

## Serie Tieremissionen

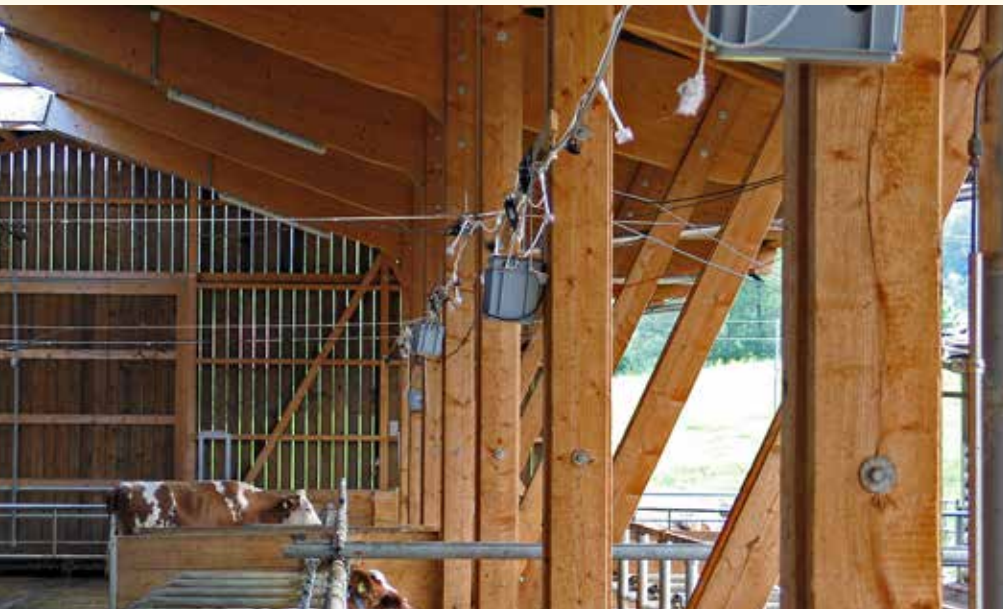
# Feinstaub(PM10)-Emissionen bei Milchvieh im Liegeboxenlaufstall mit Laufhof

Sabine Schrade<sup>1</sup>, Kerstin Zeyer<sup>2</sup>, Lukas Emmenegger<sup>2</sup> und Margret Keck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Agroscope, 8056 Ettenhausen, Schweiz

<sup>2</sup>Empa, 8600 Dübendorf, Schweiz

Auskünfte: Sabine Schrade, E-Mail: sabine.schrade@agroscope.admin.ch



Erstmalig wurden in frei gelüfteten Milchviehställen mit Laufhof PM10-Emissionen gemessen.  
(Foto: Sabine Schrade, Agroscope)

## Einleitung

Nach Schätzungen des Bundesamts für Umwelt BAFU betragen im Jahr 2010 die gesamten Emissionen von Feinstaub der Partikelgrössenfraktion PM10 der Schweiz 20000t (BAFU 2013). Der Land- und Forstwirtschaft sind nach diesen Berechnungen 27 % der PM10-Emissionen zuzuschreiben, wovon wiederum rund 34 % aus der Milchviehhaltung stammten. Die Milchviehhaltung macht dabei mit über 40 % der Grossvieheinheiten bezogen auf das Jahr 2010 den grössten Anteil am gesamten Nutztierbestand der Schweiz aus (Schweizer Bauernverband 2011).

PM10-Emissionsdaten für die Milchviehhaltung von Takai *et al.* (1998) weisen eine grosse Spannweite von 0,12

bis 4,05 g pro Grossvieheinheit (GV) und Tag (d) auf. Diese Daten wurden lediglich von PM2.5- und PM100-Messungen in Laufställen für Milchvieh in den Niederlanden, Grossbritannien, Deutschland und Dänemark abgeleitet. Diese Datengrundlage bildet bisher in mehreren Inventaren die Basis für PM10-Emissionsfaktoren zur Rindviehhaltung (z.B. Döhler *et al.* 2002; European Environment Agency 2013; Haenel *et al.* 2014).

Emissionsdaten für PM10 sind für die in der Schweiz verbreiteten Milchvieh-Laufställe mit Liegeboxen und Laufhof und somit entsprechend grösseren Aktivitätsflächen bisher nicht vorhanden. Die Ziele dieser Untersuchung waren, die PM10-Emissionen für die in der Schweiz häu-

figste Laufstall-Situation für Milchvieh mit freier Lüftung, Liegeboxen und Laufhof zu bestimmen und einen PM10-Emissionsfaktor abzuleiten, um damit einen Beitrag für belastbare Emissionsinventare zu leisten.

## Material und Methoden

Die Messungen erfolgten auf sechs Betrieben in je zwei von drei Jahreszeiten (Sommer, Übergangszeit, Winter). Dabei handelte es sich um freigelüftete Eingebäudelaufställe mit Liegeboxen, ohne Wärmedämmung, mit planbefestigten Laufflächen und längs zum Stallgebäude angeordnetem Laufhof. Auf drei Betrieben war der Laufhof räumlich vom Stallgebäude getrennt und auf drei Betrieben als kombinierter Liegegang/Laufhof erstellt. Die Liegeboxen bestanden aus Tiefboxen mit Langstroh, Häckselstroh oder einer Kombination von Stroh und Sägemehl. Die Bestandsgrößen variierten zwischen 20 und 74 Tieren. Die mittlere Milchleistung betrug während der Messperioden zwischen 19 und 31 kg pro Kuh und Tag. Bei den Betrieben 1, 2 und 3 bestand die Fütterung hauptsächlich aus Silagen, Heu und Kraftfutter. Betrieb 4 war silofrei. Die Betriebe 5 und 6 verfütterten jeweils eine Total-Misch-Ration. Die Betriebe sind in Schrade *et al.* (2012) detailliert beschrieben.

Feinstaub der Partikelgrößenfraktion PM10 wurde gravimetrisch mit Impaktoren (Partikelabscheidern, Marke: *Personal Environmental Monitor for PM10*, MSP Corp., Shoreview, USA) ermittelt. Dabei wurde die PM10-Masse auf einem vorkonditionierten Filter angereichert (Whatman Membranfilter, teflonbeschichtet, Dicke 5,0 µm, Durchmesser 37 mm, GE Healthcare, Chicago, USA) und diese im Labor gravimetrisch bestimmt. Um ausreichend Staubmasse zu akkumulieren, wurden die Filter während 72 h belegt. Für eine repräsentative Beprobung des Stallbereichs und Laufhofs wurden in jeder Messachse drei bis fünf Impaktoren in etwa 3 m Höhe gleichmässig verteilt und zeitgleich betrieben (Abb. 1). Je nach Stall ergaben sich so 9–14 Messpunkte. Zur Ermittlung der Hintergrundkonzentration dienten zwei Impaktoren an einem vom Stall unbeeinflussten Standort.

Um die Emissionen bei freier Lüftung zu bestimmen, wurde eine Tracer-Ratio-Methode mit den beiden Tracergasen Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) und Trifluormethylschwefelpentafluorid (SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>) verwendet (Schrade *et al.* 2012). Grundlage für die Berechnung der PM10-Emissionen waren die jeweils über einen Messzeitraum von drei Tagen erfassten PM10-Konzentrationen. Aus den PM10-Konzentrationen der einzelnen Messorte im Tierbereich (Stallbereich und Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof) wurde der Median gebildet. Die Emissionsberechnung erfolgte über eine summarische Bestimmung der über drei Tage gemittelten Tracergas-Konzentrationen und -Massenströme.

## Zusammenfassung

Zur Verbesserung der Datengrundlage für Emissionsinventare wurden Feinstaub(PM10)-Emissionen in einem Laufstallhaltungssystem bestimmt, das in der Schweiz am weitesten verbreitet ist. Dazu wurden in sechs freigelüfteten Liegeboxenställen für Milchvieh mit planbefestigten Laufflächen und Laufhof jeweils in zwei von drei Jahreszeiten (Sommer, Übergangszeit, Winter) Emissionsmessungen durchgeführt. Die Beprobung von PM10 erfolgte über 72 Stunden anreichernd mit Impaktoren (Partikelabscheidern) an insgesamt 9 bis 14 Positionen in Stall und Laufhof sowie an einer Hintergrund-Position. Zur Bestimmung der Emissionen wurde eine Tracer-Ratio-Methode mit zwei Tracergasen (SF<sub>6</sub>, SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>) verwendet. Die PM10-Konzentrationen im Tierbereich lagen meist knapp über beziehungsweise im Bereich der Hintergrundkonzentration. Über alle Betriebe hinweg variierten die PM10-Emissionen zwischen 0,02 und 2,1 g pro Grossvieheinheit und Tag. Der abgeleitete PM10-Emissionsfaktor liegt mit 0,64 g pro Kuh und Tag deutlich tiefer als die Emissionsfaktoren, die bisher in den Inventaren verwendet werden.

nung erfolgte über eine summarische Bestimmung der über drei Tage gemittelten Tracergas-Konzentrationen und -Massenströme.

Zur Charakterisierung der jeweiligen Messsituation, zur Plausibilisierung der Messdaten, als Bezugsgrößen und zur Ableitung von wichtigen Einflussgrößen auf die Emissionen wurden zusätzlich zu den beschreibenden Betriebsdaten auch Klimadaten (z. B. Lufttemperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit, relative Luftfeuchtigkeit, Luftdruck) im Stall, im Laufhof und im Hintergrund erfasst (Schrade *et al.* 2012).

Die statistische Analyse erfolgte auf der Ebene der dreitägigen Messzeiträume. Dazu wurden für die zeitlich hoch aufgelösten Klimadaten Mittelwerte über den jeweiligen Messzeitraum gebildet. Zunächst wurde mit einer Varianzanalyse untersucht, wie sich die PM10-Konzentrationen der einzelnen Messorte im Tierbereich (Stallbereich und Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof) von den Hintergrundwerten unterscheiden. Dabei ist ein hierarchisch geschachtelter Effekt von Mehrfachmessungen  $b_{ijkl}$  im Messzeitraum  $b_{ijk}$  in der Messperiode  $b_{ij}$

im Betrieb  $b_i$  berücksichtigt. Dabei ging der Bereich  $\beta_1 B$  (Tierbereich versus Hintergrund) als fixer Effekt ein. Die Zielvariable PM10-Konzentration  $\varepsilon_{ijklm}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) wurde logarithmiert. Ausserdem erfolgte eine Korrektur der Varianzhomogenität:

$$c_{ijklm} = \mu + b_i + b_{ij} + b_{ijk} + b_{ijkl} + \beta_1 B + \varepsilon_{ijklm} \quad (1)$$

Weiter wurde mit einem linearen Gemischte-Effekte-Modell, welches den Betrieb als zufälligen Effekt berücksichtigt, der Einfluss der Jahreszeit  $\beta_1 JZ$ , der Ausstemperatur  $\beta_2 AT$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) und der relativen Luftfeuchtigkeit  $\beta_3 RF$  (%) auf die PM10-Emission  $E_{ij}$  (g pro GV und d) überprüft:

$$E_{ij} + \mu + b_i + \beta_1 JZ + \beta_2 AT + \beta_3 RF + \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

Die Zielvariable  $E_{ij}$  wurde logarithmisch transformiert. Zur Überprüfung der Modellannahmen diente eine graphische Residuenanalyse. Das Signifikanzniveau wurde bei 5% festgelegt.



**Abb. 1** | Die Messung von PM10 mit mehreren Impaktoren, die in den weiträumigen Laufställen verteilt wurden, ermöglichte zeitgleich eine räumlich hoch aufgelöste Probenahme. (Foto: Sabine Schrade, Agroscope)

## Resultate und Diskussion

### Klimaparameter

Der Temperaturbereich über alle Messperioden erstreckte sich zwischen  $-8$  und  $37^{\circ}\text{C}$ . Über alle Betriebe variierte der Mittelwert der Lufttemperatur im Hintergrund in den Messperioden im Sommer von  $14$ – $19^{\circ}\text{C}$ , in der Übergangszeit von  $8$ – $15^{\circ}\text{C}$  und im Winter von  $1$ – $5^{\circ}\text{C}$ . Zwischen den einzelnen Messorten Hintergrund, Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof und Stallbereich gab es nur geringe Temperaturunterschiede: Im Winter war die mittlere Lufttemperatur im Stallbereich teils bis zu  $2\text{ K}$  über dem Hintergrund, im Sommer waren diese nahezu gleich. Die mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Stall im dreitägigen Messzeitraum erstreckte sich von  $57$ – $94\%$ . In zehn der 17 dreitägigen Messzeiträume lag die mittlere relative Luftfeuchtigkeit im Stall bei  $80\%$  oder darüber. Dabei waren die Unterschiede zwischen den einzelnen Bereichen Hintergrund, Laufhof respektive Liegegang/Laufhof und Stallbereich sehr gering.

### PM10-Konzentrationen

Abbildung 2 zeigt die PM10-Konzentrationen von insgesamt 17 dreitägigen Messzeiträumen in zwölf Messperioden getrennt nach den einzelnen Bereichen (Stallbereich, Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof, Hintergrund). Die PM10-Konzentrationen über alle Messungen, Bereiche und Probenahmeorte variierten zwischen  $<10\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Nachweisgrenze) und  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$  im Hintergrund bis  $69\mu\text{g}/\text{m}^3$  im Tierbereich (Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof und Stallbereich). Bei der Sommermessung von Betrieb 5 war die Hintergrundkonzentration deutlich höher als die Werte im Tierbereich. Ursache dafür könnte die Getreideernte auf Ackerflächen in der Umgebung oder ein verstärktes Staubaufkommen von einem zirka  $20\text{ m}$  entfernten geschotterten Wirtschaftsweg sein. Deshalb wurde für diese Messperiode als Hintergrundwert ein über diesen Zeitraum gemittelter Wert aus Immissionsmessungen eines unbeeinflussten Standorts Winterthur Obertor (Ostluft 2008) herangezogen. Bei Betrieb 6 erfolgte in der Übergangszeit nach einem gewitterbedingten Stromausfall nur eine 24-stündige Messung. Die grosse Streuung dieser Werte kann auf die kurze Expositionszeit der Filter und die daraus resultierende Messunsicherheit zurückgeführt werden.

In der Mehrzahl der Messperioden waren die PM10-Konzentrationen im Stallbereich leicht höher als im Laufhof respektive Liegegang/Laufhof. Eine Varianzanalyse zeigte, dass sich über alle Messperioden hinweg die Konzentration des Hintergrunds signifikant von der Konzentration des Tierbereichs (Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof

und Stallbereich) unterschied ( $F_{1,17} = 14,62$ ;  $p = 0,001$ ). Dabei lag der Mittelwert der Hintergrundkonzentration bei  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und die PM10-Konzentration im Tierbereich bei  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In einem ähnlichen Bereich mit  $11\text{--}41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  erstreckten sich die PM10-Konzentrationen eines Liegeboxenlaufstalls in den Niederlanden (Mosquera *et al.* 2012). Bei Untersuchungen von Henseler-Passmann (2010) lagen die PM10-Konzentrationen in beiden Liegeboxenlaufställen mit  $4\text{--}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  unter den eigenen Werten, dagegen waren die Konzentrationen eines Tiefstreustalls mit  $170\text{--}206 \mu\text{g}/\text{m}^3$  um ein Vielfaches höher.

### PM10-Emissionen

Die PM10-Emissionen lagen über alle Betriebe und Jahreszeiten hinweg zwischen  $0,02$  und  $2,1 \text{g}$  pro GV und d (Abb. 3). Innerhalb der Betriebe sind Unterschiede in der Emissionshöhe zwischen den Jahreszeiten, Messperioden und dreitägigen Messzeiträumen erkennbar. Der Jahreszeiteffekt ist jedoch nicht systematisch. Bei Betrieb 5 waren beispielsweise die Emissionen im Sommer mit  $1,27 \text{g}$  pro GV und d deutlich höher als im Winter mit  $0,07 \text{g}$  pro GV und d. Dagegen lagen bei Betrieb 4 der

Emissionswert des einen Wintermesszeitraums ( $1,42 \text{g}$  pro GV und d) deutlich über denen der Übergangszeit ( $0,32 \text{g}$  pro GV und d;  $0,52 \text{g}$  pro GV und d). Bei den Betrieben 1 und 3 waren jahreszeitliche Unterschiede der PM10-Emissionen schwächer ausgeprägt beziehungsweise zu vernachlässigen. Der hohe Wert in der Übergangszeit von Betrieb 6 ist möglicherweise auf die grosse Streuung der Konzentrationen zurückzuführen, bedingt durch die kürzere 24-Stunden-Messung aufgrund des durch ein Gewitter ausgelösten Stromausfalls. Dieses uneinheitliche Bild spiegelt auch die statistische Analyse der Einflussgrössen wider. Nach einem linearen Gemischte-Effekte-Modell, das den Betrieb als zufälligen Effekt berücksichtigt, deutete keine der untersuchten Einflussgrössen (Jahreszeit, Aussentemperatur, relative Luftfeuchtigkeit im Stall) auf einen signifikanten Einfluss auf die PM10-Emission hin.

Über die Betriebe, Jahreszeiten und dreitägige Messzeiträume hinweg wiesen die PM10-Emissionen eine grosse Streuung auf. Mit  $0,03\text{--}2,8 \text{g}$  pro Tier und d lagen die Werte in einem ähnlichen Bereich oder waren etwas höher als Literaturwerte von Liegeboxen-Laufställen von

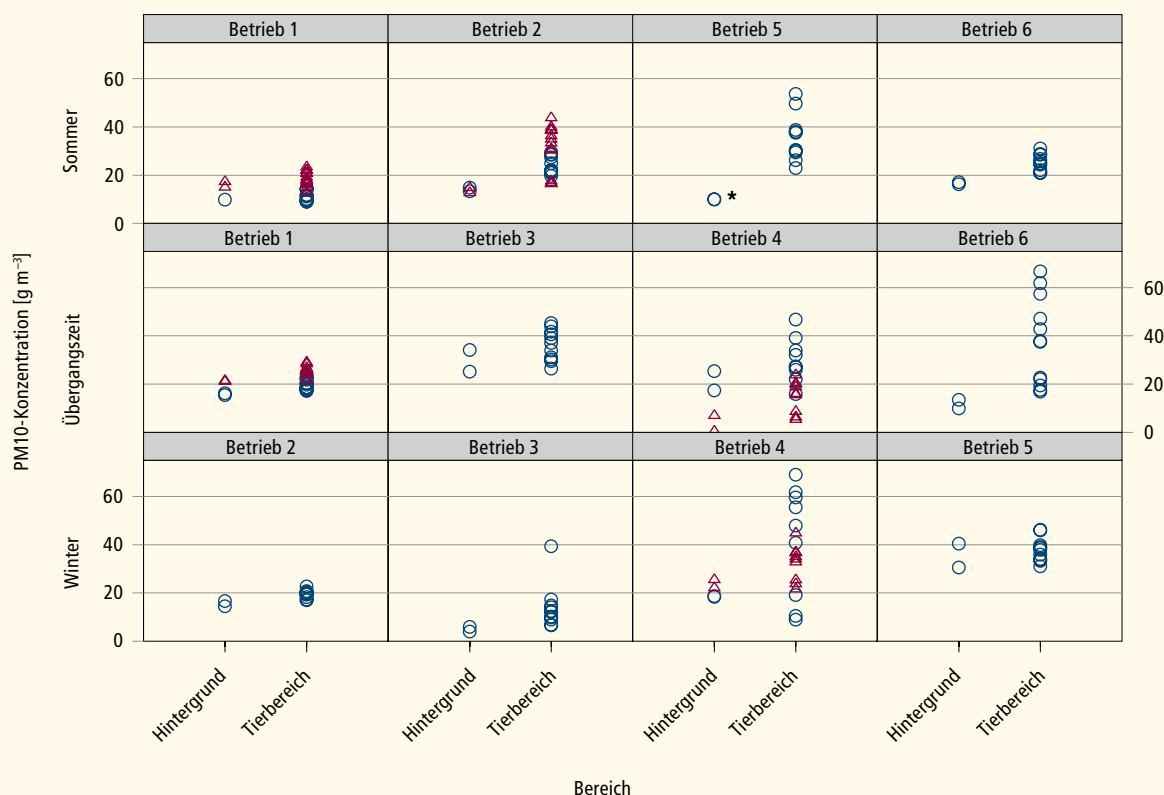


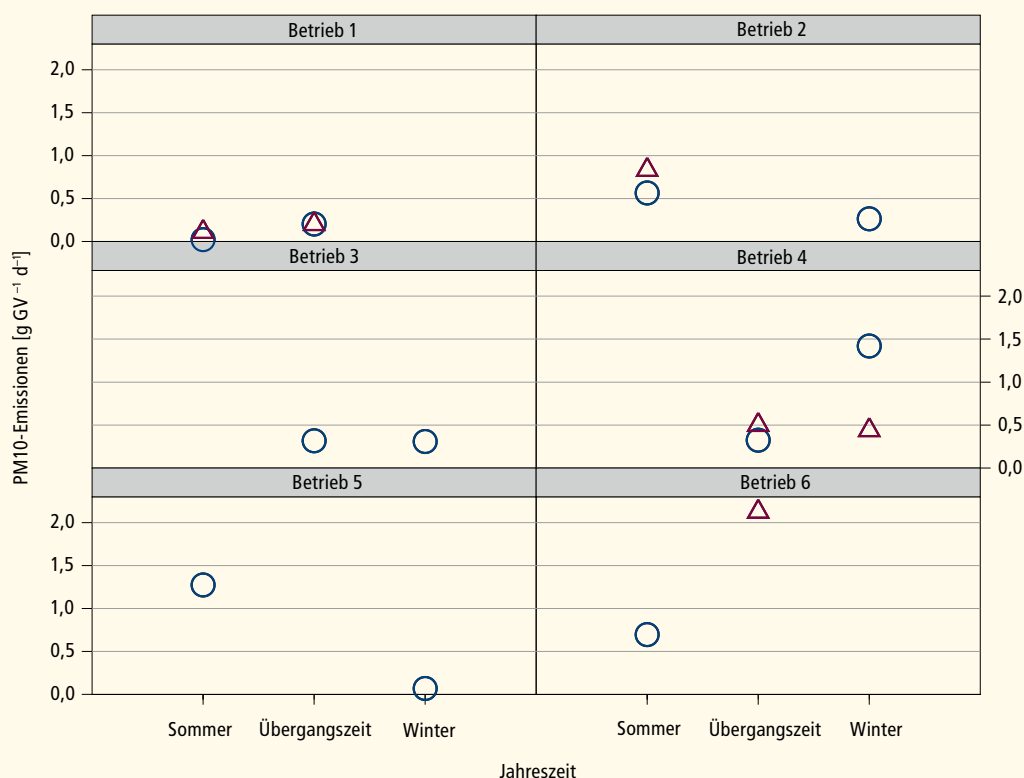
Abb. 2 | PM10-Konzentrationen [ $\mu\text{g}$  pro  $\text{m}^3$ ] im Tierbereich und Hintergrund nach Betrieb und Jahreszeit, innerhalb der Messperiode dargestellt als dreitägige Messzeiträume; \* kennzeichnet den Wert aus Immissionsmessungen am Ostluft-Standort Winterthur Obertor (Ostluft 2008); O = dreitägiger Messzeitraum 1; Δ = dreitägiger Messzeitraum 2 (Schrade *et al.* 2017).

Heidenreich *et al.* (2008) mit 0,10–1,44 g pro Tierplatz und d. PM10-Emissionswerte von Mosquera *et al.* (2012), von einem Liegeboxen-Laufstall in den Niederlanden an sechs unabhängigen Messtagen übers Jahr verteilt, erstreckten sich von 0,08–0,41 g pro Tierplatz und d. Etwas höher waren PM10-Emissionen in einem Tiefstreustall in Deutschland mit 2,06–2,78 g pro GV und d (Henseler-Passmann 2010). Bei den Messungen in drei Jahreszeiten von Heidenreich *et al.* (2008), Henseler-Passmann (2010) und Mosquera *et al.* (2012) war analog zu den eigenen Messungen kein systematischer Jahreszeiteffekt erkennbar.

### PM10-Emissionsfaktor

Der PM10-Emissionsfaktor wurde als arithmetischer Mittelwert der PM10-Emissionen aller Messperioden berechnet und liegt bei 0,48 g pro GV und d (0,18 kg pro GV und Jahr) beziehungsweise 0,64 g/Tier und d (0,23 kg pro Tier und Jahr). Die Umrechnung erfolgte mit dem Grossvieheinheitenrechner des KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft 2014). Die Datengrundlage für diesen neuen PM10-Emissionsfaktor stützt sich auf eine grössere Anzahl von Betrie-

ben als die PM10-Emissionsfaktoren aus der Literatur ab (Tab. 1). Die von Goodrich *et al.* (2006) angeführten PM10-Emissionsfaktoren für einen Milchvieh-Laufstall und einen nicht überdachten Laufbereich wurden anhand von Konzentrationsmessungen und Ausbreitungsmodellierung auf nur einem Betrieb kalkuliert. Im Emissionsinventar der *European Environment Agency* (EEA 2013) sind PM10-Emissionsfaktoren differenziert in «Milchkühe, Festmist» und «Milchkühe, güllebasiert» dargestellt. Diese Werte basieren auf den oben angeführten Untersuchungen von Takai *et al.* (1998), bei denen die PM10-Emissionen nicht gemessen, sondern von der Partikelfraktion Gesamtstaub (TSP) abgeleitet wurden. Die Emissionsfaktoren aus den Niederlanden für Liegeboxenlaufställe mit perforierten Laufflächen mit bzw. ohne Weidehaltung stützen sich auf Messungen auf vier Betrieben (Mosquera *et al.* 2011). Mit 0,64 g/Tier und d ist der von den eigenen Messungen abgeleitete PM10-Emissionsfaktor deutlich niedriger als die bisher in Inventaren für die Schweiz und Europa verwendeten Werte mit 1,07 g pro Kopf und d (BAFU 2014) beziehungsweise 2,27 g pro AAP und d (AAP = *Average Animal Population*; EEA 2013). Die von vier perforierten



**Abb. 3** | PM10-Emissionen [g pro GV und d] nach Betrieben und Jahreszeiten, angegeben pro dreitägigem Messzeitraum, berechnet auf Grundlage des Medians der PM10-Konzentration aus dem Tierbereich (Stallbereich, Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof) und der Tracergas-Messungen; O = dreitägiger Messzeitraum 1; Δ = dreitägiger Messzeitraum 2 (Schrade *et al.* 2017).

**Tab. 1 | Vergleich von PM10-Emissionsfaktoren für die Milchviehhaltung, abgeleitet aus der vorliegenden Untersuchung mit Literaturdaten (AAP = Average Animal Population; CEPMEIP = Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories; EEA = European Environment Agency; BAFU = Bundesamt für Umwelt; GV = Grossvieheinheit, 1 GV = 500 kg Lebendmasse, d = Tag).**

Angaben zum Haltungssystem	PM10-Emissionsfaktor	Region	Datengrundlage	Quellen
Milchkühe, Festmist (strohbasierend) Milchkühe, güllebasiert	1,18 g AAP <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 2,27 g AAP <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Europa	basierend auf TSP-Messungen von Takai <i>et al.</i> (1998)	EEA (2013)
Rinder (Bestand)	1,09 g Kopf <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Europa	nicht dargestellt	CEPMEIP (2014)
Milchvieh (bezogen auf 2012)	1,07 g Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Schweiz	nicht dargestellt	BAFU (2014)
Laufstall für Milchvieh Nicht überdachter Laufbereich für Milchvieh	5,0 g GV <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 11,3 g GV <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Texas, USA	Konzentrationsmessungen und Ausbreitungsmodellierung, 1 Betrieb	Goodrich <i>et al.</i> (2006)
Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh mit Stroh-Mist-Matratze Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh mit Gummimatte	0,99 g Tierplatz <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 0,58 g Tierplatz <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Deutschland	Emissionsmessungen, 1 Betrieb Emissionsmessungen, 2 Betriebe	Heidenreich <i>et al.</i> (2008)
Tiefstreu-Laufstall für Milchvieh mit Weide (Mai bis Oktober) Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh mit Weide (Mai bis Oktober)	1,48 g GV <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 0,16 g GV <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Deutschland	Emissionsmessungen, 3 Betriebe	Henseler-Passmann (2010)
Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh mit perforierten Laufflächen (Weide) Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh mit perforierten Laufflächen (ganzjährige Stallhaltung)	0,32 g Tierplatz <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> 0,40 g Tierplatz <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Niederlande	Emissionsmessungen, 4 Betriebe	Mosquera <i>et al.</i> (2011)
Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh mit planbefestigten Laufflächen und Laufhof	0,64 g Tier <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> bzw. 0,48 g GV <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Schweiz	Emissionsmessungen, 6 Betriebe	vorliegende Untersuchung

\* Umrechnung mit dem KTBL-Grossvieheinheitenrechner (2014)

Liegeboxenlaufställen abgeleiteten PM10-Emissionsfaktoren (Mosquera *et al.* 2011) sind mit 0,40g pro Tier und d (ganzjährige Stallhaltung) respektive 0,32g pro Tier und d (mit Weide) tiefer als der Emissionsfaktor basierend auf den eigenen Messungen und liegen somit auch deutlich unter den in den Inventaren verwendeten Werten. Die mittlere PM10-Emission von aktuelleren Messungen in den Niederlanden ist auch deutlich tiefer ( $P < 0,05$ ) als der in Mosquera *et al.* (2011) genannte Emissionsfaktor (Mosquera *et al.* 2012). Somit scheinen die Emissionsfaktoren, die bisher in den Inventaren verwendet werden, als zu hoch.

## Schlussfolgerungen

Erstmalig wurden PM10-Konzentrationen und -Emissionen auf Milchviehbetrieben mit Liegeboxen, freier Lüftung und Laufhof quantifiziert. Mit diesen systematischen Emissionsmessungen auf sechs Praxisbetrieben in insgesamt zwölf Messperioden konnten für ein Haltungssystem betriebliche Effekte abgebildet und praxisübliche Messbedingungen gewährleistet werden. Die sechs Betriebe unterschieden sich bezüglich Fütterung, Management, Bewirtschaftungsweise, Herdenleistung, Grösse sowie baulichen Details. Damit ist für dieses Haltungssystem ein breites Spektrum der Praxis-

vielfalt abgedeckt. Mit Messungen in je zwei der drei Jahreszeiten pro Betrieb konnten jeweils innerhalb der Betriebe zwei unterschiedliche klimatische Situationen erfasst und damit das Klima im Jahresverlauf abgedeckt werden. Die gewichtsbezogene Messung von PM10 mit Impaktoren ermöglichte zeitgleich eine räumlich hoch aufgelöste Probenahme in den weiträumigen Ställen und Laufhöfen.

Die PM10-Konzentrationen im Tierbereich (Stall und Laufhof bzw. Liegegang/Laufhof) unterschieden sich zwar signifikant von der Hintergrundkonzentration, lagen jedoch häufig nur knapp über beziehungsweise im Bereich der Hintergrundkonzentration. Innerhalb der Betriebe waren zwischen den Jahreszeiten und zwischen den Messzeiträumen Unterschiede in der Emissionshöhe erkennbar. Beim vorliegenden Datenumfang und aufgrund der nur knappen Abgrenzung zur Hintergrundkonzentration war jedoch kein statistisch nachweisbarer Zusammenhang mit den untersuchten Einflussgrössen erkennbar. Der von den eigenen Messungen abgeleitete PM10-Emissionsfaktor sowie weitere Emissionsfaktoren aus neueren Untersuchungen in Liegeboxenlaufställen deuten darauf hin, dass die bisher in Inventaren verwendeten Emissionsfaktoren die PM10-Emissionen der Milchviehhaltung zu hoch einschätzen. ■

### Literatur

- CEPMEIP, 2014. Co-ordinated European Programme on Particulate Matter Emission Inventories. Projections and Guidance (CEPMEIP) Database. Zugang: <http://www.air.sk/tno/cepmeip> [16.04.2014].
- Döhler H., Eurich-Menden B., Dämmgen U., Osterburg B., Lüttich M., Bergschmidt A., Berg W. & Brunsch R., 2002. BMVEL/UBA-Ammoniak-Emissionsinventar der Deutschen Landwirtschaft und Minderungsszenarien bis zum Jahr 2010. *Umweltbundesamt Texte 05/02*, Umweltbundesamt, Berlin.
- EAA, 2013. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013. European Environment Agency EAA, Kopenhagen.
- BAFU, 2013. PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland. Modelling results from 2005, 2010 and 2020. Environmental studies. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- BAFU, 2014. Switzerland's Informative Inventory Report 2014 (IIR). Inventory Report. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- Goodrich L.B., Parnell C.B., Mukhtar S. & Capareda S.C., 2006. A PM10 emission factor for free stall dairies. *In: Workshop on agricultural air quality*, 5.–8. Juni 2006, Washington D.C., S. 628–629.
- Haenel D., Rösemann C., Dämmgen U., Poddey E., Freibauer A., Wulf S., Eurich-Menden B., Döhler H., Schreiner C., Bauer B. & Osterburg B. 2014. Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990–2012. Thünen Report 17, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.
- Heidenreich T., Lippmann J., Höferth C., & Wanka U. 2008. Quantifizierung von Emissionen in der Rinderhaltung. *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie* 33, Dresden.
- Henseler-Passmann J. 2010. Untersuchungen zur Emission und Transmission von Feinstäuben aus Rinderställen. Dissertation, Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2014. Grossvieheinheitenrechner 2.1. Zugang: <http://www.ktbl.de> [08.08.2014].
- Mosquera J., Hol J.M.G., Winkel A., Huis in 't Veld J.W.H., Gerrits F.A., Ogink N.W.M. & Aarnink A.J.A., 2011. Fijnstofemissie uit stallen: melkvee. *Rapport 296*, Wageningen UR Livestock Research.
- Mosquera J., Hol J.M.G., Huis in 't Veld J.W.H., Ploegaert J.P.M. & Ogink N.W.M., 2012. Emissies uit een ligboxenstal voor melkvee met het «Vrije keuze» systeem. – Meetprogramma Integraal Duurzame Stallen. *Rapport 614*, Wageningen UR Livestock Research.
- Ostluft, 2008. OSTLUFT – die Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein. Zugang: <http://www.ostluft.ch> [20.11.2008].
- Schrade S., Zeyer K., Gygax L., Emmenegger L., Hartung E. & Keck M., 2012. Ammonia emissions and emission factors of naturally ventilated dairy housing with solid floors and an outdoor exercise area in Switzerland. *Atmospheric Environment* 47, 183–194.
- Schrade S., Zeyer K., Emmenegger L. & Keck M., 2017. Konzentrationen und Emissionen von PM10 aus sechs freigelüfteten Milchviehställen mit Liegeboxen und Laufhof. *Landtechnik*, 72 (2), 101–119.
- Schweizer Bauernverband, 2011. Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung 2010. SBV, Brugg.
- Takai H., Pedersen S., Johnsen J.O., Metz J.H.M., Groot Koerkamp P.W.G., Uenk G.H., Phillips V.R., Holden M.R., Sneath R.W., Short J.L., White R.P., Hartung J., Seedorf J., Schröder M., Linkert K.H. & Wathes C.M., 1998. Concentrations and emissions of airborne dust in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 70 (1), 59–77.

**Riassunto****Emissioni di polveri fini (PM10) di bestiame da latte nella stalla a stabulazione libera con box con recinto**

Al fine di migliorare la base di dati per l'inventario delle emissioni sono state determinate le emissioni di polveri fini (PM10) nel sistema di stabulazione libera, che è il più comune in Svizzera. A tale scopo sono state eseguite rilevazioni delle emissioni in sei stalle arieggiate a stabulazione libera con box per bestiame da latte, equipaggiate di superfici di camminamento e corti con rivestimento. Le rilevazioni sono state realizzate in due su tre stagioni (estate, periodo di transizione, inverno). Il campionamento di PM10, arricchito con impattori (separatori di particelle), è avvenuto nell'arco di 72 ore complessivamente in da 9 a 14 posizioni in stalla e corti nonché in una posizione in secondo piano. È stato utilizzato un metodo Tracer-Ratio con due gas traccianti ( $SF_6$ ,  $SF_5CF_3$ ) per stabilire le emissioni. Le concentrazioni di PM10 nel settore degli animali sono state leggermente superiori oppure dello stesso ordine di quelle in secondo piano. In tutte le aziende, le emissioni di PM10 sono oscillate da 0,02 e 2,1 grammi per unità di bestiame grosso e giorno. Il fattore delle emissioni PM10 derivato, con 0,64 grammi per vacca e giorno, è nettamente inferiore rispetto ai fattori d'emissione precedentemente utilizzati negli inventari.

**Summary****Particulate matter (PM10) emissions from dairy loose housing with outdoor exercise area**

To improve the underlying data for emission inventories, particulate matter (PM10) emissions were determined for the most common loose-housing system in Switzerland. Emission measurements were conducted in two out of three seasons (summer, transition period, winter) per farm in six naturally ventilated dairy loose-housing systems comprising cubicles, solid floors and an outdoor exercise area. PM10 was collected cumulatively over 72 hours with impactors (particle separators) at a total of 9 to 14 measuring points in the housing and outdoor exercise area, as well as in the background. A tracer ratio method with two tracer gases ( $SF_6$  and  $SF_5CF_3$ ) was used to determine the emissions. PM10 concentrations in the animal area were usually just above or within the range of the background concentration. Across all farms, PM10 emissions varied between 0,02 and 2,1 g per livestock unit and day. At 0,64 g per cow and day, the derived PM10 emission factor is considerably lower than those used to date in the inventories.

**Key words:** PM10 emissions, PM10 concentrations, natural ventilation, dairy loose housing, outdoor exercise area, emission factor.