

Fallstudie zur digitalen Aufzeichnung der Staubentwicklung in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung und der Einstreu in einem Pferdestall

Conny Herholz¹, Jan Kocher¹, Peter Küng² und Alexander Burren¹

¹ Hochschule für Agrar-, Forst und Lebensmittelwissenschaften, Zollikofen, Schweiz

² MUUTU AG, Bern, Schweiz

Zusammenfassung: Der Einfluss verschieden großer Lüftungsflächen auf die Staubexposition in einem Pferdestall wurde mit drei verschiedenen Einstreuvarianten untersucht. Dazu wurden die Belüftungssituationen A, B und C definiert (A = Fenster geöffnet, 10 179 cm², B = Türe geöffnet, 23 415 cm², C = Fenster und Türe geöffnet, 33 594 cm²). Die Versuchsbox war mit einem Pony besetzt und die Staubbelastung wurde mit Hilfe eines digitalen Überwachungssystems (SmartHorse®, MUUTU AG) aufgezeichnet. Bei den Einstreuvarianten handelte es sich um zwei verschiedene Stroharten (Gerste und Weizen) und Holzspäne, wobei die Staubexposition auf Messhöhen von 53 und 130 cm gemessen wurde. Mit Hilfe eines statistischen Modelles wurden die Effekte von Lufttemperatur und -feuchte, sowie der Aktivität des Ponys auf die Staubexposition berücksichtigt. Der Effekt unterschiedlicher Belüftungssituationen zeigte sich für die Partikelgröße PM 2,5 gemessen auf 53 cm Höhe am deutlichsten. Es bestanden signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) in den Modellschätzwerten der Staubkonzentration PM 2,5 bei geöffnetem Fenster (A) versus geöffneter Tür (B) für Weizenstroh (A = 3,6 µg/m³, B = 5,6 µg/m³) und für Gerstenstroh (A = 2,9 µg/m³, B = 5,5 µg/m³). Bei geöffneter Türe und Fenster (C) betrug die Staubkonzentration PM 2,5 im Modellschätzwert für Weizenstroh 6,0 µg/m³, für Gerstenstroh 4,9 µg/m³ und für Holzspäne 9,6 µg/m³. Damit ergab sich zwischen den Belüftungssituationen B und C bei den beiden Stroharten kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) in der Staubexposition. Holzspäne verursachten bei geöffneter Türe und Fenster (C) die höchste Staubkonzentration, wobei PM 2,5 signifikant höher gegenüber beiden Strohsorten war ($p < 0,05$). Für die Partikelgröße PM 10 war der Unterschied bei gleicher Belüftungssituation (C) auf 53 cm Messhöhe nur zwischen Holzspänen und Weizenstroh signifikant verschieden ($p < 0,05$). Ungeachtet der gefundenen Unterschiede in den Staubkonzentrationen bei den Einstreuqualitäten und Belüftungssituationen lässt sich sagen, dass in der vorliegenden Studie die Staubexposition gemessen als PM 2,5 und PM 10 Werte (µg/m³) generell sehr tief lag. Von der Weltgesundheitsorganisation WHO werden für den Menschen im Tagesdurchschnitt maximale Staubexpositionen mit der Grösse PM 2,5 von 25 µg/m³ und PM 10 von 50 µg/m³ empfohlen. Diese Werte wurden in der vorliegenden Studie in keiner der Belüftungssituationen bzw. Messhöhen und Einstreutypen im Mittel- oder Modellschätzwert überschritten. Die Beurteilung des Stallklimas ist komplex und wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Digitale Monitoringsysteme können Klimawerte in Ställen sichtbar und bewertbar machen und zusammen mit geeigneter Einstreu, staubarmer Fütterung und richtigem Management wesentlich zum Tier- und Menschenwohl und -gesundheit beitragen.

Schlüsselwörter: Staub, Belüftung, digitale Überwachung, Einstreu, Pferd

Digital monitoring of dust release in a horse stable, depending on ventilation opening area and bedding type

The effect of three different ventilation configurations on dust exposure in a horse stable with three different bedding options was evaluated. The three ventilation configurations were: A = open window (10,179 cm² opening), B = open door (23,415 cm² opening), and C = open door and window (33,594 cm² opening). The experimental box was occupied by a pony and dust release was recorded using a digital monitoring system (SmartHorse®, MUUTU AG). The impact on dust release (measured as particulate matter, PM 2.5 and PM 10) of two different straw qualities (wheat and barley) and of wood shavings was investigated at two measurement heights (53 and 130 cm). A statistical model was used to take into account the effects of air temperature and humidity and the activity of the pony on dust release. The effect of the different ventilation configurations on the airborne particulate matter (PM 2.5) was most obvious at a height of 53 cm. Significant differences ($p < 0.05$) of the PM 2.5 concentrations estimated by the model were observed between configurations A (open window) and B (open door) for wheat straw (A = 3.6 µg/m³, B = 5.6 µg/m³) and for barley straw (A = 2.9 µg/m³, B = 5.5 µg/m³). When both door and window were open (C), the PM 2.5 concentration at 53 cm height was 6.0 µg/m³ for wheat straw, 4.9 µg/m³ for barley straw and 9.6 µg/m³ for wood shavings. With ventilation configurations B and C, there was no significant difference in PM 2.5 release between the two straw qualities. Wood shavings produced the highest PM 2.5 concentration in configuration C, and the values were significantly higher ($p < 0.05$) than those measured with the two types of straw. At 53 cm height particulate matter (PM 10) concentrations differed significantly ($p < 0.05$) between wood shavings and wheat straw only with ventilation configuration C. However, regardless of the differences observed between the various ventilation configurations and bedding materials, the dust release measured as PM 2.5 and PM 10 values (µg/m³) were generally low. The guideline values of the World Health Organization (WHO) for the maximum mean daily dust exposure of humans are 25 µg/m³ for PM 2.5 and 50 µg/m³ for PM 10. In the current study, both the mean measured values and the model estimates were lower than the recommended WHO maximal values in all three ventilation configurations, for both measurement heights and all bedding types. Assessing the climate of a stable is a complex process which is influenced by multiple factors. Digital monitoring systems make climate parameters visible and evaluable. In combination with adequate bedding material, low-dust feeding and appropriate stable management, they can therefore contribute substantially to the wellbeing and health of both animals and people.

Keywords: dust, ventilation, digital monitoring, bedding, horse

Zitation: Herholz C., Kocher J., Küng P., Burren A. (2020) Fallstudie zur digitalen Aufzeichnung der Staubentwicklung in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung und der Einstreu in einem Pferdestall. *Pferdeheilkunde* 36, 316–324, DOI 10.21836/PEM20200405

Korrespondenz: Prof. Conny Herholz, Berner Fachhochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Länggasse 85, 3052 Zollikofen, Schweiz; conny.herholz@bfh.ch

Eingereicht: 9. März 2020 | **Akzeptiert:** 11. Mai 2020

Einleitung

Staub besteht aus feinsten, festen Partikeln, die in Gasen (meist Luft) suspendiert schweben. Dabei kann Staub aus lebenden Partikeln wie Bakterien, Viren, Pilzen oder Parasiten, sogenannte Bioaerosole und aus unbelebten Partikeln wie z.B. mineralischem Staub und aus Aerosolen wie Ammoniak, Kohlendioxid u.a. bestehen (Szabo 2008). Die Atemwege der Pferde haben eine hohe Leistungsfähigkeit, sind aber auch sehr empfindlich gegenüber äußeren Faktoren, wie Staub oder Schadgasen. Chronische Atemwegserkrankungen sind die dritthäufigste Erkrankungsursache beim Pferd (Knubben et al. 2008), wobei die allergische Disposition zu Staub beim Pferd dem Asthma des Menschen ähnelt (Gerber et al. 2003). Insbesondere der organische Allergengehalt des Staubs spielt eine große Rolle in der Pathogenese des Equinen Asthma (Pirie et al. 2003).

Im Wesentlichen werden drei Quellen für die Herkunft von Staub im Pferdestall genannt: vom Pferd selber (Haare, Haut, Mist), von der Einstreu und vom Raufutter (Wathes et al. 1983, Szabo 2008, Saastamoinen et al. 2015). Die Zusammensetzung und die Konzentration des Staubs wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst, wie das Management, die Stallbelüftung, die Tierbesatzdichte, Luftfeuchte und Temperatur (Fleming et al. 2009).

Staub wird nach seiner Partikelgröße, engl. particulate matter (PM), klassifiziert. Die vom Pferd einatembaren Partikel besitzen eine Größe unter $100\mu\text{m}$, diejenigen, die durch die Luftröhre bis in den Brustraum vordringen können, haben Partikelgrößen $\leq 10\mu\text{m}$ und diejenigen mit einer Partikelgröße unter $\leq 5\mu\text{m}$ können bis in die Lungenbläschen gelangen (Seedorf und Hartung 2002). Die Partikel, welche in die Lungenbläschen vordringen ($\text{PM} \leq 5\mu\text{m}$) stören den Gasaustausch, aber auch die größeren Partikel $\text{PM} \leq 10\mu\text{m}$ führen zu vermehrter Schleimbildung in den Atemwegen und zu erhöhter Infektionsgefahr (Millerick-May et al. 2013).

Der Equidenbestand in der Schweiz beläuft sich auf 125 233 (TVD 2020), wovon Pferde nach wie vor hauptsächlich in Boxen gehalten werden (Siegel et al. 2018). Zur Boxenhaltung zählen Außen-, Innen- und Auslaufboxen. Die permanente Weidehaltung (Robusthaltung) ist mit 3 % bei Einzel- und 4 % bei Gruppenhaltung in der Schweiz kaum verbreitet. Eine zunehmende Zahl an Pferden in der Schweiz hat permanent Zugang zu einem Auslauf (Siegel et al. 2018). Diese Ausläufe weisen in der Regel eine permanent grössere Lüftungsöffnung auf, als Boxen ohne Auslauf. Pferde in Boxenhaltung sind einer erhöhten Staubbelastung ausgesetzt (Vandenput et al. 1997), welche die Atemwege der Pferde schädigt (Woods et al. 1993). Besonders im Fohlenalter ist das Risiko groß, dass das empfindliche Atemsystem der Pferde in schlechtem Stallklima lebenslanglich Schaden nimmt (Eubel 2004). Die

Staubbelastung in Boxenhaltung variiert je nach Einstreuart und Raufutter (Szabo 2008, Kwiatkowska-Stenzel et al. 2017). Nebst der Aktivität der Pferde haben auch Stallarbeiten wie «Misten», «Füttern», «Einstreuen» und «Fegen» einen Einfluss auf die Staubentwicklung (Nazarenko et al. 2018, Vandenput et al. 1997, Labie et al. 2019). Ebenfalls ist bekannt, dass der Luftaustausch ein besonders wichtiger Faktor zur Senkung der Feinstaubkonzentration in der Luft darstellt (Webster et al. 1987).

Ziel der Arbeit war es, den Effekt verschieden großer Lüftungsöffnungen auf die Staubbelastung mit Hilfe eines digitalen Überwachungssystems in einem Pferdestall aufzuzeichnen. Dadurch soll abgeschätzt werden, welche Auswirkungen verschieden große Lüftungsöffnungen, wie man sie in Boxen- oder Auslaufhaltung antrifft, in Bezug auf die Staubbelastung haben. Zusätzlich wurde auch der Effekt von zwei verschiedenen Stroharten (Gerste und Weizen), sowie Holzspänen auf die Staubentwicklung untersucht.

Material und Methoden

Versuchsstall und Einstreu

Der Versuchsort befand sich auf einem konventionellen Landwirtschaftsbetrieb im Kanton Bern in der Schweiz (437 m ü. M.). In der Stallung befanden sich drei gleich große, durch Seitenwände separierte und geschlossene Boxen (Grundfläche $10,2\text{m}^2$ Höhe von 280 cm) ohne Firstlüftung (Abb. 1). Die Staubmessungen wurden vom 23. Juli bis 25. August 2019 in der randständig rechten Pferdeboxe durchgeführt. In dieser Boxe wurde ein 18 Jahre altes irisches Sportpony gehalten, welches während des Versuches nicht geritten oder anderweitig genutzt wurde. Die Boxe wurde mit einer Wildkamera überwacht (Modell Snapshot Extra 5.0, Firma Dörr GmbH), um Aktivitätseinflüsse (liegen, stehen, umhergehen, fressen) des Ponys auf die Staubexposition berücksichtigen zu können. Die Bildintervalle betragen eine Minute, Nachtaufnahmen wurden durch in die Kamera integrierte Infrarot-Dioden gewährleistet. Die Kamera wurde mit 12AA (1,5V) Batterien betrieben und die Bilder auf einer 16 Gigabyte Secure Digital Memory Card gespeichert.

Die Ration bestand aus dreimal täglich, fünf Minuten vor der Verfütterung in Wasser eingeweichtes Heu ($1,5\text{kg}/100\text{kg LM TS}$) und zweimal täglich $0,25$ Liter Hafer, ebenfalls zuvor mit Wasser angefeuchtet, um den Staubeinfluss durch die Fütterung soweit als möglich zu standardisieren. Der Weidegang erfolgte je nach Witterung und wurde notiert.

An der Vorderseite der Boxen in Richtung Osten befanden sich Türen der Maße $117 \times 130\text{cm}$ (B \times H), sowie ein darin

eingelassenes Fenster (117×87). Das Fenster konnte separat geöffnet werden. An der Stallhinterseite befanden sich Türen (105×132 cm) in Richtung Westen mit ebenfalls separat zu öffnendem Fenster (105×91), welche zum angrenzenden Auslauf führten. Letzterer hatte eine Grundfläche von 21 m^2 , wurde mit Ecorastern befestigt und mit gewaschenem Sand aufgefüllt. Während des Versuchs wurde der Auslauf mittags bewässert.

Sensoren

Die Messung von Luftfeuchtigkeit und der Temperatur erfolgte mit drei Sensoren der Firma OTP (Modell Standard AM2302, DHT22). Der Messbereich der relativen Luftfeuchtigkeit betrug 0% bis 100% mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$. Die Temperatur wurde von -40 bis $+80$ Grad Celsius gemessen, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5$ Grad Celsius. Die Sensoren befanden sich vor Regen geschützt an der Außenseite der Box auf einer Höhe von 62 cm (Sensor 1) und 136 cm (Sensor 2), sowie in der Box (Sensor 3) auf der Höhe von 98 cm. Ein Schalenanemometer (ohne Name, China) zur Messung der Luftbewegung war auf 270 cm in der Mitte der Boxe an der rechten Wand angebracht. Es ist für eher stärkere Windströme konzipiert.

Die kontinuierliche Messung (24 h/Tag) der Staubbelastung der Partikelgrößen PM 2,5 ($< 2,5 \mu\text{m}$) und PM 10 ($< 10 \mu\text{m}$) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ erfolgte mit zwei Sensoren des Typs SDS011 (Inovafit, Shandong Architecture, Universität China). Die Partikel werden bei diesem Sensor mit Hilfe eines Lasers vermessen (Budde et al. 2018). Die Staubsensoren wurden in einer Höhe von 53 cm (Höhe der Nüstern beim Fressen des Heus) und

von 130 cm (Kopfhöhe des Ponys im Ruhezustand) ausserhalb der Box angebracht und die Luft mit einem Plastikschlauch aus der Box angesaugt (System SmartHorse®, Firma MUUTU AG). Zur vergleichenden Aufzeichnung der Ammoniakkonzentrationen (ppm) bei verschiedenen Einstreu-/Belüftungssituationen wurde ein Sensor des Modelles MQ 137 (Beijing XNQ Electric Co., LTD) in eine Höhe von 90 cm in der Box installiert. Da dessen Messungen nicht mit einem geprüften Ammoniakmesssystem validiert wurden, wurden die Messergebnisse nur vergleichend interpretiert.

Die Daten der Messsensoren Temperatur-, Luftfeuchte, Luftbewegung, Ammoniak und Staub, wurden von verteilten Messcomputern erfasst und dann in die Datenbank des zentralen Computers übertragen. Der Zentral-Computer war im Zwischendach des Stalles installiert. Die Daten waren sowohl über das lokale WiFi-Netzwerk als auch über das Internet mittels Computer oder Handy erreichbar. Die Daten wurden täglich gesichert und konnten mit Excel oder einer anderen Software visualisiert und analysiert werden.

Versuchsdesign

Zur Untersuchung des Einflusses verschieden großer Lüftungsöffnungen auf die Staubentwicklung bei drei verschiedenen Einstreuvarianten, wurden die Belüftungssituationen A, B und C definiert. Zur Einstreu wurde in Kleinballen gepresstes Gersten- und Weizenstroh aus extensivem, konventionellem Anbau, Erntejahr 2018 verwendet. Das Stroh wurde zweimal mit Herbiziden behandelt, allerdings wurden keine Insektizide und keine Fungizide verwendet. Ebenfalls wurde keine Vorerntespritzung mit Glyphosat vorgenommen. Nach

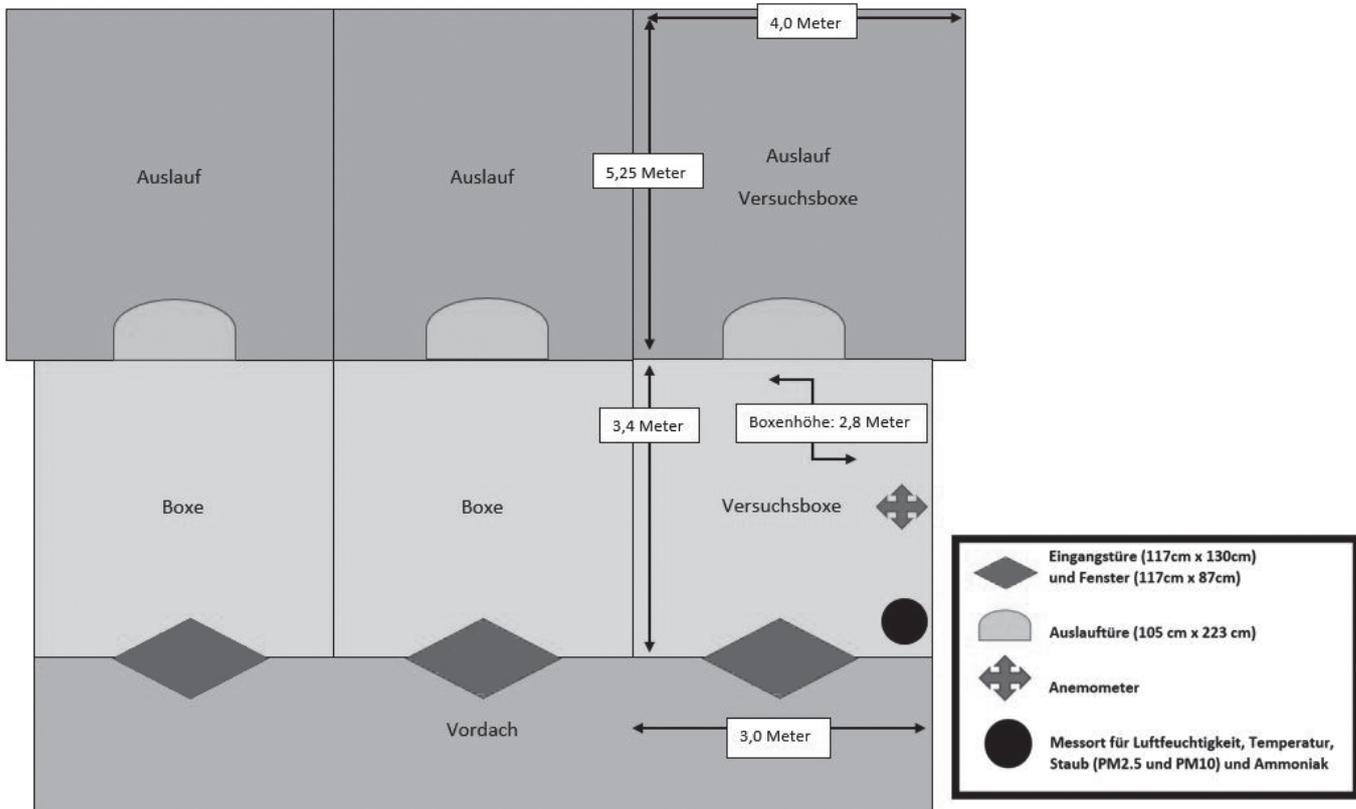


Abb. 1 Stallgrundriss und Anordnung der Messsensoren | Stable floor plan and arrangement of the measuring sensors

grob sinnlicher Prüfung wurden beide Strohsorten als qualitativ gut beurteilt. Das Gerstenstroh wirkte optisch glänzender und glatter als das Weizenstroh. Bei den Holzspänen handelte es sich um chemisch unbehandelte, grobe Holzspäne (Firma Landi, ANIPremium). Die Box wurde während des gesamten Versuchszeitraumes zweimal täglich gemistet, Stroh wurde einmal täglich, Holzspäne wurde nicht nachgestreut (Tab. 1).

Belüftungssituation A: Fenster geöffnet

Der Auslauf war geschlossen, das Fenster oberhalb der Eingangstüre geöffnet. Die Lüftungsfläche gegen Osten betrug 10 179 cm².

Belüftungssituation B: Türe geöffnet

Das Fenster bei der Eingangstüre war geschlossen und die Auslauftüre geöffnet. Das Pony hatte ständig Zugang zum Auslauf. Die Lüftungsfläche gegen Westen betrug 23 415 cm².

Belüftungssituation C: Fenster und Türe geöffnet

Das Fenster oberhalb der Eingangstüre und die gegenüberliegende Auslauftüre wurden geöffnet. Das Pony hatte ständig Zugang zum Auslauf. Die Lüftungsfläche in der Ost-West Achse betrug gesamt 33 594 cm².

Statistische Analyse

Die Staubentwicklung der drei Einstreumaterialien wurde bei verschiedenen Belüftungssituationen (A, B, C) miteinander verglichen. Neben den Belüftungssituationen sollten Einflussfaktoren wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit auf die Staubent-

wicklung berücksichtigt werden. Weiter wurden Datenperioden aus der Auswertung ausgeschlossen, in denen sich das Pony länger als 10 Minuten außerhalb der Box aufhielt, sowie die Zeit für die Entmistung und das Einstreuen von 30 Minuten.

Gearbeitet wurde mit dem folgenden Modell: Modell (Generalized least squares):

$$\text{Staubkonzentration}_{\log} = \text{Luftfeuchtigkeit}_{\text{Box}_z} + \text{Temperatur}_{\text{Box}_z} + \text{Windgeschwindigkeit}_{\log_z} + \text{Halbtag} + \text{Aktivität} + \text{Belüftungssituation} + \text{Rest}$$

Aufgrund der Modellvoraussetzungen wurden verschiedene Variablen wie folgt transformiert: z = z-Transformation, log = log-Transformation. Beobachtungen mit PM_{2,5} > 200 µg/m³ wurden nicht berücksichtigt, da die Messungenauigkeit des Sensors ab diesem Bereich zu hoch wird (LUBW 2017, Budde et al. 2018). Die Daten wurden pro halbe Stunde aggregiert. Da es sich bei den vorliegenden Daten um Zeitreihen handelt, wurde der Autokorrelation durch die Verwendung der Funktion gls (generalized least squares) Rechnung getragen. Von statistisch gesicherten Unterschieden (p < 0,05) sprach man in diesem Zusammenhang, wenn der Schätzwert der einen Faktorstufe nicht im Unsicherheitsintervall der anderen Faktorstufe lag. Gearbeitet wurde mit der Software R (R Core Team 2019) und den Paketen «car» (Fox und Weisberg 2019) und «nlme» (Pinheiro et al. 2019).

Resultate und Diskussion

Die Temperatur und relative Luftfeuchte variierten an der Boxaussenseite (62 cm und 136 cm) zwischen 12,4–33,7°C, Durchschnitt 20,3°C bzw. 35–100%, Durchschnitt 71,5%. In der Boxe (98 cm) betrug die Temperatur 14,9–36,3°C, Durchschnitt 22,8°C bzw. die relative Luftfeuchte 37–85%, Durchschnitt 60,6%. Nach schweizerischen Tierschutzempfehlungen soll die Stalltemperatur im Sommer im Stallinneren

Tab. 1		Versuchsanordnungen für die Belüftungssituationen und Einstreuvarianten		Test arrangements for the ventilation situations and bedding types	
Dauer	Verfahren	Lüftungsöffnung	Einstreu		
3 Tage	Eingewöhnung				
3 Tage	A, Fenster geöffnet	10 179 cm ²			
1 Tag	Wechsel Belüftungsart				
3 Tage	B, Türe/Auslauf geöffnet	23 415 cm ²	Gerstenstroh		
1 Tag	Wechsel Belüftungsart		Grundeinstreu 30 kg/10 ² m Box, 1 × tgl. Nachstreu 4–8 kg		
3 Tage	C, Fenster und Türe/Auslauf geöffnet	33 594 cm ²			
1 Tag	Wechsel Belüftungsart und Einstreu				
3 Tage	Eingewöhnung				
3 Tage	A, Fenster geöffnet	10 179 cm ²			
1 Tag	Wechsel Belüftungsart		Weizenstroh		
3 Tage	B, Türe/Auslauf geöffnet	23 415 cm ²	Grundeinstreu 30 kg/10 ² m Box, 1 × tgl. Nachstreu 4–8 kg		
1 Tag	Wechsel Belüftungsart				
3 Tage	C, Fenster und Türe/Auslauf geöffnet	33 594 cm ²			
1 Tag	Wechsel Belüftungsart und Einstreu		Holzspäne		
2 Tage	C, Fenster und Türe/Auslauf geöffnet	33 594 cm ²	Grundeinstreu 40 kg/10 ² m Box, keine Nachstreu		

nicht höher als 2 bzw. 3 Grad über dem Wert der Außentemperatur liegen (BLV 2018), was im Versuchsstall erfüllt war. Nach deutschen Empfehlungen für Pferdehaltungen werden für die Luftfeuchtigkeit Richtwerte zwischen 60–80% empfohlen, welche im vorliegenden Stall ebenfalls eingehalten wurden. Bei der Windgeschwindigkeit soll die Luftbewegung im Stall mindestens 0,2 m/s betragen (BMELV 2009, Grote et al. 2006). Die minimale und maximale Windgeschwindigkeit betrug im gesamten Versuchszeitraum 0 m/s bis 1,53 m/s und im Mittel 0,04 m/s. Von insgesamt 7153 aufgezeichneten Sequenzen lag die Windgeschwindigkeit bei 6944 Sequenzen unter 0,2 m/s. Damit schien die Luftbewegung im Versuchsstall unter den Anforderungen zu liegen, wobei das gewählte Anemometer bei geringen Windströmen tendenziell zu tiefe Werte angab, was vorgängig mit einem Handanemometer überprüft wurde.

Die Effekte Temperatur °C, relative Luftfeuchte %, Windgeschwindigkeit m/s und Aktivität des Ponys in der Box hatten einen signifikanten Einfluss ($p < 0,05$) auf die Staubentwicklung, was sich mit den Erkenntnissen anderer Autoren deckt (Nazarenko et al. 2018, Labie et al. 2019) und wurden in den Modellschätzwerten berücksichtigt.

Die Werte der Staubkonzentrationen der Partikelgrößen PM 2,5 und PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) wurden für die Versuchsanordnungen A, B und C für die Sensoren auf 53 cm bzw. 130 cm Höhe in Tabelle 2 und in den Abbildungen 2–5 dargestellt. Die Effektplots (Abb. 2–5) zeigen den Mehrwert des Modelles, indem Modellschätzwerte und gewöhnliche arithmetische Mittelwerte gegenübergestellt wurden. Mit dem Modell wurden Einflussfaktoren wie Temperatur, Luftfeuchte, Aktivität des Ponys etc. berücksichtigt. War das Pony beispielsweise auf den Holzspänen aktiver als auf dem Stroh, oder wenn es an einem Tag feuchter war, trug das Modell diesen Umständen Rechnung. Es wurde deutlich, dass die Modellschätzwerte der Staubkonzentration überwiegend tiefer als die arithmetischen Mittelwerte lagen (Tab. 2, Abb. 2–5).

Der Effekt unterschiedlicher Belüftungssituationen zeigte sich für die Partikelgröße PM 2,5 gemessen auf 53 cm Höhe am deutlichsten. Es bestanden signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) in den Modellschätzwerten der Staubkonzentration PM 2,5 bei geöffnetem Fenster (A) versus geöffneter Tür (B) für Weizenstroh ($A = 3,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $B = 5,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und für Gerstenstroh ($A = 2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $B = 5,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Tab. 2, Abb. 3). Bei geöffneter Türe und Fenster (C) betrug die Staubkonzentration PM 2,5 im Modellschätzwert für Weizenstroh $6,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, für Gerstenstroh $4,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und für Holzspäne $9,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Damit ergab sich gegenüber der Belüftungssituationen B bei den beiden Strohharten kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$) in der Staubentwicklung. Holzspäne verursachten bei geöffneter Türe und Fenster (C) auf 53 cm eine signifikant höhere Staubkonzentration PM 2,5 gegenüber den beiden Strohsorten ($p < 0,05$, Tab. 2, Abb. 2, Abb. 5). Der Tagesverlauf der Staubentwicklung PM 2,5 ist für die Einstreuvarianten Holzspäne und Gerstenstroh auf eine Messhöhe von 53 cm in Abbildung 6 illustriert.

Für die Partikelgröße PM 10 war der Unterschied bei gleicher Belüftungssituation (C) nur zwischen Holzspänen und Weizenstroh signifikant verschieden ($p < 0,05$, Abb. 4, Tab. 2). Vergleichbar

Tab. 2 Staubkonzentrationen PM 2,5 und PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) nach Belüftungssituation bei drei Einstreuvarianten (Messhöhe 53 und 130 cm) | Dust concentrations PM 2,5 and PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) according to ventilation situation with three bedding types (measuring height 53 and 130 cm)

Belüftungssituation	Einstreu	PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$; 53 cm)			PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$; 53 cm)			PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$; 130 cm)			PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$; 130 cm)		
		min	max	MW	MS	min	max	MW	MS	min	max	MW	MS
A = Fenster geöffnet	Weizenstroh	0,3	32,3	6,6	3,6 ^d	3,0	73,0	14,8	8,0 ^b	1,0	20,9	3,2	2,2 ^h
	Gerstenstroh	0,9	13,9	3,5	2,9 ^{cd}	1,4	151,4	27,5	11,0 ^{ab}	0,2	17,6	5,2	2,9 ^{cd}
B = Tür geöffnet	Weizenstroh	2,4	23,8	6,3	5,6 ^b	2,7	141,5	15,5	11,7 ^{bc}	0,9	14,8	3,5	3,5 ^{bc}
	Gerstenstroh	1,1	42,7	4,8	5,5 ^b	5,0	116,4	22,2	13,1 ^a	2,0	16,5	4,7	3,8 ^{bc}
C = Fenster und Tür geöffnet	Weizenstroh	2,3	25,0	7,2	6,0 ^{bc}	3,7	44,4	10,6	8,9 ^{bc}	1,5	9,9	3,4	3,1 ^{bc}
	Gerstenstroh	1,9	11,3	4,6	4,9 ^b	5,5	76,9	17,2	10,6 ^{ab}	1,7	17,7	4,9	3,9 ^b
	Holzspäne	7,2	39,8	12,9	9,6 ^a	10,3	69,1	22,4	13,0 ^a	5,5	22,2	9,8	6,9 ^a

PM 2,5: Partikelgröße < 2,5 μm ; PM 10: Partikelgröße < 10 μm ; min = minimal, max = maximal, MW = arithmetischer Mittelwert, MS = Modellschätzwert; a,b,c,d: unterschiedliche Exponenten kennzeichnen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) je Partikelgröße und Messhöhe bei den Belüftungssituationen A, B, C | PM 2,5: particle size < 2,5 μm ; min = minimal, max = maximal, MW = arithmetic mean value, MS = model estimate; a,b,c,d: different exponents indicate significant differences ($p < 0,05$) per particle size and measurement height in ventilation situations A, B, C

mit der Arbeit von Nazarenko et al. (2018) generierte die Stroh-
 einstreue gegenüber Holzspänen in vorliegender Arbeit eine ge-
 ringere Konzentration luftgetragener Partikel. In der Studie von

Labie et al. (2019) lag die Konzentration der Partikelgröße PM 10
 bei den getesteten Strohsorten etwas höher als bei Holzspänen,
 die Konzentrationen der Partikelgröße PM 2,5 waren bei Stroh

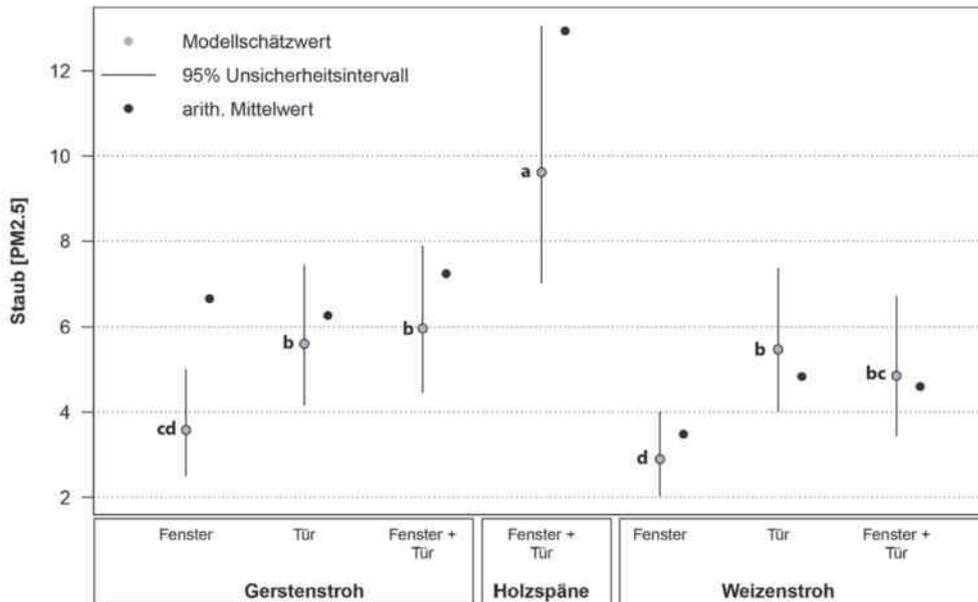


Abb. 2 Effektplot zu den Staubkonzentrationen PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) bei den Belüftungssituationen A, B, C und verschiedenen Einstreuqualitäten auf 53 cm Messhöhe | *Effect plot for the dust concentrations PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in the aeration situations A, B, C and various bedding qualities at a measuring height of 53 cm*

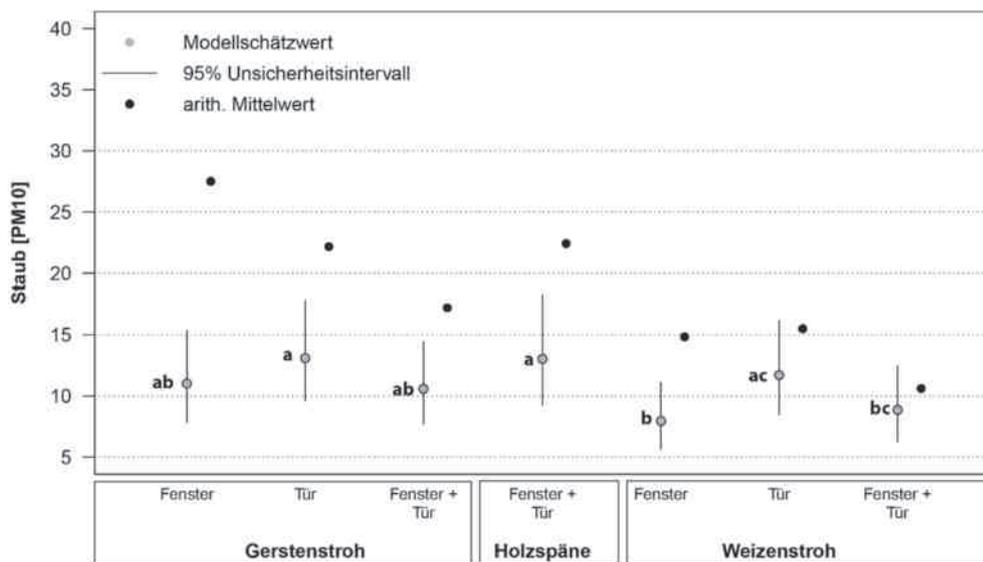


Abb. 3 Effektplot zu den Staubkonzentrationen PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) bei den Belüftungssituationen A, B, C und verschiedenen Einstreuqualitäten auf 53 cm Messhöhe | *Effect plot for the dust concentrations PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in the aeration situations A, B, C and various bedding qualities at a measuring height of 53 cm*

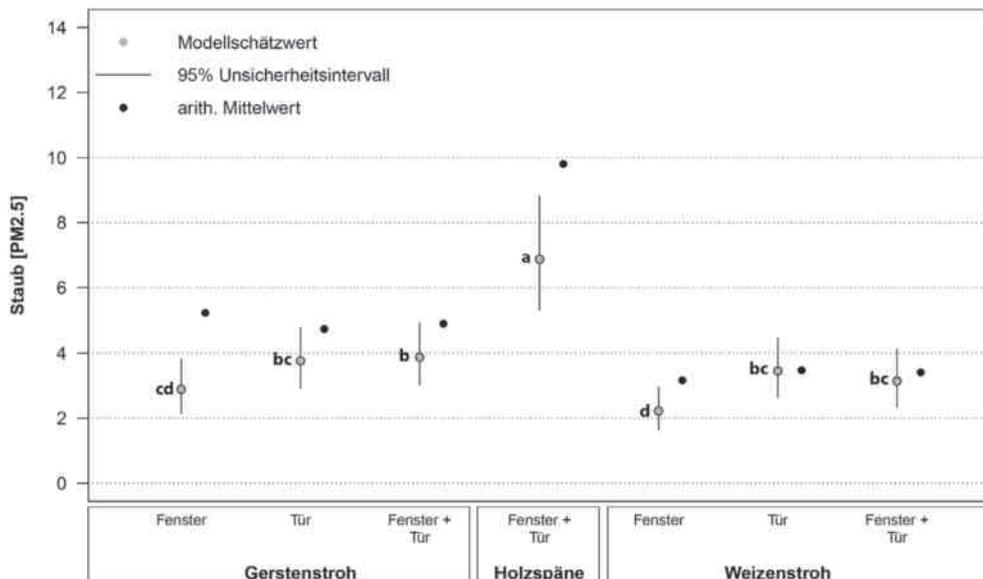


Abb. 4 Effektplot zu den Staubkonzentrationen PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) bei den Belüftungssituationen A, B, C und verschiedenen Einstreuqualitäten auf 130 cm Messhöhe | *Effect plot for the dust concentrations PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in the aeration situations A, B, C and various bedding qualities at a measuring height of 130 cm*

und Holzspänen vergleichbar (Tab. 3). In der Studie von Fleming et al. (2008) generierten Holzspäne geringere Konzentrationen lufttragener Partikel als Langstroh. Die unterschiedlichen Befunde verschiedener Autoren lassen sich möglicherweise auf die Einstreuqualität, das Management, die Belüftungssituation und letztlich auch auf die Messmethode zurückführen. Bei beiden Strohsorten wurden auf 130 cm Höhe signifikant höhere Konzentrationen der Partikelgröße PM 2,5 zwischen den Belüftungssituationen A und C festgestellt ($p < 0,05$). Nur bei der Einstreu Weizenstroh war die Staubkonzentration PM 2,5 auch signifikant verschieden ($p < 0,05$), wenn nur das Fenster (A) oder nur die Türe (B) geöffnet wurden. Bei der Belüftungssituation Fenster und Türe geöffnet (C) wurde wiederum bei der Einstreu Holzspäne eine signifikant ($p < 0,05$) höhere Staubkonzentration der Partikelgröße PM 2,5 gemessen, als bei Weizen- oder Gerstenstroh (Abb. 4, Tab. 2).

Bei der Partikelgröße PM10 und der Belüftungssituation C waren die Unterschiede auf einer Messhöhe von 130 cm

einzig zwischen den Einstreuvarianten Holzspäne und Weizenstroh signifikant verschieden ($p < 0,05$) und bei der Einstreu Gerstenstroh zwischen den Belüftungssituationen B und C ($p < 0,05$, Abb. 5).

Die Minimal-, Maximal- und Durchschnittswerte der Staubkonzentration lagen sowohl bei der Partikelgröße PM 2,5 als auch bei PM 10 beim Sensor auf 130 cm tiefer als beim Sensor auf 53 cm Höhe (Tab. 3). Möglicherweise wurden zum einen besonders die kleinen Partikel bei der Öffnung der Türe bzw. Türe und Fenster (Belüftungssituationen B und C) durch den Luftstrom in Bodennähe stärker aufgewirbelt und zum anderen setzten sich die größeren Partikel eher Richtung Boden ab (Szabo 2008). Walinder et al. (2011) fanden in einer Messhöhe von 100–150 cm bei unterschiedlichen Belüftungssituationen ebenfalls nur geringfügige Veränderungen der einatembaren Staubkonzentration. Demgegenüber nahmen mit erhöhter Ventilation die Konzentrationen an Kohlendioxid, Ammoniak und lufttragener Allergene ab (Walinder et al.

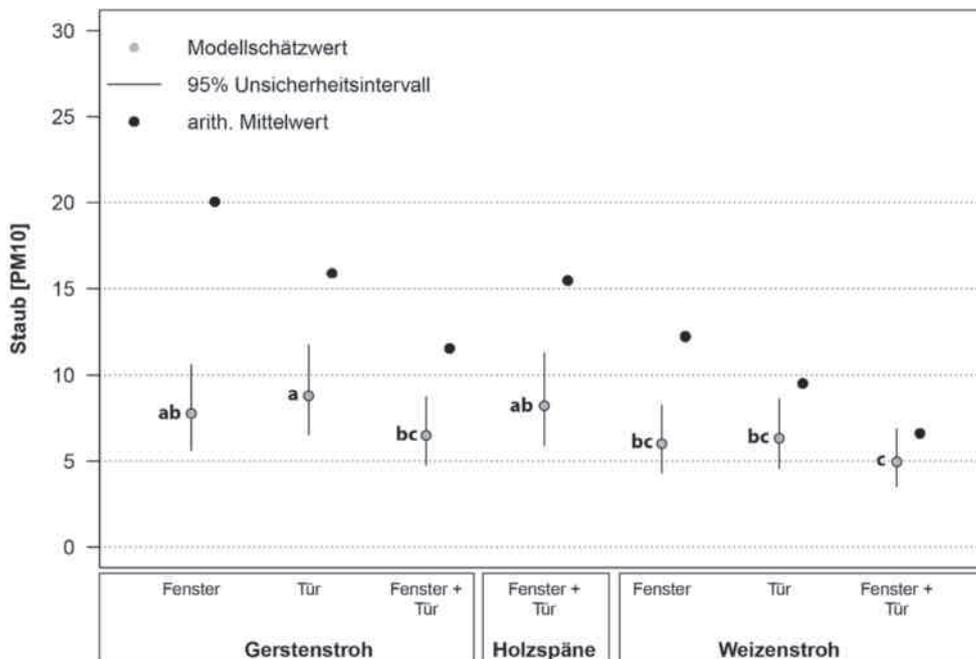


Abb. 5 Effektplot zu den Staubkonzentrationen PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) bei den Belüftungssituationen A, B, C und verschiedenen Einstreuqualitäten auf 130 cm Messhöhe | Effect plot for the dust concentrations PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in the aeration situations A, B, C and various bedding qualities at a measuring height of 130 cm

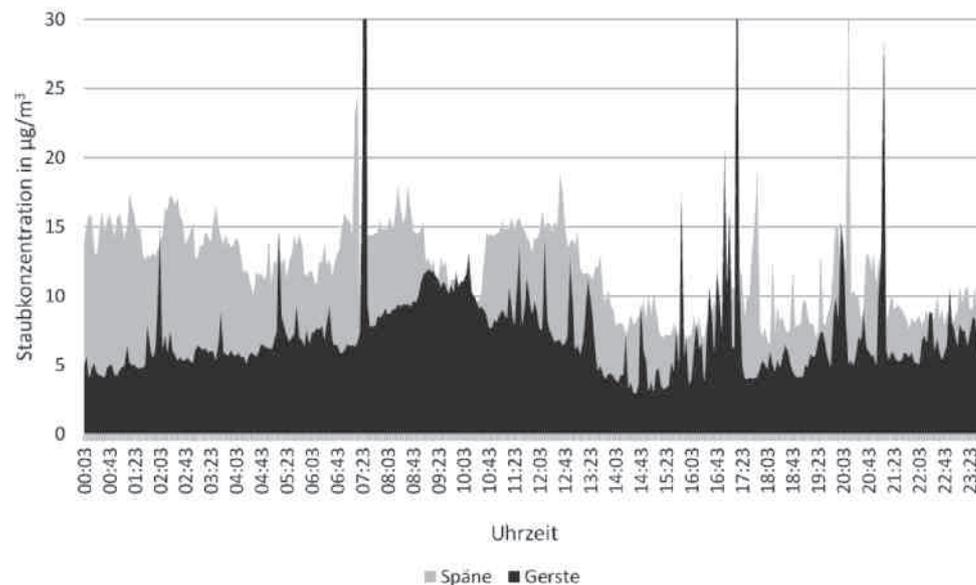


Abb. 6 Staubpartikelkonzentrationen PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) von Holzspänen und Gerstenstroh bei der Belüftungssituation C (Türe und Fenster geöffnet) auf einer Messhöhe von 53 cm im Tagesverlauf | Dust particle concentrations PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of wood chips and barley straw during ventilation situation C (door and window open) at a measuring height of 53 cm during the day

2011). In der vorliegenden Studie wurden mit dem einfachen Sensor keine validierten, absoluten Ammoniakwerte erhoben, allerdings zeigte sich bei den vergleichenden Messungen ebenfalls bei allen drei Einstreuvarianten der Effekt abnehmender Ammoniakkonzentrationen (ppm) mit zunehmender Lüftungsöffnung (Durchschnitt für alle Einstreuvarianten 5,2 ppm bei Belüftungssituation A, 3,8 ppm bei Belüftungssituation B, 3,6 ppm Belüftungssituation C).

Ungeachtet der gefundenen Unterschiede in den Staubkonzentrationen bei den Einstreuqualitäten und Belüftungssituationen lässt sich sagen, dass in der vorliegenden Studie die PM 2,5 und PM 10 Werte ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) generell sehr tief lagen (Tab. 2). Von der Weltgesundheitsorganisation WHO werden für den Menschen im Tagesdurchschnitt maximale Staubexpositionen mit der Grösse PM 2,5 von $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ und PM 10 von $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ empfohlen. In der Schweiz existieren keine gesetzlichen Bestimmungen zu Maximalkonzentrationen von Staub in Pferdehaltungen (BLV, 2018). In Tabelle 3 werden die Ergebnisse der vorliegenden Studie mit denjenigen der Autoren Labie et al. (2019) und Nazarenko et al. (2018) verglichen. Zu beachten ist allerdings, dass es sich um unterschiedliche Ställe mit unterschiedlichem Pferdebesatz, Management, Belüftung usw., wie auch verschiedenen Holz- und Strohqualitäten handelte. In der Studie von Labie et al. (2019) wurde ebenfalls mit dem Sensor SDS011 und dem MUTUU System gearbeitet, jedoch wurde die Aktivität der Pferde in der Box bzw. Arbeitsphasen im Stall bei der Darstellung der Staubkonzentrationen nicht berücksichtigt. Dennoch ist ein tendenzieller Vergleich gestattet. Labie et al. 2019 schlugen ein Ampelsystem für PM 2,5 und PM 10 vor, wobei PM 2,5 idealerweise unter $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM 10 unter $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ liegen sollte (grün). Dieses System ist für Pferde strenger als die Empfehlungen der WHO. Auch diese Empfehlung wurde für alle im vorliegenden Versuch getesteten Einstreuarten und Belüftungssituationen er-

füllt. Die Validität des in der vorliegenden Studie verwendeten Staubsensors SDS011 wurde überprüft. Erst bei PM 2,5 Konzentrationen über $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ konnte eine erhöhte Messgenauigkeit dieses Sensortyps aufgezeigt werden (LUWB, 2017). Obwohl das Modell SDS011 nicht explizit für die Anwendung in Pferdeställen konzipiert wurde, haben die Staubsensoren über den gesamten Versuchszeitraum einwandfrei funktioniert und auch die kontinuierliche, digitale Datenaufzeichnung erfolgte problemlos.

Schlussfolgerungen

Anhand von verschiedenen Belüftungs- und Einstreusituationen wurde ein digitales Staubmonitoring-System getestet. Die kontinuierlich aufgezeichneten Daten waren sowohl auf dem Computer als auch auf dem Handy erreichbar und erlauben eine kontinuierliche Beurteilung der Staubbelastung. In vorliegender Fallstudie sind die Unterschiede in den Belüftungssituationen vor allem für Staubkonzentrationen der Partikelgröße PM 2,5 in Bodennähe (53 cm) deutlich. Obwohl mit Holzspänen als Einstreumaterial die Partikelkonzentrationen PM 2,5 und PM 10 bei gleicher Belüftungssituation signifikant höher ist als mit Gersten- und Weizenstroh, wurde generell eine sehr tiefe Staubbelastung im untersuchten Stall aufgezeichnet. Die Beurteilung des Stallklimas ist komplex und wird durch zahlreiche Faktoren beeinflusst. Digitale Monitoringsysteme können Klimawerte in Ställen sichtbar und bewertbar machen und zusammen mit geeigneter Einstreu, staubarmer Fütterung und richtigem Management wesentlich zum Tier- und Menschenwohl beitragen.

Literatur

- BLV (Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen) (2018) Tierschutz-Kontrollhandbuch. Technische Weisungen über den baulichen und qualitativen Tierschutz Pferde und andere Equiden vom 1. Oktober 2018. <https://www.blv.admin.ch/blv/de/home/tiere/tierschutz/nutztierhaltung/pferde-ref.html>
- Budde M., Schwarz A. D., Müller T., Laquai B., Streibl N., Schindler G., Köpke M., Riedel T., Dittler A., Beigl M. (2018) Potenzial und Grenzen des kostengünstigen SDS011 Partikelsensors bei der Überwachung urbaner Luftqualität. Karlsruher Institut für Technologie, http://www.teco.edu/~budde/publications/GUS2019_budde.pdf
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019) Leitlinien zur Beurteilung von Pferdehaltungen unter Tierschutzgesichtspunkten. <https://www.bmel.de/DE/themen/tiere/tierschutz/tierschutz-pferdehaltung.html>
- Eubel J. (2004) Orientierende Untersuchungen zum Einfluss von Haltung, Hygiene und Luftqualität auf die Atemwegsgesundheit von Fohlen in vier deutschen Zuchtbetrieben. Tierärztliche Hochschule Hannover. https://elib.tiho-hannover.de/servlets/MCRFileNodeServlet/etd_derivate_00002466/Eubelj_ss04.pdf
- Fleming K., Hessel E. F., van den Weghe H. F. A. (2008) Generation of Airborne Particles from Different Bedding Materials Used for Horse Keeping. J. Equine Vet. Sci. 28, 408–418; DOI 10.1016/j.jevs.2008.05.004
- 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 regimen. J. Anim. Sci. 87, 3805–3816; DOI 10.2527/jas.2008-1569
- Fox J., Weisberg S. (2019) An {R} Companion to Applied Regression, Third Edition. Thousand Oaks CA Sage. URL:<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>

Tab. 3 Autorenangaben der Feinstaubkonzentrationen PM 2,5 und PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in Pferdeställen mit verschiedenen Einstreumaterialien | Authors information on fine dust concentrations PM 2.5 and PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) in stables with different bedding materials

Einstreumaterial	AutorInnen	Mittlere PM 2,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mittlere PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Langstroh	Nazarenko et al., 2018*	8,6	95,3
Weizenstroh	Labie et al. 2019**	8,8	87,7
Weizenstroh	vorliegende Studie***	3,8	11,5
Gerstenstroh	vorliegende Studie***	5,8	19,1
Rapsstroh	Labie et al., 2019*	6,8	52,4
Holzspäne	Nazarenko et al., 2018*	9,5	160,0
Holzspäne	Labie et al., 2019**	7,8	41,7
Holzspäne	vorliegende Studie***	11,4	19,0
Holzpellet	Nazarenko et al., 2018*	10,5	204,8
Strohpellet	Nazarenko et al., 2018*	9,5	125,0

*Staubsensor Grimm 1,108 optical particle counter, Messhöhe 180 cm; **Staubsensor SDS011 analog vorliegender Studie; *** angegeben werden die Mittelwerte aus den Belüftungssituationen A, B, C und den Messhöhen 53 und 130 cm | *dust sensor Grimm 1.108 optical particle counter, measuring height 180cm; **dust sensor SDS011 analogous to the present study; *** the mean values from the ventilation situations A, B, C and the measuring heights 53 and 130 cm are given

- Gerber V., Robinson N. E., Luethi S., Marti E., Wampfler B., Straub R. (2003) Airway inflammation and mucus in two age groups of asymptomatic well-performing sport horses. *Equine Vet. J.* 35, 491–495; DOI 10.2746/042516403775600424
- Grote D., Güttler J., Jager K.-H., Könnike K., Kuhfahl B., Maiworm K., Noak U., Wegert J., Wimmer C. (2006) Stallklimaprüfung in der landwirtschaftlichen Tierhaltung. Empfehlungen der Länderarbeitsgruppe Stallklima. https://www.laves.niedersachsen.de/download/96058/Stallklimaueberpruefung_in_landwirtschaftlichen_Tierhaltungen.pdf.
- Knubben J. M., Gygas L., Auer J., Fürst A., Stauffacher M. (2008) Häufigkeiten von Erkrankungen und Verletzungen in der Schweizer Pferdepopulation. *Schweiz. Arch. Tierhik.* 150, 399–408; DOI 10.1024/0036-7281.150.8.399
- Kwiatkowska-Stenzel A., Witkowska D., Sowińska J., Stopyra A. (2017) The effect of stable bedding materials on dust levels, microbial air contamination and equine respiratory health. *Res. Vet. Sci.* 115, 523–529; DOI 10.1016/j.rvsc.2017.09.022
- Labie C., Kägi F., Küng P., Herholz C. (2019) Mesure digitale de la poussière dans les écuries pour chevaux: effet de la litière et du management. *Agroscope Sci.* 84, 26–27
- LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) (2017) Messungen mit dem Feinstaubsensor SDS011. Ein Vergleich mit einem eignungsgeprüften Feinstaubanalysator, Baden-Württemberg. http://www4.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/268831/messungen_mit_dem_feinstaubsensor_sds011.pdf?command=downloadContent&file-name=messungen_mit_dem_feinstaubsensor_sds011.pdf
- Millerick-May M. L., Karmaus W., Derksen F. J., Berthold B., Holcombe S. J., Robinson N. E. (2013) Local airborne particulate concentration is associated with visible tracheal mucus in Thoroughbred racehorses. *Equine Vet. J.* 45, 85–90; DOI 10.1111/j.2042-3306.2012.00568.x
- Nazarenko Y., Westendorf M. L., Williams C. A., Mainelis G. (2018) The effects of bedding type in stalls and activity of horses on stall air quality. *J. Equine Vet. Sci.* 67, 91–98; DOI 10.1016/j.jevs.2018.03.014
- Pinheiro J., Bates D., Debroy S., Sarkar D., R Core Team (2019) nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3.1–147, 184–186; <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Pirie R. S., Collie D. D., Dixon P. M., McGorum B. C. (2003) Inhaled endotoxin and organic dust particulates have synergistic proinflammatory effects in equine heaves (organic dust-induced asthma). *Clin. Exp. Allergy* 33, 676–83; DOI 10.1046/j.1365-2222.2003.01640.x
- R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Saastamoinen M., Särkijärvi S., Hyyppä S. (2015) Reducing Respiratory Health Risks to Horses and Workers. A Comparison of Two Stall Bedding Materials. *Animals* 5, 965–977; DOI 10.3390/ani5040394
- Seedorf J., Hartung J. (2002) Stäube und Mikroorganismen in der Tierhaltung. *KTBL -Schrift* 398. Hrsg. KTBL, Darmstadt
- Siegel J., Augsburger C., Hofer V., Zollinger A., Bachmann I. (2018) Wie ist es, ein Pferd zu sein in der Schweiz? *Agroscope Science* 60, 24–25; <https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=46792&Load=true>
- Szabo E. (2008) Experimentelle Untersuchungen luftgetragener Partikel und Schimmelpilze in Pferdeställen. Cuvillier Verlag, Göttingen
- TVD (2020) Registrierten Equiden per 31.1.2020, www.agate.ch/portal/web/agate/die-tierverkehrsdatenbank-tvd, Tierverkehrsdatenbank, Identitas AG
- Vandenput S., Istasse L., Nicks B., Lekeux P. (1997) Airborne dust and aeroallergen concentration in different sources of feed and bedding for horses. *Vet. Quart.* 19, 154–158; DOI 10.1080/01652176.1997.9694762
- Wälinder R., Riihimäki M., Bohlin S., Hogstedt C., Nordquist T., Raine A., Pringle J., Elfman L. (2010) Installation of mechanical ventilation in a horse stable: effects on air quality and human and equine airways. *Environ Health Prev. Med.* 16, 264–272; DOI 10.1007/s12199-010-0195-5
- Wathes C. M., Jones C. D., Webster A. J. (1983) Ventilation, air hygiene and animal health. *Vet. Rec* 113, 554–559
- Webster A. J. F., Clarke A. F., Madelin M., Wathes C. M. (1987) Air hygiene in stables 1: Effects of stable design, ventilation and management on the concentration of respirable dust. *Equine Vet. J.* 19, 448–453; DOI 10.1111/j.2042-3306.1987.tb02641.x
- Woods P. S. A., 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 Vet. J.* 25, 208–213; DOI 10.1111/j.2042-3306.1993.tb02945.x