

Messungen der Methanemission an einzelnen Kühen mithilfe des  
Laser-Methan-Detektors und genetisch-statistische Analyse daraus  
definierter Phänotypen

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor agriculturarum (Dr. agr.)

der

der Naturwissenschaftlichen Fakultät III,  
Agrar- und Ernährungswissenschaften,  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Frau M. Sc. Sarah Mühlbach  
geboren am 14.08.1988 in Zeitz

Gutachter: Prof. Dr. Hermann H. Swalve  
Prof. Dr. Georg Thaller

Verteidigung: 31.01.2022

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
I. Tabellenverzeichnis.....	4
II. Abbildungsverzeichnis.....	7
III. Formelverzeichnis .....	10
IV. Abkürzungsverzeichnis.....	11
<b>1 Einleitung und Zielstellung .....</b>	<b>14</b>
<b>2 Literaturübersicht.....</b>	<b>15</b>
2.1 Entstehung von CH <sub>4</sub> .....	15
2.2 Methoden der CH <sub>4</sub> -Messung.....	16
2.2.1 Respirationkammer.....	16
2.2.2 GreenFeed .....	17
2.2.3 SF <sub>6</sub> -Methode .....	19
2.2.4 Sniffer .....	20
2.2.5 Laser-Methan-Detektor.....	21
2.2.6 Indirekte Berechnung über Schätzggleichungen.....	25
2.3 Einflussfaktoren auf die CH <sub>4</sub> -Bildung und CH <sub>4</sub> -Messung.....	27
2.3.1 Futteraufnahme .....	27
2.3.2 Rationszusammensetzung.....	29
2.3.3 Milchleistung.....	30
2.3.4 Lebendmasse .....	33
2.3.5 Genotyp.....	34
2.3.6 Aktivität.....	36
2.3.7 Witterung .....	37
2.3.8 Weitere Einflussfaktoren .....	38
2.4 Merkmale der CH <sub>4</sub> -Emission.....	40
2.4.1 CH <sub>4</sub> -Konzentration.....	40
2.4.2 CH <sub>4</sub> -Produktion.....	40
2.4.3 CH <sub>4</sub> -Ertrag .....	42
2.4.4 CH <sub>4</sub> -Intensität .....	43
2.5 Strategien zur Verminderung von CH <sub>4</sub> .....	44
2.5.1 Futter und Fütterungsmanagement.....	44

2.5.2	Beeinflussung der Mikrobenpopulation im Pansen .....	45
2.5.3	Genetische Selektion.....	48
<b>3</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>51</b>
3.1	Untersuchungsorte und Zeitraum.....	51
3.2	Tiere .....	51
3.3	Versuchsaufbau und Datenbearbeitung.....	53
3.3.1	CH <sub>4</sub> -Messung .....	53
3.3.2	Aufbereitung der CH <sub>4</sub> -Daten .....	54
3.3.3	Erstellung von CH <sub>4</sub> -Phänotypen .....	55
3.3.4	Erfassung von zusätzlichen Daten.....	58
3.3.4.1	Milchleistungsdaten .....	58
3.3.4.2	Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur .....	59
3.3.4.3	Lebendmasse .....	60
3.3.4.4	Futtermittelaufnahme und Rationszusammensetzung.....	60
3.4	Statistische Auswertung.....	62
3.4.1	Deskriptive Statistik und Modellaufstellung .....	62
3.4.2	Genetische Parameter.....	66
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>68</b>
4.1	CH <sub>4</sub> -Phänotypen.....	68
4.1.1	Deskriptive Statistik .....	68
4.1.2	Einflussfaktoren auf die CH <sub>4</sub> -Phänotypen .....	69
4.2	Modell für die genetisch-statistische Auswertung.....	79
4.2.1	Einzelprofile .....	79
4.2.2	Mittelwerte aller Einzelprofile einer Kuh .....	81
4.3	Genetische Parameter.....	83
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>85</b>
5.1	CH <sub>4</sub> -Messung mit dem LMD .....	85
5.2	CH <sub>4</sub> -Phänotypen.....	89
5.3	Einflüsse auf die CH <sub>4</sub> -Messung .....	93
5.4	Genetische Parameter.....	101
5.5	Auswahl des besten Phänotyps für die genetische Selektion.....	102
5.6	Auswirkungen einer Einbeziehung der CH <sub>4</sub> -Emission in das Zuchtziel .....	104
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>110</b>

---

<b>8</b>	<b>Summary .....</b>	<b>113</b>
<b>V.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>116</b>
<b>VI.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>137</b>

## I. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich von CH <sub>4</sub> -Konzentrationen und Emissionen gemessen mit dem Laser-Methan-Detektor (LMD), GreenFeed und Sniffer (Sorg et al., 2018).....	24
Tabelle 2:	Publikationen zur Schätzung der CH <sub>4</sub> -Konzentration bei Milchkühen .....	27
Tabelle 3:	Heritabilität ± Standardfehler (SE) verschiedener CH <sub>4</sub> -Merkmale, die mit unterschiedlichen Techniken gemessen wurden .....	35
Tabelle 4:	CH <sub>4</sub> -Konzentrationen gemessen mit dem Laser-Methan-Detektor (LMD) und Sniffer an Milchkühen.....	40
Tabelle 5:	Geschätzte und berechnete CH <sub>4</sub> -Emissionen (g/d) .....	41
Tabelle 6:	CH <sub>4</sub> -Ertrag (g/kg Trockenmasseaufnahme) gemessen mit Respirationskammer und GreenFeed .....	42
Tabelle 7:	CH <sub>4</sub> -Intensität (g/kg Milch) gemessen mittels Respirationskammer und geschätzt aus MIR-Daten.....	43
Tabelle 8:	Übersicht zu den Praxisbetrieben (PB).....	52
Tabelle 9:	Übersicht zu den Versuchsbetrieben (VB).....	52
Tabelle 10:	Anzahl der gemessenen CH <sub>4</sub> -Profile auf den Praxis- (PB) und Versuchsbetrieben (VB) .....	54
Tabelle 11:	Verbleibende Anzahl der Kühe mit CH <sub>4</sub> -Messung und Anzahl der CH <sub>4</sub> -Profile, nachdem unplausible und unphysiologische Werte aus den CH <sub>4</sub> -Profilen entfernt wurden .....	55
Tabelle 12:	Übersicht aller CH <sub>4</sub> -Merkmale .....	57
Tabelle 13:	Mittelwerte, Anzahl (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Milchleistungskennzahlen der Praxis (PB)- und Versuchsbetriebe (VB) .....	59
Tabelle 14:	Mittelwerte, Anzahl (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Windgeschwindigkeit ( $V_{Wind}$ ) und Lufttemperatur (Temp.) im Stall während der CH <sub>4</sub> -Messungen in den Praxis- und Versuchsbetrieben .	60
Tabelle 15:	Mittelwerte, Anzahl (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Lebendmasse (kg) der Kühe in den Praxis- und Versuchsbetrieben .....	60
Tabelle 16:	Mittelwerte, Anzahl Kühe (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Futteraufnahme (kg Trockenmasse/d) in den Versuchsbetrieben .....	61
Tabelle 17:	Anzahl der Kühe mit CH <sub>4</sub> -Messung und Anzahl der CH <sub>4</sub> -Profile, die auf den Versuchs- und Praxisbetrieben erhoben wurden, nach der Datenbereinigung.	62

Tabelle 18: Klasseneinteilung der Laktationstage .....	62
Tabelle 19: Klasseneinteilung der Windgeschwindigkeit (m/s) in den Praxis- und Versuchsbetrieben .....	62
Tabelle 20: Klasseneinteilung der Lufttemperatur (°C) in den Praxis- und Versuchsbetrieben .....	63
Tabelle 21: Mittelwerte, Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der CH <sub>4</sub> -Phänotypen der einzelnen CH <sub>4</sub> -Profile, gemessen auf den Praxisbetrieben (n = 1.660) .....	68
Tabelle 22: Mittelwerte, Standardabweichung (SD.), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der CH <sub>4</sub> -Phänotypen der einzelnen CH <sub>4</sub> -Profile, gemessen auf den Versuchsbetrieben (n=589) .....	69
Tabelle 23: Einfluss des LMD-Geräts auf die Werte der CH <sub>4</sub> -Phänotypen (Least Square Means ± Standardfehler) .....	70
Tabelle 24: Einfluss der bedienenden Person auf die Werte der CH <sub>4</sub> -Phänotypen (Least Square Means ± Standardfehler) .....	70
Tabelle 25: Einfluss des Betriebes auf die Werte der CH <sub>4</sub> -Phänotypen (Least Square Means ± Standardfehler) .....	71
Tabelle 26: Einfluss der Windklasse auf die Werte der CH <sub>4</sub> -Phänotypen (Least Square Means ± Standardfehler) .....	74
Tabelle 27: Einfluss der Klasse der Lufttemperatur auf die Werte des Phänotyps pn (Least Square Means ± Standardfehler) .....	74
Tabelle 28: P-Werte aller Effekte im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH <sub>4</sub> -Phänotypen auf den Praxisbetrieben .....	79
Tabelle 29: Einfluss der Laktationstagklasse (LTK) auf die CH <sub>4</sub> -Phänotypen im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH <sub>4</sub> -Phänotypen auf den Praxisbetrieben (Least Square Means ± Standardfehler) .....	81
Tabelle 30: P-Werte aller Effekte im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Mittelwerte der CH <sub>4</sub> -Phänotypen auf den Praxisbetrieben .....	81
Tabelle 31: Einfluss der Laktationstagklasse (LTK) auf die CH <sub>4</sub> -Phänotypen im Modell für die genetisch-statistische Auswertung des Mittelwerts aller Einzelprofile einer Kuh für die CH <sub>4</sub> -Phänotypen auf den Praxisbetrieben (Least Square Means ± Standardfehler) .....	82
Tabelle 32: Heritabilität (h <sup>2</sup> ), Standardfehler (SE) und additiv-genetische ( $\sigma_a^2$ ), Rest- ( $\sigma_e^2$ ) und phänotypische ( $\sigma_p^2$ ) Varianz sowie Varianz der permanenten Umwelt ( $\sigma_{pU}^2$ ) der CH <sub>4</sub> -Phänotypen für die Einzelprofile auf den Praxisbetrieben .....	83
Tabelle 33: Heritabilität (h <sup>2</sup> ) und additiv-genetische ( $\sigma_a^2$ ), Rest- ( $\sigma_e^2$ ) und phänotypische ( $\sigma_p^2$ ) Varianz des Mittelwerts aller Einzelprofile einer Kuh für die CH <sub>4</sub> -Phänotypen auf den Praxisbetrieben .....	84

Tabelle 34: Geschätzte Heritabilität (Diagonale), phänotypische (unterhalb der Diagonalen) und genetische (oberhalb der Diagonalen) Korrelation der CH<sub>4</sub>-Merkmale für die Einzelprofile und Mittelwerte aller Profile einer Kuh ..... 84

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bildung der flüchtigen Fettsäuren und des H <sub>2</sub> aus Glukose (eigene Darstellung nach Loeffler & Gäbel, 2009) .....	15
Abbildung 2: Schema einer Respirationskammer mit offenem Kreislauf (Storm et al., 2012) .....	17
Abbildung 3: AMS mit Futtertrog (1), Sniffer-Ansaugrohr (2), Pellets (3) und Kuh (4) (eigene Darstellung).....	21
Abbildung 4: Laser-Methan-Detektor (Tokyo Gas Engineering Solutions, Tokyo, Japan) (Bild: S.Mühlbach).....	22
Abbildung 5: Funktionsweise des LMD (nach Crowcon Gas Detection Instruments Ltd.)... 22	
Abbildung 6: Beziehung des Archaeolgehalts im Kot (Archaeol excretion) und der CH <sub>4</sub> -Emission (Methane production) von Holstein-Färsen (Schwarm et al., 2015) 26	
Abbildung 7: Beziehung zwischen CH <sub>4</sub> -Emission und Trockenmasseaufnahme (DMI) (Brask et al., 2015).....	28
Abbildung 8: Beziehung zwischen tgl. Milchleistung (Milk yield) und dem CH <sub>4</sub> -Emissions-Index während des Melkens (MEIm) (Garnsworthy et al., 2012a) .....	31
Abbildung 9: CH <sub>4</sub> -Emission (Estimated methane) während des Melkens innerhalb der Laktationswochen (Week of lactation) (Garnsworthy et al., 2012b) .....	32
Abbildung 10: Manhattan Plot der geschätzten CH <sub>4</sub> -Emission, die gestrichelte Linie kennzeichnet den Schwellenwert bei einem Bayes-Faktor von 10,1 (de Haas et al., 2011).....	36
Abbildung 11: Kuhprofil einer CH <sub>4</sub> -Messung mittels Respirationskammer (schwarze Punkte) und Laser-Methan-Detektor (graue Linie) bei verschiedenen Aktivitäten (Ruminating = Wiederkäuen, Feeding = Fressen, Resting = Ruhen) (Chagunda et al., 2013) .....	36
Abbildung 12: Box-Whisker-Plot mit den Restvarianzen der während des Melkens gemessenen CH <sub>4</sub> -Konzentration (Methane concentration) auf verschiedenen Betrieben (Farm) nachdem auf Milchleistung, Laktationswoche und Betrieb korrigiert wurde (Bell et al., 2014).....	39
Abbildung 13: Einflussgrößen auf die CH <sub>4</sub> -Bildung und Messung .....	39
Abbildung 14: Laktationskurve für die CH <sub>4</sub> -Emission (PME) (schwarze Linie), Milchleistung (MY) (gestrichelte Linie) und Trockenmasseaufnahme (DMI) (gepunktete Linie) (Pickering et al., 2015).....	42
Abbildung 15: Auswirkung verschiedener Fettgehalte (Fat) in der Ration auf die Milchleistung (Milk yield) bei Milchkühen (Patra, 2013).....	45

Abbildung 16: Aufbau der CH <sub>4</sub> -Messung mit dem LMD (1=Kuh, 2=Ziellaser und Messlaserpfad, 3=LMD, 4=Fressfanggitter oder Behandlungsstand), Profildauer: 5 Minuten .....	53
Abbildung 17: Ein mit dem Laser-Methan-Detektor aufgezeichnetes Profil der CH <sub>4</sub> -Konzentration der Atemluft vor (a) und nach (b) der Entfernung von Ausreißern (= unphysiologisch und unplausibel hohe isolierte Einzelwerte, die ein Artefakt der Messung darstellen) .....	55
Abbildung 18: CH <sub>4</sub> -Profil mit Schwellenwert zur Trennung von Atmungs- und Ruktuswerten und den daraus zu bildenden CH <sub>4</sub> -Merkmalen, gestrichelte Linie = Schwellenwert (a); Boxplot-Methode zur Bestimmung des Schwellenwerts, IQR = Interquartile-Range (b) .....	56
Abbildung 19: Übersicht zum Ablauf der CH <sub>4</sub> -Messung auf den Praxisbetrieben .....	61
Abbildung 20: Fließschema zur Datenverarbeitung und Analyse .....	67
Abbildung 21: Einfluss des Besuchs auf die Werte der CH <sub>4</sub> -Phänotypen (p <sub>mean</sub> , r <sub>pmean</sub> , r <sub>emean</sub> , gCH <sub>4</sub> , gCH <sub>4</sub> (GF)) und die Anzahl an Atemzügen (pn) im Profil (LSM) auf Praxisbetrieb (PB) 1, PB 2 und PB 3 (Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen Besuchen innerhalb eines CH <sub>4</sub> -Phänotypen an (p < 0,05)); p <sub>mean</sub> , r <sub>pmean</sub> , r <sub>emean</sub> in ppmxm; gCH <sub>4</sub> , gCH <sub>4</sub> (GF) in g/d; pn: Anzahl; Erklärung der CH <sub>4</sub> -Phänotypen: siehe Tabelle 12 .....	73
Abbildung 22: Einfluss der Fütterungsgruppe auf die Werte der CH <sub>4</sub> -Phänotypen (p <sub>mean</sub> , r <sub>pmean</sub> , r <sub>emean</sub> , gCH <sub>4</sub> , gCH <sub>4</sub> (GF)) und die Anzahl an Atemzügen (pn) im Profil (LSM) auf Praxisbetrieb (PB) 1, PB 2 und PB 3 (Buchstaben geben signifikante Unterschiede (p < 0,05) zwischen Fütterungsgruppen an) .....	76
Abbildung 23: Verlauf der CH <sub>4</sub> -Werte aller CH <sub>4</sub> -Phänotypen und der Anzahl an Atemzügen (pn) in Abhängigkeit von der Laktationstagklasse (LTK), gemessen auf den Praxisbetrieben (n = 1.660); Erklärung der CH <sub>4</sub> -Phänotypen: siehe Tabelle 12 .....	77
Abbildung 24: Zusammenhang von energiekorrigierter Milchleistung (ECM) und CH <sub>4</sub> -Intensität (CH <sub>4</sub> -I), gemessen auf den Praxisbetrieben (a) und auf den Versuchsbetrieben (b) .....	78
Abbildung 25: Zusammenhang von Lebendmasse und CH <sub>4</sub> -Konzentration des Merkmals p <sub>mean</sub> , gemessen auf den Praxisbetrieben (a) und auf den Versuchsbetrieben (b) .....	78
Abbildung 26: Least Square Means (LSM) des Effektes Betriebsbesuch × Windklasse für das Merkmal p <sub>mean</sub> im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH <sub>4</sub> -Phänotypen auf den Praxisbetrieben .....	80
Abbildung 27: Least Square Means (LSM) des Effektes LMD × Bediener für das Merkmal p <sub>mean</sub> im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH <sub>4</sub> -Phänotypen auf den Praxisbetrieben .....	80
Abbildung 28: Least Square Means (LSM) des Effektes Betriebsbesuch × Fütterungsgruppe (Gruppe) für das Merkmal p <sub>mean</sub> im Modell für die genetisch-statistische	

Auswertung des Mittelwerts aller Einzelprofile für die CH<sub>4</sub>-Phänotypen auf den Praxisbetrieben. .... 82

### III. Formelverzeichnis

$\text{CO}_2 + 4 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$ (1).....	15
$\text{CH}_4 \left( \frac{\text{g}}{\text{d}} \right) = \text{SF}_6 \text{ (Pansen)} * \frac{\text{CH}_4 \text{ (Kanister)}}{\text{SF}_6 \text{ (Kanister)}}$ (2).....	19
Schwellenwert = $Q3 + (1.5 \times IQR)$ (3).....	56
$\text{ECM} = \frac{(\text{MM} * (383 * \text{Fett} + 242 * \text{Eiwei\ss} + 163.2 * \text{Laktose}))}{3140}$ (4).....	57
$\text{gCH}_4(\text{GF}) = 150 + 2,20 * \text{pmean}$ (5).....	57
$\text{ECM} = \frac{(\text{MM} * (383 * \text{Fett} + 242 * \text{Eiwei\ss} + 163.2 * \text{Laktose}))}{3140}$ (6).....	58
$\text{CH}_4\text{-I} = \frac{\text{CH}_4(\text{GF})}{\text{ECM}}$ (7).....	58
$y_{ijkl} = \mu + (\text{BB} \times \text{Wi})_i + (\text{LMD} \times \text{Bed})_j + \text{DIM}_k + \beta_1 \text{ecm}_l + \beta_2 \text{lm}_l + a_l + \text{pe}_l + e_{ijkl}$ (8).....	64
$y_{ijk} = \mu + (\text{BB} \times \text{Gr})_i + \text{DIM}_j + \beta_1 \text{ecm}_k + \beta_2 \text{lm}_k + a_k + e_{ijk}$ (9).....	64
$y_{ijkl} = \mu + \text{BB}_i + (\text{Temp} \times \text{Wi})_j + (\text{LMD} \times \text{Bed})_k + \text{DIM}_l + a_l + \text{pe}_l + e_{ijkl}$ (10).....	65

#### IV. Abkürzungsverzeichnis

ADF	saure Detergenz-Faser
AIC	Akaike Information Criterion
AMS	automatisches Melksystem
ATP	Adenosintriphosphat
BB	Betriebsbesuch
BCS	Body Condition Score
CCC	Concordance Correlation Coefficient (Konkordanz-Korrelationskoeffizient)
CIA	Coefficient of Individual Agreement (Koeffizient der individuellen Übereinstimmung)
ca.	circa
CH <sub>4</sub>	Methan
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CV	Coefficient of Variation (Variationskoeffizient)
d	Tag
DMI	Dry Matter Intake (Trockenmasseaufnahme)
ECM	Energy Corrected Milk yield (energiekorrigierte Milchleistung)
FFS	flüchtige Fettsäuren
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Analyse
g	Gramm
GE	Gross Energy (Bruttoenergie)
Gr	Fütterungsgruppe
h	Stunde(n)
h <sup>2</sup>	Heritabilität
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
IQR	Interquartile-Range
k.A.	keine Angaben

KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
l	Liter
LD	Luftdruck
LF	Luftfeuchte
LFA	Landesforschungsanstalt
LKV	Landeskontrollverband
LM	Lebendmasse
LMD	Laser Methan Detektor
LSM	Least Square Means
LTK	Laktationstagklasse
m	Meter
ME	metabolische (umsetzbare) Energie
Max.	Maximum
Min.	Minimum
MLU	Martin-Luther-Universität
mm	Millimeter
MIR	Mittlere-Infrarot-Spektroskopie
MLP	Milchleistungsprüfung
n	Anzahl
NDIR	nicht dispersive Infrarotspektroskopie
NDF	neutrale Detergenz-Faser
NEL	Netto-Energie-Laktation
nXP	nutzbares Rohprotein am Duodenum
3NOP	3-Nitrooxypropanol
PB	Praxisbetrieb
PMR	partielle Mischration

ppm	parts per million
ppm×m	parts per million je Meter
r	Korrelation
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RFI	Residual Feed Intake (Restfutterraufnahme)
r <sub>g</sub>	genetische Korrelation
r <sub>p</sub>	phänotypische Korrelation
r <sub>RM</sub>	Korrelation der wiederholten Messungen
s	Sekunden
SD	Standardabweichung
SE	Standardfehler
SNP	Single Nucleotide Polymorphism
TKL	Temperaturklasse
TM	Trockenmasse
TMR	totale Mischration
VDLUFA	Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
VB	Versuchsbetrieb
VIT	Vereinigte Informationssysteme Tierhaltung
WKL	Windklasse

## 1 Einleitung und Zielstellung

Steigenden Kosten landwirtschaftlicher Betriebsmittel von 2,6 % pro Jahr stehen um 0,2 % steigenden Erzeugerpreisen landwirtschaftlicher Produkte gegenüber (Deutscher Bauernverband, 2013). Besonders betroffen sind milcherzeugende Betriebe. Allein im Laufe des Jahres 2015 gaben deutschlandweit 3.200 Betriebe ihre Milchproduktion auf (Veauthier, 2016). Einen der größten Kostenpunkte in der Milchviehhaltung stellen mit 40-60 % die Futterkosten dar (FAO, 2013b). Tiere mit einer hohen Futtereffizienz könnten dazu beitragen, Futterkosten zu sparen. Methanogene Archaeen im Pansen von Wiederkäuern bilden während der Futterverdauung Methan ( $\text{CH}_4$ ). Dieser Prozess bedeutet für die Kuh einen Energieverlust von 2-12 % der aufgenommenen Bruttoenergie (Johnson & Johnson, 1995; Yan et al., 2000).

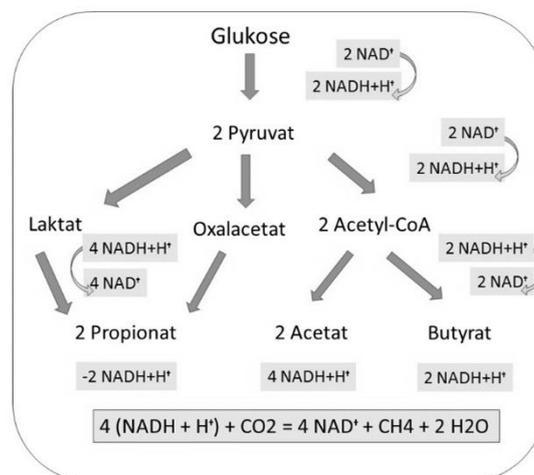
Doch nicht nur aus Gründen der Effizienz ist es notwendig, Tiere mit hohen und niedrigen  $\text{CH}_4$ -Emissionen zu identifizieren und auf Tiere mit geringeren  $\text{CH}_4$ -Abgaben zu selektieren, sondern auch der Einfluss auf das Klima und den Klimawandel sind zu berücksichtigen. So stammen 28 % der weltweiten  $\text{CH}_4$ -Emissionen aus der Tierhaltung (FAO, 2013a).  $\text{CH}_4$  besitzt ein 21 mal größeres Treibhauspotenzial als Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) (Forster et al., 2007). Aus diesen Gründen wird eine Verminderung der  $\text{CH}_4$ -Emissionen in der Rinderhaltung angestrebt. Eine langfristige und dauerhafte Senkung der  $\text{CH}_4$ -Emissionen kann erreicht werden, indem über mehrere Generationen auf dieses Merkmal selektiert wird (Robinson et al., 2014b). Für die genetische Selektion muss allerdings an vielen Tieren die  $\text{CH}_4$ -Emission gemessen werden. Dies stellt bisher noch eine Herausforderung dar, weil noch keine uneingeschränkt geeignete Messmethode etabliert wurde (Lassen et al., 2012).

Ziel dieser Studie war es, die Eignung des Laser-Methan-Detektors (LMD) für die Messung der  $\text{CH}_4$ -Konzentration in der Atemluft von Milchkühen unter Praxisbedingungen zu untersuchen. Für diesen Zweck sollte ein Messprotokoll entworfen werden, mit dem standardisiert und möglichst genau  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen gemessen werden können. Auf Versuchs- und Praxisbetrieben wurden die  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen der Atemluft von Kühen gemessen und daraus neue  $\text{CH}_4$ -Phänotypen berechnet. Mögliche tierindividuelle und exogene Einflussfaktoren wurden auf ihre Einflussnahme auf die  $\text{CH}_4$ -Werte geprüft und genetisch-statistische Analysen der verschiedenen  $\text{CH}_4$ -Merkmale durchgeführt.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Entstehung von CH<sub>4</sub>

Wiederkäuer sind in besonderer Art und Weise in der Lage, aufgenommenes Futter in seine Bestandteile zu zerlegen und aus den so gebildeten Abbauprodukten Energie für ihren Erhalt und ihre Leistung bereitzustellen. Bei dem Abbau von Kohlenhydraten entstehen vor allem die kurzkettigen Fettsäuren Acetat und Butyrat sowie Wasserstoff (H<sub>2</sub>) (Bergen & Yokoyama, 1977; Moss et al., 2000) (Abbildung 1). Der gebildete H<sub>2</sub> hemmt jedoch die Aktivität der futterverwertenden Mikroorganismen und führt so zu einem verlangsamten Futterabbau (McAllister & Newbold, 2008; Miller & Wolin, 1973). Um dem entgegenzuwirken, sind Archaeen (*Archaea*) im Pansen in der Lage, H<sub>2</sub> und Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zu Methan (CH<sub>4</sub>) zur eigenen Energieversorgung zu reduzieren (Janssen & Kirs, 2008; Thauer et al., 2008). Dieser Prozess wird Methanogenese genannt und stellt die Hauptform der H<sub>2</sub>-Eliminierung im Pansen dar. Folgende Reaktionsgleichung beschreibt die Methanogenese:



**Abbildung 1: Bildung der flüchtigen Fettsäuren und des H<sub>2</sub> aus Glukose (eigene Darstellung nach Loeffler & Gäbel, 2009)**

Die Methanogenese stellt jedoch für das Tier einen Energieverlust dar. Je nach Futterart kann dies 2-12 % der aufgenommenen Bruttoenergie (GE) betragen (Holter & Young, 1992; Johnson & Johnson, 1995; Hegarty et al., 2007). Auf molekularer Ebene bedeutet das, dass je Mol entstandenes CH<sub>4</sub> vier Mol ATP (ca. 134 kJ) benötigt werden (Bergen & Yokoyama, 1977). Das CH<sub>4</sub> wird im Pansen und zu einem geringeren Anteil (10 %) im Dickdarm gebildet (Murray et al., 1976). Die Abgabe des CH<sub>4</sub> kann über drei Wege erfolgen. Nur 1-3 % des CH<sub>4</sub> werden über den Anus abgegeben. Ein zweiter Teil (15-17 %) wird aus dem Pansen

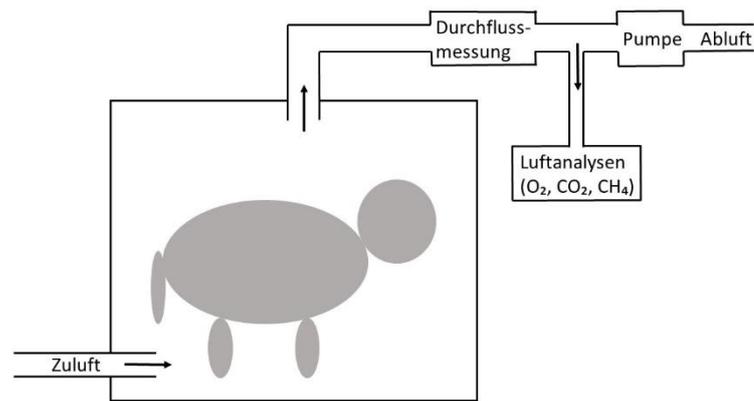
und dem Darm in die Blutbahn aufgenommen, in die Lunge transportiert und dort über die Atmung abgegeben. Die größte CH<sub>4</sub>-Abgabe (83 %) erfolgt auf direktem Weg aus dem Pansen über den Ruktus (Blaxter & Joyce, 1963; Muñoz et al., 2012; Murray et al., 1976). Dieser wird ein bis zwei Mal in der Minute abgegeben (Kaske, 2010). Dabei steigen die Pansengase über die Speiseröhre in Richtung Maul auf und werden aufgrund des verschlossenen Nasen-Rachen-Raums in die Lunge eingeatmet. Dort wird das Gas mit den folgenden Atemzügen ausgeatmet (Scheman, 2010).

## 2.2 Methoden der CH<sub>4</sub>-Messung

Um die CH<sub>4</sub>-Emission bei Kühen messen zu können, wurden eine Vielzahl an Messtechniken entwickelt. In den folgenden Kapiteln wird auf den „Gold-Standard“ der CH<sub>4</sub>-Messung, also die Referenzmethode, und auf einige praxistaugliche, sogenannte „On-farm“-Geräte eingegangen.

### 2.2.1 Respirationskammer

Die Anfänge der Untersuchungen des Energiestoffwechsels gehen auf Carl von Voit (1831-1908) zurück. Er nutzte einen Apparat mit offenem Luftkreislauf (von Max von Pettenkofer (1818-1901) erfunden), um Experimente durchzuführen, die sich mit dem Gaswechsel und dem Energiehaushalt beschäftigten (Johnson et al., 2003). Seitdem wurden die Technik und das Verfahren verbessert, und die Respirationskammer wird mittlerweile als „Gold-Standard“ der CH<sub>4</sub>-Messung angesehen (Chagunda, 2013). Abbildung 2 zeigt eine Respirationskammer mit offenem Kreislauf. Hammond et al. (2016a) und Derno et al. (2009) beschreiben die Funktionsweise solch einer Respirationskammer. Eine Respirationskammer muss luftdicht sein, so dass von außen eingeführte und die aus der Kammer abgesaugte Luft ohne Verfälschung auf ihre CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Konzentration analysiert werden kann. Die vom Tier abgegebene Atemluft vermischt sich mit der zugeführten Außenluft und wird wieder abgesaugt und analysiert. Um beispielsweise die von der Kuh abgegebenen CH<sub>4</sub>-Menge zu bestimmen, wird die Differenz aus der CH<sub>4</sub>-Konzentration in der Zu- und der Abluft gebildet. Dieser Wert wird anschließend mit dem Luftdurchsatz der Kammer multipliziert. Daraus ergibt sich die CH<sub>4</sub>-Emission der Kuh.



**Abbildung 2: Schema einer Respirationsskammer mit offenem Kreislauf (Storm et al., 2012)**

Vorteil dieser Methode ist, dass alle anfallenden Daten bezüglich Input und Output sehr genau erfasst werden können. Dies trifft nicht nur auf die Gasanalysen zu, sondern auch auf die Futteraufnahme, die Abgabe von Kot und Harn sowie die Wärmebilanz (Storm et al., 2012). Allerdings treten auch einige Nachteile auf. Mehrere Studien weisen darauf hin, dass sich das Tierverhalten in einer Respirationsskammer von dem im Stall unterscheidet. Insbesondere die Futteraufnahme ist vermindert (Garnsworthy et al., 2012a; Robinson et al., 2011; Robinson et al., 2014a; Storm et al., 2012). Dieser Effekt kann durch eine Gewöhnung der Tiere an die Kammer gemindert werden, was aber einen zusätzlichen Arbeitsaufwand bedeutet. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten und des allgemein sehr hohen Arbeitsaufwands (Einzeltierbetreuung beim Melken, Füttern etc.) ist die Kapazität und die Anzahl der zu untersuchenden Tiere begrenzt (Storm et al., 2012). Vor allem zuletzt Genanntes führt dazu, dass andere Techniken genutzt werden müssen, um im großen Umfang die  $\text{CH}_4$ -Produktion bei Kühen messen zu können.

### 2.2.2 GreenFeed

Das GreenFeed-System ermöglicht die Messung einer größeren Anzahl von Kühen in ihrer gewohnten Umgebung. Je nach Bedingungen (Tier- und Stallgröße, Futter etc.) können in einer Station bei ca. 20 Tieren die  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Emissionen gemessen werden (C-Lock Inc., 2015). Dazu wird den Kühen mehrmals am Tag Kraftfutter in einem Futterautomaten angeboten. Die Tiere befinden sich dadurch im Durchschnitt pro Besuch 3-7 Minuten im Automaten und fressen. Luft wird kontinuierlich aus dem Trog eingesogen und auf die Konzentrationen von  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  und Propan (periodisch abgeben als Referenzgas) analysiert. Mit einer Umrechnungsformel wird aus den analysierten Gasen die  $\text{CH}_4$ -Emission in g/d geschätzt (Hammond et al., 2016b; Hristov et al., 2015a; Velazco et al., 2016).

Obwohl 3 % des gebildeten CH<sub>4</sub> von der Kuh über den Anus abgegeben und somit nicht vom GreenFeed erfasst werden (Muñoz et al., 2012), fanden Velazco et al. (2016) bei der CH<sub>4</sub>-Messung von Milch- und Mastrindern keine signifikanten Unterschiede zwischen den gemessenen CH<sub>4</sub>-Emissionen im Vergleich zur Respirationskammer. Dies lässt vermuten, dass die Verluste über den Flatus zu vernachlässigen sind. Auch bei anderen Messtechniken, welche die CH<sub>4</sub>-Emission nur aus der Atemluft messen, sollten die CH<sub>4</sub>-Verluste aus dem Anus eine untergeordnete Rolle spielen. In der Studie von Rischewski et al. (2017) konnte mit Hilfe einer hierarchischen Clusteranalyse festgestellt werden, dass GreenFeed und Respirationskammer die in der Studie ausgewerteten Kühe in den Merkmalen CH<sub>4</sub>-Produktion (gesamte abgegebene CH<sub>4</sub>-Menge in g/d) und CH<sub>4</sub>-Ertrag (abgegebene CH<sub>4</sub>-Menge je Einheit Futterraufnahme) gleich rangierten. In einer weiteren Studie wurde festgestellt, dass die von GreenFeed und Respirationskammer gemessene absolute CH<sub>4</sub>-Produktion und der CH<sub>4</sub>-Ertrag ähnlich hoch waren. Bei genauerer Betrachtung des „concordance correlation coefficient“ (Konkordanz-Korrelations-Koeffizient) (CCC) stellte sich jedoch heraus, dass die von beiden Techniken gemessenen Kühe unterschiedlich rangiert wurden (CCC = 0,06-0,10) (Hammond et al., 2015a), wobei der CCC das Maß der Übereinstimmung zweier Messmethoden angibt und dabei die Genauigkeit (accuracy) und die Streuung (precision) mit einbezieht (Barnhart et al., 2007; Lin, 1989). Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Rangierungen könnte die große Varianz der GreenFeed-Daten je Kuh darstellen, so dass die gemessenen Werte im Mittel übereinstimmten, den Tieren jedoch individuell ein anderer Rang als bei Messungen mit der Respirationskammer zugewiesen wurde. Die Kühe besuchten in dieser Studie 1,97-mal am Tag den GreenFeed. Eine häufigere, gleichmäßig über den Tag verteilte Probennahme würde zu einer höheren Übereinstimmung mit der Respirationskammer führen (Hammond et al., 2015b). Die wiederholte Aufnahme der Krafffuttergabe und damit die wiederholte CH<sub>4</sub>-Messung stellen trotz allem einen Vorteil dar (Hegarty, 2013), da diese Messungen ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand und verteilt über den Tag hinweg erfolgen. Beim GreenFeed wird jedoch nur die CH<sub>4</sub>-Emission während des Fressens gemessen, andere Aktivitäten bleiben unberücksichtigt (Storm et al., 2012). Ein weiterer Nachteil ist, dass das Tier den Futterautomaten freiwillig besuchen muss. Geht es nicht in den Automaten, findet keine Messung statt. Mithin kann es vorkommen, dass sich einzelne Tiere nur schwer an das System gewöhnen lassen. Außerdem ist es erforderlich, dass das Tier seinen Kopf für mindestens 3 Minuten komplett im Trog versenkt, um zuverlässige Daten zu erhalten. Die Wiederholbarkeit der Messergebnisse betrug 0,64-0,81 (Hristov et al., 2015a).

### 2.2.3 SF<sub>6</sub>-Methode

Bei der SF<sub>6</sub>-Methode wird neben CH<sub>4</sub> noch ein zweites Gas, Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>), gemessen. Den Kühen wird dazu ein Bolus, ein gasdurchlässiges Röhrchen, mit SF<sub>6</sub> in den Pansen eingegeben. Verschiedene Messungen fanden an 5 bis 262 aufeinanderfolgenden Tagen statt (Fitzsimons et al., 2013; Muñoz et al., 2012). Der Bolus gibt SF<sub>6</sub> mit einer bekannten Rate im Pansen frei (SF<sub>6</sub>-Pansen). Oberhalb der Nasenlöcher der Tiere wird kontinuierlich Atemluft eingesaugt und in einem Kanister auf dem Rücken der Tiere gespeichert. Mittels Gaschromatographie wird die CH<sub>4</sub>- und SF<sub>6</sub>-Konzentration einer Gasprobe aus dem Kanister (CH<sub>4</sub>-Kanister, SF<sub>6</sub>-Kanister) ermittelt (Johnson et al., 1994; Grainger et al., 2007, 2010). Anschließend kann mithilfe der folgenden Formel die CH<sub>4</sub>-Produktion berechnet werden:

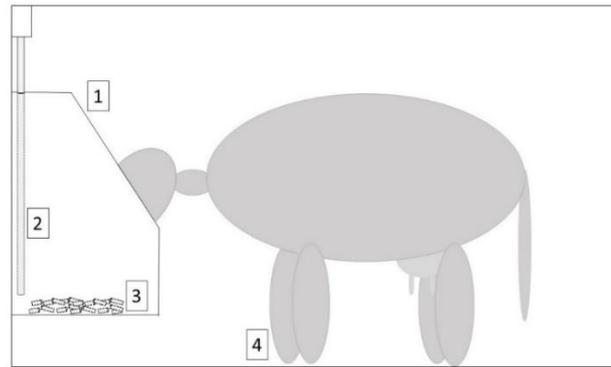
$$CH_4 \left( \frac{g}{d} \right) = SF_6 (Pansen) * \frac{CH_4 (Kanister)}{SF_6 (Kanister)} \quad (\text{Johnson et al., 1994}) \quad (2)$$

Der Vorteil dieser Methode ist, dass sich die Tiere frei in ihrer gewohnten Umgebung bewegen können. Die Messung ist auch bei Weidehaltung möglich und erfolgt über 24 Stunden an mehreren Folgetagen (Fitzsimons et al., 2013; Grainger et al., 2007; Storm et al., 2012). Die Übereinstimmung der CH<sub>4</sub>-Messung zwischen SF<sub>6</sub>-Methode und Respirationskammer ist sehr hoch. Die mit der SF<sub>6</sub>-Technik gemessenen CH<sub>4</sub>-Emissionen lagen zwar zu 4 % unter beziehungsweise zu 2 % über den Werten aus der Respirationskammer, jedoch waren diese Unterschiede nicht signifikant (Grainger et al., 2007; McGinn et al., 2006). Es ist dennoch zu beachten, dass in diesen Versuchen der Vergleich zwischen Respirationskammer und SF<sub>6</sub>-Methode innerhalb einer Kammer stattfand. In einem Versuch mit Schafen, die über 6 Tage in Stoffwechselbuchten in einem überdachten Hof mit der SF<sub>6</sub>-Technik und anschließend 4 Tage in Respirationskammern gemessen wurden, konnte nur eine geringe Beziehung der beiden Techniken nachgewiesen werden (Korrelationskoeffizient = 0,14) (Pinares-Patiño et al., 2011). Jedoch stellt die Korrelation kein gutes Maß für den Vergleich von verschiedenen Techniken dar, da die Übereinstimmung der Werte nicht direkt miteinander verglichen wird. Vielmehr wird durch die Korrelation die Intensität der Beziehung dargestellt (Bland & Altman, 2010). Bessere Vergleichsinstrumente, wie zum Beispiel CCC und „coefficient of individual agreement“ (Koeffizient der individuellen Übereinstimmung) (CIA) würden eventuell einen besseren Zusammenhang zwischen SF<sub>6</sub>-Technik und Respirationskammer ergeben (Barnhart et al., 2007; Lin, 1989). Die in der Studie von Pinares-Patiño et al. (2011) um 6 % signifikant höheren CH<sub>4</sub>-Werte der SF<sub>6</sub>-Technik wurden auf eine geringere tatsächliche – als

die vorher kalibrierte – Abgaberate des SF<sub>6</sub> zurückgeführt. Zudem wäre es möglich, dass der Anteil an SF<sub>6</sub> in der Atmung weniger repräsentativ ist als der Anteil an CH<sub>4</sub>. Eine weitere technische Herausforderung stellt die Abgaberate des SF<sub>6</sub>-Gases dar, die über die gesamte Messperiode konstant sein muss (Storm et al., 2012). Zusätzlich müssen die Tiere erst an das Geschirr mit den Geräten gewöhnt werden. Das bedeutet einen zusätzlichen Arbeitsaufwand. (Johnson & Johnson, 1995; Storm et al., 2012). Der Einsatz von SF<sub>6</sub> als Markergas ist außerdem fraglich, da das Treibhausgaspotenzial nur etwas geringer ist als das von CH<sub>4</sub> (SF<sub>6</sub> = 23,5; CH<sub>4</sub> = 28) und SF<sub>6</sub> eine viel höhere Verweildauer in der Atmosphäre aufweist (SF<sub>6</sub> = 3.200 Jahre; CH<sub>4</sub> = 12,4 Jahre) (Myhre et al., 2013).

## 2.2.4 Sniffer

Mit der „Sniffer“-Technik kann während des Melkvorganges im Automatischen Melksystem (AMS) die CH<sub>4</sub>- und CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atemluft der Kühe gemessen werden. Dafür wird mit einem im Futtertrog des AMS installierten Ansaugröhrchen kontinuierlich Atemluft angesaugt (1-4 l/min), zu einem Sensor gepumpt und in Intervallen von 1-5 Sekunden mittels Infrarottechnik analysiert. Hier wird entweder nur die Konzentration von CH<sub>4</sub> in parts per million (ppm) oder auch die Konzentration von CO<sub>2</sub> in ppm erfasst (Abbildung 3) (Difford et al., 2016; Garnsworthy et al., 2012a; Pszczola et al., 2017). Um die CH<sub>4</sub>-Emission in l/d zu schätzen, wird das Verhältnis von CH<sub>4</sub>- zu CO<sub>2</sub>-Konzentration bestimmt und mit der erwarteten CO<sub>2</sub>-Emission multipliziert (Madsen et al., 2010). Die erwartete CO<sub>2</sub>-Emission kann aus der Wärmeproduktion abgeleitet werden (Pedersen et al., 2008), die sich wiederum aus der Lebendmasse, dem Laktationstag und der energiekorrigierten Milchleistung (ECM) schätzen lässt (Pederson & Sällvik, 2002). Eine Umwandlung von l/d in g/d wird durch die Multiplikation mit der CH<sub>4</sub>-Dichte erzielt (Pszczola et al., 2017).



**Abbildung 3: AMS mit Futtertrog (1), Sniffer-Ansaugrohr (2), Pellets (3) und Kuh (4) (eigene Darstellung)**

Der Sniffer kann mit zwei verschiedenen Sensoren ausgestattet sein. Difford et al. (2016) stellten die Funktionsweise des NDIR (Nicht-Dispersive-Infrarotspektroskopie) (Guardian NG/Gascard, Edinburgh Instruments Ltd, Livingston, UK) und des FTIR (Fourier-Transformations-Infrarot-Analyse) (Gaset DX 4000, Gaset Technologies Oy, Helsinki, Finnland) vor und führten einen Vergleich zu deren Übereinstimmung durch. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass beide Techniken – nach Kalibrierung des Gaset – eine gute Übereinstimmung zeigten und gewonnene Datensätze problemlos kombiniert werden können.

Der Vorteil dieser Methode ist, dass damit viele Tiere auf Praxisbetrieben und in ihrer täglichen Routine, während des Melkens, gemessen werden können (Garnsworthy et al., 2012a) und so mehrere Profile der  $\text{CH}_4$ -Konzentration pro Tag erfasst werden können. In der Studie von Difford et al. (2016) gingen die Kühe im Durchschnitt  $2,4 \pm 0,86$  mal am Tag zum Melken. Die Wiederholbarkeit der einzelnen Sniffer-Messungen lag zwischen 0,35-0,38 (Lassen et al., 2012; Lassen & Løvendahl, 2016). Wie beim GreenFeed kann die  $\text{CH}_4$ -Produktion des Tieres nur bei einer Aktivität (Fressen während des Melkens) gemessen werden (Lassen et al., 2012). Trotz dieser Gemeinsamkeit von Sniffer und GreenFeed stellten Hristov et al. (2016) nur eine geringe Pearson Korrelation ( $r = 0,40$ ) und CCC (= 0,34) fest. Garnsworthy et al. (2012a) fanden dagegen eine gute Korrelation zwischen Sniffer und Respirationsskammer ( $r = 0,73$ ) und schlussfolgerten, dass Gasmessungen während des Melkens und Fressens Rückschlüsse auf die tägliche  $\text{CH}_4$ -Abgabe zulassen.

## 2.2.5 Laser-Methan-Detektor

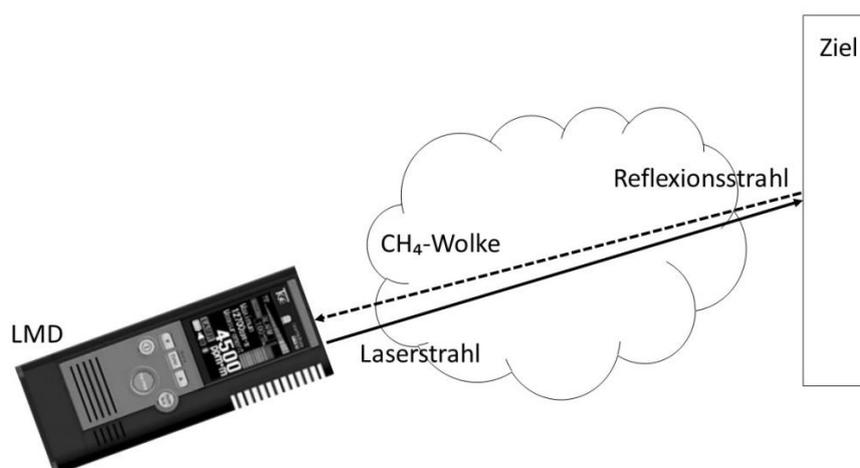
Mit dem Laser-Methan-Detektor (LMD) (Hersteller Tokyo Gas Engineering Solutions, Tokyo, Japan; Vertrieb: Crowcon Gas Detection Instruments Ltd., Abingdon, UK) (Abbildung 4) ist

es möglich, die  $\text{CH}_4$ -Konzentration in der Atemluft bei Kühen an unterschiedlichen Orten, unter den verschiedensten Bedingungen zu messen. Für die hiesige Studie wurde die  $\text{CH}_4$ -Konzentration bei Milchkühen in Versuchs- und Praxisbetrieben unter verschiedenen Bedingungen gemessen, wobei die neueste Generation des LMD zum Einsatz kam.



**Abbildung 4: Laser-Methan-Detektor (Tokyo Gas Engineering Solutions, Tokyo, Japan) (Bild: S.Mühlbach)**

Chagunda et al. (2009b) stellten fest, dass mithilfe des LMD  $\text{CH}_4$  bei Kühen in ihrer gewohnten Umgebung nicht-invasiv und aus 3 m Abstand gemessen werden kann. Das Messprinzip beruht auf der Infrarot-Absorptionsspektroskopie, mit der Konzentrationen zwischen 1-50.000 ppmxm gemessen werden können (Tokyo Gas Engineering Solutions, 2006). Die vom Gerät angezeigte Einheit ppmxm ist die kumulative  $\text{CH}_4$ -Konzentration entlang des gesamten Laserpfades. Bei Division durch die Länge des Laserpfades in m erhält man die durchschnittliche Konzentration in ppm. Mit Hilfe der „Offset“-Funktion ist es möglich, die  $\text{CH}_4$ -Konzentration der Umgebungsluft zu kalibrieren (Chagunda et al., 2013).



**Abbildung 5: Funktionsweise des LMD (nach Crowcon Gas Detection Instruments Ltd.)**

Der Laser erreicht eine hohe Genauigkeit der CH<sub>4</sub>-Messung, da die Wellenlänge der Lichtquelle auf eine spezifische Absorptionswellenlänge von CH<sub>4</sub> (1.653 nm) fixiert ist und es so zu keiner Überlagerung mit anderen Gasen kommt. Die Abschwächung des reflektierten und vom Gerät wieder registrierten Laserstrahls ergibt dann die CH<sub>4</sub>-Konzentration in der Luftsäule zwischen LMD und Ziel, in diesem Falle dem Kuhmaul (Abbildung 5) (Chagunda & Yan, 2011; Tokyo Gas Engineering Solutions, 2006). Die CH<sub>4</sub>-Konzentration wird in Echtzeit alle 0,5 Sekunden erfasst, so dass auftretende Schwankungen im CH<sub>4</sub> der Luft, z. B. durch Fluktuation oder variierende Verdauungsprozesse, genau erfasst werden können (Chagunda et al., 2013; Ricci et al., 2014). Die gemessenen Methankonzentrationen werden via Bluetooth an ein Smartphone gesendet und dort gespeichert. Von dort aus können die Daten zur weiteren Verarbeitung auf einen Computer übertragen werden. Ein weiterer Vorteil des LMD ist, dass er klein und handlich ist. Das Gewicht des LaserMethaneMini-green beträgt 530 g und die Größe 70 x 179 x 42 mm, so dass er gut geeignet ist, um ihn zu transportieren und an verschiedenen Messorten einzusetzen (Tokyo Gas Engineering Solutions, 2006). Zur optischen Kontrolle der Zielführung gibt es neben dem Infrarotlaser noch einen grünen Lichtlaser, der zum Zielen dient und auch bei starker Sonneneinstrahlung noch als grüner Punkt zu erkennen ist. Zu beachten ist, dass der Laserstrahl immer ausreichend reflektiert werden muss. Eine Folge schlechter Reflektion ist das gehäufte Auftreten von fehlerhaften, vor allem nichtproportional hohen Messwerten (Ricci et al., 2014). Die Wiederholbarkeit von Messungen mit dem LMD im wöchentlichen Abstand wurden bisher mit 0,07 angegeben (Pickering et al., 2015).

Ein Sensorvergleich zwischen LMD und verschiedenen Respirationskammern ergab eine hohe Übereinstimmung der in der Kammerluft gemessenen CH<sub>4</sub>-Werte ( $r_{\text{Pearson}} = 0,86-0,98$ ;  $r_{\text{CCC}} = 0,67-0,93$ ) (Sorg et al., 2017b). Der LMD war in der Lage, bereits geringe Unterschiede in der CH<sub>4</sub>-Konzentration festzustellen, obwohl er ursprünglich nur für das Aufspüren von sehr hohen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen aufgrund von Gaslecks entwickelt worden war (Tokyo Gas Engineering Solutions, 2006). Selbst Unterschiede in der CH<sub>4</sub>-Konzentration bei verschiedenen Aktivitäten der Kuh in der Respirationskammer wurden vom LMD ähnlich detektiert wie vom Gassensor der Respirationskammer. Darüber hinaus zeigten zwei baugleiche LMD-Geräte bei hohen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen in Respirationskammern und bei niedrigeren CH<sub>4</sub>-Konzentrationen in der Stallluft eine sehr hohe Übereinstimmung, was wichtig ist, wenn mehrere Geräte parallel zum Einsatz kommen (Sorg et al., 2017b). Ricci et al. (2014) verglichen die CH<sub>4</sub>-Produktion (g/d) in einer Respirationskammer mit CH<sub>4</sub>-Konzentrationen (µl/l) der Atemluft von Rindern im Stall. Hierbei wurden 72 Mastbullen drei Mal am Tag für jeweils vier Minuten an drei Folgetagen gemessen. In der darauffolgenden Woche wurden die Tiere in

Respirationskammern eingestallt. Es zeigte sich, dass die Mittelwerte aus der Messung mit dem LMD moderat mit den Mittelwerten aus der Respirationskammer korrelierten ( $r = 0,53$ ) (Ricci et al., 2014).

Auch die Übereinstimmung der  $\text{CH}_4$ -Messung mittels LMD mit Messungen von Sniffer oder GreenFeed wurde überprüft. Der Vergleich der mittleren  $\text{CH}_4$ -Konzentration aller Spitzen in einem LMD-Profil mit der gemittelten  $\text{CH}_4$ -Produktion (g/d) des GreenFeed zeigte zunächst einen geringen CCC und einen niedrigen CIA (Sorg et al., 2018). Der CIA vergleicht, ob die Abweichung der Messungen aus zwei Techniken größer ist als die Varianz innerhalb einer Messmethode (Barnhart et al., 2007). Eine weitere Maßzahl für die Übereinstimmung zweier Techniken, die die Beziehung wiederholter Messungen an einem Tier berücksichtigt, ist die „repeated measures correlation“ (Korrelation der wiederholten Messungen) ( $r_{\text{RM}}$ ) (Bakdash & Marusich, 2017), wobei dieser Wert als Hilfsmerkmal für die genetische Korrelation herangezogen werden kann (Sorg et al., 2018). Der  $r_{\text{RM}}$  zwischen LMD und GreenFeed war im Gegensatz zu CCC und CIA moderat. LMD-Werte, die mittels einer aus GreenFeed-Daten aufgestellten Schätzgleichung in g/d hochgerechnet wurden, ergaben eine bessere Übereinstimmung mit dem GreenFeed bezüglich der drei genannten Kenngrößen. Bei zwei weiteren Versuchen, bei denen der LMD mit FTIR- und NDIR-Sniffen verglichen wurde, wurden die LMD-Werte mit Hilfe der gleichen Schätzgleichung ebenfalls zur  $\text{CH}_4$ -Emission umgerechnet und mit den Sniffer-Daten verglichen. Sorg et al. (2018) fanden eine geringe CCC, eine hohe CIA und eine starke  $r_{\text{RM}}$ . Daraus schlussfolgerten sie, dass eine gewisse Übereinstimmung der beiden Techniken vorhanden war. Einzelne Tiere wurden jedoch zum Teil unterschiedlich rangiert (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Vergleich von  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen und Emissionen gemessen mit dem Laser-Methan-Detektor (LMD), GreenFeed und Sniffer (Sorg et al., 2018)**

LMD-Merkmal	Vergleichstechnik	CCC <sup>1</sup>	CIA <sup>2</sup>	$r_{\text{RM}}$ <sup>3</sup>
<b>pmean</b> <sup>4</sup> (ppm×m)	GreenFeed	0,02	0,06	0,66
<b>gCH(GF)</b> <sup>5</sup> (g/d)	GreenFeed	0,22	0,99	0,74
	Sniffer (FTIR)	0,28	0,91	0,57
	Sniffer (NDIR)	0,17	0,87	0,60

<sup>1</sup> Konkordanz-Korrelations-Koeffizient, <sup>2</sup> coefficient of individual agreement, <sup>3</sup> repeated measures correlation,

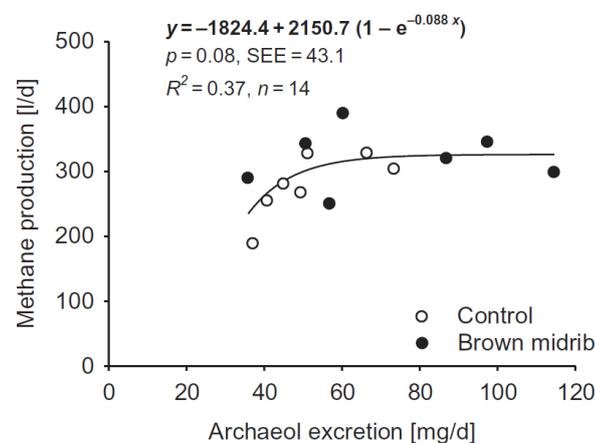
<sup>4</sup> mittlere  $\text{CH}_4$ -Konzentration aller Spitzen in einem LMD-Profil, <sup>5</sup> anhand von GreenFeed-Daten kalibrierte  $\text{CH}_4$ -Emission

## 2.2.6 Indirekte Berechnung über Schätzgleichungen

Die bisher genannten Messmethoden zur Bestimmung der CH<sub>4</sub>-Produktion von Einzeltieren erfordern alle die Anschaffung zusätzlicher Techniken und sind zum Teil arbeitsintensiv. Um Daten von vielen Tieren kostengünstig und einfach erheben zu können, wäre es von Vorteil, wenn routinemäßig erhobene Daten für die Bestimmung der CH<sub>4</sub>-Emissionen genutzt werden könnten. Dabei ist es wichtig, dass diese Indikatoren eine hohe Korrelation mit der CH<sub>4</sub>-Emission aufweisen (Visker et al., 2014). Diese Anforderungen erfüllen die Hilfsmerkmale der Milchfettsäuren und das Milchinfrarotspektrum. Die Verbindung zwischen CH<sub>4</sub>-Produktion und Milchfettsäuren liegt in der De-novo-Fettsäuresynthese. Die Fettsäuren Acetat und Butyrat spielen bei der CH<sub>4</sub>-Bildung im Pansen eine zentrale Rolle und sind ebenso Grundbausteine der De-novo-Synthese in der Milchdrüse (Bruckmaier, 2010). Bei der monatlichen Milchleistungsprüfung (MLP), die bei einem großen Teil der Milchkühe in Deutschland durchgeführt wird, wird die Technik der Mittel-Infrarot-Absorptionsspektroskopie (MIR) verwendet, um den Gehalt der Hauptinhaltsstoffe Fett, Eiweiß und Laktose zu bestimmen. Dabei wird eine Probe mit elektromagnetischer Strahlung (Infrarotlicht der mittleren Wellenlänge  $\cong 4.000-400 \text{ cm}^{-1}$  (Smith, 2011)) angeregt. Dabei kommt es bei speziellen Frequenzen zu unterschiedlich starken Schwingungen aufgrund der vorherrschenden chemischen Bindungen innerhalb der einzelnen Moleküle. Besonders die Bindungen von verschiedenen funktionalen Gruppen (zum Beispiel –OH und –CH<sub>3</sub>) sind interessant, da sie bei unterschiedlichen Frequenzen die Strahlung verschieden absorbieren (Coates, 2006). Daraus ergibt sich ein stoffspezifisches Frequenzbild, ein Absorptionsspektrum. Mit diesem ist es möglich die Milchhaltsstoffe, aber auch die Zusammensetzung des Fetts beziehungsweise der Milchfettsäuren in der Milch über Schätzgleichungen zu bestimmen (Marchi et al., 2014; Soyeurt et al., 2006). Mit Hilfe dieser Merkmale und parallelen Messungen der CH<sub>4</sub>-Emission wurden Regressionsgleichungen erstellt, die es ermöglichen, Vorhersagen für die individuelle CH<sub>4</sub>-Emission zu treffen (Chilliard et al., 2009; Dijkstra et al., 2011).

Ein zweiter Ansatz, um die CH<sub>4</sub>-Produktion ohne direkte Messung zu schätzen, ist die Bestimmung des Archaeolgehalts im Kot. Archaeol stammt aus der Zellmembran der Archaeen, zu denen methanogene Mikroorganismen gehören, welche sich im Pansen aufhalten. Sterben die Archaeen ab, so wird das Archaeol über den Kot abgegeben. Aus diesem Grund wird angenommen, dass die Menge an Archaeol im Kot Auskunft über die Menge bzw. die Aktivität der Methanogenen im Pansen gibt. Es könnte somit ein Hilfsmerkmal zur Schätzung der CH<sub>4</sub>-Produktion sein (Gill et al., 2010; Jain et al., 2014). In einer Studie wurde die Beziehung zwischen Archaeol und CH<sub>4</sub>-Emission bei je 8 Färsen der Rassen Jersey x Holstein-

Friesian und Holstein-Friesian in einer Respirationsskammer untersucht. Als Ergebnis konnte eine Beziehung zwischen CH<sub>4</sub>-Produktion und Archaeolgehalt im Kot festgestellt werden (McCartney et al., 2013). In einem anderen Versuch wurde im Gegensatz dazu kein signifikanter Zusammenhang zwischen Archaeolgehalt und CH<sub>4</sub>-Emission festgestellt. Die Tendenz, dass mit zunehmendem Gehalt an Archaeol auch die CH<sub>4</sub>-Emission anstieg, war jedoch zu erkennen (Abbildung 6) (Schwarm et al., 2015). Die in den genannten Studien gefundenen Zusammenhänge zwischen Archaeolgehalt im Kot und der gemessenen CH<sub>4</sub>-Emission waren schwach oder nicht signifikant. Weiterhin stellt das Erfassen und Analysieren der individuellen Kotproben einen hohen Arbeitsaufwand dar, weshalb dieses Hilfsmerkmal nicht zur Schätzung der CH<sub>4</sub>-Emission geeignet ist.



**Abbildung 6: Beziehung des Archaeolgehalts im Kot (Archaeol excretion) und der CH<sub>4</sub>-Emission (Methane production) von Holstein-Färsen (Schwarm et al., 2015)**

Im folgenden Kapitel 2.3 wird auf die vielfältigen Einflussfaktoren der CH<sub>4</sub>-Produktion eingegangen. Vor allem die Höhe der Futteraufnahme und die Rationszusammensetzung (Anteil an Rohfaser (besonders ADF, NDF) und Krafffutter) sind bedeutende Faktoren der CH<sub>4</sub>-Produktion, weshalb verschiedenste Formeln zur Schätzung der CH<sub>4</sub>-Emission aus Futterdaten entwickelt wurden. Ellis et al. (2007) trugen Schätzgleichungen von 83 Studien mit Mastrindern und 89 Studien mit Milchkühen zusammen, die in den USA und in Canada erstellt wurden. Diese Sammlung an Schätzgleichungen lässt sich mit Studien aus Europa ergänzen (de Haas et al., 2011; Mc Court et al., 2006).

In Tabelle 2 ist eine Auswahl an verschiedenen Ansätzen für Schätzgleichungen aufgeführt, wobei die Phänotypen der letzten beiden Schätzmethode nicht einfach oder routinemäßig erhoben werden können. Somit werden hier die Anforderungen von Visker et al. (2014) an Indikatoren nicht vollständig erfüllt, weshalb sich die Frage nach dem Nutzen dieser Schätzgleichungen stellt. Dennoch stellen diese Methoden Alternativen zur direkten CH<sub>4</sub>-Messung

dar. Da diese Schätzer die Variation der CH<sub>4</sub>-Emission nie vollständig genau abbilden können, sondern nur einzelne Aspekte beleuchten, ist es ratsam, zwei oder mehr Schätzer zu verwenden. Die Genauigkeit der Schätzung kann so um 15-35 % erhöht werden (Negussie et al., 2017a). Ihre Grenze finden Schätzgleichungen hinsichtlich ihrer Robustheit und Anwendbarkeit in unterschiedlichen Produktionssystemen (de Haas et al., 2018). So variierten zwischen unterschiedlichen Studien geschätzte Heritabilitäten, basierend auf CH<sub>4</sub>-Werten aus Schätzgleichungen, stärker als wenn diese direkt aus gemessenen CH<sub>4</sub>-Werten geschätzt wurden (Brito et al., 2018).

**Tabelle 2: Publikationen zur Schätzung der CH<sub>4</sub>-Konzentration bei Milchkühen**

Ausgangsvariable(n)	geschätzter CH <sub>4</sub> -Phänotyp	Quelle
Milchfettsäuren	CH <sub>4</sub> [g/kg TM-Aufnahme]	Dijkstra et al., 2011
	CH <sub>4</sub> [g/d]	Chilliard et al., 2009
Milchinfrarotspektrum	CH <sub>4</sub> [g/d]	Kandel et al., 2017
	CH <sub>4</sub> [g/kg Milch]	Dehareng et al., 2012
Archaeolgehalt im Kot	CH <sub>4</sub> [g/kg TM-Aufnahme]	McCartney et al., 2013
TM-Aufnahme & Rationskomponenten	CH <sub>4</sub> [g/d]	de Haas et al., 2011
		Mc Court et al., 2006

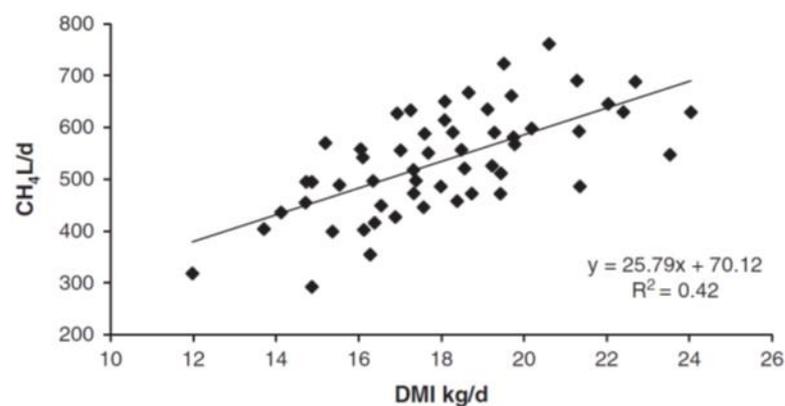
## 2.3 Einflussfaktoren auf die CH<sub>4</sub>-Bildung und CH<sub>4</sub>-Messung

Die absolute Höhe der gemessenen CH<sub>4</sub>-Emission eines Tieres ist von vielen verschiedenen Faktoren abhängig, auf die im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

### 2.3.1 Futteraufnahme

Am bedeutendsten ist der Einfluss des Futters. Sowohl die durch das Tier aufgenommene Menge als auch die Zusammensetzung sind entscheidend für die CH<sub>4</sub>-Produktion im Pansen. Mehrere Studien zeigten einen positiven Zusammenhang zwischen CH<sub>4</sub>-Produktion und Trockenmasseaufnahme (DMI) (Brask et al., 2015; Mc Court et al., 2006; Grainger et al.,

2007; Yan et al., 2006). Die DMI und die CH<sub>4</sub>-Bildung verändert sich im Verlauf der Laktation (Garnsworthy et al., 2012b; Hüttmann et al., 2009). Bell et al. (2014) konnten einen Anstieg der CH<sub>4</sub>-Emissionen bis zur 20. Laktationswoche und Garnsworthy et al. (2012b) bis zur 10. Laktationswoche feststellen. Beide Autoren beschreiben eine konstante CH<sub>4</sub>-Emission nach dem Anstieg, wobei letzterer einen Einfluss der Trächtigkeit beschreibt. So gab es einen Trend, dass nach der 20. Trächtigkeitswoche die CH<sub>4</sub>-Emissionen sanken (Garnsworthy et al., 2012b). Difford et al. (2017) fanden eine starke genetische Korrelation zwischen der CH<sub>4</sub>-Produktion und der DMI von 0,75. In einer Studie von Grainger et al. (2007) wurde ein linearer Zusammenhang von 17,1 g CH<sub>4</sub> je kg DMI bei Milchkühen in Respirationskammern bestimmt. Die lineare Regression der von Brask et al. (2015) ebenfalls in Respirationskammern gemessenen CH<sub>4</sub>-Emission auf den DMI ergaben ein Bestimmtheitsmaß (R<sup>2</sup>) von 0,42 (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Beziehung zwischen CH<sub>4</sub>-Emission und Trockenmasseaufnahme (DMI) (Brask et al., 2015)**

Dieser positive Zusammenhang ist jedoch nur absolut vorhanden. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass die CH<sub>4</sub>-Produktion bezogen auf ein zusätzlich aufgenommenes Kilogramm Futter bzw. eine Einheit mehr aufgenommener Bruttoenergie (GE) abnimmt (Yan et al., 2010). So sank in einem Versuch mit Milchkühen der CH<sub>4</sub>-Ausstoß auf 76 %, 59 %, 42 % und 24 % des Erhaltungsbedarfs bei gesteigertem Fütterungslevel auf das 2-, 3-, 4- und 5-fache des Erhaltungsbedarfes (Yan et al., 2006). Diese Verdünnung des CH<sub>4</sub>-Anteils am Erhaltungsbedarf ist auf eine gesteigerte Passagerate der Ingesta durch den Pansen zurückzuführen. Hierbei verbleibt den Pansenmikroben weniger Zeit zur Verarbeitung der Futterbestandteile, und weniger Ausgangsstoffe für die CH<sub>4</sub>-Synthese können gebildet werden (Yan et al., 2006, 2010). Ein anderer Grund die Futteraufnahme zu betrachten, ist die Restfutteraufnahme (RFI). Hierbei handelt es sich um ein Merkmal, das die Differenz zwischen der aktuell gemessenen Futteraufnahme und der geschätzten Futteraufnahme für Erhaltungsbedarf, Leistung und einer eventuellen Trächtigkeit darstellt (Connor, 2015). Tiere mit

geringem RFI sind effizienter, da sie für die gleiche Leistung weniger Futter benötigen als Tiere mit hohem RFI (Waghorn & Hegarty, 2011). In einem Versuch mit Mastbullen zeigten Tiere mit geringem RFI im Gegensatz zu Tieren mit hohem RFI eine erhöhte Verdaulichkeit des Futters. Dadurch stieg die Umsatzrate der Nährstoffe an und es kam zu einer erhöhten CH<sub>4</sub>-Produktion je Futtereinheit (Nkrumah et al., 2006). Zu gleichen Ergebnissen kamen auch de Haas et al. (2011) und Fitzsimons et al. (2013). Folge der gesteigerten Verdaulichkeit ist eine geringere Futteraufnahme je Tag oder Produktionseinheit, was wiederum insgesamt zu geringeren CH<sub>4</sub>-Emissionen je Tag oder Produkteinheit führt. Umgekehrt brachte eine höhere Trockenmasseaufnahme um 1 kg Futter je Tag eine Zunahme der CH<sub>4</sub>-Emission von 13-23 g/d (Fitzsimons et al., 2013; Hegarty et al., 2007). De Haas et al. (2011) schätzten die Korrelation zwischen RFI und geschätzter täglicher CH<sub>4</sub>-Emission – aus Futteraufnahme und Rationszusammensetzung bestimmt – auf 0,51-0,66 über die gesamte Laktation einer Milchkuh.

Ergänzend zur Höhe der Futteraufnahme sollte auch deren Zeitpunkt berücksichtigt werden. So ist die Fermentationsrate im Pansen am höchsten, wenn frisches Futter aufgenommen wird. Im Tagesverlauf der CH<sub>4</sub>-Emissionen folgt deshalb kurz nach der Fütterung eine Spitze der CH<sub>4</sub>-Produktion. Mit zunehmendem Abstand zur Fütterung sinkt folglich auch die abgegebene CH<sub>4</sub>-Menge (Andreini et al., 2016; Bell et al., 2018; Eckert et al., 2018). Bei einem Versuch mit 18 Mastbullen der Rassen Brahman und Belmont Red wurde über 24 Stunden die CH<sub>4</sub>-Emission in Respirationsskammern gemessen. Ein Ergebnis war, dass die CH<sub>4</sub>-Emissionen nach der Fütterung um 35 % anstiegen (Tomkins et al., 2011).

### **2.3.2 Rationszusammensetzung**

Neben der Futtermenge und Zeit der Futteraufnahme hat auch die Rationszusammensetzung einen erheblichen Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Bildung. Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben wurde, ist die Bildung der flüchtigen Fettsäuren (FFS) Acetat und Butyrat aus Kohlenhydraten von großer Bedeutung für die CH<sub>4</sub>-Synthese (Moss et al., 2000). Besonders schwerverdauliche Kohlenhydrate in rohfaserreichen Futtermitteln tragen zur Synthese der beiden FFS bei und führen so zu höheren CH<sub>4</sub>-Emissionen (Moe & Tyrrell, 1979). Yan et al. (2006) verglichen die Auswirkungen unterschiedlicher Anteile an Silage, saurer (ADF) und neutraler Detergenzienfaser (NDF) auf 315 Holstein-Friesian-Kühe. Das Ergebnis war eine Verminderung der CH<sub>4</sub>-Abgabe um 0,80, 2,26 und 2,01 l/kg DMI, wenn sich der Rohfaseranteil und die

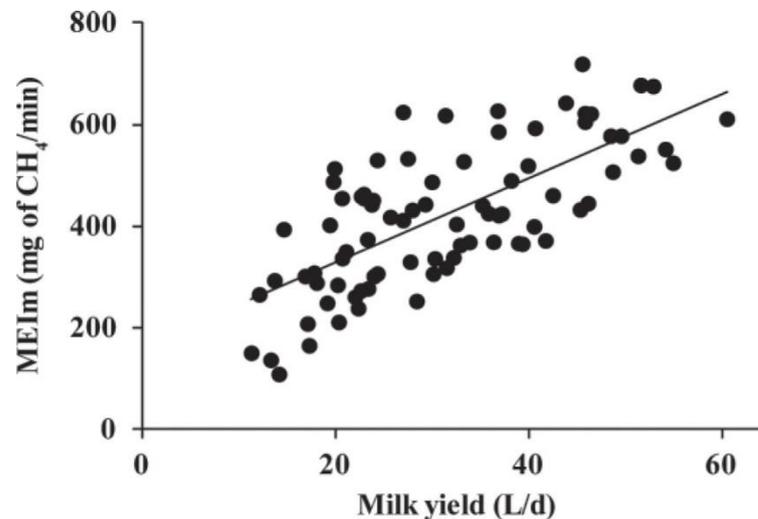
ADF- und NDF-Konzentration in der Ration um 1 % verringert. Andere Studien wiesen ebenfalls eine höhere CH<sub>4</sub>-Produktion bei einem gesteigerten Anteil an Rohfaser in der Ration nach (Chagunda et al., 2009a; Garnsworthy et al., 2012a). Ein erhöhter Einsatz von Krafftutter in der Ration führte wiederum zu weniger *Archaeen* und *Protozoen*, die für die CH<sub>4</sub>-Bildung wichtigen Mikroorganismen im Pansen (Rooke et al., 2014). In einem Versuch mit 72 Mastbullen wurden zwei Gruppen mit unterschiedlichen Krafftutteranteilen in der Ration in Respirationsskammern auf ihre CH<sub>4</sub>-Produktion getestet. Dabei wurde gezeigt, dass ein höherer Anteil an Krafftutter in der Ration die CH<sub>4</sub>-Produktion verminderte. Bei der Gruppe mit einem Krafftutteranteil über 900 g/kg Trockenmasse (TM) im Futter betrug die über CH<sub>4</sub> abgegebene Energie 0,039 MJ/MJ aufgenommener GE. Die Gruppe mit einem geringeren Krafftutteranteil (520 g/kg TM) erreichte höhere Werte von 0,062 MJ/MJ aufgenommener GE (Rooke et al., 2014). Ebenso fanden Chagunda et al. (2009a), Holter & Young (1992), Lassen et al. (2010) und Troy et al. (2016) einen signifikanten Einfluss des Krafftutteranteils in der Ration, der sich mindernd auf die CH<sub>4</sub>-Bildung auswirkte.

Neben Rohfaser und Kohlenhydraten kommt den Fetten in der Ration auch eine Bedeutung bezüglich ihrer Wirkung auf die CH<sub>4</sub>-Emission zu. Im Allgemeinen kommt es durch den Zusatz von Fetten in der Ration zu einer Depression der CH<sub>4</sub>-Produktion (Beauchemin et al., 2007; Holter & Young; McGinn et al., 2004, 1992; Patra, 2013). Die Hauptursache liegt in einer verminderten Futteraufnahme durch das Tier bzw. in der Substitution von Kohlenhydraten durch Fette, so dass weniger fermentierbares Material im Pansen zur Verfügung steht. Weiterhin hemmt Fett die Aktivität der methanogenen *Archaeen* und der Pansenprotozoen. Langkettige, mehrfach ungesättigte Fettsäuren dienen als H<sub>2</sub>-Akzeptor, wodurch sich eine zweite H<sub>2</sub>-Senke, neben der Reduktion von CO<sub>2</sub>, bildet. Dieser Vorgang wird Biohydrogenation genannt (Johnson & Johnson, 1995). Beauchemin et al. (2007) zeigten in einem Versuch, in dem drei verschiedene Fetttypen (Talg, Sonnenblumenöl und Sonnenblumenkerne) an Angus-Färsen verfüttert wurden, dass bei einem Zusatz von 33 g Fett je kg TM, unabhängig von der Art des Fettes, die CH<sub>4</sub>-Emissionen als Anteil der aufgenommenen GE um 15-25 % vermindert wurden.

### 2.3.3 Milchleistung

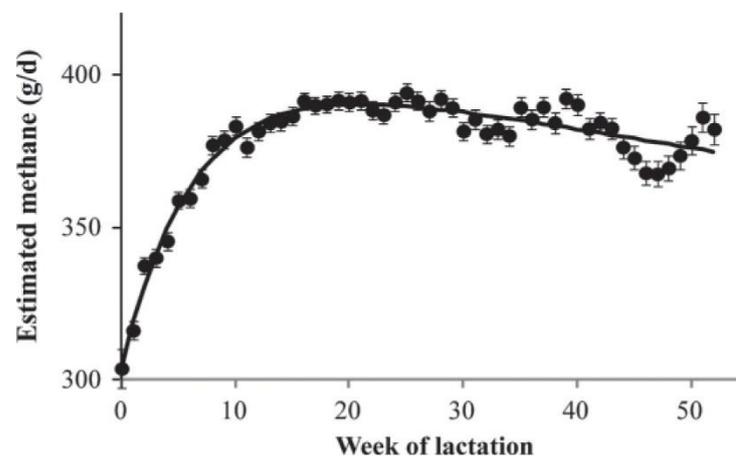
Eine weitere Einflussgröße auf die CH<sub>4</sub>-Produktion, die stark mit der Futteraufnahme in Beziehung steht, ist die Milchleistung. Eine absolute Betrachtung der beiden Merkmale zeigt,

dass mit zunehmender Milchleistung auch die CH<sub>4</sub>-Produktion ansteigt (Bell et al., 2014; Garnsworthy et al., 2012a; Haque et al., 2015; Yan et al., 2006). Die genetische Korrelation zwischen CH<sub>4</sub>-Produktion und ECM wurde auf 0,26 ( $\pm$  0,27) und 0,43 ( $\pm$  0,10) geschätzt (Breider et al., 2018; Lassen & Løvendahl, 2016). Garnsworthy et al. (2012b) zeigten dazu einen linearen Zusammenhang (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Beziehung zwischen tgl. Milchleistung (Milk yield) und dem CH<sub>4</sub>-Emissions-Index während des Melkens (MEIm) (Garnsworthy et al., 2012a)**

Der CH<sub>4</sub>-Ausstoß je Liter produzierter Milch sinkt jedoch, was auf eine effizientere Energienutzung von Tieren mit hoher Milchleistung hindeutet (Chagunda et al., 2009a; Negussie et al., 2017b). Im Verlauf der Laktation verändert sich die Milchleistung und damit auch die Futtermittelaufnahme einer Kuh (Martens & Breves, 2010). Dies führt dazu, dass sich auch die CH<sub>4</sub>-Produktion im Lauf der Zeit ändert. In den ersten 10-20 Wochen steigt die CH<sub>4</sub>-Emission an und bleibt danach auf einem relativ konstanten Niveau bzw. sinkt zum Ende der Laktation wieder leicht ab (Bell et al., 2014; Garnsworthy et al., 2012b; Kandel et al., 2017; Negussie et al., 2017b). Bell et al. (2014) untersuchten 1.964 Holstein-Kühe mit einem Sniffer (siehe Kapitel 2.2.4) in einem AMS. In der ersten Laktationswoche wurde ein Mittelwert der CH<sub>4</sub>-Emissionen von 2,2 mg CH<sub>4</sub> je Liter Milch gemessen, und in Laktationswoche 50 war der Mittelwert auf 3,2 mg CH<sub>4</sub> je Liter Milch gestiegen. Abbildung 9 zeigt den Verlauf der CH<sub>4</sub>-Produktion über die Wochen der Laktation.



**Abbildung 9: CH<sub>4</sub>-Emission (Estimated methane) während des Melkens innerhalb der Laktationswochen (Week of lactation) (Garnsworthy et al., 2012b)**

Erwartungsgemäß folgt die CH<sub>4</sub>-Kurve der Laktationskurve (mit leichter Verzögerung). Dies ist durch den Zusammenhang zwischen Milchmenge und Futteraufnahme ( $r = 0,52-0,85$ ) zu erklären (Martin & Sauvant, 2002). Die Futteraufnahme übt wiederum einen großen Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Produktion aus (Brask et al., 2015; Mc Court et al., 2006; Grainger et al., 2007; Yan et al., 2006). Am Ende der Laktation gibt es eine Diskrepanz zwischen den noch relativ hohen CH<sub>4</sub>-Emissionen und der mittlerweile abgesunkenen Milchproduktion der Kühe. Kandel et al. (2017) stellten dazu zwei Annahmen auf. Zum einen vermuteten sie, dass hochleistende Kühe – zu Beginn der Laktation – effizienter sind als gering leistende Kühe – am Ende der Laktation – und deshalb je Liter Milch weniger CH<sub>4</sub> erzeugen. Zum anderen ist die Kuh zu Beginn der Laktation nicht in der Lage, die für die stark einsetzende Milchleistung erforderlichen Mengen an Futter aufzunehmen. Damit ausreichend Energie für Erhalt und Leistung zur Verfügung steht, werden Körperreserven abgebaut, wodurch kein zusätzliches CH<sub>4</sub> gebildet wird. Die Veränderung der CH<sub>4</sub>-Produktion im Verlauf der Laktation zeigt, dass dieses Merkmal für die einzelnen Laktationsabschnitte charakterisiert werden sollte. De Haas et al. (2011) zeigten, dass die genetischen Korrelationen der geschätzten CH<sub>4</sub>-Emission zwischen zunehmenden Laktationsabschnitten immer mehr abnahmen. So korrelierte die CH<sub>4</sub>-Emission in den Wochen 1-5 noch zu 0,82 mit den Wochen 6-10, zu den Wochen 21-25 waren es jedoch nur noch 0,31 (de Haas et al., 2011). Diese Unterschiede weisen darauf hin, dass die CH<sub>4</sub>-Bildung in den einzelnen Laktationswochen von unterschiedlichen Faktoren bedingt wird und deshalb in den verschiedenen Abschnitten als unterschiedliche Merkmale anzusehen ist.

Zum Einfluss der Laktationsnummer wurden verschiedene Ergebnisse in der Literatur veröffentlicht. Sowohl der Anstieg der CH<sub>4</sub>-Emission mit zunehmender Laktationsnummer (Bell et

al., 2011; Chagunda et al., 2009a), als auch eine Verminderung der CH<sub>4</sub>-Emission (Garnsworthy et al., 2012b; Kandel et al., 2017) wurden in der Literatur beschrieben. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse von Bell et al. (2011) und Chagunda et al. (2009a) in g CH<sub>4</sub>/kg (energiekorrigierte) Milch angegeben sind und die von Garnsworthy et al. (2012b) und Kandel et al. (2017) in g CH<sub>4</sub>/Tag. Eine Berücksichtigung der Milchleistung in den letzten beiden Studien würde eventuell auch zu einer anderen Aussage der Versuche führen, weshalb dieser Vergleich mit Vorsicht betrachtet werden sollten. Der Anstieg der abgegebenen CH<sub>4</sub>-Menge ist mit einem allgemeinen Milchleistungsanstieg – der vor allem von Laktation eins bis drei stattfindet – zu erklären. Chagunda et al. (2009a) betrachteten in ihrer Studie nur die Laktationen eins bis drei und Bell et al. (2011) analysierten nur eine kleine Gruppe von Kühen (n = 24), die sich in einer höheren Laktation als drei befanden. Folglich konnte in diesen Studien keine Aussage über die CH<sub>4</sub>-Emission in höheren Laktationen erfolgen. Im Gegensatz dazu untersuchten Garnsworthy et al. (2012b) Kühe in den Laktationen eins bis zwölf und fanden, dass bis zur dritten Laktation die CH<sub>4</sub>-Emission anstiegen und ab der vierten Laktation wieder abnahmen. Obwohl in dieser Studie die Laktationsnummer keinen signifikanten Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Emission hatte, zeigt sie, dass der Einfluss der Parität stets überprüft werden sollte.

### 2.3.4 Lebendmasse

Ebenso wie die Milchleistung hängt auch die Lebendmasse eng mit der Futteraufnahme zusammen (phänotypische Korrelation ( $r_p$ ) = 0,59, genetische Korrelation ( $r_g$ ) = 0,43 (Veerkamp & Brotherstone, 1997)). Die Beziehung zur CH<sub>4</sub>-Produktion ist allerdings nicht so eindeutig. Hammond et al. (2015b) und Holter & Young (1992) konnten auch mit unterschiedlichen Bezugsbasen (CH<sub>4</sub> g/Tag oder CH<sub>4</sub> g/kg DMI) keinen Zusammenhang feststellen. In einem Versuch mit Schafen aus verschiedenen Betrieben konnte zwar eine Tendenz festgestellt werden, dass schwerere Tiere mehr CH<sub>4</sub> abgeben. Dieser Einfluss war zwischen den Betrieben jedoch nicht konsistent, so dass der Betrieb mit den schwersten Tieren die geringsten durchschnittlichen CH<sub>4</sub>-Emissionen aufwies. Andere Faktoren, wie z. B. die Futtermenge und -Verfügbarkeit, scheinen von größerer Bedeutung zu sein (Robinson et al., 2014b). Einige Studien berichten auch von einem positiven Zusammenhang zwischen Lebendmasse und CH<sub>4</sub>-Produktion (Antunes-Fernandes et al., 2016; Mc Court et al., 2006; Robinson et al., 2010). Eine positive genetische Korrelation von 0,34 ( $\pm$  0,22) wurde in einer Studie mit 314 Holstein-Kühen, bei denen mittels SF<sub>6</sub>-Technik CH<sub>4</sub> gemessen wurde, festgestellt (Breider et

al., 2018). Höhere Lebendmassen, die im Zusammenhang mit erhöhter CH<sub>4</sub>-Produktion stehen, könnten dadurch erklärt werden, dass für ein höheres Gewicht mehr Energie für den Erhalt der Körperfunktionen benötigt wird und so für eine gleichbleibende Milchleistung mehr Futter aufgenommen werden muss (Antunes-Fernandes et al., 2016). Zudem steht das Gewicht in Beziehung zum Pansenvolumen, wobei ein großes Pansenvolumen bei konstanter Futteraufnahme zu einer geringeren Passagerate des Futters führt und dieses so besser verdaut wird. Es steht also mehr fermentierbares Material zur Verfügung, und eine größere Menge an CH<sub>4</sub> kann gebildet werden (Demment & van Soest, 1985). Dem widerspricht die geschätzte genetische Korrelation zwischen CH<sub>4</sub>-Produktion und Lebendmasse von -0,18 ( $\pm 0,08$ ) durch Lassen & Løvendahl (2016), wobei dieser negative Zusammenhang schwer zu erklären ist. Ein Erklärungsansatz wäre, dass schwere Tiere Futter besser verwerten und dadurch weniger CH<sub>4</sub> bilden. Die zusätzlich gewonnene Energie wird in Körperreserven angelegt. Dieser Erklärungsansatz widerspricht jedoch komplett dem oben genannten, dass bei einer höheren Lebendmasse mehr Futter aufgenommen werden muss und somit mehr CH<sub>4</sub> gebildet wird. Weitere Studien zur Einflussnahme der Lebendmasse auf die CH<sub>4</sub>-Bildung sind deshalb notwendig.

### 2.3.5 Genotyp

Ein weiterer wichtiger Sachverhalt, um die Höhe der CH<sub>4</sub>-Emission eines Tieres zu erklären, ist der Genotyp eines Tieres. In Studien, die mit verschiedenen Messtechniken CH<sub>4</sub> bei Milchkühen gemessen hatten, lagen die Variationskoeffizienten (CV) zwischen den Tieren meist höher ( $CV_{zw} = 18-29\%$ ) als innerhalb der Tiere ( $CV_{ih} = 4-14\%$ ) (Garnsworthy et al., 2012a, 2012b; Grainger et al., 2007; Vlaming et al., 2008). Haque et al. (2015) ermittelten jedoch eine Variation zwischen den Tieren von  $CV_{zw} = 6-9\%$  und innerhalb der Tiere von  $CV_{ih} = 9-16\%$ . Trotz der niedrigeren Variation zwischen den Tieren waren sie ebenfalls der Meinung, dass in Bezug auf geringere CH<sub>4</sub>-Emission auch nach der Korrektur auf Futteraufnahme und Milchleistung noch ausreichend Variation zwischen den Tieren vorhanden ist, um darauf selektieren zu können. Die Erblichkeit des Merkmals CH<sub>4</sub> schwankt je nach Definition und Messmethode. De Haas et al. (2011) und Kandel et al. (2017) schätzten eine Heritabilität ( $h^2$ ) von 0,35 und 0,25 wenn Schätzgleichungen für die tägliche CH<sub>4</sub>-Emission, die auf der Höhe der Futteraufnahme und Daten der Mittleren-Infrarot-Spektroskopie (MIR) der Milch basierte, zugrunde gelegt wurden. Heritabilitäten, die mit „on-farm“-Messmethoden geschätzt wurden, waren niedriger. On-farm-Methoden erscheinen allerdings trotzdem als geeignet,

um einen erblichen Einfluss des Tieres auf die CH<sub>4</sub>-Produktion erkennen zu lassen. Die niedrigste Heritabilität für ein CH<sub>4</sub>-Merkmal wurde aus Daten geschätzt, die mit einem LMD gemessen wurden (Pickering et al., 2015). Eine Übersicht zu Schätzungen der Heritabilitäten ist in Tabelle 3 dargestellt. Pszczola et al. (2017) hoben hervor, dass sich die Höhe der CH<sub>4</sub>-Emissionen und auch die Heritabilität im Verlauf der Laktation ändert. So wurde die Heritabilität zu Beginn der Laktation auf  $0,23 \pm 0,12$ , im Maximum auf  $0,30 \pm 0,08$  und am Ende der Laktation auf  $0,27 \pm 0,12$  geschätzt (Pszczola et al., 2017). Aus diesem Grund sollte der Zeitpunkt der CH<sub>4</sub>-Messung bei der Analyse der Daten berücksichtigt werden.

**Tabelle 3: Heritabilität  $\pm$  Standardfehler (SE) verschiedener CH<sub>4</sub>-Merkmale, die mit unterschiedlichen Techniken gemessen wurden**

Technik	Phänotyp	$h^2 \pm SE$	Quelle
Schätzungsgleichung aus Trockenmasseaufnahme	PME (g/d)	$0.35 \pm 0.12$	de Haas et al. (2011)
Schätzungsgleichung aus MIR-Daten	PME (g/d)	$0.25 \pm 0.01$	Kandel et al. (2017)
Sniffer	CH <sub>4</sub> (g/d)	$0,27 \pm 0,09$	Pszczola et al. (2017)
Sniffer	CH <sub>4</sub> (g/d)	$0.21 \pm 0.06$	Lassen & Løvendahl (2016)
LMD	pmean (ppm)	$0.05 \pm 0.07$	Pickering et al. (2015)

Den Einfluss der Genetik konnten de Haas et al. (2011) und Pszczola et al. (2018) auch auf molekularer Ebene nachweisen. Sie fanden je sieben und 50 Punktmutationen (Single Nucleotide Polymorphisms, SNP), die einen Bayes-Faktor von über 10,1 aufwiesen und damit einen signifikanten Einfluss auf den CH<sub>4</sub>-Ausstoß hatten. Der zu den Untersuchungen von de Haas et al. (2011) gehörige Manhattan Plot, der die P-Werte der einzelnen untersuchten SNPs darstellt, ist in Abbildung 10 abgebildet. Trotz eines klaren Signals einiger SNPs wurde die geschätzte Varianz nur bis zu maximal 0,2 % beziehungsweise 0,15 % durch die SNP erklärt (de Haas et al., 2011; Pszczola et al., 2018). Dies deutet darauf hin, dass die CH<sub>4</sub>-Bildung stark polygen bedingt ist (Pszczola et al., 2018).

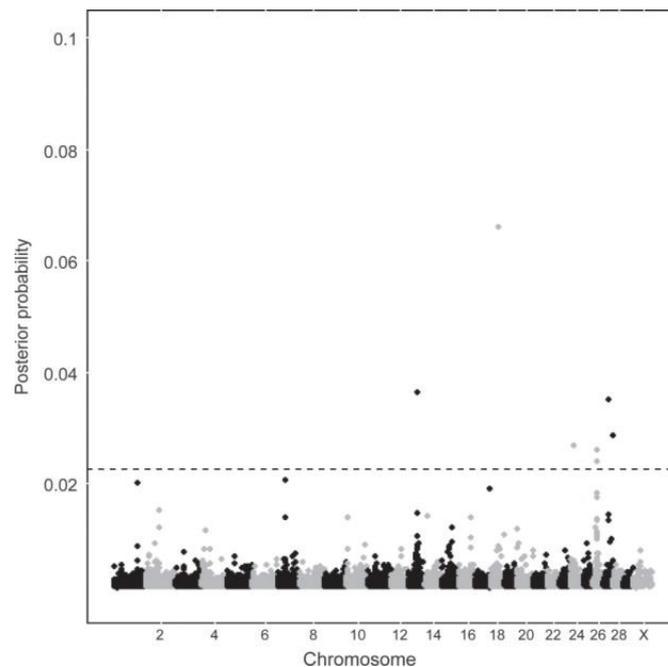


Abbildung 10: Manhattan Plot der geschätzten  $\text{CH}_4$ -Emission, die gestrichelte Linie kennzeichnet den Schwellenwert bei einem Bayes-Faktor von 10,1 (de Haas et al., 2011)

### 2.3.6 Aktivität

Abhängig von der jeweiligen Aktivität der Kuh ändert sich die abgegebene und somit auch die gemessene  $\text{CH}_4$ -Menge. So wird bei Tätigkeiten, die zu einer erhöhten Bewegung des Verdauungstraktes führen, wie z. B. Fressen, Wiederkauen und Trinken, mehr  $\text{CH}_4$  freigesetzt, als wenn die Verdauung weniger beansprucht wird (Laufen, Schlafen) (Chagunda et al., 2009a, 2013; Sorg et al., 2017b). Abbildung 11 zeigt die sich ändernde  $\text{CH}_4$ -Abgabe bei unterschiedlichen Aktivitäten. Sowohl die Respirationskammer als auch der LMD stellten Unterschiede zwischen den Aktivitäten fest.

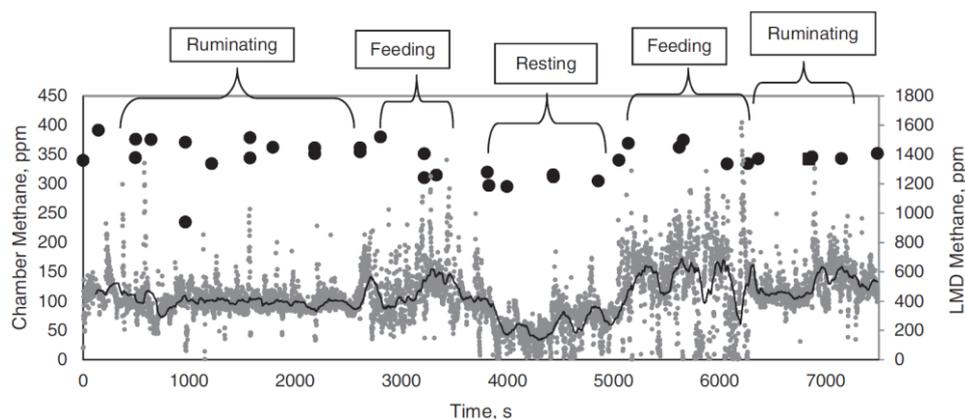


Abbildung 11: Kuhprofil einer  $\text{CH}_4$ -Messung mittels Respirationskammer (schwarze Punkte) und Laser-Methan-Detektor (graue Linie) bei verschiedenen Aktivitäten (Ruminating = Wiederkäuen, Feeding = Fressen, Resting = Ruhen) (Chagunda et al., 2013)

### 2.3.7 Witterung

Die Aktivität der Kuh wird zum Teil durch die Umgebungstemperatur beeinflusst. Der thermoneutrale Bereich für Rinder liegt bei ca. 15° C (Engelhardt, 2010; Rodehutsord & Petry, 2010). Ein Zusammenhang zwischen durchschnittlich steigenden Temperaturen im Stall und sinkender täglicher Kuhaktivität wurde festgestellt (Ngwabie et al., 2011; Silanikove, 2000). Unter Hitzestress leidende Tiere nehmen weniger Futter auf (Silanikove, 2000; West, 2003). Bei höheren Umgebungstemperaturen ist also weniger fermentierbares Material im Pansen vorhanden, und die Tieraktivitäten sind reduziert, was zu einer geringeren CH<sub>4</sub>-Emissionen der Kühe führt. Der allgemeine Einfluss der Temperatur auf die CH<sub>4</sub>-Messung wird in der Literatur allerdings kontrovers diskutiert. Chagunda et al. (2013) stellten keinen signifikanten Einfluss der Lufttemperatur auf ihre CH<sub>4</sub>-Messungen mit dem LMD fest, wohingegen andere Studien einen negativen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und gemessener CH<sub>4</sub>-Konzentration konstatierten. Eine Erklärung hierfür liegt in den gesteigerten Lüftungsraten im Stall bei erhöhten Temperaturen (Cortus et al., 2015; Joo et al., 2015; Wu et al., 2016). Höhere Windgeschwindigkeiten beeinflussten ebenfalls die CH<sub>4</sub>-Messungen und führten zu einer schnelleren Verflüchtigung des CH<sub>4</sub> (Chagunda et al., 2013; Joo et al., 2015). Weitere Klimafaktoren, die auf die CH<sub>4</sub>-Messung wirken könnten, sind die relative Luftfeuchte (LF) und der Luftdruck (LD). Chagunda et al. (2013) fanden für beide Faktoren eine leicht positive Korrelation ( $r_{LF} = 0,04$ ;  $r_{LD} = 0,18$ ) zur gemessenen CH<sub>4</sub>-Konzentration. Erklärt wird dieser Zusammenhang dadurch, dass eine höhere relative Luftfeuchte bzw. ein höherer Luftdruck die Aufwärtsbewegung des CH<sub>4</sub> bremst und sich das CH<sub>4</sub> dadurch langsamer verflüchtigt.

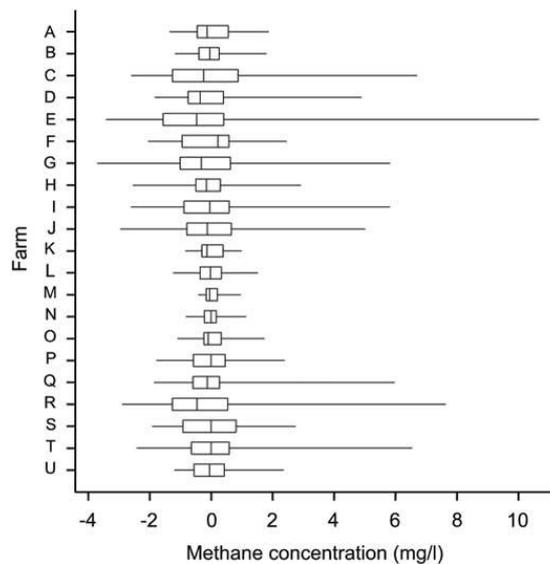
Die Gesamtheit aller Klimafaktoren beeinflusst nicht nur die gemessene CH<sub>4</sub>-Menge in der Atemluft des Tieres, sondern auch die Hintergrundwerte im Stall. So wurden z. B. Hintergrundwerte von 9-283 ppm in einem natürlich belüfteten Stall für 164-195 Milchkühe gemessen (Ngwabie et al., 2009). Diese Werte sind zum einen tageszeitabhängig und zum anderen ortsabhängig. Bei Messungen der CH<sub>4</sub>-Konzentration in der Stallluft von Außenklimaställen wurde festgestellt, dass die CH<sub>4</sub>-Menge in der Luft jeweils eine Stunde nach der Fütterung anstieg (Ngwabie et al., 2011; Wu et al., 2012). Zu begründen ist dieser Anstieg mit der durch die Fütterung angeregten Futteraufnahme der Kühe und die damit einhergehenden einsetzenden Fermentationsprozesse im Pansen. Neben der Fütterung tragen auch andere Stallarbeiten, wie z. B. Reinigungsarbeiten und das Umpumpen der Gülle in die Güllebehälter außerhalb des Stalls, zu variierenden CH<sub>4</sub>-Konzentrationen in der Stallluft bei (Ngwabie, 2007). CH<sub>4</sub> entsteht neben der Fermentation im Pansen auch bei der Güllelagerung und wird durch die Beseitigung der Gülle aus dem Stall vermindert (Monteny et al., 2006). Williams et

al. (2011) stellten zusätzlich eine Variation der CH<sub>4</sub>-Menge entlang der Länge des Stalls fest. In ihrem Fall traten höhere Konzentrationen an den jeweiligen Enden des Stalls auf, welche verschlossen waren und so einen geschützteren Bereich als in der Stallmitte aufwiesen.

### 2.3.8 Weitere Einflussfaktoren

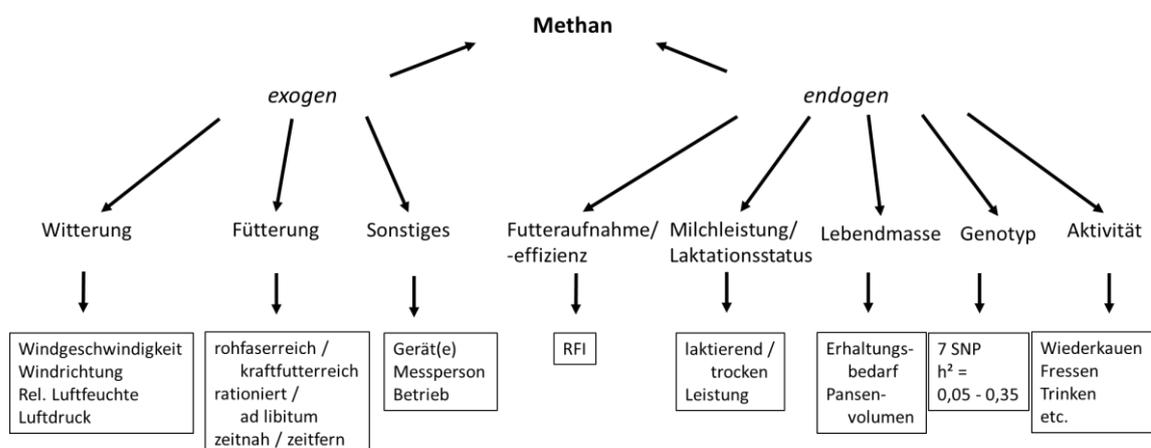
Manche Einflussfaktoren der CH<sub>4</sub>-Messung entstehen erst durch das Versuchsdesign bzw. aufgrund der Durchführung des Versuchs. So ist es zum Beispiel möglich, dass die verwendeten Messgeräte nicht genau die gleichen Werte messen, sondern voneinander abweichen. In Großbritannien wurde ein Vergleich der Genauigkeit verschiedener Respirationskammern durchgeführt. Als Ergebnis wurde eine Ungenauigkeit zwischen den Kammern von bis zu 25,7 % festgestellt (Gardiner et al., 2015). Sorg et al. (2017b) überprüften diesen Sachverhalt anhand zweier LMD unter geschützten Bedingungen in einer Respirationskammer. Es zeigte sich, dass diese beiden Geräte sehr gut übereinstimmten. Der Vergleich brachte eine Pearson Korrelation und einen CCC von 0,98-1,00. Unter Praxisbedingungen im Stall betragen die gleichen Parameter jeweils 0,97 und 0,95. Eine etwas geringere Übereinstimmung von Lasergeräten fanden (Chagunda & Yan, 2011). Dies zeigt, dass auch Geräte innerhalb einer Gerätegruppe unterschiedlich übereinstimmen können, weshalb dieser Einfluss stets neu geprüft werden sollte.

Werden Messungen auf mehreren Betrieben durchgeführt, stellen diese eine weitere Einflussgröße dar. Bell et al. (2014) untersuchten die CH<sub>4</sub>-Emissionen mittels Sniffer auf 21 Praxisbetrieben und fanden eine schwankende Restvarianz der CH<sub>4</sub>-Emissionen zwischen den Kühen. Diese Schwankungen traten in unterschiedlicher Höhe sowohl innerhalb der Betriebe als auch zwischen den Betrieben auf (Abbildung 12). Als Grund für die Differenzen werden verschiedene Faktoren wie zum Beispiel Management, bauliche Voraussetzungen, die Futtergrundlage und die Kuhgenetik angegeben



**Abbildung 12: Box-Whisker-Plot mit den Restvarianzen der während des Melkens gemessenen CH<sub>4</sub>-Konzentration (Methane concentration) auf verschiedenen Betrieben (Farm) nachdem auf Milchleistung, Laktationswoche und Betrieb korrigiert wurde (Bell et al., 2014)**

Die aufgeführten Einflussfaktoren auf die CH<sub>4</sub>-Emissionen zeigen auf, dass viele Einflussgrößen (endogen oder exogen) bei der CH<sub>4</sub>-Messung berücksichtigt werden müssen. Eine Übersicht zu den hier aufgeführten Einflussfaktoren ist in Abbildung 13 zusammengestellt. Zu beachten ist, dass sich die einzelnen Einflussfaktoren auch untereinander beeinflussen. So hängen zum Beispiel die Milchleistung und die Futtereffizienz vom Genotyp ab und werden über die Fütterung beeinflusst. Umgekehrt passt der Landwirt aber auch die Fütterung der Leistung und der Lebendmasse bzw. der Futtermenge der Kühe an. Weiterhin beeinflussen Futtermenge und Futtereffizienz die Milchleistung und umgekehrt. Es gibt noch weitere Einflussgrößen, die sich auf die CH<sub>4</sub>-Produktion auswirken. Im Rahmen dieser Arbeit war es jedoch nicht möglich, auf alle Faktoren einzugehen, so dass hier nur eine Auswahl der wichtigsten Einflussgrößen vorgestellt wurde.



**Abbildung 13: Einflussgrößen auf die CH<sub>4</sub>-Bildung und Messung**

## 2.4 Merkmale der CH<sub>4</sub>-Emission

Mit Hilfe der unterschiedlichen Messmethoden können verschiedene CH<sub>4</sub>-Phänotypen in variierenden Einheiten ausgegeben werden. Im folgenden Kapitel soll auf die wichtigsten Phänotypen und ihre Messergebnisse eingegangen werden.

### 2.4.1 CH<sub>4</sub>-Konzentration

Ein CH<sub>4</sub>-Phänotyp, der direkt gemessen wird, ist die CH<sub>4</sub>-Konzentration in ppm oder als kumulative Konzentration über den Weg des Laserstrahls in ppm×m. Die wichtigsten Messgeräte für diesen Phänotyp sind der Sniffer und der LMD. Das Messprinzip beider Geräte ist die Laser-Absorptionsspektroskopie, mit der Kurzprofile aus der Atemluft von Kühen erstellt werden können. In Tabelle 4 sind verschiedene durchschnittliche CH<sub>4</sub>-Konzentrationen aufgelistet, die mit diesen Methoden in verschiedenen Studien erfasst wurden.

**Tabelle 4: CH<sub>4</sub>-Konzentrationen gemessen mit dem Laser-Methan-Detektor (LMD) und Sniffer an Milchkühen**

Technik	CH <sub>4</sub> -Konzentration	Quelle
<b>LMD</b> <b>(ppm×m)</b>	326	Chagunda et al. (2009b)
	396 <sup>1</sup>	Chagunda et al. (2013)
	180	Pickering et al. (2015)
	129	Sorg et al. (2018)
<b>Sniffer (ppm)</b>	7	Difford et al. (2016)

<sup>1</sup> Einheit = ppm

### 2.4.2 CH<sub>4</sub>-Produktion

Die totale CH<sub>4</sub>-Produktion, angegeben in der Einheit Gramm pro Tag (g/d), ist als Phänotyp gut geeignet, um Tiere und Studien miteinander auch über verschiedene Messregime und Umgebungsbedingungen hinweg zu vergleichen. Dieser Phänotyp wird von einigen Techniken direkt ausgegeben oder kann durch Hochrechnung aus anderen CH<sub>4</sub>-Messungen und über Schätzgleichungen aus anderen Merkmalen berechnet werden. Tabelle 5 gibt eine Übersicht über gemessene und berechnete CH<sub>4</sub>-Emissionen.

Tabelle 5: Geschätzte und berechnete CH<sub>4</sub>-Emissionen (g/d)

	Technik	Tiere	CH <sub>4</sub> -Emission (g/d)	Quelle
<b>Messung</b>	Respirationskammer	Milchkühe	377	Garnsworthy et al. (2012a)
		Mastrinder	198-215	Velazco et al. (2016)
	GreenFeed	Milchkühe	523	Hristov et al. (2015a)
			450	Huhtanen et al. (2015)
			430	Sorg et al. (2018)
<b>Hochrechnung</b>	Sniffer	Milchkühe	395	Garnsworthy et al. (2012a)
			315	Lassen & Løvendahl (2016)
	Laser-Methan-Detektor	Milchkühe	279	Pszczola et al. (2017)
			357	Chagunda et al. (2009b)
			431	Sorg et al. (2018)
<b>Schätzung</b>	Trockenmasseaufnahme	Milchkühe	231 (245 <sup>1</sup> )	Pickering et al. (2015)
			400 <sup>1</sup>	de Haas et al. (2011)
	Milchinfrastruktogramm	Milchkühe	433	Kandel et al. (2017)

<sup>1</sup> Maximalwert in der Laktation

Die in den Tabellen dargestellten Werte sind Durchschnittswerte und stark abhängig vom jeweiligen Versuchsdesign, weshalb sie nur zur Übersichtsgewinnung geeignet sind. Wie bereits in Kapitel 2.3 beleuchtet, beeinflussen viele Faktoren die CH<sub>4</sub>-Produktion. Abbildung 14 zeigt die sich während der Laktation ändernde CH<sub>4</sub>-Emission im Verhältnis zur Milchleistung und Futteraufnahme. Es ist zu erkennen, dass beide Faktoren einen hohen Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Produktion aufweisen, woraus sich ein Nachteil für den Phänotyp CH<sub>4</sub>-Produktion ergibt (de Haas, 2017). Daher werden nachfolgend zwei weitere, spezifische Phänotypen vorgestellt.

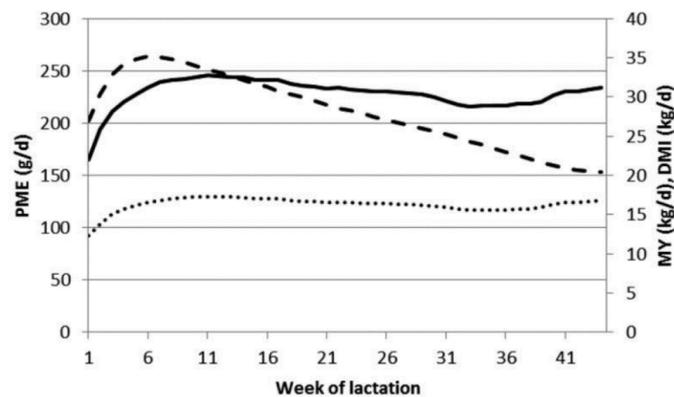


Abbildung 14: Laktationskurve für die CH<sub>4</sub>-Emission (PME) (schwarze Linie), Milchleistung (MY) (gestrichelte Linie) und Trockenmasseaufnahme (DMI) (gepunktete Linie) (Pickering et al., 2015)

### 2.4.3 CH<sub>4</sub>-Ertrag

Der CH<sub>4</sub>-Ertrag drückt die abgegebene CH<sub>4</sub>-Menge je Einheit Futteraufnahme aus (Lassey, 2007). Dadurch soll verhindert werden, dass bei der Züchtung auf weniger CH<sub>4</sub>-Emissionen auch auf eine geringere Futteraufnahme selektiert wird. Außerdem können die CH<sub>4</sub>-Bildungspotenziale verschiedener Fütterungsstrategien und Futtermittel verglichen werden. Es ist jedoch schwierig die Futteraufnahme auf Praxisbetrieben zu messen. Noch herausfordernder ist die Messung der Futteraufnahme bei weidenden Tieren (Lassey, 2007). Die Höhe der CH<sub>4</sub>-Emission je kg Futteraufnahme, die in verschiedenen Studien veröffentlicht wurden, ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: CH<sub>4</sub>-Ertrag (g/kg Trockenmasseaufnahme) gemessen mit Respirationsskammer und GreenFeed

Technik	Tiere	CH <sub>4</sub> -Ertrag (g CH <sub>4</sub> /kg Trockenmasseaufnahme)	Quelle
Respirationsskammer	Milchkühe	25-29	Garnsworthy et al. (2012a)
		21	Veneman et al. (2015)
	Mastbullen	30	Tomkins et al. (2011)
GreenFeed	Milchkühe	20-26	Hristov et al. (2015a)

## 2.4.4 CH<sub>4</sub>-Intensität

Die abgegebene CH<sub>4</sub>-Menge kann auch in Abhängigkeit des gebildeten Produktes (Milch, Fleisch) angegeben werden. Dies ist durch den engen Zusammenhang zwischen Futteraufnahme und Milchleistung möglich (Kandel et al., 2014). Kandel et al. (2017) schätzten dazu erst die CH<sub>4</sub>-Emission (g/d) und bildeten danach das Verhältnis zu der täglichen Milchleistung (kg/d). Für das Merkmal Lebendmassezunahme ist dieses Vorgehen ebenfalls möglich. Ergebnisse aus verschiedenen Studien zur CH<sub>4</sub>-Intensität sind in Tabelle 7 dargestellt.

Die zwei zuletzt genannten CH<sub>4</sub>-Merkmale (CH<sub>4</sub>-Ertrag und CH<sub>4</sub>-Intensität) sind Verhältnismerkmale, das heißt, dass der CH<sub>4</sub>-Phänotyp zu einem weiteren Phänotyp (DMI und Leistung) ins Verhältnis gesetzt wird. Diese Art von Merkmalen ist leicht zu interpretieren und lässt einen einfachen Vergleich zwischen verschiedenen Populationen zu. In einer Simulation wurde die Selektion auf CH<sub>4</sub>-Intensität der Selektion auf die Einzelmerkmale Milchleistung und CH<sub>4</sub>-Emission gegenübergestellt. Die Selektion auf die Einzelmerkmale brachte einen größeren Zuchtfortschritt im Merkmal CH<sub>4</sub>, weshalb empfohlen wird, auf Verhältnismerkmale zu verzichten. Bevorzugt soll direkt auf die gewünschten Merkmale selektiert werden. Ein Erklärungsansatz ist, dass das Merkmal Milchleistung, welches im Nenner steht, eine viel höhere genetische Varianz aufweist als CH<sub>4</sub> und somit dessen Effekt überdeckt. Weiterhin war im genutzten Datenmaterial die genetische Korrelation zwischen Verhältnis- und Einzelmerkmal relativ gering, so dass eine Selektion auf die CH<sub>4</sub>-Intensität nur einen geringen Effekt auf das direkte Merkmal CH<sub>4</sub> ausübte. Dieses Ergebnis sei auf alle Verhältnismerkmale, also auch auf den CH<sub>4</sub>-Ertrag, anzuwenden (Zetouni et al., 2017). Für die Lebensmittelindustrie könnte die Angabe der CH<sub>4</sub>-Intensität einen Vorteil bringen, da so eine spezielle Kennzeichnung der Produkte möglich ist. Verbraucher könnten so gezielt umweltschonendere Milch- und Fleischprodukte wählen.

**Tabelle 7: CH<sub>4</sub>-Intensität (g/kg Milch) gemessen mittels Respirationskammer und geschätzt aus MIR-Daten**

Technik	Tiere	CH <sub>4</sub> -Intensität (g CH <sub>4</sub> /kg Milch)	Quelle
Respirationskammer	Milchkühe	21-25	Veneman et al. (2015)
		24	Kandel et al. (2014)
MIR-Schätzung	Milchkühe	20	Kandel et al. (2017)

## 2.5 Strategien zur Verminderung von CH<sub>4</sub>

Eine Verminderung der CH<sub>4</sub>-Emissionen ist das langfristige Ziel der bereits genannten und vielen weiteren Studien über die CH<sub>4</sub>-Produktion beim Wiederkäuer. Dazu werden drei Strategien besonders hervorgehoben (Hook et al., 2010; Knapp et al., 2014):

- Beeinflussung der CH<sub>4</sub>-Produktion über das Futter und Fütterungsmanagement
- Manipulation der Pansenmikroben, vor allem der Pansenmethanogenen
- Zucht auf effizientere und leistungsfähigere Tiere

Auf diese Strategien wird im Folgenden genauer eingegangen.

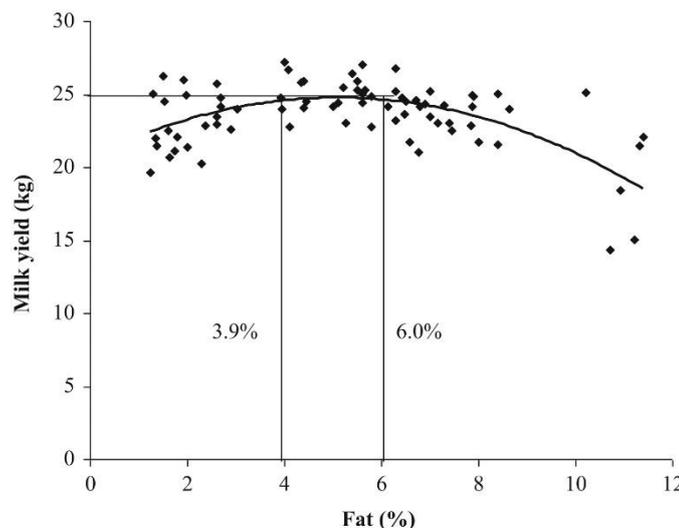
### 2.5.1 Futter und Fütterungsmanagement

Die Wirkung unterschiedlicher Futterbestandteile, vor allem der bedeutende Einfluss von Rohfaser, Kohlenhydraten und Fetten, wurde in Kapitel 2.3.2 bereits hervorgehoben. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein vermehrter Einsatz von Nicht-Strukturkohlenhydraten (Zucker und Stärke) anstelle von Strukturkohlenhydraten zu einer geringeren CH<sub>4</sub>-Produktion führt. Grund dafür sind schnellere Umsatzraten der Nährstoffe im Pansen und die daraus resultierenden Veränderungen der Pansenumwelt und der Zusammensetzung der Pansenmikroben. Stärkeabbauende Mikroorganismen werden begünstigt, und statt Acetat wird vermehrt Propionat gebildet (Grainger & Beauchemin, 2011; Martin et al., 2010).

Fette in der Ration vermindern die CH<sub>4</sub>-Produktion ebenfalls wirkungsvoll. In einer Analyse mehrerer Studien zum Einfluss von Fett auf die CH<sub>4</sub>-Emission bei Milchkühen, Mastrindern und Schafen, sank die gebildete CH<sub>4</sub>-Menge um 3,8 %, nachdem der Ration 1 % mehr Fett hinzugefügt wurde (Martin et al., 2010). Grainger & Beauchemin (2011) berichten von einer Abnahme des CH<sub>4</sub>-Ertrags um 1 g/kg DMI, nachdem der Fettanteil in der Ration um 10 g/kg DMI erhöht wurde.

Fütterungsbedingte Besonderheiten der Wiederkäuer müssen auch im Rahmen einer möglichen CH<sub>4</sub>-Reduzierung eingehalten werden. Drochner (2008) geht auf die „Anforderungen an [die] wiederkäuergerechte Fütterung“ ein: Die Ration muss ausreichend zum Wiederkäuen und damit zur Speichelbildung anregen. Der Speichel dient der Pufferung der im Pansen gebildeten Fettsäuren. Außerdem muss das aufgenommene Futter eine gute Schichtung des

Panseninhalts zulassen und die Verdauung entschleunigen, so dass der pH-Wert nicht zu stark absinkt. Ein zu großer Anteil an leicht abbaubaren Kohlenhydraten kann zur Pansenübersäuerung (Acidose) und zu Problemen bei der Futtermittelaufnahme führen (Spiekers et al., 2009). Mindestens 18 % Rohfaser müssen in der Ration enthalten sein, wovon 2/3 zumindest eine gute Strukturwirkung aufweisen sollten (Drochner, 2008). Der Fettgehalt in der Ration ist ebenfalls beschränkt. Zu viel Fett vermindert die Futtermittelaufnahme der Tiere massiv, wodurch es zum Einbruch der Leistung kommen kann. Maximal 6-8 % Fett sollten der Ration zugesetzt werden (Grainger & Beauchemin, 2011; Patra, 2013). Der Effekt von Fett in der Ration auf die Milchleistung wird in Abbildung 15 dargestellt.



**Abbildung 15: Auswirkung verschiedener Fettgehalte (Fat) in der Ration auf die Milchleistung (Milk yield) bei Milchkühen (Patra, 2013)**

Die Berücksichtigung der wiederkäuergerechten Ernährung ist essentiell für die Fütterung. Aus diesem Grund ist die Reduzierung der  $\text{CH}_4$ -Emission über die Fütterung nur begrenzt möglich.

## 2.5.2 Beeinflussung der Mikrobenpopulation im Pansen

Archaeen im Pansen sind für die  $\text{CH}_4$ -Produktion verantwortlich, folglich ist eine weitere Möglichkeit, die  $\text{CH}_4$ -Emissionen zu mindern, die direkte Einflussnahme auf diese Mikroorganismen. Hierfür gibt es drei Möglichkeiten. Zum einen gibt es Untersuchungen zu Impfstoffen, die die methanogenen Archaeen über die körpereigene Immunantwort hemmen sollen. In einer Studie von Cook et al. (2008) wurden Hühner mit einer Zusammensetzung aus Rohzellen von *Methanobrevibacter smithii*, *Methanobrevibacter ruminantium* oder *Methanos-*

*phaera stadmanae* und einem Zusatz von Montanide ISA 70 immunisiert. Die von diesen Hennen gelegten Eier enthielten Antikörper gegen die verabreichten Archaeen. Bei der Zugabe der daraus gewonnenen Geflügelantikörper zu Pansensaft konnte so *in vitro* die CH<sub>4</sub>-Produktion gesenkt werden. Jedoch ließ dieser Effekt bereits nach 24 Stunden nach. Die mögliche Instabilität der Antikörper im Pansensaft und die Ausbreitung von anderen Methanogenen, welche durch die Antikörper unbeeinflusst blieben, wurden als Gründe aufgeführt (Cook et al., 2008). Bei Schafen konnte nach einer Zweifach-Immunisierung mit einem Impfstoff gegen drei methanogene Archaeenstämme eine Verminderung des CH<sub>4</sub>-Ertrags um 7,7 % erzielt werden (Wright et al., 2004). Eine weitere, auf der vorgenannten Studie aufbauende Untersuchung konnte allerdings keine Auswirkungen einer Immunisierung auf die CH<sub>4</sub>-Produktion feststellen (Williams et al., 2009).

Eine andere Möglichkeit, die Mikrobenpopulation im Pansen in Bezug auf eine verminderte CH<sub>4</sub>-Produktion zu verändern, stellt die Defaunierung, also das Abtöten der Protozoen dar (Buddle et al., 2011; Morgavi et al., 2008). Da Protozoen über Enzyme verfügen, die in der Lage sind Kohlenhydrate, Fette und Proteine des Futters zu spalten, sind sie ein wichtiger Bestandteil der Verdauung im Pansen. Besonders die Arten der Genera *Isotricha* und *Dasytricha* fermentieren überwiegend leicht lösliche Kohlenhydrate, wohingegen die Gattung *Diplodinium* eher pflanzliche Zellwände in ihre Bestandteile zerlegt (Martens, 2010). Während des Abbaus werden flüchtige Fettsäuren (Acetat und Butyrat), sowie CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> gebildet. Die Gase werden daraufhin von den Archaeen zum Teil zu CH<sub>4</sub> umgewandelt (Breves & Leonhard-Marek, 2010; Martens, 2010). Folglich konnte nachgewiesen werden, dass das Entfernen der Protozoen zu verminderten CH<sub>4</sub>-Emissionen führt (Buddle et al., 2011; Morgavi et al., 2008). Eine Defaunierung kann über verschiedene Medikamente erreicht werden. Hier eignen sich z. B. die ionophoren Antibiotika Monensin und Lasalocid. Guan et al. (2006) stellten nach Verabreichung der Ionophore eine geringere Anzahl an Protozoen in der Pansenflüssigkeit fest. Weiterhin war zu beobachten, dass sich das Acetat-Propionat-Verhältnis in Richtung Propionat verschoben hatte. Das Ergebnis der Studie führte zu einer verminderten CH<sub>4</sub>-Produktion um 27-30 % der aufgenommenen GE. Der Effekt der Zusatzstoffe hielt jedoch nicht lange an, so dass die Ausgangssituation bezogen auf die Anzahl an Protozoen, das Acetat-Propionat-Verhältnis und die CH<sub>4</sub>-Emission nach ca. 3-6 Wochen wieder erreicht wurde (Guan et al., 2006). Als allgemeine Verminderungsstrategie sind Ionophore nicht geeignet, da Antibiotika seit dem 01.01.2006 in der Europäischen Union nicht mehr als Futterzusatzstoffe verwendet werden dürfen (BMEL, 2013). Eine komplette Defaunierung beim Wiederkäuer sollte zudem nicht das Ziel sein, da Bakterien und Protozoen ein essentieller

Bestandteil der Wiederkäuerverdauung darstellen und Wiederkäuer ohne sie nicht überleben können.

Ein weiterer vielversprechender Futterzusatzstoff zur Verminderung der CH<sub>4</sub>-Emission ist 3-Nitrooxypropanol (3NOP). 3NOP ist eine chemische Verbindung, die das Enzym hemmt, welches den letzten Schritt der Methanogenese katalysiert (Ermler, 1997; Hristov et al., 2015b). Verschiedene Studien an Milchrindern zeigten, dass der Einsatz von 3NOP in der Fütterung zu einer reduzierten CH<sub>4</sub>-Emission führte (7-60 %) (Haisan et al., 2014; Hristov et al., 2015b; Reynolds et al., 2014). Dabei ist es bemerkenswert, dass keine Verminderung der Milchproduktion und der Futteraufnahme erfolgte (Haisan et al., 2014; Hristov et al., 2015b; Reynolds et al., 2014) und dieser Effekt über einen langen Zeitraum (12 Wochen) anhielt (Hristov et al., 2015b). Weiterhin wurde bei Tieren mit 3NOP-Aufnahme eine gesteigerte Lebendmassezunahme berichtet, welche zum Teil auf eine gesteigerte Verdaulichkeit der aufgenommenen Nährstoffe zurückzuführen war (Haisan et al., 2014; Hristov et al., 2015b). Reynolds et al. (2014) fanden jedoch eine verminderte Verdaulichkeit der aufgenommenen Trockenmasse, der NDF und der ADF je nach Dosis des eingesetzten 3NOP. Diese Abweichung der Ergebnisse deuten an, dass noch weitere Untersuchungen zum Einsatz von 3NOP erforderlich sind. Insbesondere die Frage nach den Auswirkungen auf Gesundheit und Fruchtbarkeit der Tiere muss noch geklärt werden, bevor dieser Zusatzstoff großflächig eingesetzt werden kann.

Sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe und organische Säuren wurden ebenfalls auf ihre Wirkung auf die CH<sub>4</sub>-Produktion untersucht. Sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe werden von Pflanzen im Sekundärstoffwechsel gebildet, der aus Teilen des Primärstoffwechsels (z. B. die Bildung von Zuckern, Aminosäuren, Fettsäuren und Vitaminen) besteht. Diese Stoffe üben keine bestimmten Funktionen bezüglich des Zellwachstums, der Zellteilung und des Zellstoffwechsels aus (Hänsel & Sticher, 2010). Für die CH<sub>4</sub>-Verminderung eingesetzte sekundäre Pflanzeninhaltsstoffe sind z. B. Tannin, Saponin und ätherische Öle. Tannine sollen die Archaea hemmen und die H<sub>2</sub>-Verfügbarkeit begrenzen (Tavendale et al., 2005), Saponine das Vorkommen von Protozoa vermindern (Guo et al., 2008) und ätherische Öle eine antimikrobielle Wirkung gegen gramnegative Bakterien zeigen (Calsamiglia et al., 2007). Eine Verminderung der CH<sub>4</sub>-Bildung wurde überwiegend in *in vitro*-Versuchen erreicht. *In vivo* war der Effekt der pflanzlichen Stoffe inkonsistent. Die Ergebnisse des Einsatzes von organische Säuren waren *in vivo* ebenfalls sehr variabel (Hook et al., 2010). Foley et al. (2009) stellten eine verminderte CH<sub>4</sub>-Emission durch den Einsatz von Apfelsäure fest, zusätzlich jedoch auch eine geringere Futteraufnahme der sich im Versuch befindenden Mastbullen.

Solche negativen Auswirkungen der eingesetzten Zusatzstoffe auf die Futtermittelaufnahme sowie mögliche Beeinträchtigungen auf die Leistung, Gesundheit und Fruchtbarkeit sind unbedingt zu vermeiden. Die variablen Ergebnisse der *in vivo*-Studien zeigen, dass weitere Untersuchungen am Tier durchgeführt werden müssen. Ziel sollte dabei sein, die Fragen zur optimalen Dosis, Adaption der Mikroorganismen an die Pflanzenstoffe, Verbleib der Stoffe im Organismus, mögliche Rückstände in Milch und Fleisch und Auswirkungen auf die Tierleistung zu beantworten (Calsamiglia et al., 2007). Zudem ist der Langzeiteffekt der eingesetzten Stoffe bisher unzureichend untersucht, weshalb noch weitere Langzeitstudien erforderlich sind (Knapp et al., 2014).

### 2.5.3 Genetische Selektion

Die Zucht auf geringere CH<sub>4</sub>-Emissionen ist eine vielversprechende Möglichkeit, eine dauerhaft anhaltende Verminderung zu erzielen (Vlaming et al., 2008). Wie bereits in Kapitel 2.3.5. beleuchtet, gibt es eine natürlich vorkommende Varianz zwischen Kühen hinsichtlich ihrer CH<sub>4</sub>-Emissionen (Garnsworthy et al., 2012a, 2012b; Grainger et al., 2007; Vlaming et al., 2008). Daraus ergibt sich die Möglichkeit, Tiere zu selektieren, die weniger CH<sub>4</sub> bilden als andere (Garnsworthy et al., 2012b). Obwohl die Heritabilität für verschiedene CH<sub>4</sub>-Merkmale im niedrigen bis mittlerem Bereich liegen (0,05-0,35) (de Haas et al., 2011; Kandel et al., 2017; Lassen & Løvendahl, 2016; Pickering et al., 2015), ließe sich ein Zuchtfortschritt im Merkmal CH<sub>4</sub> erzielen. Im Idealfall sollte die CH<sub>4</sub>-Messung direkt am Tier erfolgen, um so das Merkmal unverfälscht abbilden zu können (Wall et al., 2010). Bisher stellt allerdings die direkte CH<sub>4</sub>-Messung ausreichend vieler Tiere für eine genetische Selektion aufgrund aufwändiger Messverfahren noch eine große Herausforderung dar (Lassen et al., 2012). Es ist auch noch immer fraglich, welcher Phänotyp als Basis für eine Verminderte CH<sub>4</sub>-Emission wirklich geeignet ist. Bei der Auswahl sollten die Beziehungen zu anderen wichtigen Merkmalen, wie zum Beispiel Leistung (siehe Kapitel 2.3.3), Fruchtbarkeit, Gesundheit und Langlebigkeit unbedingt berücksichtigt werden. Bei einer Nichtberücksichtigung kann es zu unerwünschten Auswirkungen auf diese Merkmale kommen (de Haas et al., 2018). Zetouni et al. (2018) schätzten die genetischen Korrelationen zwischen der CH<sub>4</sub>-Produktion – gemessen mit dem Sniffer – und Exterieur-, Gesundheits- sowie Fruchtbarkeitsmerkmalen. Sie kamen zu dem Fazit, dass, die Selektion auf geringere CH<sub>4</sub>-Emissionen keine negativen Auswirkungen auf die Fruchtbarkeit, jedoch auf den Gesundheitszustand der Kühe haben würde. Im Einzelnen wurde eine genetische Korrelation für das Merkmal „andere Krankheiten“, zu denen Stoff-

wechsel- und Klauenkrankheiten zählten, von  $r_g = -0,32$  geschätzt. Der vorteilhafte Zusammenhang zur Fruchtbarkeit wird über die genetischen Korrelationen zu den Merkmalen „Body Condition Score“ (BCS) ( $r_g = -0,28$ ) und Milchcharakter ( $r_g = 0,28$ ) begründet (Zetouni et al., 2018). Beide Merkmale können als Anzeichen für die Energiebilanz einer Kuh genutzt werden (Veerkamp & Brotherstone, 1997). Folglich tragen ein hoher BCS und Milchcharakter zu einer besseren Fruchtbarkeit bei. Pszczola et al. (2019) untersuchten die genetischen Beziehungen zwischen  $\text{CH}_4$ -Produktion und den Leistungsmerkmalen, sowie Exterieur und Langlebigkeit. Die genetischen Beziehungen waren insgesamt gering, wobei die höchsten Korrelationen bei den Merkmalen Fettgehalt in der Milch, Milchleistung, Stärke und Größe der Kuh auftraten ( $r_g = 0,21; 0,15; 0,15; 0,15$ ) (Pszczola et al. 2019). Die genetische Korrelation zum Merkmal Langlebigkeit lag bei  $r_g = -0,06$ . Der Standardfehler war mit 0,07 jedoch sehr hoch, weshalb diese Korrelation mit Vorsicht betrachtet werden sollte (Pszczola et al. 2019).

Die genomische Selektion ist trotz eines schwierig zu messenden Phänotyps ein gangbarer Weg, auf verminderte  $\text{CH}_4$ -Emissionen zu züchten. Hierbei werden von einer Referenzpopulation Daten des Phänotyps (hier:  $\text{CH}_4$ -Emission) und des Genotyps (SNP-Informationen) benötigt. Es ist möglich aus diesen Daten eine Schätzgleichung zu generieren, mit deren Hilfe genomische Zuchtwerte aus Markergenotypen geschätzt werden können. Somit kann diese Gleichung auf Individuen angewandt werden, von denen nur Genotypdaten vorliegen, aber keine Phänotypen (Hayes & Goddard, 2010). Es stellt jedoch eine Herausforderung dar, eine ausreichend große Anzahl an Tieren mit Genotyp- und Phänotypinformationen für die Referenzpopulation bereitzustellen. VanRaden et al. (2009) untersuchten 3.576 Bullen auf ihre genomischen Eigenschaften und erhielten eine Sicherheit der Zuchtwerte von 50 % im Durchschnitt aller Merkmale. Dies bedeutete einen Zuwachs von 23 % im Vergleich zur Schätzung der Zuchtwerte nur über die Verwandtschaftsmatrix (VanRaden et al., 2009). Um für die  $\text{CH}_4$ -Emission bei Rindern die Zuchtwerte ebenso zuverlässig schätzen zu können, ist es also notwendig an mehreren tausend genotypisierten Kühen genaue  $\text{CH}_4$ -Messungen durchzuführen.

Neben der Verringerung der Abgabe von Treibhausgasen geht es bei der Verminderung der  $\text{CH}_4$ -Produktion um eine Verminderung der Energieverluste durch gebildetes  $\text{CH}_4$  und somit um eine Verbesserung der Tiereffizienz. Je Einheit tierisches Produkt soll weniger Energie über  $\text{CH}_4$  abgegeben, bzw. weniger aufgenommene Futterenergie zu  $\text{CH}_4$  umgewandelt werden (Wall et al., 2010; Yan et al., 2010). Chagunda et al. (2009a) selektierten in einer Herde hochleistende und niedrigleistende Tiere. Die hochleistenden Kühe gaben 19 % mehr

Milch und hatten eine um 11 % verminderte CH<sub>4</sub>-Intensität im Vergleich zu Kühen mit einer niedrigen Milchleistung. Ähnliche Ergebnisse brachte eine Auswertung aus den Niederlanden. Dort stieg in Folge der Zucht auf eine höhere Milchleistung von 1990-2008 die durchschnittliche protein- und fettkorrigierte Milchleistung um 34 %, parallel dazu sank die aus Rationsbestandteilen geschätzte CH<sub>4</sub>-Intensität um 13 % (Bannink et al., 2011). Aufgrund der negativen Korrelation zwischen CH<sub>4</sub>-Intensität und Milchleistung ( $r_g = -0,98$  bis  $-0,68$ ) (de Haas et al., 2011; Kandel et al., 2014; Lassen & Løvendahl, 2016; Zetouni et al., 2017) und einer mittleren Heritabilität der 305-Tage-Milchleistung (Hoekstra et al., 1994) wird mit einem Zuchtfortschritt in Milchleistung auch eine Verminderung der CH<sub>4</sub>-Emission pro Einheit Produkt erzielt.

Die bereits in Kapitel 2.3.1 genannte RFI stellt ebenfalls ein Hilfsmerkmal für die Effizienz eines Tieres dar (Hegarty et al., 2007). Fitzsimons et al. (2013) fanden eine negative Korrelation zwischen CH<sub>4</sub>-Ertrag und RFI ( $r = -0,39$  bis  $-0,26$ ). In ihrer Studie nahm die CH<sub>4</sub>-Produktion um 23 g/d ab, sobald die RFI um 1 kg TM/d sank. Andere Studien bestätigen, dass Tiere mit einer verminderten RFI auch weniger CH<sub>4</sub>-Emissionen aufweisen (Hegarty et al., 2007; Nkrumah et al., 2006). Die RFI besitzt eine moderate Heritabilität ( $h^2 = 0,38-0,39$ ) (Arthur et al., 2001; Schenkel et al., 2004), so dass auch hier eine Zucht auf niedrigere RFI und somit eine verringerte CH<sub>4</sub>-Produktion möglich ist.

Für die Verminderung der CH<sub>4</sub>-Emission gibt es verschiedene Ansätze. Für ein optimales Ergebnis sollte eine Kombination aller Möglichkeiten angestrebt werden. Zu beachten sind allerdings Wechselwirkungen mit anderen Merkmalen wie Milchleistung, Futteraufnahme, Fruchtbarkeit und den Gesundheitsmerkmalen. Alle diese Merkmale müssen in einem balancierten Selektionsindex zusammen verwendet werden. Breider et al. (2018) fertigten eine Simulationsstudie an in der CH<sub>4</sub>, Milchleistung, Futteraufnahme und Lebendmasse im Index aufgeführt wurden. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass bei einer Selektion auf verminderte CH<sub>4</sub>-Emissionen und keiner Einschränkung der anderen Merkmale der Selektionserfolg aller Merkmale sinken würde. Vor allem für die Milchleistung ist dies nicht wünschenswert. Das Ziel, hier die Milchleistung zu steigern und die CH<sub>4</sub>-Emission pro Einheit Produkt zu senken, ließe sich umsetzen, jedoch würde daraufhin die Futteraufnahme je Tier steigen. Folglich würden auch die Futterkosten des Betriebs ansteigen. Eine Fixierung des Zuchtfortschritts für das Merkmal Futteraufnahme würde dem entgegenwirken. Durch diese Maßnahme würde sich aber auch der Zuchtfortschritt im Merkmal Milchleistung verkleinern.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Untersuchungsorte und Zeitraum

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten CH<sub>4</sub>-Messungen fanden im Rahmen des Verbundprojektes „optiKuh“ mit dem Titel „Verbesserung der Haltung von Milchkühen durch Zuchtverfahren auf Futteraufnahme und Stoffwechselstabilität sowie Umweltverträglichkeit bei optimierter Fütterungsintensität und Nutzung von Stoffwechselindikatoren sowie Sensoren im Herdenmanagement“, das von März 2015 bis Juni 2018 durchgeführt wurde, statt. Die Förderung erfolgte durch das Innovationsprogramm des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft, über den Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.

Die Datenerhebung fand auf vier Versuchsbetrieben (VB) im Zeitraum von August 2015 bis Januar 2017 und drei Praxisbetrieben (PB) von Dezember 2015 bis Mai 2017 statt. Bei den PB handelte es sich um drei Milchviehbetriebe, bei denen 14 Betriebsbesuche durchgeführt wurden. Zwei Betriebe lagen in Mecklenburg-Vorpommern, einer in Sachsen-Anhalt. Die PB wurden für die CH<sub>4</sub>-Messung danach ausgesucht, dass Vorrichtungen zur Fixierung der Kühe vorhanden waren. In zwei Betrieben befanden sich Fress-Fanggitter am Futtertisch. Der dritte Betrieb wies einen Behandlungsstand, der sich zwischen Melkstand und Gruppenbucht befand, auf. Alle Kühe wurden in Liegeboxen-Laufställen gehalten und erhielten eine Totale-Misch-Ration (TMR) zu fressen. Die in der TMR eingesetzten Futtermittel sind im Anhang in Tabelle A-1 aufgeführt.

Die CH<sub>4</sub>-Messungen auf den VB erfolgten zu 12 Betriebsbesuchen auf je einem Betrieb in Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen. Die Ställe waren Liegeboxen-Laufställe. Im Anhang ist in Tabelle A-2 eine Übersicht über verwendete Futtermittel in den VB aufgeführt, wobei die Betriebe A und B eine TMR und die Betriebe C und D eine partielle Mischration (PMR) mit zusätzlicher Kraffuttermittelgabe am Automaten verfütterten.

### 3.2 Tiere

Auf den PB wurde bei insgesamt 720 Milchkühen der Rasse Holstein-Friesian die CH<sub>4</sub>-Konzentration in der Atemluft gemessen. Ein allgemeiner Überblick zu den PB und zu den durchgeführten CH-Messungen auf den Betrieben ist in Tabelle 8 dargestellt. Im Durchschnitt befanden sich die Tiere in der zweiten Laktation, wobei die Spanne von der 1. bis zur

11. Laktation reichte. Der Laktationstag betrug zum Zeitpunkt der Messung durchschnittlich 93 Tage (5 bis 446 Tage).

**Tabelle 8: Übersicht zu den Praxisbetrieben (PB)**

	<b>PB 1</b>	<b>PB 2</b>	<b>PB 3</b>	<b>Gesamt</b>
<b>Milchkühe im Bestand</b>	623	477	877	<b>1.977</b>
<b>Betriebsbesuche mit CH<sub>4</sub>-Messung</b>	3	7	4	<b>14</b>
<b>Fütterungsgruppen mit CH<sub>4</sub>-Messung</b>	3	2	2	<b>7</b>
<b>CH<sub>4</sub>-Messung bei n Kühen</b>	225	287	208	<b>720</b>

Auf den VB wurden insgesamt 229 Tiere beprobt. Hierbei handelte es sich ebenfalls um Kühe der Rasse Holstein-Friesian.

Tabelle 9 gibt eine Übersicht über die einzelnen Versuchsbetriebe und zu den dort stattgefundenen CH<sub>4</sub>-Messungen. Die Kühe in den VB befanden sich zum Zeitpunkt der CH<sub>4</sub>-Messung im Durchschnitt am 82. (7.-395.) Laktationstag und in der dritten (1.-10.) Laktation.

Die Ausgangsdatei zur Erstellung der Verwandtschaftsmatrix der Versuchstiere wurde vom VIT (Vereinigte Informationssysteme Tierhaltung), Verden, bereitgestellt. Die Abstammung der Tiere aus den PB konnte auf bis zu 14 Generationen bei einzelnen Tieren nachvollzogen werden. Dabei wurden 2.553 Tiere in das Pedigree aufgenommen, wobei durchschnittlich 1,95 Töchter je Bulle analysiert wurden. Für die Tiere aus den VB beinhaltete das Pedigree 4.922 Vorfahren aus bis zu 17 Generationen bei einzelnen Tieren. Im Durchschnitt waren je Bulle 2,5 Töchter in der Auswertung.

**Tabelle 9: Übersicht zu den Versuchsbetrieben (VB)**

	<b>VB 1</b>	<b>VB 2</b>	<b>VB 3</b>	<b>VB 4</b>	<b>Gesamt</b>
<b>Milchkühe im Bestand</b>	400	86	230	64	<b>780</b>
<b>Betriebsbesuche mit CH<sub>4</sub>-Messung</b>	4	6	1	1	<b>12</b>
<b>Fütterungsgruppen mit CH<sub>4</sub>-Messung</b>	3	2	2	4	<b>11</b>
<b>CH<sub>4</sub>-Messung bei n Kühen</b>	118	37	28	46	<b>229</b>

### 3.3 Versuchsaufbau und Datenbearbeitung

#### 3.3.1 CH<sub>4</sub>-Messung

Die CH<sub>4</sub>-Messung erfolgte anfangs mit zwei, später mit drei LMD parallel. Die Funktionsweise des LMD wurde in Kapitel 2.2.3 bereits vorgestellt. Insgesamt kamen auf den PB fünf bedienende Personen zum Einsatz. Auf den VB waren es vier Personen. Vor jedem Betriebsbesuch wurden alle LMD neu kalibriert. Dies geschah mittels Kalibrationszelle in den Geräten (Tokyo Gas Engineering Solutions, 2006). Nach eigenen Testmessungen (Sorg et al., 2017a) und unter Berücksichtigung weiterer Studien mit dem LMD (Chagunda et al., 2009b, 2013; Chagunda & Yan, 2011; Pickering et al., 2015; Sorg et al., 2017a) wurde ein Messprotokoll festgelegt, nach dem bei allen Tieren die CH<sub>4</sub>-Messung erfolgte.

Für die CH<sub>4</sub>-Messung wurden die Tiere auf den PB nach dem morgendlichen Melken fixiert. Die Kühe wurden beim Stehen gemessen. Einige Tiere fingen nach einiger Zeit an, wiederzukäuen, so dass teilweise Kühe auch bei dieser zweiten Aktivität gemessen wurden. Für die Messung stand die Messperson frontal vor der Kuh, zielte mit dem sichtbaren Ziellaserstrahl auf ihre Nase und folgte dieser bei Bewegungen des Kopfes. Mit einem zusätzlichen Infrarot-Laser-Messgerät zur Entfernungsbestimmung (Bosch, Stuttgart, Deutschland) wurde zu Beginn der Messung eine Distanz von 2 m eingestellt. Von jeder Kuh wurde eine Messung über 5 Minuten erfasst, was als Profil bezeichnet wird. So wurde sichergestellt, dass mindestens ein Ruktus mitaufgezeichnet wurde. Bei jeder Kuh wurde an drei Folgetagen die CH<sub>4</sub>-Konzentration gemessen. Bei einzelnen Kühen wurden nur eine oder zwei Tagesmessungen erfasst, da sie an einzelnen Tagen nicht selektiert werden konnten oder wegen anderer Managementmaßnahmen nicht für die Messung zur Verfügung standen. Abbildung 16 zeigt den Aufbau der CH<sub>4</sub>-Messung.

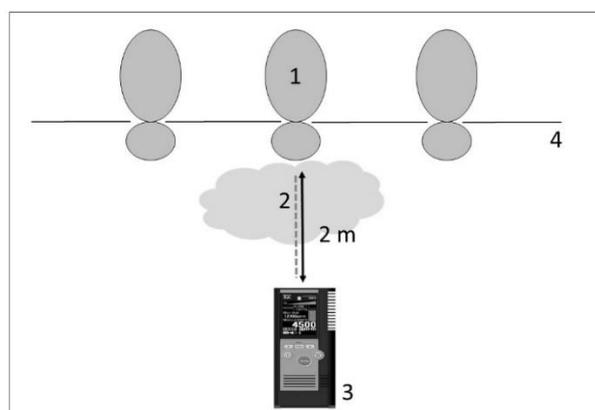


Abbildung 16: Aufbau der CH<sub>4</sub>-Messung mit dem LMD (1=Kuh, 2=Ziellaser und Messlaserpfad, 3=LMD, 4=Fressfanggitter oder Behandlungsstand), Profildauer: 5 Minuten

Die Messungen auf den VB unterschieden sich von denen auf den PB. Zum einen wurden die zu messenden Kühe aufgrund ungenügender Fixierungsmöglichkeiten während des Wiederkäuens, vorzugsweise im Liegen in den Liegeboxen, gemessen. Es war so möglich, bei den Tieren für 5 Minuten die CH<sub>4</sub>-Konzentration zu messen, ohne dass sie sich der Messung entzogen. Weiterhin betrug die Messdistanz 2,5 m, um die Tiere nicht zu beunruhigen und von ihrer liegenden Position zu vertreiben. Die Messungen in den Liegeboxen erfolgten frontal und im 90°-Winkel. Tabelle 10 gibt eine Übersicht zu der Anzahl der erfassten CH<sub>4</sub>-Profile je Betrieb und Betriebsart.

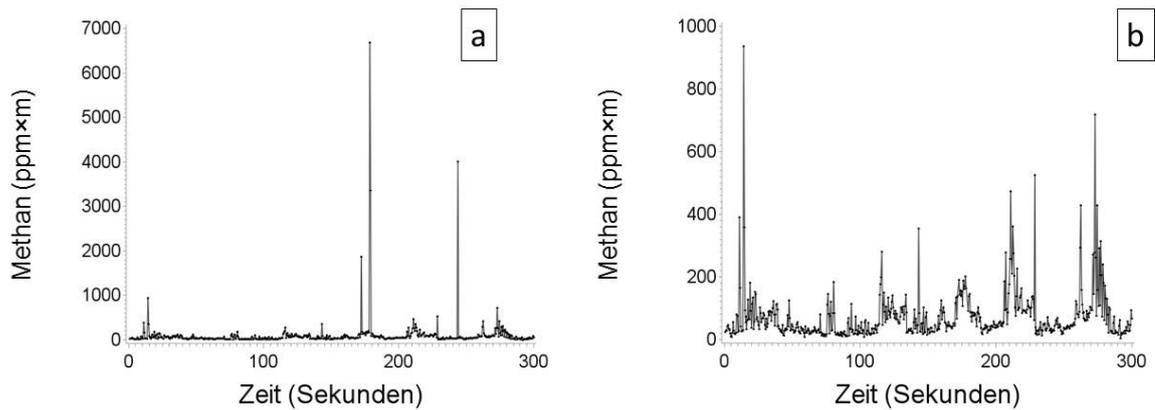
**Tabelle 10: Anzahl der gemessenen CH<sub>4</sub>-Profile auf den Praxis- (PB) und Versuchsbetrieben (VB)**

Betriebe	1	2	3	4	Gesamt
<b>PB</b>	567	814	574	-	<b>1.955</b>
<b>VB</b>	278	110	74	127	<b>589</b>

### 3.3.2 Aufbereitung der CH<sub>4</sub>-Daten

Für die weitere Verarbeitung der LMD-Dateien wurden diese von den Smartphones auf den Computer übertragen. Alle Profile wurden zunächst einzeln als Schaubild dargestellt und visuell qualitativ auf Unregelmäßigkeiten untersucht. Für die Aufbereitung der Daten und die Plausibilitätsprüfung wurde das Statistikprogramm SAS 9.4 (SAS Institute, Cary, NC, USA) verwendet.

Die Darstellung der CH<sub>4</sub>-Profile erfolgte mit der SAS-Prozedur *gplot*. Profile ohne erkennbare regelmäßig wiederkehrende Atem- und Ruktusspitzen oder einzelne isolierte Messwerte, welche die übrigen Spitzen eines Profils um ein Vielfaches überstiegen (Ausreißer), wurden entfernt. Ein Beispiel, wie sich Ausreißer auf ein Profil auswirken, ist in Abbildung 17 zu sehen. In Abbildung 17a sind im CH<sub>4</sub>-Profil CH<sub>4</sub>-Spitzen bis 7.000 ppm<sub>xm</sub> enthalten. Aus diesem Profil wurden alle CH<sub>4</sub>-Spitzen, die größer 1.000 ppm<sub>xm</sub> waren, entfernt, so dass ein plausibles und physiologisch sinnvolles CH<sub>4</sub>-Profil entstand (Abbildung 17b).



**Abbildung 17:** Ein mit dem Laser-Methan-Detektor aufgezeichnetes Profil der  $\text{CH}_4$ -Konzentration der Atemluft vor (a) und nach (b) der Entfernung von Ausreißern (= unphysiologisch und unplausibel hohe isolierte Einzelwerte, die ein Artefakt der Messung darstellen)

Weiterhin wurden alle Messwerte entfernt, bei denen die Reflektionsintensität des Laserstrahls kleiner als 100 war. Es wurde in eigenen Vorarbeiten festgestellt, dass bei diesen Intensitäten die gemessenen  $\text{CH}_4$ -Werte nicht mehr zuverlässig bzw. gehäuft unphysiologisch hoch waren (Daten nicht gezeigt). Ricci et al. (2014) entfernten ebenfalls alle Fehlermessungen, die durch unzureichende Reflektion entstanden waren. Für die vergleichende Auswertung wurden alle Profile auf genau 300 Sekunden (5 Minuten) gekürzt. Tabelle 11 zeigt eine Übersicht über die verbliebenen  $\text{CH}_4$ -Daten, nachdem die Profile aufbereitet wurden.

**Tabelle 11:** Verbleibende Anzahl der Kühe mit  $\text{CH}_4$ -Messung und Anzahl der  $\text{CH}_4$ -Profile, nachdem unplausible und unphysiologische Werte aus den  $\text{CH}_4$ -Profilen entfernt wurden

	Praxisbetriebe				Versuchsbetriebe				
	PB 1	PB 2	PB 3	gesamt	VB 1	VB 2	VB 3	VB 4	gesamt
<b>Anzahl Kühe mit <math>\text{CH}_4</math>-Messung</b>	225	290	228	<b>743</b>	120	41	28	47	<b>236</b>
<b>Anzahl <math>\text{CH}_4</math>-Profile</b>	567	825	629	<b>2.021</b>	288	429	74	128	<b>919</b>

### 3.3.3 Erstellung von $\text{CH}_4$ -Phänotypen

Nach der Bereinigung und Vereinheitlichung der  $\text{CH}_4$ -Daten wurden verschiedene  $\text{CH}_4$ -Merkmale aus den Roh- $\text{CH}_4$ -Werten erstellt. Dies geschah nach dem Verfahren von Sorg et al. (2018): Dazu wurde untersucht, ob es sich bei einem Messpunkt in einem Profil um eine  $\text{CH}_4$ -Spitze handelte oder um ein Tal. War die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden

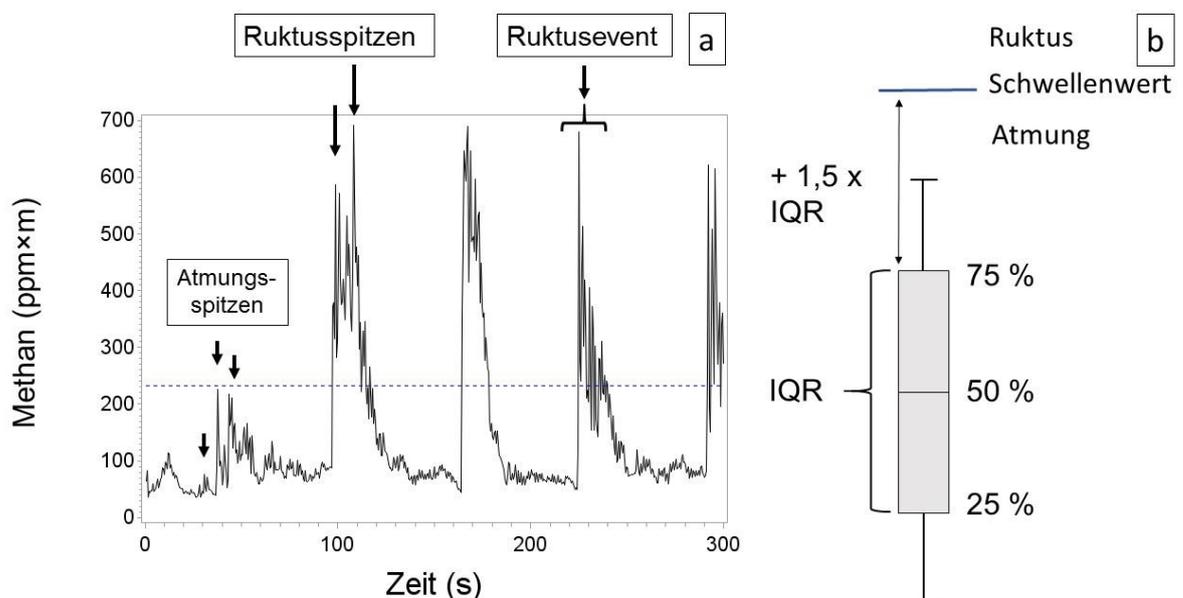
Messwerten kleiner Null ( $x_i - x_{i-1} < 0$ ) und die Differenz der beiden Messpunkte vorher größer Null ( $x_{i-1} - x_{i-2} > 0$ ), so wurde der mittlere Messwert ( $x_{i-1}$ ) als CH<sub>4</sub>-Spitze definiert. Weiterhin wurden die Messwerte der Atmung oder einem Ruktus zugeordnet. Messwerte, die über einem profilindividuellen Schwellenwert lagen, galten als Ruktus, niedrigere Messwerte als Atmung. Der Schwellenwert wurde mittels Boxplot-Methode (Tukey, 1992) ermittelt (Abbildung 18). Dazu wurde die Differenz zwischen den oberen 75 % (Q3) und den unteren 25 % (Q1) aller gemessenen CH<sub>4</sub>-Werte in einem Profil ermittelt. Diese Differenz stellt die Interquartile Range (IQR) dar. Der Schwellenwert war damit

$$\text{Schwellenwert} = Q3 + (1.5 \times IQR) \quad (3)$$

Bei einem Ruktus folgen verständlicherweise mehrere Ruktusspitzen in kurzen Abständen aufeinander. Diese Abfolge wird als Ruktusevent bezeichnet.

Abbildung 18 zeigt die Unterscheidung von Atmung und Ruktus.

Durch dieses Verfahren ist es möglich, verschiedene CH<sub>4</sub>-Merkmale zu definieren. In Tabelle 12 sind die in dieser Arbeit betrachteten CH<sub>4</sub>-Merkmale aufgeführt und beschrieben.



**Abbildung 18:** CH<sub>4</sub>-Profil mit Schwellenwert zur Trennung von Atmungs- und Ruktuswerten und den daraus zu bildenden CH<sub>4</sub>-Merkmale, gestrichelte Linie = Schwellenwert (a); Boxplot-Methode zur Bestimmung des Schwellenwerts, IQR = Interquartile-Range (b)

Für die physikalische Hochrechnung wurde folgende Formel verwendet:

$$gCH_4 = \ell_{CH_4} * \frac{pmean * pn * AV * VF * 288}{1.000.000} \quad (4)$$

wobei  $gCH_4$  =  $CH_4$ -Emission (g/d),  $\ell_{CH_4}$  =  $CH_4$ -Dichte (0,717 g/l) (Wiegleb, 2016),  $pmean$  = mittlere Atemkonzentration von  $CH_4$  (ppm),  $pn$  = Anzahl Atemzüge in einem Profil (n/5 min),  $AV$  = Atemvolumen ( $AV = 0,0062 * \text{Lebendmasse}^{1,01}$  (Schmidt-Nielsen, 2010)),  $VF$  = Verdünnungsfaktor für  $CH_4 = 19,2$  (Garnsworthy et al., 2012a)) und  $288 \triangleq$  Anzahl an 5 Minutenprofilen je Tag = Hochrechnung auf 1 Tag beschreibt.

**Tabelle 12: Übersicht aller  $CH_4$ -Merkmale**

<b><math>CH_4</math>-Merkmale</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>pmean</b>	ppm×m	Mittelwert aller $CH_4$ -Spitzen
<b>rpmean</b>	ppm×m	Mittelwert aller Ruktusspitzen
<b>remean</b>	ppm×m	Mittelwert aller Maxima der Ruktusevents
<b>pn</b>	n	Anzahl $CH_4$ -Spitzen $\triangleq$ Atemzüge
<b>g<math>CH_4</math></b>	g / d	physikalische Hochrechnung
<b>g<math>CH_4</math>(GF)</b>	g / d	Hochrechnung mittels Formel aus GreenFeed-Daten

Für diese Auswertung wurde  $ppm \times m = ppm$  angenommen, um die Messwerte nicht künstlich zu verkleinern (Sorg et al., 2017a). Streng genommen müsste  $pmm \times m$  durch die Distanz (m) geteilt werden, um die durchschnittliche  $CH_4$ -Konzentration auf einem Meter abzubilden (Sorg et al., 2017b). Mit zunehmender Entfernung zur Kuh über 0,4 m ist jedoch nur noch ein geringer Anteil an Hintergrund- $CH_4$  zu verzeichnen, so dass die zusätzliche Distanz vernachlässigt werden kann.

Die Hochrechnung, die mittels GreenFeed erarbeitet wurde, stellt sich wie folgt dar:

$$gCH_4(GF) = 150 + 2,20 * pmean \quad (\text{Sorg et al., 2018}) \quad (5)$$

hierbei ist  $gCH_4(GF)$  =  $CH_4$ -Emission (g/d) und  $pmean$  =  $CH_4$ -Merkmal (ppm×m).

Neben den Einzelprofilen wurde für jede Kuh und für jedes  $CH_4$ -Merkmal auch ein Mittelwert über alle Beobachtungen ermittelt.

### 3.3.4 Erfassung von zusätzlichen Daten

Zusätzliche Daten zu den Tieren mit CH<sub>4</sub>-Daten wurden durch die Betriebe bereitgestellt. Kühe mit fehlenden Angaben zu Lebendmasse, Milchleistung, Milchinhaltsstoffen und Abstammung wurden aus der Analyse ausgeschlossen.

#### 3.3.4.1 Milchleistungsdaten

Informationen zur Laktationsnummer, zum Laktationstag und zur täglichen Milchmenge wurden den auf den Betrieben verwendeten Managementprogrammen HERDE (dsp Agrosoft, Ketzin / Havel, Deutschland) und SUPERKUH (CLAAS KGaA mbH, Harsewinkel, Deutschland) entnommen. Für die Berechnung der ECM wurden die Konzentrationen der Inhaltsstoffe Fett, Eiweiß und Laktose in Prozent aus dem der CH<sub>4</sub>-Messung vorangegangenen letzten Milchkontrolltag verwendet:

$$ECM = \frac{(MM * (383 * Fett + 242 * Eiweiß + 163.2 * Laktose))}{3140} \quad (\text{Sjaunja et al., 1990}) \quad (6)$$

wobei ECM die energiekorrigierte Milch ist und MM die Milchleistung (kg/d). Fett, Eiweiß und Laktose sind die Gehalte dieser Stoffe in der Milch in Prozent.

Für die Darstellung des Einflusses der ECM auf die CH<sub>4</sub>-Produktion wurde zudem das Merkmal CH<sub>4</sub>-Intensität (CH<sub>4</sub>-I) erstellt:

$$CH_4 - I = \frac{CH_4(GF)}{ECM} \quad (7)$$

Kühe, die sich am Laktationstag kleiner 7 oder größer 400 befanden, wurden aus der Auswertung ausgeschlossen.

Tabelle 13 gibt eine Übersicht zu den Milchleistungsdaten. Für einen der PB war keine tägliche Milchmenge verfügbar. Hier wurde stattdessen die Milchmenge des letzten Milchkontrolltages vor der CH<sub>4</sub>-Messung näherungsweise verwendet.

**Tabelle 13: Mittelwerte, Anzahl (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Milchleistungskennzahlen der Praxis (PB)- und Versuchsbetriebe (VB)**

Betriebsart	Merkmal	n	Mittelwert	SD	Min.	Max.
<b>PB</b>	Milchmenge (kg/d)	1.342	34,1	8,5	7,7	63,1
	Fett (%)	611	3,69	0,68	1,84	6,74
	Eiweiß (%)	611	3,19	0,26	2,37	4,26
	Laktose (%)	611	4,89	0,23	0	5,22
	ECM (kg/d)	1.342	32,3	8,5	7,3	71,2
<b>VB</b>	Milchmenge (kg/d)	589	41,2	9,2	12,4	65,1
	Fett (%)	229	3,71	0,82	1,64	6,49
	Eiweiß (%)	229	3,30	0,32	2,65	4,36
	Laktose (%)	229	4,83	0,16	4,35	5,26
	ECM (kg/d)	589	39,0	8,0	12,9	59,9

Die nach der Datenbereinigung verbleibenden Tiere in den PB hatten zum Zeitpunkt der CH<sub>4</sub>-Messung einen durchschnittlichen Laktationstag von 94 (13-341). In den VB veränderte sich durch die Datenbereinigung nichts an den beschreibenden Daten.

### 3.3.4.2 Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur

Zu Beginn und am Ende jeder CH<sub>4</sub>-Messung wurden mittels Hitzedraht-Anemometer (PCE Deutschland GmbH, Meschede, Deutschland) die Luftgeschwindigkeit und die Lufttemperatur gemessen. Hierbei wurden an zwei bis drei Messpunkten im Stall, je nach Größe des Bereichs der CH<sub>4</sub>-Messung, Daten erhoben. Für die Auswertung wurde aus den Daten vor und nach jeder Messphase ein Mittelwert gebildet. Im Mittel lag die Windgeschwindigkeit auf den PB bei  $0,49 \pm 0,44$  m/s und auf den VB bei  $0,61 \pm 0,54$  m/s. Die Lufttemperatur war auf den VB im Durchschnitt 2,6 °C höher als auf den PB. Die Minimaltemperatur -1,8 °C wurde auf einem PB gemessen (Tabelle 14). Die Messwerte weisen eine große Spanne auf, da die CH<sub>4</sub>-Messungen über das Jahr verteilt, in unterschiedlichen Jahreszeiten stattfanden.

**Tabelle 14: Mittelwerte, Anzahl (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Windgeschwindigkeit ( $V_{\text{Wind}}$ ) und Lufttemperatur (Temp.) im Stall während der  $\text{CH}_4$ -Messungen in den Praxis- und Versuchsbetrieben**

	Merkmal	Mittelwert	SD	Min.	Max.
<b>Praxisbetriebe</b> (n = 82)	$V_{\text{Wind}}$ (m/s)	0,49	0,44	0,05	2,94
	Temp. (°C)	9,5	5,6	-1,8	21,1
<b>Versuchsbetriebe</b> (n = 81)	$V_{\text{Wind}}$ (m/s)	0,61	0,54	0,03	1,67
	Temp. (°C)	12,1	8,2	0,9	25,8

### 3.3.4.3 Lebendmasse

In den PB 1 und 3 wurden jeweils mittels mobiler Plattenwaage die Tiergewichte erfasst. In PB 2 befand sich eine stationäre automatische Waage. Das Wiegen fand an einem der Tage der  $\text{CH}_4$ -Messung statt. Die Betriebe stellten anschließend die Daten zur Verfügung. Auf den VB wurden die Lebendmassen der Versuchstiere routinemäßig erhoben und für die Auswertung der  $\text{CH}_4$ -Daten bereitgestellt. Es wurde der Wiegetag verwendet, der dem ersten Tag der  $\text{CH}_4$ -Messung am nächsten war. Tiere, bei denen die Lebendmasse kleiner als 450 kg war, wurden aus der Analyse ausgeschlossen. Die Lebendmassen der Tiere betrug im Durchschnitt in den PB  $616 \pm 79$  kg und in den VB  $656 \pm 62$  kg (Tabelle 15).

**Tabelle 15: Mittelwerte, Anzahl (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Lebendmasse (kg) der Kühe in den Praxis- und Versuchsbetrieben**

	n	Mittelwert	SD	Min.	Max.
<b>Praxisbetriebe</b>	611	616	79	451	850
<b>Versuchsbetriebe</b>	229	656	62	495	839

### 3.3.4.4 Futteraufnahme und Rationszusammensetzung

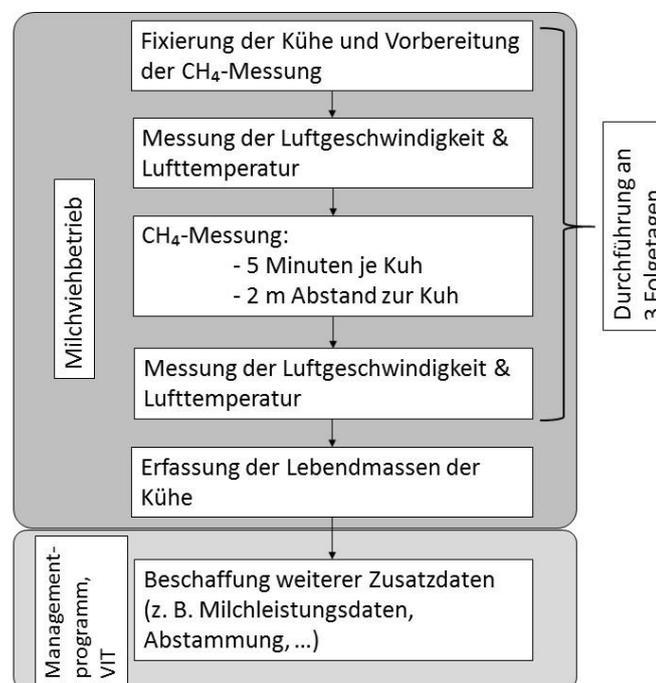
Die Rationszusammensetzung wurde sowohl auf den PB als auch auf den VB auf ihre Einzelbestandteile hin untersucht. Für die PB wurden die Futtermittelproben im Auftrag der Landesforschungsanstalt Mecklenburg-Vorpommern an die LUFA Rostock geschickt, wo sie nach Methoden des Verbands Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA) untersucht wurden (Naumann & Bassler, 2012). Die VB analysierten entweder die Futterproben selbst oder leiteten sie an offizielle Untersuchungseinrich-

tungen weiter, die ebenfalls nach den Methoden der VDLUFA arbeiteten (Naumann & Bassler, 2012). Die Analysen sind in Tabelle A-3 und Anhang A-4 im Anhang aufgeführt. Weiterhin wurde auf allen VB die tierindividuelle Futteraufnahme mittels Wiegetrögen gemessen. Dabei wurde über die Tiererkennung registriert, wie viel TMR bzw. PMR sich vor und nach dem Fressen im Trog befand. Die Differenz bildete die aufgenommene Menge an Futter. Die Futteraufnahme war auf den Versuchsbetrieben ausgeglichen, wobei im Mittel eine Differenz von 2,8 kg zwischen dem Betrieb mit der geringsten und dem Betrieb mit der höchsten Futteraufnahme vorlag (Tabelle 16).

**Tabelle 16: Mittelwerte, Anzahl Kühe (n), Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der Futteraufnahme (kg Trockenmasse/d) in den Versuchsbetrieben**

Betrieb	n	Mittelwert	SD	Min.	Max.
1	277	23,2	4,1	12,1	33,9
2	110	21,7	4,0	12,1	30,6
3	74	24,5	5,1	13,8	37,6
4	127	24,0	3,0	9,5	30,6

Eine schematische Darstellung zum Ablauf der Datenerhebung auf den landwirtschaftlichen Betrieben ist in Abbildung 19 dargestellt.



**Abbildung 19: Übersicht zum Ablauf der CH<sub>4</sub>-Messung auf den Praxisbetrieben**

### 3.4 Statistische Auswertung

#### 3.4.1 Deskriptive Statistik und Modellaufstellung

Nachdem alle Daten bereinigt waren, verblieben für die Auswertung noch 611 Kühe bzw. 1.660 CH<sub>4</sub>-Profile in den PB und 229 Kühe bzw. 589 CH<sub>4</sub>-Profile in den VB (Tabelle 17).

**Tabelle 17: Anzahl der Kühe mit CH<sub>4</sub>-Messung und Anzahl der CH<sub>4</sub>-Profile, die auf den Versuchs- und Praxisbetrieben erhoben wurden, nach der Datenbereinigung**

	Praxisbetriebe				Versuchsbetriebe				
	PB 1	PB 2	PB 3	gesamt	VB 1	VB 2	VB 3	VB 4	gesamt
<b>Anzahl Kühe mit CH<sub>4</sub>-Messung</b>	200	234	177	<b>611</b>	118	37	28	46	<b>229</b>
<b>Anzahl CH<sub>4</sub>-Profile</b>	508	657	495	<b>1.660</b>	278	110	74	127	<b>589</b>

Die deskriptive Statistik wurde mit der Prozedur *means* in SAS berechnet. Die folgenden Einflussgrößen wurden für die Aufstellung des Auswertungsmodells in Klassen eingeteilt:

Der Laktationstag wurde für beide Betriebsarten gleichermaßen in sechs Klassen gruppiert, wobei die erste Klasse alle Tiere, die weniger als 40 Tage in Milch waren, und die sechste Klasse alle Tiere, die mehr als 160 Tage in Milch waren, enthielt (Tabelle 18).

**Tabelle 18: Klasseneinteilung der Laktationstage**

Klassen	1	2	3	4	5	6
<b>Laktationstage (d)</b>	≤ 40	41 – 60	61 – 80	81 – 100	101 – 160	≥ 161

Da auf den PB geringere Windgeschwindigkeiten auftraten als auf den VB, erfolgte die Klasseneinteilung je nach Betriebsart unterschiedlich. In den PB zählten Windgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s und in den VB Windgeschwindigkeiten, die kleiner als 0,25 m/s waren, zur Klasse 1. Die Abstände zwischen den Klassen betragen für beide Betriebsarten 0,2 m/s. Insgesamt gab es vier Klassen (Tabelle 19).

**Tabelle 19: Klasseneinteilung der Windgeschwindigkeit (m/s) in den Praxis- und Versuchsbetrieben**

Klasse	1	2	3	4
<b>Praxisbetriebe</b>	≤ 0,2	0,21 – 0,4	0,41 – 0,6	≥ 0,61
<b>Versuchsbetriebe</b>	≤ 0,25	0,26 – 0,45	0,46 – 0,65	≥ 0,66

Die auf den Betrieben gemessenen Lufttemperaturen wurden ebenfalls in vier Klassen eingeteilt. Die erste Klasse beinhaltete Lufttemperaturen die 6 °C auf den PB bzw. 5 °C auf den

VB im Minimum erreichten. Die Spanne der weiteren Klassen betrug jeweils 5 K. In der letzten Klasse befanden sich alle Lufttemperaturen die größer als 16 °C bzw. 15 °C waren (Tabelle 20).

**Tabelle 20: Klasseneinteilung der Lufttemperatur (°C) in den Praxis- und Versuchsbetrieben**

Klasse	1	2	3	4
<b>Praxisbetriebe</b>	≤ 6	6,1 – 11	11,1 – 16	≥ 16,1
<b>Versuchsbetriebe</b>	≤ 5	5,1 – 10	10,1 – 15	≥ 15,1

Für die Effektprüfung und Modellentwicklung wurde die Prozedur *mixed* in SAS genutzt, so dass ein lineares gemischtes Modell entstand. Die Effekte Betriebsbesuch, Laktationsnummer, Laktationstag, Gerät, bedienende Person, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Winkel der Messung, Fütterungsgruppe und Rationskomponenten wurden erst einzeln zusammen mit dem zufälligen Tiereffekt und später gemeinsam auf ihren Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Merkmale getestet. Gleichmaßen erfolgte die Überprüfung des Einflusses der Effekte auf die Mittelwerte, wobei der zufällige Tiereffekt nicht mit ins Modell einfluss. Der Einfluss eines Effektes wurde als signifikant angenommen, wenn der P-Wert unter 0,05 lag. Nicht signifikante Effekte wurden nicht weiter berücksichtigt. Die Einflussfaktoren Lufttemperatur, Laktationsnummer, Messwinkel, Futteraufnahme und Rationszusammensetzung übten keinen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Merkmale aus. Außerdem unterschieden sich die CH<sub>4</sub>-Konzentrationen der Aktivitäten ‚Stehen‘ und ‚Stehend Wiederkauen‘ nicht signifikant voneinander. Folglich wurde keine Unterscheidung der Aktivitäten getroffen. Die Lebendmasse bildete eine Ausnahme und wurde – trotz eines P-Wertes  $> 0,05$  – als Kovariable berücksichtigt. Wie bereits in Kapitel 2.3.1 berichtet, beeinflusst die Futteraufnahme die CH<sub>4</sub>-Produktion in hohem Maße. Auf den PB war es nicht möglich diese zu erfassen. Es ist jedoch möglich aus der Lebendmasse und der Milchleistung einer Kuh die Futteraufnahme zu schätzen, weshalb beide Faktoren im statistischen Modell berücksichtigt wurden. Für eine optimale Modellwahl wurden die Restvarianz des Modells und das Akaike Information Criterium (AIC-Wert) betrachtet. Die Modelle mit der geringsten Restvarianz und dem kleinsten AIC-Wert wurden für die weiteren Analysen ausgewählt.

Für die genetisch-statistische Auswertung auf den PB ergaben sich folgende gemischte lineare Tiermodelle für die Einzelprofile (8) und den Mittelwert aller Profile eines Tieres (9):

$$y_{ijkl} = \mu + (BB \times Wi)_i + (LMD \times Bed)_j + DIM_k + \beta_1 ecm_l + \beta_2 lm_l + a_l + pe_l + e_{ijkl} \quad (8)$$

$y_{ijkl}$	= Methanphänotyp
$\mu$	= allgemeines Mittel
$(BB \times Wi)_i$	= Betriebsbesuch (1-14) $\times$ Windklasse ( $\leq 0,2$ ; $0,2 - 0,4$ ; $0,4 - 0,6$ ; $\geq 0,6$ m/s)
$(LMD \times Bed)_j$	= LMD Gerät (1-3) $\times$ bedienende Person (1-6)
$DIM_k$	= Klasse des Laktationstags ( $\leq 40$ ; $41 - 60$ ; $61 - 80$ ; $81 - 100$ ; $101 - 160$ ; $\geq 161$ )
$\beta_1 \times ecm_l$	= energiekorrigierte Milchleistung (kg/d)
$\beta_2 \times lm_l$	= Lebendmasse (kg)
$a_l$	= zufälliger additiv-genetischer Effekt des Tieres
$pe_l$	= zufälliger permanenter Umwelteffekt des Tieres
$e_{ijkl}$	= zufälliger Resteffekt

$$y_{ijk} = \mu + (BB \times Gr)_i + DIM_j + \beta_1 ecm_k + \beta_2 lm_k + a_k + e_{ijk} \quad (9)$$

$y_{ijkl}$	= Methanphänotyp
$\mu$	= allgemeines Mittel
$(BB \times Gr)_i$	= Betriebsbesuch (1-14) $\times$ Fütterungsgruppe innerhalb eines Betriebs (1-7)
$DIM_k$	= Klasse des Laktationstags ( $\leq 40$ ; $41 - 60$ ; $61 - 80$ ; $81 - 100$ ; $101 - 160$ ; $\geq 161$ )
$\beta_1 \times ecm_k$	= energiekorrigierte Milchleistung (kg/d)
$\beta_2 \times lm_k$	= Lebendmasse (kg)
$a_l$	= zufälliger additiv-genetischer Effekt des Tieres
$e_{ijkl}$	= zufälliger Resteffekt

Bei einigen Betriebsbesuchen konnte der Effekt des Bedieners und des LMD-Gerätes nicht voneinander getrennt werden, weshalb beide Effekte zusammengefasst wurden. Gleichermaßen wurde der Effekt des Betriebsbesuchs mit der Windklasse kombiniert, da das Wetter je nach Saison mit dem Zeitpunkt des Betriebsbesuchs verbunden war. Für die Auswertung der Mittelwerte wurde der Effekt der Fütterungsgruppe – anstatt die Windklasse, die sich über die drei Messtage änderte – mit dem Betriebsbesuch kombiniert. Die Fütterungsgruppe

war ebenfalls mit dem Betriebsbesuch verknüpft, da die Rationszusammensetzung und die Windgeschwindigkeiten in den einzelnen Gruppen saisonabhängig waren. Bei den meisten Betriebsbesuchen wechselte die bedienende Person eines LMD an jedem Tag das Gerät, folglich wurde bei der Betrachtung der Mittelwerte auch dieser kombinierte Effekt aus dem Modell genommen.

Der Phänotyp  $p_n$  bildet eine Ausnahme, da es sich hierbei nicht um eine  $CH_4$ -Konzentration oder –Menge handelt.  $p_n$  gibt die Anzahl der Atemzüge in einem Profil an, weshalb auf dieses Merkmal andere Einflussfaktoren wirken und ein eigenes Modell für die Einzelprofile aufgestellt wurde. Das folgende gemischt-lineare Tiermodell (10) wurde für die Prüfung der Einflussfaktoren auf das Merkmal  $p_n$  verwendet:

$$y_{ijkl} = \mu + BB_i + (Temp \times Wi)_j + (LMD \times Bed)_k + DIM_l + a_l + pe_l + e_{ijkl} \quad (10)$$

$y_{ijkl}$	= <b>Methanphänotyp</b>
$\mu$	= allgemeines Mittel
$BB_i$	= <b>Betriebsbesuch</b> (1-14)
$(Temp \times Wi)_j$	= <b>Lufttemperaturklasse</b> ( $\leq 6$ ; 6,1 – 11; 11,1 – 16; $\geq 16,1$ °C) $\times$ <b>Windklasse</b> ( $\leq 0,2$ ; 0,2 – 0,4; 0,4 – 0,6; $\geq 0,6$ m/s)
$(LMD \times Bed)_k$	= <b>LMD Gerät</b> (1-3) $\times$ <b>bedienende Person</b> (1-6)
$DIM_l$	= Klasse des <b>Laktationstags</b> ( $\leq 40$ ; 41 – 60; 61 – 80; 81 – 100; 101 – 160; $\geq 161$ )
$a_l$	= zufälliger additiv-genetischer Effekt des Tieres
$pe_l$	= zufälliger permanenter Umwelteffekt des Tieres
$e_{ijkl}$	= zufälliger Resteffekt

Aufgrund einer zu geringen Datenmenge, einer unzureichenden Verknüpfung der verwandtschaftlichen Beziehungen zwischen den Tieren und der fehlenden signifikanten Einflüsse auf die  $CH_4$ -Konzentrationen in den VB (siehe Kapitel 4.1.2), war es in diesem Datensatz nicht möglich, adäquate Modelle aufzustellen und eine genetische Auswertung vorzunehmen.

### 3.4.2 Genetische Parameter

Die Schätzung der Varianzkomponenten und der Heritabilität wurde für das Datenmaterial der PB mithilfe des Programms ASReml (Gilmour et al., 2009) durchgeführt. Für die Analyse wurden die jeweiligen Tiermodelle aus Kapitel 3.4.1 verwendet. Die Heritabilität ( $h^2$ ) berechnet sich wie folgt:

$$h^2 = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_a^2 + \sigma_{pe}^2 + \sigma_e^2}$$

Hierbei ist  $\sigma_a^2$  die additiv-genetische Varianz,  $\sigma_{pe}^2$  die permanente Umweltvarianz und  $\sigma_e^2$  die Restvarianz.

Die hierfür benötigte Verknüpfung der Tiere mit ihren Vorfahren wurde durch das Programm Python (Wensch-Dorendorf, 2015) realisiert. Mit dem Programm PEST (Groeneveld, 1990) wurden alle Daten neu nummeriert und geordnet, so dass eine reibungslose Verrechnung durch die folgenden Programme gewährleistet war.

Basierend auf den gleichen Modellen wie für die Schätzung der Heritabilität wurden mit dem Programm VCE (Groeneveld et al., 2008) die phänotypischen und genetischen Korrelationen der  $CH_4$ -Merkmale geschätzt. Hierzu wurde ein multivariates Tiermodell verwendet. Für Korrelationen gilt:

$$r_{AB} = \frac{cov(AB)}{\sqrt{var(A) * var(B)}}$$

wobei  $r_{AB}$  die genetische oder phänotypische Korrelation der zu korrelierenden Merkmale A und B ist,  $cov(AB)$  stellt die genetische oder phänotypische Kovarianz und  $var(A)$  bzw.  $var(B)$  die jeweilige Varianz der Merkmale A und B dar.

Der gesamte Ablauf der Datenverarbeitung und Auswertung ist in Abbildung 20 übersichtlich dargestellt.

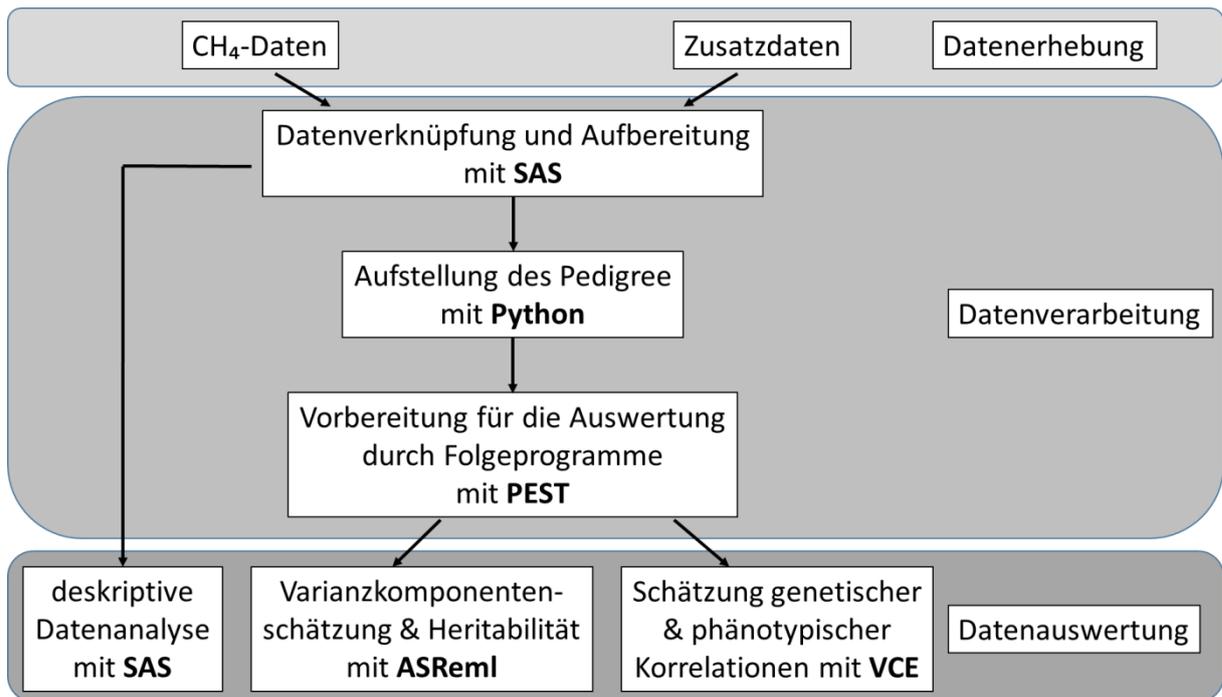


Abbildung 20: Fließschema zur Datenverarbeitung und Analyse

## 4 Ergebnisse

### 4.1 CH<sub>4</sub>-Phänotypen

#### 4.1.1 Deskriptive Statistik

Zunächst wird nur die deskriptive Statistik der Einzelprofile gezeigt. In der genetisch-statistischen Auswertung werden später zusätzlich alle Einzelprofile einer Kuh zu einem Mittelwert verrechnet und als neuer Phänotyp behandelt.

Auf den PB zeigte das Merkmal pmean mit 120 ppmxm im Vergleich zu den anderen Phänotypen den niedrigsten Mittelwert. Den höchsten Wert hatte remean (362 ppmxm). Die mit der GreenFeed-Regression geschätzte CH<sub>4</sub>-Menge (gCH<sub>4</sub>(GF)) lag mit 416 g/d deutlich höher als die physikalische Hochrechnung gCH<sub>4</sub> (288 g/d). Innerhalb eines Fünf-Minuten-Profiles wurden im Durchschnitt 149 Atemzüge (pn) geatmet (Tabelle 21).

**Tabelle 21: Mittelwerte, Standardabweichung (SD), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der CH<sub>4</sub>-Phänotypen der einzelnen CH<sub>4</sub>-Profile, gemessen auf den Praxisbetrieben (n = 1.660)**

Phänotyp <sup>1</sup>	Einheit	Mittelwert	SD	Min.	Max.
pmean	ppmxm	120	58	21	408
rpmean	ppmxm	291	124	50	893
remean	ppmxm	362	145	69	1.074
gCH <sub>4</sub>	g / d	288	129	47	974
gCH <sub>4</sub> (GF)	g / d	416	128	197	1.049
pn	n	149	13	113	210

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

Auf den VB hatte ebenfalls pmean mit 119 ppmxm den niedrigsten Mittelwert. Den höchsten Mittelwert hatte remean (396 ppmxm). gCH<sub>4</sub>(GF) lag auch hier mit 413 g/d deutlich höher als gCH<sub>4</sub> (314 g/d). Innerhalb eines Fünf-Minuten-Profiles wurden im Durchschnitt 155 Atemzüge (pn) geatmet (Tabelle 22).

**Tabelle 22: Mittelwerte, Standardabweichung (SD.), Minimum (Min.) und Maximum (Max.) der CH<sub>4</sub>-Phänotypen der einzelnen CH<sub>4</sub>-Profile, gemessen auf den Versuchsbetrieben (n=589)**

Phänotyp <sup>1</sup>	Einheit	Mittelwert	SD	Min.	Max.
<b>pmean</b>	ppm <sub>xm</sub>	119	51	23	333
<b>rpmean</b>	ppm <sub>xm</sub>	303	142	48	1.034
<b>remean</b>	ppm <sub>xm</sub>	396	193	56	1.482
<b>gCH<sub>4</sub></b>	g / d	314	130	55	749
<b>gCH<sub>4</sub>(GF)</b>	g / d	413	113	200	884
<b>pn</b>	n	155	17	107	206

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

### 4.1.2 Einflussfaktoren auf die CH<sub>4</sub>-Phänotypen

Im folgenden Kapitel wird den Zusammenhängen der Einflussfaktoren LMD, Geräte-Bediener, Betrieb bzw. Betriebsbesuch, Windgeschwindigkeit, Fütterungsgruppe, Laktations-tag, ECM und Lebendmasse auf die CH<sub>4</sub>-Merkmale nachgegangen. Hierbei soll dargestellt werden, wie die einzelnen Faktoren auf die gemessenen CH<sub>4</sub>-Werte wirkten. Kombinierte Effekte werden vorerst einzeln aufgeschlüsselt.

Die drei LMD-Geräte unterschieden sich voneinander signifikant ( $p < 0,05$ ). Dies zeigt der Vergleich der Least Square Means (LSM) der CH<sub>4</sub>-Konzentrationen auf den PB. Besonders LMD 3 detektierte leicht höhere Werte als LMD 1 und 2. Auf den VB zeigte nur LMD 3 eine signifikant ( $p < 0,05$ ) höhere CH<sub>4</sub>-Konzentration als die anderen Geräte. Dies war jedoch nur bei den Merkmalen pmean, rpmean und gCH<sub>4</sub>(GF) der Fall. Im Merkmal pn waren die Unterschiede zwischen den Geräten kleiner. Auf den PB wich nur das Gerät 3 von Gerät 1 signifikant ( $p < 0,05$ ) ab (Tabelle 23).

Die auf den PB durch unterschiedliche bedienende Personen gemessenen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und -Mengen wiesen signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede auf. So unterschieden sich generell die Messpersonen 1 und 2 voneinander. Messperson 3 unterschied sich in den Merkmalen pmean, gCH<sub>4</sub> und CH<sub>4</sub>(GF) von Messperson 2. In den Merkmalen pmean und gCH<sub>4</sub>(GF) wies zusätzlich Messperson 5 einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschied zu Person 2 auf. Im Merkmal remean unterschied sich die bedienende Person 5 von Person 1. Generell erfasste Messperson 1 die höchsten und Messperson 2 die niedrigsten CH<sub>4</sub>-Werte. Im Gegensatz zu den PB waren die auf den VB gemessenen CH<sub>4</sub>-

Konzentrations- und Mengenunterschiede zwischen den Bedienern nicht signifikant ( $p < 0,05$ ) voneinander verschieden. Person 5 maß auf den PB signifikant ( $p < 0,05$ ) weniger Atemzüge als die anderen bedienenden Personen. Weitere Unterschiede traten bei der Messung der Atemzüge nicht auf. In Tabelle 24 sind die Unterschiede der LSM der einzelnen CH<sub>4</sub>-Phänotypen ersichtlich.

**Tabelle 23: Einfluss des LMD-Geräts auf die Werte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen (Least Square Means  $\pm$  Standardfehler)**

	LMD	n	pmean (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	rpmean (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	remean (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	Pn (n) <sup>1</sup>
PB <sup>3</sup>	1	663	120 $\pm$ 2 <sup>a2</sup>	291 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	363 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	292 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	415 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	150 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	2	698	111 $\pm$ 2 <sup>b</sup>	267 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	332 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	265 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	394 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	148 $\pm$ 0 <sup>ab</sup>
	3	299	145 $\pm$ 3 <sup>c</sup>	349 $\pm$ 7 <sup>c</sup>	431 $\pm$ 8 <sup>c</sup>	333 $\pm$ 7 <sup>c</sup>	469 $\pm$ 7 <sup>c</sup>	147 $\pm$ 1 <sup>b</sup>
VB <sup>4</sup>	1	228	120 $\pm$ 3 <sup>a</sup>	307 $\pm$ 9 <sup>a</sup>	397 $\pm$ 13 <sup>a</sup>	314 $\pm$ 9 <sup>a</sup>	414 $\pm$ 7 <sup>a</sup>	155 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	2	228	114 $\pm$ 3 <sup>a</sup>	285 $\pm$ 9 <sup>a</sup>	374 $\pm$ 13 <sup>a</sup>	301 $\pm$ 9 <sup>a</sup>	400 $\pm$ 7 <sup>a</sup>	157 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	3	133	128 $\pm$ 4 <sup>b</sup>	327 $\pm$ 12 <sup>b</sup>	432 $\pm$ 17 <sup>a</sup>	334 $\pm$ 11 <sup>a</sup>	433 $\pm$ 10 <sup>b</sup>	153 $\pm$ 1 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12; <sup>2</sup> unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede an ( $p < 0,05$ ); <sup>3</sup> Praxisbetrieb; <sup>4</sup> Versuchsbetrieb

**Tabelle 24: Einfluss der bedienenden Person auf die Werte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen (Least Square Means  $\pm$  Standardfehler)**

	Person	n	pmean (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	rpmean (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	remean (ppm $\times$ m) <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (g/d) <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) (g/d) <sup>1</sup>	pn (n) <sup>1</sup>
PB <sup>3</sup>	1	165	126 $\pm$ 5 <sup>a2</sup>	317 $\pm$ 10 <sup>a</sup>	395 $\pm$ 11 <sup>a</sup>	311 $\pm$ 10 <sup>a</sup>	429 $\pm$ 10 <sup>a</sup>	151 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	2	399	107 $\pm$ 4 <sup>b</sup>	269 $\pm$ 9 <sup>b</sup>	341 $\pm$ 10 <sup>b</sup>	261 $\pm$ 9 <sup>b</sup>	396 $\pm$ 9 <sup>b</sup>	149 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	3	676	122 $\pm$ 2 <sup>a</sup>	295 $\pm$ 5 <sup>ab</sup>	370 $\pm$ 6 <sup>ab</sup>	296 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	419 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	150 $\pm$ 0 <sup>a</sup>
	4	224	117 $\pm$ 4 <sup>ab</sup>	283 $\pm$ 8 <sup>ab</sup>	348 $\pm$ 10 <sup>b</sup>	276 $\pm$ 9 <sup>ab</sup>	407 $\pm$ 9 <sup>ab</sup>	149 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	5	196	124 $\pm$ 3 <sup>a</sup>	289 $\pm$ 6 <sup>ab</sup>	354 $\pm$ 7 <sup>b</sup>	285 $\pm$ 6 <sup>ab</sup>	424 $\pm$ 6 <sup>a</sup>	145 $\pm$ 1 <sup>b</sup>
VB <sup>4</sup>	1	192	116 $\pm$ 4 <sup>a</sup>	295 $\pm$ 12 <sup>a</sup>	383 $\pm$ 17 <sup>a</sup>	304 $\pm$ 11 <sup>a</sup>	405 $\pm$ 9 <sup>a</sup>	158 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	2	89	115 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	289 $\pm$ 15 <sup>a</sup>	389 $\pm$ 20 <sup>a</sup>	304 $\pm$ 14 <sup>a</sup>	97 $\pm$ 12 <sup>a</sup>	154 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	3	267	120 $\pm$ 3 <sup>a</sup>	305 $\pm$ 9 <sup>a</sup>	399 $\pm$ 12 <sup>a</sup>	314 $\pm$ 8 <sup>a</sup>	414 $\pm$ 7 <sup>a</sup>	156 $\pm$ 2 <sup>a</sup>
	4	81	132 $\pm$ 6 <sup>a</sup>	328 $\pm$ 16 <sup>a</sup>	419 $\pm$ 21 <sup>a</sup>	343 $\pm$ 14 <sup>a</sup>	440 $\pm$ 12 <sup>a</sup>	153 $\pm$ 2 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12; <sup>2</sup> unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede an ( $p < 0,05$ ); <sup>3</sup> Praxisbetrieb; <sup>4</sup> Versuchsbetrieb

Die Unterschiede zwischen den PB waren hoch signifikant ( $p < 0,0001$ ), wobei in PB 3 die höchsten CH<sub>4</sub>-Werte (pmean = 168 ppm $\times$ m) gemessen wurden, gefolgt von PB 1 und PB 2 (pmean = 115 ppm $\times$ m bzw. 89 ppm $\times$ m). Die in den VB durchschnittlich gemessenen CH<sub>4</sub>-

Konzentrationen für das Merkmal pmean lagen zwischen 104-135 ppmxm, wobei sich in den Merkmalen pmean und CH<sub>4</sub>(GF) nur der Betrieb mit der geringsten CH<sub>4</sub>-Konzentration (VB 4) signifikant ( $p < 0,05$ ) von dem mit der höchsten Konzentration (VB 3) unterschied. Bei den Ruktusmerkmalen trat zudem ein signifikanter ( $p < 0,05$ ) Unterschied zwischen VB1 und VB3 auf. In dem Merkmal gCH<sub>4</sub> unterschieden sich VB1 und VB4 signifikant ( $p < 0,05$ ) voneinander. PB 3 unterschied sich im Merkmal pn signifikant ( $p < 0,05$ ) von PB 1 und 2. Auf den VB ähnelten sich im gleichen Merkmal VB 3 und 4. Signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede traten zu und unter den anderen VB auf (Tabelle 25).

**Tabelle 25: Einfluss des Betriebes auf die Werte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen (Least Square Means  $\pm$  Standardfehler)**

	Betrieb	n	pmean (ppmxm) <sup>1</sup>	rpmean (ppmxm) <sup>1</sup>	remea (ppmxm) <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (g/d) <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) (g/d) <sup>1</sup>	pn (n) <sup>1</sup>
PB <sup>3</sup>	1	508	114 $\pm$ 2 <sup>a</sup>	272 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	341 $\pm$ 6 <sup>a</sup>	284 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	403 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	150 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	2	657	89 $\pm$ 2 <sup>b</sup>	235 $\pm$ 4 <sup>b</sup>	305 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	231 $\pm$ 5 <sup>b</sup>	346 $\pm$ 4 <sup>b</sup>	150 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	3	495	168 $\pm$ 2 <sup>c</sup>	385 $\pm$ 5 <sup>c</sup>	460 $\pm$ 6 <sup>c</sup>	366 $\pm$ 5 <sup>c</sup>	521 $\pm$ 5 <sup>c</sup>	145 $\pm$ 1 <sup>b</sup>
VB <sup>4</sup>	1	278	121 $\pm$ 3 <sup>ab</sup>	295 $\pm$ 8 <sup>a</sup>	380 $\pm$ 11 <sup>a</sup>	335 $\pm$ 8 <sup>a</sup>	417 $\pm$ 7 <sup>ab</sup>	162 $\pm$ 1 <sup>a</sup>
	2	110	122 $\pm$ 5 <sup>ab</sup>	331 $\pm$ 13 <sup>ab</sup>	428 $\pm$ 18 <sup>ab</sup>	294 $\pm$ 12 <sup>ab</sup>	419 $\pm$ 11 <sup>ab</sup>	151 $\pm$ 1 <sup>b</sup>
	3	74	135 $\pm$ 6 <sup>a</sup>	355 $\pm$ 16 <sup>b</sup>	474 $\pm$ 22 <sup>b</sup>	316 $\pm$ 15 <sup>ab</sup>	447 $\pm$ 13 <sup>a</sup>	138 $\pm$ 2 <sup>c</sup>
	4	127	104 $\pm$ 4 <sup>b</sup>	266 $\pm$ 12 <sup>a</sup>	357 $\pm$ 17 <sup>a</sup>	283 $\pm$ 11 <sup>b</sup>	380 $\pm$ 10 <sup>b</sup>	154 $\pm$ 1 <sup>cd</sup>

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12; <sup>2</sup> unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede an ( $p < 0,05$ ); <sup>3</sup> Praxisbetrieb; <sup>4</sup> Versuchsbetrieb

Es unterschieden sich nicht nur die Betriebe voneinander, sondern auch die Besuche auf den einzelnen Betrieben zeigten signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede. So überstiegen zum Beispiel die CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und Mengen auf PB 1 des zweiten Betriebsbesuchs die der anderen Besuche. Dies traf für alle Merkmale zu. In PB 2 waren es die Betriebsbesuche 3 und 7, die sich signifikant ( $p < 0,05$ ) voneinander unterschieden, wobei zu Besuch 3 die geringsten und zu Besuch 7 die höchsten Werte innerhalb des zweiten Praxisbetriebs gemessen wurden. Das Ruktusmerkmal rpmean unterschied sich zudem bei den Betriebsbesuchen 6 und 7 mit einer Differenz von 67 ppmxm signifikant ( $p < 0,05$ ). Die Messungen in PB 3 waren überwiegend homogen. Nur im Merkmal remean wich der Besuch 4 (remea = 426 ppmxm) von den Besuchen 2 (remea = 487 ppmxm) und 3 (remea = 501 ppmxm) ab. Weiterhin unterschieden sich im gleichen Merkmal Besuch 1 (remea = 440 ppmxm) und 3 signifikant ( $p < 0,05$ ). Das Merkmal gCH<sub>4</sub> unterschied sich zu Besuch 3 von den Besuchen 1 und 4 signifikant ( $p < 0,05$ ). Bezüglich des Merkmals pn zeigte

auf PB 1 der dritte Besuch signifikant ( $p < 0,05$ ) mehr Atemzüge im Profil ( $n = 160$ ) als zu den anderen beiden Besuchen ( $n = 146$  und  $n = 142$ ). Auf PB 2 traten verschiedenartige Wechselwirkungen zwischen den Betriebsbesuchen auf. Weiterhin gab es auf PB 3 die Tendenz, dass mit einem weiteren Betriebsbesuch die Anzahl der Atemzüge im Profil abnahm (Abbildung 21). Innerhalb der VB gab es wenig signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede zwischen den gemessenen  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen und Mengen. Der erste Besuch in VB 1 unterschied sich in den Merkmalen  $r_{pmean}$ ,  $r_{emean}$  und  $\text{CH}_4g$  signifikant ( $p < 0,05$ ) von Besuch 4, wobei die Differenzen  $110 \text{ ppm}\times\text{m}$ ,  $155 \text{ ppm}\times\text{m}$  und  $95 \text{ ppm}\times\text{m}$  betragen. In VB 2 unterschieden sich die Betriebsbesuche 4, 5 und 6 von Betriebsbesuch 1 in den Merkmalen  $p_{mean}$  und  $g\text{CH}_4(\text{GF})$  signifikant ( $p < 0,05$ ). Hier finden sich die Differenzen der LSM im Merkmal  $p_{mean}$  von  $54 \text{ ppm}\times\text{m}$ ,  $71 \text{ ppm}\times\text{m}$  und  $57 \text{ ppm}\times\text{m}$ . Bezüglich des Merkmals  $p_n$  unterschied sich auf VB 1 nur der dritte Betriebsbesuch ( $n = 167$ ) zu den Besuchen 1 ( $n = 154$ ) und 4 ( $n = 156$ ) und auf VB 2 wich die gemessene Anzahl an Atemzügen zu Besuch 2 ( $n = 135$ ) von allen anderen Besuchen ( $n = 150-163$ ) – außer Besuch 3 ( $n = 146$ ) – ab.

Die Windgeschwindigkeiten wurden in vier Klassen eingeteilt. Dies erfolgte in Abständen von  $0,2 \text{ m/s}$ . Für die Klasse 1 betrug die Obergrenze auf den PB  $0,2 \text{ m/s}$  und auf den VB  $0,25 \text{ m/s}$ . Die auf den PB gemessenen Windgeschwindigkeiten verhielten sich zur  $\text{CH}_4$ -Konzentration invers, das heißt, dass die  $\text{CH}_4$ -Konzentration mit steigender Windklasse abnahm. Dabei wurden bei Windklasse 4 die geringsten  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen und -Mengen gemessen, außerdem wies diese Klasse einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschied zu den anderen Klassen auf. Auf den VB wurden keine signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschiede der  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen und -Mengen zwischen den Windklassen festgestellt. Bei der Betrachtung der Anzahl der Atemzüge im Profil ließ sich erkennen, dass mit steigender Windgeschwindigkeit die Anzahl anstieg. Auf den PB war dieser Verlauf signifikant ( $p < 0,05$ ), auf den VB war dies als Trend zu erkennen (Tabelle 26).

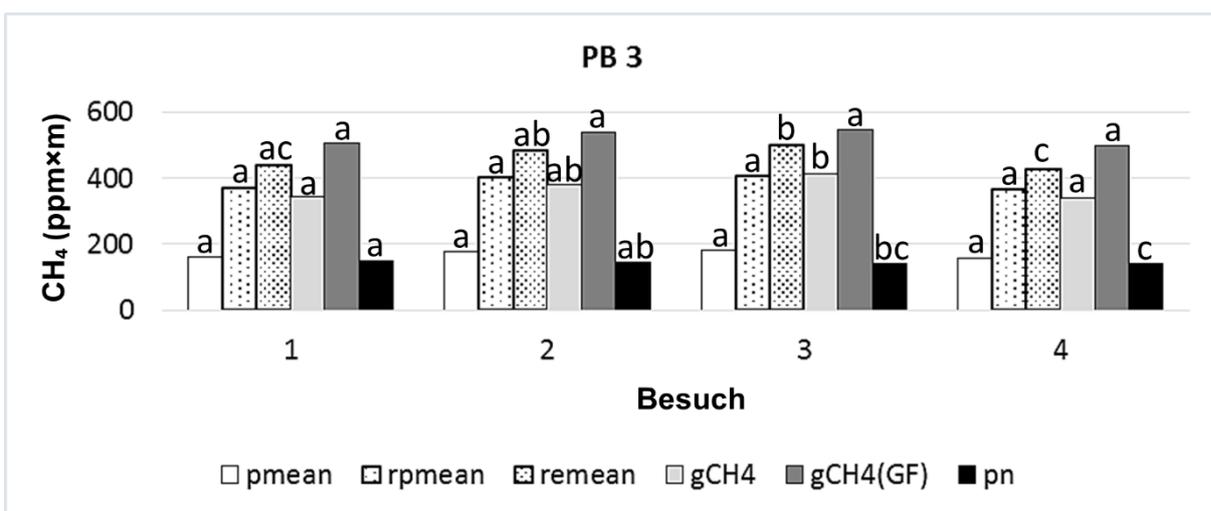
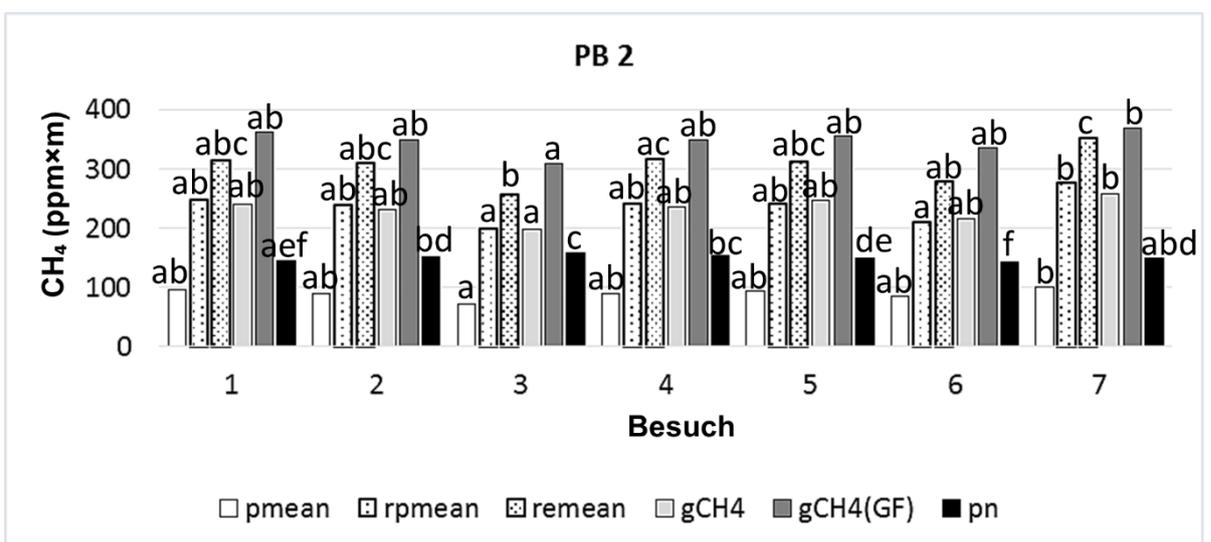
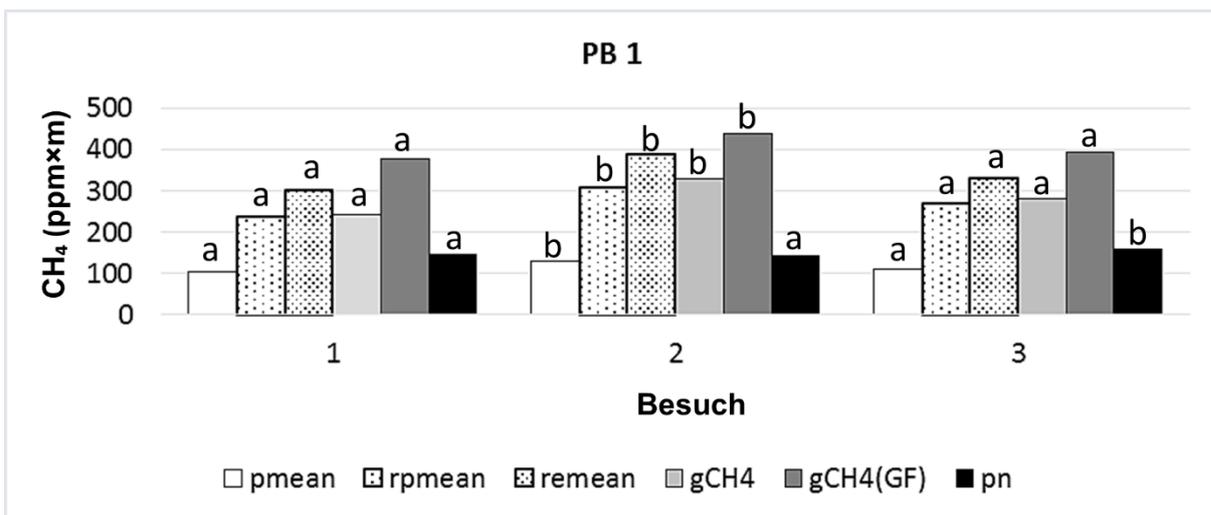


Abbildung 21: Einfluss des Besuchs auf die Werte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen (pmean, rpmean, remean, gCH<sub>4</sub>, gCH<sub>4</sub>(GF)) und die Anzahl an Atemzügen (pn) im Profil (LSM) auf Praxisbetrieb (PB) 1, PB 2 und PB 3 (Buchstaben geben signifikante Unterschiede zwischen Besuchen innerhalb eines CH<sub>4</sub>-Phänotypen an (p < 0,05)); pmean, rpmean, remean in ppmxm; gCH<sub>4</sub>, gCH<sub>4</sub>(GF) in g/d; pn: Anzahl; Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

**Tabelle 26: Einfluss der Windklasse auf die Werte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen (Least Square Means ± Standardfehler)**

	WKL <sup>1</sup>	n	pmean (ppm×m) <sup>2</sup>	rpmean (ppm×m) <sup>2</sup>	remean (ppm×m) <sup>2</sup>	gCH <sub>4</sub> (g/d) <sup>2</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) (g/d) <sup>2</sup>	pn (n) <sup>2</sup>
<b>PB<sup>4</sup></b>	1	367	121 ± 3 <sup>a3</sup>	296 ± 6 <sup>a</sup>	366 ± 8 <sup>a</sup>	293 ± 7 <sup>a</sup>	418 ± 6 <sup>a</sup>	149 ± 1 <sup>a</sup>
	2	498	126 ± 3 <sup>a</sup>	302 ± 6 <sup>a</sup>	374 ± 6 <sup>a</sup>	303 ± 6 <sup>a</sup>	427 ± 6 <sup>a</sup>	150 ± 1 <sup>ac</sup>
	3	408	125 ± 3 <sup>a</sup>	302 ± 6 <sup>a</sup>	372 ± 7 <sup>a</sup>	295 ± 6 <sup>a</sup>	426 ± 6 <sup>a</sup>	147 ± 1 <sup>b</sup>
	4	387	108 ± 3 <sup>b</sup>	261 ± 6 <sup>b</sup>	333 ± 7 <sup>b</sup>	256 ± 6 <sup>b</sup>	387 ± 6 <sup>b</sup>	153 ± 1 <sup>c</sup>
<b>VB<sup>5</sup></b>	1	166	118 ± 4 <sup>a</sup>	311 ± 11 <sup>a</sup>	411 ± 14 <sup>a</sup>	301 ± 10 <sup>a</sup>	411 ± 9 <sup>a</sup>	153 ± 1 <sup>a</sup>
	2	183	119 ± 4 <sup>a</sup>	303 ± 11 <sup>a</sup>	398 ± 14 <sup>a</sup>	306 ± 10 <sup>a</sup>	413 ± 8 <sup>a</sup>	154 ± 1 <sup>a</sup>
	3	63	124 ± 6 <sup>a</sup>	314 ± 18 <sup>a</sup>	416 ± 24 <sup>a</sup>	347 ± 16 <sup>a</sup>	422 ± 14 <sup>a</sup>	159 ± 2 <sup>a</sup>
	4	176	119 ± 4 <sup>a</sup>	291 ± 11 <sup>a</sup>	373 ± 15 <sup>a</sup>	326 ± 10 <sup>a</sup>	412 ± 9 <sup>a</sup>	156 ± 2 <sup>a</sup>

<sup>1</sup> Windklasse; <sup>2</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12; <sup>3</sup> unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede an (p < 0,05); <sup>4</sup> Praxisbetrieb; <sup>5</sup> Versuchsbetrieb

Die Lufttemperatur im Stall zeigte einen signifikanten Einfluss auf das Merkmal pn. Mit steigender Lufttemperatur stieg die Anzahl der Atemzüge, die innerhalb der fünfminütigen Messphase abgegeben wurden, signifikant (p < 0,05) an (Tabelle 27).

**Tabelle 27: Einfluss der Klasse der Lufttemperatur auf die Werte des Phänotyps pn (Least Square Means ± Standardfehler)**

	TKL <sup>1</sup>	n	pn (n) <sup>2</sup>
<b>PB<sup>4</sup></b>	1	367	143 ± 1 <sup>a3</sup>
	2	498	148 ± 1 <sup>b</sup>
	3	408	153 ± 1 <sup>c</sup>
	4	387	155 ± 1 <sup>c</sup>
<b>VB<sup>5</sup></b>	1	166	151 ± 2 <sup>a</sup>
	2	183	151 ± 1 <sup>a</sup>
	3	63	157 ± 2 <sup>b</sup>
	4	176	163 ± 2 <sup>b</sup>

<sup>1</sup> Lufttemperaturklasse; <sup>2</sup> Erklärung des Phänotyps: siehe Tabelle 12; <sup>3</sup> unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede an (p < 0,05); <sup>4</sup> Praxisbetrieb; <sup>5</sup> Versuchsbetrieb

Für die genetisch-statistische Auswertung werden später aus allen Einzelprofilen einer Kuh zusätzlich die Mittelwerte für jeden CH<sub>4</sub>-Phänotyp und für pn gebildet. Der Effekt Windklasse kann bei jedem Einzelprofil innerhalb einer Kuh andere Werte annehmen. Einen Mittelwert

der Windklassen dieser Einzelprofile zu bilden, ist für die genetisch-statistische Auswertung nicht sinnvoll. Daher wird dieser Effekt dort durch den Effekt Fütterungsgruppe ersetzt. Diese bleibt für eine Kuh über mehrere Einzelprofile hinweg konstant. Da die Fütterungsgruppen jeweils in unterschiedlichen Teilen des Stalles untergebracht waren, wurde angenommen, dass dieser Effekt ungefähr die baulichen Bedingungen widerspiegelt, die einen Einfluss auf die vorherrschende Windgeschwindigkeit in dieser Gruppe hatten. Dieser Effekt ist besonders in PB 1 und PB 2 zu erkennen. In PB 1 waren die Unterschiede aller CH<sub>4</sub>-Merkmale zwischen den Gruppen signifikant ( $p < 0,05$ ) und in PB 2 war nur der Unterschied im Merkmal pn nicht signifikant ( $p < 0,05$ ). Die CH<sub>4</sub>-Phänotypen pmean, rpmean und gCH<sub>4</sub>(GF), die auf PB 3 gemessen wurden, zeigten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Fütterungsgruppen (Abbildung 22). Auf den VB ist zu beachten, dass die VB 2 und 3 nur zwei, VB 1 drei und VB 4 vier Fütterungsgruppen aufwiesen. In VB 1 unterschieden sich die gemessenen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und gCH<sub>4</sub>(GF) zwischen den Fütterungsgruppen 1 und 3 und in VB 2 zwischen Fütterungsgruppe 1 und 2 signifikant ( $p < 0,05$ ). Im Merkmal gCH<sub>4</sub> traten keine signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschiede auf. Dies war ebenso der Fall im Merkmal pn auf VB 1. Auf VB 2 war in diesem Merkmal der Unterschied zwischen den Fütterungsgruppen signifikant ( $p < 0,05$ ). Auf den VB 3 und 4 wurden keine signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschiede zwischen den Merkmalen festgestellt. Eine Ausnahme bildete das Merkmal gCH<sub>4</sub>, welches auf VB 4 eine knappe Signifikanz ( $p = 0,0495$ ) zeigte.

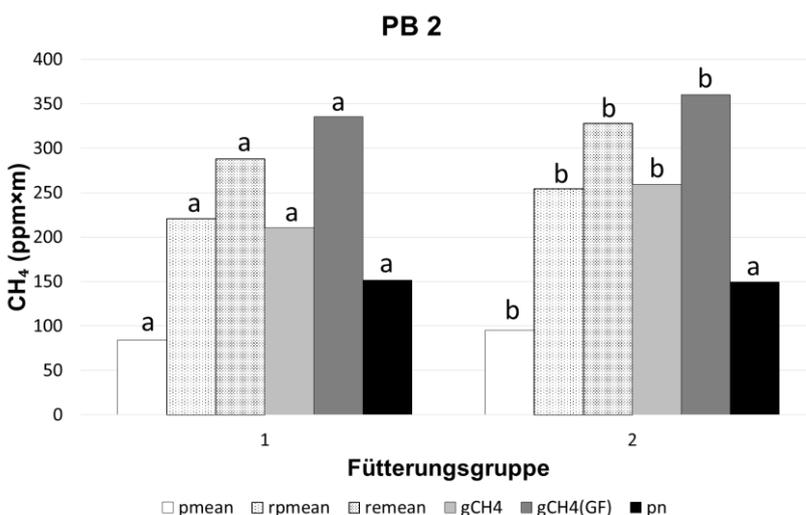
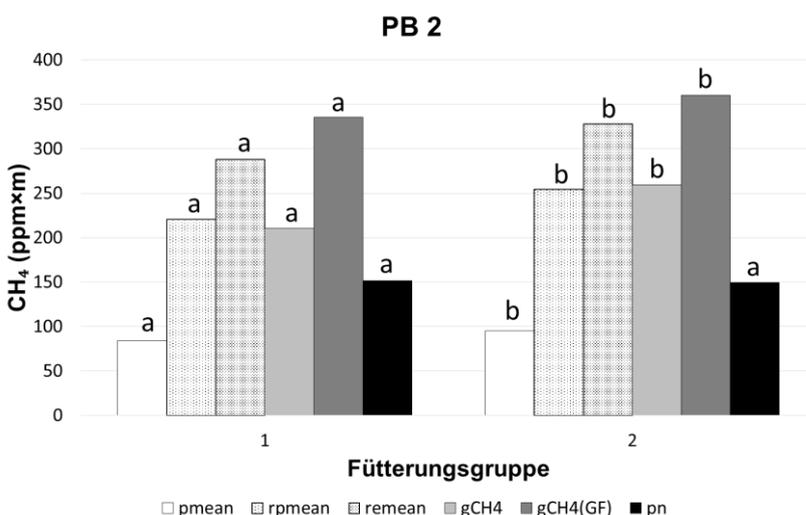
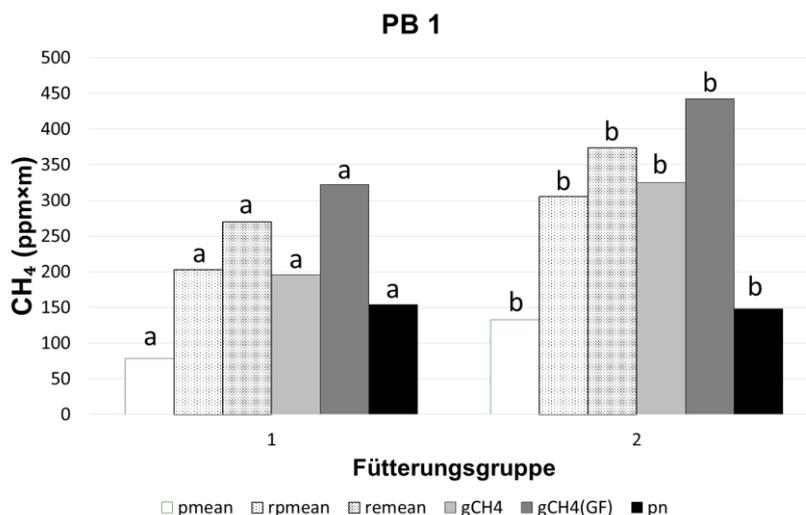


Abbildung 22: Einfluss der Fütterungsgruppe auf die Werte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen (pmean, rpmean, remean, gCH<sub>4</sub>, gCH<sub>4</sub>(GF)) und die Anzahl an Atemzügen (pn) im Profil (LSM) auf Praxisbetrieb (PB) 1, PB 2 und PB 3 (Buchstaben geben signifikante Unterschiede (p < 0,05) zwischen Fütterungsgruppen an)

Der Laktationsverlauf der CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und -Mengen, die in den PB gemessen wurden, wird in Abbildung 23 dargestellt. Für beide Betriebsarten wurde der Laktationstag in sechs gleich große Klassen eingeteilt. Zu Klasse 1 zählen die Laktationstage 5 bis 40. Die weiteren Klassen folgen in 20 Tagesschritten. Die Laktationstagklasse (LTK) 1 zeigte bei allen CH<sub>4</sub>-Phänotypen den kleinsten Wert, wohingegen in den Klassen 4 und 5 die CH<sub>4</sub>-Werte signifikant ( $p < 0,05$ ) höher waren als in den niedrigeren Klassen. Zu der 6. LTK sanken die Werte aller CH<sub>4</sub>-Phänotypen wieder ab, wobei bei den Phänotypen pmean, rpmean und gCH<sub>4</sub>(GF) ein signifikanter ( $p < 0,05$ ) Unterschied zur LTK 6 vorlag. Der Unterschied zwischen LTK 1 und 6 war in den Phänotypen rpmean, remean und gCH<sub>4</sub> signifikant ( $p < 0,05$ ). In den VB war ebenfalls ein Anstieg zur fünften LTK zu erkennen, dieser Unterschied war bei den Ruktusmerkmalen signifikant ( $p < 0,05$ ). Die niedrigsten CH<sub>4</sub>-Werte wurde in Klasse 2 gemessen, während die höchsten in Klasse 5 gemessen wurden. Die größten Abweichungen der Phänotypen rpmean und remean von 74 ppmxm und 100 ppmxm traten zwischen diesen Klassen auf. Die CH<sub>4</sub>-Werte der LTK 6 waren niedriger als die der LTK 5, wobei der Unterschied nicht signifikant ( $p < 0,05$ ) war.

Im Merkmal pn sank die Anzahl an Atemzügen innerhalb der Fünf-Minuten-Messperiode über die LTK hinweg leicht ab. Auf den PB wurde in der LTK 5 signifikant ( $p < 0,05$ ) weniger Atemzüge gemessen als in LTK 1 und 3. Eindeutiger war dieser Verlauf auf den VB zu erkennen. Dort wurden in der LTK 5 signifikant ( $p < 0,05$ ) weniger Atemzüge gemessen als in LTK 1-3. Zur letzten Klasse erhöhte sich die Anzahl der Atemzüge wieder leicht, wobei der Unterschied zu den Klassen 1-3 trotzdem noch signifikant ( $p < 0,05$ ) war.

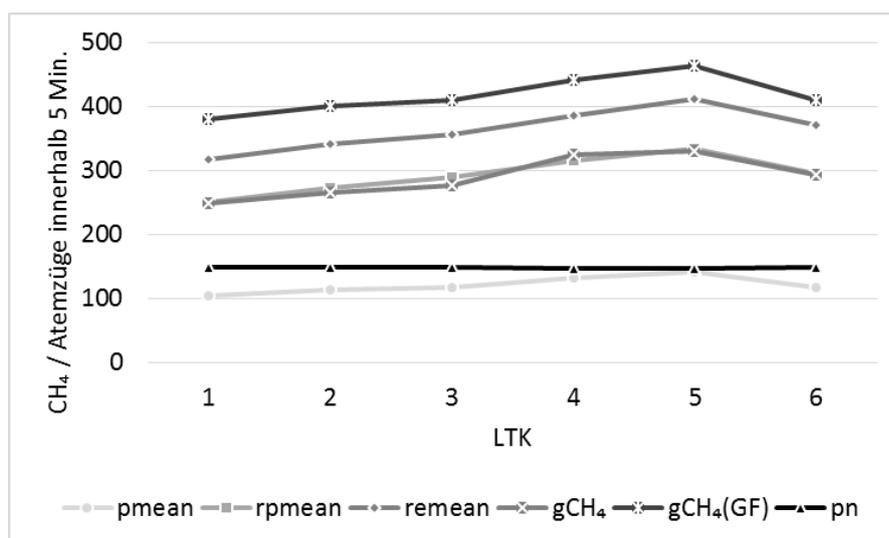
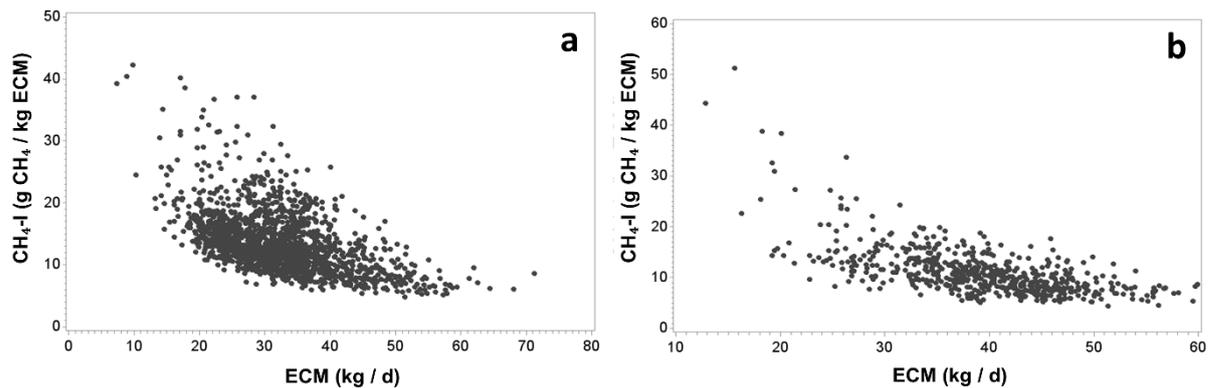


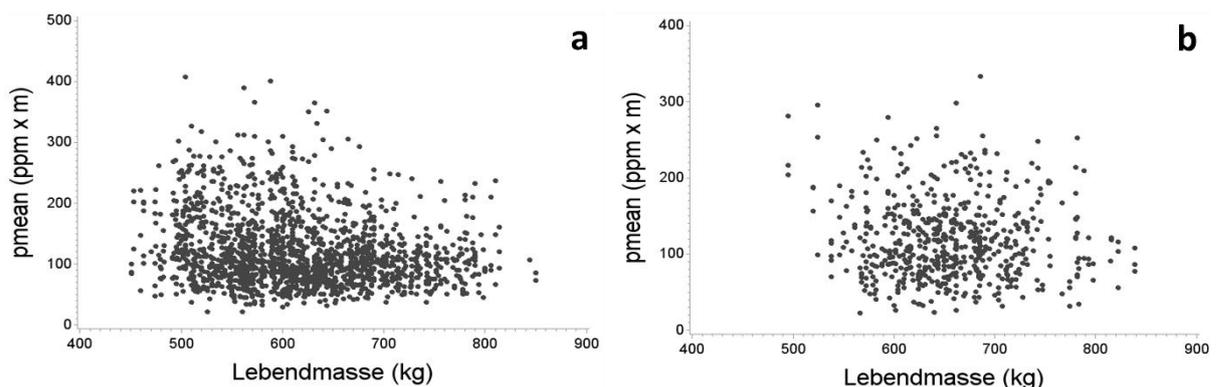
Abbildung 23: Verlauf der CH<sub>4</sub>-Werte aller CH<sub>4</sub>-Phänotypen und der Anzahl an Atemzügen (pn) in Abhängigkeit von der Laktationstagklasse (LTK), gemessen auf den Praxisbetrieben (n = 1.660); Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

Die ECM wurde als Kovariable hinsichtlich ihrer Einflussnahme auf die  $\text{CH}_4$ -Produktion getestet. Auf den PB war der Zusammenhang zwischen ECM und  $\text{CH}_4$  signifikant ( $p < 0,05$ ), so dass mit steigender ECM auch die  $\text{CH}_4$ -Konzentration zunahm. Bei der Betrachtung der  $\text{CH}_4$ -Intensität ( $\text{CH}_4\text{-I}$ ) konnte zudem gezeigt werden, dass mit zunehmender Milchleistung der Anteil des gebildeten  $\text{CH}_4$  je Liter produzierter Milch abnahm. Auf den VB war dieser Trend ebenfalls zu sehen, jedoch war der Einfluss der ECM nicht signifikant ( $p < 0,05$ ) ausgeprägt (Abbildung 24).



**Abbildung 24: Zusammenhang von energiekorrigierter Milchleistung (ECM) und  $\text{CH}_4$ -Intensität ( $\text{CH}_4\text{-I}$ ), gemessen auf den Praxisbetrieben (a) und auf den Versuchsbetrieben (b)**

Die Lebendmasse der Kuh wurde als Kovariable auf ihren Einfluss auf die  $\text{CH}_4$ -Produktion untersucht. Sowohl auf den PB als auch auf den VB zeigte sie keinen Einfluss auf die  $\text{CH}_4$ -Bildung aller Merkmale (Abbildung 25).



**Abbildung 25: Zusammenhang von Lebendmasse und  $\text{CH}_4$ -Konzentration des Merkmals pmean, gemessen auf den Praxisbetrieben (a) und auf den Versuchsbetrieben (b)**

## 4.2 Modell für die genetisch-statistische Auswertung

Nach der Überprüfung des Einflusses der einzelnen Faktoren auf die CH<sub>4</sub>-Produktion wurde ein Gesamtmodell für die genetisch-statistische Auswertung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen erstellt. Aufgrund des geringen Einflusses der getesteten Effekte auf den VB basiert das hier vorgestellte Modell auf den Daten der PB. Die Faktoren LMD-Gerät und Messperson wurden dabei als ein Effekt betrachtet, weil nicht alle bedienenden Personen mit jedem Gerät gemessen hatten. Ebenso war der Betriebsbesuch mit der Windklasse verknüpft, da die Windgeschwindigkeiten durch die Saison, in der die Messung stattfand, beeinflusst wurde.

### 4.2.1 Einzelprofile

Es zeigte sich, dass sich die für das Gesamtmodell ausgewählten fixen Effekte hoch signifikant auf die CH<sub>4</sub>-Werte auswirkten ( $p < 0,0001$ ). Die Kovariable ECM übte ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf alle CH<sub>4</sub>-Merkmale aus ( $p < 0,05$ ). Die Lebendmasse zeigte, außer im Merkmal gCH<sub>4</sub>, keinen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Phänotypen (Tabelle 28).

**Tabelle 28: P-Werte aller Effekte im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH<sub>4</sub>-Phänotypen auf den Praxisbetrieben**

	Einflussgrößen <sup>1</sup>	pmean <sup>2</sup>	rpmean <sup>2</sup>	remean <sup>2</sup>	gCH <sub>4</sub> <sup>2</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) <sup>2</sup>
<b>fixe Effekte</b>	<b>BB×WKL</b>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	<b>Ger×Bed</b>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	<b>LTK</b>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<b>Kovariablen</b>	<b>ECM</b>	0,0177	0,0110	0,0145	0,0089	0,0177
	<b>LM</b>	n.s.	n.s.	n.s.	<0,0001	n.s.

<sup>1</sup> BB = Betriebsbesuch, WKL = Windklasse, Ger = LMD-Gerät, Bed = bedienende Person, LTK = Laktationstagklasse, ECM = energiekorrigierte Milchleistung, LM = Lebendmasse; <sup>2</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

Abbildung 26 zeigt für das Merkmal pmean exemplarisch, welchen Einfluss einzelne Betriebsbesuche und Windklassen hatten. Zudem wird der Zusammenhang dieser Einflussfaktoren ersichtlich, was die Kombination dieser erklärt. Es ist zu sehen, dass sich die Betriebe hinsichtlich auftretender Windklassen unterschieden. In Betrieb 2 wurden kleinere Windgeschwindigkeiten und auch geringere LSM im Vergleich zu den anderen Betrieben gemessen. Obwohl in den Betrieben 1 und 3 alle Windklassen auftraten, wurden auf Betrieb 3 höhere

CH<sub>4</sub>-Werte – auch in der gleichen Klasse – gemessen als auf Betrieb 1. Zusätzlich unterschieden sich auch einzelne Besuche auf den gleichen Betrieben voneinander. Nicht zu jedem Betriebsbesuch traten alle bzw. die gleichen Windklassen auf. Vor allem in Betrieb 3 traten zumeist nur zwei, zu Betriebsbesuch 4 nur eine Windklasse auf.

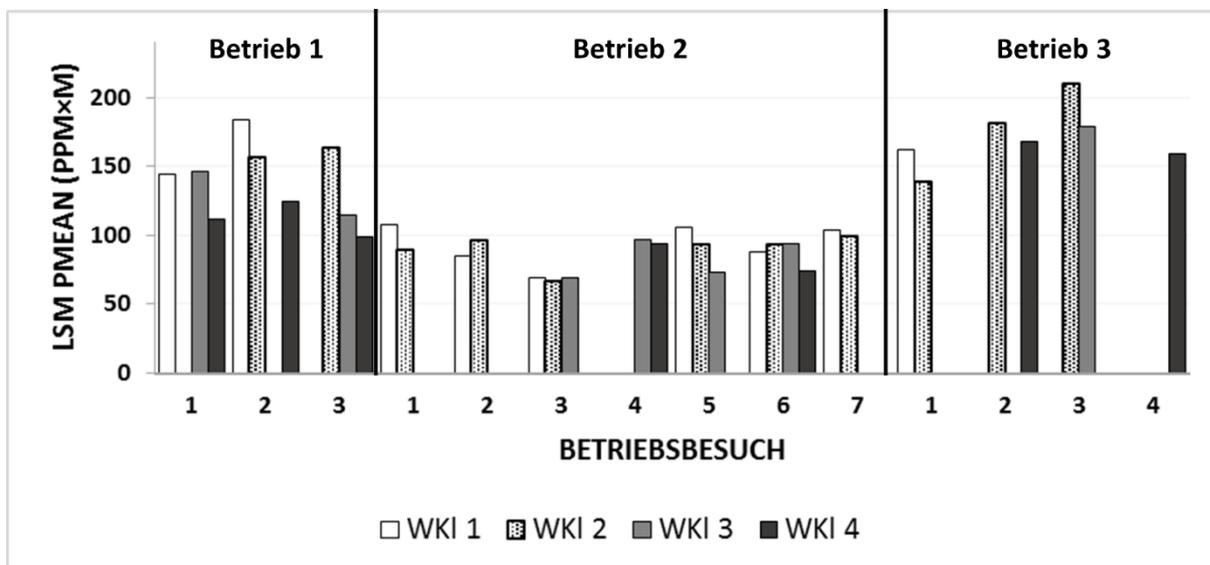


Abbildung 26: Least Square Means (LSM) des Effektes Betriebsbesuch x Windklasse für das Merkmal pmean im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH<sub>4</sub>-Phänotypen auf den Praxisbetrieben

Der zweite kombinierte Effekt LMD-Gerät x Bediener zeigte ebenfalls einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss auf die Messergebnisse, wobei hier die LSM von 91 ppmxm bei Gerät 2 und Bediener 5 bis 157 ppmxm bei Gerät 3 und Bediener 1 reichten. LMD 3 maß im Durchschnitt höhere Werte als LMD 1 und 2 (Abbildung 27).

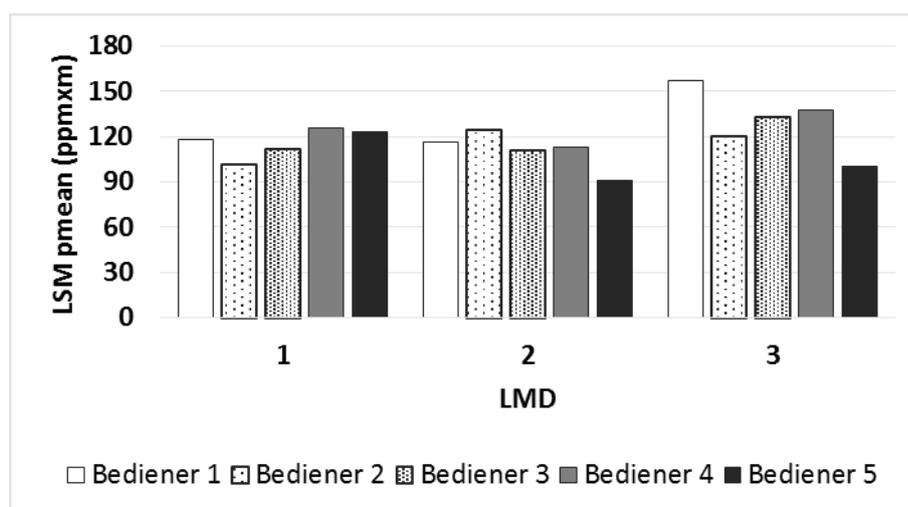


Abbildung 27: Least Square Means (LSM) des Effektes LMD x Bediener für das Merkmal pmean im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH<sub>4</sub>-Phänotypen auf den Praxisbetrieben

**Tabelle 29: Einfluss der Laktationstagsklasse (LTK) auf die CH<sub>4</sub>-Phänotypen im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Einzelprofile der CH<sub>4</sub>-Phänotypen auf den Praxisbetrieben (Least Square Means ± Standardfehler)**

LTK	pmean <sup>1</sup>	rpmean <sup>1</sup>	reman1	gCH <sub>4</sub> <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) <sup>1</sup>
1	108 ± 3 <sup>a2</sup>	264 ± 7 <sup>a</sup>	327 ± 9 <sup>a</sup>	263 ± 8 <sup>a</sup>	389 ± 7 <sup>a</sup>
2	110 ± 3 <sup>a</sup>	270 ± 7 <sup>a</sup>	342 ± 8 <sup>a</sup>	266 ± 7 <sup>a</sup>	392 ± 7 <sup>a</sup>
3	116 ± 3 <sup>ab</sup>	286 ± 8 <sup>ab</sup>	356 ± 9 <sup>ab</sup>	280 ± 8 <sup>ab</sup>	406 ± 8 <sup>ab</sup>
4	123 ± 4 <sup>bc</sup>	297 ± 8 <sup>bc</sup>	370 ± 10 <sup>bc</sup>	299 ± 8 <sup>bc</sup>	421 ± 8 <sup>bc</sup>
5	130 ± 3 <sup>c</sup>	314 ± 7 <sup>c</sup>	392 ± 9 <sup>c</sup>	310 ± 7 <sup>c</sup>	437 ± 7 <sup>c</sup>
6	126 ± 3 <sup>b</sup>	312 ± 7 <sup>c</sup>	392 ± 9 <sup>c</sup>	298 ± 8 <sup>b</sup>	428 ± 7 <sup>c</sup>

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12; <sup>2</sup> unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede an (p < 0,05)

Im Gesamtmodell stiegen die LSM des Effekts LTK bis zur fünften Klasse (Tag 101-160) an. Zur letzten Klasse fielen die LSM in allen CH<sub>4</sub>-Phänotypen wieder leicht ab. Tabelle 29 gibt eine Übersicht über die LSM aller CH<sub>4</sub>-Phänotypen.

Die ECM zeigte einen signifikanten Zusammenhang (p < 0,05) zu den CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und Mengen im Gesamtmodell, so dass mit steigender Milchleistung auch mehr CH<sub>4</sub> gebildet wurde. Das Gewicht der Kühe zeigte mit einem p-Wert von 0,31 im Gegensatz dazu keinen signifikanten (p < 0,05) Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und Mengen.

## 4.2.2 Mittelwerte aller Einzelprofile einer Kuh

Die Einflussfaktoren wirkten sich hoch signifikant (p < 0,0001) auf den Mittelwert aller Einzelprofile einer Kuh aus, wobei die Lebendmasse eine Ausnahme bildete. Nur das Merkmal gCH<sub>4</sub> wurde von der Lebendmasse hoch signifikant (p < 0,0001) beeinflusst (Tabelle 30).

**Tabelle 30: P-Werte aller Effekte im Modell für die genetisch-statistische Auswertung der Mittelwerte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen auf den Praxisbetrieben**

	Einflussgrößen <sup>1</sup>	pmean <sup>2</sup>	rpmean <sup>2</sup>	reman <sup>2</sup>	gCH <sub>4</sub> <sup>2</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) <sup>2</sup>
<b>fixe Effekte</b>	<b>BB×Gr</b>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	<b>LTK</b>	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<b>Kovariablen</b>	<b>ECM</b>	0,0004	0,0005	0,0019	<0,0001	0,0004
	<b>LM</b>	n.s.	n.s.	n.s.	<0,0001	n.s.

<sup>1</sup> BB = Betriebsbesuch, Gr = Fütterungsgruppe, LTK = Laktationstagsklasse, ECM = energiekorrigierte Milchleistung, LM = Lebendmasse; <sup>2</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

Der Vergleich des Einflusses der Fütterungsgruppen zeigte, dass auf PB 1 die Gruppe 2 stets höhere Werte als Gruppe 1 aufwies. In PB 2 unterschieden sich die Fütterungsgruppen nicht signifikant ( $p < 0,05$ ) (außer zu Betriebsbesuch 1) voneinander. Ein Vergleich der Fütterungsgruppen in Betrieb 3 war nicht möglich, da hier bei jedem Betriebsbesuch nur bei einer Gruppe  $\text{CH}_4$  gemessen wurde. Es fällt auf, dass die abgegebenen  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen in Betrieb 3 höher waren als die Konzentrationen in Betrieb 1 und 2 (Abbildung 28).

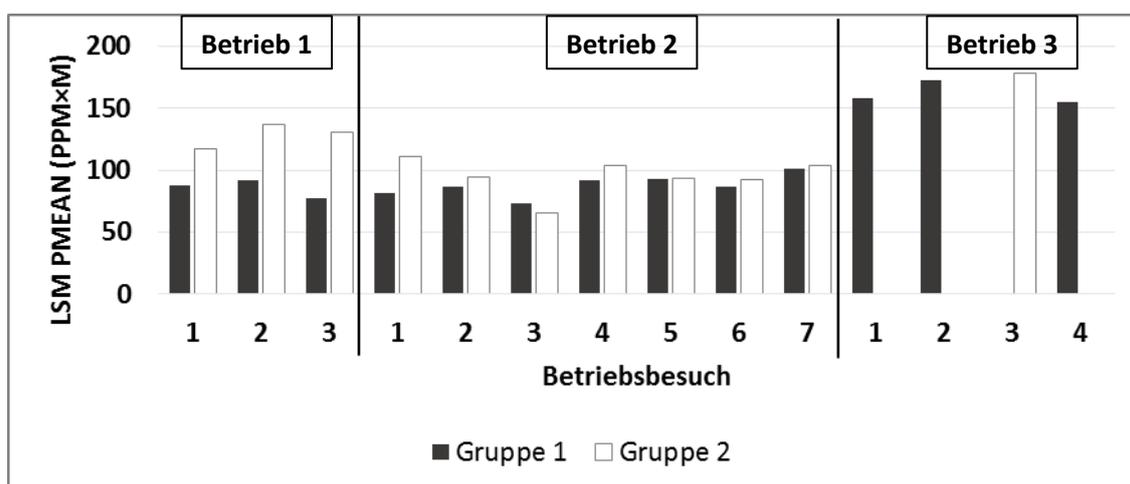


Abbildung 28: Least Square Means (LSM) des Effektes Betriebsbesuch  $\times$  Fütterungsgruppe (Gruppe) für das Merkmal pmean im Modell für die genetisch-statistische Auswertung des Mittelwerts aller Einzelprofile für die  $\text{CH}_4$ -Phänotypen auf den Praxisbetrieben.

Bei der Betrachtung des Einflusses der LTK zeigte sich, dass ein Anstieg der  $\text{CH}_4$ -Mengen bis zur fünften LTK vorlag, und danach die Mengen wieder abfielen (Tabelle 31).

Tabelle 31: Einfluss der Laktationstagklasse (LTK) auf die  $\text{CH}_4$ -Phänotypen im Modell für die genetisch-statistische Auswertung des Mittelwerts aller Einzelprofile einer Kuh für die  $\text{CH}_4$ -Phänotypen auf den Praxisbetrieben (Least Square Means  $\pm$  Standardfehler)

LTK	pmean <sup>1</sup>	rpmean <sup>1</sup>	remean <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> <sup>1</sup>	gCH <sub>4</sub> (GF) <sup>1</sup>
1	101 $\pm$ 2 <sup>ac2</sup>	274 $\pm$ 4 <sup>a</sup>	307 $\pm$ 5 <sup>a</sup>	247 $\pm$ 4 <sup>ac</sup>	373 $\pm$ 4 <sup>ac</sup>
2	100 $\pm$ 2 <sup>a</sup>	252 $\pm$ 4 <sup>ab</sup>	323 $\pm$ 5 <sup>ab</sup>	242 $\pm$ 4 <sup>a</sup>	370 $\pm$ 4 <sup>a</sup>
3	106 $\pm$ 2 <sup>ac</sup>	267 $\pm$ 5 <sup>bc</sup>	336 $\pm$ 6 <sup>b</sup>	255 $\pm$ 5 <sup>ac</sup>	384 $\pm$ 4 <sup>ac</sup>
4	109 $\pm$ 2 <sup>bc</sup>	272 $\pm$ 5 <sup>cd</sup>	345 $\pm$ 6 <sup>bc</sup>	266 $\pm$ 5 <sup>bc</sup>	391 $\pm$ 5 <sup>bc</sup>
5	117 $\pm$ 2 <sup>b</sup>	288 $\pm$ 4 <sup>cd</sup>	366 $\pm$ 5 <sup>c</sup>	276 $\pm$ 4 <sup>b</sup>	407 $\pm$ 4 <sup>b</sup>
6	113 $\pm$ 2 <sup>bc</sup>	386 $\pm$ 4 <sup>cd</sup>	362 $\pm$ 5 <sup>c</sup>	267 $\pm$ 4 <sup>bc</sup>	400 $\pm$ 4 <sup>bc</sup>

<sup>1</sup> Erklärung der  $\text{CH}_4$ -Phänotypen: siehe Tabelle 12; <sup>2</sup> unterschiedliche Buchstaben geben signifikante Unterschiede an ( $p < 0,05$ )

### 4.3 Genetische Parameter

Im folgenden Kapitel werden die Varianzkomponenten, die Heritabilität und die genetischen Korrelationen der CH<sub>4</sub>-Phänotypen dargestellt. Das Merkmal gCH<sub>4</sub>(GF) stellt eine lineare Transformation von pmean dar, da es eine Multiplikation von pmean ist. Deshalb waren die Varianzkomponenten dieser Merkmale identisch. Demzufolge wird im folgenden Kapitel nur pmean betrachtet. gCH<sub>4</sub>(GF) wird nicht weiter aufgeführt.

Die Heritabilität der CH<sub>4</sub>-Merkmale lag, je nachdem ob die Profile einzeln oder gemittelt je Kuh ausgewertet wurden, im niedrigen bis moderaten Bereich. Die Einzelprofile besaßen eine geringe Heritabilität, wobei remean die niedrigste Heritabilität der Einzelprofile von  $h^2 = 0,05$  zeigte. Die höchste Heritabilität wurde für gCH<sub>4</sub> geschätzt, wobei  $h^2 = 0,08$  war. Die Standardfehler waren bei allen CH<sub>4</sub>-Merkmalen hoch (0,03-0,06). Besonders beim Merkmal remean erreichte der Standardfehler eine Höhe von 0,06 und war somit höher als die Heritabilität selbst (0,05) (Tabelle 32).

**Tabelle 32: Heritabilität ( $h^2$ ), Standardfehler (SE) und additiv-genetische ( $\sigma^2_a$ ), Rest- ( $\sigma^2_e$ ) und phänotypische ( $\sigma^2_p$ ) Varianz sowie Varianz der permanenten Umwelt ( $\sigma^2_{pU}$ ) der CH<sub>4</sub>-Phänotypen für die Einzelprofile auf den Praxisbetrieben**

Merkmal <sup>1</sup>	$h^2$	SE	$\sigma^2_a$	$\sigma^2_e$	$\sigma^2_{pU}$	$\sigma^2_p$
pmean	0,07	0,03	130	1.748	$0,64 \times 10^{-3}$	1.877
rpmean	0,07	0,03	677	8.593	$0,87 \times 10^{-3}$	9.270
remean	0,05	0,06	649	12.613	487	13.749
gCH <sub>4</sub>	0,08	0,03	760	8.722	$0,35 \times 10^{-2}$	9.482

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

Die Mittelwerte der CH<sub>4</sub>-Phänotypen einer Kuh waren moderat erblich ( $h^2 = 0,08-0,27$ ) mit einem hohen Standardfehler (0,13-0,14). Für das Merkmal remean wurde wiederholt die geringste Heritabilität und ein sehr hoher Standardfehler geschätzt ( $0,08 \pm 0,13$ ). Im Gegensatz dazu war die Heritabilität für gCH<sub>4</sub> am höchsten ( $0,27 \pm 0,14$ ) (Tabelle 33).

**Tabelle 33: Heritabilität ( $h^2$ ) und additiv-genetische ( $\sigma^2_a$ ), Rest- ( $\sigma^2_e$ ) und phänotypische ( $\sigma^2_p$ ) Varianz des Mittelwerts aller Einzelprofile einer Kuh für die CH<sub>4</sub>-Phänotypen auf den Praxisbetrieben**

Merkmal <sup>1</sup>	$h^2$	SE	$\sigma^2_a$	$\sigma^2_e$	$\sigma^2_p$
pmean	0,22	0,14	207	723	930
rpmean	0,14	0,14	654	3.914	4.568
remean	0,08	0,13	534	6.383	6.912
gCH <sub>4</sub>	0,27	0,14	1.258	3.394	4.652

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

Neben der Heritabilität jedes einzelnen Merkmals wurden auch die phänotypischen und genetischen Korrelationen untereinander betrachtet, um so den Grad der Übereinstimmung der CH<sub>4</sub>-Merkmale zu bestimmen.

Die Korrelationen waren sowohl für die Merkmale der Einzelprofile als auch für die Auswertung der Mittelwerte hoch bis sehr hoch ( $r_p = 0,76-0,96$ ;  $r_g = 0,66-0,99$ ). Die höchsten Korrelationen bestanden zwischen rpmean und remean. Im Gegensatz dazu stand gCH<sub>4</sub> zu allen anderen Merkmalen am wenigsten in Beziehung (Tabelle 34).

**Tabelle 34: Geschätzte Heritabilität (Diagonale), phänotypische (unterhalb der Diagonalen) und genetische (oberhalb der Diagonalen) Korrelation der CH<sub>4</sub>-Merkmale für die Einzelprofile und Mittelwerte aller Profile einer Kuh**

Merkmal <sup>1</sup>	Einzelprofile				Mittelwerte			
	pmean	rpmean	remean	gCH <sub>4</sub>	pmean	rpmean	remean	gCH <sub>4</sub>
pmean	0,07	0,95	0,91	0,74	0,22	0,99	0,95	0,84
rpmean	0,92	0,07	0,99	0,70	0,93	0,14	0,99	0,82
remean	0,83	0,95	0,05	0,66	0,85	0,96	0,08	0,80
gCH <sub>4</sub>	0,92	0,86	0,77	0,08	0,87	0,83	0,76	0,27

<sup>1</sup> Erklärung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen: siehe Tabelle 12

## 5 Diskussion

Diese Arbeit zielt darauf ab, die Eignung des LMD zur CH<sub>4</sub>-Messung unter Praxisbedingungen zu überprüfen. Dafür müssen zuerst die aus den Profilen berechneten Phänotypen verglichen werden. Weiterhin ist zu klären, welche Umwelt- und Tiereinflüsse in welchem Ausmaß auf die Messung und die aus den Profilen berechneten Phänotypen wirken. Daraufhin kann eine Aussage getroffen werden, welches dieser Merkmale sich aufgrund seiner genetischen Eigenschaften für eine Zucht auf verringerte CH<sub>4</sub>-Emission eignen würde. Andere Merkmale zur Messung einer CH<sub>4</sub>-Emission werden diskutiert und mit diesen verglichen.

### 5.1 CH<sub>4</sub>-Messung mit dem LMD

Die CH<sub>4</sub>-Messung mit dem LMD erfolgte nach einem eigens aus Vorversuchen und bereits veröffentlichten Publikationen entworfenen Messprotokoll. Mit diesem Protokoll war es möglich, Kurzzeit-Profile der CH<sub>4</sub>-Konzentration auf Einzeltierbasis zu erfassen.

Als Messzeitraum wurde die Zeit nach dem Morgengemelk gewählt. Chagunda et al. (2009b) legten ebenfalls einen fixen Messzeitraum (zwischen Mittag und Abendgemelk) fest. Dieser festgelegte Zeitraum hat den Vorteil, dass der Abstand zur letzten Futteraufnahme immer etwa gleich war. Es ist wichtig, dies zu gewährleisten, da festgestellt wurde, dass sich die abgegebene Menge an CH<sub>4</sub> über den Tag ändert. So ist die CH<sub>4</sub>-Abgabe vor der Morgenfütterung am geringsten, steigt dann nach dem Fressen und über den Tag an, um dann in der Nacht wieder abzufallen (Bell et al., 2018; Eckert et al., 2018). Bell et al. (2018) fanden jedoch auch Wechselwirkungen zwischen Kuh und Tageszeit als Einfluss auf die Futteraufnahme. So spielte neben dem Messzeitpunkt auch der individuelle Abstand zur letzten Fütterung eine Rolle, der bei jeder Kuh verschieden sein kann. Tiere, die die ganze Nacht kein Futter zu sich genommen haben, könnten somit eine geringere CH<sub>4</sub>-Emission aufweisen als Kühe, die noch kurz vor dem Melken fraßen. Außerdem werden tierindividuelle Unterschiede bei der Dauer der Verdauung nicht weiter berücksichtigt. Es wäre möglich, dass manche Tiere nicht sofort viel CH<sub>4</sub> bilden, dies jedoch konstant über einen längeren Zeitraum tun. Eine Überprüfung der Rangierung der Kühe bezüglich ihrer CH<sub>4</sub>-Produktion zu einem anderen Tageszeitpunkt wäre daher ratsam. Alternativ dazu würden mehrere Messungen über den Tag verteilt einen Mittelwert der CH<sub>4</sub>-Konzentration für jede Kuh aufzeigen. Dies würde jedoch einen erhöhten Arbeitsaufwand bedeuten. Aus diesem Grund sollte zunächst die Vergleichbarkeit der Rangierung der Kühe über den Tag überprüft werden.

Weiterhin wurde im Messprotokoll die Aktivität der Kühe standardisiert. Die Kühe standen ausschließlich, und in seltenen Fällen kauten sie wieder. Chagunda et al. (2009a, 2013) und Sorg et al. (2017b) stellten fest, dass bei verschiedenen Aktivitäten unterschiedliche Konzentrationen an CH<sub>4</sub> abgegeben werden. Es stellt sich die Frage, ob Kühe, die beim Stehen und Wiederkauen eine hohe oder niedrige CH<sub>4</sub>-Emission aufweisen, auch bei anderen Aktivitäten, wie zum Beispiel Fressen und Liegen, ebenfalls viel oder wenig CH<sub>4</sub> abgeben. Eine Überprüfung der Rangierung der Kühe hinsichtlich ihrer CH<sub>4</sub>-Emissionen bei verschiedenen Aktivitäten wäre demzufolge in weiteren Untersuchungen sinnvoll.

Die Distanz zwischen LMD und Kuh betrug 2 bzw. 2,5 m und sollte einen „Sicherheitsabstand“ zur Kuh gewährleisten, sodass die Kühe in ihrem Verhalten nicht beeinflusst werden. In anderen Studien mit dem LMD wurden Distanzen zwischen 1-3 m zur Kuh gewählt (Chagunda et al., 2009b, 2013; Pickering et al., 2015). Da der LMD die kumulierte CH<sub>4</sub>-Konzentration der gesamten Messstrecke angibt, wäre eine Messdistanz von einem Meter optimal. Demzufolge würde die Einheit der CH<sub>4</sub>-Konzentrationen ppm×m mit ppm übereinstimmen, und eine Beachtung der Hintergrundwerte bzw. weitere Umrechnungen wären nicht notwendig. Es wurde jedoch festgestellt, dass bei Entfernungen zwischen 0,4-2,5 m keine signifikanten Unterschiede zwischen den lokalen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen vor dem Maul der Kuh in der Luft auftraten (Sorg et al., 2017a). Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass das mit jedem zusätzlichen Meter an Entfernung hinzukommende CH<sub>4</sub> vernachlässigbar gering ist und Messentfernungen bis zu 2,5 m akzeptabel sind. Besonders bei unruhigen Kühen kann so mit weniger Störung zielgenauer am Maul gemessen werden, was die Datenqualität verbessern kann.

Die Messzeit war auf fünf Minuten festgelegt, so wie dies auch in anderen Studien erfolgte (Chagunda et al., 2013; Pickering et al., 2015). Dadurch sollte gewährleistet werden, dass mindestens zwei Ruktusevents erfasst wurden, um so repräsentative Ruktusmerkmale erstellen und die durchschnittliche CH<sub>4</sub>-Konzentrationen adäquat darstellen zu können. Sorg et al. (2017a) stellten fest, dass auch kürzere Messungen – bis zu zwei Minuten – keine signifikant ( $p < 0,05$ ) unterschiedlichen Messergebnisse lieferten. Für folgende Studien wäre es von Vorteil, die Messzeit zu verkürzen, da dadurch der Durchsatz an Tieren je Zeiteinheit erhöht würde. Es sollte ein Puffer berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass mindestens zwei Ruktusevents erfasst würden. Der Ruktusreflex erfolgt in der Minute ein bis zwei Mal (Kaske, 2010). Aus diesem Grund ist eine Messzeit von drei Minuten empfehlenswert.

Bei der Messung mit dem LMD handelt es sich um eine Kurzzeitmessung. Deshalb sind wiederholte Messungen erforderlich, um die repräsentative durchschnittliche CH<sub>4</sub>-Konzentration

einer Kuh zu erfassen. Chagunda et al. (2009b) und Pickering et al. (2015) wiederholten ihre Messungen ebenfalls an drei Tagen. Drei Wiederholungen können Ausreißerwerte ausgleichen, wobei auch drei 5-Minutenmessungen nur einen Teil der CH<sub>4</sub>-Produktion einer Kuh abdecken. Folglich wären mehr Wiederholungen – am besten über die Laktation hinweg – besser geeignet. Solch kontinuierliche Messungen erfordern jedoch einen hohen Arbeitsaufwand, weshalb die Messung an drei Folgetagen einen Kompromiss darstellt. Zudem ändern sich im Laufe der Zeit die Leistung der Kuh und somit auch ihre Futteraufnahme (Martens & Breves, 2010). Dies bringt eine Veränderung der CH<sub>4</sub>-Produktion mit sich (Brask et al., 2015; Grainger et al., 2007; Yan et al., 2006). Folglich können CH<sub>4</sub>-Konzentrationen, die in größeren Abständen erfasst werden, nicht direkt miteinander verglichen werden. Sie müssten dann als unterschiedliche Merkmale betrachtet werden. In dieser Arbeit wurden auch CH<sub>4</sub>-Messungen von Kühen mit in die Auswertung genommen, die weniger als drei Messwiederholungen hatten. Bei dem alltäglichen Ablauf der Betriebe war eine vollständige Wiedervorstellung der am ersten Messtag gemessenen Kühe an den Folgetagen nicht möglich. Um durch eine weitere Verringerung der Profilanzahl die genetischen Auswertungen nicht weiter zu erschweren, wurden auch Tiere mit weniger als drei Messungen in die Auswertungen einbezogen. Eine Überprüfung der Einflussnahme der Anzahl an wiederholten Messungen ergab keinen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und Mengen. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob drei Messwiederholungen notwendig sind und die Anzahl der Wiederholungen weiter eingeschränkt werden könnte. Ein Vergleich mit den Daten anderer Messtechniken wäre hier sinnvoll. Ziel ist es den Arbeitsaufwand eventuell weiter zu reduzieren. Weiterhin wäre auch hier eine Überprüfung der Rangierung der Kühe bezüglich der CH<sub>4</sub>-Messung zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Laktation empfehlenswert.

Der LMD ist in der Lage, CH<sub>4</sub>-Konzentrationen in der Luft genau zu messen. So zeigte ein Sensorvergleich mit Respirationskammern in Deutschland und der Schweiz eine gute bis sehr gute Übereinstimmung von  $r_{\text{Pearson}} = 0,86-0,98$  und  $r_{\text{CCC}} = 0,67-0,93$  (Sorg et al., 2017b; 2017a). Daten die mit dem auf den VB verwendeten Messprotokoll erhoben wurden, wurden von Sorg et al. (2018) mit Daten des GreenFeed verglichen. Beide Messmethoden rangierte die Kühe mit wiederholten Messungen über 3-4 Tage ähnlich, bei einer mittelhohen Korrelation von  $r_{\text{RM\_pmean}} = 0,66$  bzw.  $r_{\text{RM\_gCH}_4(\text{GF})} = 0,74$ . In weiteren Versuchen wurden LMD-Messungen mit Sniffer-Messungen im AMS verglichen. Die LMD-Messungen erfolgten zum einen, während die Kühe in ihren Gruppen wiederkauten und zum anderen, direkt nachdem sie aus dem AMS herauskamen. Der Vergleich der geschätzten CH<sub>4</sub>-Produktion des LMD ( $\text{gCH}_4(\text{GF})$ ) mit der gemessenen CH<sub>4</sub>-Menge im AMS ergab für die Kenngrößen  $r_{\text{RM}}$ , CCC und CIA folgende Werte: 0,57-0,60; 0,17-0,28 und 0,87-0,91 (Sorg et al., 2018). Demzufolge

rangierten auch LMD und Sniffer die Kühe bezüglich ihrer CH<sub>4</sub>-Produktion ähnlich, obschon sich Messbedingungen und Analysetechniken unterschieden. Die Autoren sehen den Vorteil des LMD besonders in seiner Flexibilität bezüglich der CH<sub>4</sub>-Messung unter unterschiedlichen Messbedingungen und während verschiedener Kuhaktivitäten. Sie schlagen vor, den LMD bei verschiedenen Behandlungsgruppen auf Gruppen- und Herdenebene einzusetzen. Zudem kann der LMD genutzt werden, um bei umfangreichen CH<sub>4</sub>-Messungen andere Techniken zu validieren, oder um die Schätzung der genetischen Beziehungen zwischen kleinen Versuchsgruppen zu stärken (Sorg et al., 2018). Die hier genannten Messtechniken werden in der Literatur als „indirekt“ beschrieben, da sie nur einen Teil der CH<sub>4</sub>-Emission der Kuh je Tag erfassen (Hristov et al., 2018). Ricci et al. (2014) verglichen LMD-Messungen im Stall mit Langzeitmessungen, die eine Woche später in Respirationskammern stattfanden. Im ersten Experiment, in dem CH<sub>4</sub> bei 24 Mutterschafen gemessen wurde, wurde zwischen den Rohdaten des LMD und der Kammer nur eine schwache Korrelation festgestellt ( $r = 0,12$  ( $P = 0,36$ )). Die Korrelation bei einem Versuch mit 72 Mastbullen lag bei  $r = 0,53$  ( $P < 0,001$ ) (Ricci et al., 2014). Die aus diesem Versuch vorliegende niedrige Korrelation zwischen LMD und Respirationskammer könnte in dem Versuchsaufbau begründet sein. Die Messungen mit LMD und Respirationskammer lagen eine Woche auseinander. Eigene Voruntersuchungen (Daten nicht veröffentlicht) zeigten, dass, aufgrund sich ändernder Leistungsparameter, die CH<sub>4</sub>-Bildung innerhalb einer Woche stark schwankt und die Wiederholbarkeit der Messungen abnimmt. Zudem war die Dauer der LMD-Messung bei den Mutterschafen in Ricci et al. (2014) sehr kurz. Diese betrug zwei Minuten. Sorg et al. (2017a) gaben zwei Minuten Messzeit als Minimum an, ohne dass sich die CH<sub>4</sub>-Phänotypen änderten. Eine etwas längere Messzeit von drei oder vier Minuten würde vermutlich eine größere Sicherheit für die Repräsentativität der CH<sub>4</sub>-Konzentrationen bringen. Außerdem handelte es sich bei 24 Schafen um eine sehr kleine Stichprobe. Eine größere Anzahl an Versuchstieren würde vermutlich zu valideren Aussagen führen. Weitere Untersuchungen mit einem überarbeiteten Versuchsprotokoll und mehr Versuchstieren sind notwendig, um die Beziehung zwischen LMD und Respirationskammer genauer darstellen zu können. Weiterhin fehlen Vergleiche des LMD mit der SF<sub>6</sub>-Technik, um auch hier Aussagen zur Übereinstimmung der CH<sub>4</sub>-Messung treffen zu können.

Bei der Messung mit dem LMD ist der damit verbundene hohe Arbeitsaufwand zu berücksichtigen. Für jede Kuh, bei der CH<sub>4</sub> gemessen wird, wird mit dem in dieser Arbeit verwendeten Messprotokoll eine Person an drei Tagen für je fünf Minuten in Anspruch genommen. Für genetisch-statistische Auswertungen sind große Tierzahlen nötig, was bei der alleinigen Verwendung des LMD zu einem hohen Kosten- und Zeitaufwand führt. Für den großflächigen

gen Einsatz des LMD wäre es notwendig, die Arbeitsweise zu automatisieren. Für eine technische Weiterentwicklung sind jedoch technisches Wissen und finanzielle Mittel erforderlich. Generell wäre es sinnvoll, CH<sub>4</sub>-Messungen verschiedener Geräte zu kombinieren, so dass große Datensätze generiert werden können. Bereits durchgeführte Methodenvergleiche fanden unter anderem zwischen folgenden Techniken statt: GreenFeed - Respirationskammer (Hammond et al., 2015a; Rischewski et al., 2017; Velazco et al., 2016), GreenFeed - SF<sub>6</sub>-Technik (Hammond et al., 2015a), SF<sub>6</sub>-Technik - Respirationskammer (Grainger et al., 2007; McGinn et al., 2006; Pinares-Patiño et al., 2011), Sniffer - Respirationskammer (Garnsworthy et al., 2012a), Sniffer - GreenFeed (Hristov et al., 2016), LMD - Respirationskammer (Ricci et al., 2014; Sorg et al., 2017b), LMD - Sniffer und LMD - GreenFeed (Sorg et al., 2018). Die Messung der SF<sub>6</sub>-Technik beim Vergleich mit der Respirationskammer fanden jedoch nicht unter regulären Messbedingungen der SF<sub>6</sub>-Technik, sondern geschützt in einer Kammer, statt. Bei dem Versuch von Sorg et al. (2017b) handelt es sich ebenfalls um einen reinen Sensorvergleich, so dass hier keine Aussage über die Übereinstimmung der Techniken während einer Praxismessung getroffen wurde. Es ist ratsam, die schon durchgeführten Sensorvergleiche mit einem optimierten Messprotokoll und unter den jeweiligen praxisnahen Messbedingungen durchzuführen. Zudem fehlen bisher Vergleiche zwischen der SF<sub>6</sub>-Technik und dem LMD sowie mit dem Sniffer.

## 5.2 CH<sub>4</sub>-Phänotypen

Der Vergleich der CH<sub>4</sub>-Phänotypen macht deutlich, dass sich die Merkmale in ihren Eigenschaften unterscheiden und stets die Definition beachtet werden sollte. Zwischen den zwei Betriebsarten (Versuchs- und Praxisbetriebe) wurden keine erheblichen Unterschiede hinsichtlich der Ausprägung der CH<sub>4</sub>-Phänotypen festgestellt. Einzig die Maximalwerte wiesen größere Differenzen zwischen den Betriebsarten auf.

Wie zu erwarten, wies das Merkmal  $p_{\text{mean}}$  die geringsten CH<sub>4</sub>-Konzentrationen auf ( $p_{\text{mean}_{\text{PB}}} = 120 \text{ ppm}\times\text{m}$ ;  $p_{\text{mean}_{\text{VB}}} = 119 \text{ ppm}\times\text{m}$ ). Grund ist die Definition des Merkmals, die sowohl die Atmungsspitzen mit niedrigen Werten als auch die Ruktusspitzen mit höheren Werten beinhaltet. Im Vergleich zur Literatur lagen die Mittelwerte von  $p_{\text{mean}}$  etwas niedriger als die von Chagunda et al. (2009b), Pickering et al. (2015) und Sorg et al. (2018) gemessenen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen (129-180 ppm×m und 201 ppm). Diese Abweichungen könnten auf geringfügig unterschiedliche (Mess-)Bedingungen, Tiere mit einem unterschiedlich hohem Leistungsniveau und einer anderen Erkennung der Spitzen in einem Profil zurückzuführen

sein. In einer weiteren Studie von Chagunda et al. (2013) wurden jedoch auch höhere Konzentrationen von  $p_{\text{mean}} = 396$  ppm gemessen. Eine mögliche Ursache für diese hohen  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen könnte sein, dass die Kühe in dieser Studie während der Messung mit dem LMD in einer Respirationsskammer standen. In einer derartigen Kammer akkumuliert sich das von der Kuh abgegebene  $\text{CH}_4$ , was zu erhöhten Hintergrundwerten führt (Sorg et al., 2017b). Dem widerspricht allerdings die Aussage, dass die „Offset“-Funktion des LMD genutzt wurde, wodurch die gemessenen  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen um die Hintergrundkonzentrationen in der Respirationsskammer korrigiert werden sollte.

$R_{\text{pmean}}$  enthält alle Ruktusspitzen eines Profils, weshalb höhere  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen für dieses Merkmal gemessen wurden. Für den Phänotyp  $r_{\text{pmean}}$  gibt es keine vergleichbaren Angaben in der Literatur.  $r_{\text{emean}}$  wies die höchsten  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen auf ( $r_{\text{emean}_{\text{PB}}} = 362$  ppmxm;  $r_{\text{emean}_{\text{VB}}} = 396$  ppmxm), da hier nur der Durchschnitt der Maxima der Ruktusspitzen aller Ruktusevents ermittelt wurde. Die Phänotypen  $r_{\text{pmean}}$  und  $r_{\text{emean}}$  zeigten auf den VB, im Gegensatz zu  $p_{\text{mean}}$ , beide höhere Maximalwerte von  $r_{\text{pmean}_{\text{VB}}} = 1.034$  ppmxm und  $r_{\text{emean}_{\text{VB}}} = 1.482$  ppmxm als auf den PB ( $r_{\text{pmean}_{\text{PB}}} = 893$  ppmxm,  $r_{\text{emean}_{\text{PB}}} = 1.074$  ppmxm). Die höheren Maxima der Ruktusmerkmale auf den VB könnten mit der höheren Milchleistung auf diesen Betrieben zusammenhängen. Aus einer höheren Milchleistung resultiert eine höhere Futteraufnahme, wodurch eine größere Menge an fermentierbarem Material im Pansen zur Verfügung steht. Da 83 % des im Pansen gebildeten  $\text{CH}_4$  über Ruktus abgegeben werden (Blaxter & Joyce, 1963; Murray et al., 1976), lässt es sich erklären, dass auf den VB – bei höherer Milchleistung und daraus resultierender höherer Futteraufnahme – höhere Maxima der Ruktusmerkmale auftreten. Außerdem könnten auch andere Faktoren, die sich zwischen den Betriebsarten unterscheiden (zum Beispiel Fütterung, Management, Aufbau des Stalls und Messzeitpunkt) zu den vorliegenden Differenzen geführt haben.

In der Literatur wird häufig die absolute Menge der  $\text{CH}_4$ -Produktion in g/d angegeben, so dass sich einzelne Studien einfacher miteinander vergleichen lassen. Aus diesem Grund und zur groben Abschätzung der täglichen  $\text{CH}_4$ -Produktion wurden die Phänotypen  $g_{\text{CH}_4}$  und  $g_{\text{CH}_4(\text{GF})}$  entwickelt. Obwohl diese beiden Hochrechnungen das Merkmal  $p_{\text{mean}}$  als Grundlage haben, besteht eine große Differenz von ca. 100 ppm zwischen beiden Phänotypen. Begründet liegt dies in den unterschiedlichen Berechnungsweisen, die bereits in Kapitel 3.3.3 vorgestellt wurden. Der fast identische Standardfehler beider Phänotypen lässt jedoch die gemeinsame Grundlage  $p_{\text{mean}}$  erkennen. Die physikalischen Hochrechnung  $g_{\text{CH}_4}$  lag mit  $g_{\text{CH}_4_{\text{PB}}} = 288$  g/d und  $g_{\text{CH}_4_{\text{VB}}} = 314$  g/d unter den Angaben für Milchrinder aus der Lite-

ratur (Garnsworthy et al., 2012a; Pszczola et al., 2017; Sorg et al., 2018). Aus den folgenden Gründen stellt die Formel für  $gCH_4$  keine optimale Möglichkeit der Hochrechnung dar. Mit dieser Schätzgleichung wird angenommen, dass die Kuh den ganzen Tag die gleiche Aktivität ausübt. Bei den hier zugrundeliegenden  $CH_4$ -Werten wären das die Aktivitäten Stehen bzw. Wiederkäuen. Nachweislich wird aber bei verschiedenen Aktivitäten unterschiedlich viel  $CH_4$ -abgegeben (Chagunda et al., 2009a; 2013; Sorg et al., 2017b). Für ein repräsentatives Bild der Tages- $CH_4$ -Produktion wäre es deshalb notwendig, alle Aktivitäten des Tieres und die Dauer der jeweiligen Aktivität zu berücksichtigen. Eine weitere Annahme ist, dass die Dichte von  $CH_4$  für jede Messung gleich ist. Die Dichte ist jedoch variabel, da sie von der Lufttemperatur und dem Luftdruck abhängt. Eine Überprüfung des Einflusses der vorliegenden Lufttemperatur zur Messung auf die Dichte und somit auf das Merkmal  $gCH_4$  zeigte keine markanten Unterschiede zwischen angepasster und statischer Dichte (Daten nicht gezeigt). Die beiden genannten Annahmen erklären, weshalb es zu Abweichungen im Vergleich zu anderen Studien kommen kann. Sie stellen jedoch noch keine hinreichende Begründung für die niedrigen  $CH_4$ -Werte dar. Es ist wahrscheinlicher, dass der gewählte Verdünnungsfaktor von 19,2 (Garnsworthy et al., 2012a) für die Messung mit einem LMD unzureichend ist. Garnsworthy et al. (2012a) erfassten die  $CH_4$ -Produktion während des Melkens mit einem Sniffer. Bei dieser Technik wird die Atemluft der Kühe im Krafftuttertrog angesaugt. Die Messbedingungen sind geschützter als bei der Messung mit einem LMD, die entweder direkt in den Kuhgruppen oder auf dem Futtertisch stattfanden. Einflussfaktoren, wie zum Beispiel Wind, wirken sich stärker auf die Messungen mit dem LMD aus. Es ist somit für den LMD ein höherer Verdünnungsfaktor erforderlich als der hier verwendete. Weitere Untersuchungen zur Höhe dieses Verdünnungsfaktors sind notwendig.

Die Formel zur Bestimmung der  $CH_4$ -Produktion von Sorg et al. (2018) führte zu höheren  $CH_4$ -Werten ( $gCH_4(GF)_{PB} = 416$  g/d;  $gCH_4(GF)_{VB} = 413$  g/d). Diese liegen in der Größenordnung von anderen Publikationen, bei denen entweder die  $CH_4$ -Produktion bei Milchkühen direkt gemessen oder die Tagesmenge geschätzt wurde (357-434 g/d (Chagunda et al., 2009b; Garnsworthy et al., 2012a; Lassen & Løvendahl, 2016; Sorg et al., 2018)). Obwohl Lassen & Løvendahl (2016) ebenfalls  $CH_4$  mit einem Sniffer im AMS erfassten, wurde hier eine mögliche Verdünnung der analysierten Atemluft (wie bei Garnsworthy et al. (2012a)) nicht berücksichtigt, so dass dies ein möglicher Grund für eine geringere mittlere  $CH_4$ -Produktion in dieser Studie (315 g/d) darstellen könnte. In Studien, bei der die  $CH_4$ -Produktion mit dem GreenFeed bestimmt wurde, wurden höhere Werte (450-523 g/d) gemessen (Hristov et al., 2015a; Huhtanen et al., 2015). Es wäre möglich, dass diese Methode generell höhere Werte im Vergleich zu anderen Messtechniken liefert. Velazco et al. (2016)

fanden eine hohe Übereinstimmung der Messwerte des GreenFeed mit den Werten einer Respirationsskammer. Es ist jedoch zu beachten, dass die Respirationsskammer die gesamte  $\text{CH}_4$ -Emission einer Kuh aus Maul und Anus erfasst. Der GreenFeed misst nur die Emissionen, die während des Fressens aus dem Maul kommen. Die hohe Übereinstimmung mit der Respirationsskammer ist möglicherweise dadurch zu erklären, dass Velazco et al. (2016) für den Vergleich von GreenFeed und Respirationsskammer das 95 %-Konfidenzintervall und die Pearson Korrelation heranzogen. Diese Werkzeuge sind zur Überprüfung der Übereinstimmung zweier Geräte nicht optimal geeignet. Die Pearson-Korrelation gibt beispielsweise die Stärke einer Beziehung zwischen zwei Techniken an. Hierbei wird jedoch keine Aussage über die Übereinstimmung der Messwerte getroffen (Bland & Altman, 2010). So kann die Korrelation zwischen zwei Methoden hoch sein, dennoch ist es möglich, dass die Mittelwerte (Genauigkeit der Messungen) und der Maßstab der gemessenen Werte (Variabilität der Messwerte) voneinander abweichen. Gefordert sind jedoch möglichst ähnliche Mittelwerte, Varianzen und hohe Korrelationen, um unterschiedlichen Methoden eine gute Übereinstimmung bescheinigen zu können (Difford, 2016). Geeignete Maßzahlen sind die CCC, welche die Genauigkeit und die Streuung der Messtechniken angibt, und die CIA, welche die Abweichung der Messtechniken untereinander mit der Varianz innerhalb einer Technik vergleicht (Barnhart et al., 2007; Lin, 1989).

Die  $\text{CH}_4$ -Phänotypen wiesen erwartungsgemäß untereinander eine hohe bis sehr hohe Korrelation auf ( $r_p = 0,76-0,96$ ,  $r_g = 0,66-0,99$ ). Dieses Ergebnis war zu erwarten, da die Phänotypen jeweils aus den gleichen Profilen stammten. Außerdem enthielten sie teilweise gleiche Daten. So waren zum Beispiel die Ruktusspitzen von `remean` in `rpmean` enthalten, und beide Merkmale waren auch ein Teil von `pmean`.  $g\text{CH}_4(\text{GF})$  ist eine lineare Transformation von `pmean` und besitzt somit vergleichbare statistische Eigenschaften. Bei der physikalischen Hochrechnung  $g\text{CH}_4$  bildete `pmean` ebenfalls die Grundlage, dieses Merkmal fiel jedoch bezüglich der Korrelation zu den anderen Merkmalen etwas ab, da auch andere – tierindividuelle und profilindividuelle – Faktoren in das Merkmal mit einfließen. Neben der Anzahl an Atemzügen, die ebenfalls aus dem  $\text{CH}_4$ -Profil gewonnen wurden, ging das Tiergewicht mit in die Formel ein. Letzteres übte wahrscheinlich einen besonders großen Einfluss auf die Schätzung der  $\text{CH}_4$ -Produktion aus. Beim Vergleich der Korrelationen der Einzelprofile mit den Mittelwerten der Profile zeigte sich, dass die  $\text{CH}_4$ -Phänotypen aus den Mittelwerten der Profile etwas stärker miteinander korreliert waren. Eine Erklärung könnte sein, dass extreme Werte durch die Bildung der Mittelwerte über alle Profile einer Kuh ausgeglichen wurden und sich die Phänotypen so einheitlicher darstellten. Diese stabileren  $\text{CH}_4$ -Werte könnten aber dazu geführt haben, dass der Einfluss des Gewichts im Merkmal  $g\text{CH}_4$  stärker zum Tragen

kam. Folglich waren die phänotypischen Korrelationen der Profilmittelwerte zum Merkmal  $gCH_4$  geringer als die der Einzelprofile. Die hohen Korrelationen aller Merkmale zeigen, dass sich die einzelnen  $CH_4$ -Merkmale untereinander sehr ähneln und wahrscheinlich nicht alle parallel benötigt werden, um Tiere in ihren  $CH_4$ -Konzentrationen zu vergleichen. Der Aufwand, die Konzentrationsprofile zu messen und die verschiedenen Merkmale daraus auszuwerten, ist überall gleich groß, so dass die Auswahl des besten Phänotyps danach erfolgen kann, welches Merkmal die  $CH_4$ -Produktion der Kuh am besten beschreibt.

### 5.3 Einflüsse auf die $CH_4$ -Messung

Die vorliegende Arbeit zeigte, dass die gemessenen  $CH_4$ -Konzentrationen und -Mengen – vor allem auf den PB – von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängen.

#### LMD

Einen Einfluss auf die Messung hatte zum Beispiel das Gerät, welches für die Messung genutzt wurde. Die Werte, die auf den PB gemessen wurden, unterschieden sich zwischen allen LMD. Auf den VB wichen die Werte von Gerät 3 zum Teil zu den anderen LMD ab. Es ist auffällig, dass für beide Betriebsarten besonders LMD 3 eine größere Abweichung zeigte. Die Messwerte für  $p_{mean}$  lagen auf den PB für LMD 1, 2 und 3 bei 120 ppmxm, 111 ppmxm und 145 ppmxm und auf den VB bei 120 ppmxm, 114 ppmxm und 128 ppmxm. Diese Abweichung des dritten LMD könnte dadurch erklärt werden, dass LMD 3 1,5 Jahre später angeschafft wurde als LMD 1 und 2. Kleine Änderungen in der Bauweise der LMD oder eine leichte Drift der etwas älteren Geräte könnten für diese Abweichungen verantwortlich sein. Sorg et al. (2017a) stellten, unter Anwendung eines speziellen Versuchsdesigns zum Vergleich der LMD-Geräte, ebenfalls einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss der Gerätenummer fest. In einer weiteren Studie, in der die Übereinstimmung der Messwerte von verschiedenen LMD-Geräten geprüft wurde, wurde jedoch eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse gefunden (Sorg et al., 2017b). Daraus lässt sich ableiten, dass mehrere LMD ausreichend ähnliche Messergebnisse liefern und diese gemeinsam ausgewertet werden können. Trotzdem sollte der Effekt jedes einzelnen Geräts in der statistischen Auswertung berücksichtigt werden.

## **Bedienende Person**

Etwas weniger Einfluss auf die Messungen schienen die bedienenden Personen der Geräte zu haben. In den VB wurde sogar gar kein Einfluss der bedienenden Person auf die CH<sub>4</sub>-Konzentrationen festgestellt. Die Ursache dafür könnte jedoch sein, dass die Standardfehler dort etwas höher waren als in den PB. Folglich ist es schwieriger Unterschiede zwischen den Personen auszumachen. Messperson 2 erhielt im Vergleich zu den anderen bedienenden Personen stets die niedrigsten CH<sub>4</sub>-Werte. In den PB war dieser Unterschied zu Messperson 1, welche die höchsten CH<sub>4</sub>-Werte erfasste, signifikant ( $p < 0,05$ ), und in den VB war dies als Trend zu erkennen. Auf den PB kam eine weitere Person zum Einsatz. Die von ihr gemessenen Werte unterschieden sich zum Teil signifikant ( $p < 0,05$ ) von denen anderer bedienender Personen. Gründe für diese Abweichungen könnten eine abweichende Statur und ein variierendes Messverhalten zwischen den Bedienenden sein. Beispielsweise könnte eine besonders kleine oder große Person bei der Messung einen ungünstigen Messwinkel haben, bei dem der Laserstrahl einen kleineren Teil der Gaswolke der Kuh durchdringen würde. Das hätte niedrigere Werte zur Folge, als wenn der Laserstrahl die volle Breite der Wolke durchschneiden würde. Unruhige oder unaufmerksame Personen könnten ebenfalls zu kleineren Messwerten beitragen, da sie den Kopfbewegungen der Kuh schlechter folgen. Somit würden vermehrt Messpunkte abseits der Gaswolke aufgenommen oder Atemzüge der Kuh verpasst werden. Bei den im Versuch messenden Personen waren Messperson 2 am kleinsten und Messperson 5 am größten, was abweichende Werte erklären könnte. Zudem führte die bedienende Person 1 ihre Messungen besonders sorgfältig durch, so dass dadurch wahrscheinlich mehr Ruktusspitzen erfasst wurden. Zu beachten ist zudem, dass nicht alle Messpersonen mit jedem LMD arbeiteten. Aus diesem Grund wurden die Effekte LMD-Gerät und Messperson für die genetisch-statistische Auswertung kombiniert. Chagunda et al. (2009b) stellten bei ihren LMD-Messungen keinen Einfluss der Bedienperson fest. Möglicherweise waren die Personen sich sehr ähnlich in Verhalten und Statur, so dass die Messungen in ähnlicher Art und Weise erfolgten. Eine Untersuchung von Sorg et al. (2017b) zur Einflussnahme der bedienenden Person ergab, dass die bedienende Person einen bedeutenden Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Messung ausübt.

## **Betrieb**

Der Vergleich der Betriebe untereinander zeigte, dass die unterschiedlichen Voraussetzungen auf den Betrieben zu unterschiedlichen Ergebnissen der CH<sub>4</sub>-Messungen führen können. Dies war besonders auf den PB zu erkennen, da sich alle drei Betriebe signifikant ( $p < 0,05$ ) unterschieden. Diese Unterschiede könnten auf Haltungs- und Fütterungsbedin-

gungen zurückzuführen sein. So stand der Stall von PB 3, wo die höchsten CH<sub>4</sub>-Werte gemessen wurden, geschützt zwischen anderen Gebäuden. Dies wirkte sich verlangsamernd auf die CH<sub>4</sub>-Verdünnung aus. Das durch die Kühe abgegebene CH<sub>4</sub> wurde langsamer durch Luftbewegung verteilt. Zudem wiesen die Kühe eine hohe Milchleistung (ECM  $\approx$  34 l/d) auf, die zu einer verstärkten CH<sub>4</sub>-Bildung geführt haben könnte. In PB 2 gaben die Kühe durchschnittlich ca. 27 l Milch je Tag, was die geringeren gemessenen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen zum Teil erklärt. Auf den Einfluss der Milchleistung wird in einem folgenden Abschnitt genauer eingegangen. Zwischen den VB waren möglicherweise die Unterschiede in Haltung, Fütterung und anderen Faktoren weniger stark ausgeprägt, so dass hier die Differenzen der CH<sub>4</sub>-Konzentrationen geringer ausfielen. Nur in den VB 3 und 4 wurden signifikant ( $p < 0,05$ ) unterschiedliche CH<sub>4</sub>-Werte gemessen, wobei VB 4 die niedrigsten CH<sub>4</sub>-Konzentrationen aufwies und VB 3 die höchsten. Dieser Unterschied ist schwer erklärbar, da die Messungen in VB 3 weniger geschützt erfolgten als in VB 4. Weiterhin war die Milchleistung in Betrieb 3 geringer als in Betrieb 4. Beide Ansätze lassen vermuten, dass in VB 3 niedrigere CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und Mengen vorzufinden wären als in VB 4, was nicht der Fall war. In beiden Betrieben wurde jedoch nur zu einem Messtermin und dabei nur an wenigen Tieren gemessen, so dass die hier gefundenen Ergebnisse nicht repräsentativ sind. In der Literatur finden sich in ähnlicher Weise Unterschiede zwischen einzelnen Betrieben. Bell et al., (2014) schlossen daraus, dass sich Betriebe aufgrund des Managements, der Fütterung, des Stallbaus und der auf dem Betrieb vorherrschenden Kuhgenetik unterscheiden. Diese Faktoren könnten auch in der vorliegenden Studie zu Unterschieden zwischen den Betrieben geführt haben.

Auf den einzelnen Betrieben erfolgten mehrere Versuchsdurchläufe zu verschiedenen Zeitpunkten. Deshalb wurde anstatt des Betriebs der Betriebsbesuch im Modell berücksichtigt, um den auf die Messung wirkenden saisonalen Effekt zu berücksichtigen. Auf manchen Betrieben wurden signifikante ( $p < 0,05$ ) Unterschiede zwischen den Betriebsbesuchen gefunden, auf anderen nicht. Auf den VB 3 und 4 wurde nur eine CH<sub>4</sub>-Messung durchgeführt, weshalb kein Vergleich möglich war. Bell et al. (2014) stellten ebenfalls unterschiedliche CH<sub>4</sub>-Emissionen innerhalb einzelner Betriebe fest. Eine Begründung für stark abweichende CH<sub>4</sub>-Konzentrationen zwischen Betriebsbesuchen könnten sich ändernde Bedingungen auf den Betrieben sein. Beispielhaft dafür ist Futter aus einem anderen Silo, was eine veränderte Futterzusammensetzung und Verdauung der Nährstoffe bedeuten würde. Die Witterungsbedingungen ändern sich täglich und saisonal. Tiere, bei denen im Sommer CH<sub>4</sub> gemessen wurde, könnten unter Hitzestress gelitten haben, was die Futtermittelaufnahme senkte (Silanikove, 2000; West, 2003). Die im Sommer sehr verbreitet eingesetzten Lüftungsanlagen könnten

ebenfalls zu einer geringeren messbaren CH<sub>4</sub>-Konzentration geführt haben, da erhöhte Luftgeschwindigkeiten das CH<sub>4</sub> schneller verdünnen (Cortus et al., 2015; Joo et al., 2015; Wu et al., 2016). Zudem führte natürlich auftretender Wind ebenfalls zu einer schnelleren Verflüchtigung des CH<sub>4</sub> bei einzelnen Betriebsbesuchen. Auch in anderen Studien wurde eine Verdünnung der CH<sub>4</sub>-Emissionen durch Wind festgestellt (Chagunda et al., 2013; Joo et al., 2015).

### **Windklasse**

Da sich Windgeschwindigkeiten von Tag zu Tag sehr stark verändern können, wurden diese zusätzlich erfasst. Auf den PB zeigte sich, dass höhere Windgeschwindigkeiten zu geringeren CH<sub>4</sub>-Konzentrationen führten. Nur die Differenz zur größten Windgeschwindigkeitsklasse war signifikant ( $p < 0,05$ ), aber auch zwischen den anderen Klassen war ein Trend in diese Richtung zu erkennen. Dieser negative Zusammenhang bestätigt die Ergebnisse von Chagunda et al. (2013) und Joo et al. (2015). Bei der Studie von Chagunda et al. (2013) handelte es sich um eine Simulation der CH<sub>4</sub>-Messung unter Weidebedingungen. Hierzu wurde kontrolliert CH<sub>4</sub> aus einem Kanister freigelassen und mit einem LMD CH<sub>4</sub> in der Umgebungsluft gemessen. Die so ermittelte Korrelation zwischen Windgeschwindigkeit und CH<sub>4</sub>-Messung von  $r = -0,41$  zeigte einen noch deutlicheren Zusammenhang, als die hier vorliegenden Ergebnisse (Chagunda et al., 2013). Ursache dafür könnte sein, dass die Untersuchung im Freien durchgeführt wurde. Folglich wurde eine größere Spanne an Windgeschwindigkeiten (0-6,7 m/s) als in der hiesigen Studie auf den PB (0,05-2,94 m/s) gemessen. Auf den VB war die Differenz der Windgeschwindigkeiten kleiner (0,03-1,67 m/s) als auf den PB. Außerdem waren dort die Standardfehler der LSM bei den Windgeschwindigkeitsklassen größer, so dass auf den VB zwischen den Klassen keine signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschiede festzustellen waren. Der einzig positive Zusammenhang trat auf den VB nur mit dem CH<sub>4</sub>-Merkmal  $gCH_4$  auf. Dieser Zusammenhang scheint zunächst widersprüchlich zu sein, da er beschreibt, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit auch die berechnete CH<sub>4</sub>-Menge ansteigt. Dies ist allerdings unwahrscheinlich, da, wie bereits oben beschrieben, ausgeatmetes CH<sub>4</sub> durch Wind schneller verdünnt wird. Die Ursache des positiven Zusammenhangs könnte jedoch auf die Formel der physikalischen Hochrechnung zurückzuführen sein. Ein genauer Blick auf die einzelnen Bestandteile der Formel deckte auf, dass die Windklasse einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss auf die Anzahl an Atemzügen in einem Profil hatte. Bei höherer Luftgeschwindigkeit wurden mehr Atemzüge bei den Kühen gezählt als bei niedriger Luftgeschwindigkeit. Auch höhere Umgebungstemperaturen während der CH<sub>4</sub>-Messung führten zu einer gesteigerten Atmungsrate der Kühe. Es ist bekannt, dass Kühe unter Hitzestress eine

erhöhte Atemfrequenz zeigen: Kühe, die der prallen Sonne ausgesetzt waren, nahmen in einer Studie durchschnittlich 82 Atemzüge je Minute. Kühe, die im Schatten standen, hatten eine Atemfrequenz von nur 54 Atemzüge je Minute (West, 2003). Vermutlich liegt der Zusammenhang in der vorliegenden Untersuchung an dem stärkeren Einsatz von Lüftern im Stall bei hohen Temperaturen, die zu hohen Windgeschwindigkeiten führten. Parallel dazu führte der Hitzestress bei den Kühen zu einer höheren Atemfrequenz und damit zu höheren Werten von  $p_n$ . Dieser Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeitsklasse und Atemfrequenz führte zu einem positiven Zusammenhang von Windgeschwindigkeit mit dem  $\text{CH}_4$ -Phänotyp  $g\text{CH}_4$  auf den VB. Auf den PB war der Zusammenhang der Anzahl Atemzüge und der Windgeschwindigkeit jedoch nicht signifikant ( $p < 0,05$ ), weshalb das Merkmal  $g\text{CH}_4$  bezüglich seiner Beziehung zur Windgeschwindigkeit nicht im Widerspruch zu den anderen  $\text{CH}_4$ -Merkmalen stand. Es konnte nicht zu jedem Betriebsbesuch jede Windklasse nachgewiesen werden, da diese durch die unterschiedlichen Witterungsbedingungen der Jahreszeiten beeinflusst wurden. Aus diesem Grund wurde für die genetisch-statistische Auswertung der Effekt der Windgeschwindigkeit mit dem Effekt des Betriebsbesuchs kombiniert. Folglich ist in diesem kombinierten Effekt die Windgeschwindigkeit in der Jahreszeit der Messung und an dem Messtag berücksichtigt. Dadurch werden Besuchsunterschiede dargestellt. Zusätzlich wurden bauliche Gegebenheiten im Betrieb mit einbezogen, die die Bedingungen am Messort beeinflussen und somit Betriebsunterschiede widerspiegeln.

### **Fütterungsgruppe**

In der Literatur wurde festgestellt, dass die Fütterung einen sehr großen Einfluss auf die  $\text{CH}_4$ -Bildung ausübt. Aus einer kraftfutterreichen Ration wird weniger  $\text{CH}_4$  gebildet, als aus einer rohfaserreichen Ration (Lassen et al., 2010; Rooke et al., 2014; Troy et al., 2016). Hinsichtlich der Rationszusammensetzung konnte in der hiesigen Studie kein Einfluss auf die  $\text{CH}_4$ -Bildung festgestellt werden, da die Zusammensetzung der Ration auf den PB sehr ähnlich war. Die Rationen auf den PB waren alle mit einer maisbetonten TMR auf Hochleistungskühe zugeschnitten, und in keinem Betrieb wurde Grünfutter oder Weidegang angeboten. Der fehlende Einfluss auf den VB könnte auf die geringen Tierzahlen in den Datensätzen und somit auf eine unzureichende Auswertbarkeit der Daten zurückzuführen sein. Der Effekt des Futters wird teilweise durch die im Modell der Mittelwerte einbezogene Einflussgröße Fütterungsgruppe berücksichtigt. Zudem werden Unterschiede in Haltung, Umweltbedingungen und Management in den einzelnen Gruppen widerspiegelt. Diese Unterschiede waren zwischen den Gruppen auf PB 1 und 2 deutlich, auf PB 3 etwas weniger deutlich nachzuweisen. In PB 1 unterschieden sich beide Fütterungsgruppen zu jedem Betriebsbe-

such voneinander. Hauptursache dafür war, dass sich der Futtertisch von Gruppe 1, an dem die Messungen stattfanden, nicht im Stall, sondern unter einem Schleppdach befand und somit der Einfluss des Windes auf diese Messung sehr hoch war. Im Gegensatz dazu befanden sich die Fütterungsgruppen auf PB 3 in einem Stall auf zwei gegenüber liegenden Seiten. Die Umwelteinflüsse auf die CH<sub>4</sub>-Messungen waren deshalb relativ ähnlich. Auf PB 2 wurden die Messungen für beide Gruppen im gleichen Behandlungsstand durchgeführt und trotz gleicher Umwelteinflüsse signifikante Unterschiede der CH<sub>4</sub>-Phänotypen zwischen den Fütterungsgruppen festgestellt. In Fütterungsgruppe 2 wurden mehr Kühe in einer höheren LTK gemessen als in Fütterungsgruppe 1. Die Ergebnisse der hiesigen Studie zeigten, dass Kühe in höheren LTK signifikant ( $p < 0,05$ ) höhere CH<sub>4</sub>-Konzentrationen ausatmen. Dies könnte die signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschiede zwischen den Fütterungsgruppen erklären. Auf VB 1 wurden die Kühe der verschiedenen Fütterungsgruppen in einer Laufstallgruppe gemessen. Trotzdem unterschieden sich die Merkmale zwischen den Fütterungsgruppen 1 und 3 signifikant ( $p < 0,05$ ) und zwischen den Gruppen 1 und 2, und den Gruppen 2 und 3 nicht signifikant ( $p < 0,05$ ). Der Gehalt an Rohfaser, NDF und ADF in der Ration unterschied sich zwischen Fütterungsgruppe 1 und 3 am stärksten, was die höheren CH<sub>4</sub>-Konzentrationen in Gruppe 3 möglicherweise erklärt. VB 2 befand sich in Mecklenburg-Vorpommern, wo bei den CH<sub>4</sub>-Messungen häufig ein starker Wind wehte. Obwohl beide Gruppen in einem Stall gemessen wurden, fanden die Messungen der Gruppe 1 häufiger bei stärkeren Windgeschwindigkeiten statt. Folglich wurde das ausgeatmete CH<sub>4</sub> schneller verdünnt und geringere CH<sub>4</sub>-Konzentrationen gemessen. Die höheren Windgeschwindigkeiten in Fütterungsgruppe 2 sind vermutlich auf die Bauweise und Ausrichtung des Stalls, sowie die Hauptwindrichtung dieser Gegend zurückzuführen. Die geringe Anzahl der Messungen auf VB 3 und 4 lassen keine klaren Aussagen über den Einfluss der einzelnen Gruppen zu.

### **Laktationstag**

Die Untersuchungen zum Einfluss des Laktationstages bzw. der LTK bestätigten, dass sich die CH<sub>4</sub>-Produktion im Verlauf der Laktation änderte. So stiegen die CH<sub>4</sub>-Konzentrationen von der ersten LTK bis zur fünften Klasse (101.-160. Laktationstag) an und fielen zur letzten Klasse wieder ab. In den VB war dieser Trend, im Gegensatz zu den PB, nur schwach ausgeprägt. Die CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und -Mengen unterschieden sich zwischen den LTK in den VB nur gering voneinander, und die Standardfehler waren etwas höher als in den PB, so dass keine signifikanten ( $p < 0,05$ ) Unterschiede zwischen den Klassen festgestellt werden konnten. Eine Ausnahme stellten die Phänotypen *rpmean* und *remean* dar. Hier unterschied sich die LTK mit den niedrigsten LSM (LTK 2) signifikant ( $p < 0,05$ ) von der LTK mit den

höchsten LSM (LTK 5). Es ist möglich, dass die höheren CH<sub>4</sub>-Werte der Ruktusmerkmale in den fortgeschrittenen Laktationsstadien durch eine höhere Futteraufnahme hervorgerufen wurden. Wie bereits in Kapitel 5.2 vermutet, könnte eine höhere Futteraufnahme vor allem zu höheren Ruktuskonzentrationen führen. Folglich konnten Unterschiede zwischen den LTK besser durch die Ruktusmerkmale detektiert worden sein, als durch die Merkmale, die sowohl Atmungs- als auch Ruktusspitzen einschließen. In der Literatur wird ebenfalls ein laktationsähnlicher Verlauf der CH<sub>4</sub>-Produktion beschrieben. Es wird ausgeführt, dass in den ersten 10-20 Wochen der Laktation ein Anstieg der CH<sub>4</sub>-Emissionen mit einer möglichen Plateauphase stattfindet, und danach wieder ein Rückgang zu verzeichnen ist (Bell et al., 2014; Garnsworthy et al., 2012b; Kandel et al., 2017; Negussie et al., 2017b). Die LTK 5 deckt die Laktationswochen 14-23 ab und liegt demzufolge überwiegend in dem Bereich, für den eine hohe CH<sub>4</sub>-Produktion beschrieben wurde. In den folgenden Wochen wurde eine konstante CH<sub>4</sub>-Emission beschrieben (Bell et al., 2014; Garnsworthy et al., 2012b). Es wird vermutet, dass trotz sinkender Futteraufnahme in Folge sinkender Milchleistung die CH<sub>4</sub>-Emission konstant bleibt, da der Anteil an Rohfaser in der Ration steigt und somit vermehrt CH<sub>4</sub> gebildet wird (Garnsworthy et al., 2012b). In dieser Studie sanken die CH<sub>4</sub>-Emissionen nach dem 160. Laktationstag leicht ab, wobei dieser Effekt nur auf den PB für die Phänotypen pmean, rpmean und gCH<sub>4</sub>(GF) signifikant ( $p < 0,05$ ) war. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass in diesem Zeitraum die ersten Kühe wieder trächtig waren. Garnsworthy et al. (2012b) fanden einen Trend, dass Kühe mit fortgeschrittenem Trächtigkeitsstadium weniger CH<sub>4</sub>-Emissionen abgaben. Ein Erklärungsansatz ist die sinkende Milchleistung am Ende der Laktation, die mit zunehmender Trächtigkeit zu einer geringeren Futteraufnahme führt.

### **Milchleistung**

Der Zusammenhang zwischen ECM und CH<sub>4</sub>-Konzentration bzw. -Menge war auf den PB signifikant ( $p < 0,05$ ). Damit bestätigen sich die Angaben aus der Literatur, die beschreiben, dass mit steigender Milchmenge auch die CH<sub>4</sub>-Produktion ansteigt (Bell et al., 2014; Garnsworthy et al., 2012a, 2012b; Haque et al., 2015; Yan et al., 2006). Die genetische Korrelation zwischen CH<sub>4</sub>-Emission und Milchleistung wurde auf 0,26 ( $\pm 0,27$ ) und 0,43 ( $\pm 0,10$ ) geschätzt (Breider et al., 2018; Lassen & Løvendahl, 2016). Zurückzuführen ist dieser Zusammenhang auf eine gesteigerte Futteraufnahme aufgrund des höheren Energiebedarfs der zusätzlichen Milchleistung (Garnsworthy et al., 2012b; Yan et al., 2006). Ein genauere Blick auf die abgegebene CH<sub>4</sub>-Menge je kg Milch deckt eine Verminderung der CH<sub>4</sub>-Intensität bei steigender Milchleistung auf. Grundlage dafür ist die Verdünnung der CH<sub>4</sub>-Produktion für den Erhaltungsbedarf der Kuh. Je zusätzlichem Liter Milch wird zwar mehr CH<sub>4</sub> gebildet, aber der

Erhaltungsbedarf bleibt gleich und verteilt sich rechnerisch auf die produzierte Milchmenge. Als Folge steigt die Effizienz der Energienutzung an und es wird weniger CH<sub>4</sub> je Liter Milch abgegeben (Negussie et al., 2017b). Dieser Effekt wurde auch in anderen Studien nachgewiesen (Chagunda et al., 2009a; Negussie et al., 2017b; Yan et al., 2006).

### **Lebendmasse**

Die Lebendmasse übte, entgegen erster Vermutungen, für beide Betriebsarten keinen signifikanten Einfluss ( $p < 0,05$ ) auf die CH<sub>4</sub>-Produktion aus. Eine Ausnahme bildete das Merkmal gCH<sub>4</sub>, auf das die Lebendmasse einen hoch signifikanten Einfluss ( $p < 0,0001$ ) ausübte. Dieser ist auf die Schätzgleichung des Merkmals zurückzuführen, da hier die Lebendmasse als Faktor einging. Eine höhere Lebendmasse bedeutet eine höhere Futteraufnahme. Dieser Zusammenhang wurde bereits durch mehrere Studien belegt. Die phänotypischen und genetischen Korrelationen zwischen Lebendmasse und Trockenmasseaufnahme lagen im Bereich von 0,24-0,32 (Manzanilla-Pech et al., 2017) bzw. 0,43-0,68 (Manzanilla-Pech et al., 2017; Veerkamp & Brotherstone, 1997). Eine größere Futteraufnahme führt wiederum zu einer größeren Menge an fermentierbarem Material im Pansen und zu einer höheren CH<sub>4</sub>-Produktion (Brask et al., 2015; Mc Court et al., 2006; Grainger et al., 2007; Yan et al., 2006). Der direkte Zusammenhang zwischen Lebendmasse und CH<sub>4</sub>-Emission konnte in der Literatur jedoch nicht durchgängig nachgewiesen werden. Ein positiver Zusammenhang wurde von einigen Autoren beobachtet (Antunes-Fernandes et al., 2016; Mc Court et al., 2006; Robinson et al., 2010; Garnsworthy et al., 2012b; Yan et al., 2006). Garnsworthy et al. (2012b) berichteten beispielsweise von einer zunehmenden CH<sub>4</sub>-Emission von  $0,13 \pm 0,03$  g CH<sub>4</sub> / d, wenn die Lebendmasse der Kuh um ein kg stieg. Andere Studien bestätigen die in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse und beschreiben, dass es keinen Zusammenhang zwischen Lebendmasse und CH<sub>4</sub>-Produktion gibt (Hammond et al., 2015b; Holter & Young, 1992; Negussie et al., 2017b). In einer Studie von Lassen & Løvendahl (2016) wurde sogar eine negative Korrelation zwischen Lebendmasse und CH<sub>4</sub>-Produktion geschätzt. Trotz dieser vielfältigen Ergebnisse zur Einflussnahme der Lebendmasse auf die CH<sub>4</sub>-Bildung und des nicht signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einflusses in dieser Studie, wurde sie im Modell der genetisch-statistischen Auswertung berücksichtigt. Begründet liegt dies in der großen Bedeutung der Futteraufnahme für die CH<sub>4</sub>-Produktion. Es war nicht möglich, die Futteraufnahme auf den PB zu erfassen. Aus den Daten der Lebendmasse und Milchleistung einer Kuh kann jedoch die Futteraufnahme geschätzt werden. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft beide Einflussfaktoren im statistischen Modell zu berücksichtigen.

Anhand dieser Ausführungen ist zu erkennen, dass die Beeinflussung der CH<sub>4</sub>-Bildung und Messung durch verschiedene Faktoren erfolgt. Deshalb ist es notwendig Einflussfaktoren zu standardisieren oder zu dokumentieren und später in der Auswertung zu berücksichtigen. Für nachfolgende CH<sub>4</sub>-Messungen mit dem LMD ist es ratsam, diese und mögliche neue Einflussfaktoren und ihre Berücksichtigung im Modell neu zu analysieren, da sich aufgrund neuer Umstände auch die Einflussfaktoren ändern können.

## 5.4 Genetische Parameter

Die Schätzung der Heritabilitäten der CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und Mengen aus den Einzelprofilen einer Kuh ergab niedrige (0,05-0,08) und aus den Mittelwerten der Profile niedrige bis mittlere Werte (0,07-0,27). Diese positive Differenz zwischen den Einzelprofilen und dem Mittelwert über mehrere Profile weist darauf hin, dass wiederholte Messungen je Tier vorteilhaft sind, da Ausreißerwerte ausgeglichen werden. Außerdem wird der Effekt von zufällig wirkenden Einflussgrößen bei Messungen an mehreren Tagen vermindert (Storm et al., 2012). Nachteilig war jedoch, dass bei der Bildung der Mittelwerte die Gesamtzahl der auszuwertenden Beobachtungen sank, weshalb der Standardfehler anstieg.

Die höchste Heritabilität – sowohl bei wiederholten Messungen als auch beim Mittelwert – wies das Merkmal gCH<sub>4</sub> auf. Ursache war der Einfluss des Gewichts, welches in der Schätzgleichung verwendet wird. Das Tiergewicht besitzt selbst eine hohe Heritabilität (0,25-0,55 (Veerkamp & Brotherstone, 1997; Manzanilla-Pech et al., 2014)), die teilweise in das neue Merkmal gCH<sub>4</sub> mit einfließt. Die zweite Hochrechnung stellte eine lineare Transformation von p<sub>mean</sub> dar und konnte deshalb bei den genetischen Auswertungen als das gleiche Merkmal betrachtet werden. gCH<sub>4</sub>(GF) als Maßzahl für die Tagesmenge an gebildetem CH<sub>4</sub> besaß eine etwas geringere Heritabilität als gCH<sub>4</sub>, enthielt jedoch keine zusätzlichen Faktoren. Diese „Reinheit“ des Merkmals gCH<sub>4</sub>(GF) gegenüber gCH<sub>4</sub> ist positiv zu bewerten, da die Ergebnisse nicht durch andere Faktoren beeinflusst wurden und direkt abgelesen werden konnten. Der Phänotyp r<sub>pmean</sub> besaß bei der Analyse der Einzelprofile dieselbe Heritabilität wie p<sub>mean</sub>. Bei der Betrachtung der Mittelwerte aller Profile einer Kuh ergab sich jedoch eine geringere Heritabilität als bei p<sub>mean</sub>. Es zeigte sich, dass durch die Bildung des Mittelwerts die Restvarianz im Verhältnis zur Tiervarianz größer war als im Merkmal p<sub>mean</sub>. Deshalb stieg auch die Heritabilität weniger an. Ähnlich verhielt es sich im Merkmal r<sub>emean</sub>, bei dem zu einer niedrigen Heritabilität noch ein sehr hoher Standardfehler hinzukam. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Ruktuswerte in den einzelnen CH<sub>4</sub>-Profilen erheblich

schwankten und stark von äußeren Einflussfaktoren abhängig waren. Die zum Merkmal remean gehörige hohe Restvarianz untermauert diese Vermutung. Folglich sind Ruktusmerkmale weniger gut zur Einzeltierbewertung und Selektion geeignet.

## 5.5 Auswahl des besten Phänotyps für die genetische Selektion

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung bestätigen die Angaben aus der Literatur, dass es möglich ist, Kühe mit einer geringeren CH<sub>4</sub>-Produktion zu selektieren. Bevor das Merkmal CH<sub>4</sub>-Konzentration oder -Emission jedoch ins Zuchtziel aufgenommen werden kann, ist es erforderlich, einen Phänotyp zu definieren, der die CH<sub>4</sub>-Produktion einer Kuh möglichst genau und unverzerrt widerspiegelt.

Im vorliegenden Datensatz aus Messungen mit dem LMD stellt pmean (beziehungsweise gCH<sub>4</sub>(GF) als Transformation) den für Selektionszwecke am ehesten geeigneten Phänotypen dar. Pmean bildet den Mittelwert aus allen Spitzen in einem CH<sub>4</sub>-Profil, so dass sowohl Atmungs- als auch Ruktusspitzen berücksichtigt werden – was bei den Phänotypen rmean und remean nicht der Fall ist. Das hat den Vorteil, dass Tiere mit einem hohen CH<sub>4</sub>-Anteil in der Atmung gleichermaßen betrachtet werden wie Tiere, die mehr CH<sub>4</sub> über den Ruktus abgeben. Dieser Sachverhalt bietet auch einen Vorzug gegenüber den Messungen von Green-Feed und Sniffer, da bei diesen Techniken Messungen weniger differenziert erfolgen und überwiegend Ruktusereignisse erfasst werden. Das Atmungs-CH<sub>4</sub> wird so ungenauer erfasst als bei Messungen mit dem LMD (Hammond et al., 2016a). Außerdem scheinen Einflussfaktoren stärker auf Ruktusmerkmale einzuwirken, weshalb eine alleinige Betrachtung dieser Merkmale zu ungenauen Ergebnissen führen könnte. Weiterhin spricht für das Merkmal pmean, dass sowohl bei den Einzelprofilen als auch bei den Mittelwerten der Profile höhere Heritabilitäten mit den kleinsten Standardfehlern geschätzt wurden. Das bedeutet, dass mit diesem Phänotyp am ehesten von allen hier untersuchten Phänotypen die CH<sub>4</sub>-Produktion züchterisch bearbeitet werden kann, da ein moderater Anteil der Variation der CH<sub>4</sub>-Konzentration der Vorfahren an die Nachkommen weitergegeben wird. Die Heritabilität von gCH<sub>4</sub> war zwar etwas höher als die von pmean, diese ist jedoch wahrscheinlich auf den Faktor Lebendmasse in der Schätzgleichung zurückzuführen. Es ist daher unbestimmt, in welchem Umfang gCH<sub>4</sub> die CH<sub>4</sub>-Produktion selbst widerspiegelt und wie viel durch die anderen Faktoren beeinflusst wird. Pmean gibt im Gegensatz dazu die reine CH<sub>4</sub>-Konzentration wieder. Die Formel für das Merkmal gCH<sub>4</sub>(GF) wurde anhand von elf Kühen und 105 CH<sub>4</sub>-

Profilen abgeleitet (Sorg et al., 2018). Für eine genauere Schätzung sollte hier eine Validierung der Schätzgleichung anhand von mehr Tieren und mehr CH<sub>4</sub>-Profilen mit bekannter CH<sub>4</sub>-Produktion erfolgen. Für die genetische Selektion wäre das Grundmerkmal  $p_{\text{mean}}$  wahrscheinlich ausreichend, da die Rangierung der Kühe ausschlaggebend ist und der absolute Wert in g/d nicht benötigt wird.

Wie bereits in Kapitel 5.4 diskutiert, spiegeln wiederholte CH<sub>4</sub>-Messungen und deren Mittelwert das genetische Potenzial einer Kuh bezüglich ihrer CH<sub>4</sub>-Konzentration in der Atemluft besser wider als einzelne Messungen. Aus diesen Gründen stellt der Mittelwert von  $p_{\text{mean}}$  den geeignetsten Phänotyp für die Selektion von Kühen mit einer geringen CH<sub>4</sub>-Produktion in der hier vorgestellten Arbeit dar.

Neben der Möglichkeit auf die reine CH<sub>4</sub>-Produktion zu selektieren, könnten auch Verhältnismerkmale wie der CH<sub>4</sub>-Ertrag und die CH<sub>4</sub>-Intensität in Betracht gezogen werden. Diese Merkmale würden wichtige, nicht zu vernachlässigende Einflussfaktoren – wie zum Beispiel Milchleistung und Futteraufnahme – berücksichtigen. Der Zuchtfortschritt bei Verhältnismerkmalen ist jedoch geringer als bei der direkten Selektion, da sich einzelne Effekte überlagern (Zetouni et al., 2017).

CH<sub>4</sub>-Merkmale sind schwer zu messen und werden nicht routinemäßig erhoben (Pickering et al., 2015). Als Alternative könnten Hilfsmerkmale für die Selektion herangezogen werden. In einer Übersichtsarbeit beschreiben Negussie et al. (2017a), dass diese Hilfsmerkmale eine gute Möglichkeit darstellen, um die CH<sub>4</sub>-Emission einfach, günstig und im großen Umfang zu schätzen. Sie sind zwar weniger genau, liegen jedoch mit wiederholten Messungen vor, so dass Daten weniger verzerrt werden. Beispielsweise stellen die Milchleistung (de Haas et al., 2011; Kandel et al., 2014; Zetouni et al., 2017), die Zusammensetzung der Milch bezüglich der Milchsäuren (Chilliard et al., 2009; Dijkstra et al., 2011) oder das Milchinfrarotspektrum (Dehareng et al., 2012; Kandel et al., 2017) geeignete Hilfsmerkmale dar. Bevor diese Hilfsmerkmale jedoch akkurat eingesetzt werden können, ist es notwendig, die genaue Beziehung zur CH<sub>4</sub>-Bildung zu untersuchen. Hierzu ist wiederum eine große Anzahl an direkten CH<sub>4</sub>-Messungen notwendig (de Haas et al., 2011). Zudem bildet ein Hilfsmerkmal meist nur einen kleinen Teil der Varianz des zu schätzenden Merkmals ab, so dass zu empfehlen ist, mehrere Hilfsmerkmale einzusetzen und so die Genauigkeit der Schätzung zu verbessern (Negussie et al., 2017a). Ein weiterer Nachteil ist, dass die Robustheit und Anwendbarkeit einiger Hilfsmerkmale nicht in allen Umwelten und Produktionssystemen gegeben ist (de Haas et al., 2018). Eine Meta-Analyse zu geschätzten CH<sub>4</sub>-Heritabilitäten zeigte, dass die Variation der Heritabilitäten für die CH<sub>4</sub>-Produktion von Kühen und Schafen zwischen Stu-

dien größer war, wenn die Heritabilität aus Schätzgleichungen abgeleitet wurde. Heritabilitäten, die aus direkten CH<sub>4</sub>-Messungen geschätzt wurden, waren über verschiedene Studien hinweg ähnlicher (Brito et al., 2018).

## 5.6 Auswirkungen einer Einbeziehung der CH<sub>4</sub>-Emission in das Zuchtziel

Um bei Kühen mit gleicher Milchleistung und Futteraufnahme einen schnellen Zuchtfortschritt in der Senkung der CH<sub>4</sub>-Produktion zu gewährleisten, ist die beste Strategie, die CH<sub>4</sub>-Produktion direkt ins Zuchtziel aufzunehmen und wichtige Einflussgrößen als Effekte im Modell zu berücksichtigen. Ein ausbalancierter Selektionsindex mit dem Merkmal CH<sub>4</sub> wäre somit das Ziel (Basarab et al., 2013; Wall et al., 2010; de Haas et al., 2017). Bei einem Zuchtziel, mit dem die Milchleistung gesteigert und der CH<sub>4</sub>-Ausstoß gesenkt werden soll, zeigt sich, wie wichtig ein richtig balancierter Index ist. Breider et al. (2018) stellten fest, dass die Futteraufnahme und somit auch die Futterkosten je Tier als Folge steigen und die Lebendmasse kleiner werden würden. Hier wäre eine Restriktion der Futteraufnahme vorteilhaft, was wiederum zu einer geringeren Steigerung der Milchleistung führen würde. Dies zeigt, dass es wichtig ist Korrelationen zwischen Einflussgrößen und den Merkmalen im Zuchtziel zu kennen. Nur so kann die CH<sub>4</sub>-Emission ins Zuchtziel integriert und unerwünschte Auswirkungen auf anderen Merkmale vermieden werden (Wall et al., 2010). Pszczola et al. (2019) fanden eine gleichgerichtete genetische Korrelation zwischen CH<sub>4</sub>-Emission und Fettgehalt in der Milch, zur Milchleistung, sowie zu den Exterieurmerkmalen Stärke und Größe der Kuh. Im Gegensatz dazu war die Beziehung zu dem Merkmal Langlebigkeit negativ (Pszczola et al. 2019). Diese Ergebnisse zeigen nachteilige Zusammenhänge der CH<sub>4</sub>-Emission zu den aktuellen Zuchtzielen. Obwohl die genetischen Korrelationen gering waren, würden sie bei der direkten Zucht auf weniger CH<sub>4</sub>-Emissionen auch zu einer geringeren Milchleistung mit weniger Fett in der Milch, kleineren Kühen und einer geringeren Langlebigkeit führen. In einer Studie von Zetouni et al. (2018) wurden Fruchtbarkeits- und Gesundheitsmerkmale untersucht. Vorteilhaft zeigte sich ein positiver Zusammenhang zwischen CH<sub>4</sub>-Emission und den Fruchtbarkeitsmerkmalen bzgl. des Besamungsintervalls und ein negativer Zusammenhang zum BCS. Eine negative genetische Korrelation zu Stoffwechsel- und Klauenkrankheiten würde jedoch zu nachteiligen Auswirkungen auf die Gesundheit bei der Selektion auf weniger CH<sub>4</sub>-Emissionen führen (Zetouni et al. 2018). In beiden Studien waren die Standardfehler der genetischen Korrelationen hoch, weshalb eine Interpretation der Ergebnisse nur

begrenzt möglich ist. Weitere Studien bzgl. der genetischen Korrelation der CH<sub>4</sub>-Emission zu den Milchleistungsmerkmalen, der Lebendmasse, Futteraufnahme, Fruchtbarkeit und Langlebigkeit, sowie zu den Merkmalen Gesundheit und Exterieur sollten durchgeführt werden, um diese vorläufigen Ergebnisse abzusichern und zu ergänzen.

Nach der Festlegung auf einen für die Selektion optimalen CH<sub>4</sub>-Phänotyp stellt die genomische Selektion eine weitere Möglichkeit dar, sehr genau Kühe mit einer verminderten CH<sub>4</sub>-Emission zu selektieren. So wurden bereits mehrere SNP gefunden, die einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss auf die CH<sub>4</sub>-Produktion ausüben (de Haas et al., 2011; Pszczola et al., 2018). Die genomische Selektion besitzt den Vorteil, dass mit dem Vorhandensein einer geeigneten Schätzgleichung aus Genomdaten einer Referenzpopulation für die CH<sub>4</sub>-Emission auf eine direkte CH<sub>4</sub>-Messung verzichtet werden kann. Allerdings muss die Referenzpopulation auch immer wieder durch neue Individuen mit Phänotyp- und Genotypinformationen aktualisiert werden. Für eine solche Referenzpopulation werden jedoch mehrere Tausend genotypisierte Kühe mit möglichst genauen CH<sub>4</sub>-Messungen benötigt, um eine ausreichende Sicherheit der Zuchtwerte zu erlangen (VanRaden et al., 2009). Außerdem muss die Schätzgleichung regelmäßig an neuen Tieren, die Genotyp- und Phänotypinformationen zu ihrer CH<sub>4</sub>-Emission besitzen, validiert werden.

Erforderlich ist es auch, dass die CH<sub>4</sub>-Emission einen ökonomischen Wert erhält und somit im Zuchtziel spezifisch gewichtet werden kann (Boichard & Brochard, 2012). Ein solcher Wert könnte beispielsweise dadurch entstehen, dass eine Klimagassteuer je Kuh gezahlt werden muss. Eine ähnliche Steuer gibt es bereits auf Kraftfahrzeuge (KFZ). Seit 2009 muss für KFZ, die viel CO<sub>2</sub> abgeben, eine höhere KFZ-Steuer bezahlt werden als für andere motorisierte Fahrzeuge, die weniger CO<sub>2</sub> abgeben (CO<sub>2</sub>-Steuer.info, 2009). Mit diesem Instrument soll erreicht werden, dass vermehrt Autos mit einer geringen Emissionsrate gekauft und so weniger klimaschädliche Gase emittiert werden. Eine CH<sub>4</sub>-Steuer würde folglich einen Anreiz schaffen, Kühe zu selektieren, die weniger CH<sub>4</sub> bilden. Alternativ wäre es möglich, positive Anreize – im Gegensatz zu einer Steuer – zur CH<sub>4</sub>-Verminderung zu schaffen. Zum Beispiel könnte der Lebensmitteleinzelhandel Produkte als besonders klimaschonend bewerben und den Landwirtschaftsbetrieben für die Zucht auf weniger CH<sub>4</sub>-Emissionen einen Bonus zahlen.

Eine genauere Betrachtung der bisher erforschten Beziehungen zwischen CH<sub>4</sub> und den anderen Merkmalen im Zuchtziel zeigt, dass vor allem zwischen CH<sub>4</sub>, Futteraufnahme und

Milchleistung enge positive genetische Korrelationen vorliegen (Difford et al., 2017; Lassen & Løvendahl, 2016). Aus diesem Grund wäre es möglich, CH<sub>4</sub> nicht nur als direktes Merkmal im Zuchtziel zu berücksichtigen, sondern auch als Hilfsmerkmal für andere Merkmale zu benutzen. Es wäre möglich, dass über die Bestimmung der CH<sub>4</sub>-Produktion die Futteraufnahme des Einzeltieres geschätzt wird, da die Erfassung dieses Merkmals in der Praxis eine große Herausforderung darstellt und bisher nur in Versuchseinrichtungen standardmäßig über Wiegetröge erfasst werden kann. Die Futteraufnahme weist eine hohe Korrelation zur Milch- und CH<sub>4</sub>-Bildung auf. Zudem hat sie einen entscheidenden Einfluss auf die Gesundheit und Fruchtbarkeit der Kühe und auf die betriebswirtschaftlichen Kosten. Aus diesen Gründen spielt die Futteraufnahme eine zentrale Rolle als neues Merkmal im Zuchtziel. Mit den Daten der Futteraufnahme könnte dann ein neues Zuchtziel mit neuen Merkmalen definiert werden. Um diesen Schritt gehen zu können, ist es jedoch ebenfalls notwendig, zwischen allen Merkmalen im Selektionsindex – vor allem zwischen neuen und alten Merkmalen – die genetischen Korrelationen zu bestimmen. Neue wichtige Merkmale für die Zucht auf leistungsstarke, gesunde und rentable Kühe sind zum Beispiel die Lebendmasse und die Langlebigkeit. Da sich die Eigenschaften der einzelnen Merkmale im Verlauf der Laktation zum Teil ändern können, sollten diese auch in verschiedenen Laktationsstadien und für unterschiedliche Laktationen bekannt sein. Ein Beispiel für sich verändernde Eigenschaften in der Laktation ist die CH<sub>4</sub>-Emission. So korrelierte die geschätzte CH<sub>4</sub>-Menge am Anfang einer Laktation nur noch zu 31 % mit der in der 21.-25. Laktationswoche geschätzten (de Haas et al., 2011). Die Futteraufnahme verändert sich ebenfalls im Verlauf der Laktation (Hüttmann et al., 2009). Es sollte darauf geachtet werden, dass die Kuh zu Beginn der Laktation besonders viel frisst, um so das Energiedefizit durch die schnell ansteigende Milchmenge möglichst gering zu halten. Am Ende der Laktation, wenn die Milchleistung abnimmt, sind geringere Futteraufnahmen von Vorteil, um eine Verfettung der Tiere zu verhindern und so Fruchtbarkeits- und Gesundheitsstörungen zu vermeiden. Außerdem können so Futterkosten gespart werden. Zusätzlich werden durch eine effizientere Fütterung negative Auswirkungen auf die Umwelt verringert, da weniger Futter produziert und verarbeitet werden muss und weil geringere Stickstoffausscheidungen anfallen.

Liegen alle Informationen über die einzelnen Merkmale und deren Beziehungen untereinander vor, kann ein ausbalancierter Selektionsindex entwickelt werden. Mit diesem ist eine differenzierte Selektion von Kühen möglich, an die spezielle Anforderungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in ihrem Leben gestellt werden.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit sind folgende Schlussfolgerungen abzuleiten:

- Der LMD war in der Lage, hohe und niedrige CH<sub>4</sub>-Konzentrationen von Milchkühen unter Praxisbedingungen zu messen. Daraus folgt, dass der LMD für die Untersuchung der CH<sub>4</sub>-Produktion geeignet ist und in weiteren Studien verwendet werden kann.
- Das für die Messungen angewendete Messprotokoll war praktikabel und zeigte Ergebnisse, die mit anderen Kurzzeit-Messverfahren vergleichbar sind. Weitere Vergleiche, vor allem mit kontinuierlichen Messverfahren, sind notwendig.
- Es besteht Bedarf an weiteren Untersuchungen bezugnehmend auf das Messprotokoll bei den Punkten Aktivität und Messzeitraum. Die Rangierung der Kühe bei anderen Aktivitäten oder abweichenden Tageszeiten ist zu überprüfen. Weichen die Ergebnisse voneinander ab, reicht die Betrachtung einzelner Aktivitäten und Tageszeiten nicht für eine repräsentative CH<sub>4</sub>-Messung aus. Weiterhin ist zu prüfen, ob eine dreifache Wiederholung der Messungen notwendig ist. Weniger Messungen je Tier wären aufgrund eines geringeren Arbeitsaufwands vorteilhaft. Es muss gewährleistet bleiben, dass die gemessenen Werte die tatsächliche CH<sub>4</sub>-Produktion des Tieres abbilden. Die empfohlene Messdistanz liegt bei einem Meter, sofern die Kühe dies ohne Irritationen zulassen. Anderenfalls ist eine Distanz bis zu 2,5 m möglich, da sich die lokalen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen in der Luft ab einer Entfernung zur Kuh von 40 cm nicht signifikant ändern. Die Messdauer von fünf Minuten ist ausreichend, kann aber auf drei Minuten begrenzt werden. Das ist ratsam, um Arbeitszeit einzusparen.
- Die in dieser Studie erhobenen CH<sub>4</sub>-Konzentrationen und Tagesmengen lagen in ähnlichen Bereichen wie andere bereits veröffentlichte CH<sub>4</sub>-Werte. Die CH<sub>4</sub>-Phänotypen wiesen untereinander hohe bis sehr hohe genetische Korrelationen auf, was zeigt, dass es sich um ähnliche Merkmale handelt oder einige Phänotypen als ein Merkmal zu behandeln sind. Die Formel der physikalischen Hochrechnung enthält jedoch vermutlich einen zu niedrigen Verdünnungsfaktor. Weiterhin basiert die Formel aus den GreenFeed-Daten auf einer geringen Datengrundlage. Weitere Studien mit mehr Tieren zur Validierung der GreenFeed-Formel und zu einem LMD-spezifischen Verdünnungsfaktor sind notwendig.
- Auf die CH<sub>4</sub>-Bildung und Messung wirkten in dieser Studie folgende Einflussgrößen signifikant ( $p < 0,05$ ) ein: LMD-Gerät, bedienende Person, Betrieb beziehungsweise Betriebsbesuch, Wind, Laktationstag und ECM. Der Einfluss der Lebendmasse war in

dieser Studie nicht signifikant ( $p < 0,05$ ), wurde aber im Zusammenhang mit der Milchleistung aufgrund ihrer Bedeutung auf die Futteraufnahme mitberücksichtigt. In weiteren Versuchen sollte dieser Einfluss weiter untersucht werden, um klare Aussagen zur Einflussnahme auf die  $\text{CH}_4$ -Bildung treffen zu können. Zudem sollten mögliche Einflussfaktoren identifiziert werden. Diese können je nach Gegebenheit von den hier aufgeführten Faktoren abweichen. Die aufgedeckten Einflussfaktoren müssen standardisiert oder dokumentiert werden, so dass sie in der Auswertung berücksichtigt werden können.

- Die Heritabilität der  $\text{CH}_4$ -Phänotypen lag im niedrigen bis mittleren Bereich, wobei die Mittelwerte aller Profile einer Kuh im Durchschnitt eine höhere Heritabilität aufwiesen als die Einzelprofile. Die geschätzten Heritabilitäten stimmen mit denen aus der Literatur überein. Die höchste Heritabilität wies  $g\text{CH}_4$  auf, was auf die in der Formel enthaltene Lebendmasse zurückzuführen ist.  $P_{\text{mean}}$  hatte als reines  $\text{CH}_4$ -Merkmal die höchste Heritabilität inne.
- $P_{\text{mean}}$ , als Mittelwert aller  $\text{CH}_4$ -Spitzen eines Profils, ist für die Zuchtwertschätzung für  $\text{CH}_4$  das in dieser Studie geeignetste Merkmal, da es die ausgeatmete  $\text{CH}_4$ -Konzentration als reines Merkmal unverzerrt darstellt und sowohl Atmungs- als auch Ruktus- $\text{CH}_4$  beinhaltet. Weiterhin spricht die Heritabilität dieses Merkmals für die Verwendung zur Selektion, wobei eine Weiterentwicklung dieses Merkmals notwendig ist. Weitere Studien sollten zudem Phänotypen und Genotypen der untersuchten Kühe erheben. Die Tieranzahl dieser Versuche sollte groß genug sein, um eine Lernstichprobe für die genomische Selektion bilden zu können.
- Zur Verminderung der  $\text{CH}_4$ -Emission bei Milchkühen wäre die direkte Selektion auf dieses Merkmal möglich. In Deutschland gibt es jedoch noch keinen ökonomischen Wert für  $\text{CH}_4$ -Ausstoß bzw. dessen Verminderung. Ein solcher Wert wäre nötig, um im Selektionsindex eine Gewichtung dieses Merkmals vornehmen zu können. Aufgrund unerwünschter genetischer Korrelationen zur Milchleistung und Futteraufnahme sollte  $\text{CH}_4$  nicht direkt im Zuchtziel stehen. Der Einsatz als Hilfsmerkmal für die Erfassung der Futteraufnahme erscheint hingegen zweckmäßig. Die Beziehungen zu anderen Merkmalen wie Fruchtbarkeit, Gesundheit und Exterieur sind bisher nur wenig untersucht, sind jedoch notwendig, um negative Folgen der Selektion zu vermeiden.
- Die durchgeführte Arbeit stellt eine Grundlagenforschung dar, in der eine bisher experimentell verwendete Messmethode für  $\text{CH}_4$  weiterentwickelt und evaluiert wurde und vielversprechende Ergebnisse erzielt wurden. Bevor die hiermit erfasste  $\text{CH}_4$ -

Konzentration im Speziellen und die CH<sub>4</sub>-Emission von Kühen im Allgemeinen jedoch in das Zuchtziel aufgenommen werden kann, besteht noch einiges an Forschungsbedarf in den oben genannten Bereichen.

Langfristiges Ziel ist es, einen ausgeglichenen Selektionsindex zu erstellen, in dem neue Merkmale berücksichtigt werden. Nur so kann auf gesunde, leistungsstarke und umweltschonende Kühe selektiert werden.

## 7 Zusammenfassung

Kühe mit niedrigeren Methan ( $\text{CH}_4$ )- Emissionen verwerten aufgenommenes Futter – bei gleicher Leistung und Futteraufnahme – effizienter. Dies hat für den Landwirt eine große Bedeutung, da solche Kühe (Futter-) Kosten sparen. Zudem nimmt das Thema Klimaschutz und Emissionssenkung in der öffentlichen Diskussion einen immer größeren Stellenwert ein. Die landwirtschaftliche Nutztierhaltung als Verursacherin von erheblichen Mengen an Treibhausgasen ist aufgefordert, ihren Beitrag zur Senkung von klimaschädlichen Emissionen zu leisten.

Im Verbundprojekt „optiKuh“ wurde neben der Futteraufnahme und der Stoffwechselstabilität auch die  $\text{CH}_4$ -Produktion bei Milchkühen untersucht. Die hier vorgestellte Arbeit zielte darauf ab, die Eignung des Laser-Methan-Detektors (LMD) zur Erfassung der abgegebenen  $\text{CH}_4$ -Konzentration durch Kühe zu überprüfen und aus dessen Daten neue  $\text{CH}_4$ -Phänotypen zu erstellen. Dazu sollte ein geeignetes Messprotokoll eingeführt werden. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war zu überprüfen, ob es genetisch bedingte tierindividuelle Unterschiede hinsichtlich der  $\text{CH}_4$ -Emissionen gibt und so Heritabilitäten für die mit dem LMD gemessene  $\text{CH}_4$ -Konzentration geschätzt werden können. Dabei sollten mögliche Einflussfaktoren auf die  $\text{CH}_4$ -Konzentration identifiziert und berücksichtigt werden. Abschließend wurde die Integration des Merkmals  $\text{CH}_4$  in das aktuelle und ein mögliches zukünftiges Zuchtziel der Milchkühe diskutiert.

Mit dem LMD wurde auf Versuchs- und Praxisbetrieben (VB, PB) die  $\text{CH}_4$ -Konzentration von 949 Milchkühen an drei Folgetagen für je fünf Minuten gemessen. Auf den PB wurden die Kühe nach dem Morgengemelk fixiert und im Stehen die  $\text{CH}_4$ -Konzentration aus einer Distanz von zwei Metern gemessen. Auf den VB erfolgte die Messung über den Vormittag verteilt, wobei hier  $\text{CH}_4$  bei den Kühen beim Wiederkäuen gemessen wurde. Dabei betrug die Entfernung zwischen LMD und Kuh 2,5 m. Nach der Datenbereinigung verblieben in den PB 611 Kühe mit 1.660  $\text{CH}_4$ -Profilen und in den VB 229 Kühe mit 589  $\text{CH}_4$ -Profilen zur Auswertung. Zunächst wurden die  $\text{CH}_4$ -Phänotypen  $p_{\text{mean}}$  (= Mittel aller Atmungs- und Ruktusspitzen),  $r_{\text{pmean}}$  (= Mittel aller Ruktusspitzen),  $r_{\text{emean}}$  (= Mittel aller Maxima der Ruktusevents),  $g_{\text{CH}_4}$  (= physikalische Hochrechnung aus Konzentration und geschätztem Atemvolumen) und  $g_{\text{CH}_4}(\text{GF})$  (= Hochrechnung mittels einer Regressionsformel, basierend auf einer mit GreenFeed gemessenen  $\text{CH}_4$ -Produktion) aus allen  $\text{CH}_4$ -Profilen erstellt.  $p_{\text{mean}}$ ,  $r_{\text{pmean}}$  und  $r_{\text{emean}}$  wurden als Konzentrationen in  $\text{ppm}\times\text{m}$  angegeben.  $g_{\text{CH}_4}$  und  $g_{\text{CH}_4}(\text{GF})$  stellen die geschätzte  $\text{CH}_4$ -Emission in Gramm je Tag (g/d) dar. Auf den PB übten folgende Größen

einen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss aus: Betriebsbesuch, Windgeschwindigkeit, LMD, bedienende Person, Laktationstag und energiekorrigierte Milchleistung (ECM). Die bedienenden Personen und die Windgeschwindigkeit zeigten auf den VB keinen signifikanten ( $p < 0,05$ ) Einfluss auf die gemessenen Werte. Der Einfluss der Fütterungsgruppe war jedoch signifikant ( $p < 0,05$ ). Die ECM übte auf den VB nur tendenziell einen Einfluss auf die  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen aus. Die Lebendmasse wurde berücksichtigt, obwohl auf den PB und den VB kein signifikanter ( $p < 0,05$ ) Einfluss nachgewiesen werden konnte. Sie stellt in Kombination mit der Milchleistung ein Hilfsmerkmal für die individuelle Futteraufnahme einer Kuh dar. Für die Schätzung der Heritabilität und der genetischen Korrelationen zwischen den Merkmalen wurden alle  $\text{CH}_4$ -Profile einer Kuh einzeln und über die drei Messtage gemittelt ausgewertet.

Die Betriebsarten unterschieden sich bezüglich der Mittelwerte der Phänotypen kaum voneinander. Dabei lagen die  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen der verschiedenen Merkmale zwischen 119-396 ppmxm und die  $\text{CH}_4$ -Produktion zwischen 288 und 416 g/d. Aufgrund einer zu geringen Datengrundlage waren genetisch-statistische Auswertungen auf den VB nicht möglich. Die auf den PB geschätzten Heritabilitäten ( $\pm$  Standardfehler) der Einzelprofile lagen mit  $0,05 (\pm 0,06)$  -  $0,08 (\pm 0,03)$  niedriger als die Heritabilitäten der Mittelwerte mit  $0,08 (\pm 0,13)$  -  $0,27 (\pm 0,14)$ . Die genetischen Korrelationen zwischen den  $\text{CH}_4$ -Phänotypen waren hoch ( $r_g = 0,66-0,99$ ), wobei  $g\text{CH}_4(\text{GF})$  eine lineare Transformation von  $p_{\text{mean}}$  darstellte und deshalb zwischen diesen beiden Merkmalen eine Korrelation von 1,00 vorlag.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass es möglich ist, mit dem LMD und dem hier erarbeiteten Messprotokoll eine Variation zwischen Kühen hinsichtlich ihrer  $\text{CH}_4$ -Konzentration festzustellen. Eine Optimierung des Protokolls ist jedoch hinsichtlich der Messzeit und der Anzahl an Wiederholungen ratsam. Ein Vergleich der  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen bei verschiedenen Aktivitäten und Tageszeiten sowie zwischen unterschiedlichen Messtechniken ist in weiteren Untersuchungen ebenso erforderlich. Den geeignetsten  $\text{CH}_4$ -Phänotyp für die Selektion stellte  $p_{\text{mean}}$  dar, weil sowohl Atmungs- als auch Ruktusspitzen berücksichtigt werden und so die  $\text{CH}_4$ -Konzentration während einer Messung ganzheitlich abgebildet wird. Die Bildung eines Mittelwerts über wiederholte Messungen ist dabei ratsam. Dadurch werden Ausreißerwerte ausgeglichen, und es entsteht ein repräsentativeres Bild über die  $\text{CH}_4$ -Konzentrationen der Kuh. Für den Mittelwert von  $p_{\text{mean}}$  lag eine moderate Heritabilität vor, die eine züchterische Bearbeitung dieses  $\text{CH}_4$ -Phänotyps zulässt. In zukünftigen Studien sollten für die Schätzung der genomischen Zuchtwerte der  $\text{CH}_4$ -Phänotypen zusätzlich die Genotypen der Versuchstiere aufgenommen und eine Stichprobengröße gewählt werden, die eine Lern-

stichprobe für die genomische Selektion ermöglicht. Die engen genetischen Korrelationen zur Milchleistung und Futteraufnahme in der Literatur lassen vermuten, dass das Merkmal CH<sub>4</sub> nicht direkt ins Zuchtziel aufgenommen werden muss, sondern als Hilfsmerkmal dienen könnte. Bevor neue Merkmale, wie zum Beispiel CH<sub>4</sub> oder Futteraufnahme, ins Zuchtziel aufgenommen werden können, ist es jedoch unbedingt erforderlich die genetischen Beziehungen zu allen anderen Merkmalen im Zuchtziel genau zu untersuchen. Sind die offenen Fragestellungen geklärt, kann ein ausbalancierter Selektionsindex für gesunde, rentable und klimaschonende Kühe aufgestellt werden.

## 8 Summary

Cows with low methane (CH<sub>4</sub>) emissions use ingested feed more efficiently than cows with higher emissions at the same level in milk yield and dry matter intake (DMI). These cows save (feeding) costs and are thus important for the farmer. Furthermore, the public is interested in reducing greenhouse gas emissions and saving the environment is becoming more and more important. Animal production in agriculture is the cause of a large amount of climate-damaging emissions, therefore, it is important to reduce these emissions.

In the project “optiKuh” the CH<sub>4</sub> emission of dairy cows was measured. Moreover, DMI and the metabolic stability were examined. This study was part of the project. In this study, the applicability of the Laser Methane Detector (LMD) for measuring the CH<sub>4</sub> concentration in the breath of cows was tested. For the measurements, a protocol was developed and new CH<sub>4</sub> phenotypes were created from the data. Moreover, individual differences in the CH<sub>4</sub> concentrations and emission of the cows were analyzed and estimates of heritability for CH<sub>4</sub> were calculated. Possible factors influencing the measured CH<sub>4</sub> concentrations were identified and included in the analysis. Finally, the integration of CH<sub>4</sub> traits in current and future breeding goals was discussed.

In commercial and research herds the CH<sub>4</sub> concentration in the breath of 949 dairy cows was measured. Each measurement lasted for five minutes and was repeated daily over three consecutive days for each cow. In the commercial herds the measurements took place during two hours after the morning milking. The cows were fixed standing in head gates and the distance between the LMD and the cow was two meters. In the research herds the cows were standing or lying ruminating during the measurement period from morning milking to noon. The distance between the LMD and the cow was 2.5 m. After processing the data, 611 cows from the commercial farms and 229 cows from the research herds with 1,660 and 589 CH<sub>4</sub> profiles remained in the dataset for the analyses. New phenotypes were created: pmean (mean of all peaks), rpmean (mean of all eructation peaks), remean (mean of the maxima of the eructation events), gCH<sub>4</sub> (estimation of the daily CH<sub>4</sub> emission based on CH<sub>4</sub> concentration and estimated tidal volume) and gCH<sub>4</sub>(GF) (extrapolation of the daily CH<sub>4</sub> emission using a regression equation based on CH<sub>4</sub> production data measured with GreenFeed and LMD). The unit of pmean, rpmean and remean was ppm×m and for gCH<sub>4</sub> and gCH<sub>4</sub>(GF) grams per day (g/d). The visit at the farm, wind speed, LMD, the operator, day in milk and energy corrected milk yield (ECM) had a significant ( $p < 0.05$ ) influence on the CH<sub>4</sub> phenotypes on commercial herds. Operator and wind speed had no significant ( $p < 0.05$ ) influence in the

research herds, but diet group had. ECM tended to be significant ( $p < 0.05$ ). For both herd types, bodyweight had no significant ( $p < 0.05$ ) influence on the CH<sub>4</sub> concentration, but was taken into consideration. Bodyweight in combination with milk yield is an estimator for the individual feed intake of cows. Heritability of and the genetic correlations between the CH<sub>4</sub> phenotypes were estimated for the repeated measurements per cow and for the average over the three measurements of each cow with a linear animal model.

Mean CH<sub>4</sub> concentrations of the studied phenotypes differed only marginal between the two herd types. The CH<sub>4</sub> concentrations were between 119-396 ppmxm and the estimated CH<sub>4</sub> production was 288-416 g/d. It was impossible to perform genetic-statistical analyses in the research herds because there were not enough data available. In the commercial herds, a heritability ( $\pm$  standard error) of 0.05 ( $\pm$  0.06) – 0.08 ( $\pm$  0.03) for the repeated measurements per cow and 0.08 ( $\pm$  0.13) – 0.27 ( $\pm$  0.14) for the average of the measurements per cow was estimated. The genetic correlations between the CH<sub>4</sub> phenotypes were high ( $r_g = 0.66$ -0.99). The correlation between pmean and gCH<sub>4</sub>(GF) was 1.00, because gCH<sub>4</sub>(GF) is a linear transformation of pmean.

This study shows that it is possible to determine a between-cow variation for CH<sub>4</sub> concentration in the breath of cows with the LMD and the here developed measurement protocol. For further studies it is advisable to optimize the measurement protocol in regards to the duration of each measurement and the number of repetitions. Furthermore, the CH<sub>4</sub> concentrations during different activities of the cow and times of day need to be studied. The LMD should also be compared with other CH<sub>4</sub> measurement techniques. In this study, the CH<sub>4</sub> phenotype most favorable for genetic selection would be pmean, because it takes all peaks of breathing and eructation into consideration. Thus, the CH<sub>4</sub> concentration of all respiration cycles of a cow – including those with and without an eructation behind – is taken into account. It is advisable to create an average for repeated measurements per cow. Accordingly, this would compensate for outliers and a more representative CH<sub>4</sub> phenotype could be created. A moderate heritability was estimated for the average of pmean which would allow for a genetic selection for this phenotype. In future studies, the genotypes for cows which have a CH<sub>4</sub> phenotype should be taken into consideration, so that a genomic breeding value can be estimated for those phenotypes. In addition, an increased sample size should be used in order to provide a reference population for genetic selection. Other studies reported a strong relationship between CH<sub>4</sub> production and milk yield as well as between CH<sub>4</sub> production and feed intake. Hence the assumption is, that CH<sub>4</sub> production should not be included into the breeding goal itself. It should rather be used as a proxy for feed intake. Before new traits like CH<sub>4</sub>

or feed intake can be included into the breeding goal, it is necessary to identify their genetic relationships with all the other traits. It may possible to create a balanced selection index for healthy, cost-effective and climate-friendly cows if all open questions are answered.

## V. Literaturverzeichnis

- Andreini, E. M., M. S. Calvo-Lorenzo, C. J. Richards, J. E. White, and S. E. Place. 2016. 1200 Evaluation of an enteric methane emissions measurement system for cattle. *Journal of animal science* 94(supplement5):576. doi:10.2527/jam2016-1200.
- Antunes-Fernandes, E. C., S. van Gastelen, J. Dijkstra, K. A. Hettinga, and J. Vervoort. 2016. Milk metabolome relates enteric methane emission to milk synthesis and energy metabolism pathways. *Journal of dairy science* 99(8):6251–6262. doi:10.3168/jds.2015-10248.
- Arthur, P. F., J. A. Archer, D. J. Johnston, R. M. Herd, E. C. Richardson, and P. F. Parnell. 2001. Genetic and phenotypic variance and covariance components for feed intake, feed efficiency, and other postweaning traits in Angus cattle. *Journal of animal science* 79(11):2805. doi:10.2527/2001.79112805x.
- Bakdash, J. Z., and L. R. Marusich. 2017. Repeated Measures Correlation. *Frontiers in psychology* 8:456. doi:10.3389/fpsyg.2017.00456.
- Bannink, A., M. W. van Schijndel, and J. Dijkstra. 2011. A model of enteric fermentation in dairy cows to estimate methane emission for the Dutch National Inventory Report using the IPCC Tier 3 approach. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:603–618. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.043.
- Barnhart, H. X., M. J. Haber, and L. I. Lin. 2007. An overview on assessing agreement with continuous measurements. *Journal of biopharmaceutical statistics* 17(4):529–569. doi:10.1080/10543400701376480.
- Basarab, J. A., K. A. Beauchemin, V. S. Baron, K. H. Ominski, L. L. Guan, S. P. Miller, and J. J. Crowley. 2013. Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency: effects on economically important traits and enteric methane production. *Animal an international journal of animal bioscience* 7 Suppl 2:303–315. doi:10.1017/S1751731113000888.
- Beauchemin, K. A., S. M. McGinn, and H. V. Petit. 2007. Methane abatement strategies for cattle: Lipid supplementation of diets. Nr. 103. *Can. J. Anim. Sci.* 87(3):431–440. doi:10.4141/CJAS07011.

- Bell, M. J., J. Craigon, N. Saunders, J. R. Goodman, and P. C. Garnsworthy. 2018. Does the diurnal pattern of enteric methane emissions from dairy cows change over time? *Animal an international journal of animal bioscience*:1–6. doi:10.1017/S1751731118000228.
- Bell, M. J., S. L. Potterton, J. Craigon, N. Saunders, R. H. Wilcox, M. Hunter, J. R. Goodman, and P. C. Garnsworthy. 2014. Variation in enteric methane emissions among cows on commercial dairy farms. Nr. 31. *Animal an international journal of animal bioscience* 8(9):1540–1546. doi:10.1017/S1751731114001530.
- Bell, M. J., E. Wall, G. Simm, and G. Russell. 2011. Effects of genetic line and feeding system on methane emissions from dairy systems. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:699–707. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.049.
- Bergen, W. G., and M. T. Yokoyama. 1977. Productive Limits to Rumen Fermentation. *Journal of animal science*(45):573–584. doi:10.2134/jas1977.453573x.
- Bland, J. M., and D. G. Altman. 2010. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *International Journal of Nursing Studies* 47(8):931–936. doi:10.1016/j.ijnurstu.2009.10.001.
- Blaxter, K. L., and J. P. Joyce. 1963. The accuracy and ease with which measurements of respiratory metabolism can be made with tracheostomized sheep. *BJN* 17(01):523. doi:10.1079/BJN19630055.
- BMEL. 2013. Futtermittelzusatzstoffe. [https://www.bmel.de/DE/Tier/Tierernaehrung/\\_texte/Futtermittelzusatzstoffe.html](https://www.bmel.de/DE/Tier/Tierernaehrung/_texte/Futtermittelzusatzstoffe.html). (zugegriffen am 1. August 2017).
- Boichard, D., and M. Brochard. 2012. New phenotypes for new breeding goals in dairy cattle. Nr. 121. *Animal an international journal of animal bioscience* 6(4):544–550. doi:10.1017/S1751731112000018.
- Brask, M., M. R. Weisbjerg, Hellwing, A L F, A. Bannink, and P. Lund. 2015. Methane production and diurnal variation measured in dairy cows and predicted from fermentation pattern and nutrient or carbon flow. *Animal an international journal of animal bioscience* 9(11):1795–1806. doi:10.1017/S1751731115001184.
- Breider, I. S., E. Wall, P. C. Garnsworthy, and J. E. Pryce. 2018. Genetic relationships between methane emission and milk yield, live weight and dry matter intake. *Proceedings of*

- the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production Challenges - Environmental:134.
- Breves, G., and S. Leonhard-Marek. 2010. Verdauungsvorgänge in den Vormägen: Mikroorganismen in den Vormägen. In: W. von Engelhardt, editor, *Physiologie der Haustiere*. Enke, Stuttgart. p. 382.
- Brito, L. F., F. Schenkel, H. R. d. Oliveira, A. Canovas, and F. Miglior. 2018. Meta-analysis of heritability estimates for methane emission indicator traits in cattle and sheep. *Proceedings of the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production Challenges - Environmental:740*.
- Bruckmaier, R. M. 2010. Laktation: Synthese und Sekretion der Milch und ihrer Bestandteile. In: W. von Engelhardt, editor, *Physiologie der Haustiere*. Enke, Stuttgart. p. 611.
- Buddle, B. M., M. Denis, G. T. Attwood, E. Altermann, P. H. Janssen, R. S. Ronimus, C. S. Pinares-Patiño, S. Muetzel, and D. Neil Wedlock. 2011. Strategies to reduce methane emissions from farmed ruminants grazing on pasture. *Veterinary journal (London, England 1997)* 188(1):11–17. doi:10.1016/j.tvjl.2010.02.019.
- Calsamiglia, S., M. Busquet, P. W. Cardozo, L. Castillejos, and A. Ferret. 2007. Invited review: Essential oils as modifiers of rumen microbial fermentation. *Journal of dairy science* 90(6):2580–2595. doi:10.3168/jds.2006-644.
- Chagunda, M.G.G., D.A.M. Römer, and D. J. Roberts. 2009a. Effect of genotype and feeding regime on enteric methane, non-milk nitrogen and performance of dairy cows during the winter feeding period. *Livestock Science* 122(2-3):323–332. doi:10.1016/j.livsci.2008.09.020.
- Chagunda, M.G.G., D. Ross, and D. J. Roberts. 2009b. On the use of a laser methane detector in dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture* 68(2):157–160. doi:10.1016/j.compag.2009.05.008.
- Chagunda, M.G.G., and T. Yan. 2011. Do methane measurements from a laser detector and an indirect open-circuit respiration calorimetric chamber agree sufficiently closely? *Animal Feed Science and Technology* 165(1-2):8–14. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.02.005.
- Chagunda, M. G. G. 2013. Opportunities and challenges in the use of the Laser Methane Detector to monitor enteric methane emissions from ruminants. Review. *Animal an inter-*

- national journal of animal bioscience 7 Suppl 2:394–400. doi:10.1017/S1751731113000724.
- Chagunda, M. G. G., D. Ross, J. Rooke, T. Yan, J.-L. Douglas, L. Poret, N. R. McEwan, P. Teeranavattanakul, and D. J. Roberts. 2013. Measurement of enteric methane from ruminants using a hand-held laser methane detector. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A - Animal Science* 63(2):68–75. doi:10.1080/09064702.2013.797487.
- Chilliard, Y., C. Martin, J. Rouel, and M. Doreau. 2009. Milk fatty acids in dairy cows fed whole crude linseed, extruded linseed, or linseed oil, and their relationship with methane output. Nr. 113. *Journal of dairy science* 92(10):5199–5211. doi:10.3168/jds.2009-2375.
- C-Lock Inc. 2015. GreenFeed - Large Animals. <https://www.c-lockinc.com/shop/automated-emissions-measurement/greenfeed-large-animals/>. (zugegriffen am 12. September 2017).
- CO2-Steuer.info. 2009. Emissionsbasierte Kfz Steuer tritt zum 01. Juli 2009 offiziell in Kraft - Start der CO2 Steuer. <http://www.co2-steuer.info/politik/emissionsbasierte-kfz-steuer-tritt-zum-01-juli-2009-offiziell-in-kraft-start-der-co2-steuer.php>. (zugegriffen am 4. April 2018).
- Coates, J. 2006. Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach. In: R. A. Meyers, editor, *Encyclopedia of analytical chemistry*. John Wiley & Sons, Hoboken. p. 2.
- Connor, E. E. 2015. Invited review: Improving feed efficiency in dairy production: challenges and possibilities. *Animal an international journal of animal bioscience* 9(3):395–408. doi:10.1017/S1751731114002997.
- Cook, S. R., P. K. Maiti, A. V. Chaves, C. Benchaar, K. A. Beauchemin, and T. A. McAllister. 2008. Avian (IgY) anti-methanogen antibodies for reducing ruminal methane production: In vitro assessment of their effects. *Aust. J. Exp. Agric.* 48(2):260. doi:10.1071/EA07249.
- Cortus, E. L., L. D. Jacobson, B. P. Hetchler, A. J. Heber, and B. W. Bogan. 2015. Methane and nitrous oxide analyzer comparison and emissions from dairy freestall barns with manure flushing and scraping. *Atmospheric Environment* 100:57–65. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.10.039.
- de Haas, Y. d., E. Wall, P. Garnsworthy, B. Kuhla, E. Negussie, and J. Lassen. 2018. Where have we come with breeding for methane emissions – update from international collabo-

- rations. Proceedings of the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production Challenges - Environmental:810.
- de Haas, Y. de. 2017. Methane phenotypes. persönliche Mitteilung, Caserta.
- de Haas, Y. de, M. Pszczola, H. Soyeurt, E. Wall, and J. Lassen. 2017. Invited review: Phenotypes to genetically reduce greenhouse gas emissions in dairying. *Journal of dairy science* 100(2):855–870. doi:10.3168/jds.2016-11246.
- de Haas, Y. de, J. J. Windig, M. P. L. Calus, J. Dijkstra, M. d. Haan, A. Bannink, and R. F. Veerkamp. 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. *Journal of dairy science* 94(12):6122–6134. doi:10.3168/jds.2011-4439.
- Dehareng, F., C. Delfosse, E. Froidmont, H. Soyeurt, C. Martin, N. Gengler, A. Vanlierde, and P. Dardenne. 2012. Potential use of milk mid-infrared spectra to predict individual methane emission of dairy cows. *Animal an international journal of animal bioscience* 6(10):1694–1701. doi:10.1017/S1751731112000456.
- Demment, M. W., and P. J. van Soest. 1985. A Nutritional Explanation for Body-Size Patterns of Ruminant and Nonruminant Herbivores. *The American Naturalist* 125(5):641–672. doi:10.1086/284369.
- Derno, M., H.-G. Elsner, E.-A. Paetow, H. Scholze, and M. Schweigel. 2009. Technical note: a new facility for continuous respiration measurements in lactating cows. *Journal of dairy science* 92(6):2804–2808. doi:10.3168/jds.2008-1839.
- Deutscher Bauernverband. 2013. Situationsbericht 2012/2013. <http://www.bauernverband.de/62-betriebsmittel-/futtermittel>. (zugegriffen am 20. Januar 2016).
- Difford, G. 2016. Results Working Group 2, Padova, Italien.
- Difford, G., Y. de Haas, M.H.P.W. Visker, J. Lassen, H. Bovenhuis, R. F. Veerkamp, and P. Løvendahl. 2017. Do breath gas measurements hold the key to unlocking the genetics of feed efficiency in dairy cows? In: Book of Abstracts of the 68th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science: Tallinn, Estonia, 28 August - 1 September 2017, Tallinn, Estonia. Wageningen Academic Publishers, Wageningen. p. 184.
- Difford, G. F., J. Lassen, and P. Løvendahl. 2016. Interchangeability between methane measurements in dairy cows assessed by comparing precision and agreement of two

- non-invasive infrared methods. *Computers and Electronics in Agriculture* 124:220–226. doi:10.1016/j.compag.2016.04.010.
- Dijkstra, J., S. M. van Zijderveld, J. A. Apajalahti, A. Bannink, W.J.J. Gerrits, J. R. Newbold, H. B. Perdok, and H. Berends. 2011. Relationships between methane production and milk fatty acid profiles in dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:590–595. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.042.
- Drochner, W. 2008. Fütterung der Rinder. In: H. Jeroch, W. Drochner, and O. Simon, editors, *Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere: Ernährungsphysiologie, Futtermittelkunde, Fütterung*. UTB GmbH. 415–418, 430.
- Eckert, M., M. J. Bell, S. L. Potterton, J. Craigon, N. Saunders, R. H. Wilcox, M. Hunter, J. R. Goodman, and P. C. Garnsworthy. 2018. Effect of Feeding System on Enteric Methane Emissions from Individual Dairy Cows on Commercial Farms. *Land* 7(1):26. doi:10.3390/land7010026.
- Ellis, J. L., E. Kebreab, N. E. Odongo, B. W. McBride, E. K. Okine, and J. France. 2007. Prediction of methane production from dairy and beef cattle. *Journal of dairy science* 90(7):3456–3466. doi:10.3168/jds.2006-675.
- Engelhardt, W. von. 2010. *Physiologie der Haustiere*. Enke, Stuttgart.
- Ermler, U. 1997. Crystal Structure of Methyl-Coenzyme M Reductase: The Key Enzyme of Biological Methane Formation. *Science* 278(5342):1457–1462. doi:10.1126/science.278.5342.1457.
- FAO. 2013a. *Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production*. FAO. Rom.
- FAO. 2013b. *Optimization of feed use efficiency in ruminant production systems: Key indicators for measuring dairy cow performance*. FAO. Rom.
- Fitzsimons, C., D. A. Kenny, M. H. Deighton, A. G. Fahey, and M. McGee. 2013. Methane emissions, body composition, and rumen fermentation traits of beef heifers differing in residual feed intake. *Journal of animal science* 91(12):5789–5800. doi:10.2527/jas.2013-6956.
- Foley, P. A., D. A. Kenny, J. J. Callan, T. M. Boland, and F. P. O'Mara. 2009. Effect of DL-malic acid supplementation on feed intake, methane emission, and rumen fermentation in beef cattle. *Journal of animal science* 87(3):1048–1057. doi:10.2527/jas.2008-1026.

- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D. W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D. C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz, and R. van Dorland. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Intergovernmental Panel on Climate Change, editor, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York.
- Gardiner, T. D., M. D. Coleman, F. Innocenti, J. Tompkins, A. Connor, P. C. Garnsworthy, J. M. Moorby, C. K. Reynolds, A. Waterhouse, and D. Wills. 2015. Determination of the absolute accuracy of UK chamber facilities used in measuring methane emissions from livestock. *Measurement* 66:272–279. doi:10.1016/j.measurement.2015.02.029.
- Garnsworthy, P. C., J. Craigon, J. H. Hernandez-Medrano, and N. Saunders. 2012a. On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. *Journal of dairy science* 95(6):3166–3180. doi:10.3168/jds.2011-4605.
- Garnsworthy, P. C., J. Craigon, J. H. Hernandez-Medrano, and N. Saunders. 2012b. Variation among individual dairy cows in methane measurements made on farm during milking. *Journal of dairy science* 95(6):3181–3189. doi:10.3168/jds.2011-4606.
- Gill, F. L., R. J. Dewhurst, J. A.J. Dungait, R. P. Evershed, L. Ives, C.-S. Li, R. D. Pancost, M. Sullivan, S. Bera, and I. D. Bull. 2010. Archaeol – a biomarker for foregut fermentation in modern and ancient herbivorous mammals? *Organic Geochemistry* 41(5):467–472. doi:10.1016/j.orggeochem.2010.02.001.
- Gilmour, A. R., B. J. Gogel, B. R. Cullis, and Thompson R. 2009. *ASREML: User Guide*. NSW Agriculture, Orange, Australia.
- Grainger, C., and K. A. Beauchemin. 2011. Can enteric methane emissions from ruminants be lowered without lowering their production? *Animal Feed Science and Technology* 166-167:308–320. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.021.
- Grainger, C., T. Clarke, S. M. McGinn, M. J. Auldist, K. A. Beauchemin, M. C. Hannah, G. C. Waghorn, H. Clark, and R. J. Eckard. 2007. Methane emissions from dairy cows measured using the sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer and chamber techniques. *Journal of dairy science* 90(6):2755–2766. doi:10.3168/jds.2006-697.

- Grainger, C., R. Williams, R. J. Eckard, and M. C. Hannah. 2010. A high dose of monensin does not reduce methane emissions of dairy cows offered pasture supplemented with grain. *Journal of dairy science* 93(11):5300–5308. doi:10.3168/jds.2010-3154.
- Groeneveld, E. 1990. PEST: User's manual, Mariensee.
- Groeneveld, E., M. Kovac, and N. Mielenz. 2008. VCE-6: user's guide and reference manual. Institute of Farm Animal Genetics, Mariensee.
- Guan, H., K. M. Wittenberg, K. H. Ominski, and D. O. Krause. 2006. Efficacy of ionophores in cattle diets for mitigation of enteric methane. *Journal of animal science* 84(7):1896. doi:10.2527/jas.2005-652.
- Guo, Y. Q., J.-X. Liu, Y. Lu, W. Y. Zhu, S. E. Denman, and C. S. McSweeney. 2008. Effect of tea saponin on methanogenesis, microbial community structure and expression of *mcrA* gene, in cultures of rumen micro-organisms. *Letters in applied microbiology* 47(5):421–426. doi:10.1111/j.1472-765X.2008.02459.x.
- Haisan, J., Y. Sun, L. L. Guan, K. A. Beauchemin, A. Iwaasa, S. Duval, D. R. Barreda, and M. Oba. 2014. The effects of feeding 3-nitrooxypropanol on methane emissions and productivity of Holstein cows in mid lactation. *Journal of dairy science* 97(5):3110–3119. doi:10.3168/jds.2013-7834.
- Hammond, K. J., L. A. Crompton, A. Bannink, J. Dijkstra, D. R. Yáñez-Ruiz, P. O'Kiely, E. Kebreab, M. A. Eugène, Z. Yu, K. J. Shingfield, A. Schwarm, A. N. Hristov, and C. K. Reynolds. 2016a. Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants. *Animal Feed Science and Technology* 219:13–30. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.05.018.
- Hammond, K. J., D. J. Humphries, L. A. Crompton, C. Green, and C. K. Reynolds. 2015a. Methane emissions from cattle: Estimates from short-term measurements using a Green-Feed system compared with measurements obtained using respiration chambers or sulphur hexafluoride tracer. *Animal Feed Science and Technology* 203:41–52. doi:10.1016/j.anifeedsci.2015.02.008.
- Hammond, K. J., D. J. Humphries, L. A. Crompton, P. Kirton, and C. K. Reynolds. 2015b. Effects of forage source and extruded linseed supplementation on methane emissions from growing dairy cattle of differing body weights. *Journal of dairy science* 98(11):8066–8077. doi:10.3168/jds.2015-9669.

- Hammond, K. J., G. C. Waghorn, and R. S. Hegarty. 2016b. The GreenFeed system for measurement of enteric methane emission from cattle. *Anim. Prod. Sci.* 56(3):181. doi:10.1071/AN15631.
- Hänsel, R., and O. Sticher. 2010. *Pharmakognosie — Phytopharmazie*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Haque, M. N., C. Cornou, and J. Madsen. 2015. Individual variation and repeatability of methane production from dairy cows estimated by the CO<sub>2</sub> method in automatic milking system. *Animal an international journal of animal bioscience*:1–10. doi:10.1017/S1751731115000646.
- Hayes, B., and M. Goddard. 2010. Genome-wide association and genomic selection in animal breeding. *Genome* 53(11):876–883. doi:10.1139/G10-076.
- Hegarty, R. S. 2013. Applicability of short-term emission measurements for on-farm quantification of enteric methane. *Animal an international journal of animal bioscience* 7 Suppl 2:401–408. doi:10.1017/S1751731113000839.
- Hegarty, R. S., J. P. Goopy, R. M. Herd, and B. McCorkell. 2007. Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production. *Journal of animal science* 85(6):1479–1486. doi:10.2527/jas.2006-236.
- Hoekstra, J., A.W. van der Lugt, J.H.J. van der Werf, and W. Ouweltjes. 1994. Genetic and phenotypic parameters for milk production and fertility traits in upgraded dairy cattle. *Livestock Production Science* 40(3):225–232. doi:10.1016/0301-6226(94)90090-6.
- Holter, J. B., and A. J. Young. 1992. Methane Prediction in Dry and Lactating Holstein Cows. *Journal of dairy science* 75(8):2165–2175. doi:10.3168/jds.S0022-0302(92)77976-4.
- Hook, S. E., A.-D. G. Wright, and B. W. McBride. 2010. Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies. *Archaea (Vancouver, B.C.)* 2010:945785. doi:10.1155/2010/945785.
- Hristov, A. N., E. Kebreab, M. Niu, J. Oh, A. Bannink, A. R. Bayat, T. B. Boland, A. F. Brito, D. P. Casper, L. A. Crompton, J. Dijkstra, M. Eugène, P. C. Garnsworthy, N. Haque, A. L. F. Hellwing, P. Huhtanen, M. Kreuzer, B. Kuhla, P. Lund, J. Madsen, C. Martin, P. J. Moate, S. Muetzel, C. Muñoz, N. Peiren, J. M. Powell, C. K. Reynolds, A. Schwarm, K. J. Shingfield, T. M. Storlien, M. R. Weisbjerg, D. R. Yáñez-Ruiz, and Z. Yu. 2018. Symposi-

- um review: Uncertainties in enteric methane inventories, measurement techniques, and prediction models. *Journal of dairy science*. doi:10.3168/jds.2017-13536.
- Hristov, A. N., J. Oh, F. Giallongo, T. Frederick, M. T. Harper, H. Weeks, A. F. Branco, W. J. Price, P. J. Moate, M. H. Deighton, S. R. O. Williams, M. Kindermann, and S. Duval. 2016. Short communication: Comparison of the GreenFeed system with the sulfur hexafluoride tracer technique for measuring enteric methane emissions from dairy cows. *Journal of dairy science* 99(7):5461–5465. doi:10.3168/jds.2016-10897.
- Hristov, A. N., J. Oh, F. Giallongo, T. Frederick, H. Weeks, P. R. Zimmerman, M. T. Harper, R. A. Hristova, R. S. Zimmerman, and A. F. Branco. 2015a. The Use of an Automated System (GreenFeed) to Monitor Enteric Methane and Carbon Dioxide Emissions from Ruminant Animals. *Journal of visualized experiments JoVE*(103). doi:10.3791/52904.
- Hristov, A. N., J. Oh, F. Giallongo, T. W. Frederick, M. T. Harper, H. L. Weeks, A. F. Branco, P. J. Moate, M. H. Deighton, S. R. O. Williams, M. Kindermann, and S. Duval. 2015b. An inhibitor persistently decreased enteric methane emission from dairy cows with no negative effect on milk production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112(34):10663–10668. doi:10.1073/pnas.1504124112.
- Huhtanen, P., E. H. Cabezas-Garcia, S. Utsumi, and S. Zimmerman. 2015. Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions. *Journal of dairy science* 98(5):3394–3409. doi:10.3168/jds.2014-9118.
- Hüttmann, H., E. Stamer, W. Junge, G. Thaller, and E. Kalm. 2009. Analysis of feed intake and energy balance of high-yielding first lactating Holstein cows with fixed and random regression models. *Animal an international journal of animal bioscience* 3(2):181–188. doi:10.1017/S175173110800325X.
- Jain, S., A. Caforio, and A. J. M. Driessen. 2014. Biosynthesis of archaeal membrane ether lipids. *Frontiers in microbiology* 5:641. doi:10.3389/fmicb.2014.00641.
- Janssen, P. H., and M. Kirs. 2008. Structure of the archaeal community of the rumen. *Applied and environmental microbiology* 74(12):3619–3625. doi:10.1128/AEM.02812-07.
- Johnson, D. E., C. L. Ferrell, and T. G. Jenkins. 2003. The history of energetic efficiency research - Where have we been and where are we going?

- Johnson, K., M. Huyler, H. Westberg, B. Lamb, and P. Zimmerman. 1994. Measurement of methane emissions from ruminant livestock using a sulfur hexafluoride tracer technique. *Environmental science & technology* 28(2):359–362. doi:10.1021/es00051a025.
- Johnson, K. A., and D. E. Johnson. 1995. Methane Emissions from Cattle. *Journal of animal science*(73):2483–2492.
- Joo, H. S., P. M. Ndegwa, A. J. Heber, J.-Q. Ni, B. W. Bogan, J. C. Ramirez-Dorronsoro, and E. Cortus. 2015. Greenhouse gas emissions from naturally ventilated freestall dairy barns. *Atmospheric Environment* 102:384–392. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.11.067.
- Kandel, P. B., S. Vanderick, M.-L. Vanrobays, A. Vanlierde, F. Dehareng, E. Froidmont, H. Soyeurt, and N. Gengler. 2014. Consequences of Selection for Environmental Impact Traits in Dairy Cows. In: 10th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production., editor, Proceedings, Vancouver, BC, Canada.
- Kandel, P. B., M.-L. Vanrobays, A. Vanlierde, F. Dehareng, E. Froidmont, N. Gengler, and H. Soyeurt. 2017. Genetic parameters of mid-infrared methane predictions and their relationships with milk production traits in Holstein cattle. *Journal of dairy science* 100(7):5578–5591. doi:10.3168/jds.2016-11954.
- Kaske, M. 2010. Motorik des Magen-Darm-Kanals: Der Ruktus. In: W. von Engelhardt, editor, *Physiologie der Haustiere*. Enke, Stuttgart. p. 355.
- Knapp, J. R., G. L. Laur, P. A. Vadas, W. P. Weiss, and J. M. Tricarico. 2014. Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: quantifying the opportunities and impact of reducing emissions. *Journal of dairy science* 97(6):3231–3261. doi:10.3168/jds.2013-7234.
- Lassen, J., and P. Løvendahl. 2016. Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods. Nr. 83. *Journal of dairy science* 99(3):1959–1967. doi:10.3168/jds.2015-10012.
- Lassen, J., P. Løvendahl, and J. Madsen, editors. 2010. Experiences with Large Scale Individual Measurements of Methane Emission in Dairy Cattle using a Fourier Transform Infrared (FTIR) Measuring Unit, Leipzig, Germany.
- Lassen, J., P. Løvendahl, and J. Madsen. 2012. Accuracy of noninvasive breath methane measurements using Fourier transform infrared methods on individual cows. *Journal of dairy science* 95(2):890–898. doi:10.3168/jds.2011-4544.

- Lassey, K. R. 2007. Livestock methane emission: From the individual grazing animal through national inventories to the global methane cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* 142(2-4):120–132. doi:10.1016/j.agrformet.2006.03.028.
- Lin, L. I.-K. 1989. A Concordance Correlation Coefficient to Evaluate Reproducibility. *Biometrics* 45(1):255. doi:10.2307/2532051.
- Loeffler, K., and G. Gäbel. 2009. *Anatomie und Physiologie der Haustiere*. 12. Aufl. UTB M. UTB GmbH, Stuttgart.
- Madsen, J., B. S. Bjerg, T. Hvelplund, M. R. Weisbjerg, and P. Lund. 2010. Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. *Livestock Science* 129(1-3):223–227. doi:10.1016/j.livsci.2010.01.001.
- Manzanilla-Pech, C. I. V., R. F. Veerkamp, Calus, M P L, R. Zom, A. van Knegsel, J. E. Pryce, and Y. de Haas. 2014. Genetic parameters across lactation for feed intake, fat- and protein-corrected milk, and liveweight in first-parity Holstein cattle. *Journal of dairy science* 97(9):5851–5862. doi:10.3168/jds.2014-8165.
- Manzanilla-Pech, C. I. V., R. F. Veerkamp, Y. de Haas, M. P. L. Calus, and J. ten Napel. 2017. Accuracies of breeding values for dry matter intake using nongenotyped animals and predictor traits in different lactations. *Journal of dairy science* 100(11):9103–9114. doi:10.3168/jds.2017-12741.
- Marchi, M. de, V. Toffanin, M. Cassandro, and M. Penasa. 2014. Invited review: Mid-infrared spectroscopy as phenotyping tool for milk traits. *Journal of dairy science* 97(3):1171–1186. doi:10.3168/jds.2013-6799.
- Martens, H. 2010. Funktion der Vormägen: Mikrobielle Stoffwechselprozesse in den Vormägen. In: W. von Engelhardt, editor, *Physiologie der Haustiere*. Enke, Stuttgart. p. 388.
- Martens, H., and G. Breves. 2010. Physiologische Grenzen der Hochleistungskuh. In: W. von Engelhardt, editor, *Physiologie der Haustiere*. Enke, Stuttgart. p. 649–650.
- Martin, C., D. P. Morgavi, and M. Doreau. 2010. Methane mitigation in ruminants: from microbe to the farm scale. *Animal an international journal of animal bioscience* 4(3):351–365. doi:10.1017/S1751731109990620.

- Martin, O., and D. Sauvant. 2002. Metaanalysis of Input/Output Kinetics in Lactating Dairy Cows. *Journal of dairy science* 85(12):3363–3381. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74424-X.
- Mc Court, A., T. Yan, C. S. Mayne, and M. G. Porter. 2006. Prediction of methane output in beef cattle from indirect respiration calorimetry data. *International Congress Series* 1293:46–49. doi:10.1016/j.ics.2006.01.073.
- McAllister, T. A., and C. J. Newbold. 2008. Redirecting rumen fermentation to reduce methanogenesis. *Aust. J. Exp. Agric.* 48(2):7. doi:10.1071/EA07218.
- McCartney, C. A., I. D. Bull, T. Yan, and R. J. Dewhurst. 2013. Assessment of archaeol as a molecular proxy for methane production in cattle. *Journal of dairy science* 96(2):1211–1217. doi:10.3168/jds.2012-6042.
- McGinn, S. M., K. A. Beauchemin, T. Coates, and D. Colombatto. 2004. Methane emissions from beef cattle: Effects of monensin, sunflower oil, enzymes, yeast, and fumaric acid. *Journal of animal science* 82(11):3346. doi:10.2527/2004.82113346x.
- McGinn, S. M., K. A. Beauchemin, A. D. Iwaasa, and T. A. McAllister. 2006. Assessment of the sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer technique for measuring enteric methane emissions from cattle. *Journal of environmental quality* 35(5):1686–1691. doi:10.2134/jeq2006.0054.
- MILLER, T. L. and WOLIN, M. J. 1973. Formation of Hydrogen and Formate by *Ruminococcus albus*. *JOURNAL OF BACTERIOLOGY*(116):836–846.
- Moe, P. W., and H. F. Tyrrell. 1979. Methane Production in Dairy Cows. *Journal of dairy science* 62(10):1583–1586. doi:10.3168/jds.S0022-0302(79)83465-7.
- Monteny, G.-J., A. Bannink, and D. Chadwick. 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112(2-3):163–170. doi:10.1016/j.agee.2005.08.015.
- Morgavi, D. P., J.-P. Jouany, and C. Martin. 2008. Changes in methane emission and rumen fermentation parameters induced by refaunation in sheep. *Aust. J. Exp. Agric.* 48(2):69. doi:10.1071/EA07236.
- Moss, A. R., J.-P. Jouany, and J. Newbold. 2000. Methane production by ruminants: Its contribution to global warming. *Ann. Zootech.* 49(3):231–253. doi:10.1051/animres:2000119.

- Muñoz, C., T. Yan, D. A. Wills, S. Murray, and A. W. Gordon. 2012. Comparison of the sulfur hexafluoride tracer and respiration chamber techniques for estimating methane emissions and correction for rectum methane output from dairy cows. *Journal of dairy science* 95(6):3139–3148. doi:10.3168/jds.2011-4298.
- Murray, R. M., A. M. Bryant, and R. A. Leng. 1976. Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. *BJN* 36(01):1. doi:10.1079/BJN19760053.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, and H. Zhang. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, editor, Working Group I: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK & NY, USA. p. 731–733.
- Naumann, C., and R. Bassler. 2012. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. 3. Aufl. Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch) Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Hrsg. von Rolf Bassler ; Bd. 3,3. VDLUFA-Verl., Darmstadt.
- Negussie, E., Y. de Haas, F. Dehareng, R. J. Dewhurst, J. Dijkstra, N. Gengler, D. P. Morgavi, H. Soyeurt, S. van Gastelen, T. Yan, and F. Biscarini. 2017a. Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions. *Journal of dairy science* 100(4):2433–2453. doi:10.3168/jds.2016-12030.
- Negussie, E., J. Lehtinen, P. Mantysaari, A. R. Bayat, A.-E. Liinamo, E. A. Mantysaari, and M. H. Lidauer. 2017b. Non-invasive individual methane measurement in dairy cows. *Animal an international journal of animal bioscience* 11(5):890–899. doi:10.1017/S1751731116002718.
- Ngwabie, N. M. 2007. Volatile organic compound emission and other trace gases from selected animal buildings. *Landbauforschung Völkenrode*(3).
- Ngwabie, N. M., K.-H. Jeppsson, G. Gustafsson, and S. Nimmermark. 2011. Effects of animal activity and air temperature on methane and ammonia emissions from a naturally ventilated building for dairy cows. *Atmospheric Environment* 45(37):6760–6768. doi:10.1016/j.atmosenv.2011.08.027.

- Ngwabie, N. M., K.-H. Jeppsson, S. Nimmermark, C. Swensson, and G. Gustafsson. 2009. Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows. *Biosystems Engineering* 103(1):68–77. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.02.004.
- Nkrumah, J. D., E. K. Okine, G. W. Mathison, K. Schmid, C. Li, J. A. Basarab, M. A. Price, Z. Wang, and S. S. Moore. 2006. Relationships of feedlot feed efficiency, performance, and feeding behavior with metabolic rate, methane production, and energy partitioning in beef cattle. *Journal of animal science*(84):145–153.
- Patra, A. K. 2013. The effect of dietary fats on methane emissions, and its other effects on digestibility, rumen fermentation and lactation performance in cattle: A meta-analysis. *Livestock Science* 155(2-3):244–254. doi:10.1016/j.livsci.2013.05.023.
- Pedersen, S., V. Blanes-Vidal, H. Joergensen, A. Chwalibog, A. Haeussermann, M.J.W. Heetkamp, and A.J.A. Aarnink. 2008. Carbon Dioxide Production in Animal Houses: A literature review. *Agricultural Engineering International X(BC 08 008)*:19.
- Pederson, S., and K. Sällvik. 2002. 4th report of working group on climatization of animal houses: Heat and moisture production at animal and house levels. Reports / International Commission of Agricultural Engineering 4. Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark.
- Pickering, N. K., Chagunda, M G G, G. Banos, R. Mrode, J. C. McEwan, and E. Wall. 2015. Genetic parameters for predicted methane production and laser methane detector measurements. *Journal of animal science* 93(1):11–20. doi:10.2527/jas.2014-8302.
- Pinares-Patiño, C. S., K. R. Lassey, R. J. Martin, G. Molano, M. Fernandez, S. MacLean, E. Sandoval, D. Luo, and H. Clark. 2011. Assessment of the sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) tracer technique using respiration chambers for estimation of methane emissions from sheep. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:201–209. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.067.
- Pszczola, M., K. Rzewuska, S. Mucha, and T. Strabel. 2017. Heritability of methane emissions from dairy cows over a lactation measured on commercial farms. *Journal of animal science* 95(11):4813. doi:10.2527/jas2017.1842.

- Pszczola, M., T. Strabel, S. Mucha, and E. Sell-Kubiak. 2018. Genetic architecture of methane emissions from dairy cows. *Proceedings of the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production Challenges - Environmental*:477.
- Pszczola, M., M. P. L. Calus and T. Strabel. 2019. Short communication: Genetic correlations between methane and milk production, conformation, and functional traits. *Journal of dairy science* 102:5342-5346. Doi:10.3168/jds.2018-16066
- Reynolds, C. K., D. J. Humphries, P. Kirton, M. Kindermann, S. Duval, and W. Steinberg. 2014. Effects of 3-nitrooxypropanol on methane emission, digestion, and energy and nitrogen balance of lactating dairy cows. *Journal of dairy science* 97(6):3777–3789. doi:10.3168/jds.2013-7397.
- Ricci, P., Chagunda, M G G, J. Rooke, M Houdijk, J G, C.-A. Duthie, J. Hyslop, R. Roehe, and A. Waterhouse. 2014. Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers. *Journal of animal science* 92(11):5239–5250. doi:10.2527/jas.2014-7676.
- Rischewski, J., A. Bielak, G. Nürnberg, M. Derno, and B. Kuhla. 2017. Rapid Communication: Ranking dairy cows for methane emissions measured using respiration chamber or GreenFeed techniques during early, peak, and late lactation. *Journal of animal science* 95(7):3154. doi:10.2527/jas2017.1530.
- Robinson, D. L., S. L. Bickell, A. F. Toovey, D. K. Revel, and P. E. Vercoe. 2011. Factors affecting variability in feed intake of sheep with ad libitum access to feed and the relationship with daily methane production. *Proc. Assoc. Advmt. Anim. Breed. Genet.*(19):159–162.
- Robinson, D. L., J. P. Goopy, A. J. Donaldson, R. T. Woodgate, V. H. Oddy, and R. S. Hegarty. 2014a. Sire and liveweight affect feed intake and methane emissions of sheep confined in respiration chambers. *Animal an international journal of animal bioscience* 8(12):1935–1944. doi:10.1017/S1751731114001773.
- Robinson, D. L., J. P. Goopy, R. S. Hegarty, V. H. Oddy, A. N. Thompson, A. F. Toovey, C. A. Macleay, J. R. Briegal, R. T. Woodgate, A. J. Donaldson, and P. E. Vercoe. 2014b. Genetic and environmental variation in methane emissions of sheep at pasture. *Journal of animal science* 92(10):4349–4363. doi:10.2527/jas.2014-8042.

- Robinson, D. L., J. P. Goopy, R. S. Hegarty, and P. E. Vercoe. 2010. Repeatability animal and sire variation in 1-hr Methane Emissions & Relationships with Rumen Volatile Fatty Acid Concentrations. [https://www.researchgate.net/publication/265623155\\_Repeatability\\_Animal\\_and\\_Sire\\_Variation\\_in\\_1-hr\\_Methane\\_Emissions\\_Relationships\\_with\\_Rumen\\_Volatile\\_Fatty\\_Acid\\_Concentrations](https://www.researchgate.net/publication/265623155_Repeatability_Animal_and_Sire_Variation_in_1-hr_Methane_Emissions_Relationships_with_Rumen_Volatile_Fatty_Acid_Concentrations). (zugegriffen am 23. Juni 2017).
- Rooke, J. A., R. J. Wallace, C.-A. Duthie, N. McKain, de Souza, Shirley Motta, J. J. Hyslop, D. W. Ross, T. Waterhouse, and R. Roehe. 2014. Hydrogen and methane emissions from beef cattle and their rumen microbial community vary with diet, time after feeding and genotype. *The British journal of nutrition* 112(3):398–407. doi:10.1017/S0007114514000932.
- Scheman, M. 2010. Motorik des Magen-Darmkanals: Der Ruktus. In: W. von Engelhardt, editor, *Physiologie der Haustiere*. Enke, Stuttgart. p. 355–356.
- Schenkel, F. S., S. P. Miller, and J. W. Wilton. 2004. Genetic parameters and breed differences for feed efficiency, growth, and body composition traits of young beef bulls. *Can. J. Anim. Sci.* 84(2):177–185. doi:10.4141/A03-085.
- Schmidt-Nielsen, K. 2010. *Animal physiology: Adaptation and environment*. 11th printing. Cambridge University Press, Cambridge.
- Schwarm, A., M. Schweigel-Röntgen, M. Kreuzer, S. Ortmann, F. Gill, B. Kuhla, U. Meyer, M. Lohölter, and M. Derno. 2015. Methane emission, digestive characteristics and faecal archaeol in heifers fed diets based on silage from brown midrib maize as compared to conventional maize. *Archives of animal nutrition* 69(3):159–176. doi:10.1080/1745039X.2015.1043211.
- Silanikove, N. 2000. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livestock Production Science* 67(1-2):1–18. doi:10.1016/S0301-6226(00)00162-7.
- Sjaunja, L. O., L. Baevre, L. Junkkarinen, J. Pedersen, and J. Setälä. 1990. A Nordic proposal for an energy corrected milk (ECM) formula. In: Y. C. P. Gaillon, editor, *PERFORMANCE RECORDING OF ANIMALS: STATE OF THE ART*. PUDOC, Wageningen, Niederlande. p. 192.

- Smith, B. C. 2011. *Fundamentals of Fourier transform infrared spectroscopy*. 2. ed. CRC Press, Boca Raton.
- Sorg, D., G. F. Difford, S. Mühlbach, B. Kuhla, H. H. Swalve, J. Lassen, T. Strabel, and M. Pszczola. 2018. Comparison of a laser methane detector with the GreenFeed and two breath analysers for on-farm measurements of methane emissions from dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture* 153:285–294. doi:10.1016/j.compag.2018.08.024.
- Sorg, D., S. Mühlbach, J. Kecman, and H. H. Swalve. 2017a. Protocol for measuring CH<sub>4</sub> concentrations with the laser methane detector in the breath of cows. In: *Book of Abstracts of the 68th Annual Meeting of the European Federation of Animal Science: Tallinn, Estonia, 28 August - 1 September 2017, Tallinn, Estonia*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen. p. 200.
- Sorg, D., S. Mühlbach, F. Rosner, B. Kuhla, M. Derno, S. Meese, A. Schwarm, M. Kreuzer, and H. Swalve. 2017b. The agreement between two next-generation laser methane detectors and respiration chamber facilities in recording methane concentrations in the spent air produced by dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture* 143:262–272. doi:10.1016/j.compag.2017.10.024.
- Soyeurt, H., P. Dardenne, F. Dehareng, G. Lognay, D. Veselko, M. Marlier, C. Bertozzi, P. Mayeres, and N. Gengler. 2006. Estimating Fatty Acid Content in Cow Milk Using Mid-Infrared Spectrometry. *Journal of Environment Quality* 35(9):3690–3695. doi:10.3168/jds.S0022-0302(06)72409-2.
- Spiekers, H., H. Nußbaum, and V. Potthast. 2009. *Erfolgreiche Milchviehfütterung*. DLG-Verlag, Frankfurt (Main).
- Storm, Ida M. L. D., A. L. F. Hellwing, N. I. Nielsen, and J. Madsen. 2012. Methods for Measuring and Estimating Methane Emission from Ruminants. *Animals* 2(4):160–183. doi:10.3390/ani2020160.
- Tavendale, M. H., L. P. Meagher, D. Pacheco, N. Walker, G. T. Attwood, and S. Sivakumar. 2005. Methane production from in vitro rumen incubations with *Lotus pedunculatus* and *Medicago sativa*, and effects of extractable condensed tannin fractions on methanogenesis. *Animal Feed Science and Technology* 123-124:403–419. doi:10.1016/j.anifeedsci.2005.04.037.

- Thauer, R. K., A.-K. Kaster, H. Seedorf, W. Buckel, and R. Hedderich. 2008. Methanogenic archaea: ecologically relevant differences in energy conservation. *Nature reviews. Microbiology* 6(8):579–591. doi:10.1038/nrmicro1931.
- Tokyo Gas Engineering Solutions. 2006. Laser Methane Detector Operation Manual., Tokyo, Japan.
- Tomkins, N. W., S. M. McGinn, D. A. Turner, and E. Charmley. 2011. Comparison of open-circuit respiration chambers with a micrometeorological method for determining methane emissions from beef cattle grazing a tropical pasture. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:240–247. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.014.
- Troy, S. M., C.-A. Duthie, D. W. Ross, J. J. Hyslop, R. Roehe, A. Waterhouse, and J. A. Rooke. 2016. A comparison of methane emissions from beef cattle measured using methane hoods with those measured using respiration chambers. *Animal Feed Science and Technology* 211:227–240. doi:10.1016/j.anifeedsci.2015.12.005.
- Tukey, J. W. 1992. *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley series in behavioral science: quantitative methods. Addison-Wesley, Reading, Mass. u.a.
- VanRaden, P. M., C. P. van Tassell, G. R. Wiggans, T. S. Sonstegard, R. D. Schnabel, J. F. Taylor, and F. S. Schenkel. 2009. Invited Review: Reliability of genomic predictions for North American Holstein bulls. *Journal of dairy science* 92(1):16–24. doi:10.3168/jds.2008-1514.
- Veauthier, G. 2016. Betriebsaufgaben nehmen zu. <http://www.elite-magazin.de/news/Neue-Bundeslaender-Betriebsaufgaben-nehmen-zu-2656331.html>. (Accessed 21 January 2016).
- Veerkamp, R. F., and S. Brotherstone. 1997. Genetic correlations between linear type traits, food intake, live weight and condition score in Holstein Friesian dairy cattle. *Anim. Sci.* 64(03):385–392. doi:10.1017/S1357729800015976.
- Velazco, J. I., D. G. Mayer, S. Zimmerman, and R. S. Hegarty. 2016. Use of short-term breath measures to estimate daily methane production by cattle. *Animal an international journal of animal bioscience* 10(1):25–33. doi:10.1017/S1751731115001603.
- Veneman, J. B., S. Muetzel, K. J. Hart, C. L. Faulkner, J. M. Moorby, H. B. Perdok, and C. J. Newbold. 2015. Does Dietary Mitigation of Enteric Methane Production Affect Rumen

- Function and Animal Productivity in Dairy Cows? *PloS one* 10(10):e0140282. doi:10.1371/journal.pone.0140282.
- Visker, M. H.P.W., S. van Engelen, J. Dijkstra, J. A.M. van Arendonk, and H. Bovenhuis, editors. 2014. *Proceedings: Genetic Parameters for Methane Emissions of Dairy Cows Predicted Based on Milk Fatty Acids*, Vancouver, Canada.
- Vlaming, J. B., N. Lopez-Villalobos, I. M. Brookes, S. O. Hoskin, and H. Clark. 2008. Within- and between-animal variance in methane emissions in non-lactating dairy cows. *Aust. J. Exp. Agric.* 48(2):124. doi:10.1071/EA07278.
- Waghorn, G. C., and R. S. Hegarty. 2011. Lowering ruminant methane emissions through improved feed conversion efficiency. *Animal Feed Science and Technology* 166-167:291–301. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.019.
- Wall, E., G. Simm, and D. Moran. 2010. Developing breeding schemes to assist mitigation of greenhouse gas emissions. *Animal an international journal of animal bioscience* 4(3):366–376. doi:10.1017/S175173110999070X.
- Wensch-Dorendorf, M. 2015. *Erstellung einer Verwandtschaftsmatrix mittels Pythonskript*, Halle / Saale.
- West, J. W. 2003. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of dairy science* 86(6):2131–2144. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X.
- Wiegleb, G. 2016. *Gasmesstechnik in Theorie und Praxis: Messgeräte, Sensoren, Anwendungen*. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Williams, S.R.O., P. J. Moate, M. C. Hannah, B. E. Ribaux, W. J. Wales, and R. J. Eckard. 2011. Background matters with the SF6 tracer method for estimating enteric methane emissions from dairy cows: A critical evaluation of the SF6 procedure. *Animal Feed Science and Technology* 170(3-4):265–276. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.08.013.
- Williams, Y. J., S. Popovski, S. M. Rea, L. C. Skillman, A. F. Toovey, K. S. Northwood, and A.-D. G. Wright. 2009. A vaccine against rumen methanogens can alter the composition of archaeal populations. *Applied and environmental microbiology* 75(7):1860–1866. doi:10.1128/AEM.02453-08.
- Wright, A. D. G., P. Kennedy, C. J. O'Neill, A. F. Toovey, S. Popovski, S. M. Rea, C. L. Pimm, and L. Klein. 2004. Reducing methane emissions in sheep by immunization

- against rumen methanogens. *Vaccine* 22(29-30):3976–3985. doi:10.1016/j.vaccine.2004.03.053.
- Wu, L., P. W.G. Groot Koerkamp, and N. W.M. Ogink. 2016. Temporal and spatial variation of methane concentrations around lying cubicles in dairy barns. *Biosystems Engineering* 151:464–478. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.10.016.
- Wu, W., G. Zhang, and P. Kai. 2012. Ammonia and methane emissions from two naturally ventilated dairy cattle buildings and the influence of climatic factors on ammonia emissions. *Atmospheric Environment* 61:232–243. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.07.050.
- Yan, T., R.E. Agnew, F.J. Gordon, and M.G. Porter. 2000. Prediction of methane energy output in dairy and beef cattle offered grass silage-based diets. *Livestock Production Science* 64(2-3):253–263. doi:10.1016/S0301-6226(99)00145-1.
- Yan, T., C. S. Mayne, F. G. Gordon, M. G. Porter, R. E. Agnew, D. C. Patterson, C. P. Ferris, and D. J. Kilpatrick. 2010. Mitigation of enteric methane emissions through improving efficiency of energy utilization and productivity in lactating dairy cows. *Journal of dairy science* 93(6):2630–2638. doi:10.3168/jds.2009-2929.
- Yan, T., C. S. Mayne, and M. G. Porter. 2006. Effects of dietary and animal factors on methane production in dairy cows offered grass silage-based diets. *International Congress Series* 1293:123–126. doi:10.1016/j.ics.2006.02.024.
- Zetouni, L., M. Henryon, M. Kargo, and J. Lassen. 2017. Direct multitrait selection realizes the highest genetic response for ratio traits. *Journal of animal science* 95(5):1921. doi:10.2527/jas.2016.1324.
- Zetouni, L., M. Kargo, E. Norberg, and J. Lassen. 2018. Genetic correlations between methane production and fertility, health, and body type traits in Danish Holstein cows. *Journal of dairy science* 101(3):2273–2280. doi:10.3168/jds.2017-13402.

## VI. Anhang

**Tabelle A-1: Eingesetzte Futtermittel auf den Praxisbetrieben (PB)**

	<b>PB 1</b>	<b>PB 2</b>	<b>PB 3</b>	
<b>Grund- futter</b>	Grassilage	Grassilage	Gras- und Luzernesilage	
	Maissilage	Maissilage	Maissilage	
	Gerstenstroh	Gerstenstroh	Heu	
<b>Kraft- futter</b>	Rapsschrot	Rapsextraktionsschrot / Rap- sexpeller	Rapsextraktionsschrot	
	Sojaextraktionsschrot	Sojaschrot	Sojaextraktionsschrot/ Ackerbohnen- schrot/ Sojabohne getoastet	
	Milchleistungsfutter	Körnermais	Lieschkolbenschrot	
	Trockenschnitzel	Trockenschnitzel (z.T. melas- siert)	Pressschnitzel	
	Mineralfutter	Mineralfutter	Mineralfutter	Mineralfutter
			Zuckerrübenmus	Biertreber
		Zuckerrübenmelasse	Zuckerrübenmelasse	
		Roggen	Gerstenschrot / Lupitherm-Schrot	
		Glycerin	Futterfett	
		Roggen-GPS		

Tabelle A-2: Eigesetzte Futtermittel auf den Versuchsbetrieben (VB)

	VB 1	VB 2	VB 3	VB 4
<b>Grundfutter</b>	Grassilage	Grassilage	Grassilage	Grassilage
	Maissilage	Maissilage	Maissilage	Maissilage
	Stroh	Stroh	Stroh	Stroh
		Heu		
	Körnermais	Maisschrot	Mais	Mais
	Rapsextraktionsschrot	Rapsextraktionsschrot	Rapsextraktionsschrot	Rapsschrot
	Rapsfett	Sojaextraktionsschrot	Sonnenblumenschrot	Sojaöl
	Trockenschnitzel		Melasseschnitzel, Melasse	Trockenschnitzel
<b>Kraftfutter</b>		Weizen	Weizen	Weizen
	Mischfutter	Milchleistungsfutter	Propylenglycol, Glycerin	Gerste
	Mineralfutter		Mineralfutter, Harnstoff, Aminosäuren	Vitamine, Calcium, Harnstoff
			Weizengrieskleie, Weizenkleberfutter	
			Vinasse	
		pansengeschütztes Fett		

Tabelle A-3: Ergebnisse der Futtermittelanalyse der durchschnittlichen Rationen auf den Praxisbetrieben (PB)

Betrieb	PB1	PB2	PB3
<b>Trockenmasse (g/kg)</b>	447	453	457
<b>Nährstoffe (g/kg DM)</b>			
<b>Rohprotein</b>	159	200	162
<b>nXP<sup>1</sup></b>	156	188	156
<b>Rohfaser</b>	167	177	172
<b>Energie (MJ /kg DM)</b>			
<b>NEL<sup>2</sup></b>	6,5	8,0	6,8

<sup>1</sup> nXP = nutzbares Rohprotein am Duodenum; <sup>2</sup> NEL = Netto-Energie-Laktation

Tabelle A-4: Ergebnisse der Futtermittelanalyse der durchschnittlichen Rationen auf den Versuchsbetrieben (VB)

Betrieb	VB1	VB2	VB3	VB4
<b>Trockenmasse (g/kg)</b>	462	k.A. <sup>1</sup>	691	448
<b>Nährstoffe (g/kg DM)</b>				
<b>Rohasche</b>	61	71	76	66
<b>Rohprotein</b>	150	175	140	156
<b>Rohfaser</b>	189	157	218	151
<b>NDF<sup>2</sup></b>	353	375	k.A.	314
<b>ADF<sup>3</sup></b>	224	216	k.A.	191
<b>Energie (MJ /kg DM)</b>				
<b>NEL<sup>4</sup></b>	7,7	6,9	6,4	7,4
<b>ME<sup>5</sup></b>	12,4	11,3	10,6	11,9

<sup>1</sup> k.A. = keine Angaben; <sup>2</sup> NDF = neutrale Detergenz-Faser; <sup>3</sup> ADF = saure Detergenz-Faser; <sup>4</sup> NEL = Netto-Energie-Laktation; <sup>5</sup> ME = umsetzbare Energie

## Danksagung

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. H.H. Swalve. Durch sein Vertrauen und die durch ihn erbrachte Möglichkeit an dem Projekt „optiKuh“ mitarbeiten und promovieren zu können, konnte ich tiefe Einblicke in das wissenschaftliche Arbeiten erlangen und vielfältige Erfahrungen sammeln.

Besonders möchte ich mich bei Frau Dr. Diana Sorg bedanken. Als Mentorin wurde ich durch sie intensiv betreut, wobei sie mir stets mit Rat und konstruktiver Kritik zur Seite stand. Auf den vielen Dienstreisen war ich sehr froh über ihre Erfahrungen und freundliche Gesellschaft.

Ein weiterer Dank geht an alle weiteren Doktoranden und Kollegen in der Arbeitsgruppe Tierzucht. Gemeinsam erlebten wir viele schöne Momente, wobei auch intensive Gespräche und Anregungen zu Problemlösungen nicht zu kurz kamen. Großer Dank gilt meinem Methanteam. Nur mit dessen Hilfe war es möglich, so viele Betriebsbesuche durchzuführen und bei annähernd 1.000 Tieren die CH<sub>4</sub>-Emissionen zu messen.

Ebenso möchte ich mich bei den Leitern und Mitarbeitern der Versuchs- und Praxisbetriebe bedanken, ohne die der Versuch nicht hätte stattfinden können und die uns stets bei der Durchführung der Datenerhebung unterstützten. Für die gute Kooperation bedanke ich mich zudem recht herzlich bei der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt und der Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern.

Für die finanzielle Ermöglichung des Projektes „optiKuh“ danke ich dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über den Projektträger Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Zudem gebührt der EU-Cost-Action „METHAGENE“ großer Dank, da dieses Netzwerk Möglichkeiten bot, Grundlagen zur Methanentstehung zu lernen, Probleme zu erkennen und Lösungsansätze zu diskutieren. Dabei lernte ich exzellente Wissenschaftler kennen und knüpfte neue internationale Freundschaften.

Mein Dank geht zudem an Frau Anne Thomas und Frau Stephanie Rochow für ihr Korrekturlesen und das Lektorat. Ein besonderer Dank geht an Frau Dr. Jelena Kecman, die ebenfalls ihre Expertise mit in diese Arbeit einbrachte und mich für ein halbes Jahr in ihrer Wohnung beherbergte.

Abschließend möchte ich mich für die große Unterstützung, die ich von meiner Familie und meinen Freunden erhielt, bedanken. Insbesondere die Geduld und Motivation meines Mannes Martin gaben mir in zähen Zeiten Kraft und Antrieb. Meinen Eltern sei gedankt, da ihre Förderung und ihr Vertrauen mir erst die Grundlagen und die Möglichkeit zur Promotion boten.

### **Eidesstattliche Erklärung / *Declaration under Oath***

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

*I declare under penalty of perjury that this thesis is my own work entirely and has been written without any help from other people. I used only the sources mentioned and included all the citations correctly both in word or content.*

---

Datum / *Date*

---

Unterschrift des Antragstellers /  
*Signature of the applicant*

## Lebenslauf

### persönliche Daten

Name: Mühlbach, M. Sc. Sarah  
geboren: 14.08.1988 in Zeitz  
Geschlecht: weiblich  
Staatsangehörigkeit: deutsch

### Ausbildung & Studium

02/2015 – 03/2018 Promotion am Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Professur für Tierzucht, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

10/2009 - 12/2014 Bachelor- und Masterstudium der Agrarwissenschaft am Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Vertiefung Nutztierwissenschaften

Abschluss: B. Sc. und M. Sc.:

Ich erkläre hiermit, dass keine Vorstrafen gegen mich vorliegen und kein Ermittlungsverfahren eingeleitet ist. Weiterhin wurden keine weiteren vergeblichen Promotionsversuche unternommen und diese Dissertation wurde nicht in der gegenwärtigen bzw. in einer anderen Fassung bereits einer anderen Fakultät vorgelegt.

\_\_\_\_\_  
Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des Antragstellers