentrationsmaxima als den wesentlichen Vorteil des kontinuierlichen Verfahrens heraus. Nach Födisch (2004) eignen sich solche Geräte insbesondere für Messungen bei der Funktionsüberprüfung technischer Schutzmaßnahmen bzw. bei der Überprüfung der Einhaltung von Kontrollwerten. Bei kontinuierlichen Langzeitmessungen spricht Brauer (1995) die umfangreich anfallende Datenmenge an, welche üblicherweise nur noch automatisch ausgewertet werden kann. Laut TA-Luft (2002) müssen „[...] bei kontinuierlicher Messung bezogen auf die Stundenmittelwerte eine Mindestverfügbarkeit von 75 vom Hundert gewährleistet sein“.

Diskontinuierliche Verfahren

Bei diskontinuierlichen Messungen, werden laut Brauer (1995) wie auch Födisch (2004) Stichproben gezogen, welche anschließend im Labor analysiert und ausgewertet werden. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, die Probenahmestelle flexibel zu variieren. Laut TA-Luft (2002) kommen diskontinuierliche Messungen nur dann in Betracht, wenn für den jeweiligen Schadstoff nur ein Immissionswert für jährliche Einwirkung festgelegt werden muss oder wenn eine Bestimmung kurzzeitiger Spitzenbelastungen nötig ist. Bei diskontinuierlichen Messungen soll die Probenahmezeit in der Regel 1 Stunde betragen (TA-Luft, 2002). Als Nachteil dieses Verfahrens wird oftmals der hohe personelle Aufwand angeführt. Des Weiteren können zeitweilige Konzentrationsmaxima nicht erkannt werden (Driemer und Van den Weghe, 1997).

2.8.1 Optische Messprinzipien

Geräte, welche nach dem optischen Messprinzip arbeiten, nutzen die Partikeleigenschaft Licht zu zerstreuen und zu absorbieren. Nach Müller und Wieser (1987) bilden Staubpartikel in übersättigtem Wasserdampf sogenannte Kondensationskerne wodurch die Partikel größer und somit durch optische Verfahren darstellbar werden. Die optische Bestimmung arbeitet dabei mit Streulicht oder Transmissionslicht. Auch Henseler-Paßmann (2010) arbeitete bei Untersuchungen zu Emissionsmessungen von Feinstäuben in Rinderställen mit einem Gerät (Grimm Aerosol spectrometer 1.109), welches auf der Basis eines Streulichtverfahrens arbeitet, wodurch es möglich ist, sowohl die Größe als auch die Anzahl von Partikeln in Abhängigkeit von der Streuungsintensität zu erfassen. Bei Geräten, welche nach dem optischen Messprinzip arbeiten, wird oftmals die Kalibrierung als problematisch beschrieben. Die optische Messgröße unterliegt neben der Massenkonzentration auch verschiedenen Partikeleigenschaften, wie etwa der Partikelform, wodurch eine spezifische Kalibrierung benötigt wird, welche mit einem hohen zeitlichen und technischen Aufwand verbunden ist (Driemer und Van den Weghe, 1997; Klemm et al., 2008). Nachfolgend wird das Messgerät - Grimm Aerosol spectrometer 1.109 - zur Beschreibung des optischen Messverfahrens näher erläutert.

Grimm Aerosol spectrometer 1.109

Das von der Firma GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG entwickelte Aerosolspektrometer 1.109 (s. Abbildung 12) arbeitet nach dem Prinzip des Streulichtverfahrens, welches unter Abbildung 13 dargestellt ist. Bei dem GRIMM Aerosolspektrometer wird die Probenluft durch eine Pumpe mit konstantem Luftstrom durch eine Einlassöffnung in das Gerät gesaugt. Dort erfolgt die Zählung und

Größeneinteilung der Partikel gemäß dem nachfolgend beschriebenen Streulichtprinzip. Als zu messende Größe wird eine Partikelanzahl pro m^3 ausgegeben. Dieses Gerät eignet sich vor allem für das Messen partikulärer Emissionen in Lüftungschächten zwangsbelüfteter Tierställe (Nannen und Büscher, 2007). Das Gerät misst in einem Messbereich der Staubgröße von $0,3$ bis $>20 \mu\text{m}$ und in Bezug auf die Partikelmasse in einem Bereich von 1 bis $100.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Abbildung 12: Ansicht des Aerosolspektrometers 1.109 der Firma GRIMM (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 2010).

Abbildung 13 stellt das Prinzip des Streulichtverfahrens dar, nach dem das GRIMM Aerosolspektrometer arbeitet. Bei dieser Methode wird das um 90° umgelenkte Streulicht über einen Spiegel mit einem Öffnungswinkel von etwa 60° auf eine Empfängerdiode geleitet. Wenn Partikel den Laserstrahl durchqueren, geben sie einen Streulichtimpuls ab. Das Signal der Diode wird durch den Empfänger in verschiedenen Größenkanälen klassifiziert. Die Pfeile veranschaulichen den Weg des Lichtes.

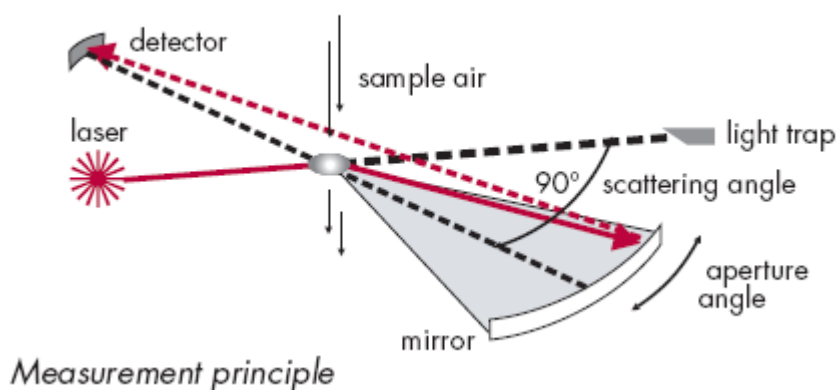


Abbildung 13: Prinzip des Streulichtverfahrens (GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, 2010).

2.8.2 Gravimetrische Messprinzipien

Laut Schmidt-Ott und Ristovski (2004) ist die gravimetrische Probennahme das meist verwendete Messverfahren zur Erfassung partikelförmiger Stoffe. Bei den gravimetrischen Verfahren unterscheidet man zwischen der Filtration und der Impaktion, welche in den folgenden Gliederungspunkten detailliert erläutert werden.

2.8.2.1 Impaktion („Aufprallverfahren“) - Andersen-Kaskaden-Impaktor

Bei diesem Verfahren wird die aerosolhaltige Probe mit einem definierten Volumenstrom in einer Düse beschleunigt und danach umgelenkt. Am Beispiel einer PM_{10} -Messung treffen Partikel $>10 \mu m$ aufgrund ihrer Trägheit auf eine Prallplatte (Aufprallverfahren) und werden darauf abgeschieden. Kleinere Partikel (PM_{10}) bleiben im Gasstrom und werden auf dem nachfolgenden Filter zurückgehalten und gravimetrisch bestimmt. Es erfolgt somit eine Größenfraktionierung der untersuchten Partikel entsprechend ihrer aerodynamischen Eigenschaften (Nannen und Büscher, 2007).

Der Andersen-Kaskaden-Impaktor ist nach Angersbach-Heger (2002) das gebräuchlichste Impaktionsgerät. Dabei handelt es sich um einen mehrstufigen Kaskadenimpaktor, welcher aus hintereinander geschalteten Impaktorstufen besteht, die so ausgelegt sind, dass in den nachfolgenden Stufen Partikel geringerer Trägheit abgeschieden werden und somit Fraktionen unterschiedlicher Partikelgröße erfasst werden können. Durch eine Verringerung der Düsenweite von Stufe zu Stufe erhöht sich die Geschwindigkeit des durchgeführten Gas-/Partikelstromes. Somit werden immer kleinere Partikel abgeschieden. Die nicht abgeschiedenen Partikel werden auf einem hinter der letzten Impaktionsstufe angeordneten Endfilter gesammelt. Das Gerät wird bei einer Absauggeschwindigkeit von 28,3 l/min unter Beachtung der in der VDI 2066, Blatt 1 (2006) zugrunde liegenden Angaben betrieben. Der so festgelegte Aufbau des Gerätes erlaubt eine Partikelgrößenzuordnung. Abbildung 14 stellt das Funktionsprinzip dar.

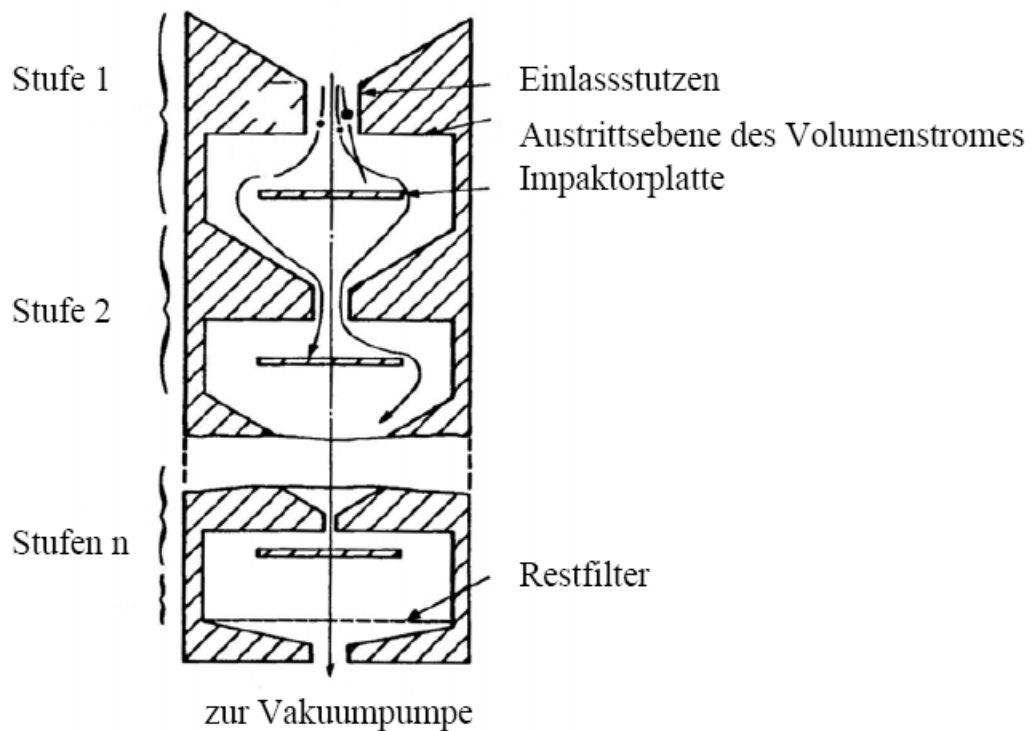


Abbildung 14: Aufbau und Prinzip eines einfachen Impaktors (Mitchell, 1995).

Das Verfahren der Impaktion wurde für Anwendungen im Bereich der Arbeitsplatzhygiene entwickelt. Nach Berry et al. (2005) eignen sich Impaktoren gut für Messungen im Stallbereich. Dadurch, dass vor allem kleine, geregelte Pumpen verwendet werden, kann die Probenahme im Stallbereich erfolgen, ohne das Verhalten der Tiere zu beeinflussen. Nach Angersbach-Heger (2002) kann es zur Schädigung der Partikel beim Aufprall auf die Platten kommen. Als weiteren Nachteil sieht die Autorin, dass es speziell bei Keimsammlungen zur Austrocknung der Keime auf der Sammeloberfläche infolge des Luftstroms kommen kann, wonach die Probennahmedauer auf 1-30 Minuten reduziert werden muss. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Partikel sich gehäuft unter den Lochbohrungen ansammeln, was eine saubere Trennung der einzelnen Partikel erschwert.

2.8.2.2 Filtration - Tapered-Element Oscillating Microbalance (TEOM)

Bei der Filtration wird ein volumendefinierter Luftstrom durch entsprechende Filter gesaugt, wobei der Grad der Abscheidung von der Größe der Partikel und den Eigenschaften des Filters hinsichtlich des sogenannten „Cut-Off-Wertes“ (ist abhängig von der Porengröße und vom Filtertyp) abhängt. Eines der meist eingesetzten Geräte zur Bestimmung partikulärer Konzentrationen stellt das TEOM (Tapered-Element Oscillating Microbalance, Rupprecht & Patashnick Co., Franklin, MA) dar (Patashnick und Rupprecht, 1991). Durch eine externe Vakuumpumpe wird die zu untersuchende Luftprobe über ein oszillierendes konisches Röhrchen durch ein Filterpapier gesaugt (0,5-13,67 l/min), auf dem die in der Luftprobe enthaltenen Partikel abgeschieden werden (Lim et al., 2003). Der Filter ist am Ende einer schwingenden Hohlneedle befestigt. Eine elektronische Schaltung erfasst die Schwingfrequenz der Hohlneedle, welche bei einer Partikelzunahme durch die Staublast des Filters beeinflusst und verändert wird. Die gemessene Frequenzänderung wird über eine gerätespezifische Kalibrierkonstante in Beziehung zur Massenänderung auf dem Filter gesetzt (Driemer und Van den Weghe, 1997). Dadurch kann die Veränderung der Frequenz im Verlaufe der Zeit zur Wägung herangezogen werden (Horodecki und Fissan, 1996). Es handelt sich also um eine „schwingende“ Mikrowaage (Berry et al., 2005). Die Massenänderung wird nach folgender Formel berechnet:

Berechnung der Massenänderung

$$\Delta m = K_0 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_0^2} \right)$$

Δm = Massenänderung in einem Zeitintervall ($t_1 - t_0$)
 f_1 = Frequenz zur Zeit t_1
 f_0 = Frequenz zur Zeit t_0
 K_0 = Kalibrierkonstante

Normalerweise ändert sich die Kalibrierkonstante K_0 über die Lebensdauer des Messgerätes nicht, wobei Abweichungen der gemessenen Konstante vom Originalwert von weniger als 2,5% akzeptabel sind (Patashnick und Rupprecht, 1991; Driemer und Van den Weghe, 1997).

Die Sensoreinheit kann mit unterschiedlichen Messköpfen (PM_{20} , PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$) ausgerüstet werden, wonach eine Partikelgrößenordnung der Konzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) kontinuierlich und online möglich ist. Abbildung 15 stellt das TEOM1400a (Ruppert & Patashnick) und die Hohlneedle mit Filter dar. Abbildung 16 stellt das TEOM1400a mit Messkopf PM_{10} bei Praxisuntersuchungen von Fleming (2004) dar.



Abbildung 15: TEOM 1400a und Hohnadel mit Filter (Patashnick und Rupprecht, 1991).

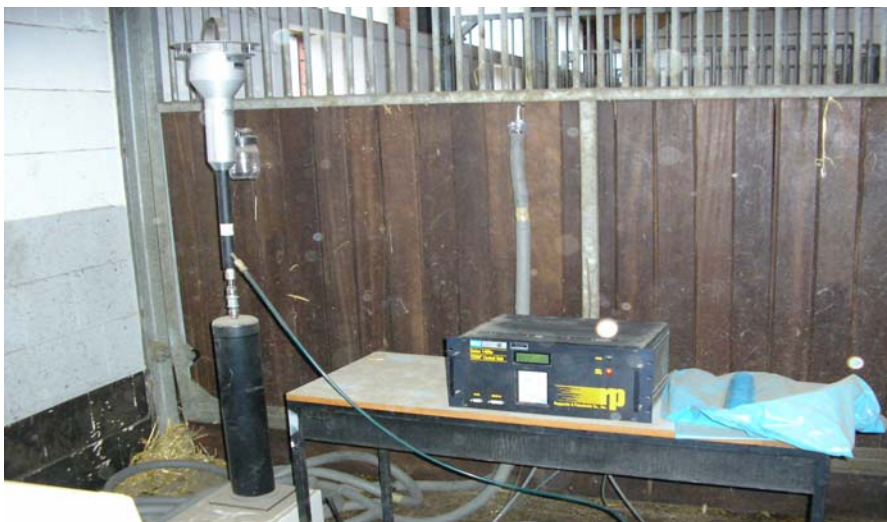


Abbildung 16: TEOM1400a mit Messkopf PM_{10} (Fleming, 2004).

Berry et al. (2005) führen an, dass sich mit dem TEOM sehr gute Konzentrationsverläufe innerhalb eines Stalles messen lassen, wobei die Partikelmessungen mit diesem Gerät grundsätzlich einer kontinuierlichen Wägung entsprechen. Die Autoren stellen auch heraus, dass die Ergebnisse nicht immer direkt vergleichbar mit der klassischen gravimetrischen Bestimmung sind, da das Gerät auf einer sehr konstanten Temperatur ($40^{\circ}C$) gehalten werden muss. Aufgrund der unterschiedlichen Flüchtigkeit der jeweiligen Proben müsste dementsprechend für den Vergleich mit Referenzverfahren ein Korrekturfaktor bestimmt werden.

Nach Horodecki und Fissan (1996) ist das TEOM das beste Messgerät für die kontinuierliche Erfassung von Partikelmassen bzw. Partikelmassenkonzentrationen in Gasen am Arbeitsplatz und in der Außenluft, unter mehr oder weniger konstant schwachen Wind- und Druckverhältnissen. Als Nachteil beschreiben Horodecki und Fissan (1996) den Einsatz des TEOM1400a bei Messungen direkt in einem Abluftstrom, da das Gerät zu voluminös und daher schwer zu handhaben ist. Des Weiteren ist es nicht möglich, mit dem in Abbildung 16 dargestellten Messkopf (PM₁₀), Partikelmessungen in strömenden Gasen gemäß VDI 2066, Blatt 1 (2006) „Messen von Partikeln, Staubmessung in strömenden Gasen, gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung“ vorzunehmen.

3 Beiträge mit Begutachtung

3.1 *Generation of airborne particles from horse feeds depending on type and processing*

Hessel E.F, Garlipp F, Van den Weghe H.F.A. 2009
Journal of Equine Veterinary Science, 29 (9); 665-674.

3.2 *The influence of a particle separation technology on the generation of airborne particles from different roughages and bedding materials used for horses*

Garlipp F, Hessel E.F, Van den Weghe H.F.A. 2010
Journal of Equine Veterinary Science, 30 (10); 545-559.

3.3 *The effects of three different liquid additives mixed with oats (whole or rolled) for horses on the generation of airborne particles*

Garlipp F, Hessel E.F, Van den Weghe H.F.A. 2010
Journal of Equine Veterinary Science, (submitted, 17.12.2010).

3.4 *Characteristics of gas generation (NH₃, CH₄, N₂O, CO₂, H₂O) from horse manure added to different bedding materials used in deep litter bedding systems*

Garlipp F, Hessel E.F, Van den Weghe H.F.A. 2010
Journal of Equine Veterinary Science, (accepted, 18.10.2010).

4 Diskussion

4.1 Evaluierung materialspezifischer Einflussfaktoren und verfahrenstechnischer Ansätze zum Abscheiden luftgetragener Partikel

Solange eine Vielzahl von Pferden in konventioneller Boxenhaltung eingestallt wird, stellt die Optimierung der Haltungsbedingungen speziell des Stallklimas, eine der Hauptkriterien für eine tiergerechte, leistungsorientierte und ökonomische Pferdehaltung bzw. -zucht dar. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Mehrheit der Pferde mehr als 2/3 des Tages in der Box verbringt (Jussen et al., 1984; Webster et al., 1987), steht primär die Optimierung und Kontrolle der Qualität der Stallluft im Fokus. Dazu zählt neben der prozesstechnischen Überwachung der physikalischen Faktoren (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftbewegung), auch die Reduzierung der chemischen (Gase wie z.B. Ammoniak) und biologischen Parameter (Mikroorganismen, luftgetragene Partikel) (Hilliger, 1990). In Bezug auf die Fragestellung der prozess- und verfahrenstechnischen Reduzierung von Partikelkonzentrationen in der Stallluft, steht vorrangig die Behandlung der Primärquellen luftgetragener Partikel im Vordergrund. Dazu zählen in erster Instanz verschiedene Einstreumaterialien sowie Rau- und Krafftuttermittel (Woods et al., 1993; Fleming et al., 2008).

Warum primär die Behandlung dieser Materialien im Vordergrund stehen muss, wird anhand von verschiedenen in der Literatur beschriebenen Einflussgrößen auf die Konzentration an luftgetragenen Partikeln in einem Haltungssystem deutlich. Die von den verschiedenen Parametern (Stallarbeit, Tieraktivität etc.) beeinflusste Partikelkonzentration hängt hauptsächlich von der Qualität der Materialien ab. Nach Zeitler et al. (1984) wie auch Pedersen (2004) besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Konzentration an luftgetragenen Partikeln in der Stallluft und der Tieraktivität, wobei das Aktivitätsniveau deutlich vom Alter der Tiere abhängt. Je mehr sich die Tiere in der Box bewegen, desto höher fällt die Generierung von Partikeln in die Stallluft aus, welche hauptsächlich aus der Einstreu herrührt. Die Bewegung (Aktivität) eines bzw. mehrerer Pferde in der Box kann nur sehr begrenzt beeinflusst werden, daher würde eine Behandlung (Reinigung) der Einstreumaterialien einer hohen Partikelgenerierung präventiv entgegen wirken. In einer Studie von Hartung et al. (1989) wurde die Staubminderung durch das Einsetzen eines Staubbindemittels (Revesto pur®) untersucht, wonach eine geringfügige Reduzierung der Partikelkonzentration auftrat. Verschiedene Autoren (Haake, 1992; Dixon, 1995; Seedorf und Hartung, 2002) verweisen jedoch bei der Behandlung von Einstreumaterialien bzw. auch Raufuttermitteln darauf, diese ausschließlich trocken, sprich ohne Flüssigzusatzmittel zu behandeln, aufgrund der Tatsache, dass durch die Feuchtigkeit

ein erneutes Nährmedium für Keime, Pilze und Bakterien geschaffen wird. Demnach wäre eine Behandlung der Einstreumaterialien vor dem Einstreuprozess eine mögliche Option zur Partikelreduzierung (Clarke und Mandelin, 1987).

Ein Teilprojekt dieser Arbeit beinhaltete die Analyse der Schwebstaub- und Schimmelpilzgenerierung ausgehend von zuvor behandelten Einstreumaterialien (Weizenstroh, Späne, Flachs, Hanf) und Raufuttermitteln (Heu, Heulage). Diese wurden mit einer neuartigen Technologie zur Partikelabscheidung (Firma Hurkyson, Postbus 98, NL-6865 ZH Doorwerth, Niederlande) ausschließlich trocken behandelt. Die Ergebnisse zeigten, dass durch die Behandlung die Schwebstaubgenerierung, sowohl für Grobstaubpartikel (80 - 90%), als auch für thorax- und alveolargängige Partikel (70 - 50%) um ein Vielfaches reduziert werden konnten. Diese Art der Behandlung müsste direkt vor dem Einstreuprozess bzw. der Raufuttergabe erfolgen und kann dementsprechend auch kontrovers diskutiert werden. Einerseits erfolgt eine enorme Partikelabscheidung bei den Materialien, welche sich besonders bei dem Einstreuprozess bemerkbar machen sollte, der in der Literatur als eine der Tätigkeiten beschrieben wird, bei dem eine der höchsten Konzentrationen luftgetragener Partikel in die Stallluft generiert (Clarke, 1987; Woods, 1993; Fleming, 2004). Auch bei der Raufuttergabe würde durch die vorgeschaltete Partikelabscheidung aus dem Heu oder der Heulage eine deutlich geringfügigere Schwebstaubkonzentration im direkten Einatmungsbereich des Pferdes generieren. Andererseits kann neben dem positiven Effekt der Partikelreduzierung der Einsatz der Technologie zur Partikelabscheidung auch kritisch betrachtet werden. Bei der täglich anfallenden Stallarbeit würde ein weiterer Arbeitsschritt, welcher zusätzlich Zeit (AKh) in Anspruch nimmt, anfallen. Die Maschine hat einen kontinuierlichen Materialdurchsatz von ca. 2,5 kg pro Minute. Da Weizenstroh immer noch das am meisten eingesetzte Einstreumaterial für Pferde darstellt, wird im folgenden Beispiel anhand von Weizenstroh der zeitliche Mehraufwand berechnet, welcher durch die vorgeschaltete Partikelabscheidung entsteht (ganzjährige Stallhaltung).

Zeitaufwand pro Pferd und Jahr bei vorgeschalteter Partikelabscheidung

<i>Menge Stroh pro Pferd/Jahr</i>	3650 kg	(Fleming, 2008)
<i>Materialdurchsatz/Stunde</i>	150 kg	
<i>Zeitaufwand pro Pferd/Jahr</i>	ca. 24 Std.	

Unter der Annahme, dass täglich nachgestreut wird, müsste pro Tag und Pferd ein zeitlicher Mehraufwand von ca. 4 Minuten berücksichtigt werden. Bei der Verwendung anderer Einstreumaterialien (Späne, Flachs, Hanf) würde sich der zeitliche

Mehraufwand durch die Partikelabscheidung aufgrund des deutlich längeren Nachstreuintervalls (ca. alle 5 Tage) und der geringeren Menge pro Pferd reduzieren. Allerdings sind sogenannte alternative Einstreumaterialien im Einkauf deutlich teurer als Stroh. Tabelle 6 stellt die Verbrauchsmengen und den Gesamtverbrauch pro Pferd und Jahr für verschiedene handelsübliche Einstreumaterialien bei ganzjähriger Stallhaltung dar (Fleming, 2008).

Tabelle 6: Ersteinstreu und Gesamtverbrauch pro Pferd und Jahr sowie die Kosten pro Pferd und Jahr für handelsübliche Einstreumaterialien bei ganzjähriger Stallhaltung (Fleming, 2008).

Einstreu	Ersteinstreu [kg/12 m ²]	Nachstreu [kg/Woche]	Gesamtverbrauch [kg/Pferd und Jahr]	Kosten [€/Pferd und Jahr]
Stroh	ca. 40-50	70	3650	ca. 300
Holzspäne	120	30	2000	600
Strohpellets	150	12,5	1200	500
Hanfeinstreu	120	10	1000	650
Leinstroh	100	20	1400	840

In Bezug auf eine mögliche Partikelreduzierung wird von vielen Wissenschaftlern (Webster et al., 1987; Haake, 1992; Woods et al., 1993) die Verwendung alternativer Einstreumaterialien, wie z.B. Späne, Flachs, Hanf oder Strohpellets, geraten. Zusätzlich werden diese Produkte von den Herstellern mit Schlagwörtern wie „staubarm“ oder „keimfrei“ deklariert, wonach diese Einstreumaterialien speziell für den Einsatz bei Pferden geeignet seien, welche bereits respiratorische Erkrankungen aufzeigen. Es war nicht das Ziel dieser Arbeit, die Schwebstaubgenerierung von verschiedenen Einstreumaterialien miteinander zu vergleichen, aber aufgrund der Ergebnisse soll diese Thematik dennoch kritisch diskutiert werden. Die Schwebstaubgenerierung wurde von allen Einstreumaterialien unter den gleichen standardisierten Bedingungen gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass in der Partikelfraktion PM₁₀ von dem unbehandelten, alternativen Einstreumaterial Flachs (81,06 mg/m³) eine deutlich höhere Schwebstaubgenerierung im Vergleich zum konventionellen Einstreumaterial Weizenstroh unbehandelt (62,79 mg/m³) ausging. In der alveolargängigen Partikelfraktion PM_{1,0} fiel das Ergebnis noch deutlicher aus. Unbehandelter Flachs (20,14 mg/m³) generierte eine mehr als 10-fach und unbehandelter Hanf (8,84 mg/m³) eine ca. 6-fach höhere mittlere maximale Schwebstaubkonzentration im Vergleich zu unbehandeltem Weizenstroh (1,43 mg/m³). Nur Späne generierten in der Partikelfraktion PM_{1,0} eine niedrigere Schwebstaubkonzentration als Weizenstroh. Diese Ergebnisse werden durch frühere Studien von

Fleming et al. (2008) bestätigt, in denen die alternativen Einstreumaterialien Hanf und Flachs in allen Partikelfractionen signifikant höhere Schwebstaupkonzentrationen im Vergleich zu Weizenstroh generierten.

Auch die Frage nach der Hauptkontaminationsquelle luftgetragener Partikel wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Entgegen der Meinung vieler Autoren, die Einstreu stelle die Hauptkontaminationsquelle für luftgetragene Partikel in einem Pferdestall dar, behaupten sowohl Zeitler et al. (1987) als auch Bartz (1992), dass Heu die größte Quelle luftgetragenen Staubes darstellt. In dieser Arbeit wurde die Schwebstaubgenerierung unter standardisierten Laborbedingungen sowohl von Raufuttermitteln (Heu, Heulage) als auch von bereits aufgeführten Einstreumaterialien untersucht. In den Partikelfractionen PM_{20} und PM_{10} generierten beide Raufuttermittel deutlich niedrigere Schwebstaubkonzentrationen gegenüber allen untersuchten Einstreumaterialien. In Partikelfraction $PM_{1.0}$ generierte unbehandeltes Heu ($3,10 \text{ mg/m}^3$) eine höhere mittlere maximale Schwebstaubkonzentration im Vergleich zu unbehandeltem Weizenstroh ($1,43 \text{ mg/m}^3$) und unbehandelten Spänen ($0,56 \text{ mg/m}^3$).

Auch die Verfütterung von Silage oder Heulage wird in der Literatur als eine Maßnahme zur Reduzierung luftgetragener Partikel bezeichnet. In Untersuchungen von Schütz und Sasse (1998) als auch Vandenput und Lekeux (1996) führte die Fütterung von Silage zu einer deutlich geringeren Generierung luftgetragener Partikel gegenüber trockenem Heu. Die Autoren führen dies auf den höheren Feuchtegehalt zurück. Dies kann ebenfalls durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt werden. In allen Partikelfractionen generierte sowohl die unbehandelte als auch die behandelte Heulage eine niedrigere mittlere maximale Schwebstaubkonzentration als unbehandeltes bzw. behandeltes Heu. Die unbehandelte Heulage wies dabei einen Trockenmassegehalt von 74,97% (Heu 89,70%) auf. Aufgrund des höheren Feuchtegehaltes der Heulage ergibt sich ein deutlich geringerer Behandlungseffekt (Partikelabscheidung), welcher bei Heulage ca. 50% (PM_{20} , PM_{10}) beträgt. Durch den Feuchtegehalt in der Heulage werden vor allem Grobstaubpartikel ($\leq 20 \mu\text{m}$) gebunden, welche durch die trockene Behandlung nur geringfügig entfernt werden können (Butera et al., 1991; Vandenput et al., 1993). Auch in Bezug auf die Reduzierung der Schimmelpilzgenerierung traten zwischen Heulage unbehandelt und behandelt keine signifikanten Unterschiede auf. Die Pilzsporen bleiben aufgrund des Feuchtegehaltes am Material haften und können durch die Trockenabscheidung allein nicht entfernt werden. In der Praxis ist es ein gängiges Verfahren Futtermittel zu befeuchten, um eine Reduzierung der Schwebstaubgenerierung bei sofortiger Verfütterung zu erzielen. Durch das Befeuchten werden Partikel wie Staub oder

Schimmelpilzsporen verstärkt am Material gebunden (Clarke und Madelin, 1987; Bartz, 1992).

Thomson und McPherson (1983) empfehlen eine Lagerung von Heu- und Strohballen in einem Mindestabstand von 46 m zum Stallgebäude und die Vermeidung der Lagerung oberhalb der Pferdeboxen (Dachboden). Dass die Lagerung von Einstreumaterialien bzw. Raufuttermitteln einen Einfluss auf die Schwebstaubgenerierung dieser Materialien hat, konnte auch in dieser Arbeit belegt werden. Durch die achtwöchige Lagerung in Form von Pressgut und als lose Ware, kam es bei allen zuvor behandelten Materialien zu einem erneuten Anstieg der Schwebstaubgenerierung, wobei die Werte nicht das Niveau der unbehandelten Materialien erreichten. Die Ergebnisse zeigen auch, dass infolge der Lagerung als Pressgut verstärkt Kleinstpartikel (< 1mm) gebildet werden. Daran wird deutlich, weshalb eine Lagerung oberhalb von Pferdeboxen (Dachboden) vermieden werden sollte. Da in vielen Ställen die Decke zwischen Stallbereich und Dachboden aus Holz gefertigt ist, besteht die Gefahr, dass durch die Spalten zwischen den Holzbohlen Partikel in den Stallbereich gelangen. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die Schwebstaubgenerierung infolge der losen Lagerung der Materialien niedriger ausfällt als infolge der gepressten Lagerung. In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit dieser neuentwickelten Technologie bzw. einer Steigerung der Arbeitseffizienz, könnte über die Behandlung einer größeren Menge (z.B. Heu) mit anschließender loser Lagerung nachgedacht werden. Es könnte z.B. einmal in der Woche die Gesamtmenge für eine Woche (Einstreu und Raufutter) behandelt werden.

Wie bereits angesprochen, beeinflusst die Qualität von Einstreumaterialien wie auch Raufuttermitteln, die bei bestimmten Prozessen bzw. Aktivitäten im Stall in die Luft generierte Partikelkonzentration. Aufgrund der Tatsache, dass beide Materialien als Primärquellen luftgetragener Partikel gelten, ist eine Behandlung dieser als schwebstaubmindernde Maßnahme mit positivem Einfluss auf die Schwebstaubgenerierung während des Einstreu- bzw. Nachstreuprozesses und der Raufuttergabe zu bewerten. Dies trifft auch auf die Schwebstaubgenerierung bei erhöhter Tieraktivität zu.

In dieser Arbeit konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass auch von Kraffuttermitteln eine nicht unerhebliche Konzentration an Schwebstaubpartikeln ausgeht. Der Schwebstaubreduktion aus Kraffuttermitteln ist aufgrund der Tatsache von Bedeutung, weil die Emission luftgetragener Partikel im direkten Einatembereich des Pferdes während der Futteraufnahme stattfindet. Dementsprechend ist die Behandlung herkömmlicher Kraffuttermittel wie Hafer und Gerste als eine notwendige

Option zur Schwebstaubminderung zu betrachten. Nach Kamphues et al. (1989) wie auch Meyer und Coenen (2002), setzen sich vor allem Getreidefuttermittel aus Kleinstpartikeln zusammen (Spelze, Schale, Grannenbruchstücke, Sandpartikel, Unkrautteilchen und -samen und Vorratsschädlinge), welche eine hohe Staubgenerierung bewirken. Bei der Behandlung (Trockenreinigung) dieser Materialien konnte eine Schwebstaubreduktion in den Partikelfractionen PM_{20} und PM_{10} von ca. 80% und in den Partikelfractionen $PM_{2,5}$ und $PM_{1,0}$ von ca. 30 - 50% erzielt werden. Bei der Reinigung war es entscheidend, dass diese ausschließlich trocken (Aspirateur OPTIMA 2002 NA, ZUTHER GmbH, Karwitz, Deutschland) erfolgte. Daraus ergibt sich der Vorteil, dass die gesamte Charge (Hafer, Gerste etc.) in einem Arbeitsgang gereinigt und auch langfristig gelagert werden kann. Bei einer Nassreinigung der Materialien wäre eine sofortige Verfütterung anzuraten. Auch Meyer und Coenen (2002) verweisen speziell auf die Gefahr, die von zu feucht eingelagerten Krippenfuttermitteln ausgeht, welche zu einem erhöhten Besatz mit Mikroorganismen und Parasiten sowie deutlich erhöhten Gehalten an Bakterien, Schimmelpilzen und Milben neigen.

Haake (1992) untersuchte die Wirkung einer Haferreinigungsanlage (Staubmaster, Egon Sommer Maschinenbau GmbH & Co. KG, Deutschland), wobei diese die Behandlung des Kraftfuttermittels unmittelbar vor der Fütterung erfordert. Die Behandlung des Hafers führte zu einer Reduzierung der Staubgenerierung (Partikel > 1 mm) um 84,4%. Demnach ist der Schwebstaubminderungseffekt mit den Ergebnissen dieser Arbeit vergleichbar, jedoch konnte Haake (1992) lediglich Staubfraktionen erfassen, welche dem Gesamtstaub zuzuordnen sind. Auch hier könnte der zeitliche Mehraufwand für die Haferbehandlung vor der Futtergabe kontrovers diskutiert werden, welcher zusätzliche Kosten pro Pferd verursacht. Demgegenüber steht jedoch eine erhebliche Reduktion der Partikelgenerierung im direkten Einatembereich des Pferdes, welche in Anbetracht der anfallenden Kosten für die Behandlung respiratorischer Erkrankungen (Tab. 3) den finanziellen Mehraufwand für die Behandlung des Hafers rechtfertigt.

Das Quetschen von Hafer bzw. Gerste in der Pferdefütterung muss sowohl vom ernährungsphysiologischen als auch vom gesundheitlichen Standpunkt aus differenziert betrachtet werden. Mit einem relativ hohen Rohfaseranteil von 10% hat Hafer in unbehandeltem Zustand eine Verdaulichkeit von ca. 70% (Gerste 30%), welche durch das Quetschen auf ca. 99,7% (Gerste 75% nach Heintzsch, 1995) erhöht werden kann (Bothe, 2001; Meyer und Coenen, 2002). Eine erhöhte Verdaulichkeit ist vor allem für ältere bzw. für Pferde mit gastrointestinalen Erkrankungen aus ernährungsphysiologischer Sicht von Bedeutung. Wie die Ergebnisse dieser Arbeit

zeigen, hat das Quetschen (Hafer, Gerste) einen Anstieg der Schwebstaubgenerierung von 20 - 30% zur Folge, was bei gesundheitlicher Betrachtungsweise einen Nachteil des Quetschprozesses darstellt. Den Grund für die Erhöhung der Schwebstaubgenerierung stellt der Prozess des Quetschens dar. Durch Walzen (1 mm Abstand) werden die Spelzen zum Aufspringen gebracht, sodass der Mehlkörper sichtbar wird. Durch enger gestellte Walzen wird der Mehlkörper aus der Fruchtschale gedrückt, sodass etwa zwei Drittel des Mehlkörpers frei liegen (Bothe, 2001). Dadurch können zum einen essentielle Stoffe vom Pferd besser aufgenommen werden, aber zum anderen entstehen ebenfalls eine Vielzahl von Kleinstpartikeln (Spelze, Grane, Teile des Mehlkörpers), welche die Erhöhung der Schwebstaubgenerierung bei gequetschten Materialien bewirken. Zeitler-Feicht (1994) untersuchte die Generierung luftgetragener Partikel aus unterschiedlich stark zerkleinerten Mischfuttermitteln. Die Ergebnisse zeigten, dass mit Zunahme des Zerkleinerungsgrades der Gehalt lungengängiger Partikel in der Stallluft signifikant anstieg.

Des Weiteren findet auch die Verwendung von industriell hergestellten Futtermitteln (Pellets, Müsli) aufgrund einer höheren Komprimierung essentieller Nährstoffe sowie einer deutlich reduzierten Schwebstaubgenerierung (hydrothermische Herstellung) immer mehr Zuspruch. Bei der Analyse der Schwebstaubgenerierung, ausgehend von verschiedenen Pellet- bzw. Müsli-Futtermitteln und herkömmlichen Kraftfuttermitteln (Hafer, Gerste) in dieser Arbeit, ergab sich in den Partikelfractionen PM_{20} , PM_{10} und $PM_{2,5}$ eine 65 - 80% niedrigere Schwebstaubgenerierung ausgehend von den industriell hergestellten Futtermitteln im Vergleich zu den unbehandelten Futtermitteln Hafer und Gerste. Auch Haake (1992) konnte eine deutliche Reduzierung (> 50 %) des Staubgehaltes bei der Verfütterung von pelletiertem Futter analysieren. In Abhängigkeit von der Größe der Pellets (5 mm und 10 mm) konnten in dieser Arbeit keine signifikanten Unterschiede in der Höhe der Schwebstaubgenerierung festgestellt werden. Das von Pelletfuttermitteln dennoch eine gewisse Konzentration an luftgetragenen Partikeln ausgeht, führt Arndt (2001) auf die Entstehung von Kleinstpartikeln bei Abriebprozessen während des Transportes zurück.

Die in dieser Arbeit untersuchten zwei Müsliarten wiesen bis zu 20% niedrigere Schwebstaubkonzentrationen (PM_{20} und PM_{10}) im Vergleich zu beiden Pelletsorten auf. Ein möglicher Grund dafür stellt sicherlich der hohe Anteil an Melasse (3 - 11%) und Öl (4%) in beiden Müsliarten dar. Beide Zusätze werden aufgrund ihrer staubbindenden Eigenschaften sowohl zu Futtermitteln gemischt als auch in Schweine- und Geflügelställen versprüht (Zhang et al., 1996). Dennoch wies eines der Müsli-Futtermittel in den alveolargängigen Partikelfractionen eine der höchsten Schwebstaub-

konzentrationen auf. Eine mögliche Ursache könnte von der stofflichen Zusammensetzung dieses Futtermittels herrühren, welches aus einem erhöhten Anteil an geschrotetem Mais (7,2%) sowie aus einem deutlich höheren Anteil an getrockneten Haselnuss- und Brennesselblättern besteht. Vor allem der hohe Anteil an Schrot (Schroten stellt im Vergleich zum Quetschen einen noch höheren Zerkleinerungsgrad des Futters dar) könnte ursächlich für die höhere Schwebstaubgenerierung sein. Auch Bothe (2001) konnte bei der Verfütterung von Haferschrot sehr starke Staumentwicklungen beobachten und führte diese auf den hohen Anteil an losen Spelzen zurück.

Der Einsatz industriell hergestellter Futtermittel kann aus ökonomischer Sicht auch kontrovers diskutiert werden. Neben der deutlich schwebstaubmindernden Wirkung bedeutet die Verfütterung vor allem von Müslifuttermitteln auch einen finanziellen Mehraufwand. Die Kosten für die in dieser Arbeit untersuchten Müslifuttermittel belaufen sich auf 13 - 16€ (25 kg) und für die Pelletfuttermittel auf ca. 10€ (25 kg). Im Vergleich dazu kosten 25 kg behandelter Hafer (gereinigt) zwischen 7,50 und 8€ (Bäuerliche Bezugs- und Absatzgenossenschaft Vechta-Langförden eG, Deutschland).

Aufgrund der Tatsache, dass auch von behandeltem Hafer (PM_{10} heil $487,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$; gequetscht $789,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) eine Generierung luftgetragener Partikel ausgeht, wurde der Effekt des Zumischens von verschiedenen Flüssigzusatzmitteln (Wasser, Papsöl, Zuckerrübenmelasse) zu Hafer (heil, gequetscht) untersucht. Der Einsatz von Öl bzw. Wasser zur Partikelreduzierung wurde in der Schweine- und Geflügelhaltung vielfach untersucht und auch in die Praxis übernommen. Allerdings werden die Flüssigzusatzmittel nicht unter das Futter gemischt, sondern primär mit Beriesungssystemen im Stall versprüht. Dabei konnten Takai et al. (1995) wie auch Zhang et al. (1996) eine 70%-ige Reduzierung der Partikelkonzentration (PM_{10}) in der Stallluft analysieren. Der Einsatz solcher Systeme in Pferdeställen ist nicht bekannt. Durch das Versprühen von Wasser bzw. Öl in die Stallluft, würden diese die Partikel binden und sich anschließend auf der Einstreu ablagern. Die Feuchte in den Einstreumaterialien würde ein erneutes unerwünschtes Nährmedium für Pilze, Keime und Bakterien hervorrufen, welche erneut in die Stallluft generieren könnten. Gleichzeitig würde die relative Luftfeuchte zunehmen. Leadon (1986) stellt die Korrelation zwischen dem Anstieg der relativen Luftfeuchte und der damit einhergehenden Zunahme an Bakterien, welche den unteren Respirationstrakt des Pferdes erreichen, dar.

In dieser Arbeit wurden die Flüssigzusatzmittel in verschiedenen Konzentrationen zu dem Hafer (heil, gequetscht) gemischt. Durch den Einsatz von 3% Öl (ca. 60 ml auf 2 kg) konnte bei heilem und gequetschtem Hafer die Schwebstaubgenerierung

(PM₂₀) von 1083,4 µg/m³ auf 18,6 µg/m³ (heiler Hafer) bzw. von 1680,9 µg/m³ auf 33,7 µg/m³ (gequetschter Hafer) reduziert werden. Dies entspricht einer ca. 98%-igen Schwebstaubminderung. Heber und Martin (1988) konnten durch die Zugabe von 1% Sojabohnenöl zu schrotförmigem Schweinefutter eine signifikante Schwebstaubreduzierung in der Stallluft von 29% analysieren. Untersuchungen von Welford et al. (1992) ergaben eine 31%-ige Schwebstaubreduzierung (PM₂₀) durch die Zugabe von 2% Öl zu Schweinefutter. Ein möglicher Nachteil, welcher sich aus dem Mischen mit Flüssigzusatzmitteln ergibt ist die direkte Verfütterung im Anschluss an den Mischvorgang. Von der Lagerung dieser Materialien ist aufgrund der Feuchte, welche ein optimales Nährmedium für Schimmelpilze und Bakterien bietet, abzuraten. Des Weiteren besteht besonders bei gequetschtem Hafer durch die Beschädigung des Korns die Gefahr, dass die im Keim enthaltenen Fettsäuren ranzig werden (Meyer und Coenen, 2002).

In dieser Arbeit wurden die Flüssigzusatzmittel jeweils manuell zu 2 Kilogramm Hafer dosiert. In einem Stall mit einer entsprechend großen Anzahl an Pferden würde dieser zusätzlich anfallende Arbeitsschritt zu zeit- und damit verbunden zu kostenintensiv ausfallen. Entsprechende Mischvorrichtungen sind jedoch auf dem Markt erhältlich. Am Beispiel von Öl (3%) als Flüssigzusatzmittel soll im nachfolgenden Beispiel eine Bewertung des finanziellen Mehraufwandes pro Pferd vorgenommen werden. Es wird von einer durchschnittlichen Hafermenge von 2 kg pro Pferd und Tag, sowie von einem durchschnittlichen Literpreis von 0,6 Euro für Öl ausgegangen.

Kosten pro Pferd/Jahr beim Zumischen von 3% Öl zu Hafer (Eigene Berechnung)

<i>Menge Hafer pro Pferd/Jahr</i>	730,0 kg
<i>Menge Öl pro Pferd/Jahr</i>	21,9 l
<i>Kosten pro Pferd/Jahr</i>	13,14 €

Bei einer durchschnittlichen Hafermenge von 2 kg pro Pferd und Tag würden im Jahr ca. 13 € Mehrkosten pro Pferd beim Zumischen von 3% Rapsöl (60 ml auf 2 kg Hafer) entstehen. Demgegenüber steht eine Schwebstaubreduzierung von ca. 98%. Der finanzielle Mehraufwand, welcher durch die Anschaffungskosten der Mischvorrichtung und dem Arbeitsaufwand entsteht, kann an dieser Stelle nicht bewertet werden.

Das Mischen des Hafers (heil; gequetscht) mit Wasser führte im Vergleich zu Öl zu einer deutlich geringeren Schwebstaubreduzierung. Ökonomisch betrachtet ist

Wasser jedoch günstiger als Öl und jederzeit verfügbar, wodurch der Einsatz von Wasser als Flüssigzusatzmittel aus betriebswirtschaftlicher Sicht gesehen als durchaus positiv bewertet werden kann. Die schwebstaubmindernde Wirkung durch den Einsatz von Melasse ist mit der von Öl vergleichbar. Allerdings ist Melasse deutlich teurer als Öl und durch den hohen Zuckeranteil (43 - 45%) schwieriger zu verarbeiten. Beim maschinellen Mischen der Melasse müssen zum einen spezielle Mischschnecken verwendet werden und zum anderen müssen diese aufgrund der hohen Viskosität der Melasse häufig gereinigt werden.

4.2 Bewertung des angewandten Versuchsdesigns

Konzentrationen luftgetragener Partikel in Pferdeställen unterliegen einer Vielzahl von Einflussfaktoren, welche das Standardisieren von Messmethoden bzw. der Bedingungen im Stall erschweren und somit eine Verzerrung der Ergebnisse hervorrufen. Des Weiteren werden Praxiserhebungen luftgetragener Partikel durch die vorherrschenden baulichen, organisatorischen und personellen Bedingungen beeinflusst, so dass es schwierig ist mehrere Ställe mit einander zu vergleichen. Dementsprechend wurden in dieser Arbeit bestimmte Arbeitsvorgänge im Stall bzw. Stallbedingungen unter Ausschluss von externen Einflussmöglichkeiten unter standardisierten Laborbedingungen rekonstruiert.

Um praxisrelevante Aussagen treffen zu können, wurden im Rahmen der Untersuchungen der Abscheidegrad luftgetragener Partikel anhand handelsüblicher Einstreumaterialien (Weizenstroh, entstaubte Späne, Flachs, Hanf), Raufuttermittel (Heu, Heulage) und Kraftfuttermittel (Hafer ganz und gequetscht, Gerste ganz und gequetscht, Müsli- und Pelletfuttermittel) untersucht. Bei den Schwebstaubanalysen der Kraftfuttermittel wurde explizit der Einfüllvorgang dieser in den Trog so praxisnah wie möglich simuliert. Alle Analysen zur Schwebstaubgenerierung fanden in einer geschlossenen Kammer in einem separaten klimatisierten Raum (relative Luftfeuchte 45%, Temperatur 20°C) statt, sodass keine äußeren Einflüsse (Luftströmung, Partikel der Außenluft etc.) die Messergebnisse verzerren konnten. Die Parameter relative Luftfeuchte und Temperatur wurden kontinuierlich gemessen. Dementsprechend war es möglich, mehrere Wiederholungen der einzelnen Versuchsdurchgänge unter gleichen Bedingungen durchzuführen. Im Zweifelsfall konnte die Messung direkt wiederholt werden, da durch die Onlineanalysen des Schwebstaubmessgerätes die Messwerte sofort zur Verfügung standen. Aufgrund der standardisierten Bedingungen war es weiterhin möglich feinste materialspezifische Unterschiede zu analysieren und zu bewerten. Auch Vandenput et al. (1997) führten Staubmessungen in einer Messkammer durch, wobei die Materialproben sehr

vorsichtig in die Kammer gebracht wurden, um Konzentrationsunterschiede bedingt durch die Handhabung zu vermeiden.

In Anbetracht einer Vielzahl von Messgeräten zur Erfassung von luftgetragenen Partikeln stellen Hamelmann und Schmidt (2002) als Kriterien zur Wahl der geeigneten Messtechnik vor allem die Übertragbarkeit auf die geeigneten Standortbedingungen, die Ausgabe der Messwerte (direkt/ indirekt) sowie die Darstellung der Ergebnisse heraus. Des Weiteren sei es wünschenswert, dass die Messgeräte die Partikelmassenkonzentration, Partikelgröße, Partikelanzahlkonzentration und die Partikelgrößenverteilung analysieren. In dieser Arbeit wurden alle Messungen mit Hilfe des gravimetrisch messenden Schwebstaubmessgerätes TEOM 1400a (Rupprecht & Patashnick Co., Franklin, MA) durchgeführt. Die Messungen wurden aufgrund der Tatsache mit dieser Messtechnik durchgeführt, dass zum einen die gravimetrische Probennahme das meist verwendete Messverfahren zur Erfassung partikelförmiger Stoffe ist (Schmidt-Ott und Ristovski, 2004) und zum anderen, dass das TEOM 1400a in der Literatur als sehr zuverlässig beschrieben wird (Berry et al., 2005).

Ein großer Vorteil dieser Messtechnik stellt die kontinuierliche Online-Analyse dar, wodurch eine permanente Überwachung der Messvorgänge sowie eine schnelle Datenanalyse und -darstellung gewährleistet wird. Der Einsatz der Filterköpfe (PM_{20} , PM_{10} , $PM_{2.5}$, $PM_{1.0}$) lässt eine direkte Abscheidung bzw. Wägung der jeweiligen Fraktion zu. In der Literatur wird dieses Prinzip als sehr vorteilhaft beschrieben, weil Messungenauigkeiten, wie solche die z.B. bei der Weiterverarbeitung von Filterrückständen zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung entstehen, reduziert werden (Hamelmann und Schmidt, 2002). Die Ausgabe von größenabhängigen Partikelanzahlkonzentrationen ermöglichte die Betrachtung von zeitlichen Verläufen.

Das Gerät (TEOM 1400a) muss auf einer sehr konstanten Temperatur ($40^{\circ}C$) gehalten werden, wodurch das Entstehen von Kondenswasser vermieden wird, was z.B. bei Messgeräten, welche nach dem optischen Messprinzip arbeiten, oftmals als problematisch beschrieben wird. Durch die Bildung von Kondenswasser z.B. an Verbindungsschläuchen zwischen Probensonde und Messgerät können Partikel gebunden werden. Es kommt zu einer Ablagerung von Partikeln, welche das Messergebnis beeinträchtigen (Nannen und Büscher, 2007). Die hohe Temperatur wird oftmals auch kritisch betrachtet. Bei der Erwärmung von Staubpartikeln besteht die Gefahr, dass neben Wasseranteilen auch leichtflüchtige Staubbestandteile verdampfen. Ein zu starkes Erwärmen würde die Messungen verfälschen. Dementsprechend wurden in dieser Arbeit die Temperaturen in einem Bereich von $35-40^{\circ}C$ gehalten.

Dem oftmals als Nachteil beschriebenen Einsatz der sehr lauten externen Vakuumpumpe kam in dieser Arbeit keine Bedeutung zu. Das Gerät bewährte sich als sehr robust (kontinuierliche Laufzeit von 6 Monaten) und zeichnete sich durch die sehr einfache Handhabung und Bedienung aus.

5 Zusammenfassung

Der gesamte Respirationstrakt des Pferdes stellt gegenüber allen anderen Organen die größte und empfindlichste Kontaktfläche für potenziell irritierende Substanzen aus der Luft dar, welche in einem vielfältigen Gemisch aus Schadgasen (Ammoniak, Lachgas, Kohlenstoffdioxid) und luftgetragenen Partikeln auftreten. Aufgrund der Tatsache, dass mehr als eine Million Pferde in Deutschland leben, von denen der größte Anteil, sowohl im Sport- als auch im Zucht- und Freizeitbereich, in geschlossenen Haltungssystemen aufgestellt werden, hat die Qualität der Stallluft einen entscheidenden Einfluss auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit des Pferdes (Korries, 2003; Deutsche Reiterliche Vereinigung, 2003). In Bezug auf die Reduzierung luftgetragener Partikel in der Pferdehaltung muss dementsprechend die Behandlung der Hauptkontaminationsquellen von Stäuben im Vordergrund stehen, welche in der Pferdehaltung verschiedene Einstreumaterialien (Weizenstroh, Späne, Flachs, Hanf), Raufuttermittel (Heu, Heulage) und diverse Kraftfuttermittel (Hafer, Gerste, Mischfuttermittel) darstellen.

In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche verfahrenstechnische Ansätze zum Abscheiden luftgetragener Partikel aus verschiedenen Einstreumaterialien, Rau- und Kraftfuttermitteln für Pferde unter standardisierten Bedingungen untersucht. Die Untersuchungen konzentrierten sich auf folgende Schwerpunkte:

- Analyse des Abscheidegrades von luftgetragenen Partikeln infolge der Trockenreinigung herkömmlicher Kraftfuttermittel (Hafer und Gerste) sowie die Quantifizierung der Schwebstaubgenerierung durch die mechanische Bearbeitung (Quetschen) dieser. Zu dem wurde die Generierung luftgetragener Partikel, ausgehend von verschiedenen industriell hergestellten Kraftfuttermitteln (Pellet- und Müslifuttermittel), unter Technikumsbedingungen untersucht.
- Analyse des Abscheidegrades von luftgetragenen Partikeln und Schimmelpilzsporen durch den Einsatz einer neuartigen Technologie zur Behandlung von verschiedenen Einstreumaterialien und Raufuttermitteln. Dabei wurde außerdem der Effekt einer achtwöchigen losen und gepressten Lagerung der zuvor behandelten Materialien auf die Höhe der Schwebstaubgenerierung untersucht.

- Analyse des Abscheidegrades von luftgetragenen Partikeln aus Hafer (heil; gequetscht) infolge der Zugabe verschiedener Flüssigzusatzmittel (Wasser, Öl, Melasse) in unterschiedlichen Konzentrationen. Zu dem wurde der Einfluss der Fallhöhe (20 cm, 40 cm) auf die Schwebstaubgenerierung untersucht.

Alle Schwebstaubmessungen wurden unter standardisierten Bedingungen in mehreren Technikumsversuchen in einer Staubkammer mit Hilfe des Schwebstaubmessgerätes TEOM 1400a (Firma Rupprecht und Patashnick Company, USA) durchgeführt. Zur Schwebstaubdifferenzierung wurden verschiedene Messköpfe verwendet: PM_{20} ($< 20 \mu m$), PM_{10} ($< 10 \mu m$), $PM_{2,5}$ ($< 2,5 \mu m$) und $PM_{1,0}$ ($< 1 \mu m$).

Die Analysen des Abscheidegrades von luftgetragenen Partikeln infolge der Trockenreinigung der herkömmlichen Kraftfuttermittel Hafer und Gerste, ergaben eine Schwebstaubreduktion in den Partikelfractionen PM_{20} und PM_{10} von ca. 80%. In den Partikelfractionen $PM_{2,5}$ und $PM_{1,0}$ fiel die Schwebstaubreduktion deutlich niedriger aus. Diese lag in einem Bereich von ca. 30 - 50%. Das mechanische Bearbeiten (Quetschen) von Hafer und Gerste führten zu einem erneuten Anstieg der Schwebstaubgenerierung um bis zu 20% (PM_{20} , PM_{10}) gegenüber den nicht gequetschten Kraftfuttermitteln. Da auch die Fütterung von industriell hergestellten Kraftfuttermitteln (hydrothermische Bearbeitung) als schwebstaubmindernde Maßnahme betrachtet werden kann, wurden zusätzlich zwei verschiedene Pellet- und Müslifuttermittel untersucht. Die Analysen zeigten, dass die industriell hergestellten Kraftfuttermittel in den Partikelfractionen PM_{20} , PM_{10} und $PM_{2,5}$ eine 65 - 80% niedrigere Schwebstaubgenerierung aufwiesen im Vergleich zu ungereinigtem Hafer bzw. ungereinigter Gerste. Innerhalb der industriell hergestellten Futtermittel generierten beide Müslisorten bis zu 20% niedrigere Schwebstaubkonzentrationen (PM_{20} und PM_{10}) im Vergleich zu beiden Pelletsorten. Die Größe der Pellets (5 mm und 10 mm) hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Höhe der Schwebstaubgenerierung.

Schlussfolgernd zeigen die Ergebnisse, dass es sinnvoll ist, herkömmliche Futtermittel wie Hafer und Gerste mechanisch reinigen zu lassen, um die Gefahr einer möglichen Reizung des Respirationstraktes zu minimieren. Der Reinigungseffekt spiegelt sich in einer deutlichen Schwebstaubreduzierung wider. Auch die Fütterung von industriell hergestellten Futtermitteln (Pellet und Müsli) kann deutlich dazu beitragen, die Schwebstaubbelastung im direkten Einatmungsbereich des Pferdes zu reduzieren.

Die Analysen des Abscheidegrades von luftgetragenen Partikeln und Schimmelpilzsporen durch den Einsatz einer neuartigen Technologie zur Behandlung von verschiedenen Einstreumaterialien (Weizenstroh, Späne, Flachs, Hanf) und Raufuttermitteln (Heu, Heulage), ergaben einen hochsignifikanten ($P < .0001$) Einfluss der Behandlung der Materialien auf die Höhe der Schwebstaubgenerierung. Dabei kam es zu einer Reduktion der Schwebstaubgenerierung (PM_{20}) bei Heu von 49,16 mg/m^3 auf 22,79 mg/m^3 (53,6%), bei Heulage von 28,57 auf 25,04 mg/m^3 (12,3%), bei Spänen von 141,68 auf 15,04 mg/m^3 (89,4%), bei Weizenstroh von 143,08 auf 22,97 mg/m^3 (83,9%), bei Flachs von 135,11 auf 53,31 mg/m^3 (60,5%) und bei Hanf von 63,67 auf 17,64 mg/m^3 (72,3%).

Durch das Behandeln konnte die Generierung von Schimmelpilzsporen nur bei Spänen (von 586,7 auf 44,3 CFU/ m^3 ; -92,4%), bei Weizenstroh (von 383,3 auf 46,0 CFU/ m^3 ; -88,0%) und bei Heu (von 61,0 auf 8,7 CFU/ m^3 ; -85,8%) signifikant reduziert werden. Den niedrigsten Effekt wies mit 24,5% behandelter Hanf auf (Hanf unbehandelt 62,7 CFU/ m^3 ; Hanf behandelt 47,3 CFU/ m^3). Heulage (49,0 CFU/ m^3) und Flachs (94,7 CFU/ m^3) behandelt wiesen einen geringfügig höheren Schimmelpilzgehalt gegenüber den jeweils unbehandelten Materialien (Heulage 37,0 CFU/ m^3 ; Flachs 67,0 CFU/ m^3) auf.

Des Weiteren wurden von jedem behandelten Material 5 kg als Pressgut und 5 kg als lose Ware eingelagert und nach 8 Wochen auf deren Schwebstaubgenerierung untersucht. Die achtwöchige Lagerung der behandelten Materialien als Pressgut führte bei Heulage (+29,9%), Weizenstroh (+104,0%), Spänen (+40,4%) und Hanf (+30,7%) zu einem erneuten signifikanten Anstieg der Schwebstaubgenerierung (PM_{10}). Ein erneuter signifikanter Anstieg der Schwebstaubgenerierung (PM_{10}) infolge der Lagerung als lose Ware trat nur bei Weizenstroh (+44,2%) auf.

Schlussfolgernd zeigen die Ergebnisse, dass durch die Technologie zur Abscheidung luftgetragener Partikel die Schwebstaubgenerierung, ausgehend von Raufuttermitteln und Einstreumaterialien, sowohl für Grobstaubpartikel als auch für thorax- und alveolargängige Partikel um ein Vielfaches reduziert werden kann. Durch die Lagerung der behandelten Materialien steigt die Schwebstaubgenerierung erneut an, jedoch bei keinem der gelagerten Materialien erneut auf das Niveau der unbehandelten Materialien.

Die Analysen des Abscheidegrades von luftgetragenen Partikeln infolge der Zugabe verschiedener Flüssigzusatzmittel (Wasser, Öl, Melasse) in unterschiedlichen Konzentrationen zu heilem und gequetschtem Hafer, ergaben insgesamt einen hochsignifikanten ($P < .0001$) Einfluss des Zumischens der verschiedenen Flüssigzusatzmittel auf die Höhe der Schwebstaubgenerierung. Durch die 1%-ige Zugabe von Wasser zu heilem Hafer konnte in Partikelfraktion PM_{20} eine Schwebstaubreduzierung von 90,6% und in den Fraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ von ca. 67% analysiert werden. Bei gleicher Dosierung von Öl ergab sich eine Schwebstaubreduzierung in Partikelfraktion PM_{20} von -93,8%, PM_{10} von -90,8% und $PM_{2,5}$ von -78,0%. Die Schwebstaubreduzierung bei 1%-iger Zugabe von Melasse lag in den Partikelfraktionen PM_{20} und $PM_{2,5}$ in annähernd dem gleichen Bereich wie bei Öl (1%), wobei in Partikelfraktion PM_{10} eine geringere Reduzierung von -85,2% im Vergleich zu Öl (-90,8%) erzielt wurde. Bei heilem Hafer fiel die Schwebstaubreduzierung infolge der Zugabe von Öl und Melasse in allen Partikelfraktionen annähernd gleich aus. Die Schwebstaubreduzierung bei gequetschtem Hafer fiel bei der Zugabe von Melasse deutlich niedriger aus als bei der Zugabe von Öl. Die Zugabe von Wasser hatte bei heilem und gequetschtem Hafer den signifikant niedrigsten Effekt. Sowohl bei heilem ($18,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) als auch bei gequetschtem Hafer ($33,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) konnte die höchste Schwebstaubreduktion (PM_{20}) mit etwa 98% bei der Zugabe von 3% Öl analysiert werden.

Die Analysen der Schwebstaubgenerierung in Abhängigkeit von der Fallhöhe (20 cm, 40 cm) ergaben, dass der Faktor „Fallhöhe“ insgesamt nur in der Partikelfraktion PM_{10} einen signifikanten ($P = 0.0261$) Einfluss auf die Schwebstaubkonzentration hatte. In der Partikelfraktion PM_{10} fiel die Schwebstaubgenerierung insgesamt bei der niedrigeren Fallhöhe (20 cm) geringer aus als bei der Fallhöhe von 40 cm. In Partikelfraktion $PM_{2,5}$ fiel die Schwebstaubgenerierung aus 40 cm ($34.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) tendenziell ($P < 0.1000$) niedriger aus als bei der Fallhöhe von 20 cm ($42.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Schlussfolgernd zeigen die Ergebnisse, dass durch das Mischen von geringen Mengen an Flüssigzusatzmitteln die Schwebstaubgenerierung ausgehend von heilem und gequetschtem Hafer für alle Partikelfraktionen deutlich reduziert (50-98%) werden kann. Die Ergebnisse lassen die eindeutige Schlussfolgerung zu, dass aus Sicht der Schwebstaubreduzierung Öl in geringen Konzentrationen als Bindemittel für Schwebstaubpartikel eine bessere Option gegenüber Melasse und Wasser darstellt. In Bezug auf die Schwebstaubgenerierung ausgehend von der Fallhöhe kann das Einfüllen des Hafers in den Trog aus niedriger Fallhöhe, als Option zur Reduzierung von luftgetragenen Partikeln empfohlen werden.

6 Summary

In comparison to all its other organs, the respiratory tract of the horse forms the largest and most sensitive contact surface for potentially irritating substances from the air. Such substances occur as a mixture of toxic gases (e.g. ammoniac, nitrous oxide and carbon dioxide) and airborne particles. More than a million horses live in Germany and the majority of these animals are kept in closed housing systems (not only those used in equestrian sport but also those horses kept for breeding or leisure). This means that the quality of the stable air has a decisive influence on the health and performance of a huge number of horses. With respect to the reduction of airborne particles in equine husbandry, the treatment of the main sources of dust contamination must be brought to the fore. Such sources include the different types of bedding (wheat straw, wood shavings, flax and hemp), roughage (hay, haylage) and feed concentrates (oats, barley and compound feed) which are used.

In the present investigation, different methods for the separation of airborne particles from various types of bedding material, roughage and compound feed for horses were investigated under standardised conditions. The investigations concentrated on the following key points:

- Analysis of the reduction in airborne particles as a consequence of the cleaning of common feed grains (oats and barley) as well as the quantification of airborne particle generation by the mechanical treatment (rolling) of such grains. In addition, an investigation into the generation of airborne particles from different industrially produced compound feeds (pellets and muesli) was also undertaken under standardised laboratory conditions.
- Analysis of the separation rate of airborne particles and mould spores by the use of a new form of air-driven particle separation technology (Hurkyson, Netherlands) for the treatment of different bedding materials and roughage feedstuffs. This included an investigation into the effects of storing the treated materials for eight weeks, either in an incoherent or pressed form, on the degree of airborne particle generation.
- Analysis of reduction in airborne particle generation as a consequence of the application of three types of fluid (water, rapeseed oil, molasses) in different concentrations to whole and rolled oats. The influence of the drop height (20 cm or 40 cm) on the generation of airborne particles was also investigated.

All the airborne particle measurements were undertaken under standardised conditions in a series of laboratory tests in a dust chamber with the aid of the airborne particle analyser TEOM 1400a (Rupprecht and Patashnick Company, USA). Different measuring heads were used to differentiate between the various sizes of airborne particles: PM₂₀ (< 20 µm), PM₁₀ (< 10 µm), PM_{2.5} (< 2.5 µm) and PM_{1.0} (< 1 µm).

The analyses of the separation rate of airborne particles as a consequence of cleaning oats and barley revealed a reduction in the PM₂₀ and PM₁₀ fractions by ca. 80%. The reduction was much less in the PM_{2.5} and PM_{1.0} fractions; this lay in the range of ca. 30-50%. The mechanical treatment (rolling) of oats and barley led to a renewed increase in the generation of airborne particles by up to 20% (PM₂₀, PM₁₀) in contrast to the non-rolled grains.

As the feeding of industrially produced compound feed (hydrothermal treatment) is considered to be a method of reducing airborne particle generation, two different types of pellets and muesli were investigated. The analyses showed that the industrially produced compound feeds generated 65-80% fewer particles in the fractions PM₂₀, PM₁₀ and PM_{2.5} in comparison to uncleaned oats or barley. Comparing the four types of industrially produced compound feeds to each other, the two types of muesli generated up to 20% lower airborne particle concentrations (PM₂₀ and PM₁₀) than the two types of pellets. The size of the pellets (5 mm and 10 mm) did not significantly influence the amount of airborne particles generated.

In conclusion, these results show that it is sensible to clean standard straights such as oats and barley to minimise the danger of irritating the equine respiratory tract. The effects of cleaning are reflected in the significant reduction in airborne particles. Also the feeding of industrially produced compound feedstuffs (pellets or muesli) can clearly aid in the reduction of airborne particle contamination in the direct breathing zone of the horse.

The analyses of the separation rate of airborne particles and mould spores by the use of a new form of separation technology for the treatment of different types of bedding material (wheat straw, wood shavings, flax and hemp) and roughage feedstuffs (hay and haylage) revealed a highly significant influence of the treatment of the materials on the amount of airborne particles generated ($P < 0.0001$). There was a reduction in the generation of airborne particles (PM₂₀) in hay of 49.16 mg/m³ down to 22.79 mg/m³ (53.6%), haylage from 28.57 to 25.04 mg/m³ (12.3%), wood shavings from 141.68 to 15.04 mg/m³ (89.4%), wheat straw from 143.08 to

22.97 mg/m³ (83.9%), flax from 135.11 to 53.31 mg/m³ (60.5%) and hemp from 63.67 to 17.64 mg/m³ (72.3%). By using this separation technology on the various materials, the generation of mould spores was only significantly reduced in the wood shavings (586.7 to 44.3 CFU/m³; -92.4%), wheat straw (383.3 to 46.0 CFU/m³; -88.0%) and hay (61.0 to 8.7 CFU/m³; -85.8%). The smallest reduction (24.5%) was found to occur by treating hemp (untreated hemp 62.7 CFU/m³; treated hemp 47.3 CFU/m³). Interestingly, the treated haylage (49.0 CFU/m³) and flax (94.7 CFU/m³) had a slightly higher mould content than their respective untreated counterparts (haylage 37.0 CFU/m³; flax 67.0 CFU/m³).

In another experiment on the treated materials, 5 kg was stored for eight weeks either in a compressed or incoherent form and was then investigated with respect to its airborne particle generation. The eight-week storage of the treated materials in the compressed form led to a renewed significant increase in the generation of airborne particles (PM₁₀) in the haylage (+29.9%), wheat straw (+104.0%), wood shavings (+40.4%) and hemp (+30.7%). A renewed increase in the generation of airborne particles (PM₁₀) as a consequence of storing the materials in the incoherent form occurred only in the wheat straw (+44.2%).

From these results, it can be concluded that this new technology for the separation of airborne particles can result in a substantial reduction in the generation of such particles from roughage feedstuffs and bedding materials, both for the large-sized particles and for the thorax-passable and the alveolar-passable ones. Even though the storage of the treated materials led to an increase in the generation of airborne particles, the final level did not reach the level found in the untreated materials in any of the stored materials.

The analyses of the reduction in airborne particle generation as a consequence of the application of different fluids (water, rapeseed oil or molasses) in various concentrations to whole and rolled oats had an overall highly significant influence on the amount of airborne particles generated ($P < 0.0001$). By the addition of 1% water to whole oats, a reduction of 90.6% was achieved in the PM₂₀ fraction and of ca. 67% in the PM₁₀ and PM_{2.5} fractions. The same dose of rapeseed oil resulted in a reduction of 93.8% in the PM₂₀ fraction, 90.8% in the PM₁₀ fraction and 78.0% in the PM_{2.5} fraction. The airborne particle reduction in the PM₂₀ and PM_{2.5} fractions with the application of 1% molasses lay in roughly the same range as for 1% rapeseed oil, while the reduction in the PM₁₀ fraction was lower (85.2% versus 90.8%, respectively). The reduction in airborne particle generation for all the particle fractions was roughly the same after the application of either rapeseed oil or molasses in the whole oats. In contrast, the addition of molasses resulted in a substantially lower

reduction in airborne particle generation in the rolled oats than when these were treated with rapeseed oil. The application of water had the lowest effect on both the whole and rolled oats. The highest reduction in airborne particle generation (PM_{20} : ca. 98%) was found to occur in both whole ($18.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and rolled ($33.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oats with the application of 3% rapeseed oil.

The analyses of the generation of airborne particles in relation to the drop height (20 cm vs. 40 cm) showed that the factor “drop height” only had a significant influence on the airborne particle concentration in the PM_{10} fraction ($P = 0.0261$). The airborne particle generation in this fraction was smaller with the lower drop height (20 cm) than with 40 cm. In contrast, the airborne particle generation in the $PM_{2.5}$ fraction tended to be lower with a drop height of 40 cm ($34.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) than at 20 cm ($42.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ($P < 0.1000$).

In conclusion, the mixing of fluid additives can lead to a substantial reduction (by 50-98%) in the amount of airborne particles generated by whole and rolled oats for all of the particle fractions. These results show that the use of rapeseed oil in low concentrations as a binding agent is a better option than either molasses or water with respect to achieving a reduction in airborne particles generation. In addition, the use of a short drop height to fill a trough with oats can be recommended as a further option for reducing the generation of these particles.

7 Literaturverzeichnis

- Angersbach-Heger S.** (2002): Untersuchungen zur Emission und Verfrachtung luftgetragener Mikroorganismen von der Auslauffläche einer Legehennenfreilandhaltung. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Arndt S.** (2001): Vergleich der Pferdehaltung in bäuerlich- ländlichen Kleinbetrieben mit derjenigen in hauptberuflichen, städtischen Pferdewirtschaftsbetrieben im Hinblick auf einen möglichen Zusammenhang mit Atemwegserkrankungen. Diss. Med. Vet., Gießen.
- Art T., McGorum B.C., Lekeux P.** (2002): Environmental Control of Respiratory Disease. In: Lekeux, P. (Ed.): Equine Respiratory Diseases, International Veterinary Information Service, New York.
- Banhazi T., Woodward R., Hynd P.** (2002): Improving air quality in bedded systems. *Animal Production Australia*, 24, 375.
- Bartz J.** (1992): Staubmessungen im direkten Einatmungsbereich eines Pferdes mit Hilfe eines „personal samplers“. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Berry N.R., Zeyer K., Emmenegger L., Keck M.** (2005): Emissionen von Staub (PM₁₀) und Ammoniak (NH₃) aus traditionellen und neuen Stallsystemen mit Untersuchungen im Bereich der Mastschweinehaltung. BUWAL gefördertes Forschungsprojekt. http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/46674/---/l=1 (abgerufen am 14.10.2010).
- Bitterle E.** (2004): Oxidative und inflammatorische Mechanismen von Targetzellen des Alveolarepithels nach Exposition mit ultrafeinen Aerosolpartikeln an der Luft-Medium-Grenzschicht. Diss., Technischen Universität München.
- BMELV (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz)** (2009): Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tiereschutzgesichtspunkten. Hrsg: BMVEL, Bonn.
- Bothe C.** (2001): Effekte unterschiedlicher Stärketräger und deren Bearbeitung auf die postprandiale Glucose- und Insulinreaktion beim Pferd. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Brauer H.** (1995): Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik - Emissionen und ihre Wirkungen, Band 1. Springerverlag, Berlin. ISBN 3540580247.
- Bundy D.S., Hazen T.E.** (1975): Dust levels in swine confinement systems associated with different feeding methods. *Transactions of the ASAE*, 18, 137-144.
- Butera M., Smith J.H., Morrison W.D., Hacjer R.R., Kains F.A., Ogilvie J.R.** (1991): Concentration of respirable Dust and Bioaerosols and Identification of certain microbial Types in a Hog-growing Facility. *Canadian Journal of Animal Science*, 71, 271-277.
- Cargill C.** (2000): Controlling and reducing airborne dust in horse stables and transporters. Australia: University of Adelaide, Rural Industries Research & Development Corporation.

- Clarke A.F.** (1987): A review of environmental and host factors in relation to equine respiratory disease. *Equine Veterinary Journal*, 19, 435-441.
- Clarke A.F.** (1993): Stable design and management. *Veterinary Annual*, 33, 24-44.
- Clarke A.F., Madelin T.** (1987): Technique for assessing respiratory health hazards from hay and other source materials. *Equine Veterinary Journal*, 19, 442-447.
- Cook W.R.** (1976): Chronic bronchitis and alveolar emphysema in the horse. *Veterinary Research*, 99, 448-451.
- Cox C.S.** (1995): Physical aspects of Bioaerosol Particles. In: *Bioaerosols Handbook*, C.S. Cox and C.M. Wathes (Hrsg.) CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 15-25. ISBN 0873716159.
- Crichlow E.C., Yoshida K., Wallace K.** (1980): Dust levels in a riding stable. *Equine Veterinary Journal*, 12, 185-188.
- Dahme E., Weiss E.** (2007): *Grundriss der speziellen pathologischen Anatomie der Haustiere - Auflage 5*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart. ISBN 3432809050.
- Deegen E., Müller P.** (1983): Die Bedeutung von „air trapping“ bei Pferden mit chronisch obstruktiver Bronchitis *Tierärztliche Praxis*, 11, 77-84.
- DFG (Deutschen Forschungsgemeinschaft)** (2009): MAK- und BAT – Werte – Liste 2009. Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. ISBN 3527325956.
- Deutsche Reiterliche Vereinigung/FN Warendorf** (2003): Jahresbericht. <http://www.pferd-aktuell.de> (abgerufen am 13.06.2010).
- DIN EN 481** (1993): Arbeitsplatzatmosphäre: Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel. Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18910 Teil 1** (2004): Klima in geschlossenen Ställen. Bemessung der Lüftung. Beuth Verlag, Berlin.
- Dixon P.M., Railton D.I., McGorum B.C.** (1995): Equine pulmonary disease: a case control study of 300 referred cases Part 2: Details of animals and of historical and clinical findings. *Equine Veterinary Journal*, 27, 422-427.
- Drewnick F.** (2005): Skriptum zur Vorlesung „Moderne Methoden der Aerosolmesstechnik, WS 2005/2006. Universität Mainz, Institut der Physik der Atmosphäre.
- Driemer J., Van den Weghe H.F.A.** (1997). Messung der Schwebstaubkonzentration in Stallungen. *Landtechnik*, 52, 252-253.
- Eckardt K.** (2008): Charakterisierung der endotoxinbedingten proinflammatorischen Aktivität von Bioaerosolen aus Tierställen. Diss., Freien Universität Berlin.
- Ferro E., Ferrucci F., Salimei E., Antonin M., Codazza D., Caniatti M.** (2000): Relationship between the conditions of lower airways in healthy horses, environmental factors and air quality in stables. *Pferdeheilkunde*, 16, 579-586.

- Fleming K.** (2004): Experimentelle Untersuchungen zur Luftqualität im Pferdestall mit Boxenhaltung. Masterarbeit, Georg-August-Universität Göttingen.
- Fleming K.** (2008): Analyse und Bewertung physikalisch-chemischer und stofflicher Parameter auf die Freisetzung von biogenen Gasen und luftgetragenen Partikeln aus Substraten bei der Haltung von Warmblutpferden in eingestreuten Einzelboxen. Diss., Georg-August-Universität Göttingen.
- Fleming K., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A.** (2008): Generation of airborne particles from different bedding materials used for horse keeping. *Journal of Equine Veterinary Science*, 28, 408-418.
- Fleming K., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A.** (2009): Gas and particle concentrations in horse stables with individual boxes as a function of the bedding material and the mucking-out regime. *Journal of Animal Science*, 87, 3805-3816.
- Födisch H.** (2004): Staubemissionsmesstechnik 1. Auflage. Expert-Verlag, Renningen. ISBN 3816922961.
- Franz C.** (2003): Der Blick ins Pferd. In: Herbst & Winter 2003.
- Gast R.M., Bundy D.S.** (1986): Control of feed dusts by adding oils. American Society of Agricultural Engineers. Paper No. 86-4039.
- GefStoffV** (2004): Gefahrstoffverordnung vom 23. Dezember 2004. BGBl. I S. 3758.
- GOT (Gebührenordnung für Tierärzte)** (2008): Gebührenordnung für Tierärzte - mit Gebührensätzen nach 2. Verordnung zur Änderung der GOT vom 30. Juni 2008.
<http://www.bundestieraerztekammer.de/fachliches/praxis/gebuehrenordnung/index.htm> (abgerufen am 11.10.2010).
- Grabner A.** (1987): Diagnose und Therapie der Luftsackmykose des Pferdes. *Tierärztliche Praxis*, 2, 10-14.
- GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG** (2010): World Smallest Aerosol Spectrometer Model 1.109.
<http://www.grimm-aerosol.com/> (abgerufen am 11.05.2010).
- Haake B.** (1992): Felduntersuchungen zum Einfluss von Einstreu und Futterart auf die Luftqualität in freigelüfteten Boxen in einem Reitstall. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Hamelmann F., Schmidt E.** (2002): Messverfahren zur Bestimmung des Staubungsvermögens von dispersen Pulvern. *Chemie Ingenieur Technik*, 74, 1666-1676.
- Hartung J., Klinckmann G., Adrian U.** (1989): Untersuchungen des Staub- und Keimgehaltes in einem Pferdestall beim Einsatz eines Staubbindemittels *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift*, 96, 368-370.
- Hartung J.** (1992): Emissions of airborne substances from stalls of domestic animals. *Pneumologie*, 46, 196-202.

- Hartung J.** (1995): Gas- und partikelförmige Emissionen aus Ställen der Tierproduktion. Deutsche Tierärztliche Wochenschrift, 102, 283-288.
- Heber A.J., Martin C.R.** (1988) Effect of additives on aerodynamic segregation of dust from swine feed. Transactions of the ASAE, 31, 558-563.
- Heintzsch A.** (1995): Effekte einer Enzymmischung (α -Amylase, Xylanase, β -Glucanase, Pektinase) als Futteradditiv auf die Verdaulichkeit stärkereicher Rationen beim Pferd. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Henninger W., Frame E.M., Willmann M., Simhofer H., Malleczek D., Kneissl S.M., Mayrhofer E.** (2003): CT features of alveolitis and sinusitis in horses. Veterinary Radiology & Ultrasound, 44, 269-276.
- Henseler-Paßmann J.** (2010): Untersuchungen zur Emission und Transmission von Feinstäuben aus Rinderställen. Diss., Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität zu Bonn.
- Heüveldop S.** (2002): Atemwege: Erkrankungen vorbeugen, erkennen und behandeln. Müller Rüschkon Verlag, Cham. ISBN 3275014250.
- Heyder J., Gebhart J., Rudolf G., Schiller C.F., Stahlhofen W.** (1986): Deposition of particles in the human respiratory tract in the size range 0.005-15 μ m. Journal of Aerosol Science, 17, 811-825.
- Hilliger H.G.** (1990): Stallgebäude, Stallluft und Lüftung. Enke-Verlag, Stuttgart.
- Hinds W.** (1998): Aerosol Technology. Properties, behavior, and measurement of airborne particles. Second Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Honey L.F., McQuitty J.B.** (1979): Some physical factors affecting dust concentrations in a pig facility. Canadian Agricultural Engineering, 21, 9-14.
- Horodecki J., Fissan H.** (1996): Vergleich unterschiedlicher Kalibriermethoden für den Sensor eines TEOM-Messgerätes. Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft, 56, 5-10.
- Hörmann A.** (2006): Experimentelle Untersuchungen zu Gas- und Schwebstaubkonzentrationen im Pferdestall mit Boxenhaltung unter besonderer Berücksichtigung des Pferdeverhaltens und der Stallarbeit. Masterarbeit, Georg-August Universität Göttingen.
- ISO 7708** (1995): Luftbeschaffenheit – Festlegung von Partikelgrößenverteilungen für die gesundheitsbezogene Schwebstaubprobenahme. Beuth-Verlag, Berlin.
- Jaggy U.** (1996): Einfluss des Stallklimas, insbesondere von Heustaub, auf die Lungengesundheit von Pferden. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Jungbluth T., Büscher W., Krause M.** (2005): Technik Tierhaltung: Grundwissen Bachelor. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. ISBN 3-8252-2641-7.
- Jussen U., Zeitler M., Groth W.** (1984): Untersuchungen über Haltungsverhältnisse in bayrischen Pferdebeständen, 1. Mitteilung: Stallgebäude und Haltungssysteme. Züchtungskunde, 56, 199-208.

- Kamphues J., Amtsberg G., Klarmann D.** (1989): Feinanteile und Staub in Futtermitteln- quantitative und qualitative (Pilze, Bakterien und LPS-) Aspekte. Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift, 102, 418-421.
- Kappos A., Bruckmann P., Eikmann T., Englert N., Heinrich U., Höpfe P., Koch E., Metz N., Rauchfuss K., Rombout P., Schabronath J., Schulz-Klemm V., Spallek M.F., Wichmann H.E., Kreyling W.G., Krause G. H. M.** (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, 257-278.
- Khol-Parisini A., van den Hoven R., Leinker S., Hulan H.H., Zentek J.** (2007): Effects of feeding sunflower oil or seal blubber oil to horses with recurrent airway obstruction. Canadian Journal of Veterinary Research, 71, 59–65.
- Kirschvink N., Di silvestro F., Sbai I., Vandenput S., Art T., Roberts C., Lekeux P.** (2002): The use of cardboard bedding material as part of an environmental control regime for heaves-affected horses: In vitro assessment of airborne dust and aeroallergen concentration and in vivo effects on lung function. The Veterinary Journal, 163, 319-325.
- Klemm M., Löser J., Bernhard D., Rostkowski S.** (2008). Verminderung der Feinstaubemissionen aus Biomassekleinkesseln durch Feuerraumoptimierung und innovative Abgasreinigung bzw. -wäsche. Bericht VWS - B6. www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22022506.pdf (abgerufen am 01.09.2010).
- Korries O.** (2003): Untersuchung pferdehaltender Betriebe in Niedersachsen. Bewertung unter dem Aspekt der Tiergerechtheit, bei Trennung in verschiedene Nutzungsgruppen und Beachtung haltungsbedingter Schäden. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft)** (2000): Leitsatz Bauliche Anlagen für die Pferdehaltung. KTBL-Arbeitsblatt 1108. KTBL, Darmstadt.
- Kovacs F., Raifai P.** (1984): Aerial Dust Contamination in Pig Fattening Houses under Different Management Systems. Proceedings of Symposium Dust in Animal Houses, ISAH, Hanover, 11-15.
- Laboklin (Labor für klinische Diagnostik)** (2008): Allergisch bedingte respiratorische Erkrankungen beim Pferd - Therapieansatz allergenspezifische Immuntherapie. www.laboklin.de/pdf/de/news/200805_respiratorische_erkrankungen_pferd.pdf (abgerufen am 12.11.2010).
- Lim T.T., Heber A.J., Ni J.Q., Gallen J.X., Xin H.** (2003): Air Quality Measurements at a Laying Hen House: Particulate Matter Concentrations and Emissions. In: Air Pollution from Agricultural Operations III, Proceedings of the 12-15 October 2003 Conference (Research Triangle Park, North Carolina USA), Publication Date 12 October 2003, 701P1403, 249-256.
- Mansfield J.R.** (1998): Treatment of Equine Allergic Diseases with Allergy Neutralization. A Field Study. Journal of Nutritional & Environmental Medicine, 8, 329-334.

- Markus R.G.** (2002): Untersuchungen zur Therapie der Luftsackmykose des Pferdes - Ligatur der Arteria carotis interna mittels transendoskopischer Clipapplikation. Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Marten J.** (2004): Stallgebäude für die Pensionspferdehaltung In: Pensionspferdehaltung im landwirtschaftlichen Betrieb. KTBL- Schrift 405. Darmstadt, Hrsg: KTBL. ISBN 3784321615.
- Marti E., Tahon L., Baselgia S., Hellberg W.** (2005): Beziehung zwischen Atemwegserkrankungen und Allergien beim Pferd. FFP-Fortbildungsveranstaltung zur Pferdegesundheit am 23. & 24. April 2005 in Münster-Handorf. Thema: Immunkrankheiten beim Pferd.
- Mayr A.** (1999): Infektionskrankheiten. In Dietz O., Huskamp B. Handbuch Pferdepraxis 2. Auflage. Enke Verlag, Stuttgart, 346-361. ISBN 3432292627.
- McPherson E.A., Thomson J.R.** (1983): Chronic obstructive pulmonary disease in the horse: Nature of the disease. *Equine Veterinary Journal*, 15, 203-206.
- Mehlhorn G.** (1979): Lehrbuch der Tierhygiene. 1. Aufl. Bd. 2. Fischer Verlag, Jena. ASIN B0010ZG7L0.
- Meyer H., Coenen M.** (2002): Pferdefütterung - 4. Erweiterte und aktualisierte Auflage. Parey Buchverlag, Berlin. ISBN 3826333985.
- Mitchell J.P.** (1995): Particle Size Analyzers: Practical Procedures and Laboratory Techniques. In: *Bioaerosols Handbook*, Cox C.S., Wathes C.M. (Hrsg.). CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 5-14. ISBN 0873716159.
- Müller W., Wieser P., Woiwode J.** (1977): Zur Größe koloniebildender Einheiten in der Stallluft. *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift*, 90, 6-11.
- Müller W., Wieser P.** (1987): Dust and microbial emissions from animal production. In: *Animal production and environmental health*. Elsevier Sci. Pub. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo.
- Müller W.** (2002): Skriptum zur Vorlesung Mechanische Grundoperationen, SS 2002 Fachhochschule Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik.
- Nannen C., Büscher W.** (2007): Analyse der Zusammensetzung von Staubemissionen aus Ställen verschiedener Nutztierarten und Bestimmung des Gravimetriefaktors. Forschungsvorhaben im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Patashnick H., Rupprecht E.** (1991): Continuous PM₁₀ measurements using the tapered element oscillating microbalance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 41, 1079-1083.
- Pearson C.C., Sharples T.J.** (1995): Airborne dust concentrations in livestock buildings and the effect of feed. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 60, 145-154.

- Pedersen S.** (1992): Dust and Gases. 2nd Report of Working Group „Climatization of Animal Houses“. Universität Gent, Belgien.
- 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.
- Pick M.** (1986): Handbuch der Pferdekrankheiten. Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. ISBN 3440059588.
- Raymond S.L., Curtis E.F., Winfield L.M., Clarke A.F.** (1997): A comparison of respirable particles associated with various forage products for horses. *Equine Practice*, 19, 23-26.
- Robinson R.E.** (2001): Recurrent Airway Obstruction (Heaves). In: *Equine Respiratory Diseases*, P. Lekeux (Ed.) Publisher: International Veterinary Information Service (www.ivis.org), Ithaca, New York, USA.
- Sainsbury D.W.B.** (1981): Ventilation and environment in relation to equine respiratory disease. *Equine Veterinary Journal*, 13, 167-170.
- Schlichting K.E.** (2001): Atemwegserkrankungen. *Reitsportmagazin*, Hannover-Bremen, 3, 22-23.
- Schmidt-Ott A., Ristovski Z.D.** (2004): Measurement of Airborne Particles. In: *Indoor Environment: Airborne Particles and Settled Dust*. Hrsg.: Morawska L., Salthammer T. Wiley-VCH Verlag, Weinheim. ISBN 3527305254.
- Schmitt-Paukzstat G., Rosenthal E., Büscher W., Diekmann B.** (2005): Sinkgeschwindigkeiten von Tierstäuben. *Agrartechnische Forschung*, 11, 133-144.
- Seedorf J., Hartung J., Schröder M., Linkert K.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Pedersen S., Takai H., Johnsen J.O., Metz J. H. M., Groot Koerkamp P. W. G., Uenk G. H., Wathes C.M.** (1998): Concentrations and Emissions of Airborne Endotoxins and Microorganisms in Livestock Buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70, 97-109.
- Seedorf J., Hartung J.** (2002): Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung. KTBL-Schrift 393. ISBN 3784321453.
- Schütz M., Sasse H.H.L.** (1998): Erfahrungen mit Silagefütterung bei COB-Patienten. 15. Arbeitstagung der DVG, Fachgruppe Pferdekrankheiten Wiesbaden. 225-229.
- Stetzenbach L. D.** (1997): Introduction to aerobiology. In: *Manual of environmental microbiology*, C. J. Hurst (ed.). ASM Press, Washington, D.C. 619-628. ISBN-155581087X.
- Stieß M.** (2007): Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1: Beschreibung und Erzeugung von dispersen Stoffen, Auflage: 3. Springer Verlag, Berlin. ISBN 3540325514.

- Szabo E.** (2007): Experimentelle Untersuchungen luftgetragener Partikel und Schimmelpilze in Pferdeställen. Diss., Freie Universität Berlin.
- Takai H., Moller F., Iversen M., Jorsal S.E., Bille-Hansen V.** (1995): Dust control in pig houses by spraying rapeseed oil. Transactions of the ASAE, 38, 1513-1518.
- TA Luft** (2002): Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Thomson J.R., McPherson E.A.** (1983): Chronic obstructive pulmonary disease in the horse 2: Therapy. Equine Veterinary Journal, 15, 207-210.
- Thomson J.R., McPherson E.A.** (1984): Effects of environmental control on pulmonary function of horses affected with chronic obstructive pulmonary disease. Equine Veterinary Journal, 16, 35-38.
- Traub P. M.** (2005): Klinische und immunologische Untersuchungen zur Ausprägung der Chronisch Obstruktiven Bronchitis des Pferdes: Gibt es Hinweise auf eine hyperreagible und eine dyskrinische Form? Diss., Tierärztl. Hochsch. Hannover.
- Tucker M.E.** (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. ISBN 3-8274-1290-0.
- Umweltbundesamt (UBA)** (2010): Tagungsband zum Fachgespräch „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung. PAREST Fachgespräch, UBA/Berlin, 10. Juni 2010.
- Vandenput S., Lekeux P.** (1996): Advantage of silage made from wilted grass in the prevention and treatment of allergic respiratory disease in horses. Journee de la recherche equine, 22, 44-52.
- VDI 2066; Blatt 1** (2006): Messen von Partikeln - Staubmessungen in strömenden Gasen - Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung. In: VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft - Band 4: Analysen- und Messverfahren. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- VDI 2463; Blatt 1** (1999): Messen von Partikeln - Gravimetrische Bestimmung der Massenkonzentration von Partikeln in der Außenluft – Grundlagen. In: VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft - Band 4: Analysen- und Messverfahren. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Voshaar T.H., Heyder J., Köhler D., Krug N., Nowak D., Scheuch G., Schulz H., Witt C.** (2005): Partikuläre Luftverunreinigung und ihre Folgen für die menschliche Gesundheit. Stellungnahme der deutschen Gesellschaft für Pneumologie (DGP) zur aktuellen Feinstaub-Diskussion. Pneumologie, 59, 470-476.
- Wang X., Zhao L.Y., Riskowski G.L.** (2000): Effect of Ventilation Rate on Dust Spatial Distribution in Mechanically Ventilated Airspace. Transaction of the ASAE, 43, 1877-1884.

- Webster A.J.F, Clarke A.F, Madelin T.M, Wathes C.M.** (1987): Air hygiene in stables 1: Effects of stable design, ventilation and management on the concentration of respirable dust. *Equine Veterinary Journal*, 19, 448-453.
- Welford R.A., Feddes J.J.R., Barber E.M.** (1992): Pig building dustiness as affected by canola oil in the feed. *Canadian Agricultural Engineering*, 34, 365-373.
- Woods P.S, Robinson N.E, Swanson M.C, Reed C.E, Broadstone R.V, Derksen F.J.** (1993): Airborne dust and aeroallergen concentration in a horse stable under two different management systems. *Equine Veterinary Journal*, 25, 172-174.
- Zeitler M., Jussen U., Groth W.** (1984): Untersuchungen über Staub in Pferdeställen, sowie über dessen allergene Wirkung auf das Pferd. Dust in animal houses Symposium of the International Society of Animal Hygiene, Hanover, 13 -14 March 1984. 108-111.
- Zeitler M.H.** (1985): Konzentration und Korngrößenverteilung von luftgetragenen Staubpartikeln in Pferdeställen. *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift*, 98, 241-246.
- Zeitler M.H., König M., Groth W.** (1987): Der Einfluss von Futterform (mehlförmig, pelletiert, flüssig) und Jahreszeit auf die Konzentration und Korngrößenverteilung luftgetragener Staubpartikel in Mastschweineställen. *Deutsche Tierärztliche Wochenschrift*, 94, 381-440.
- Zeitler M.H.** (1988): Hygienische Bedeutung des Staub- und Keimgehaltes der Stallluft Sonderdruck aus „Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch“, Vorträge der XXV. Weihenstephaner Hochschultagung, 65. Jahrgang Hrsg.: TU Weihenstephan, Lehrstuhl für Tierhygiene und Nutztierkunde Weihenstephan. 151-165.
- Zeitler-Feicht M.H.** (1994): Qualität der Stallluft und Gesundheit der Pferde. Tagungsband zum Fachgespräch über Pferdehaltung, ALB Bayer e.V., Grub. 35-46.
- Zeitler-Feicht M.H., Bohnet W., Düe M., Esser E., Franzky A., Pollmann U.** (2004): Positionspapier zu den Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutzgesichtspunkten. Tierärztliche Vereinigung für Tierschutz e.V., Bramsche.
- Zhang Y., Tanaka A., Barber E.M., Feddes J.J.R.** (1996): Effects of Frequency and Quantity of Sprinkling Canola Oil on Dust Reduction in Swine Buildings. *Transactions of the ASABE*, 39, 1077-1081.

8 Anhang

8.1 Lebenslauf

Felix Garlipp ♦ Eichstr. 7 ♦ 39596 Hohenberg-Krusemark
 Telefon: 01739528469 ♦ E-Mail: fgarlip@gwdg.de

Persönliche Daten

Geburtsdatum	08.12. 1982
Geburtsort	Leipzig
Familienstand:	ledig
Staatsangehörigkeit	Deutsch

Schulbildung

1995 – 2002	Markgraf Albrecht Gymnasium Osterburg
2002	Schulabschluss: Abitur, Juni 2002

Wehrdienst

Juli 2002 – März 2003	Grundwehrdienst im Panzerpionierbataillon Elb-Havel-Kaserne, Havelberg
-----------------------	---

Studium

Oktober 2003 – Oktober 2006	Veterinärmedizinische Universität Wien, Österreich <ul style="list-style-type: none"> ➤ Studiengang: Pferdewissenschaften ➤ Abschluss: Bachelor of Science
Oktober 2006 – März 2008	Georg-August-Universität Göttingen <ul style="list-style-type: none"> ➤ Studiengang: Agrarwissenschaften ➤ Studienrichtung: Agribusiness ➤ Abschluss: Master of Science

Berufliche Tätigkeiten

April 2008 – März 2011	wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand in der Abteilung für Verfahrenstechnik in der Veredelungswirtschaft der Georg-August-Universität Göttingen in Vechta
Januar 2009 – März 2011	Nebenbeschäftigung als Fachberater der Firma HIT-Aktivstall (HIT Hinrichs Innovation + Technik GmbH) Beratungsgebiet: Neue Bundesländer
April 2010 – Oktober 2010	Planung und Organisation der „Akademie zum Pferdemanagement“ an der Universität Vechta

Praktika

August 1999 – September 1999	Mitarbeit im Holsteiner Verband (Herbert Blöcker)
August 2000 – September 2000	Mitarbeit in der Tierarztpraxis Hans Peter Garlipp
Juli 2004 – September 2004	Mitarbeit im Brandenburgischen Haupt - und Landgestüt Neustadt (Dosse)
Juli 2005 – November 2005	Leitung eines Forschungsprojektes an der Veterinärmedizinischen Universität Wien - Institut für Ernährung und Interne (Prof. Van den Hoven)
August 2007 – Oktober 2007	Mitarbeit im Bereich Marketing und Werbung in der Firma Heinrich Eggersmann GmbH & Co KG

Sprachkenntnisse

Sprachen	Englisch (Gute Kenntnisse)
	Französisch (Schulkenntnisse)
	Latein (Grundkenntnisse)

Sonstiges

EDV-Kenntnisse	MS Word, PowerPoint, Excel, Access, MS Internet Explorer, Statistikprogramm SAS 9.1
Führerschein	C1,C,BE,C1E,CE – Erwerb bei der Bundeswehr 2002

8.2 Veröffentlichungen

8.2.1 Wissenschaftliche Veröffentlichungen mit Begutachtung

Hessel E.F., **Garlipp** F., Van den Weghe, H.F.A. (2009): Generation of airborne particles from horse feeds depending on type and processing. *Journal of Equine Veterinary Science*, 29 (9); 665-674.

Garlipp F., Hessel E.F., van den Hurk M., Timmermann M., Van den Weghe H.F.A. (2010): The influence of a particle separation technology on the generation of airborne particles from different roughages and bedding materials used for horses. *Journal of Equine Veterinary Science*, 30 (10); 545-559.

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2010): Characteristics of gas generation (NH_3 , CH_4 , N_2O , CO_2 , H_2O) from horse manure added to different bedding materials used in deep litter bedding systems. *Journal of Equine Veterinary Science*, (accepted, 18.10.2010).

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2010): The effects of three different liquid additives mixed with oats (whole or rolled) for horses on the generation of airborne particles. *Journal of Equine Veterinary Science*, (submitted, 17.12.2010).

8.2.2 Tagungsbeiträge

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2009): Experimentelle Untersuchungen zur Generierung von Schwebstaubpartikeln aus verschiedenen Krippenfuttermitteln für Pferde. In: 9. Tagung Bau, Technik und Umwelt in der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2009. 21.-23.09.2009, Berlin, 190-195. ISBN 978-3-941583-27-6.

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2009): Generierung von Schwebstaub aus Krippenfuttermitteln für Pferde. In: Göttinger Pferdetag '09 Zucht und Haltung von Sportpferden, 203 – 210. FNVerlag der Deutschen Reiterlichen Vereinigung GmbH, Warendorf. ISBN 978-3-88542-742-1.

8.2.3 Sonstige Veröffentlichungen

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2009): Trogschluss. *St. Georg – Das Pferdemagazin für Reiter und Züchter* 12/2009, 68-71. ISSN 0944-5854.

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2010): Entstaubt. *St. Georg – Das Pferdemagazin für Reiter und Züchter* 06/2010, 74-77. ISSN 0944-5854.

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2009): Schwebstaubgenerierung aus Krippenfuttermitteln für Pferde in Abhängigkeit von der Art und Aufbereitung des Futters. *Landtechnik* 64, 242-245.

Garlipp F., Hessel E.F., Van den Weghe H.F.A. (2009): Staub im Stall – Schwebstoffe. *Zeitschrift Hufeisen*, Eggersmann, 18-19.

Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Ir. H. Van den Weghe für die Bereitstellung der finanziellen Mittel für die Durchführung der einzelnen Projekte, die hilfreichen Verbesserungsvorschläge, die Unterstützung bei der Anfertigung der Arbeit und die abendlichen Diskussionen über neuste Ereignisse in der Pferdezucht und im Pferdesport,

Frau PD Dr. E. Hessel für die unermüdliche Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Daten sowie das Korrekturlesen der oftmals hoffnungslos erscheinenden Arbeiten,

meinen Kollegen in Raum V 107, Jörgen Haneke und Dennis Otten, sowie Hanna Werhahn in Göttingen. Wir hatten eine oftmals stressige aber auch sehr lustige und schöne gemeinsame Zeit. Gegenseitige Motivation zu jeder Zeit hat uns letztendlich zum Erfolg verholfen sowie gelegentliche Besuche in der Cubar,

den Kollegen aus der Außenstelle Vechta, Hartmut Liebenow für die schnelle Unterstützung bei allen technischen Problemen zu jeder Zeit und für die private Gastfreundschaft, Herrn Heinz Siebenand, Thomas Kruthoff, Steffen Schlapphorst und Johann Boger für die technische Anfertigung noch so ungewöhnlicher Vorhaben. Danke für die schöne Zeit am Institut,

Herrn Dr. Manfred Kaiser für die Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Daten und dem ein oder anderen motivierenden Gespräch,

Herrn Uwe Vehlow für die labortechnische Unterstützung während meiner Versuche,

Herrn Johannes Wilking und Melanie Hoyng für die Unterstützung bei der Organisation der Akademie zum Pferdemanagement,

Herrn Matthieu van den Hurk und Herrn Dr. Mark Timmermann für die finanzielle wie auch fachliche Unterstützung bei der Durchführung des Forschungsprojektes,

Frau Kirsten Hübner für die Bereitschaft des Korrigierens dieser Arbeit.

Der allergrößte Dank gebührt jedoch meinen Eltern, ohne deren Unterstützung und Vertrauen ich nie soweit gekommen wäre. Ihr habt mir Rückhalt gegeben und mir immer Mut zugesprochen. Euch ist diese Arbeit gewidmet.

Und natürlich auch vielen Dank für die finanzielle Unterstützung, sowohl während meines Studiums als auch bei der Ausübung des Reitsportes. An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei meinen Großeltern bedanken, die mir für die Zeit in Vechta das Pferd zur Verfügung gestellt haben.

