JESSICA REINTKE

Energiebilanzen von Mutterschafen im *prä-* und *postpartalen* Zeitraum in Bezug zur Aufzuchtleistung von Lämmern

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Grades eines
Dr. med. vet.
beim Fachbereich Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.

Die rechtliche Verantwortung für den gesamten Inhalt dieses Buches liegt ausschließlich bei dem Autoren dieses Werkes.

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung der Autoren oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2020

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Authors or the Publisher.

1st Edition 2020

© 2020 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen
Printed in Germany

édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

STAUFENBERGRING 15, 35396 GIESSEN, GERMANY
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890
email: redaktion@doktorverlag.de

www.doktorverlag.de

Aus dem Institut für Tierzucht und Haustiergenetik
Professur für Tierzüchtung
der Justus-Liebig-Universität Gießen

und dem

Klinikum Veterinärmedizin, Klinik für Geburtshilfe, Gynäkologie und Andrologie der
Groß- und Kleintiere mit tierärztlicher Ambulanz
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Energiebilanzen von Mutterschafen im *prä*- und *postpartalen* Zeitraum in Bezug zur Aufzuchtleistung von Lämmern

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines Dr. med. vet.

beim Fachbereich Veterinärmedizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von

Jessica Reintke

Tierärztin aus Remscheid

Gießen, 2020

Mit Genehmigung des Fachbereichs Veterinärmedizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

Prof. Dr. h.c. Martin Kramer

Dekan

Prof. Dr. Sven König

1. Gutachter

Prof. Dr. Axel Wehrend

2. Gutachter

02.Oktober 2020

Tag der Disputation

Diese Arbeit wurde durch ein Promotionsstipendium der H. Wilhelm Schaumann Stiftung gefördert.

If you can dream it – you can do it.

Walt Disney

In Liebe meiner Familie und meinen Freunden gewidmet

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS I

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS III

KAPITEL 1 1

1 Einleitung 1

1.1 Schafrassen 2
1.1.1 Merinolandschaf 2
1.1.2 Rhönschaf 3
1.1.3 Coburger Fuchsschaf 4
1.2 Leistungsprüfungen und Zuchtwertschätzung in der deutschen Schafzucht 5
1.3 Energiestoffwechsel während Trächtigkeit und Laktation 6
1.3.1 Definition der maternalen Energiebilanz 7
1.3.2 Laktogenese 8
1.3.3 Galaktopoese 8
1.3.4 Negative Energiebilanz und metabolische Anpassungsstrategien 9
1.4 Methanemissionen beim Wiederkäuer 10
1.4.1 Methanogenese 10
1.4.2 Messverfahren 11
1.4.3 Beispiele für Methanmerkmalsdefinitionen und Möglichkeiten der Zucht auf einen verringerten Methanausstoß 14
1.5 Maternale Körperkonditionsmerkmale als Indikatoren für den Energiestoffwechsel 16
1.5.1 Körpergewicht und Body Condition Score 16
1.5.2 Rückenfett- und Rückenmuskeldicke 18
1.5.3 Zucht auf maternale Körperkonditionsmerkmale 19
1.6 Maternale Mengen- und Spurenelementversorgung 20
1.6.1 Indikatoren der Mineralstoffversorgung und des Stoffwechsels in der Tierzucht 24
1.7 Ziele der Arbeit 25
Referenzen 27

KAPITEL 2 38

Phenotypic relationships between maternal energy metabolism and lamb body weight development during lactation for pure- and crossbred sheep populations in low and high input production systems 38

KAPITEL 3 ..... **49**

Assessment of methane emission traits in ewes using a laser methane detector: genetic parameters and impact on lamb weaning performance **49**

KAPITEL 4 ..... **61**

Associations between minerals and metabolic indicators in maternal blood *pre*- and *postpartum* with ewe body condition, methane emissions, and lamb body weight development **61**

KAPITEL 5 ..... **93**

5 Diskussion **93**

5.1 Genetisch-statistische Modellierungsansätze für maternale Energiebilanzmerkmale unter Berücksichtigung von Genotyp-Umwelt-Interaktion 94

5.2 Beziehungen zwischen maternalen Körperkonditionsmerkmalen und dem Lammgewicht auf phänotypischer und genetischer Ebene 97

5.3 Zusammenhänge zwischen der maternalen Energiebilanz, dem Methanausstoß und dem ruminalen Mikrobiom 103

5.4 Methanemissionsmessung als Annäherung an die individuelle Futteraufnahme 107

5.5 Internationale Beispiele für Monitoringprogramme bei Mutterschafen hinsichtlich der Mineralstoffversorgung und des Energiestoffwechsels 108

5.6 Herausforderungen bezüglich der Phänotypisierung von Gesundheitsmerkmalen 111

5.7 Potential zur Integration von Merkmalen der Energiebilanz in der Schafzucht 113

Referenzen 116

Zusammenfassung **128**

Summary **133**

Erklärung **137**

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3DG	Daily gain (tägliche Zunahme) zwischen Geburt und Woche 3
3WW	3-weeks-weight (3-Wochen-Gewicht)
6DG	Daily gain (tägliche Zunahme) zwischen Woche 3 und 6
6WW	6-weeks-weight (6-Wochen-Gewicht)
9DG	Daily gain (tägliche Zunahme) zwischen Woche 6 und 9
9WW	9-weeks-weight (9-Wochen-Gewicht)
12DG	Daily gain (tägliche Zunahme) zwischen Woche 9 und 12
12WW	12-weeks-weight (12-Wochen-Gewicht)
AIC	Akaike Information Criterion
BCS	Body Condition Score
BFT	Backfat thickness (Rückenfettdicke)
BHB	ß-Hydroxybutyrat
BLUP	Best Linear Unbiased Prediction
BMT	Backmuscle thickness (Rückenmuskeldicke)
BW	Birth weight (Geburtsgewicht)
CB	Crossbreed (Kreuzungstier)
CF	Coburger Fuchsschaf
CF (Kapitel 3, 4)	Crude fibre (Rohfaser)
CH_4	Methanemission
CH_{4e}	Mean methane concentration during eructation (mittlere Methankonzentration während des Ruktus)
CH_{4emax}	Maximum methane concentration during eructation (maximale Methankonzentration während des Ruktus)
CH_{4esum}	Sum of methane concentrations per minute during eructation (Summe der Methankonzentrationen pro Minute während des Ruktus)

CH_{4event}	Number of eructation events per minute (Anzahl der Ruktusevents pro Minute)
CH_{4r}	Mean methane concentration during respiration (mittlere Methankonzentration während der Respiration)
CH_{4r+e}	Mean methane concentration during respiration and eructation (mittlere Methankonzentration während Respiration und Ruktus)
CH_{4rmax}	Maximum methane concentration during respiration (maximale Methankonzentration während der Respiration)
CH_{4rsum}	Sum of methane concentrations per minute during respiration (Summe der Methankonzentrationen pro Minute während der Respiration)
CP	Crude protein (Rohprotein)
DHHPS	Dairy Herd Health and Productivity Service
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DM	Dry matter (Trockenmasse)
DMI	Dry matter intake (Trockenmasseaufnahme)
EBV	Estimated breeding value (geschätzter Zuchtwert)
EBW	Ewe body weight (Mutterschafgewicht)
EE	Ether extract
Eq.	Equation (Gleichung)
GLDH	Glutamatdehydrogenase
GWAS	Genome-wide association study
ICAR	International Committee for Animal Recording
LMD	Lasermethandetektor
ME	Metabolische Energie
MIR	Mid-infrared Spektroskopie
ML	Merinolandschaf
NEFA	Non esterified fatty acids
PAC	Portable accumulation chamber

r_g	Genetische Korrelation
RH	Rhönschaf
RRM	Random Regressions-Methode
SD	Standard deviation (Standardabweichung)
SE	Standard error (Standardfehler)
SNP	Single nucleotide polymorphism
VDL	Vereinigung Deutscher Landesschafzuchtverbände e.V.
VFA	Volatile fatty acids
VLDL	Very low density lipoprotein
WDG	Daily gain (tägliche Zunahme) von Woche 6 (high input) bzw. Woche 12 (low input) bis zum Absetzen
WL	Weight loss (Gewichtsverlust)
WW	Weaning weight (Absetzgewicht)

KAPITEL 1

1 Einleitung

Mit einer Gesamtzahl von 1,6 Millionen Schafen spielt die Schafhaltung in Deutschland im europaweiten Vergleich eher eine untergeordnete Rolle, anders als beispielsweise im Vereinigten Königreich (21,8 Millionen Schafe) oder in Spanien (15,4 Millionen Schafe) (Eurostat, 2020). Unbestritten ist jedoch die langjährige Tradition der Schäferei in Deutschland sowie ihre Bedeutung für verschiedenste landwirtschaftliche Nutzungszweige. Schafe leisten nicht nur einen wichtigen Beitrag zur Deichpflege sowie zur Erhaltung von einzigartigen Kulturlandschaften wie der Lüneburger Heide, sondern ermöglichen auch eine Nutzung und Offenhaltung von Grenzertragsflächen.

Bezüglich der Erzeugung tierischer Produkte steht neben der Gewinnung von Milch und Wolle die Lammfleischproduktion als Haupteinnahmequelle im Vordergrund. Im Jahre 2018 wurden zu den knapp 4000 Tonnen des in Deutschland produzierten Schaffleisches (Statista, 2020a) insgesamt etwa 54000 Tonnen Schaf- und Ziegenfleisch importiert (Statista, 2020b) um den jährlichen Pro-Kopf-Verbrauch von etwa 1 kg sicherzustellen (Statista, 2020c). Dabei lag der Erlös für Lammfleisch bei 5,31 € pro kg Schlachtgewicht (LEL *et al.*, 2020). Dies entspricht in etwa 2,66 € pro kg Lebendgewicht (Ausschlachtungsgrad 50 %). Die Produktionskosten je Mutterschaf belaufen sich aber im Schnitt auf 200 € pro Jahr und somit läge ein vollkostendeckender Lammpreis bei etwa 4,65 € pro kg Lebendgewicht (LEL, 2015).

Trotz staatlicher Subventionierungsprogramme ist die wirtschaftliche Situation der deutschen Schäfer somit als schwierig zu bewerten und besonders die Kosten für Futtermittel nehmen einen Großteil der anfallenden Fixkosten ein. Im Bundesland Hessen gibt es aktuell lediglich noch 100 Haupterwerbsbetriebe unter insgesamt 5500 Schafhaltungen (LLH, 2020). Eine Steigerung der Futtereffizienz der Muttertiere durch züchterische Maßnahmen könnte langfristig Futterkosten senken und bei einer damit verbundenen verbesserten Aufzuchtleistung der Lämmer wären gleichzeitig höhere Einnahmen möglich. Eine Kombination beider Aspekte könnte somit einen wichtigen Beitrag zur Stärkung der Wirtschaftskraft der Schäferei in Deutschland leisten. Darüber hinaus wird die intensive Schafhaltung immer mehr von der extensiven Weidehaltung

abgelöst. Insbesondere in extensiven Systemen müssen Mutterschafe in der Lage sein das Grundfutter optimal zu verwerten und sich ständig wechselnden Gegebenheiten anzupassen (Macé *et al.*, 2018).

1.1 Schafrassen

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Schafrassen vorgestellt und der aktuelle Schwerpunkt der entsprechenden Zuchtprogramme bzw. Leistungsprüfungen dargestellt. Es wurden eine typische Wirtschaftsrasse am Beispiel des Merinolandschafs (ML) sowie zwei Vertreter typischer Landschafrassen, das Rhönschaf (RH) und das Coburger Fuchsschaf (CF), in die Analysen miteinbezogen, um die rassespezifischen Unterschiede und Vorzüge hervorzuheben.

1.1.1 Merinolandschaf

Das ML (**Abbildung 1**) gehört zu einer der bedeutendsten Wirtschaftsschafrassen in Deutschland. Diese Rasse entstand im 19. Jahrhundert durch Veredelungskreuzung aus den bodenständigen Rassen Zaupelschaf und Niederrheinisches Marschschaf mit feinwolligen Merinoschafen aus Frankreich und Spanien.

Abbildung 1. Merinolandschafe.

Merinolandschafe eignen sich durch ihre Marschfähigkeit sehr gut zur Hütehaltung, besitzen eine sehr gute Fruchtbarkeit (asaisonale Brunst), eine gute Säugeleistung und gute Muttereigenschaften (Fischer, 2003). Die Mutterschafe dieser Rasse erreichen ein Körpergewicht zwischen 75 und 115 kg. Die Altböcke erreichen ein Gewicht

zwischen 120 und 160 kg. Die Lämmer sind frohwüchsig und zeigen eine gute Mastleistung (400–500 g tägliche Zunahme) bei guter Futterverwertung. Die reinweiße Wolle ist sehr fein (26–28 Mikron) (Hessischer Verband für Schafzucht e.V., 2019a). Die Gewichtungen der Einzelmerkmale (**Tabelle 1**) zeigen, dass der Fokus der Zucht bei dieser Rasse aktuell auf der Fleischleistung, auf der Futterverwertung (Metabolische Energie (ME) in MJ pro kg täglicher Zunahme), aber auch auf der Mütterlichkeit (42-Tage-Lammgewicht) liegt.

Tabelle 1. Gewichtung (in %) der Einzelzuchtwerte zur Berechnung des Gesamtzuchtwertes für die Rassen Merinoland-, Rhön- und Coburger Fuchsschaf.

Merkmal[1]	Rasse		
	Merinolandschaf	Rhönschaf	Coburger Fuchsschaf
Reproduktion	10,0	20,0	20,0
Wollqualität	7,5	15,0	10,0
Bemuskelung	7,5	20,0	20,0
Äußere Erscheinung	20,0	25,0	25,0
Tägliche Zunahme	10,0	20,0	25,0
Futterverwertung	15,0	0,0	-
Fleischigkeit	12,5	0,0	-
Verfettung	12,5	0,0	-
Mütterlichkeit	5,0	-	-

[1]Hessischer Verband für Schafzucht und -haltung e.V., 2019a, 2019b, 2019c

1.1.2 Rhönschaf

Das RH (**Abbildung 2**) hat seinen Ursprung in der Rhön und gehört zur Gruppe der Landschafe. Noch heute wird diese Rasse besonders in Mittelgebirgslagen gehalten. Mit Ausnahme des typischen schwarzen, hornlosen Kopfes ist sein Körper reinweiß. Auch diese Rasse zeigt eine gute Marschfähigkeit, harte Klauen, einen geringen Futteranspruch und gute Fruchtbarkeit (asaisonale Brunst). Ihre Schlichtwolle weist eine Feinheit im Bereich von 33–36 Mikron auf (Fischer, 2003). Mutterschafe erreichen ein

Körpergewicht zwischen 60 und 85 kg, Altböcke zwischen 85 und 105 kg. Die Lämmer erreichen eine tägliche Zunahme zwischen 250 und 300 g (Hessischer Verband für Schafzucht e.V., 2019b). Im Gegensatz zu ML liegt der züchterische Schwerpunkt bei dieser Rasse auf den Merkmalen Reproduktion, äußere Erscheinung, tägliche Zunahme sowie Bemuskelung (**Tabelle 1**). Der Bereich Futterverwertung unterliegt bei RH keiner besonderen Gewichtung und das Merkmal Mütterlichkeit wird bei dieser Rasse nicht erhoben.

Abbildung 2. Rhönschaf (Wikipedia, 2020).

1.1.3 Coburger Fuchsschaf

Das CF (**Abbildung 3**) wurde erstmals 1868 erwähnt. Wie auch bei anderen Landschafrassen, nahm die Zahl an CF in den zwanziger und dreißiger Jahren aufgrund steigender wirtschaftlicher Interessen ab. Nach 1945 wurden Böcke der Rassen Welsh Mountain, Solognote und Texel eingekreuzt, was zu einer erhöhten Lebendmasse der CF von knapp 60 kg führte. Seit 1966 ist die Rasse CF von der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) anerkannt. Coburger Fuchsschafe besitzen einen schmalen, hornlosen Kopf von goldener bis rotbrauner Farbe (Goldfuchs oder Rotfuchs). Der Körper ist mittellang, die Beine sind unbewollt und von gleicher Farbe wie der Kopf. Häufig ist auch ein Aalstrich entlang der Rückenlinie zu beobachten. Die Zucht ist auf Widerstandsfähigkeit, Genügsamkeit und auf die Eignung zur Koppel- bzw. Hütehaltung in Mittelgebirgslagen ausgerichtet. Diese Rasse zeigt saisonales Brunstverhalten.

Ihre Schlichtwolle erreicht Werte zwischen 33 und 36 Mikron (Fischer, 2003). Mutterschafe erreichen Körpergewichte zwischen 60 und 85 kg, Altböcke zwischen 85 bis 105 kg. Die Lämmer zeigen eine tägliche Zunahme von 250 bis 300 g (Hessischer Verband für Schafzucht e.V., 2019c).

Abbildung 3. Coburger Fuchsschaf (Krahl, 2014).

1.2 Leistungsprüfungen und Zuchtwertschätzung in der deutschen Schafzucht

Leistungsprüfungen sind die Basis für den Zuchtfortschritt und somit gerade für Herdbuchzuchtbetriebe unerlässlich. Die Vereinigung Deutscher Landesschafzuchtverbände e.V. (VDL) koordiniert die Festlegung der Zuchtziele sowie die Leistungsprüfungen im Feld und auf Station. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen für die Zuchtarbeit bilden u.a. die Verordnung (EU) 2016/1012, das Tierzuchtgesetz (TierZG) von 2019 und die Verordnung über die Leistungsprüfungen und die Zuchtwertfeststellung bei Schafen und Ziegen (Schaf/ZiegeZLpV). Letztere sieht vor, dass für die Zuchtwertfeststellung je nach Zuchtrichtung die Zuchtwerte im Bereich Fleisch- bzw. Milchleistung, Wollqualität und Zuchtleistung berücksichtigt werden. Zusätzlich können die äußere Erscheinung sowie die Eignung zur Landschaftspflege eine Rolle spielen. Seit 2014 werden die Zuchtwerte im Auftrag des VDL durch die Vereinigten Informationssysteme Tierhaltung w. V. (vit) im BLUP (best linear unbiased predicition) Verfahren geschätzt.

Die Datengrundlage bildet das digitale Herdbuchsystem serv.it OVICAP. Die Umstellung auf das BLUP-System erlaubt nun mit Hilfe von statistischen Modellen die Korrektur der phänotypischen Leistung auf Umwelteffekte wie z.B. den Betriebseffekt, das Alter des Tieres, die Saison und die Gewichtung dieser korrigierten Phänotypen zur Zuchtwertschätzung in einem einzigen Schritt. Ökonomische Gewichtungen beeinflussen die Modelle nicht. Es werden aber weiterhin alle Leistungen innerhalb des Merkmals und die genetisch korrelierten Merkmale berücksichtigt. Darüber hinaus liegt den statistischen Modellen eine Verwandtschaftsmatrix zugrunde, welche alle verfügbaren Verwandtschaftsleistungen enthält. In aktuellen Leistungsprüfungen für die in dieser Arbeit betrachteten Schafrassen werden Merkmale wie die Futterverwertung oder die Rückenfett- bzw. Rückenmuskeldicke nur bei Mastlämmern im Rahmen der Fleischleistungsprüfung erfasst. Maternale Merkmale wie die Mütterlichkeit bzw. die Säugeleistung (indirekt bestimmt über das 42-Tage-Gewicht der Lämmer) werden standardmäßig nur bei wenigen Rassen in der Zuchtleistungsprüfung beurteilt und z.B. bei der Rasse ML nur mit 5 % des Gesamtzuchtwertes berücksichtigt (**Tabelle 1**). Dabei können Merkmale wie die oben genannten einen umfassenderen Eindruck der Energiebilanz des Mutterschafes widerspiegeln und eine Selektion auf diese Merkmale Futterkosten reduzieren sowie die Fruchtbarkeit und die Gesundheit der Tiere verbessern. Bei Wirtschaftsrassen lag der züchterische Fokus bisher stark auf der Fruchtbarkeit, bei Landschafrassen auf der Marschfähigkeit. In beiden Fällen könnte sich aber eine Integration von Futtereffizienz- sowie Gesundheitsmerkmalen in Zuchtprogrammen für den Schäfer rentieren (Ellison *et al.*, 2017; Banos *et al.*, 2019).

1.3 Energiestoffwechsel während Trächtigkeit und Laktation

Eine adäquate Energieversorgung, des Mutterschafes bildet die Basis für die fetale Entwicklung während der Trächtigkeit (besonders zwischen dem 100. und 150. Trächtigkeitstag) sowie für die spätere Milchleistung während der Laktation und die damit verbundene Gewichtsentwicklung des Lammes. Die Richtwerte für die Energieversorgung von Mutterschafen mit einem Körpergewicht von 85 kg und einer Trockenmasseaufnahme von 1940 g/Tag liegen bei 18,3 MJ ME/Tag in der Hochträchtigkeit bzw. bei 28 MJ ME/Tag für ein Schaf gleichen Gewichts mit einer Trockenmasseaufnahme von 2580 g/Tag und zwei säugenden Lämmern (LfL, 2020). Gerade im letzten Drittel der Trächtigkeit findet der größte Teil des fetalen Größen- und Längenwachstums statt

(Fthenakis *et al.*, 2012; Bostedt, 2019a). Der tägliche Bedarf des Fetus an Glucose liegt in dieser Phase bei 30–40 g und beläuft sich somit auf 40 % des maternalen Glucoseumsatzes. Doch mit zunehmendem Volumen des graviden Uterus ist eine gleichzeitige Verdrängung des Pansens verbunden, also eine Reduktion der Futteraufnahmekapazität des Mutterschafes, insbesondere bei Mehrlingsträchtigkeiten. Um den gesteigerten Energie- und Nährstoffbedarf in dieser Phase zu decken und gefährlichen Stoffwechselentgleisungen (z. B. Gestationsketose) vorzubeugen, müssen dem Muttertier ausreichend körpereigene Energiereserven (z. B. Fettdepots) zur Verfügung stehen. Ergänzend sollten Futtermittel mit erhöhtem Gehalt an leichtverdaulichen Kohlenhydraten eingesetzt werden, die auch in geringer Menge genügend Energie zur Verfügung stellen (Bostedt, 2019a). Gleichzeitig bildet die Energieversorgung im letzten Trächtigkeitsdrittel die Basis für die maternale Kolostrum- und Milchbildung während der Laktation (Fthenakis *et al.*, 2012) und auch für die *postnatale* Lammgewichtsentwicklung (lamb body weight, LBW) (Neville *et al.*, 2010).

1.3.1 Definition der maternalen Energiebilanz

Der Begriff der Energiebilanz dient zur quantitativen Beurteilung des Energieumsatzes bzw. des Energiezustandes eines Tieres. Der Energieumsatz setzt sich zusammen aus der Differenz zwischen aufgenommener und benötigter Energie. Die aufgenommene Energie entspricht dabei der Energie, welche das Tier über die Nahrung aufnimmt. Die benötigte Energie leitet sich von seiner Körpermasse und -oberfläche, der Tierart, dem Alter, dem Geschlecht, der Umgebungstemperatur, der körperlichen Aktivität und zusätzlich erbrachten Leistungen ab. Die Energiebilanz setzt sich also aus der Menge der zugeführten Energie (Nahrung) abzüglich des Energiebedarfs (Ausscheidungsverluste + Aufbau Körpermasse + mechanische Arbeit + Wärmeenergie) zusammen (Spektrum, 2018). Während der Trächtigkeit bzw. Laktation ist der Energieumsatz erhöht. Übersteigt der Energiebedarf die Energiezufuhr, so entsteht der Zustand einer negativen Energiebilanz (Rodehutscord und Petry, 2010). Da die Messung der individuellen Futteraufnahme sowie die Ermittlung der ausgeschiedenen Energie aufwendig und unter Feldbedingungen nur schwer durchführbar sind, wurden im Rahmen dieser Arbeit Hilfsmerkmale herangezogen, welche Rückschlüsse auf die maternale Energiebilanz ermöglichen. Wenn im Folgenden von Energiebilanz die Rede ist, so wird ein angenommener Stoffwechselzustand beschrieben, welcher sowohl von

phänotypischen Merkmalsausprägungen (z.B. Rückenfettdicke, Körpergewicht, Methanausstoß) als auch statistisch modellierten Ergebnissen abgeleitet wird.

1.3.2 Laktogenese

Der Begriff der Laktogenese beschreibt das Ingangsetzen der Milchbildung und -sekretion in der Milchdrüse des Muttertieres (Bruckmaier, 2010). Milch stellt die optimale Ernährung des Nachwuchses von Säugetieren nach der Geburt sicher. Die maternale Milchleistung ist somit auch ein Schlüsselkriterium bezüglich der *postnatalen* Gewichtsentwicklung des Lammes (Danso *et al.*, 2016). Hinzu kommt, dass bei Wiederkäuern der maternale und fetale Blutkreislauf durch eine sechsschichtige Interhämalschranke (*Plazenta epitheliochorialis*) voneinander getrennt sind. Ein diaplazentares Überwandern von Immunglobulinen aus dem Serum der Mutter hin zum Fetus findet also nur begrenzt statt und die Lämmer kommen hypogammaglobulinämisch zur Welt. Aus diesem Grund ist die passive Immunisierung des Lammes in den ersten 18–24 Stunden nach der Geburt über die Aufnahme des maternalen Kolostrums essenziell (Bostedt, 2019b).

Die Laktation kann in zwei Phasen eingeteilt werden: In der ersten Phase zum Ende der Trächtigkeit kommt es unter der dominierenden Wirkung von Progesteron zur strukturellen Ausdifferenzierung der Milchdrüsenepithelzellen (Laktozyten). Die Prolaktinkonzentration im Blutplasma ist zu diesem Zeitpunkt niedrig, da Progesteron die Prolaktinfreisetzung im Hypophysenvorderlappen hemmt. Über freigesetztes Kortisol nimmt der Fetus kurz vor der Geburt Einfluss auf die Entwicklung der Milchdrüse. In der zweiten Phase um den Geburtszeitpunkt sinkt der Progesteronspiegel ab und die eigentliche Milchbildung beginnt, da nun Prolaktin wieder verstärkt ausgeschüttet werden kann (Bruckmaier, 2010).

1.3.3 Galaktopoese

Unter dem Begriff der Galaktopoese werden Prozesse zur Aufrechterhaltung der Milchbildung und -sekretion während der Laktation zusammengefasst (Bruckmaier, 2010). Diese Prozesse werden durch ein komplexes Zusammenspiel stoffwechselaktiver Hormone aufrechterhalten (u.a. Somatotropin, insulin-like growth factor 1, Schilddrüsenhormone, Insulin, Glukagon). Um den erhöhten Bedarf an Calcium während der

Laktation zu decken, wird Calcium unter der Wirkung von Parathormon aus dem Knochen mobilisiert und die Resorption durch Vitamin-D-Hormon (Calcitriol) optimiert. Überschreitet der Calciumbedarf die körpereigene Bereitstellung, so kann es zu einer Gebärparese (Hypocalcämie) kommen (Bruckmaier, 2010).

1.3.4 Negative Energiebilanz und metabolische Anpassungsstrategien

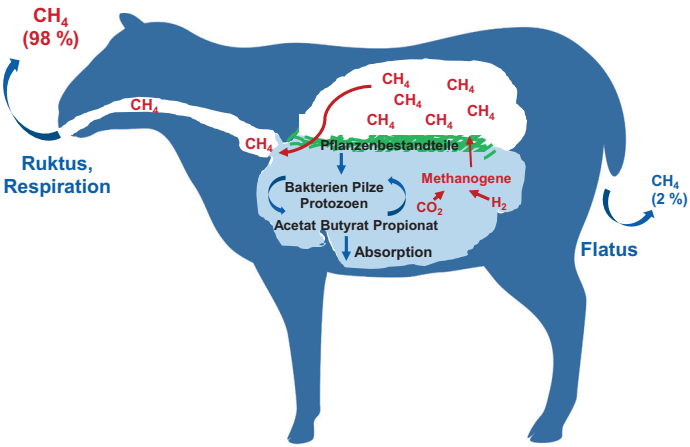
Während der Laktation wird der Stoffwechsel von einer homöostatischen hin zu einer homöorhetischen Regulation umgestellt. Dies dient dazu, die Milchdrüse gegenüber den restlichen Organen bevorzugt mit Nährstoffen und Energie zu versorgen. Auf Grund der negativen Energiebilanz kommt es zur vermehrten Mobilisation von Energiereserven (z.B. Körperfett) und damit zum Konzentrationsanstieg nicht veresterter freier Fettsäuren (NEFAs). Beim Kohlenhydratabbau im Pansen entsteht u.a. Propionat, welches wiederum in der Leber zur Gluconeogenese genutzt wird. Eine gesteigerte Gluconeogeneserate führt zu einem Fehlen von Oxalacetat als Substrat des Citratzyklus und die Oxidation von kurzkettigen Fettsäuren kann nur noch eingeschränkt erfolgen. Alternativ werden Ketonkörper, wie z.B. ß-Hydroxybutyrat (BHB) gebildet. Ein Anstieg der Ketonkörperkonzentration kann somit als Zeichen eines Energiedefizits bei gleichzeitig gesteigerter hepatischer Gluconeogenese gewertet werden und führt ebenfalls zu einer herabgesetzten Futteraufnahme des betroffenen Tieres. Die Folge ist eine weitere Verschlechterung der Energiebilanz (Bruckmaier, 2010). Die durch den vermehrten Abbau von Körperfettreserven anfallenden freien Fettsäuren belasten zusätzlich die Leber. Die große Menge an freien Fettsäuren kann nicht in den Mitochondrien der Hepatozyten oxidiert werden, sondern wird im Cytoplasma zu Triacylglyceriden verestert. Können diese Triacylglyceride dann nicht als sogenannte very low density lipoproteins (VLDL) hämatogen abtransportiert werden, kommt es zu einer vermehrten Einlagerung im Lebergewebe. Eine Leberverfettung mit Einschränkungen im hepatogenen Stoffwechsel kann die Folge sein (Bruckmaier, 2010). Kommt es darüber hinaus zur Leberzellschädigung kann die Serumkonzentration des Enzyms Glutamatdehydrogenase (GLDH) einen Hinweis auf den Fortschritt der Leberzellschädigung geben.

1.4 Methanemissionen beim Wiederkäuer

Methan (CH_4) ist das zweitwichtigste Treibhausgas und 25-mal klimaschädigender als Kohlenstoffdioxid (CO_2). Im Jahre 2017 produzierte die deutsche Landwirtschaft rund 60 % der deutschlandweiten Gesamtmethanemissionen. Davon stammten etwa 1,02 Millionen Tonnen CH_4 aus der Tierhaltung (Umweltbundesamt, 2019). Es konnte gezeigt werden, dass CH_4-Emissionen einen ungenutzten Anteil der aufgenommenen Bruttoenergie (2–18 %) eines Tieres darstellen (Johnson und Ward, 1996; Baker, 1999; Breves und Leonhard-Marek, 2010). Gleichzeitig korreliert der CH_4-Ausstoß mit der individuellen Futteraufnahme eines Tieres (Moorby *et al.*, 2015). Da Futter den größten Kostenfaktor in der Schafhaltung repräsentiert (Ellison *et al.*, 2017), ist auch dies ein Grund für das wachsende Interesse Schafe mit einer höheren Futtereffizienz und somit auch geringerem CH_4-Ausstoß zu züchten (Basarab *et al.*, 2013; Paganoni *et al.*, 2017).

1.4.1 Methanogenese

Die wichtigsten Prozesse der CH_4-Bildung sind in **Abbildung 4** schematisch dargestellt. Für den Abbau des überwiegenden Teils der Zellwandbestandteile pflanzlicher Zellen sind Wiederkäuer auf mikrobielle Enzyme angewiesen.



Legende: CH_4 – Methan; CO_2 – Kohlenstoffdioxid; H_2 – Wasserstoff

Abbildung 4. Schematische Darstellung der Methanogenese im Pansen sowie der Methanausscheidung.

Stärke, Cellulose, Hemicellulose und Pektin werden mithilfe dieser Enzyme in Monomere gespalten und durch anaerobe Glykolyse (Emden-Meyerhoff-Weg) bzw. den Pentose-Phosphat-Zyklus zu Pyruvat umgesetzt. Dieses wird daraufhin rasch in kurzkettige Fettsäuren (Acetat, Propionat, Butyrat) umgewandelt. Bei diesem Prozess entstehen ebenfalls CO_2 (40–70 %) und CH_4 (20–40 %). Dieser Fermentationsvorgang erfolgt durch methanogene Archaeen. Es handelt sich um die Reduktion von CO_2 zu CH_4. Die Stöchiometrie der CH_4-Bildung lautet:

$$CO_2 + 4\ H_2 \rightarrow CH_4 + 2\ H_2O$$

Die benötigten Reduktionsäquivalente (H_2) stammen dabei aus der Glykolyse, dem Pentose-Phosphat-Weg, der Decarboxylierung von Pyruvat und dem Aminosäureabbau (Breves und Leonhard-Marek, 2010). Das entstehende CH_4 wird im Anschluss über drei Wege ausgeschieden: i) CH_4 wird im Pansen bzw. Darm resorbiert, gelangt von da aus über das Blut zur Lunge und wird abgeatmet, ii) CH_4 verlässt den Pansen direkt über den Ruktus, iii) CH_4 wird über den Flatus ausgeschieden (Murray *et al.*, 1976). Die unter i) und ii) beschriebenen Wege machen dabei den Großteil der CH_4-Ausscheidung aus.

1.4.2 Messverfahren

Das wachsende Interesse an Strategien zur CH_4-Reduktion führte zur Untersuchung einer Vielzahl direkter *in vivo* Messverfahren hinsichtlich ihrer wissenschaftlichen Genauigkeit und Praxistauglichkeit (Hammond *et al.*, 2016). Präzise Messmethoden bilden die Basis für die Etablierung nationaler Standards, CH_4-Vermeidungsstrategien (Hristov *et al.*, 2013) und die Schätzung genetischer Parameter (Pinares-Patiño *et al.*, 2013; Jonker *et al.*, 2018) für tierzüchterische Maßnahmen. Im Folgenden werden indirekte Verfahren zur CH_4-Bestimmung ausgeklammert. Die Respirationskammer ist das Goldstandard-Verfahren zur direkten Methanmessung (Pinares-Patiño *et al.*, 2011). Zumeist handelt es sich bei diesen Kammern um offene Kreislaufsysteme. Die CH_4-Emission wird über die Konzentrationsdifferenz zwischen einströmender und ausströmender Luft ermittelt. Faktoren wie Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und CO_2-Gehalt der Luft innerhalb der Kammer müssen kontrolliert und bei den CH_4-Berechnungen berücksichtigt werden, da sie das Gasvolumen, aber auch den Kreislauf des Tieres maßgeblich beeinflussen (Hammond *et al.*, 2016). Dieses Verfahren ist kosten-

intensiv und geeignet für die Phänotypisierung einer begrenzten Tierzahl pro Zeiteinheit, da die Tiere mehrere Tage in der Messeinheit verbleiben. Dies verlangsamt das Generieren einer soliden Datenbasis für die Schätzung genetischer Parameter. Gardiner *et al.* (2015) zeigten außerdem, dass ohne eine standardisierte Kalibrierung auch dieses Verfahren Messungenauigkeiten aufweist. Darüber hinaus stellen solche Kammern eine künstliche Umgebung dar, welche die Situation in natürlichen Haltungssystemen nicht wiedergeben und auch zu einem veränderten Verhalten des Tieres (z.B. einer reduzierten Futteraufnahme) führen kann. Die Untersuchungsergebnisse sind also nicht in jedem Fall auf Praxisbedingungen übertragbar und könnten zusätzlich verzerrt sein (Bickell *et al.*, 2014; Kandel *et al.*, 2017).

Eine flexiblere Lösung stellen portable accumulation chambers (PAC) dar. Es handelt sich um tragbare, luftdichte Kammern mit meist offenem Boden und ohne künstlich erzeugten konstanten Luftstrom (Goopy *et al.*, 2011). Die Tiere verbleiben wenige Stunden in dieser Einrichtung und die CH_4-Konzentration wird nur einmal am Ende der Messung ermittelt (Hammond *et al.*, 2016). Dennoch korrelierten die Ergebnisse der Kurzzeitmessungen in PACs mit denen der Messungen in Respirationskammern über eine Zeitspanne von 22 Stunden (Goopy *et al.*, 2011).

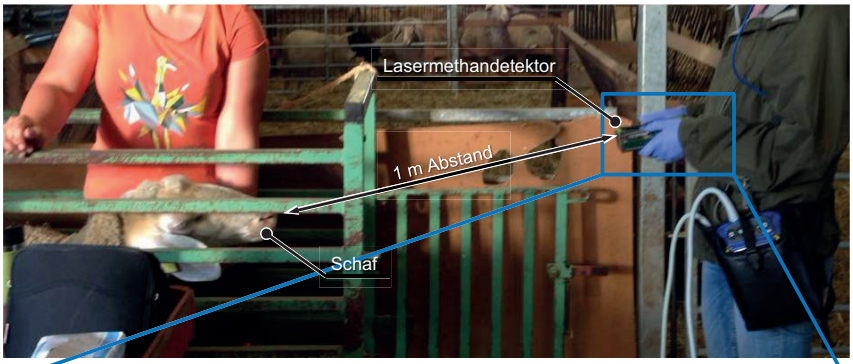
Eine weitere Möglichkeit zur Messung des individuellen CH_4-Ausstoßes, auch unter Feldbedingungen, ist die Schwefelhexafluorid- (SF_6) Marker-Technik. Dazu wird dem Tier ein Tubus in das Reticulo-Rumen gelegt, über den eine bekannte Menge SF_6 Gas abgegeben wird. Die abgeatmete Luft wird durch eine Vorrichtung nahe der Nase bzw. des Mauls abgesaugt, welche mit einem Sammelkanister verbunden ist. Dieser Kanister wird auf dem Rücken des Tieres befestigt und ermöglicht ein einigermaßen uneingeschränktes Bewegen, wobei bei jungen Schafen dennoch Verhaltensänderungen beobachtet wurden (Pinares-Patiño *et al.*, 2008). Empfohlen wird ein Messzeitraum von mindestens 24 Stunden über 5 aufeinanderfolgende Tage. Die CH_4-Emission eines Tages wird über den Quotienten zwischen CH_4 und SF_6 errechnet. Pinares-Patiño *et al.* (2011) zeigten jedoch deutliche Abweichungen der Ergebnisse aus SF_6-Versuchen verglichen mit denen aus Respirationskammern. Außerdem fanden Williams *et al.* (2011) heraus, dass sich diese Technik nicht für geschlossene Räume (z.B. Stallgebäude) eignet, da es dort zu erhöhten Konzentrationen des Tracers SF_6 als auch

des CH_4 kommen kann, welche möglicherweise Verzerrungen der Messungen verursachen. Respirationskammern, ebenso wie Tracer-Techniken, eignen sich lediglich als Langzeitmessmethoden.

Zur kurzzeitigen CH_4-Messung stehen beispielsweise statische Apparaturen wie das „GreenFeed“ System (C-Lock Inc., Rapid City, South Dakota, USA) zur Verfügung. Dieses misst den Luftfluss, die Gaskonzentration und die Position des Kopfes während dem Tier Futter vorgelegt wird. Die Messungen belaufen sich somit auf 3–7 Minuten mehrfach am Tag, je nachdem wie oft das jeweilige Tier das System freiwillig aufsucht (Hristov *et al.*, 2015). Eine Messung bestimmter Tiere und eine eindeutige Vergleichbarkeit zwischen Tieren ist mit dieser Technik schwierig. Das Futter, das innerhalb des Systems gefüttert wird, verursacht zusätzliche Kosten und muss außerdem in Rationsberechnungen miteingerechnet werden, was auf Grund der Freiwilligkeit der Besuche nur begrenzt umsetzbar ist. Die „Sniffer“-Methode funktioniert ähnlich wie das „GreenFeed“, wird allerdings in automatische Melksysteme integriert und misst während des Ruktus ausgeschiedenes CH_4. Bei dieser Methode sind starke Korrelationen mit den Messungen aus Respirationskammern beschrieben (Garnsworthy *et al.*, 2012).

Die Kurzzeitmessmethode, welche in dieser Arbeit untersucht wurde, ist die eines mobilen Lasermethandetektors (LMD, **Abbildung 5**). Hierbei wird die CH_4-Konzentration in der Ausatemluft des Tieres mit Hilfe von Infrarotabsorptionsspektroskopie gemessen. Ein Halbleiterlaser ist dabei auf die spezifische Wellenlänge des CH_4-Moleküls (1,65 µm) eingestellt und der Detektor gibt alle 0,5 Sekunden eine CH_4-Konzentration aus. Der für diese Arbeit gewählte Untersuchungsaufbau ist schematisch in **Abbildung 5** dargestellt und im Detail in Kapitel 3 beschrieben, ebenso wie Vor- und Nachteile dieser Messmethode (Reintke *et al.*, 2020).

a) Untersuchungsmethodik



b) Mobiler Laser-methandetektor (LMD)

c) Charakteristika (Messmethode); Vor- und Nachteile (LMD)

- LMD (Crowcon LaserMethane Mini, Tokyo Gas Engineering Co Ltd., Tokyo, Japan)
- Messung CH_4-Konzentration (µL/L) in ausgeatmeter Luft mittels Infrarot-Absorptionsspektroskopie
- Abstand: 1 m zwischen LMD und Tier
- auf Nasenlöcher ausgerichtet mittels Hilfslaser
- Messdauer: 3 Minuten/Tier (2 aufgezeichnete CH_4-Konzentrationen/Sekunde)
- + Nicht-invasive Kurzzeitmessmethode, auch unter Feldbedingungen
- - Teure Anschaffung, komplexe Datenaufbereitung und Berücksichtigung von Umwelteinflüssen (z.B. Verhalten während der Messung, Mikrometeorologie, Atemzugvolumen, Atemfrequenz) notwendig

Legende: CH_4 – Methan

Abbildung 5. a) Untersuchungsmethodik der Methanmessung mit einem b) mobilen Laser-methandetektor sowie c) Übersicht (mit Vorteilen (+) und Nachteilen (-)) der Messmethode.

1.4.3 Beispiele für Methanmerkmalsdefinitionen und Möglichkeiten der Zucht auf einen verringerten Methanausstoß

Da mehr als die Hälfte der Gesamtmethanproduktion aus der Landwirtschaft stammt und davon ca. 25 % durch die Nutztierhaltung verursacht wird, fokussieren sich Tierzüchter zunehmend auf Maßnahmen zur CH_4-Reduktion bei Wiederkäuern. Gleichzeitig lässt sich auch die Futtereffizienz von Nutztieren durch die Selektion auf einen verringerten CH_4-Ausstoß verbessern (Paganoni *et al.*, 2017; eMissionCow, 2020). Robinson und Oddy (2016) bestätigten in diesem Zusammenhang auch den ökonomi-

schen Nutzen einer verbesserten Futtereffizienz und eines reduzierten CH_4-Ausstoßes: Die Futterkosten reduzierten sich in ihren Studien je nach Selektionsszenario um bis zu 5,26 $ pro Tier als Folge der ersten Selektion. Bei der Beurteilung der Relevanz von CH_4-Merkmalen für die Zucht muss allerdings berücksichtigt werden, dass es nicht nur, wie oben bereits dargestellt, viele unterschiedliche Messverfahren gibt, sondern sich auch die Definitionen der CH_4-Merkmale unterscheiden. Beispiele für CH_4-Merkmale sind der CH_4-Ertrag (in g CH_4/kg Trockenmasseaufnahme (DMI); Goopy *et al.*, 2014), CH_4-Produktion (in g/d; de Haas *et al.*, 2011; Pickering *et al.*, 2015; Paganoni *et al.*, 2017; Kandel *et al.*, 2017; Jonker *et al.*, 2018) und die CH_4-Konzentration in mg/kg (Pickering et al., 2015) bzw. in µL/L (Reintke *et al.*, 2020). In der Folge lassen sich auch genetische Parameter wie die Erblichkeiten dieser Merkmale nicht uneingeschränkt miteinander vergleichen. **Tabelle 2** stellt die Variabilität der Heritabilitäten für CH_4-Merkmale bei Schaf und Rind dar sowie die genutzten Messmethoden.

Tabelle 2. Geschätzte Heritabilitäten (h^2) für verschiedene Methan-(CH_4-) Merkmale in Abhängigkeit von Tierart und Messverfahren. Die Referenzen sind chronologisch (2011–2018) angeordnet.

Merkmal	h^2	Tierart	Messverfahren	Referenz
CH_4 (g/d)	0,35[1]	Rind	errechnet[2]	de Haas *et al.* (2011)
CH_4 (g/d)	0,13	Rind	errechnet[2]	Pickering *et al.* (2015)
CH_4 (mg/kg)	0,05	Rind	LMD	Pickering *et al.* (2015)
CH_4 (g/d)	0,10	Schaf	PAC	Paganoni *et al.* (2017)
CH_4 (g/d)	0,22–0,25	Rind	MIR	Kandel *et al.* (2017)
CH_4 (g/d)	0,20	Schaf	PAC	Jonker *et al.* (2018)

LMD – Lasermethandetektor, PAC – portable respiration chamber, MIR – mid-infrared spectrometry.

[1]basierend auf genomischen Daten.

[2]CH_4-Ausstoß prognostiziert als 6 % der aufgenommenen Bruttoenergie und auf den Energieverlust durch CH_4 (55,65 kJ/g) korrigiert.

Es wird deutlich, dass die geschätzten Heritabilitäten für CH_4-Merkmale im niedrigen bis moderaten Bereich liegen, unabhängig von der angewandten Mess-/Schätzmethode. Eine Selektion auf einen geringeren CH_4-Ausstoß wird folglich erst über einen längeren Zeitraum Erfolge bringen. Eine Möglichkeit das Generationsintervall zu verkürzen und somit schneller züchterischen Fortschritt zu erreichen, ist die genomische Selektion (König *et al.*, 2009), welche in der Rinderzucht bereits etabliert ist. Im Vergleich dazu ist die Anzahl genotypisierter Schafe allerdings noch gering. Ein Grund dafür sind die nicht unerheblichen Kosten je Tier (Shumbusho et al., 2013) und die relativ geringe Anzahl merkmalsgeprüfter Schafe in Deutschland. In der vorliegenden These sollen innovative CH_4-Merkmale bei Mutterschafen definiert werden, welche eine weitere Differenzierung des CH_4-Ausstoßes während Respiration und Ruktus ermöglichen. Im weiteren Verlauf werden diese Merkmale hinsichtlich ihrer Relevanz für die Zucht und ihres generationsübergreifenden Effekts auf LBW analysiert.

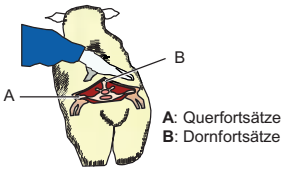
1.5 Maternale Körperkonditionsmerkmale als Indikatoren für den Energiestoffwechsel

Maternale Körperkonditionsmerkmale eignen sich gut, um Rückschlüsse auf Körperenergiereserven und die Stoffwechselsituation eines Mutterschafes zu ziehen (Caldeira *et al.*, 2007; Karagiannis *et al.*, 2014). In der vorliegenden Arbeit wurden zu diesem Zweck die Merkmale Mutterschafgewicht (ewe body weight, EBW), Body Condition Score (BCS), Rückenfettdicke (backfat thickness, BFT) und Rückenmuskeldicke (backmuscle thickness, BMT) erhoben. Im Folgenden werden diese Merkmale genauer beschrieben.

1.5.1 Körpergewicht und Body Condition Score

Das Mutterschafgewicht ist ein Indikatormerkmal für den Energiestoffwechsel, welches zusätzlich positiv mit der Fähigkeit des Mutterschafes, den Nachwuchs erfolgreich aufziehen zu können, assoziiert ist (Griffiths *et al.*, 2016). Snowder *et al.* (2001) wiesen zudem eine positive Beziehung zwischen EBW und der maternalen Milchleistung nach, welche LBW indirekt mitbestimmt. Darüber hinaus ist dieses Merkmal leicht und zuverlässig auch betriebsintern zu erfassen. Ein Merkmal, welches die Erfassung des Körpergewichts sinnvoll ergänzen kann, ist der BCS. Der BCS ist als Indikator für den Körperfett- und Muskelanteil besser geeignet als das Körpergewicht allein (Sanson *et*

al., 1993; Caldeira und Portugal, 2007). Im Gegensatz zum Körpergewicht wird der BCS auch nicht durch das Gewicht des Magendarminhalts, des Skeletts oder der Wolle beeinflusst (Kenyon *et al.*, 2014). Zusätzlich ist der BCS manuell und ohne weitere Hilfsmittel bestimmbar und weist eine geringe inter-observer Variabilität auf (Shands *et al.*, 2009). Eine routinemäßige Erfassung des BCS im Rahmen des Betriebsmanagements kann außerdem dazu beitragen *postnatale* Lämmerverluste zu reduzieren (Binns *et al.*, 2002). Der BCS wird durch Palpation des Lendenwirbelbereichs, sowie der Dorn- (*Processi spinosi*) und Querfortsätze *(Proccessi transversi*) der Wirbelkörper bestimmt. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Skala von 1,0 (sehr mager) bis 5,0 (adipös) mit Abstufungen von 0,5 Punkten zugrunde gelegt (Russel *et al.*, 1969; **Abbildung 6**).



Score 1
Die Dorn- und Querfortsätze sind scharf und prominent. Es ist möglich mit den Fingern unter die Querfortsätze zu gelangen und jeden Fortsatz einzeln zu ertasten.

Score 2
Die Dornfortsätze sind prominent aber abgerundet. Die einzelnen Fortsätze sind als Erhebungen tastbar. Die Querfortsätze sind abgerundet, aber man kann mit den Fingern unter die Fortsätze gelangen. Die Muskelschicht ist moderat mit leichter Fettschicht.

Score 3
Die Dornfortsätze sind weich und abgerundet. Die Knochenstruktur ist nur mit Druck zu ertasten. Die Querfortsätze sind abgerundet und gut von Muskulatur und einer moderaten Fettschicht abgedeckt.

Score 4
Die Dornfortsätze sind nur noch als Linie tastbar. Die Enden der Querfortsätze sind nicht mehr zu fühlen. Die Muskulatur ist rund und mit einer dicken Fettschicht bedeckt.

Score 5
Weder die Dorn- noch die Querfortsätze sind zu ertasten. Die Muskulatur ist sehr stark ausgebildet und von einer sehr dicken Fettschicht bedeckt.

Abbildung 6. Schematische Darstellung und Beschreibung des Body Condition Scorings bei Schafen in Anlehnung an die Methodik von Russel *et al.* (1969).

Ein optimaler BCS liegt zwischen 2,5 und 3,0 zum Zeitpunkt der Ablammung (Kenyon *et al.*, 2014; Cranston *et al.*, 2017). Es ist energetisch nicht sinnvoll einen BCS > 3,5 anzustreben, da mit einer Erhöhung über diesen Wert hinaus auch höhere Energieverluste in Form von Wärme verbunden sind (Morel *et al.*, 2016).

1.5.2 Rückenfett- und Rückenmuskeldicke

Ein genaueres Bild von BFT und BMT, als es mit der BCS Bestimmung möglich ist, wird durch den Einsatz von Ultraschallgeräten erreicht, die eine separate und millimetergenaue Messung beider Anteile ermöglichen. Routinemäßig wird diese Methode bereits in der Fleischleistungsprüfung bei Lämmern angewandt (Gernand und Lenz, 2005). In der vorliegenden Arbeit wurde diese Methodik auf Mutterschafe übertragen. **Abbildung 7** zeigt die Durchführung der Ultraschallmessung auf der rechten Körperseite des Mutterschafes. Der Linearschallkopf des mobilen Ultraschallgerätes wurde dabei direkt hinter der 13. Rippe angesetzt. Sowohl BFT als auch BMT spiegeln körpereigene Energiereserven wider und eignen sich daher als Indikatormerkmale der maternalen Energiebilanz.

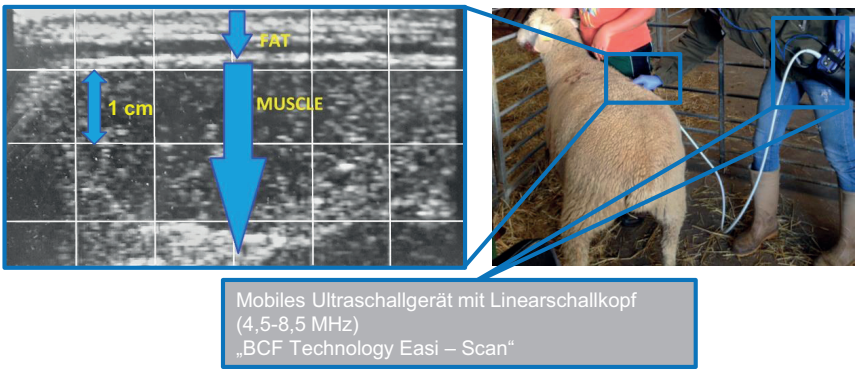


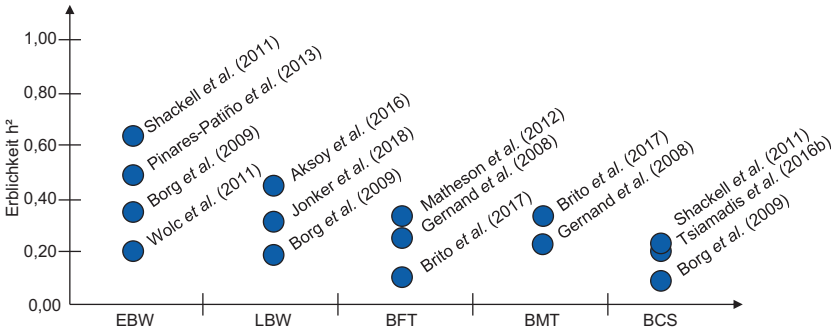
Abbildung 7. Darstellung der Durchführung der ultraschallgestützten Rückenfett- und Rückenmuskeldickemessung bei Mutterschafen. Das dargestellte Ultraschallbild zeigt die Rückenfettschicht (FAT) sowie die Rückenmuskelschicht (MUSCLE) innerhalb eines Rasters von 1 cm.

Das Wissen um die Beschaffenheit dieser körpereigenen Energiereserven ist besonders für extensive Weidehaltungssysteme entscheidend. In diesen Haltungssystemen

sind Mutterschafe immer wieder auf die Mobilisation der eigenen Reserven angewiesen, um Perioden mit unzureichender Energieversorgung über das Futter ausgleichen zu können (Gernand *et al.*, 2008), ohne dass es zu Einbußen in der Milchleistung während der Laktation kommt.

1.5.3 Zucht auf maternale Körperkonditionsmerkmale

Die oben beschriebenen Körperkonditionsmerkmale (EBW, BCS, BFT, BMT) wurden bereits in einigen Studien bezüglich ihrer Erblichkeit untersucht (**Abbildung 8**). Gerade die Merkmale EBW und BCS zeigten dabei zumeist moderate bis hohe Erblichkeiten (Borg *et al.*, 2009; Shackell *et al.*, 2011; Wolc *et al.*, 2011; Pinares Patiño *et al.*, 2013; Aksoy *et al.*, 2016; Tsiamadis *et al.*, 2016b; Jonker *et al.*, 2018) und versprechen somit einen zeitnahen Zuchtfortschritt. Im Gegensatz dazu beschränken sich Untersuchungsergebnisse zu BFT und BMT hauptsächlich auf Beobachtungen bei Lämmern (Gernand *et al.*, 2008; Matheson *et al.*, 2012; Brito *et al.*, 2017). Auf Grund der moderaten Heritabilitäten der sonographisch gemessenen Merkmale BFT und BMT werden sie aber bereits im Rahmen der Leistungsprüfungen erfasst. Daten zu Ultraschallmerkmalen bei adulten Mutterschafen liegen deutlich seltener vor (Abdel-Mageed und Abo El-Maaty, 2012), was ebenfalls eine Motivation der vorliegenden Arbeit darstellte.



Legende: EBW – Mutterschafgewicht; LBW – Lammgewicht; BFT – Rückenfettdicke; BMT – Rückenmuskeldicke; BCS – Body Condition Score

Abbildung 8. Vergleichende Darstellung von geschätzten Erblichkeiten aus der Literatur für die Merkmale Mutterschafgewicht, Lammgewicht, Rückenfettdicke, Rückenmuskeldicke und Body Condition Score.

1.6 Maternale Mengen- und Spurenelementversorgung

Neben der Energieversorgung während der Trächtigkeit und der Laktation kommt ebenfalls der Mengen- und Spurenelementversorgung des Mutterschafes große Bedeutung zu. Beispielsweise besteht besonders während der Hochträchtigkeit ein erhöhter Bedarf an Calcium (Ca), um die fetale Skelettbildung sicherzustellen. Aber auch für die optimale Kontraktionsfähigkeit des Myometriums (Actin-Myosin-Komplex) während der Geburt sowie für die Milchbildung während der Laktation ist eine adäquate Calciumversorgung des Muttertieres essenziell. Häufig werden Mineralfutter supplementiert, ohne die Mineralstoffgehalte des Grundfutters in die Rationsberechnung miteinzubeziehen (Früh, 2009). Jedoch können z.B. hohe Eiweiß- und Kalium- (K) gehalte in jungem Aufwuchs zu einer verminderten Magnesium- (Mg) absorption führen. Darüber hinaus verhalten sich einige Mineralstoffe als Antagonisten eines anderen. Eine Überversorgung an Phosphat (P) kann beispielsweise die Calciumabsorption reduzieren und somit eine sekundäre Hypocalcämie verursachen, welche ihrerseits die maternale Milchleistung während der Laktation negativ beeinflusst (Früh, 2009). Rosales Nieto *et al.* (2016) zeigten, dass sich zusätzliche Gaben an Vitamin-E während der Spätträchtigkeit bzw. Frühlaktation positiv auf Mutterschafe auswirkte, die über das Futter nur restriktiv mit Energie versorgt wurden. Die Lämmer dieser Mutterschafe zeigten in der Folge signifikant bessere Zunahmen im Vergleich zu den Lämmern von Müttern ohne Vitamin-E Supplementation. Hohe Natriumchloridgehalte im Futter beeinträchtigen nicht nur die Reproduktionsfähigkeit eines Tieres, sondern können sich auch negativ auf sein Wachstum sowie den Trächtigkeitsverlauf auswirken (Abdelnour *et al.*, 2020). Diese Beispiele unterstreichen die Relevanz der maternalen Mineralstoffversorgung im Hinblick auf LBW. Die physiologischen Funktionen aller in der vorliegenden Arbeit analysierten Blutparameter sowie die Auswirkungen einer Über- bzw. Unterversorgung sind in **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3. Im Rahmen dieser Arbeit analysierte Blutparameter mit ihrer physiologischen Funktion und den klinischen Folgen einer Über- und Unterversorgung beim Schaf.

Blutparameter	Funktion	Überversorgung	Unterversorgung
Calcium (Ca)	Knochenaufbau, Enzymaktivator Blutgerinnung, Muskelstoffwechsel	Steifer Gang, Kyphose, verminderte Futteraufnahme, Herzrhythmusstörungen, Kalzifizierung von Gefäßen, Urolithiasis	Apathie, verminderte Futteraufnahme, Bewegungsstörungen, verminderte Fruchtbarkeit, Osteopathien/Paresen
Kalium (K)	Regulation zellulärer osmotischer Druck, Enzymaktivator, Beeinflussung Fett-, Kohlenhydrat-, Nervenzell- und Muskelstoffwechsel	Herzrhythmusstörungen, Störung Mg-Absorption	Muskelschwäche, Herzrhythmusstörungen
Natrium (Na)	Säure-Basen-Haushalt, Wasserhaushalt, Nervenfunktion, Muskelstoffwechsel	Akute Kochsalzvergiftung: verminderte Futteraufnahme, Kolik, Durchfall, Muskelschwäche bis hin zu Tod	Vermindertes Wachstum, verminderte Fruchtbarkeit (Zyklus- und Puerperalstörungen)
Magnesium (Mg)	Knochenaufbau, Enzym-Cofaktor, ATP-Energiehaushalt (Fett-, Kohlenhydrat, Proteinstoffwechsel), Nervenfunktion, Thermoregulation	Ohne klinische Bedeutung	Weidetetanie, verminderte Futteraufnahme, geringere Milchleistung, Krämpfe, Muskeltremor, Fruchtbarkeitsstörungen

Blutparameter	Funktion	Überversorgung	Unterversorgung
Phosphat (P)	Knochenaufbau, Säure-Basen-Haushalt, Energiehaushalt (Fett-, Kohlenhydrat-, Proteinstoffwechsel), Nucleotidsynthese	Störung Absorption Ca, Mg und Fe	Verminderte Futteraufnahme, geringeres Wachstum, verminderte Fruchtbarkeit, Osteopathie, Rhachitis
Kupfer (Cu)	Enzym-Cofaktor (Kohlenhydrat-, Fett-, Glucose-, Eisenstoffwechsel), Melaninsynthese, Elektronentransport	Rasseabhängige Empfindlichkeit, Akkumulation in Leber, Hämolyse, Schwäche, Photodermatitis, Abmagerung	Ältere Tiere: Haarkleidveränderung, Abmagerung, Anämie, Fruchtbarkeitsstörungen, geringere Milchleistung, Aborte Lämmer: Schwäche, motorische Störungen, geringeres Wachstum
Eisen (Fe)	Bestandteil von Hämoglobin, Enzym-Cofaktor, Zellatmung	Verminderte Futteraufnahme, Wachstums-, Leistungs-, Fruchtbarkeitsdepression, Störung Mineralstoff- und Spurenelementstoffwechsel (v.a. Zn, Mn, Cu)	Verminderte Futteraufnahme, Vermindertes Wachstum, Anämie, Schwäche

Blutparameter	Funktion	Überversorgung	Unterversorgung
Zink (Zn)	Bestandteil Enzyme und Hormone, Kohlenhydrat-, Fett- Protein-, Vitamin A-stoffwechsel, DNA-Stoffwechsel, Reproduktion, Geweberegeneration, Immunsystem	Eingeschränkte Verwertung von Fe, Cu und Se, Verminderte Futteraufnahme, Schwäche, Durchfall, Anämie	Verminderte Futteraufnahme, vermindertes Wachstum, Fruchtbarkeitsstörungen, Parakeratose
Selen (Se)	Enzym-Cofaktor (z.B. Glutathionperoxidase), Antioxidans, Muskel-, Fett-, Proteinstoffwechsel	Verminderte Futteraufnahme, Koliken, ZNS-Störungen	Geringere Fruchtbarkeit, niedrige Geburtsgewichte, Weißmuskelkrankheit, Abmagerung, Immunschwäche
Nicht veresterte freie Fettsäuren (NEFA)	Stoffwechselindikator für gesteigerte Lipolyse und negative Energiebilanz	Hinweis auf Energiemangel im Futter oder reduzierte Futteraufnahme, Fettmobilisationssyndrom	Ohne klinische Bedeutung
β-Hydroxybutyrat (BHB)	Stoffwechselindikator für andauernden Energiemangel	Ohne klinische Bedeutung	Energiemangel im Futter oder reduzierte Futteraufnahme, vermehrter Gehalt in Silage, hohe Kraftfuttergaben
Glutamatdehydrogenase (GLDH)	Leberspezifisches Enzym, Indikator für Leberzellschäden	Ohne klinische Bedeutung	Leber-, Nierenschädigung, hoher Stoffwechselumsatz

Quellen: Früh (2009); Fürll (2014); Humann-Ziehank *et al.* (2019)

1.6.1 Indikatoren der Mineralstoffversorgung und des Stoffwechsels in der Tierzucht

Gesundheitsmerkmale gewinnen immer mehr an Bedeutung in der Schafzucht. So sind Resistenzzuchtbestrebungen bezüglich Infektionskrankheiten wie z.B. Scrapie (Hunter *et al.*, 1997), Moderhinke (Conington *et al.*, 2008) oder Endoparasitosen (Bishop und Stear, 1997) zu nennen. Auch die Auswirkungen von Scrapie-Resistenzzuchtprogrammen auf ökonomisch bedeutsame Merkmale wie z.B. die Anzahl der lebend geborenen bzw. die Anzahl aufgezogener Lämmer wurden bereits eingehender betrachtet (Lipsky *et al.*, 2008). Zu einer genetisch determinierten Empfindlichkeit gegenüber Mengen- und Spurenelementabweichungen oder einer genetisch bedingten Stoffwechselstabilität während der Trächtigkeit und Laktation ist allerdings bisher bei der Tierart Schaf wenig bekannt. Dabei wären in diesem Zusammenhang neue Erkenntnisse bezüglich der Vorzüge bestimmter Schafrassen in bestimmten Umwelten (bestimmte Haltungs-, Fütterungsbedingungen) interessant, um die Schafzucht dahingehend noch gezielter zu verbessern. Es gibt bereits einige Studien, welche sich mit dem quantitativ-genetischen Hintergrund von Mineralstoffgehalten im Blut oder in der Milch von Milchkühen beschäftigten. Tsiamadis *et al.* (2016a) schätzten Heritabilitäten für Ca, Mg und P im Blut von Milchkühen zwischen $h^2 = 0{,}20$ bis $h^2 = 0{,}43$ in den ersten acht Tagen der Laktation. In der Studie von Denholm *et al.* (2019) ergaben sich Erblichkeiten für Mg, K, Ca, Cu, Zn und Se in einem Bereich von $h^2 = 0{,}10$ (Se) bis $h^2 = 0{,}22$ (Cu) im Serum von Milchkühen. Außerdem konnten mit Hilfe von genomweiten Assoziationsstudien (GWAS) Genregionen bei Milchrindern, die mit dem Milchmineralstoffgehalt (v.a. Ca, Cu, Fe, Zn) assoziiert waren, identifiziert werden (Buitenhuis *et al.*, 2015). Das Körpergewicht und Ca waren bei Milchkühen negativ miteinander korreliert ($r_g = -0{,}49$) ebenso wie die Milchleistung und Ca (Tveit *et al.*, 1991). Hinsichtlich der Zucht auf Stoffwechselindikatoren schätzten Benedet *et al.* (2020) bei Holstein Rindern Heritabilitäten von $h^2 = 0{,}19$ für NEFA bzw. von $h^2 = 0{,}31$ für BHB. Billa *et al.* (2020) unterstrichen in ihrer Studie die Relevanz gemessener BHB-Werte zur Beurteilung der Energiebilanz. Diese Ergebnisse lassen die Hypothese zu, dass ähnliche Wechselwirkungen auch bei Schafen zu finden sind, welche wiederum während Trächtigkeit und Laktation die Gewichtsentwicklung der zugehörigen Lämmer beeinflussen.

1.7 Ziele der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den generationsübergreifenden phänotypischen und genetischen Zusammenhängen zwischen Indikatormerkmalen der maternalen Energiebilanz *prä*- und *postpartum* und LBW bis zum Absetzen. Zu diesem Zweck wurden sowohl Landschafrassen (RH, CF) als auch eine Wirtschaftsrasse (ML) und Kreuzungstiere (CB) unter verschiedenen Haltungsbedingungen untersucht.

Abbildung 9 gibt einen Überblick zu den untersuchten Merkmalen dieser Arbeit und deren Erfassung sowie über die Zuchtziele, bezogen auf das Mutterschaf und das Lamm aus Sicht des Tierzüchters bzw. des Schäfers.

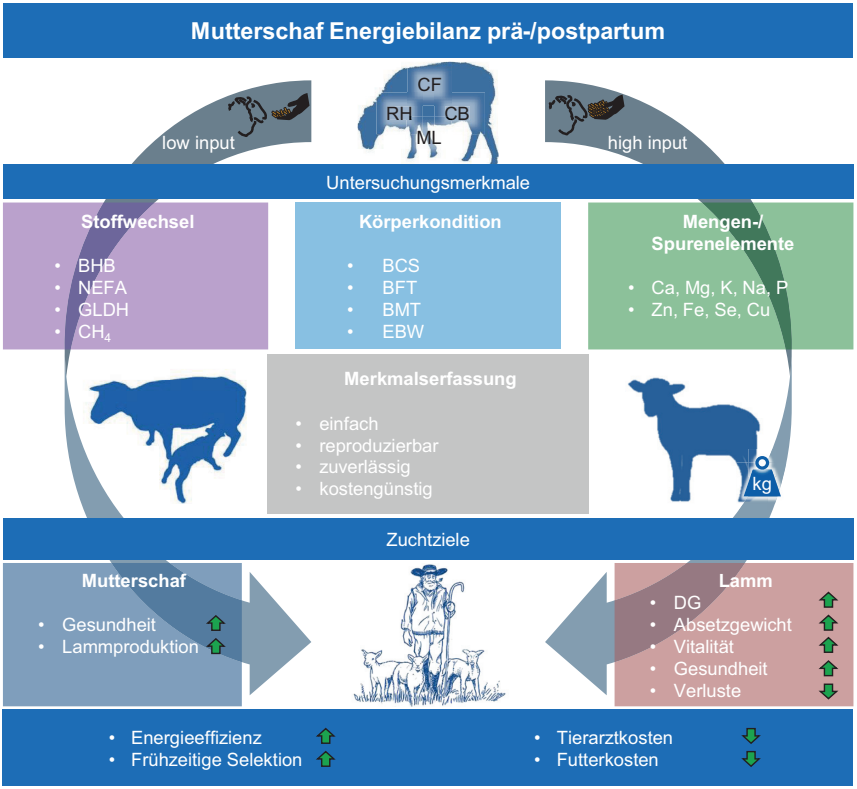
Die Ziele der Arbeit können wie folgt gegliedert werden:

1. In Kapitel 2 werden phänotypische Beziehungen zwischen Körperkonditionsmerkmalen (EBW, BCS, BFT, BMT) des Mutterschafs und der LBW während der Laktation untersucht. Diese Untersuchung umfasst Tiere eines high input (> 30 % Kraftfutter in der Ration) sowie Tiere eines low input (< 30 % Kraftfutter in der Ration) Produktionssystems. Zusätzlich werden die genannten Merkmale über verschiedene Rassen hinweg betrachtet.

2. Kapitel 3 befasst sich mit der Durchführung von CH_4-Messungen bei Mutterschafen mit Hilfe eines LMD sowie mit dem phänotypischen und genetischen Einfluss des maternalen CH_4-Ausstoßes auf LBW bzw. die maternale Körperkondition während der Laktation. In einem weiteren Schritt werden Erblichkeiten für die definierten CH_4- und Körperkonditionsmerkmale geschätzt.

3. Ziel von Kapitel 4 ist es zu zeigen, inwiefern rassebedingte Unterschiede in der Konzentration von Blutparametern (Mineralstoffe, Stoffwechselindikatoren) *prä*- und *postpartum* zu finden sind, obwohl die untersuchten Tiere unter einheitlichen und nicht von extern beeinflussten Bedingungen gehalten werden. Des

Weiteren sollen die phänotypischen Einflüsse dieser Blutparameter auf die maternale Körperkondition, die CH_4-Emissionen und LBW betrachtet werden.



Legende: BHB – ß-Hydroxybuttersäure; NEFA – Non-esterified fatty acids; GLDH – Glutamatdehydrogenase; CH_4 – Methan; BCS – Body Condition Score; BFT – Rückenfettdicke; BMT – Rückenmuskeldicke; EBW – Mutterschafgewicht; ML - Merinolandschaf; RH – Rhönschaf; CF – Coburger Fuchsschaf; CB – Kreuzungstier; Ca – Calcium; Mg – Magnesium; K – Kalium; Na – Natrium; P – Phophat; Zn – Zink; Fe – Eisen; Se – Selen; Cu – Kupfer; DG – tägliche Zunahme

Abbildung 9. Schematische Darstellung der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Rassen, Haltungsbedingungen (high input und low input) und Untersuchungsmerkmale sowie der Merkmalserfassung und der abgeleiteten Zuchtziele für Mutterschaf und Lamm.

Referenzen

Abdel-Mageed II und Abo El-Maaty AM 2012. The effect of backfat thickness at mating on the reproductive and productive performances of ewes. Small Ruminant Research 105, 148–153. doi:10.1016/j.smallrumres.2011.11.022.

Abdelnour SA, Abd El-Hack ME, Noreldin AE, Batiha GE, Beshbishy AM, Ohran H, Khafaga AF, Othman SI, Allam AA und Swelum AA 2020. High Salt Diet Affects the Reproductive Health in Animals: An Overview. Animals 10. doi:10.3390/ani10040590.

Aksoy Y, Ulutaş Z, Şen U, Şirin E und Şahin A 2016. Estimates of genetic parameters for different body weights andmuscle and fat depths of Karayaka lambs. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences 40, 13–20. doi:10.3906/vet-1504-16.

Baker SK 1999. Rumen methanogens, and inhibition of methanogenesis. Australian Journal of Agricultural Research 50, 1293–1298. doi:10.1071/AR99005.

Banos G, Clark EL, Bush SJ, Dutta P, Bramis G, Arsenos G, Hume DA und Psifidi A 2019. Genetic and genomic analyses underpin the feasibility of concomitant genetic improvement of milk yield and mastitis resistance in dairy sheep. PLoS ONE 14, e0214346. doi:10.1371/journal.pone.0214346.

Basarab JA, Beauchemin KA, Baron VS, Ominski KH, Guan LL, Miller SP und Crowley JJ 2013. Reducing GHG emissions through genetic improvement for feed efficiency. Effects on economically important traits and enteric methane production. Animal 7, 303–315. doi:10.1017/S1751731113000888.

Benedet A, Costa A, Marchi M de und Penasa M 2020. Heritability estimates of predicted blood β-hydroxybutyrate and nonesterified fatty acids and relationships with milk traits in early-lactation Holstein cows. Journal of Dairy Science 103, 6354-6363. doi:10.3168/jds.2019-17916.

Bickell SL, Revell DK, Toovey AF und Vercoe PE 2014. Feed intake of sheep when allowed ad libitum access to feed in methane respiration chambers. Journal of Animal Science 92, 2259–2264. doi:10.2527/jas.2013-7192.

Billa PA, Faulconnier Y, Larsen T, Leroux C und Pires JAA 2020. Milk metabolites as noninvasive indicators of nutritional status of mid-lactation Holstein and Montbéliarde cows. Journal of Dairy Science 103, 3133–3146. doi:10.3168/jds.2019-17466.

Binns SH, Cox IJ, Rizvi S und Green LE 2002. Risk factors for lamb mortality on UK sheep farms. Preventive Veterinary Medicine 52, 287–303. doi:10.1016/s0167-5877(01)00255-0.

Bishop SC und Stear MJ 1997. Modelling responses to selection for resistance to gastro-intestinal parasites in sheep. Animal Science 64, 469–478. doi:10.1017/S1357729800016088.

Borg RC, Notter DR und Kott RW 2009. Genetic analysis of ewe stayability and its association with lamb growth and adult production. Journal of Animal Science 87, 3515–3524. doi:10.2527/jas.2008-1623.

Bostedt H 2019a. Physiologie der Gravidität. In: Hartwig Bostedt, Martin Ganter, Theodor Hiepe (Hg.): Klinik der Schaf- und Ziegenkrankheiten. Aufl. 1. Stuttgart. Georg Thieme Verlag KG. S. 473–478.

Bostedt H 2019b. Physiologie des Neugeborenen. In: Hartwig Bostedt, Martin Ganter, Theodor Hiepe (Hg.): Klinik der Schaf- und Ziegenkrankheiten. Aufl. 1. Stuttgart. Georg Thieme Verlag KG. S. 600–611.

Breves G und Leonhard-Marek S 2010. Funktionen der Vormägen. In: Wolfgang von Engelhardt (Hg.): Physiologie der Haustiere, Aufl. 3. Stuttgart. Enke Verlag. S. 380–389.

Brito LF, McEwan JC, Miller S, Bain W, Lee M, Dodds K, Newman S-A, Pickering N, Schenkel FS und Clarke S 2017. Genetic parameters for various growth, carcass and meat quality traits in a New Zealand sheep population. Small Ruminant Research 154, 81–91. doi:10.1016/j.smallrumres.2017.07.011.

Bruckmaier R 2010. Laktation. In: Wolfgang von Engelhardt (Hg.): Physiologie der Haustiere, Aufl. 3. Stuttgart. Enke Verlag. S. 597–615.

Buitenhuis B, Poulsen NA, Larsen LB und Sehested J 2015. Estimation of genetic parameters and detection of quantitative trait loci for minerals in Danish Holstein and Danish Jersey milk. BMC Genetics 16, 52. doi:10.1186/s12863-015-0209-9.

Caldeira RM, Belo AT, Santos CC, Vazques MI und Portugal AV 2007. The effect of body condition score on blood metabolites and hormonal profiles in ewes. Small Ruminant Research 68, 233–241. doi:10.1016/j.smallrumres.2005.08.027.

Caldeira RM und Portugal AV 2007. Relationships of Body Composition and Fat Partition with Body Condition Score in Serra da Estrela Ewes. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 20, 1108–1114. doi:10.5713/ajas.2007.1108.

Conington J, Hosie B, Nieuwhof GJ, Bishop SC und Bünger L 2008. Breeding for resistance to footrot—the use of hoof lesion scoring to quantify footrot in sheep. Veterinary Research Communications 32, 583–589. doi:10.1007/s11259-008-9062-x.

Cranston LM, Kenyon PR, Corner-Thomas RA und Morris ST 2017. The potential interaction between ewe body condition score and nutrition during very late pregnancy and lactation on the performance of twin-bearing ewes and their lambs. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 30, 1270–1277. doi:10.5713/ajas.16.0641.

Danso AS, Morel PCH, Kenyon PR und Blair HT 2016. Relationships between prenatal ewe traits, milk production, and preweaning performance of twin lambs. Journal of Animal Science 94, 3527–3539. doi:10.2527/jas.2016-0337.

de Haas Y, Windig JJ, Calus MPL, Dijkstra J, Haan Md, Bannink A und Veerkamp RF 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. Journal of Dairy Science 94, 6122–6134. doi:10.3168/jds.2011-4439.

Denholm SJ, Sneddon AA, McNeilly TN, Bashir S, Mitchell MC und Wall E 2019. Phenotypic and genetic analysis of milk and serum element concentrations in dairy cows. Journal of Dairy Science 102, 11180–11192. doi:10.3168/jds.2019-16960.

Ellison MJ, Conant GC, Lamberson WR, Cockrum RR, Austin KJ, Rule DC und Cammack KM 2017. Diet and feed efficiency status affect rumen microbial profiles

of sheep. Small Ruminant Research 156, 12–19. doi:10.1016/j.smallrumres.2017.08.009.

eMissionCow 2020. https://www.emission-cow.de. Stand: 23.06.2020.

Eurostat 2020. Anzahl der Schafe in der Europäischen Union. https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=tag00017&plugin=1. Stand: 16.06.2020.

Fischer A 2003. Deutsche Schafrassen. In: Knut Strittmatter (Hg.): Schafzucht, Aufl. 1. Stuttgart. Eugen Ulmer GmbH & Co.. S. 88–118.

Früh R 2009. In: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (Hg.): Schafe auf dem Grünland gesund und leistungsfähig halten – Mineralstoffversorgung. Jena.

Fürll M 2014. Spezielle Untersuchung beim Wiederkäuer. In: Andreas Moritz (Hg.): Klinische Labordiagnostik in der Tiermedizin, Aufl. 7. Stuttgart, Schattauer GmbH. S. 755–765.

Fthenakis GC, Arsenos G, Brozos C, Fragkou IA, Giadinis ND, Giannenas I, Mavrogianni VS, Papadopoulos E und Valasi I 2012. Health management of ewes during pregnancy. Animal Reproduction Science 130, 198–212. doi:10.1016/j.anireprosci.2012.01.016.

Gardiner TD, Coleman MD, Innocenti F, Tompkins J, Connor A, Garnsworthy PC, Moorby JM, Reynolds CK, Waterhouse A und Wills D 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 PC, Craigon J, Hernandez-Medrano JH und Saunders N 2012. On-farm methane measurements during milking correlate with total methane production by individual dairy cows. Journal of Dairy Science 95, 3166–3180. doi:10.3168/jds.2011-4605.

Gernand E und Lenz H 2005. Using of ultrasound for estimation of carcass composition and prediction of breeding value for sheep. Archives Animal Breeding 48, 174–184. doi:10.5194/aab-48-174-2005.

Gernand E, Wassmuth R, Lenz H, Borstel UU von, Gauly M und König S 2008. Impact of energy supply of ewes on genetic parameters for fertility and carcass traits in Merino Long Wool sheep. Small Ruminant Research 75, 80–89. doi:10.1016/j.smallrumres.2007.09.004.

Goopy JP, Woodgate R, Donaldson A, Robinson DL und Hegarty RS 2011. Validation of a short-term methane measurement using portable static chambers to estimate daily methane production in sheep. Animal Feed Science and Technology 166-167, 219–226. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.012.

Goopy JP, Donaldson A, Hegarty R, Vercoe PE, Haynes F, Barnett M und Oddy VH 2014. Low-methane yield sheep have smaller rumens and shorter rumen retention time. British Journal of Nutrition 111, 578–585. doi:10.1017/S0007114513002936.

Griffiths KJ, Ridler AL, Heuer C, Corner-Thomas RA und Kenyon PR 2016. The effect of liveweight and body condition score on the ability of ewe lambs to successfully rear their offspring. Small Ruminant Research 145, 130–135. doi:10.1016/j.small-rumres.2016.11.001.

Hammond KJ, Crompton LA, Bannink A, Dijkstra J, Yáñez-Ruiz DR, O'Kiely P, Kebreab E, Eugène MA, Yu Z, Shingfield KJ, Schwarm A, Hristov AN und Reynolds CK 2016. 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.

Hessischer Verband für Schafzucht und -haltung e.V. 2019a. http://www.schafe-hessen.de/app/download/9963640/Merino-Landschaf_2019.pdf. Stand: 13.05.2020.

Hessischer Verband für Schafzucht und -haltung e.V. 2019b. http://www.schafe-hessen.de/app/download/9963723/Rh%C3%B6nschaf_2019.pdf. Stand: 13.05.2020.

Hessischer Verband für Schafzucht und -haltung e.V. 2019c. http://www.schafe-hessen.de/app/download/9963598/Coburger+Fuchsschaf_2019.pdf. Stand: 13.05.2020.

Hristov AN, Oh J, Firkins JL, Dijkstra J, Kebreab E, Waghorn G, Makkar HPS, Adesogan AT, Yang W, Lee C, Gerber PJ, Henderson B und Tricarico JM 2013. Special

topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. Journal of Animal Science 91, 5045–5069. doi:10.2527/jas.2013-6583.

Hristov AN, Oh J, Giallongo F, Frederick T, Weeks H, Zimmerman PR, Harper MT, Hristova RA, Zimmerman RS und Branco AF 2015. The Use of an Automated System (GreenFeed) to Monitor Enteric Methane and Carbon Dioxide Emissions from Ruminant Animals. Journal of Visualized Experiments 103, e52904. doi:10.3791/52904.

Humann-Ziehank E, Kietzmann M, Ganter M und Dühlmeier R 2019. Stoffwechselstörungen und Mangelkrankheiten. In: Hartwig Bostedt, Martin Ganter, Theodor Hiepe (Hg.): Klinik der Schaf- und Ziegenkrankheiten. Aufl. 1. Stuttgart. Georg Thieme Verlag KG. S. 184–210.

Hunter N, Goldmann W, Foster JD, Cairns D und Smith G 1997. Natural scrapie and PrP genotype: case-control studies in British sheep. The Veterinary Record 141, 137–140. doi:10.1136/vr.141.6.137.

Johnson DE und Ward GM 1996. Estimates of animal methane emissions. Environmental Monitoring and Assessment 42, 133–141. doi:10.1007/BF00394046.

Jonker A, Hickey SM, Rowe SJ, Janssen PH, Shackell GH, Elmes S, Bain WE, Wing J, Greer GJ, Bryson B, MacLean S, Dodds KG, Pinares-Patiño CS, Young EA, Knowler K, Pickering NK und McEwan JC 2018. Genetic parameters of methane emissions determined using portable accumulation chambers in lambs and ewes grazing pasture and genetic correlations with emissions determined in respiration chambers. Journal of Animal Science 96, 3031–3042. doi:10.1093/jas/sky187.

Kandel PB, Vanrobays M-L, Vanlierde A, Dehareng F, Froidmont E, Gengler N und Soyeurt H 2017. Genetic parameters of mid-infrared methane predictions and their relationships with milk production traits in Holstein cattle. Journal of Dairy Science 100, 5578–5591. doi:10.3168/jds.2016-11954.

Karagiannis I, Panousis N, Kiossis E, Tsakmakidis I, Lafi S, Arsenos G, Boscos C und Brozos C 2014. Associations of pre-lambing body condition score and serum β-

hydroxybutyric acid and non-esterified fatty acids concentrations with periparturient health of Chios dairy ewes. Small Ruminant Research 120, 164–173. doi:10.1016/j.smallrumres.2014.05.001.

Kenyon PR, Maloney SK und Blache D 2014. Review of sheep body condition score in relation to production characteristics. New Zealand Journal of Agricultural Research 57, 38–64. doi:10.1080/00288233.2013.857698.

König S, Simianer H und Willam A 2009. Economic evaluation of genomic breeding programs. Journal of Dairy Science 92, 382–391. doi:10.3168/jds.2008-1310.

Krahl R 2014. https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:2014-12-30_2144_Coburger_Fuchsschaf.jpg. Stand: 15.06.2020.

LEL, Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume, Schwäbisch Gmünd, ADD Trier, LANUV Düsseldorf, RP Gießen 2020. https://www.proplanta.de/markt-und-preis/agrarmarkt-berichte/aktuelle-schaf-preise-2020-kw-11_notierungen1584475603.html. Stand: 24.03.2020.

LEL, Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume, Schwäbisch Gmünd 2015. Schafreport Baden-Württemberg.

LfL, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2020. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/gruber_tabelle_fuetterung_milchkuehe_zuchtrinder_schafe_ziegen_lfl-information.pdf. Stand: 13.05.2020.

LLH, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen 2020. https://llh.hessen.de/tier/schafe-und-ziegen/. Stand: 13.05.2020.

Lipsky S, Brandt H, Lühken G und Erhardt G 2008. Analysis of prion protein genotypes in relation to reproduction traits in local and cosmopolitan German sheep breeds. Animal Reproduction Science 103, 69–77. doi:10.1016/j.anireprosci.2006.12.005.

Macé T, González-García E, Pradel J, Parisot S, Carrière F, Douls S, Foulquié D und Hazard D 2018. Genetic analysis of robustness in meat sheep through body weight and body condition score changes over time. Journal of Animal Science 96, 4501–4511. doi:10.1093/jas/sky318.

Matheson SM, Bünger L und Dwyer CM 2012. Genetic parameters for fitness and neonatal behavior traits in sheep. Behavior Genetics 42, 899–911. doi:10.1007/s10519-012-9562-x.

Moorby JM, Fleming HR, Theobald VJ and Fraser MD 2015. Can live weight be used as a proxy for enteric methane emissions from pasture-fed sheep? Scientific Reports 5, 17915. doi:10.1038/srep17915.

Morel PCH, Schreurs NM, Corner-Thomas RA, Greer AW, Jenkinson CMC, Ridler AL und Kenyon PR 2016. Live weight and body composition associated with an increase in body condition score of mature ewes and the relationship to dietary energy requirements. Small Ruminant Research 143, 8–14. doi:10.1016/j.smallrumres.2016.08.014.

Murray RM, Bryant AM und Leng RA 1976. Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep. British Journal of Nutrition 36, 1–14. doi:10.1079/BJN19760053.

Neville TL, Caton JS, Hammer CJ, Reed JJ, Luther JS, Taylor JB, Redmer DA, Reynolds LP und Vonnahme KA 2010. Ovine offspring growth and diet digestibility are influenced by maternal selenium supplementation and nutritional intake during pregnancy despite a common postnatal diet. Journal of Animal Science 88, 3645–3656. doi:10.2527/jas.2009-2666.

Paganoni B, Rose G, Macleay C, Jones C, Brown DJ, Kearney G, Ferguson M und Thompson AN 2017. More feed efficient sheep produce less methane and carbon dioxide when eating high-quality pellets. Journal of Animal Science 95, 3839–3850. doi:10.2527/jas2017.1499.

Pickering NK, Chagunda MGG, Banos G, Mrode R, McEwan JC und Wall E 2015. Genetic parameters for predicted methane production and laser methane detector measurements. Journal of Animal Science 93, 11–20. doi:10.2527/jas.2014-8302.

Pinares-Patiño CS, Hickey SM, Young EA, Dodds KG, MacLean S, Molano G, Sandoval E, Kjestrup H, Harland R, Hunt C, Pickering NK und McEwan JC 2013. Heritability estimates of methane emissions from sheep. Animal 7, 316–321. doi:10.1017/S1751731113000864.

Pinares-Patiño CS, Holmes CW, Lassey KR und Ulyatt MJ 2008. Measurement of methane emission from sheep by the sulphur hexafluoride tracer technique and by the calorimetric chamber: failure and success. Animal 2, 141–148. doi:10.1017/S1751731107000857.

Pinares-Patiño CS, Lassey KR, Martin RJ, Molano G, Fernandez M, MacLean S, Sandoval E, Luo D und Clark H 2011. Assessment of the sulphur hexafluoride (SF6) 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.

Reintke J, Brügemann K, Yin T, Engel P, Wagner H, Wehrend A und König S 2020. Assessment of methane emission traits in ewes using a laser methane detector: genetic parameters and impact on lamb weaning performance. Archives Animal Breeding 63, 113–123. doi:10.5194/aab-63-113-2020.

Robinson DL und Oddy VH 2016. Benefits of including methane measurements in selection strategies. Journal of animal science 94, 3624–3635. doi:10.2527/jas.2016-0503.

Rodehutscord M und Petry H 2010. Energieumsatz. In: Wolfgang von Engelhardt (Hg.): Physiologie der Haustiere, Aufl. 3. Stuttgart. Enke Verlag. S. 471–474.

Rosales Nieto CA, Meza-Herrera CA, Moron Cedillo FdJ, Flores Najera MdJ, Gámez Vázquez HG, Ventura Pérez FdJ und Liu S 2016. Vitamin E supplementation of undernourished ewes pre- and post-lambing reduces weight loss of ewes and increases weight of lambs. Tropical Animal Health and Production 48, 613–618. doi:10.1007/s11250-016-1006-9.

Russel AJF, Doney JM und Gunn RG 1969. Subjective assessment of body fat in live sheep. The Journal of Agricultural Science 72, 451–454. doi:10.1017/S0021859600024874.

Sanson DW, West TR, Tatman WR, Riley ML, Judkins MB und Moss GE 1993. Relationship of Body Composition of Mature Ewes with Condition Score and Body Weight. Journal of Animal Science 71, 1112–1116. doi:10.2527/1993.7151112x.

Shackell GH, Cullen NG und Greer GJ 2011. Genetic parameters associated with adult ewe liveweight and body condition. Proceeding of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics 19, 103–106.

Shands CG, McLeod B, Lollback ML, Duddy G, Hatcher S und O'Halloran WJ 2009. Comparison of manual assessments of ewe fat reserves for on-farm use. Animal Production Science 49, 630–636. doi:10.1071/AN09031.

Shumbusho F, Raoul J, Struc JM, Palhiere I und Elsen JM 2013. Potential benefits of genomic selection on genetic gain of small ruminant breeding programs. Journal of Animal Science 91, 3644–3657. doi:10.2527/jas2012-6205.

Snowder GD, Knight AD, van Vleck LD, Bromley CM und Kellom TR 2001. Usefulness of subjective ovine milk scores: I. Associations with range ewe characteristics and lamb production. Journal of Animal Science 79, 811–818. doi:10.2527/2001.794811x

Spektrum 2018. https://www.spektrum.de/lexikon/ernaehrung/energiebilanz/2491%20am%2018.04.20. Stand: 13.05.2020.

Statista 2020a. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/385186/umfrage/produktion-von-schaffleisch-in-deutschland/. Stand: 24.03.2020

Statista 2020b. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/215595/umfrage/entwicklung-der-importe-von-schaf-und-ziegenfleisch-nach-deutschland/. Stand: 24.03.2020.

Statista 2020c. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/177483/umfrage/pro-kopf-verbrauch-von-ziegen-und-schaffleisch-in-deutschland/. Stand: 13.05.2020.

Tsiamadis V, Banos G, Panousis N, Kritsepi-Konstantinou M, Arsenos G und Valergakis GE 2016a. Genetic parameters of calcium, phosphorus, magnesium, and potassium serum concentrations during the first 8 days after calving in Holstein cows. Journal of Dairy Science 99, 5535–5544. doi:10.3168/jds.2015-10787.

Tsiamadis V, Banos G, Panousis N, Kritsepi-Konstantinou M, Arsenos G und Valergakis GE 2016b. Genetic parameters of subclinical macromineral disorders and major clinical diseases in postparturient Holstein cows. Journal of Dairy Science 99, 8901–8914. doi:10.3168/jds.2015-10789.

Tveit B, Svendsen M und Hove K 1991. Heritability of Hypocalcemia at First Parturition in Norwegian Cattle: Genetic Correlations with Yield and Weight. Journal of Dairy Science 74, 3561–3567. doi:10.3168/jds.S0022-0302(91)78548-2.

Umweltbundesamt 2019. https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forst-wirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#emissionen-aus-der-landwirtschaft-im-jahr-2017. Stand: 13.05.2020.

Wikipedia 2020. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7a/Rhoen-schaf.jpg. Stand: 15.06.2020.

Williams SRO, Moate PJ, Hannah MC, Ribaux BE, Wales WJ und Eckard RJ 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, 265–276. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.08.013.

Wolc A, Barczak E, Wójtowski J, Ślósarz P und Szwaczkowski T 2011. Genetic parameters of body weight in sheep estimated via random regression and multi-trait animal models. Small Ruminant Research 100, 15–18. doi:10.1016/j.smallrum-res.2011.05.009.

KAPITEL 2

Dieses Kapitel basiert auf folgender Publikation:

Reintke, J., Brügemann, K., Wagner, H., Engel, P., Wehrend, A., König, S. 2020

Phenotypic relationships between maternal energy metabolism and lamb body weight development during lactation for pure- and crossbred sheep populations in low and high input production systems

Small Ruminant Research 183: 106037

https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.106037

Eigener Anteil an der Publikation:

Studienplanung:	wesentlich
Datenaufnahme:	weitestgehend eigenständig
Statistische Auswertung:	weitestgehend eigenständig
Manuskripterstellung:	weitestgehend eigenständig

Small Ruminant Research 183 (2020) 106037

Contents lists available at ScienceDirect

Small Ruminant Research

journal homepage: www.elsevier.com/locate/smallrumres

Phenotypic relationships between maternal energy metabolism and lamb body weight development during lactation for pure- and crossbred sheep populations in low and high input production systems

J. Reintke[a,*], K. Brügemann[a], H. Wagner[b], P. Engel[a], A. Wehrend[b], S. König[a]

[a] Institute of Animal Breeding and Pet Genetics, University of Giessen, Ludwig St. 21B, 35390 Giessen, Germany
[b] Clinic for Obstetrics, Gynaecology and Andrology of Large and Small Animals with Veterinary Ambulance, University of Giessen, Frankfurter St. 106, 35392 Giessen, Germany

ARTICLE INFO

Keywords:
Sheep breeds
Maternal metabolic traits
Lamb body weight
Production system diversity

ABSTRACT

There is an increasing economic pressure in sheep production. Hence, it is imperative to use all available tools contributing to improvements in lamb survival. In this regard, there is a lack of studies addressing the impact of maternal body condition traits on lamb performances during lactation. Specifically, the focus of the present study was to analyse associations between ewe traits reflecting maternal energy metabolism and lamb body weight (LBW), separately in a low and in a high input production system. The dataset considered 199 Merinoland- (ML) and 45 Rhönsheep (RH) ewes from the high input production system (> 33% concentrates in the ration), as well as 47 Coburger Fuchssheep (CF), 78 RH and eight crossbred (CB) ewes from the low input production system (< 33% concentrates in the ration). The ewe traits were: Body weight (EBW), body condition score (BCS; 1.0 = emaciated to 5.0 = obese), back fat thickness (BFT), back muscle thickness (BMT) and daily weight loss (WL). The lamb traits were: LBW, birth weight (BW), weight at week 3, 6, 9 and 12 and weaning weight (3 W W, 6 W W, 9 W W, 12 W W and WW, respectively), and the corresponding daily gains during these periods. In the high input system (for both breeds ML and RH), a decrease in maternal fat deposits was associated with a continuous gain in LBW. Highest LBW was associated with a moderate ewe BCS of 3.5. The maternal body weight class of ML ewes in the high input system significantly ($P < 0.01$) influenced BW and WW from all points in time. Lambs from ML ewes with > 100 kg EBW were 1.41 kg heavier at weaning than lambs from ML ewes < 85 kg EBW. Under low input conditions, lambs from dams with BFT > 3 mm had significantly greater 12 W W (2.63 kg, $P < 0.01$) and 12DG (0.07 kg, $P < 0.01$), compared to lambs from ewes with lower BFT. Body weights for lambs from ewes with BCS between 1.5 and 2.5 were greater than for lambs from ewes with a BCS of 3.0 or higher. Ewe WL had highly significant ($P < 0.001$) influence on LBW. Results from the present study indicated different impact of maternal energy metabolism traits on LBW development, depending on the breed and on the production system characteristics. Hence, also from a breeding perspective (i.e., development of sheep breeding goals), breed x production – system characteristics should be taken into consideration.

1. Introduction

Lamb meat production is one of the main sources of income in the sheep production systems. In Germany, depending on the breed the average number of lambs born per ewe ranges between 1.3 and 3.0 (Tierseuchenkasse Nordrhein-Westfalen, 2014). The mean rate of total lamb losses in Southern Germany is around 16% (LEL, 2015). Hence, from the perspective of farm economy, it is imperative to use all available tools to improve lamb survival. Most of the lamb losses occur during the first weeks after lambing (Green and Morgan, 1994). Risk factors include hypothermia (Henderson, 2007), low birth weight (Nash et al., 1996), inadequate colostrum intake and quality (Torres-Rovira et al., 2017), insufficient grooming behaviour of the ewe (Nowak and Poindron, 2006), and management associated factors like the utilisation of vaccination programs against clostridia (Binns et al., 2002), but also the individual farmer's expertise (Holmøy et al., 2012). Conventional

* Corresponding author.
E-mail addresses: Jessica.Reintke@agrar.uni-giessen.de (J. Reintke), Kerstin.Bruegemann@agrar.uni-giessen.de (K. Brügemann), Henrik.W.Wagner@vetmed.uni-giessen.de (H. Wagner), Petra.Engel@agrar.uni-giessen.de (P. Engel), Axel.Wehrend@vetmed.uni-giessen.de (A. Wehrend), Sven.Koenig@agrar.uni-giessen.de (S. König).

https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.106037
Received 17 January 2019; Received in revised form 21 November 2019; Accepted 8 December 2019
Available online 10 December 2019
0921-4488/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

management strategies to improve lamb survival, e.g., utilisation of milk supplements, or hand-feeding, are time consuming and expensive.

With focus on the ewe, we suggest the identification of appropriate breeding traits indicating their rearing ability, i.e., traits which are associated with lamb growth development and lamb survival. In this regard, Binns et al. (2002) emphasised the importance of body condition score (BCS), because BCS influenced postnatal lamb mortality rates. Body condition score is a trait with a high inter-observer agreement under field conditions (Shands et al., 2009), and consequently, was a better predictor for body fat and muscling scores than ewe body weight (EBW) measurements (Caldeira and Portugal, 2007; Sanson et al., 1993). From a genetics perspective, BCS is a moderate heritability trait (Borg et al., 2009; Shackell et al., 2011), suggesting the inclusion of BCS into overall breeding goals.

A further maternal energy supply indicator is back fat thickness (BFT). Back fat is an energy depot, especially important in harsh environments representing low fodder energy contents for ewe nutrition (Gernand et al., 2008). Decaluwé et al. (2013) identified associations between BFT reduction during gestation and an increased ewe colostrum yield at the beginning of lactation. Gernand et al. (2008) and Brito et al. (2017) estimated moderate heritabilities for BFT and for back muscle thickness (BMT) in lambs. To our knowledge, there is a substantial lack of phenotypic and genetic association studies additionally considering BFT and BMT from ewes. Caldeira and Portugal (2007) analysed mutual relationships among BFT, BMT, EBW and BCS, but they did not address association analyses across generations, i.e., the impact on lamb body weight development (LBW). Furthermore, studies focussing on BCS, BFT, BMT and EBW in ewes were conducted in commercial breeds, predominately kept in high input production systems, whereas local and robust breeds, adapted to harsh environments, are not usually considered. However, the future of sheep production in Germany aims on keeping local and robust sheep breeds in low input production systems, reflecting harsh environments.

The aim of the present study was to infer associations between maternal energy metabolism indicators (i.e., traits from the ewe) on LBW development. In this regard, we implemented a research design in a low and a high input production system. The different production systems traditionally utilise different sheep breed, i.e. with a focus on local robust breeds in the low input system and commercial breeds in the high input system. Hence, it was not our objective to study breed by system interactions. Instead, we were interested to infer the physiological mechanisms for the different production system characteristics.

2. Material and methods

2.1. Characterisation of the high input production system

The sheep research station from Giessen University "Oberer Hardthof" is located 200 m above sea level, in the centre of the German federal state Hesse. The average annual temperature is 8.8 °C, and the average precipitation amount is 695 mm per year. The pasture-based production system comprises 70 ha and is used as a flock including 630 ewes, seven rams and 98 hoggets of the two breeds Merinoland (ML) and Rhönsheep (RH).

The lambing period was from December 2016 until February 2017. During this period, all animals were housed in a stable on straw and solid manure. Based on their lamb age, ewes were allocated into different groups (90 ewes per group). At an age of 21–28 days, lambs had ad libitum access to concentrates. The mean lamb weaning age was 63.43 ± 5.59 days with an average body weight of 26.34 ± 4.88 kg. The flock received hay ad libitum. The hay quality was as follows: 90.3% dry matter (DM), 40.2% crude fibre, 6.8% crude protein, 1.3% crude lipid and 7.8 MJ metabolizable energy (ME)/kg in DM. During the last third of gestation, ewes received additional concentrates up to 1 kg per ewe and day. The concentrates composed barley, wheat, rapeseed meal extract, wheat bran and triticale (6.8% crude fibre, 18% crude protein, 2.6% crude lipid, 10.8 ME MJ/kg DM). The calculated daily ration for a twin suckling ewe with an average body weight of 85 kg contained 1.8 kg hay and 900 g concentrates (23.76 MJ ME/ewe and day). Sheep had free access to a mineral and a salt lick. The lambs were kept inside the stable during the rearing period.

2.2. Characterisation of the low input production system

The farm is located 643 m above sea level in the North of the federal state Hesse. The average annual temperature is 7.4 °C, and the average annual precipitation amount is 827 mm (Climate-data.org., 2018). The farm is surrounded by an area of 160 ha used for crop cultivation and as sheep pasture. Before and after trait recording, the flock was shepherded on pasture. The flock consisted of 429 ewes, eight rams and 75 hoggets of RH, Coburger Fuchssheep (CF) and crossbred sheep (CB). Only during the lambing period from March 2017 to May 2017, the flock was housed in a stable on straw and solid manure.

The animals had ad libitum access to grass silage (52.87% DM, 30.54% crude fibre, 8.75% crude protein, 2.83% crude lipid, 9.15 ME MJ/ kg DM). During the first six weeks postpartum, ewes with one suckling lamb received 200 g, and the ewes rearing twins 500 g daily concentrates. The concentrates composed 72% barley, 25% beans (7.09% crude fibre, 14.41% crude protein, 2.72% crude lipid, 12.82 ME MJ/kg DM) and 3% mineral supplement. The average lamb weaning age was 109.65 ± 6.65 days with a mean body weight of 22.71 ± 5.39 kg. During the rearing period, lambs were kept on pasture.

2.3. Animals and trait recording

2.3.1. High input system

On the high input farm, data recording spanned a period from January to April 2017. The study considered 244 ewes (199 ML and 45 RH ewes) and their 350 lambs (283 ML, 67 RH). The age of ML ewes ranged from 22.28–95.24 months (mean = 49.90 ± 17.92 months). ML ewes were from parities 1–7 (mean = 3.14 ± 1.60). The mean age for RH ewes was 47.85 ± 15.60 months (range: 22.34–85.09 months), and they represented parities 1–5 (mean = 2.85 ± 1.22). The ewes were assigned to two different groups, depending on the lambing date. The first group included 163 ewes (122 ML, 41 RH) and 236 lambs (175 ML, 61 RH), born between December 23, 2016 to January 14, 2017. The ewe traits considered in group 1 of the high input system were: EBW in kilogram (kg) (digital scale: Model 703, TRU-TEST Group, Auckland, New Zealand), BCS, daily weight loss class (WL) depending on the ewe's breed (ML: ≥ 120 g WL/d; 0 − 119 g WL/d; no WL or gain in weight; RH: ≥ 100 g WL/d; < 100 g WL/d) and body weight class (ML: < 90 kg EBW; 90 − 100 kg EBW; > 100 kg EBW; RH: < 65 kg EBW; 65 − 75 kg EBW; > 75 kg EBW). BCS was assessed by palpating the transverse and spinous processes of the lumbar region around the backbone. Scores ranged on a scale from 1.0 (emaciated) to 5.0 (obese) with increments of 0.5 (Russel et al., 1969). The lamb traits of interest in group 1 were: LBW in the course of lactation (n = 350), birth weight (BW, n = 350), 3-weeks-weight (3 W W, n = 151) (14–28 days of age), daily weight gain from birth to week three (3DG, n = 151), 6-weeks-weight (6 W W, n = 249) (28–42 days of age), daily weight gain from week three to week six (6DG, n = 249), weaning-weight (WW, n = 333) (42–75 days of age) and daily weight gain from week six until weaning (WDG, n = 333). The numbers of lambs considered per period deviated partially from the total number of lambs within this study (n = 350), because of the strict restrictions for defined age classes.

The second group from the high input system consisted of 81 ewes (77 ML, 4 RH) and 114 lambs (108 ML, 6 RH), born between January 15, 2017 to February 17, 2017. Trait recording was in analogy with group 1. Additional traits for ewes in group 2 were BFT and BMT (*Musculus longissimus dorsi*) in millimeter (mm) measured at the right

Table 1
Phenotypic correlations between ewe body weight (EBW), ewe body condition score (BCS), ewe back fat thickness (BFT) and ewe back muscle thickness (BMT) (high input production system).

		Phenotypic correlations		
Breed	Trait	BCS	BFT	BMT
ML	EBW	0.60	0.48	0.28
	BCS		0.43	0.35
	BFT			ns
RH	EBW	0.48	ns	0.64
	BCS		0.46	ns
	BFT			ns

ML, Merinolandsheep; RH, Rhönsheep; ns, P > 0.05.

Table 2
Phenotypic correlations between ewe body weight (EBW), ewe body condition score (BCS), ewe back fat thickness (BFT) and ewe back muscle thickness (BMT) (low input production system).

		Phenotypic correlations		
Breed	Trait	BCS	BFT	BMT
CF	EBW	0.64	ns	0.30
	BCS		ns	0.30
	BFT			0.55
CB	EBW	0.39	ns	ns
	BCS		ns	ns
	BFT			0.67
RH	EBW	0.51	ns	0.24
	BCS		ns	0.37
	BFT			0.52

CF, Coburger Fuchssheep; CB, crossbred sheep; RH, Rhönsheep; ns, P > 0.05.

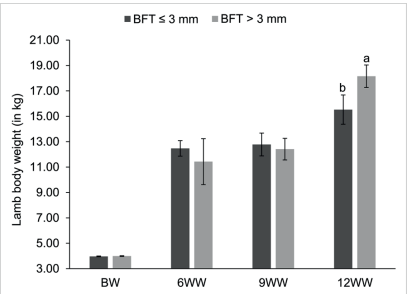


Fig. 1. Least-Squares-Means for lamb birth weight (BW), 6-weeks-weight (6 W W), 9-weeks-weight (9 W W) and 12-weeks-weight (12 W W) in dependency of the ewe back fat thickness class (model 4; low input production system). Means with different superscripts (a–b) indicate significant trait differences (P < 0.05).

side directly behind the 13th rip, using a mobile ultrasound transducer (EasiScan™ ultrasound scanner, 4.5–8.5 MHz linear, BCF Technology Ltd., Bellshill, Scotland). A disinfectant solution (Spitacid®, Ecolab, Monheim am Rhein, Germany) was used to improve the acoustic coupling. For both groups, the interval between consecutive measurements comprised three weeks, implying four repeated measurements per ewe and lamb for all traits. Descriptive statistics for the recorded traits are given in Supplementary Table 1.

2.3.2. Low input system

On the field farm representing a low input production system, data

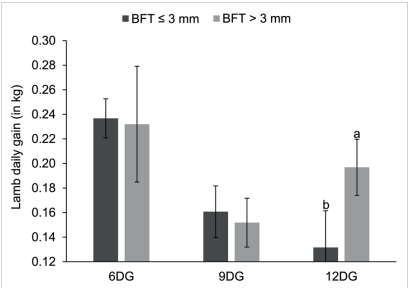


Fig. 2. Least-Squares-Means for lamb daily gain between birth and week six (6DG), week six and week nine (9DG) and between week nine and week 12 (12DG) in dependency of the ewe back fat thickness class (model 4; low input production system). Means with different superscripts (a–b) indicate significant trait differences (P < 0.05).

recording spanned a period from March to July 2017. The present study considered 133 ewes (47 CF, 78 RH and 8 CB ewes) and their 147 lambs (48 RH and 99 CB lambs). The following F1 crossbred lambs were included in the present study: CF ewe x DO ram (n = 54), CB ewe x DO ram (n = 8), CB ewe x IDF ram (n = 2), RH ewe x RH ram (n = 48) and RH ewe x IDF ram (n = 35). The age structure of the ewes was 70.53 ± 13.00 months for CF (range: 47.80–122.81 months), 51.83 ± 19.11 months for CB (range: 24.44–85.26 months) and 43.95 ± 15.70 months for RH (range: 22.74–85.55 months).

The first measurement was carried out within the first week after parturition considering the following ewe traits: EBW, BCS, BFT, BMT, WL depending on the breed (CF: ≥ 40 g WL/d; < 40 g WL/d; RH: ≥ 25 g WL/d; < 25 g WL/d; CB: > 30 g WL/d; ≤ 30 g WL/d) and body weight class (≤ 42 kg EBW, 43 – 48 kg EBW, > 48 kg EBW). The lamb traits were: LBW (n = 147), BW (n = 147), 6 W W (14–42 days, n = 96), 6DG (n = 96), 9-weeks-weight (9 W W) (42–70 days, n = 139), daily gain from week six to week nine (9DG, n = 139), 12-weeks-weight (12 W W, n = 147) (70–100 days), daily gain from week nine to week 12 (12DG, n = 147), WW (> 100 days, n = 124) and daily gain from week 12 until weaning (WDG, n = 124) (digital scale: Model PS 1000, Brecknell Scales, Fairmont, USA). The numbers of lambs considered per period partially deviated from the total number of lambs (n = 147), because of the strict restrictions for defined age classes. Repeated measurements considered intervals from three to four weeks, implying five observations per ewe and lamb for all traits. Descriptive statistics for the recorded traits are given in Supplementary Table 2.

2.4. Statistical analysis

Phenotypic correlations and mixed model analyses were considered to infer trait associations among ewe traits, and between ewe and lamb traits. In this regard, the software package SAS Studio Version 3.71 (SAS, 2017), was used. For mixed model analyses, the defined covariance and variance structure was “variance components” (VC), being the default setting in “proc mixed” applications. For the estimation of variance components, restricted maximum likelihood (REML) methodology was applied. Data of bottle-fed lambs from both farms were excluded from the analyses.

2.4.1. High input production system

The following linear mixed model (1) was used to assess the effect of ewe breed and BCS on LBW, and to analyse the dynamic impact of ewe WL on LBW in the course lactation:

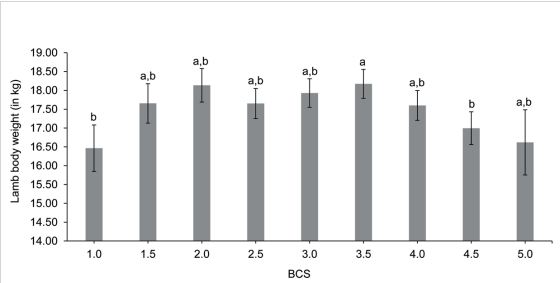


Fig. 3. Least-Squares-Means for lamb body weight (LBW) in dependency of the ewe body condition score (BCS) (model 1; high input production system). Means with different superscripts (a–b) indicate significant trait differences (P < 0.05).

$$y_{ijklmnop} = \mu + lnr_i + birthtype_j + sex_k + BCS_l + WL_m + WL_m(lamb\ age) + L_n + M_o + e_{ijklmnop} \quad (1)$$

where $y_{ijklmnop}$ was the *ijklmnop*-th observation for LBW; μ was the overall mean; lnr_i was the fixed effect for the *i*-th lactation number (1–7); $birthtype_j$ was the fixed effect for the *j*-th birth type of lamb (singleton, twin, triplet); sex_k was the fixed effect for the *k*-th sex of the lamb (m, f); BCS_l was the fixed effect for the *l*-th BCS of the ewe (1–5, with increments of 0.5); WL_m was the fixed effect for the *m*-th WL/d depending on the breed (ML: ≥ 120 g WL/d; 0 – 119 g WL/d; no WL or gain in weight; RH: ≥ 100 g WL/d; < 100 g WL/d). The fixed regression for the age of lamb (0–75 days) within WL_m was modelled using Legendre polynomials of third order. L_n was the random effect of the *n*-th lamb; M_o was the random effect of the *o*-th ewe; $e_{ijklmnop}$ was the random residual effect. The different interactions of fixed effects (birth type, lactation number, BCS and sex) were tested, but they were not significant (P > 0.05).

The following model (2) was used to analyse the influence of ewe breed, BCS and body weight class on the lamb traits BW, 3 W W, 3DG, 6 W W, 6DG, WW and WDG. Thus, with focus on same traits from different periods, we aimed on detailed studies of physiological mechanisms with aging

$$y_{ijklmnop} = \mu + lnr_i + birthtype_j + sex_k + BCS_l + weightclass_m{*}breed_n + breed_n + season_o + e_{ijklmnop} \quad (2)$$

where $y_{ijklmnop}$ was the *ijklmnop*-th observation for the trait (BW, 3 W W, 3DG, 6 W W, 6DG, WW, WDG); μ was the overall mean; lnr_i was the fixed effect for *i*-th lactation number (1–7); $birthtype_j$ was the fixed effect for *j*-th birth type of lamb (singleton, twin, triplet); sex_k was the fixed effect for *k*-th sex of the lamb (m, f); BCS_l was the fixed effect for the *l*-th BCS of the ewe (1–5, with increments of 0.5); $weight\text{-}class_m{*}breed_n$ was the interaction between the *m*-th ewe's body weight class (ML: < 90 kg EBW; 90 – 100 kg EBW; > 100 kg EBW; RH: < 65 kg EBW; 65 – 75 kg EBW; > 75 kg EBW) and the *n*-th ewe's breed (ML, RH); $breed_n$ was the fixed effect for the *n*-th ewe's breed (ML, RH); $season_o$ was the fixed effect for the *o*-th birth season for the lamb was born in (December 24, 2016 to December 30, 2016; December 31, 2016 to January 6, 2017; January 7, 2017 to February 18, 2017); $e_{ijklmnop}$ was the random residual effect. The interaction term between body weight class and breed was included, because RH and ML differed distinctively in frame and body weight.

2.4.2. Low input production system

The following linear mixed model (3) was used to assess the impact of ewe breed, BCS and WL on LBW during lactation:

$$y_{ijklmnop} = \mu + agecl_i + birthtype_j{*}sex_k + BCS_l + WL_m + WL_m(lamb\ age) + L_n + M_o + e_{ijklmnop} \quad (3)$$

where $y_{ijklmnop}$ was the *ijklmnop*-th observation for LBW; μ was the overall mean; $agecl_i$ was the fixed effect for the *i*-th age class of the ewe (< 48 months; 48–62 months, > 62 months); $birthtype_j{*}sex_k$ was the fixed effect for the interaction between *j*-th birth type of lamb (singleton, twin) and *k*-th sex of the lamb (m, f); BCS_l was the fixed effect for the *l*-th BCS of the ewe (1–4, with increments of 0.5); WL_m was the fixed effect for the *m*-th WL/d depending on the breed (CF: ≥ 40 g WL/d; < 40 g WL/d; RH: ≥ 25 g WL/d; < 25 g WL/d; CB: > 30 g WL/d; ≤ 30 g WL/d). The fixed regression for the age of lamb (0–120 days) within WL_m was modelled using Legendre polynomials of third order. L_n was the random effect of the *n*-th lamb; M_o was the random effect of the *o*-th ewe and $e_{ijklmnop}$ was the random residual effect.

To assess the influence of ewe breed, BCS, body weight class and BFT class on the lamb traits BW, 6 W W, 6DG, 9 W W, 9DG, 12 W W, 12DG, WW, WDG the following model (4) was defined:

$$y_{ijklmnopq} = \mu + agecl_i + birthtype_j + sex_k + BCS_l + weightclass_m + breed_n + season_o + bfcl_p + e_{ijklmnopq} \quad (4)$$

where $y_{ijklmnopq}$ was the *ijklmnopq*-th observation for the trait (BW, 6 W W, 6DG, 9 W W, 9DG, 12 W W, 12DG, WW); μ was the overall mean; $agecl_i$ was the fixed effect for the *i*-th age class of the ewe; $birthtype_j$ was the fixed effect for the j-th birth type of lamb (singleton, twin); sex_k was the fixed effect for *k*-th sex of the lamb (m, f); BCS_l was the fixed effect for the of the *l*-th BCS of the ewe (1–4, with increments of 0.5); $weight\ class_m$ was the fixed effect for the *m*-th ewe's body weight class (≤ 42 kg EBW, 43 – 48 kg EBW, > 48 kg EBW); $breed_n$ was the fixed effect for the *n*-th ewe's breed (CF, RH, CB); $season_o$ was the effect for the *o*-th birth season for the lamb (March 5, 2017 to April 3, 2017; April 4, 2017 to April 11, 2017; April 11, 2017 to May 3, 2017); $bfcl_p$ was the fixed effect for the *p*-th BFT class (≤ 3 mm, > 3 mm); $e_{ijklmnopq}$ was the random residual effect.

3. Results

3.1. Phenotypic correlations between ewe traits

The phenotypic correlations for the high input production system are given in Table 1. The positive correlation between BCS and BFT was due a thicker fat deposit or a thicker muscle layer around the backbone in the lumbar region. BCS was positively correlated with EBW in ML, indicating a higher BCS for heavier ewes.

Table 2 shows the phenotypic correlations between maternal traits for the low input production system. Similarly to the high input production system, heavier CF and RH ewes had a higher BCS and BMT under low input conditions.

Table 3
Least-Squares-Means for birthweight (BW), 3-weeks-weight (3 W W), 6-weeks-weight (6 W W) and weaning weight (WW) of the lamb (model 2; high input production system).

Effect	N	BW (in kg)	3 W W (in kg)	6 W W (in kg)	WW (in kg)
Sex of lamb		***	ns	*	***
Male	509	5.10 ± 0.07 [a]	12.02 ± 0.63	14.21 ± 0.45 [a]	25.46 ± 0.39 [a]
Female	640	4.84 ± 0.07 [b]	11.80 ± 0.61	13.56 ± 0.44 [b]	23.55 ± 0.39 [b]
Birth type of lamb		***	***	***	***
1	337	5.87 ± 0.07 [a]	13.93 ± 0.53 [a]	16.34 ± 0.47 [a]	27.73 ± 0.39 [a]
2	758	4.99 ± 0.06 [b]	10.58 ± 0.50 [b]	13.21 ± 0.36 [b]	23.43 ± 0.34 [b]
3	54	4.05 ± 0.12 [c]	11.21 ± 1.17 [b]	12.10 ± 0.81 [b]	22.36 ± 0.65 [b]
Lactation no.		***	**	ns	**
1	173	4.85 ± 0.08 [b]	10.41 ± 0.72 [b]	14.77 ± 0.57	24.19 ± 0.45 [b]
2	329	4.99 ± 0.07 [b,c]	12.01 ± 0.69 [a]	14.06 ± 0.50	25.36 ± 0.36 [a,b]
3	197	4.87 ± 0.07 [b]	12.43 ± 0.77 [a]	13.77 ± 0.53	24.73 ± 0.39 [a,b]
4	226	5.17 ± 0.08 [a,c]	12.72 ± 0.74 [a]	13.80 ± 0.55	25.73 ± 0.41 [a]
5	119	5.32 ± 0.09 [a]	12.77 ± 0.65 [a]	13.31 ± 0.66	25.01 ± 0.47 [a,b]
6	97	5.16 ± 0.10[a,b,c]	12.94 ± 1.03 [a,b]	13.59 ± 0.65	25.39 ± 0.54 [a,b]
7	8	4.44 ± 0.28 [b,c]	10.07 ± 1.57 [a,b]	nd	21.14 ± 1.49 [b]
Ewe BCS		*	ns	ns	*
1.0	24	4.72 ± 0.17	9.28 ± 1.32	12.18 ± 1.76	22.13 ± 0.91 [b]
1.5	40	5.19 ± 0.13	12.49 ± 1.21	13.29 ± 1.15	24.53 ± 0.71 [a,b]
2.0	74	5.02 ± 0.11	13.01 ± 1.13	13.28 ± 0.74	25.37 ± 0.57 [a]
2.5	161	5.07 ± 0.08	12.70 ± 0.96	14.53 ± 0.50	25.25 ± 0.43 [a]
3.0	273	4.90 ± 0.07	12.74 ± 0.70	14.67 ± 0.41	24.43 ± 0.39 [a,b]
3.5	270	5.05 ± 0.08	11.71 ± 0.67	14.86 ± 0.47	24.98 ± 0.42 [a]
4.0	202	4.90 ± 0.08	11.98 ± 0.77	14.28 ± 0.49	24.74 ± 0.45 [a,b]
4.5	97	4.79 ± 0.10	10.62 ± 0.91	14.09 ± 0.49	24.29 ± 0.56 [a,b]
5.0	8	5.10 ± 0.28	12.64 ± 1.57	13.78 ± 1.76	24.82 ± 1.51 [a,b]
Ewe weight class		**	ns	*	**
ML < 85 kg	313	5.38 ± 0.08 [b]	13.09 ± 0.57 [a]	14.42 ± 0.52 [a]	26.31 ± 0.43 [b]
ML 85 – 100 kg	299	5.58 ± 0.08 [a]	13.47 ± 0.59 [a]	14.87 ± 0.48 [a]	27.26 ± 0.41 [a,b]
ML > 100 kg	322	5.61 ± 0.08 [a]	13.07 ± 0.51 [a]	16.04 ± 0.52 [a]	27.72 ± 0.41 [a]
RH < 65 kg	64	4.37 ± 0.12 [c]	11.56 ± 1.25 [a,b]	11.63 ± 0.83 [b]	21.79 ± 0.64 [c]
RH 65 – 75 kg	73	4.55 ± 0.12 [c]	11.01 ± 1.28 [a,b]	12.61 ± 0.67 [b]	21.22 ± 0.64 [c]
RH > 75 kg	68	4.33 ± 0.12 [c]	9.26 ± 1.34 [b]	13.74 ± 0.68 [b]	22.73 ± 0.62 [c]
Ewe breed		***	***	***	***
ML	944	5.52 ± 0.07 [a]	13.21 ± 0.48 [a]	15.11 ± 0.40 [a]	27.10 ± 0.35 [a]
RH	205	4.42 ± 0.09 [b]	10.61 ± 0.85 [b]	12.66 ± 0.54 [b]	21.91 ± 0.47 [b]
Lambing season		***	ns	***	***
before Dec. 31, 2016	161	4.54 ± 0.09 [c]	nd	14.22 ± 0.50 [a]	26.32 ± 0.47 [a]
Dec. 31, 2016 to Jan. 7, 2017	286	5.09 ± 0.08 [b]	12.15 ± 0.81	12.90 ± 0.50 [b]	23.94 ± 0.43 [b]
after Jan. 7, 2017	702	5.28 ± 0.08 [a]	11.66 ± 0.57	14.53 ± 0.49 [a]	23.26 ± 0.41 [b]

BCS, ewe body condition score; ML, Merinolandsheep; RH, Rhönsheep.
ns, not significant, P > 0.05; nd, no data.
Means with different superscripts (a–c) indicate significant trait differences for the different effects (P < 0.05).
* P < 0.05.
** P < 0.01.
*** P < 0.001.

3.2. Influence of ewe back fat and back muscle thickness on lamb body weight

Under high input conditions, the mean BFT of ML ewes was 7.15 ± 1.89 mm around lambing and decreased to 1.94 ± 0.99 mm at weaning. BMT was quite constant with an average decrease of 1.2 mm in the course of lactation. In contrast, RH ewes had a mean BFT of 6.2 ± 3.03 mm around lambing, which decreased to 2.17 ± 0.41 mm until weaning. RH ewes showed a decline in BFT until the mid of lactation, but a slight increase from week 6 to week 9. In both breeds, BFT was negatively correlated with LBW (ML: r = -0.60, P < 0.001; RH: r = -0.59, P < 0.01). Hence, regarding the ML and RH population, a continuous gain in LBW was associated with a reduction of maternal fat deposit.

With regard to the low input system, the average BFT of CF ewes was 2.28 ± 0.84 mm around lambing and (in contrast to ewes of the high input production system) continuously increased to 5.47 ± 0.82 mm during lactation. BMT of CF was 19.61 ± 2.56 mm around parturition and increased to 23.53 ± 3.01 mm at weaning. Regarding CB ewes, the mean BFT at birth was 2.89 ± 0.78 mm, and 5.56 ± 0.53 mm at weaning. RH ewes had a mean BFT of 2.37 ± 0.75 mm around parturition, which increased to 5.54 ± 0.69 mm until weaning. The mean BMT at lambing of CB and RH ewes was 20.56 ± 1.42 mm and 19.31 ± 2.69 mm, respectively. BMT increased until the end of lactation (CB: 25.00 ± 0.00 mm; RH: 22.09 ± 2.92 mm). BMT was positively correlated with LBW in CF (r = 0.45, P < 0.001) in RH (r = 0.33, P < 0.001) and in CB (r = 0.58, P < 0.001).

Fig. 1 shows the Least-Squares-Means from model (4) to illustrate the associations between ewe BFT classes on the lamb traits BW, 6 W W, 9 W W and 12 W W in the low input system. During the first nine weeks of lactation, there were no significant differences between BFT classes.

Table 4
Least-Squares-Means for daily gain of the lamb between birth and week three (3DG), week three and six (6DG) and week six and weaning (WDG), (model 2; high input production system).

Effect	N	3DG (in kg)	6DG (in kg)	WDG (in kg)
Sex of lamb		ns	ns	**
Male	509	0.29 ± 0.02	0.28 ± 0.01	0.34 ± 0.02 [a]
Female	640	0.27 ± 0.02	0.28 ± 0.01	0.31 ± 0.02 [b]
Birth type of lamb		**	**	ns
1	337	0.29 ± 0.02 [a]	0.31 ± 0.01 [a]	0.35 ± 0.02
2	758	0.24 ± 0.02 [b]	0.27 ± 0.01 [b]	0.32 ± 0.02
3	54	0.30 ± 0.04 [a,b]	0.26 ± 0.02 [a,b]	0.30 ± 0.02
Lactation no.		ns	ns	ns
1	173	0.29 ± 0.03	0.31 ± 0.02	0.33 ± 0.03
2	329	0.30 ± 0.03	0.28 ± 0.01	0.34 ± 0.02
3	197	0.30 ± 0.03	0.27 ± 0.01	0.33 ± 0.02
4	226	0.29 ± 0.03	0.28 ± 0.02	0.34 ± 0.02
5	119	0.29 ± 0.02	0.27 ± 0.02	0.33 ± 0.03
6	97	0.28 ± 0.04	0.27 ± 0.02	0.35 ± 0.03
7	8	0.20 ± 0.06	nd	0.26 ± 0.08
Ewe BCS		ns	ns	ns
1.0	24	0.23 ± 0.05	0.38 ± 0.05	0.32 ± 0.05
1.5	40	0.20 ± 0.04	0.24 ± 0.03	0.28 ± 0.04
2.0	74	0.28 ± 0.04	0.25 ± 0.02	0.33 ± 0.03
2.5	161	0.33 ± 0.04	0.26 ± 0.01	0.36 ± 0.02
3.0	273	0.31 ± 0.03	0.27 ± 0.01	0.35 ± 0.02
3.5	270	0.29 ± 0.02	0.27 ± 0.01	0.33 ± 0.02
4.0	202	0.30 ± 0.03	0.29 ± 0.01	0.33 ± 0.03
4.5	97	0.27 ± 0.03	0.29 ± 0.01	0.29 ± 0.06
5.0	8	0.29 ± 0.06	0.26 ± 0.05	nd
Ewe weight class		ns	ns	ns
ML < 85 kg	313	0.27 ± 0.02	0.29 ± 0.01	0.36 ± 0.02
ML 85 – 100 kg	299	0.29 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.34 ± 0.02
ML > 100 kg	322	0.27 ± 0.02	0.30 ± 0.01	0.38 ± 0.02
RH < 65 kg	64	0.30 ± 0.05	0.24 ± 0.02	0.30 ± 0.03
RH 65 – 75 kg	73	0.23 ± 0.05	0.26 ± 0.02	0.28 ± 0.04
RH > 75 kg	68	0.30 ± 0.05	0.28 ± 0.02	0.29 ± 0.04
Ewe breed		ns	**	***
ML	944	0.28 ± 0.02	0.30 ± 0.01 [a]	0.36 ± 0.02 [a]
RH	205	0.28 ± 0.03	0.26 ± 0.01 [b]	0.29 ± 0.03 [b]
Lambing season		ns	ns	ns
before Dec. 31, 2016	161	nd	0.29 ± 0.01	0.33 ± 0.02
Dec. 31, 2016 to Jan. 7, 2017	286	0.28 ± 0.03	0.27 ± 0.01	0.33 ± 0.02
after Jan. 7, 2017	702	0.27 ± 0.02	0.30 ± 0.01	0.32 ± 0.02

BCS, ewe body condition score; ML, Merinolandsheep; RH, Rhönsheep.
ns, not significant, P > 0.05; nd, no data. Means with different superscripts (a–b) indicate significant trait differences for the different effects (P < 0.05).
*P < 0.05.
** P < 0.01.
*** P < 0.001.

After 12 weeks, lambs from dams with BFT > 3 mm were 2.63 kg (P < 0.01) heavier than lambs from ewes with lowest BFT. Fig. 2 represents the Least-Squares-Means from model (4) for the lamb traits 6DG, 9DG and 12DG in dependency of BFT classes in the low input system. In analogy, we found 0.07 kg greater (P < 0.01) 12DG for lambs from ewes with BFT > 3 mm compared to 12DG from ewes with BFT ≤ 3 mm.

3.3. Influence of ewe body condition score on lamb body weight

Fig. 3 represents Least-Squares-Means for LBW in dependency of ewe BCS from model (1) (high input production system). The highest LBW was associated with a moderate ewe BCS. LBW of lambs from ewes with a BCS of 3.5 was 1.71 ± 0.54 kg greater (P < 0.05) compared to LBW of lambs from dams with BCS 1.0, and 1.18 ± 0.28 kg greater (P < 0.01) compared to LBW of lambs from dams with BCS 4.5. Table 3 shows the results from model (2). Ewe BCS had a significant effect on WW (P < 0.05). Offspring from dams with a BCS of 1.0 was 3.24 kg, 3.12 kg and 2.85 kg lighter at weaning than lambs from ewes with a BCS of 2.0, 2.5 or 3.5 (P < 0.05), respectively. BCS had no significant effect on 3DG, 6DG or WDG (P > 0.05) (Table 4).

In the low input production system, ewe BCS significantly influenced LBW during the period between parturition and week six postpartum (P < 0.01). In contrast to the observations from the high input production system, BW of lambs from ewes with a BCS between 1.5 and 2.5 was greater than BW of lambs from ewes with a BCS of 3.0 (Table 5). Lambs from ewes with a BCS of 1.0 had 3.80 ± 1.35 kg greater 6 W W (P < 0.05, Table 5) and 0.11 ± 0.03 kg greater 6DG (P < 0.05, Table 6) compared to lambs from ewes with a BCS of 2.0. However, for the trait 9DG, lambs from ewes with a BCS of 2.5 achieved 0.10 ± 0.03 kg greater daily weight gain than lambs from ewes with a BCS of 1.0 (P < 0.05, Table 6).

3.4. Influence of breed and ewe daily weight loss on lamb body weight

In the high input production system (model 1), we identified significant impact of the combined breed*WL effect on LBW (P < 0.001). However, for comparisons considering only ewe WL classes for the breed ML, differences between LBW were not significant. Similarly, LBW was almost identical for RH lambs, i.e., independent from the ewe WL class (Fig. 4). Nevertheless, we observed significant breed differences. Regarding the ML breed, lambs from ewes with ≥ 120 g WL/d grew faster than the lambs from dams with lower WL, but differences decreased with increasing lactation stage. Lambs from RH ewes with < 100 g WL/d had 1.47 kg greater LBW at birth than lambs from RH ewes with ≥ 100 g WL/d. Such LBW differences were observed until day 35 of lactation. Afterwards, LBW was greater for lambs from RH ewes with ≥ 100 g WL/d, up to a LBW difference of 0.59 kg at weaning.

Accordingly, also in the low input system, ewe WL significantly influenced LBW development during lactation (P < 0.001). Results from model (3) indicate that ewes with higher body weight losses during lactation reared heavier lambs (Fig. 5). However, differences in LBW were only significant between CF and RH ewes. The breeds CF and RH from the low input system are very similar regarding frame size and body weight, and they use the same fodder resources. Nevertheless, CF ewes lost slightly more body weight per day and had heavier lambs until weaning than RH ewes. The breed effect was also significant (P < 0.01) for 9 W W, 12 W W and WW (i.e., heaviest lambs from CF ewes) (Table 5). DG followed the same trend, but differences were not significant (Table 6).

3.5. Influence of ewe body weight on lamb body weight

In the high input production system, the ewe body weight class significantly influenced BW (P < 0.01) and WW (P < 0.01, Table 3). Lamb BW from ML ewes with medium and high body weight was 0.20 kg and 0.23 kg greater than lamb BW from lighter ewes. Furthermore, ML ewes with EBW > 100 kg had 1.41 kg heavier lambs at weaning than ML ewes with < 85 kg. In the RH population, there were no significant differences for lamb weights between maternal body weight classes. For both breeds ML and RH, the effect of the ewe body weight class on DG was not significant (P > 0.05, Table 4).

The influence of the ewe body weight class under low input conditions was significant for 12 W W (Table 5). Regarding 12 W W, lambs from ewes with EBW ≤ 42 kg were 2.46 ± 0.75 kg lighter than lambs from ewes representing the medium body weight class, and 3.27 ± 1.01 kg lighter than lambs from ewes representing the high body weight class. Additionally, lambs from ewes with EBW > 48 kg achieved 0.06 ± 0.02 kg (P < 0.05) greater 9DG compared to lambs from ewes with EBW ≤ 42 kg (Table 6).

Table 5
Least-Squares-Means for birth weight (BW), 6-weeks-weight (6 W W), 9-weeks-weight (9 W W), 12-weeks-weight (12 W W) and weaning weight (WW) of the lamb (model 4; low input production system).

Effect	N	BW (in kg)	6WW (in kg)	9WW (in kg)	12WW (in kg)	WW (in kg)
Sex of lamb		ns	*	ns	ns	ns
Male	285	3.99 ± 0.03	12.58 ± 1.10 [a]	13.04 ± 0.84	16.84 ± 1.01	22.04 ± 1.34
Female	455	3.96 ± 0.03	11.32 ± 1.05 [b]	12.15 ± 0.85	16.84 ± 0.96	22.61 ± 1.27
Birth type of lamb		***	***	***	***	***
1	476	4.04 ± 0.03 [a]	14.16 ± 1.04 [a]	14.46 ± 0.81 [a]	19.10 ± 0.96 [a]	25.24 ± 1.26 [a]
2	264	3.91 ± 0.03 [b]	9.74 ± 1.14 [b]	10.73 ± 0.91 [b]	14.68 ± 1.05 [b]	19.40 ± 1.42 [b]
Ewe age class		ns	**	ns	**	**
≤ 48 mo	230	3.95 ± 0.03	10.49 ± 1.09 [b]	11.95 ± 0.95	16.14 ± 1.08 [b]	20.75 ± 1.53 [b]
49 – 62 mo	245	3.97 ± 0.03	12.76 ± 1.07 [a]	13.53 ± 0.91	18.27 ± 1.07 [a]	24.62 ± 1.42 [a]
> 62 mo	265	4.01 ± 0.03	12.61 ± 1.22 [a]	12.31 ± 0.94	16.11 ± 1.03 [b]	21.59 ± 1.34 [b]
Ewe BCS		**	**	ns	ns	ns
1.0	100	4.02 ± 0.03 [a,b]	13.18 ± 1.46 [a]	12.84 ± 0.71	16.86 ± 0.79	23.05 ± 1.33
1.5	283	4.01 ± 0.02 [a]	9.77 ± 0.93 [a,b]	12.64 ± 0.62	17.39 ± 0.61	23.96 ± 0.82
2.0	213	4.07 ± 0.02 [a]	9.37 ± 0.91 [b]	13.42 ± 0.64	17.08 ± 0.84	22.47 ± 0.96
2.5	76	4.05 ± 0.03 [a]	11.48 ± 1.31 [a,b]	12.88 ± 1.19	17.14 ± 1.46	22.99 ± 2.02
3.0	19	3.83 ± 0.06 [b]	15.94 ± 2.63 [a,b]	11.46 ± 1.81	13.32 ± 2.79	20.61 ± 4.54
3.5	9	3.98 ± 0.09 [a,b]	nd	12.32 ± 3.16	16.12 ± 2.75	18.58 ± 4.56
4.0	4	3.87 ± 0.13 [a,b]	nd	nd	19.98 ± 2.81	24.57 ± 3.39
Ewe weight class		ns	ns	ns	**	ns
≤ 42 kg	212	396 ± 0.04	11.55 ± 1.27	11.14 ± 0.99 [b]	14.93 ± 1.18 [b]	20.76 ± 1.46
43-48 kg	250	3.98 ± 0.03	12.13 ± 1.17	12.45 ± 0.97 [b]	17.39 ± 1.04 [a]	22.96 ± 1.36
> 48 kg	231	3.99 ± 0.03	12.17 ± 0.99	14.41 ± 0.78 [a]	18.20 ± 0.97 [a]	23.24 ± 1.48
Ewe breed		ns	ns	**	***	***
CF	270	4.01 ± 0.03	11.96 ± 1.11	13.81 ± 0.81 [a]	18.70 ± 0.98 [a]	24.50 ± 1.37 [a]
CB	60	3.97 ± 0.05	12.77 ± 1.35	12.11 ± 1.51 [a,b]	17.06 ± 1.59 [a,b]	22.96 ± 1.36 [a,b]
RH	410	3.95 ± 0.03	11.11 ± 1.14	11.86 ± 0.82 [b]	14.76 ± 0.92 [b]	23.24 ± 1.48 [b]
Lambing season		**	**	ns	ns	ns
before Apr. 3, 2017	220	3.98 ± 0.03 [a,b]	nd	12.04 ± 0.87	16.37 ± 0.96	23.57 ± 1.39
Apr. 4 to Apr. 10, 2017	315	3.95 ± 0.03 [b]	12.74 ± 1.09 [a]	13.30 ± 0.95	17.19 ± 1.07	22.13 ± 1.34
after Apr. 11, 2017	205	4.01 ± 0.03 [a]	11.16 ± 1.07 [b]	12.44 ± 0.97	16.96 ± 1.08	21.26 ± 1.49

BCS, ewe body condition score; CF, Coburger Fuchssheep; CB, Crossbred sheep; RH, Rhönsheep.
ns, not significant, $P > 0.05$; nd, no data. Means with different superscripts (a–c) indicate significant trait differences for the different effects ($P < 0.05$).
* $P < 0.05$.
** $P < 0.01$.
*** $P < 0.001$.

4. Discussion

The different body condition traits of the ewe had significant influence on LBW development during lactation, depending on the production system and on the breed.

4.1. Influence of ewe back fat and back muscle thickness on lamb body weight

Under high input conditions, BFT and BMT were positively correlated with EBW in ML and RH. Ptáček et al. (2014) confirmed such positive relationship in Suffolk sheep. BFT decreased with increasing LBW in both breeds ML and RH, reflecting an intensive mobilisation of body energy reserves during lactation. It is the negative energy balance initiating a change in metabolism to a homeorhetic state (Bruckmaier, 2010). Bellof et al. (2007) reported similar results for BFT and BMT development during gestation and lactation in ML ewes. They described a comparable BFT decline (~5.6 mm) from parturition until weaning. RH ewes showed an increase in BFT during the end of lactation. Such finding might be due to a shift back to a positive energy balance from day 50 postpartum (Bellof et al., 2007). An important enzyme in this context is the lipoprotein lipase, regulating physiological processes in the adipose tissue and in the mammary gland. During up-regulation in the mammary gland (i.e. during lactation), the activity of lipoprotein lipase in adipose tissue decreased (Hamosh et al., 1970; Jensen et al., 1994), indicating metabolism changes from lipogenesis to lipolysis. Accordingly, Decaluwé et al. (2013) found a negative relationship between changes in BFT between day 85 and 109 of gestation and colostrum yield in sows. One millimetre loss in BFT during this period was associated with a 113 g higher colostrum yield. Such result corresponds with the negative correlation between LBW and BFT (observed for both breeds ML and RH) in the present study for the same period.

For ewes from the low input production system, BCS and EBW around lambing was on quite low level. In the ongoing lactation, we observed a substantial BFT increase, and we identified ewes (from both breeds RH and CF) with high BFT scores (> 3 mm) and with heavy lambs until week 12 of lactation. Such findings indicate that the robust breeds RH and CF use natural fodder resources very efficient: They accumulate own body fat depots, and simultaneously, they guarantee the energy supply of their offspring. As a further example, pregnant Western White-Face ewes, which are adapted to harsh environments, kept the amino acid supply for the fetus constant, even if nutrient requirements were restricted (Jobgen et al., 2008). Similarly, Debus et al. (2012) observed adaptive mechanisms in local Merino d'Arles ewes during periods of undernutrition, because the growth rate of their lambs was independent from maternal energy intake. In addition, an increase of body fat depots contributes to an improved maternal fertility status (Gernand et al., 2008).

Table 6
Least-Squares-Means for daily gain of the lamb between birth and week six (6DG), week six and nine (9DG), week nine and 12 (12DG), and week 12 and weaning (WDG), (model 4; low input production system).

Effect	N	6DG (in kg)	9DG (in kg)	12DG (in kg)	WDG (in kg)
Sex of lamb		*	ns	ns	ns
Male	285	0.25 ± 0.03 [a]	0.15 ± 0.02	0.17 ± 0.03	0.15 ± 0.03
Female	455	0.22 ± 0.03 [b]	0.16 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.15 ± 0.03
Birth type of lamb		***	ns	ns	ns
1	476	0.29 ± 0.03 [a]	0.16 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.03
2	264	0.18 ± 0.03 [b]	0.15 ± 0.02	0.16 ± 0.03	0.14 ± 0.03
Ewe age class		**	ns	ns	ns
≤ 48 mo	230	0.19 ± 0.03 [b]	0.16 ± 0.02	0.16 ± 0.03	0.15 ± 0.03
49 – 62 mo	245	0.26 ± 0.03 [a]	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.03	0.15 ± 0.03
> 62 mo	265	0.25 ± 0.03 [a]	0.15 ± 0.02	0.16 ± 0.03	0.15 ± 0.03
Ewe BCS		**	*	ns	ns
1.0	100	0.28 ± 0.04 [a]	0.10 ± 0.02 [b]	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.03
1.5	283	0.19 ± 0.02 [b]	0.12 ± 0.01 [a,b]	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.02
2.0	213	0.17 ± 0.02 [b]	0.15 ± 0.01 [a,b]	0.16 ± 0.02	0.17 ± 0.02
2.5	76	0.21 ± 0.03 [a,b]	0.20 ± 0.03 [a]	0.15 ± 0.04	0.13 ± 0.05
3.0	19	0.32 ± 0.07 [a,b]	0.16 ± 0.04 [a,b]	0.08 ± 0.07	0.15 ± 0.10
3.5	9	nd	0.21 ± 0.07 [a,b]	0.18 ± 0.07	0.08 ± 0.10
4.0	4	nd	nd	0.24 ± 0.07	0.18 ± 0.08
Ewe weight class		ns	*	ns	ns
≤ 42 kg	212	0.22 ± 0.03	0.12 ± 0.02 [b]	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.03
43-48 kg	250	0.23 ± 0.03	0.16 ± 0.02 [a,b]	0.17 ± 0.03	0.15 ± 0.03
> 48 kg	231	0.25 ± 0.03	0.18 ± 0.02 [a]	0.18 ± 0.03	0.17 ± 0.03
Ewe breed		ns	ns	ns	ns
CF	270	0.23 ± 0.03	0.19 ± 0.02	0.18 ± 0.03	0.18 ± 0.03
CB	60	0.26 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.16 ± 0.04	0.13 ± 0.05
RH	410	0.21 ± 0.02	0.16 ± 0.02	0.15 ± 0.02	0.14 ± 0.03
Season		ns	*	**	ns
before Apr. 3, 2017	220	nd	0.19 ± 0.02 [a]	0.13 ± 0.02 [b]	0.16 ± 0.03
Apr. 4 to Apr. 10, 2017	315	0.23 ± 0.03	0.14 ± 0.02 [b]	0.17 ± 0.03 [a]	0.15 ± 0.03
after Apr. 11, 2017	205	0.24 ± 0.03	0.14 ± 0.02 [a,b]	0.19 ± 0.03 [a]	0.14 ± 0.03

BCS, ewe body condition score; CF, Coburger Fuchssheep; CB, Crossbred sheep; RH, Rhönsheep.
Means with different superscripts (a–b) indicate significant trait differences for the different effects ($P < 0.05$).
ns, not significant, $P > 0.05$; nd, no data.
* $P < 0.05$.
** $P < 0.01$.
*** $P < 0.001$.

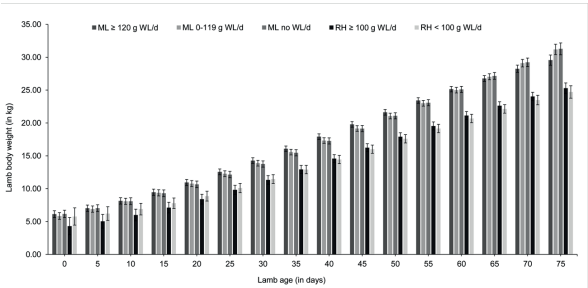


Fig. 4. Least-Squares-Means for lamb body weight (LBW) in dependency of the ewe daily weight loss class (WL) and breed (ML, Merinolandsheep; RH, Rhönsheep) (model 1; high input production system).

4.2. Influence of ewe body condition score on lamb body weight

Body condition score significantly influenced fecundity in ewes (Vatankhah et al., 2012) and weaning performance in lambs (Cranston et al., 2017). Moreover, the positive relation between BCS with BFT and BMT in our study proofs that BCS is an appropriate predictor for body fat and muscling scores. Nevertheless, in our study, ewe BCS had different impact on LBW under high or low input conditions, and for different breeds. Frutos et al. (1997) stated that the applicability of BCS to predict body fat reserves differs between breeds. Hence, a

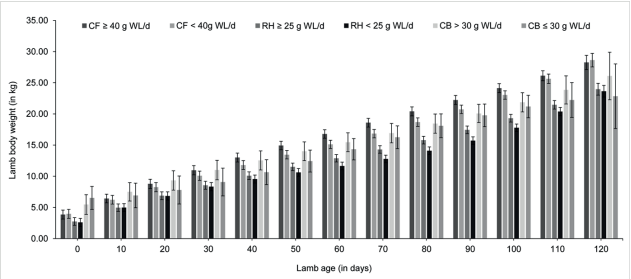


Fig. 5. Least-Squares-Means for lamb body weight (LBW) development during lactation in dependency of the ewe daily weight loss class (WL) and breed (CF, Coburger Fuchssheep; RH, Rhönsheep; CB, Crossbred sheep) (model 3; low input production system).

combination of BCS and EBW recording is recommended, in order to improve prediction accuracy. Additionally, we considered the ultrasonic measurements.

Under high input conditions, WW of lambs being offspring from ewes with BCS of 2.0, 2.5 and 3.5 were significantly greater than for offspring from ewes with BCS of 1.0 (Table 3). Accordingly, Cranston et al. (2017) and Kenyon et al. (2014) defined an optimal ewe BCS between 2.5 and 3.0 around lambing. Hence, we suggest an intermediate optimum for ewe BCS. In such context, litter weight per ewe at birth or total litter weight per ewe at weaning decreased with extremely high BCS (Vatankhah et al., 2012). Moreover, adipose ewes showed a delay onset of lactogenesis, because of restored progesterone in the adipose tissue inhibiting prolactin secretion from the pituitary gland (McCracken, 1964; Bell, 1995).

Regarding ewes from the low input production system, BCS had significant impact on LBW, especially in the first six weeks postpartum. Lambs from ewes with a BCS in the range from 1.5 and 2.5 had significantly greater BW compared to lambs from ewes with BCS 3.0. Dwyer et al. (2005) explained the negative relationship between BCS at lambing and placental weight. Accordingly, a fetus of a dam with lower BCS at lambing received a better nutrient supply during pregnancy, contributing to the lamb BW increase. In the present study, lambs from ewes with a slightly higher BCS of 2.5 had significantly greater 9DG. Hence, the ewe body reserves improved lactation persistency under low input conditions. Addressing physiological mechanisms, Ford et al. (2007) observed insulin disorders in growing lambs from ewes which were malnourished during early pregnancy. Also the other extreme, i.e. lambs from adipose ewes, showed an increase susceptibility to metabolic disorders, e.g. an increase of leptin plasma concentrations (Long et al., 2010).

4.3. Influence of breed and ewe daily weight loss on lamb body weight

Due to breed characteristics, ML generally have larger birth weights than RH lambs. However, we observed very similar daily gains for lambs from both breeds RH and ML under high input conditionsin the first three weeks of lactation, indicating the quite high productivity (milk yield) of RH ewes.

Regarding the within-breed comparisons in both production systems, maternal WL was not significantly associated with LBW in the course of lactation. Weight loss variability was more pronounced in ML than in RH ewes. Such finding does not fully correspond with Morgan et al. (2005), who associated higher maternal WL with higher milk yield, and with greater LBW. Highest LBW at weaning for lambs from ewes representing a lower WL class suggest the following hypotheses: (i) ewes with lower WL have improved milk yield persistency, or (ii) lambs from ewes with low weight loss compensate energy deficiency from other energy rich food resources than milk.

In the low input production system, we identified differences in LBW between breeds representing similar frame size, maternal EBW and feeding conditions. König von Borstel et al. (2011) also found sheep breed differences for maternal behaviour in low input systems, with further strong influence on LBW development, which could explain our findings. Similarly, research conducted in United Kingdom and Norway favoured robust breeds, because of their behavioural and physiological attributes positively influencing lamb vitality (Dwyer and Lawrence, 2005; Holmøy et al., 2014). Duehlmeier et al. (2013) identified breed dependent differences in insulin sensitivity and ketone body metabolism, with impact on catabolic and anabolic processes of the adipose tissue. These processes are also responsible for maternal energy supply during lactation and consequently for LBW development.

4.4. Influence of ewe body weight on lamb body weight

In the high input production system, the maternal body weight class showed significant impact on BW and WW. Lamb BW from ML ewes with medium and high body weight was greater than lamb BW from lighter ewes. Similarly, lambs of ML ewes with EBW > 100 kg achieved greater WW than lambs of ML ewes with < 85 kg. However, in RH, lamb BW was not associated with EBW ($P > 0.05$).

Under low input conditions, the maternal body weight class positively influenced LBW, i.e. 12 W W and 9DG. Snowder et al. (2001) found a positive correlation between EBW and milk yield for ewes older than two years. Hence, due to the positive association between EBW and LBW in our study, milk yield is a key factor influencing weaning performance of the lamb.

5. Conclusion

Significant associations between ewe energy indicator traits with lamb growth and lamb weight development during lactation were identified, but depending on breed and production system characteristics. The results support the hypothesis that local breeds, e.g. CF, are more resistant and less sensitive in response to temporary restricted energy intake, especially under grazing conditions. A focus on the CF breed in low input systems can reduce fodder costs, without detrimental effects on LBW. LBW was comparable for lambs from ewes either allocated to high or low daily WL classes. Consequently, selection on low WL has positive impact on farm economy from the “dam perspective”. Nevertheless, ewe back fat depots are important, because BFT > 3 mm represents an energy resource stimulating lamb growth in the low input system. The optimal ewe BCS during lactation was 3.5 in the high production system. In the low input system, robust local breeds were competitive in terms of LBW for ewe BCS < 3.0. The ewe body weight class had significant influence in commercial ML, i.e., was positively correlated with LBW.

Declaration of Competing Interest

None.

Acknowledgement

The authors are grateful to the "H. Wilhelm Schaumann Stiftung" for providing a scholarship to Mrs Jessica Reintke.

The authors are also grateful to the staff of the experimental farm of the Department of Animal Breeding and Genetics (Oberer Hardthof) in Giessen, especially to Mr. Mandler, Mrs. Henning and Mrs. Wagner and to the staff of the low input production system for their commitment, assistance and support.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary material related to this article can be found, in the online version, at doi:https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2019.106037.

References

Bell, A.W., 1995. Regulation of organic nutrient metabolism during transition from late pregnancy to early lactation. J. Anim. Sci. 73, 2804–2819.
Bellof, G., Mayershofer, M., Mendel, C., 2007. Rückenfettdickenmessung mittels Ultraschall bei Mutterschafen der Rasse Merinolandschaf: Perspektiven der Schaf- und Ziegenhaltung in Mitteleuropa, Internationales wissenschaftliches Symposium, Iden (Sachsen-Anhalt). DGfZ-Schriftenreihe 47, 137–144.
Binns, S.H., Cox, I.J., Rizvi, S., Green, L.E., 2002. Risk factors for lamb mortality on UK sheep farms. Prev. Vet. Med. 52 (3-4), 287–303.
Borg, R.C., Notter, D.R., Kott, R.W., 2009. Phenotypic and genetic associations between lamb growth traits and adult ewe body weights in western range sheep. J. Anim. Sci. 87 (11), 3506–3514.
Brito, L.F., McEwan, J.C., Miller, S., Bain, W., Lee, M., Dodds, K., Newman, S.-A., Pickering, N., Schenkel, F.S., Clarke, S., 2017. Genetic parameters for various growth, carcass and meat quality traits in a New Zealand sheep population. Small Rumin. Res. 154, 81–91.
Bruckmaier, R., 2010. Laktation. In: von Engelhardt, W. (Ed.), Physiologie der Haustiere. Enke Verlag in MVS Medizinverlage Stuttgart GmbH & Co. KG, Stuttgart, Germany, pp. 614.
Caldeira, R.M., Portugal, A.V., 2007. Relationships of body composition and fat partition with body condition score in Serra da estrela ewes. Asian Australas. J. Anim. Sci. 20 (7), 1108–1114.
Climate-data.org, 2018. https://de.climate-data.org/search/?q=gro%C3%9Falmerode (accessed 18 September 2018).
Cranston, L.M., Kenyon, P.R., Corner-Thomas, R.A., Morris, S.T., 2017. The potential interaction between ewe body condition score and nutrition during very late pregnancy and lactation on the performance of twin-bearing ewes and their lambs. Asian Australas. J. Anim. Sci. 30 (9), 1270–1277.
Debus, N., Chavatte-Palmer, P., Viudes, G., Camous, S., Roséfort, A., Hassoun, P., 2012. Maternal periconceptional undernutrition in Merinos d'Arles sheep: 1. Effects on pregnancy and reproduction results of dams and offspring growth performances. Theriogenology 77 (7), 1453–1465.
Decaluwé, R., Maes, D., Declerck, I., Cools, A., Wuyts, B., De Smet, S., Janssens, G.P.J., 2013. Changes in back fat thickness during late gestation predict colostrum yield in sows. Animal 7 (12), 1999–2007.
Duehlmeier, R., Fluegge, I., Schwert, B., Ganter, M., 2013. Post-glucose load changes of plasma key metabolite and insulin concentrations during pregnancy and lactation in ewes with different susceptibility to pregnancy toxaemia. J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. (Berl.) 97 (5), 971–985.
Dwyer, C.M., Calvert, S.K., Farish, M., Donbavand, J., Pickup, H.E., 2005. Breed, litter and parity effects on placental weight and placentome number, and consequences for the neonatal behaviour of the lamb. Theriogenology 63 (4), 1092–1110.
Dwyer, C.M., Lawrence, A.B., 2005. A review of the behavioural and physiological adaptations of hill and lowland breeds of sheep that favour lamb survival. Appl. Anim. Behav. Sci. 92 (3), 235–260.
Ford, S.P., Hess, B.W., Schwope, M.M., Nijland, M.J., Gilbert, J.S., Vonnahme, K.A., Means, W.J., Han, H., Nathanielsz, P.W., 2007. Maternal undernutrition during early to mid-gestation in the ewe results in altered growth, adiposity, and glucose tolerance in male offspring. J. Anim. Sci. 85 (5), 1285–1294.
Frutos, P., Mantecón, A.R., Giráldez, F.J., 1997. Relationship of body condition score and live weight with body composition in mature Churra ewes. Anim. Sci. 64, 447–452.
Gernand, E., Wassmuth, R., Lenz, H., von Borstel, U.U., Gauly, M., König, S., 2008. Impact of energy supply of ewes on genetic parameters for fertility and carcass traits in Merino Long Wool sheep. Small Rumin. Res. 75 (1), 80–89.
Green, L.E., Morgan, K.L., 1994. Risk factors associated with postpartum deaths in early born, housed lambs in southwest England. Prev. Vet. Med. 21 (1), 19–27.
Hamosh, M., Clary, T.R., Chernick, S.S., Scow, R.O., 1970. Lipoprotein lipase activity of adipose and mammary tissue and plasma triglyceride in pregnant and lactating rats. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Lipids Lipid Metab. 210 (3), 473–482.
Henderson, D.C., 2007. Neonatal conditions. In: Aitken, I.D. (Ed.), Diseases of Sheep, fourth ed. Blackwell Publishing, Oxford, pp. 81–87.
Holmøy, I.H., Kielland, C., Stubsjøen, S.M., Hektoen, L., Waage, S., 2012. Housing conditions and management practices associated with neonatal lamb mortality in sheep flocks in Norway. Prev. Vet. Med. 107 (3-4), 231–241.
Holmøy, I.H., Waage, S., Gröhn, Y.T., 2014. Ewe characteristics associated with neonatal loss in Norwegian sheep. Prev. Vet. Med. 114 (3-4), 267–275.
Jensen, D.R., Gavigan, S., Sawicki, V., Witsell, D.L., Eckel, R.H., Neville, M.C., 1994. Regulation of lipoprotein lipase activity and mRNA in the mammary gland of the lactating mouse. Biochem. J. 298 (2), 321–327.
Jobgen, W.S., Ford, S.P., Jobgen, S.C., Feng, C.P., Hess, B.W., Nathanielsz, P.W., Li, P., Wu, G., 2008. Baggs ewes adapt to maternal undernutrition and maintain conceptus growth by maintaining fetal plasma concentrations of amino acids. J. Anim. Sci. 86 (4), 820–826.
Kenyon, P.R., Maloney, S.K., Blache, D., 2014. Review of sheep body condition score in relation to production characteristics. New Zealand J. Agric. Res. 57 (1), 38–64.
König von Borstel, U., Moors, E., Schichowski, C., Gauly, M., 2011. Breed differences in maternal behaviour in relation to lamb (Ovis orientalis aries) productivity. Livest. Sci. 137 (1-3), 42–48.
Landesanstalt für Landwirtschaft, 2015. Ernährung und Ländlichen Raum Schwäbisch Gmünd (LEL). 2015: Schafreport Baden-Württemberg p. 16.
Long, N.M., George, L.A., Uthlaut, A.B., Smith, D.T., Nijland, M.J., Nathanielsz, P.W., Ford, S.P., 2010. Maternal obesity and increased nutrient intake before and during gestation in the ewe results in altered growth, adiposity, and glucose tolerance in adult offspring. J. Anim. Sci. 88 (11), 3546–3553.
McCracken, J.A., 1964. Progesterone in the body fat of the dairy cow. J. Endocrinol. 28, 339–340.
Morgan, J.E., Fogarty, N.M., Nielsen, S., Gilmour, A.R., 2005. The relationship of early lamb growth with ewe age and milk production. Proceeding of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics, vol. 16, 326–329.
Nash, M.L., Hungerford, L.L., Nash, T.G., Zinn, G.M., 1996. Risk factors for perinatal and postnatal mortality in lambs. Vet. Rec. 139 (3), 64–67.
Nowak, R., Poindron, P., 2006. From birth to colostrum: early steps leading to lamb survival. Reprod. Nutr. Dev. 46, 431–446.
Ptáček, M., Ducháček, J., Stádník, L., Beran, J., 2014. Mutual relationships among body condition score, live weight, and back tissue development in meat sheep. Acta Vet. Brno 83 (4), 341–346.
Russel, A.J.F., Doney, J.M., Gunn, R.G., 1969. Subjective assessment of body fat in live sheep. J. Agric. Sci. 72, 451.
Sanson, D.W., West, T.R., Tatman, W.R., Riley, M.L., Judkins, M.B., Moss, G.E., 1993. Relationship of body composition of mature ewes with condition score and body weight. J. Anim. Sci. 71, 1112–1116.
SAS, 2017. SAS® Studio 3.71: User's Guide. SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA.
Shackell, G.H., Cullen, N.G., Greer, G.J., 2011. Genetic parameters associated with adult ewe liveweight and body condition. Proceeding of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics, vol. 19, 103–106.
Shands, C.G., McLeod, B., Lollback, M.L., Duddy, G., Hatcher, S., O'Halloran, W.J., 2009. Comparison of manual assessments of ewe fat reserves for on-farm use. Anim. Prod. Sci. 49, 630–636.
Snowder, G.D., Knight, A.D., van Vleck, L.D., Bromley, C.M., Kellom, T.R., 2001. Usefulness of subjective ovine milk scores: I. Associations with range ewe characteristics and lamb production. J. Anim. Sci. 79, 811–818.
Tierseuchenkasse Nordrhein-Westfalen, 2014. Schätzrahmen für die Ermittlung des gemeinen Wertes von Schafen und Ziegen. (accessed 18 September 2018). https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/tierseuchenkasse/leistungen/schaetzrahmen/schafe.htm.
Torres-Rovira, L., Pesantez-Pacheco, J.-L., Hernandez, F., Elvira-Partida, L., Perez-Solana, M.-L., Gonzalez-Martin, J.-V., Gonzalez-Bulnes, A., Astiz, S., 2017. Identification of factors affecting colostrum quality of dairy Lacaune ewes assessed with the Brix refractometer. J. Dairy Res. 84 (4), 440–443.
Vatankhah, M., Talebi, M.A., Zamani, F., 2012. Relationship between ewe body condition score (BCS) at mating and reproductive and productive traits in Lori-Bakhtiari sheep. Small Rumin. Res. 106 (2-3), 105–109.

KAPITEL 3

Dieses Kapitel basiert auf folgender Publikation:

Reintke, J., Brügemann, K., Yin, T., Engel, P., Wagner, H., Wehrend, A., König S.
2020

Assessment of methane emission traits in ewes using a laser methane detector: genetic parameters and impact on lamb weaning performance

Archives Animal Breeding 63:113–123
https://doi.org/10.5194/aab-63-113-2020

Eigener Anteil an der Publikation:

Studienplanung:	eigenständig
Datenaufnahme:	weitestgehend eigenständig
Statistische Auswertung:	weitestgehend eigenständig
Manuskripterstellung:	weitestgehend eigenständig

Arch. Anim. Breed., 63, 113–123, 2020
https://doi.org/10.5194/aab-63-113-2020
© Author(s) 2020. This work is distributed under
the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Open Access
Archives Animal Breeding

Original study

Assessment of methane emission traits in ewes using a laser methane detector: genetic parameters and impact on lamb weaning performance

Jessica Reintke[1], Kerstin Brügemann[1], Tong Yin[1], Petra Engel[1], Henrik Wagner[2], Axel Wehrend[2], and Sven König[1]

[1]Institute of Animal Breeding and Pet Genetics, University of Giessen, 35390 Giessen, Germany
[2]Clinic for Obstetrics, Gynaecology and Andrology of Large and Small Animals with Veterinary Ambulance, University of Giessen, 35392 Giessen, Germany

Correspondence: Jessica Reintke (jessica.reintke@agrar.uni-giessen.de)

Received: 23 October 2019 – Revised: 6 March 2020 – Accepted: 18 March 2020 – Published: 16 April 2020

Abstract. The aim of the present study was to derive individual methane (CH_4) emissions in ewes separated in CH_4 respiration and eructation traits. The generated longitudinal CH_4 data structure was used to estimate phenotypic and genetic relationships between ewe CH_4 records and energy efficiency indicator traits from same ewes as well as from their lambs (intergenerational perspective). In this regard, we recorded CH_4 emissions via mobile laser methane detector (LMD) technique, body weight (EBW), backfat thickness (BFT) and body condition score (BCS) from 330 ewes (253 Merinoland (ML), 77 Rhön sheep (RH)) and their 629 lambs (478 ML, 151 RH). The interval between repeated measurements (for ewe traits and lamb body weight (LBW)) was 3 weeks during lactation. For methane concentration ($\mu L\,L^{-1}$) determinations in the exhaled air, we considered short time measurements (3 min). Afterwards, CH_4 emissions were portioned into a respiration and eructation fraction, based on a double normal distribution. Data preparation enabled the following CH_4 trait definitions: mean CH_4 concentration during respiration and eructation ($CH_{4_{r+e}}$), mean CH_4 concentration during respiration (CH_{4_r}), mean CH_4 concentration during eructation (CH_{4_e}), sum of CH_4 concentrations per minute during respiration ($CH_{4_{rsum}}$), sum of CH_4 concentrations per minute during eructation ($CH_{4_{esum}}$), maximal CH_4 concentration during respiration ($CH_{4_{rmax}}$), maximal CH_4 concentration during eructation ($CH_{4_{emax}}$), and eructation events per minute ($CH_{4_{event}}$). Large levels of ewe CH_4 emissions representing energy losses were significantly associated with lower LBW ($P<0.05$), lower EBW ($P<0.01$) and lower BFT ($P<0.05$). For genetic parameter estimations, we applied single- and multiple-trait animal models. Heritabilities and additive genetic variances for CH_4 traits were small, i.e., heritabilities in the range from <0.01 ($CH_{4_{r+e}}$, CH_{4_r}, $CH_{4_{rmax}}$, $CH_{4_{esum}}$) to 0.03 ($CH_{4_{rsum}}$). We estimated negative genetic correlations between CH_4 traits and EBW in the range from -0.44 ($CH_{4_{r+e}}$) to -0.05 ($CH_{4_{rsum}}$). Most of the CH_4 traits were genetically negatively correlated with BCS (-0.81 for $CH_{4_{esum}}$) and with BFT (-0.72 for $CH_{4_{emax}}$), indicating same genetic mechanisms for CH_4 output and energy efficiency indicators. Addressing the intergenerational aspect, genetic correlations between CH_4 emissions from ewes and LBW ranged between -0.35 ($CH_{4_{r+e}}$) and 0.01 ($CH_{4_{rsum}}$, $CH_{4_{rmax}}$), indicating that breeding on reduced CH_4 emissions (especially eructation traits) contribute to genetic improvements in lamb weaning performance.

Published by Copernicus Publications on behalf of the Leibniz Institute for Farm Animal Biology (FBN).

1 Introduction

Methane (CH_4) is a by-product of microbial fermentation processes in ruminants (Henderson et al., 2015) and a potential greenhouse gas. Furthermore, CH_4 emissions reflect an unused proportion of gross energy intake (Johnson and Ward, 1996; Baker, 1999). Fodder is the major cost factor in sheep production systems (Ellison et al., 2017). Hence, there is an increasing interest to breed animals with improved productivity and feed efficiency (i.e., feed intake in relation to body weight gain), possibly via selection on low individual CH_4 emissions (Paganoni et al., 2017). Pickering et al. (2015) and Paganoni et al. (2017) indicated genetic variation and small to moderate heritabilities for CH_4 traits in dairy cows and sheep, and Rösler et al. (2018) described an individual variation in enteric CH_4 emissions in female goats. Furthermore, the economic benefits from selection scenarios including CH_4 traits (Robinson and Oddy, 2016) suggest consideration of CH_4 or of CH_4 indicator traits into overall sheep breeding goals.

In this regard, respiration chamber calorimetry is the "golden standard" to determine CH_4 emissions in sheep. Nevertheless, respiration chamber measurements imply strong efforts regarding logistics, associated with a substantial cost component. In consequence, only a small number of sheep can be phenotyped for CH_4 using the respiration chamber technique. In addition, respiration chambers reflect an artificial environment, which is not representative of sheep kept in pasture-based production systems. Animals might show abnormal behavior (e.g., reduced dry matter intake, DMI) in the chamber, possibly influencing a CH_4 emission pattern (Kabreab et al., 2006; Bickell et al., 2014). Thus, Knapp et al. (2014) and Huhtanen et al. (2015) requested alternative reliable and cost-efficient methods for CH_4 recording, especially under field conditions. In such a context, approaches based on feed supplements were unsuitable under grazing conditions (Baker, 1999). Predictions of CH_4 via deterministic modeling usually require a large amount of input data, e.g., DMI, dietary or milk components, which are difficult to record (Kabreab et al., 2006; Yin et al., 2015). Further indirect methods for CH_4 emission predictions based on the ruminal microbiome composition but associations between CH_4 production and microbiome characteristics were inconsistent (Shi et al., 2014; Ellison et al., 2017). The portable handheld laser methane detector (LMD) was suitable for CH_4 recording in dairy cattle under field conditions, with low inter-observer variability (Chagunda et al., 2009b). In validations, correlations between LMD CH_4 and CH_4 measurements from the respiration calorimetric chamber were large (Chagunda and Yan, 2011).

With regard to associations between CH_4 output and other breeding goal traits, Zetouni et al. (2018) estimated negative genetic correlations between CH_4 production ($g\,d^{-1}$) and body conformation traits in Danish Holstein cows. Nevertheless, there is a gap of knowledge addressing "across generation studies", i.e., association analyses between indicators for energy balances of ewes (including CH_4 emissions) and body weights of their lambs (LBW; also characterizing productivity of the ewe).

The objective of the present study was to focus on such intergenerational aspects, considering CH_4 measurements from ewes (recorded via LMD) as energy balance indicators. The CH_4 databases were used (i) to define and to evaluate different CH_4 measurement characteristics, (ii) to estimate genetic parameters for CH_4 measurements, and (iii) to correlate phenotypically and genetically ewe CH_4 measurements with other breeding goal traits from a within- and transgenerational perspective.

2 Materials and methods

2.1 Ethics statement

The housing and treatment of the animals were carried out in accordance with national and international laws. The study was restricted to routine on-farm observations. All presented methods were non-invasive. Therefore, they did not cause the included animals pain, suffering or harm, in compliance with the German Animal Welfare Act § 7. Nevertheless, the presented procedures have been approved for a subsample of ewes that were used for additional blood parameter analyses by the regional board of Giessen (V 54-19 c 20 15 h 01 GI 18/14 Nr. G 62/2017).

2.2 Production system

For trait recording, we focused on sheep from the University of Giessen research station "Oberer Hardthof", reflecting a mixture of grazing (spring to fall) and high-input (fall to spring) sheep production system. The farm is located 200 m above sea level in the federal state Hesse in the middle of Germany. The average annual temperature is 8.8 °C, and the average precipitation amount is 695 mm per year. The farm comprises 70 ha for a flock including 630 ewes, 7 rams and 98 hoggets of Merinoland (ML) and Rhön sheep (RH). During the lambing season, the flock was fed hay ad libitum. The hay quality was as follows: 90.3 % dry matter (DM), 40.2 % crude fiber (CF), 6.8 % crude protein (CP), 1.3 % crude lipid (EE) and 7.8 MJ metabolizable energy (ME) per kg in DM. Ewes within the last third of gestation received additional concentrates up to $1\,kg\,d^{-1}$. The concentrates were composed of barley, wheat, rapeseed meal extract, wheat bran and triticale (6.8 % CF, 18 % CP, 2.6 % EE, 10.8 ME MJ per kg DM). The calculated daily ration for a twin-suckling ewe with an average body weight of 85 kg contained 1.8 kg hay and 900 g concentrates (21.84 MJ ME per ewe and day). Lambs had ad libitum access to concentrates at an age of 21 to 28 d. They were weaned group-wise at a mean age of 65.35 ± 5.35 d with an average body weight of 26.10 ± 4.91 kg.

2.3 Animals and traits

Data recording spanned a period from 2017 to 2018. The study considered 330 ewes (253 ML, 77 RH) and their purebred 629 lambs (478 ML, 151 RH). The age of ewes ranged from 22.1 to 96.8 months (mean = 51.3 ± 18.2 months). In a subset of 177 ewes (133 ML, 44 RH), the whole pattern of traits was recorded: ewe body weight (EBW) (digital scale: model 703, TRU-TEST Group, Auckland, New Zealand), ewe body condition score (BCS), ewe backfat thickness (BFT) in millimeters (mm), and the individual CH_4 concentrations ($\mu L\,L^{-1}$) in the exhaled air. Body condition score was assessed by palpating the transverse and spinous processes of the lumbar region around the backbone. Scores ranged on a scale from 1.0 (emaciated) to 5.0 (obese) with increments of 0.5 (Russel et al., 1969). Backfat thickness was measured on the right side directly behind the 13th rib (Silva et al., 2006; Gernand and Lenz, 2005), using a mobile ultrasound transducer (EasiScan ultrasound scanner, 4.5–8.5 MHz linear, BCF Technology Ltd., Bellshill, Scotland). Individual CH_4 concentrations in the exhaled air were measured using an LMD (Crowcon LaserMethane Mini, Tokyo Gas Engineering Co Ltd., Tokyo, Japan). Lamb body weight was recorded from 281 offspring (216 ML, 65 RH). A further subset for genetic analyses considered only EBW and BCS of an additional 153 ewes (120 ML, 33 RH) and LBW of their 348 lambs (262 ML, 86 RH). We generated a longitudinal data structure, implying ewe trait and LBW recording on the same days in intervals of 3 weeks from parturition until weaning.

2.4 Laser methane detector method and CH_4 data preparation

According to Ricci et al. (2014), the interval between feeding and LMD CH_4 recording comprised 3–5 h. Ricci et al. (2014) identified substantial impact of meteorological data on individual CH_4 emissions. Consequently, we selected a windstill environment, and we accounted for temperature and humidity in genetic-statistical modeling. In order to guarantee standardized trait recording, ewe CH_4 measurements were performed after weighing in the weighing facility, and additionally an assistant fixated the ewes during CH_4 recording. Hence, we always had a distance of exactly 1 m between the operator (i.e., the LMD) and the sheep's nostrils, and we avoided noisy data because of an uncontrolled movement (Ricci et al., 2014; Huhtanen et al., 2015).

The LMD recorded CH_4 concentrations in intervals of 0.5 s in the exhaled air. Methane concentrations were directly displayed in parts per million-meter (ppm-m) (Tokyo Gas Engineering Co. Ltd., 2013). Because the distance between the LMD and the ewe's nostrils was exactly 1 m in the present study, the CH_4 concentration was expressed in microliters per liter (Ricci et al., 2014). Ongoing CH_4 data preparation in R 3.3.2 (R Development Core Team, 2016) is based on the protocol as suggested by Ricci et al. (2014): the minimum CH_4 concentration of each measurement was set as a background CH_4 concentration, i.e., to reflect environmental CH_4 influence (overall mean background $CH_4 = 6.82\ \mu L\,L^{-1}$). Afterwards, background CH_4 was subtracted from the remaining CH_4 records. Because the LMD detection is based on CH_4 in the exhaled air, we considered the dynamics of the respiratory cycle (Chagunda, 2013). In this regard, Fig. 1 illustrates the CH_4 measurement profile for one ewe. Every dot represents a detected CH_4 concentration in microliters per liter. The CH_4 emission profile represents small increases in CH_4 concentration (mini-peaks; solid dots) due to exhalation or eructation. Before and after one mini-peak, mini-troughs (open dots) represent small CH_4 concentration decreases due to CH_4 diffusions. Only mini-peak data (solid dots) were log-transformed (natural logarithm) and used for further analyses (Chagunda et al., 2009b). Because mini-peaks reflect two different possibilities of CH_4 excretion – (i) CH_4 absorption from the rumen or lower digestive tract and emission via the lungs (respiration) and (ii) CH_4 emissions directly from the rumen (eructation) (Murray et al., 1976) – a double normal distribution for mini-peaks was assumed. The dashed line in Fig. 1 shows the defined threshold at 95 % cumulative probability ($35.87\ \mu L\,L^{-1}$) for the lower normal distribution from all CH_4 mini-peak observations. Consequently, all mini-peaks (solid dots) under the dashed line belong to CH_4 emitted during respiration. All mini-peaks (solid dots) above the threshold represent CH_4 concentrations during eructation. A group of solid dots including more than two mini-peaks above the dashed line was defined as one eructation event. Each normal distribution (respiration CH_4; eructation CH_4) represents a separate CH_4 dataset with separate mean and maximum. Based on the data preparation protocol, the following CH_4 traits were defined:

$CH_{4_{r+e}}$: mean CH_4 concentration during respiration and eructation,
CH_{4_r}: mean CH_4 concentration during respiration,
$CH_{4_{rsum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during respiration,
$CH_{4_{rmax}}$: maximum CH_4 concentration during respiration,
CH_{4_e}: mean CH_4 concentration during eructation,
$CH_{4_{esum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during eructation,
$CH_{4_{emax}}$: maximum CH_4 concentration during eructation,
$CH_{4_{event}}$: number of eructation events per minute.

Descriptive statistics for the defined CH_4 traits are given in Table 1.

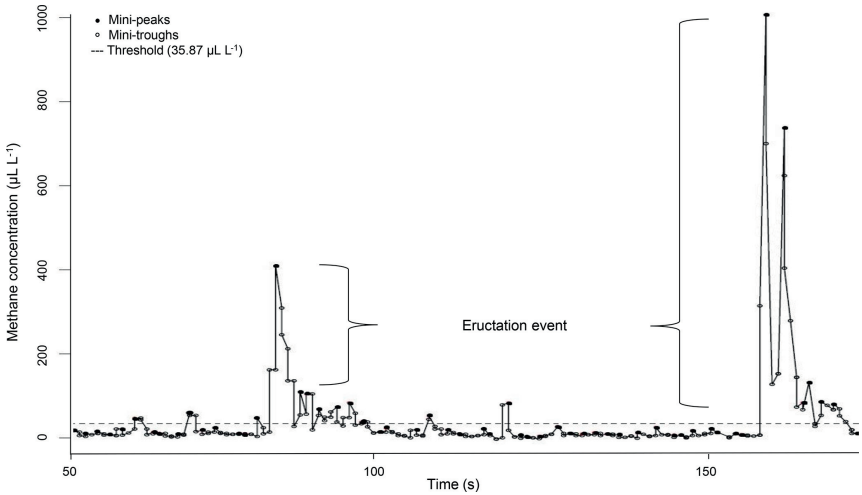


Figure 1. Example for a CH_4 measurement profile of one ewe recorded via laser methane detector (LMD) and corrected for background CH_4. Values under the threshold describe CH_4 emissions during respiration and values above the threshold describe CH_4 emissions during eructation.

2.5 Phenotypic associations between ewe CH_4 emissions with ewe and lamb body weight traits

The impact of ewe CH_4 emissions on EBW, BFT, BCS and LBW was studied via mixed model applications as implemented in the software package SAS Studio Version 3.71 (SAS Institute Inc., 2017). In matrix notation, the statistical model Eq. (1) was defined as follows:

$$\boldsymbol{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{b} + \mathbf{Z}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{e}, \tag{1}$$

where $\boldsymbol{y}$ is a vector of observations for the traits EBW, BFT, BCS and LBW; $\boldsymbol{b}$ is a vector of fixed effects including the combined effect of birth type (single, twin, triplet) and sex of the lamb (male, female), breed (ML, RH), the combined month–of-the-year effect, ewe BCS (1–5) (apart from the models where BCS and BFT are the traits of interest), and the fixed regression of the lamb age (0 to 73 d) within breed modeled with Legendre polynomials of fourth order. Furthermore, vector $\boldsymbol{b}$ included in consecutive runs the different CH_4 traits $CH_{4_{r+e}}$- ($\leq 25\,\mu L\,L^{-1}$; 26–35 $\mu L\,L^{-1}$; $\geq 36\,\mu L\,L^{-1}$), CH_{4_r}- ($\leq 15.5\,\mu L\,L^{-1}$; 15.6–19.5 $\mu L\,L^{-1}$; $>19.5\,\mu L\,L^{-1}$), $CH_{4_{rsum}}$- ($\leq 360\,\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$; 361–439 $\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$; $\geq 440\,\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$), $CH_{4_{rmax}}$- ($\leq 34\,\mu L\,L^{-1}$; $>34\,\mu L\,L^{-1}$), CH_{4_e}- ($\leq 72\,\mu L\,L^{-1}$; 73–99 $\mu L\,L^{-1}$; $>99\,\mu L\,L^{-1}$), $CH_{4_{esum}}$- ($\leq 310\,\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$; 311–620 $\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$; $>620\,\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$), $CH_{4_{emax}}$- ($\leq 170\,\mu L\,L^{-1}$; 171–315 $\mu L\,L^{-1}$; $>315\,\mu L\,L^{-1}$), and $CH_{4_{event}}$ class ($\leq 0.96\,min^{-1}$; $>0.96\,min^{-1}$). $\boldsymbol{u}$ is a vector for the random ewe or lamb effect considering up to four repeated measurements per ewe and lamb, $\boldsymbol{e}$ is a vector of random residual effects, and $\mathbf{X}$ and $\mathbf{Z}$ are incidence matrices for $\boldsymbol{b}$ and $\boldsymbol{u}$, respectively.

2.6 Genetic parameters for ewe CH_4 emissions and body weight traits

Genetic (co)variance components for all trait combinations including EBW, BCS, BFT and LBW were estimated by applying the software package DMU (Madsen and Jensen, 2013) and using the AI-REML algorithm for multiple-trait animal models. For the CH_4 traits $CH_{4_{r+e}}$, CH_{4_r}, $CH_{4_{rmax}}$, $CH_{4_{rsum}}$, CH_{4_e}, $CH_{4_{emax}}$, $CH_{4_{esum}}$ and $CH_{4_{event}}$, single-trait animal models were applied. Multiple-trait models converged properly for EBW, BCS, BFT and LBW due to the larger dataset, but some convergence problems occurred when additionally including CH_4 traits from the smaller subset of phenotyped ewes. This was the reason for the application of single-trait animal models for CH_4 traits.

The statistical model Eq. (2) for genetic analyses in matrix notation was defined as follows:

$$\boldsymbol{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{b} + \mathbf{Z}\boldsymbol{a} + \mathbf{W}\boldsymbol{pe} + \boldsymbol{e}, \tag{2}$$

where $\boldsymbol{y}$ is a vector of observations for EBW, BCS, BFT and LBW and CH_4 traits; $\boldsymbol{b}$ is a vector of fixed effects including all effects as introduced in model (1) and the fixed effects for the temperature class (≤ 4, 4.1–8.5, 8.6–11, $>11\,°C$)

Table 1. Descriptive statistics for ewe body weight (EBW), ewe body condition score (BCS), ewe backfat thickness (BFT) and CH_4 traits in the breeds Merinoland (ML) and Rhön sheep (RH).

Breed	Trait*	No.	Mean	SD	Median	Minimum	Maximum
ML	EBW (kg)	1133	94.5	11.5	94.5	57.0	130
	BCS	1133	3.35	0.78	3.50	1.00	5.00
	BFT (mm)	513	5.78	2.39	6.00	1.00	12.0
	$CH_{4_{r+e}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	555	32.8	12.1	31.5	7.92	70.0
	CH_{4_r} ($\mu L\,L^{-1}$)	555	18.5	4.48	18.1	7.92	33.2
	$CH_{4_{rmax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	555	33.8	1.82	35.0	25.0	35.0
	$CH_{4_{rsum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	555	427	97.5	413	0.00	767
	CH_{4_e} ($\mu L\,L^{-1}$)	555	90.9	36.1	84.2	0.00	279
	$CH_{4_{emax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	555	292	193	244	0.00	975
	$CH_{4_{esum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	555	522	342	470	0.00	1865
	$CH_{4_{event}}$ ($no.\,min^{-1}$)	555	0.95	0.55	0.96	0.00	3.38
RH	EBW (kg)	360	70.6	8.36	69.5	54.0	92.5
	BCS	360	2.99	0.65	3.00	1.00	4.50
	BFT (mm)	183	6.38	1.56	6.00	2.00	11.0
	$CH_{4_{r+e}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	175	31.4	12.0	30.1	7.03	67.5
	CH_{4_r} ($\mu L\,L^{-1}$)	175	16.5	3.92	16.7	7.03	27.6
	$CH_{4_{rmax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	175	33.4	2.01	34.0	26.0	35.0
	$CH_{4_{rsum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	175	381	84.2	375	196	796
	CH_{4_e} ($\mu L\,L^{-1}$)	175	93.8	36.7	87.2	0.00	242
	$CH_{4_{emax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	175	277	181	230	0.00	893
	$CH_{4_{esum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	175	513	335	463	0.00	1706
	$CH_{4_{event}}$ ($no.\,min^{-1}$)	175	0.99	0.58	0.99	0.00	3.67

* $CH_{4_{r+e}}$: mean CH_4 concentration during respiration and eructation; CH_{4_r}: mean CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rmax}}$: maximum CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rsum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during respiration; CH_{4_e}: mean CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{emax}}$: maximum CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{esum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during eructation; $CH_{4_{event}}$: number of eructation events per minute.

and for the humidity class ($\leq 43\,\%$, 44 %–55 %, 56 %–64 %, $>64\,\%$); $\boldsymbol{a}$ is a vector of random additive genetic effects considering the genetic relationships from an animal model; $\boldsymbol{pe}$ is a vector of random permanent environmental effects for repeated measurements; $\boldsymbol{e}$ is a vector of random residual effects; and $\mathbf{X}$, $\mathbf{Z}$ and $\mathbf{W}$ are incidence matrices for $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{a}$ and $\boldsymbol{pe}$, respectively.

Correlations among estimated breeding values (EBVs) for CH_4 traits (EBV from the single-trait models), and between EBV for CH_4 traits and EBV for EBW, BCS, BFT and LBW (EBV from the multiple-trait model) were transformed into genetic correlations according to Calo et al. (1973):

$$r_{g1,2} = \frac{\sqrt{\left(\sum_i R_{i1}\right)\cdot\left(\sum_i R_{i2}\right)}}{\sum_i \left(R_{i1}\cdot R_{i2}\right)}\cdot r\left(\mathrm{EBV}_1, \mathrm{EBV}_2\right),$$

where R was the EBV reliability for an individual i in trait j. For the genetic correlation approximations, we only considered EBV from ewes with phenotypic records.

3 Results and discussion

3.1 Strategies of CH_4 trait definitions

The introduced CH_4 data preparation strategy is very complex. Nevertheless, a separation of respiration and eructation CH_4 is physiologically reasonable and considers environmental air movements. We identified a high agreement between statistically defined eructation events and ewe eructation during trait recording (own visual inspections of eructation events during CH_4 recording). In our data, during the 3 min recording interval, 95 % of ewes eructated at least once. The eructation probability in the study by Ricci et al. (2014) was slightly lower (92 %), but they considered a 2 min recording interval. Hence, a minor disadvantage for specific CH_4 eructation trait definitions is the small percentage of ewes (5 %) which had to be excluded from data processing. Chagunda et al. (2009b) introduced a further transformation of LMD output data ($\mu L\,L^{-1}$) into daily CH_4 production ($g\,d^{-1}$) but without distinguishing into respiration and eructation. The data processing procedure by Chagunda et al. (2009b) also required complex equations including approximations for, example, individual respiratory tidal volume or for the daily animal activity level. Methane

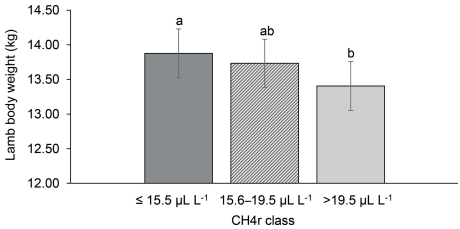


Figure 2. Least-squares means for lamb body weight (LBW) depending on ewe mean CH_4 concentration during respiration (CH_{4_r} class; model 1). Different letters represent significant differences ($P<0.01$).

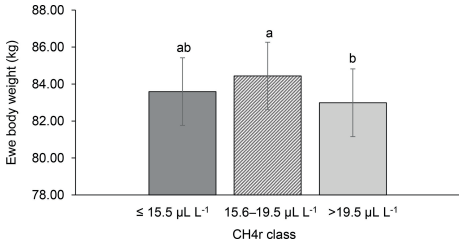


Figure 3. Least-squares means for ewe body weight (EBW) depending on ewe mean CH_4 concentration during respiration (CH_{4_r} class; model 1). Different letters represent significant differences ($P<0.01$).

traits as defined in our study reflect "pure" CH_4 emissions, whereas CH_4 predictions by Chagunda et al. (2009b) depend on body trait or physiological characteristics. Hence, in quantitative genetic studies, and following a deterministic CH_4 prediction strategy, the estimated heritability does not fully reflect the individual CH_4 genetic background (Yin et al., 2015). In genome-wide association studies, Manzanilla-Pech et al. (2016) found an overlap for 19 % of SNP markers being significantly associated with DMI, body weight and individual CH_4 production in dairy cattle. In consequence, they suggested consideration of residual CH_4 emissions that are additionally pre-corrected for CH_4 indicator traits (e.g., for DMI and for body weight).

Moreover, our CH_4 trait separation into respiration and eructation provides deeper insights into the different physiological mechanisms associated with CH_4 output. The CH_4 separation strategy allows studying the isolated influence of either respiration or eructation on ewe body condition traits and on LBW. Nevertheless, our approach depends on the individual threshold definition for the two normal distributions (respiration and eructation).

3.2 Phenotypic impact of CH_4 traits on lamb body weight and ewe body condition

Among all CH_4 traits, the inclusion of CH_4 mean concentration during respiration (CH_{4_r}) as class effect in model (1) gave the lowest value for the Akaike information criterion (Akaike, 1973) (Table 2). Hence, CH_{4_r} consideration indicated statistical modeling superiority. The CH_{4_r} class effect significantly influenced LBW ($P<0.05$) and EBW ($P<0.01$) (model 1). Ewes with low mean CH_4 emissions during respiration reared heavier lambs than ewes with high CH_4 emissions ($P<0.001$; Fig. 2). Simultaneously, low mean CH_4 emissions during respiration were associated with larger estimates for EBW during lactation ($P<0.001$; Fig. 3). EBW during lactation for ewes from the low $CH_{4_{rmax}}$ class was significantly higher (0.74 kg, $P<0.05$) compared to EBW from ewes with high $CH_{4_{rmax}}$ emissions ($CH_{4_{rmax}}$ class $>34\,\mu L\,L^{-1}$). In cattle, Johnson and Johnson (1995) identified high CH_4 emissions as major contributors to energy losses, comprising 5 %–12 % of the gross energy intake. Consequently, limited energy is available for milk production, explaining the lower LBW of lambs from ewes with high CH_4 output during lactation. Kandel et al. (2017) and Chagunda et al. (2009a) confirmed such unfavorable associations between CH_4 emissions and milk yield in cattle. Interestingly, the CH_4 eructation traits represent larger CH_4 emissions than the respiration traits (Blaxter and Joyce, 1963), but only the respiration CH_4 traits CH_{4_r} and $CH_{4_{rmax}}$ significantly influenced LBW and EBW. An explanation for the significant impact of "low-level CH_4" (CH_{4_r}, $CH_{4_{rmax}}$) on LBW and EBW might be due to the short recording interval of only 3 min. For a small recording interval, the percentage of respiration in relation to eructation is larger, compared to, for example, accumulate 24 h measurements.

Least-squares means for BFT declined with increasing ewe CH_4 emissions. In this regard, ewes representing the medium $CH_{4_{r+e}}$, $CH_{4_{emax}}$ and $CH_{4_{esum}}$ class had 0.38 to 0.43 mm less BFT than ewes from the low CH_4 classes ($P<0.05$) (Fig. 4). An increase of CH_4 emissions was associated with inefficient feed conversion, both contributing to energy deficiency during the early lactation stage (Hegarty et al., 2007; Paganoni et al., 2017). Hence, for energy deficiency compensation due to mammary requirements during lactation (intensified through CH_4 emissions), ewes are forced to increase the mobilization rate of their own body fat depots (Bell, 1995), explaining the EBW and BFT decline. Such initiated catabolic processes depend on liver glycogen levels, which represent an important glucose (energy) body resource. Physiologically, catecholamine and glucagon blood levels are increasing, initiating the hydrolysis of body fat deposits (triglycerides) (Lawrence and Fowler, 2002). Ewes from the present study received concentrates but also responded with a BFT decline during lactation. Weston (1996) indicated the general problem of energy deficiency of lactating ewes, especially in pasture based production systems.

Table 2. Akaike information criterion (AIC) for model (1) with the dependent traits of lamb body weight (LBW) or ewe body weight (EBW), considering different CH_4 class effects.

	AIC	
CH_4 class effect*	LBW	EBW
$CH_{4_{r+e}}$	4567	4484
CH_{4_r}	4564	4476
$CH_{4_{rmax}}$	4571	4485
$CH_{4_{rsum}}$	4569	4487
CH_{4_e}	4571	4488
$CH_{4_{esum}}$	4572	4488
$CH_{4_{emax}}$	4572	4488
$CH_{4_{event}}$	4571	4488

* $CH_{4_{r+e}}$: mean CH_4 concentration during respiration and eructation; CH_{4_r}: mean CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rmax}}$: maximum CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rsum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during respiration; CH_{4_e}: mean CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{emax}}$: maximum CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{esum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during eructation; $CH_{4_{event}}$: number of eructation events per minute.

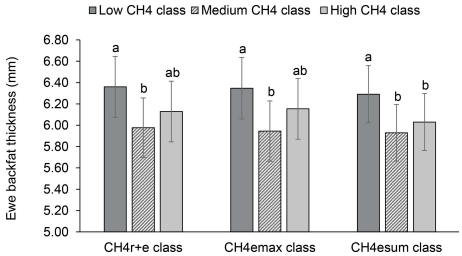


Figure 4. Least-squares means for ewe backfat thickness (BFT) depending on ewe mean CH_4 concentration during respiration and eructation ($CH_{4_{r+e}}$ class), maximal CH_4 concentration during eructation ($CH_{4_{emax}}$ class), and sum of CH_4 concentrations per minute during eructation ($CH_{4_{esum}}$ class) (model 1). Definition of CH_4 classes: low CH_4 class: $CH_{4_{r+e}} \leq 25\,\mu L\,L^{-1}$; $CH_{4_{emax}} \leq 170\,\mu L\,L^{-1}$; $CH_{4_{esum}} \leq 310\,\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$; medium CH_4 class: $CH_{4_{r+e}}$ 26–35 $\mu L\,L^{-1}$; $CH_{4_{emax}}$ 171–315 $\mu L\,L^{-1}$; $CH_{4_{esum}}$ 311–620 $\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$; high CH_4 class: $CH_{4_{r+e}} \geq 36\,\mu L\,L^{-1}$; $CH_{4_{emax}} > 315\,\mu L\,L^{-1}$; $CH_{4_{esum}} > 620\,\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$. Different letters represent significant differences ($P < 0.01$).

Consequently, we suggest selection strategies on low CH_4 emissions, in order to avoid further energy losses.

Bielak et al. (2016) suggested plasma levels of non-esterified fatty acids (NEFAs) as indicators for body fat mobilization. In lactating dairy cows, Bielak et al. (2016) identified a negative relationship between CH_4 production per DMI and NEFA plasma levels. Nevertheless, intensified body fat mobilization with decreasing CH_4 emissions in cows is in contradiction with the identified associations in the present study for sheep. Summarizing the phenotypic relationships, low values for $CH_{4_{r+e}}$, CH_{4_r}, $CH_{4_{rmax}}$, $CH_{4_{emax}}$ and $CH_{4_{esum}}$ in ewes were favorably associated with maternal body fat storage during lactation, and with increasing LBW.

3.3 Genetic parameters for CH_4, ewe body condition traits and lamb body weight

In previous studies, variation of individual CH_4 emissions was due to the diet composition and feeding system characteristics (Chagunda et al., 2009a; Pinares-Patiño et al., 2011; Bell et al., 2016), ruminal microbiome (Shi et al., 2014) and host genetic compositions (Pinares-Patiño et al., 2013). Genetic variation for CH_4 emissions indicates the general possibilities for genetic selection, but this variation was only detected for $CH_{4_{rsum}}$ and $CH_{4_{emax}}$ (Table 3). Correspondingly, heritabilities for CH_4 traits (Table 3) were close to zero, with the largest estimate for $CH_{4_{rsum}}$ (0.03). Pickering et al. (2015) and Paganoni et al. (2017) estimated heritabilities for CH_4 in a comparable range from 0.05 to 0.14 in dairy cattle and sheep, respectively. For CH_4 recordings, Paganoni et al. (2017) used portable accumulation chambers, and they applied the technique to lambs at post-weaning age and hoggets. Hence, CH_4 heritabilities in ruminants are generally quite low, irrespective of the utilized measurement technology and the age of animals. Quite large residual variances (as also indicated in Table 3 for the traits in the present study) due to further environmental effects, which were not considered in statistical modeling, e.g., the individual stress level during measurement or the exhalation rate (Wu et al., 2018), might explain the generally small CH_4 heritabilities in sheep. Large residual variances and small heritabilities indicate only minor selection response when aiming on reduced CH_4 emissions. Besides, some ewes did not show any eructation during short time measurements. For the inclusion of eructation CH_4 traits (CH_{4_e}, $CH_{4_{emax}}$, $CH_{4_{esum}}$, $CH_{4_{event}}$) into overall breeding goals, it is imperative to consider repeated measurements per animal, in order to guarantee at least one eructation per measurement.

Heritabilities for body condition traits were 0.56 for EBW, 0.37 for BCS, 0.25 for BFT and 0.37 for LBW (Table 3). Pinares-Patiño et al. (2013) and Borg et al. (2009) estimated similar heritabilities for live weight of 0.46 and 0.38, respectively. Jonker et al. (2018) estimated a heritability of 0.35 for LBW at 4 to 13 months of age, confirming our estimate of 0.37. The BFT heritability reflects estimates by Gernand et al. (2008) and Brito et al. (2017), but in both studies, the authors considered records from lambs instead of ewe traits.

Table 3. Heritabilities (h^2) with standard errors (SE), additive genetic variances (σ_a^2), permanent environmental variances (σ_{pe}^2) and residual variances (σ_e^2) for lamb body weight (LBW), ewe body weight (EBW), ewe body condition score (BCS), ewe backfat thickness (BFT) and CH_4 traits.

		Variance component		
Trait*	h^2 (SE)	σ_a^2	σ_{pe}^2	σ_e^2
LBW (kg)	0.37 (0.16)	3.29	1.64	3.12
EBW (kg)	0.56 (0.12)	51.9	27.8	13.6
BCS	0.37 (0.10)	0.16	0.11	0.16
BFT (mm)	0.25 (0.13)	0.74	0.62	1.62
$CH_{4_{r+e}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	0.00 (0.04)	< 0.01	6.12	132
CH_{4_r} ($\mu L\,L^{-1}$)	0.00 (0.04)	< 0.01	0.23	14.7
$CH_{4_{rsum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	0.03 (0.04)	185	0.00	7125
$CH_{4_{rmax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	0.00 (0.04)	< 0.01	0.00	3.08
CH_{4_e} ($\mu L\,L^{-1}$)	0.01 (0.04)	8.46	38.9	1049
$CH_{4_{esum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	0.00 (0.04)	54.4	4051	105 677
$CH_{4_{emax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	0.01 (0.04)	408	957	3236
$CH_{4_{event}}$ (no. min^{-1})	0.02 (0.05)	0.01	0.02	0.25

* $CH_{4_{r+e}}$: mean CH_4 concentration during respiration and eructation; CH_{4_r}: mean CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rmax}}$: maximum CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rsum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during respiration; CH_{4_e}: mean CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{emax}}$: maximum CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{esum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during eructation; $CH_{4_{event}}$: number of eructation events per minute.

Table 4. Genetic correlations between lamb body weight (LBW), ewe body weight (EBW), ewe body condition score (BCS) and ewe backfat thickness (BFT) with standard errors (in brackets), and approximated genetic correlations between LBW, EBW, BCS, BFT and CH_4 traits.

	Genetic correlations			
Trait*	LBW (kg)	EBW (kg)	BCS	BFT (mm)
LBW (kg)		0.78 (0.14)	0.52 (0.23)	0.67 (0.29)
EBW (kg)			0.78 (0.09)	0.79 (0.18)
BCS				0.96 (0.13)
BFT (mm)				
$CH_{4_{r+e}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	−0.35	−0.44	−0.42	−0.67
CH_{4_r} ($\mu L\,L^{-1}$)	−0.07	−0.14	0.10	0.05
$CH_{4_{rsum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	0.01	−0.05	0.28	0.12
$CH_{4_{rmax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	0.01	−0.35	−0.20	−0.08
CH_{4_e} ($\mu L\,L^{-1}$)	−0.17	−0.27	−0.34	−0.51
$CH_{4_{esum}}$ ($\mu L\,L^{-1}\,min^{-1}$)	−0.28	−0.32	−0.81	−0.49
$CH_{4_{emax}}$ ($\mu L\,L^{-1}$)	−0.18	−0.34	−0.30	−0.72
$CH_{4_{event}}$ (no. min^{-1})	−0.22	−0.23	−0.44	−0.32

* $CH_{4_{r+e}}$: mean CH_4 concentration during respiration and eructation; CH_{4_r}: mean CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rmax}}$: maximum CH_4 concentration during respiration; $CH_{4_{rsum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during respiration; CH_{4_e}: mean CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{emax}}$: maximum CH_4 concentration during eructation; $CH_{4_{esum}}$: sum of CH_4 concentrations per minute during eructation; $CH_{4_{event}}$: number of eructation events per minute.

3.4 Genetic relationships between CH_4 traits with ewe body condition traits and with lamb body weight

For the definition of overall sheep breeding goals including CH_4, knowledge about genetic correlations and covariances with other economically important traits (e.g., LBW) is imperative. Genetic correlations between CH_4 traits and EBW were slightly (CH_{4_r}, $CH_{4_{rsum}}$) or moderately negative ($CH_{4_{r+e}}$, $CH_{4_{rmax}}$, CH_{4_e}, $CH_{4_{emax}}$, $CH_{4_{esum}}$, $CH_{4_{event}}$), indicating that breeding on low CH_4 emissions increases EBW and vice versa (Table 4). Generally, genetic correlation estimates between CH_4 traits and EBW were in agreement with the phenotypic associations from model (1). In contrast

to our results, Pinares-Patiño et al. (2013) estimated a differing genetic correlation of 0.80 between CH_4 production ($g\,d^{-1}$) and body weights of lambs at the age of 8 months. In the present study, BCS was moderately negatively correlated with all CH_4 traits reflecting eructation (CH_{4_e}, $CH_{4_{emax}}$, $CH_{4_{esum}}$, $CH_{4_{event}}$; Table 4). Also, genetic correlations between BCS with $CH_{4_{r+e}}$ and $CH_{4_{rmax}}$ were negative. Zetouni et al. (2018) estimated a similar genetic correlation of −0.28 between CH_4 production and BCS in Danish Holstein cows. Regarding BFT, a decline in $CH_{4_{r+e}}$, CH_{4_e}, $CH_{4_{emax}}$, $CH_{4_{esum}}$ and $CH_{4_{event}}$ was genetically associated with an incline in BFT. The genetic correlations between the respiration CH_4 traits (CH_{4_r}, $CH_{4_{rmax}}$, $CH_{4_{rsum}}$) and BFT were close to zero. In contrast to the phenotypic associations, genetic relationships between respiration CH_4 traits (CH_{4_r}, $CH_{4_{rsum}}$, $CH_{4_{rmax}}$) and LBW were quite low in the range from −0.07 to 0.01. On a genetic basis, among all CH_4 traits, $CH_{4_{r+e}}$ had the strongest genetic correlation (−0.35) with LBW.

Genetic correlations among EBW, BCS, BFT and LBW were positive, indicating an incline in LBW when selecting heavy ewes with high values for BCS and BFT. However, a strict selection on increasing EBW, BCS and BFT for indirect improvements of LBW might be associated with insulin resistance and hormone dysregulation in the future F1 and F2 generations (Pankey et al., 2017). Furthermore, adipose ewes were susceptible for dystocia (Peel et al., 2012).

In summary, the CH_4 traits $CH_{4_{r+e}}$, CH_{4_e}, $CH_{4_{esum}}$, $CH_{4_{emax}}$ and $CH_{4_{event}}$ were genetically favorably correlated with LBW, indicating an increase in LBW and simultaneously improvements of EBW, BCS and BFT when selecting on low CH_4 emissions, particularly during eructation. Nevertheless, small CH_4 heritabilities indicate only slight selection response. Hence, in breeding goals or selection indices, it is imperative to consider the low heritability CH_4 traits with high economic values (König et al., 2009).

4 Conclusions

CH_4 recording via LMD technique was successfully implemented in sheep under field conditions. On a longitudinal trait basis, we developed statistical strategies for distinguishing CH_4 emissions in respiration and eructation. Large ewe CH_4 emissions during respiration were associated with lower EBW as well as with impaired body weight development of their lambs. Additionally, a significant ewe BCS and BFT decrease after lambing was detected in ewes with high levels of CH_4 emissions during eructation. Heritabilities for CH_4 traits were close to zero (h^2 <0.01 to 0.03). Nevertheless, the genetic correlations between CH_4 traits $CH_{4_{r+e}}$, CH_{4_e}, $CH_{4_{emax}}$, $CH_{4_{esum}}$ and $CH_{4_{event}}$ and energy efficiency indicators (e.g., LBW) suggest consideration of ewe CH_4 emissions in overall sheep breeding goals when aspiring to feed efficiency improvements. We proved that the utilization of LMD equipment is an appropriate non-invasive method to measure CH_4 emissions in sheep rapidly, easily and cost-efficiently. Furthermore, the differentiation between respiration and eructation CH_4 emissions provides insights into physiological dynamics of CH_4 emissions. Nevertheless, environmental (e.g., micrometeorology) and physiological (e.g., respiratory volume, behavior) factors can influence results from the applied CH_4 recording technique and should be considered in future statistical modeling approaches.

Data availability. The data that support the findings of this study are available from the authors upon reasonable request.

Author contributions. SK, AW and HW designed the experiment and supervised the research. SK supported JR in writing and data validation. JR was responsible for phenotyping activities, supported by PE. JR, KB and TY were responsible for data preparation and genetic statistical analyses. All authors read and approved the manuscript.

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgements. The authors are grateful to the H. Wilhelm Schaumann Stiftung for providing a scholarship to Jessica Reintke.

Financial support. This open-access publication was funded by Justus Liebig University Giessen.

Review statement. This paper was edited by Manfred Mielenz and reviewed by Angela Schwarm and one anonymous referee.

References

Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood Principle, in: Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory, edited by: Petrov, B. N. and Csaki, F., Akademiai Kiado, Budapest, 267–281, 1973.

Baker, S. K.: Rumen methanogens, and inhibition of methanogenesis, Aust. J. Agr. Res., 50, 1293–1298, https://doi.org/10.1071/AR99005, 1999.

Bell, A. W.: Regulation of organic nutrient metabolism during transition from late pregnancy to early lactation, J. Anim. Sci., 73, 2804–2819, https://doi.org/10.2527/1995.7392804x, 1995.

Bell, M., Eckard, R., Moate, P. J., and Yan, T.: Modelling the effect of diet composition on enteric methane emissions across sheep, beef cattle and dairy cows, Animals, 6, 1–16, https://doi.org/10.3390/ani6090054, 2016.

Bickell, S. L., Revell, D. K., Toovey, A. F., and Vercoe, P. E.: Feed intake of sheep when allowed ad libitum access to feed in methane respiration chambers, J. Anim. Sci., 92, 2259–2264, https://doi.org/10.2527/jas.2013-7192, 2014.

Bielak, A., Derno, M., Tuchscherer, A., Hammon, H. M., Susenbeth, A., and Kuhla, B.: Body fat mobilization in early lactation influences methane production of dairy cows, Sci. Rep., 6, 28135, https://doi.org/10.1038/srep28135, 2016.

Blaxter, K. L. and Joyce, J. P.: The accuracy and ease with which measurements of respiratory metabolism can be made with tracheostomized sheep, Brit. J. Nutr., 17, 523–537, https://doi.org/10.1079/BJN19630055, 1963.

Borg, R. C., Notter, D. R., and Kott, R. W.: Phenotypic and genetic associations between lamb growth traits and adult ewe body weights in western range sheep, J. Anim. Sci., 87, 3506–3514, https://doi.org/10.2527/jas.2008-1622, 2009.

Brito, L. F., McEwan, J. C., Miller, S., Bain, W., Lee, M., Dodds, K., Newman, S.-A., Pickering, N., Schenkel, F. S., and Clarke, S.: Genetic parameters for various growth, carcass and meat quality traits in a New Zealand sheep population, Small Rumin. Res., 154, 81–91, https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.07.011, 2017.

Calo, L. L., McDowell, R. E., van Dale Vleck, L., and Miller, P. D.: Genetic aspects of beef production among Holstein-Friesians pedigree selected for milk production, J. Anim. S., 37, 676–682, https://doi.org/10.2527/jas1973.373676x, 1973.

Chagunda, M. G. G.: Opportunities and challenges in the use of the Laser Methane Detector to monitor enteric methane emissions from ruminants, Animal, 7, 394–400, https://doi.org/10.1017/S1751731113000724, 2013.

Chagunda, M. G. G. and Yan, T.: Do methane measurements from a laser detector and an indirect open-circuit respiration calorimetric chamber agree sufficiently closely?, Anim. Feed Sci. Technol., 165, 8–14, https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.02.005 2011.

Chagunda, M. G. G., Römer, D. A. M., and Roberts, D. J.: Effect of genotype and feeding regime on enteric methane, non-milk nitrogen and performance of dairy cows during the winter feeding period, Livest. Sci., 122, 323–332, https://doi.org/10.1016/j.livsci.2008.09.020, 2009a.

Chagunda, M. G. G., Ross, D., and Roberts, D. J.: On the use of a laser methane detector in dairy cows, Comput. Electron. Agr., 68, 157–160, https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.05.008, 2009b.

Ellison, M. J., Conant, G. C., Lamberson, W. R., Cockrum, R. R., Austin, K. J., Rule, D. C., and Cammack, K. M.: Diet and feed efficiency status affect rumen microbial profiles of sheep, Small Rumin. Res., 156, 12–19, https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2017.08.009, 2017.

Gernand, E. and Lenz, H.: Using of ultrasound for estimation of carcass composition and prediction of breeding value for sheep, Arch. Anim. Breed., 48, 174–184, https://doi.org/10.5194/aab-48-174-2005, 2005.

Gernand, E., Wassmuth, R., Lenz, H., von Borstel, U. U., Gauly, M., and König, S.: Impact of energy supply of ewes on genetic parameters for fertility and carcass traits in Merino Long Wool sheep, Small Rumin. Res., 75, 80–89, https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2007.09.004, 2008.

Hegarty, R. S., Goopy, J. P., Herd, R. M., and McCorkell, B.: Cattle selected for lower residual feed intake have reduced daily methane production, J. Anim. Sci., 85, 1479–1486. https://doi.org/10.2527/jas.2006-236, 2007.

Henderson, G., Cox, F., Ganesh, S., Jonker, A., Young, W., and Janssen, P. H.: Rumen microbial community composition varies with diet and host, but a core microbiome is found across a wide geographical range, Sci. Rep., 5, 14567, https://doi.org/10.1038/srep14567, 2015.

Huhtanen, P., Cabezas-Garcia, E. H., Utsumi, S., and Zimmerman, S.: Comparison of methods to determine methane emissions from dairy cows in farm conditions, J. Dairy Sci., 98, 3394–3409, https://doi.org/10.3168/jds.2014-9118, 2015.

Johnson, D. E. and Ward, G. M.: Estimates of animal methane emissions, Environ. Monit. Assess., 42, 133–141, https://doi.org/10.1007/BF00394046, 1996.

Johnson, K. A. and Johnson, D. E.: Methane Emissions from Cattle, J. Anim. Sci., 73, 2483–2492, https://doi.org/10.2527/1995.7382483x, 1995.

Jonker, A., Hickey, S. M., Rowe, S. J., Janssen, P. H., Shackell, G. H., Elmes, S., Bain, W. E., Wing, J., Greer, G. J., Bryson, B., MacLean, S., Dodds, K. G., Pinares-Patiño, C. S., Young, E. A., Knowler, K., Pickering, N. K., and McEwan, J. C.: Genetic parameters of methane emissions determined using portable accumulation chambers in lambs and ewes grazing pasture and genetic correlations with emissions determined in respiration chambers, J. Anim. Sci., 96, 3031–3042, https://doi.org/10.1093/jas/sky187, 2018.

Kabreab, E., Clark, K., Wagner-Riddle, C., and France, J.: Methane and nitrous oxide emissions from Canadian animal agriculture: A review, Can. J. Anim. Sci., 86, 135–158, https://doi.org/10.4141/A05-010, 2006

Kandel, P. B., Vanrobays, M.-L., Vanlierde, A., Dehareng, F., Froidmont, E., Gengler, N., and Soyeurt, H.: Genetic parameters of mid-infrared methane predictions and their relationships with milk production traits in Holstein cattle, J. Dairy Sci., 100, 5578–5591, https://doi.org/10.3168/jds.2016-11954, 2017.

Knapp, J. R., Laur, G. L., Vadas, P. A., Weiss, W. P., and Tricarico, J. M.: Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions, J. Dairy Sci., 97, 3231–3261, https://doi.org/10.3168/jds.2013-7234, 2014.

König, S., Simianer, H., and Willam, A.: Economic evaluation of genomic breeding programs, J. Dairy Sci., 92, 382–391, https://doi.org/10.3168/jds.2008-1310, 2009.

Lawrence, T. L. J. and Fowler, F. R.: Tissues: Basic structure and growth, in: Growth of farm animals, 2nd Edn., CABI Publishing, Wallingford, UK, 39–40, 2002.

Madsen, P. and Jensen, J.: A User's Guide to DMU, A Package for Analysing Multivariate Mixed Models, Version 6, release 5.2, 2013.

Manzanilla-Pech, C. I. V., de Haas, Y., Hayes, B. J., Veerkamp, R. F., Khansefid, M., Donoghue, K. A., Arthur, P. F., and Pryce, J. E.: Genomewide association study of methane emissions in Angus beef cattle with validation in dairy cattle, J. Anim. Sci., 94, 4151–4166, 2016.

Murray, R. M., Bryant, A. M., and Leng, R. A.: Rates of production of methane in the rumen and large intestine of sheep, Br. J. Nutr., 36, 1–14, https://doi.org/10.1079/BJN19760053, 1976.

Paganoni, B., Rose, G., Macleay, C., Jones, C., Brown, D. J., Kearney, G., Ferguson, M., and Thompson, A. N.: More feed efficient sheep produce less methane and carbon dioxide when eating high-quality pellets, J. Anim. Sci., 95, 3839–3850, https://doi.org/10.2527/jas2017.1499, 2017.

Pankey, C. L., Walton, M. W., Odhiambo, J. F., Smith, A. M., Ghnenis, A. B., Nathanielsz, P. W., and Ford, S. P.: Intergenerational impact of maternal overnutrition and obesity throughout pregnancy in sheep on metabolic syndrome in grandsons and granddaughters, Domest. Anim. Endocrinol., 60, 67–74, https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2017.04.002, 2017.

Peel, R. K., Eckerle, G. J., and Anthony, R. V.: Effects of overfeeding naturally-mated adolescent ewes on maternal, fetal, and postnatal lamb growth, J. Anim. Sci., 90, 3698–3708, https://doi.org/10.2527/jas.2012-5140, 2012.

Pickering, N. K., Chagunda, M. G. G., Banos, G., Mrode, R., McEwan, J. C., and Wall, E.: Genetic parameters for predicted methane production and laser methane detector measurements, J. Anim. Sci., 93, 11–20, https://doi.org/10.2527/jas.2014-8302, 2015.

Pinares-Patiño, C. S., Ebrahimi, S. H., McEwan, J. C., Dodds, K. G., Clark, H., and Luo, D.: Is rumen retention time implicated in sheep differences in methane emission?, Proc. New Zeal. Soc. An., 71, 219–222, https://doi.org/10.13140/2.1.3309.5043, 2011.

Pinares-Patiño, C. S., Hickey, S. M., Young, E. A., Dodds, K. G., MacLean, S., Molano, G., Sandoval, E., Kjestrup, H., Harland, R., Hunt, C., Pickering, N. K., and McEwan, J. C.: Heritability estimates of methane emissions from sheep, Animal, 7, 316–321, https://doi.org/10.1017/S1751731113000864, 2013.

R Development Core Team: A language and environment for statistical computing, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, available at: http://www.R-project.org, last access: 12 November 2016.

Ricci, P., Chagunda, M. G. G., Rooke, J., Houdijk, J. G. M., Duthie, C.-A., Hyslop, J., Roehe, R., and Waterhouse, A.: Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers, J. Anim. Sci., 92, 5239–5250, https://doi.org/10.2527/jas.2014-7676, 2014.

Robinson, D. L. and Oddy, V. H.: Benefits of including methane measurements in selection strategies, J. Anim. Sci., 94, 3624–3635, https://doi.org/10.2527/jas.2016-0503, 2016.

Rösler, R., Chefor, F., and Schlecht, E.: Using a portable laser methane detector in goats to assess diurnal, diet- and position-dependent variations in enteric methane emissions, Comput. Electron. Agr., 150, 110–117, https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.010, 2018.

Russel, A. J. F., Doney, J. M., and Gunn, R. G.: Subjective assessment of body fat in live sheep, J. Agr. Sci., 72, 451–454, https://doi.org/10.1017/S0021859600024874, 1969.

SAS Institute Inc.: SAS® Studio 3.71, User's Guide: SAS Institute, Inc., Cary, NC, USA, 2017.

Shi, W., Moon, C. D., Leahy, S. C., Kang, D., Froula, J., Kittelmann, S., Fan, C., Deutsch, S., Gagic, D., Seedorf, H., Kelly, W. K., Atua, R., Sang, C., Soni, P., Li, D., Pinares-Patiño, C. S., McEwan, J. C., Janssen, P. H., Chen, F., Visel, A., Wang, Z., Attwood, G. T., and Rubin, E. M.: Methane yield phenotypes linked to differential gene expression in the sheep rumen microbiome, Genome Res., 24, 1517–1525, https://doi.org/10.1101/gr.168245.113, 2014.

Silva, S. R., Afonso, J. J., Santos, V. A., Monteiro, A., Guedes, C. M., Azevedo, J. M. T., and Dias-da-Silva, A.: In vivo estimation of sheep carcass composition using real-time ultrasound with two probes of 5 and 7.5 MHz and image analysis, J. Anim. Sci., 84, 3433–3439, https://doi.org/10.2527/jas.2006-154, 2006.

Tokyo Gas Engineering Co. Ltd.: SA3C50A LaserMethane mini-G Operation Manual First Edition, Tokyo Gas Engineering Co. Ltd., Tokyo, Japan, 2013.

Weston, R. H.: Some aspects of constraint to forage consumption by ruminants, Aust. J. Agr. Res., 47, 175–197, https://doi.org/10.1071/AR9960175, 1996.

Wu, L., Koerkamp, P. W. G. G., and Ogink, N.: Uncertainty assessment of the breath methane concentration method to determine methane production of dairy cows, J. Dairy Sci., 101, 1554–1564, https://doi.org/10.3168/jds.2017-12710, 2018.

Yin, T., Pinent, T., Brügemann, K., Simianer, H., and König, S.: Simulation, prediction, and genetic analyses of daily methane emissions in dairy cattle, J. Dairy Sci., 98, 5748–5762, https://doi.org/10.3168/jds.2014-8618, 2015.

Zetouni, L., Kargo, M., Norberg, E., and Lassen, J.: Genetic correlations between methane production and fertility, health, and body type traits in Danish Holstein cows, J. Dairy Sci., 101, 2273–2280, https://doi.org/10.3168/jds.2017-13402, 2018.

KAPITEL 4

Dieses Kapitel basiert auf folgender Publikation:

Reintke, J., Brügemann, K., Yin, T., Wagner, H., Wehrend, A., Müller, A., König, S.
2020

Associations between minerals and metabolic indicators in maternal blood *pre*- and *postpartum* with ewe body condition, methane emissions, and lamb body weight development

Animal (angenommen)

Eigener Anteil an der Publikation:

Studienplanung:	wesentlich
Datenaufnahme:	eigenständig
Probenaufbereitung:	eigenständig
Statistische Auswertung:	weitestgehend eigenständig
Manuskripterstellung:	weitestgehend eigenständig

Abstract

In sheep production, economic efficiency strongly depends on the maternal health and feed efficiency status, and on weaning performances of their offspring. Accordingly, an optimal level for the supply with macro- and microelements and the ewe energy status has impact on the fetal development during gestation and on maternal milk production during lactation. Furthermore, this study addressed intergenerational aspects, i.e., on associations between maternal energy metabolism profiles considering the macro- and microelement status, metabolic indicators (e.g. β-hydroxybutyrate (**BHB**)), body condition and methane (**CH_4**) emissions with lamb body weight (**LBW**) in two sheep breeds. Traits were recorded at the beginning of gestation (ewe traits), at lambing, three weeks *postpartum* and at weaning (ewe and lamb traits). Trait recording included CH_4 emissions (recorded via laser methane detector (**LMD**)), body weight (**EBW**), backfat thickness (**BFT**) and body condition score (**BCS**) from 46 ewes (24 Merinoland- (**ML**), 22 Rhönsheep (**RH**)), and LBW of their 87 (35 ML, 52 RH) purebred lambs. Serum levels of the following ewe blood parameters were determined: calcium (**Ca**), sodium (**Na**), potassium (**K**), phosphate (**P**), non-esterified fatty acids (**NEFA**), BHB, glutamate dehydrogenase (**GLDH**), selenium (**Se**), copper (**Cu**), iron (**Fe**), zinc (**Zn**) and magnesium (**Mg**). Mixed models were applied to infer associations between ewe blood parameters with EBW, BFT, BCS and CH_4, and with LBW recorded in offspring.

At weaning, a maternal serum Mg level >1.0 mmol/L was significantly associated with an increase of 13% in LBW in ML, compared to offspring from ML ewes with a serum Mg concentration within the lower reference range (0.8 mmol/L). Furthermore, higher Cu levels were favorably associated with ewe BCS and BFT at weaning in both breeds. In RH ewes, a Se level >2.4 µmol/L was significantly associated with increased BCS. In the ML breed, high Zn levels during lactation were associated with reduced CH_4 emissions. Ewe EBW was significantly larger for ML ewes representing low Ca levels. A low BHB level was associated with decreasing CH_4 emissions in RH and ML. Serum levels for Na, K, P, GLDH and Fe did not significantly affect the traits of interest. Trait associations from the present study indicate the importance of the mineral supply and

metabolic status of the ewe with regard to body condition, CH_4 emissions and LBW development, but depending on the breed. Identified associations might contribute to energy efficiency in sheep production systems.

Keywords:

sheep, blood parameters, energy metabolism, methane, lamb weaning performance

Implications

Economic competitiveness of sheep production strongly depends on ewe health, ewe feed efficiency as well as on weight development of their lambs. Against this background, it is essential to gain knowledge of breed-specific associations between the blood concentration of minerals and metabolic indicators of ewes and their body condition and methane emissions as well as the effect on lamb bodyweight development. Monitoring and optimizing of certain ewe blood parameters might contribute to improved ewe body condition (health), reduced methane emissions (efficiency) and growth performances in offspring (profitability).

Introduction

A successful health and feed efficiency management of sheep implies consideration of energy efficiency indicator traits recorded in ewes, and of body weight development of their lambs from an across-generation perpsective. Against this background, Reintke *et al*. (2020a) analyzed associations between maternal body condition scores (**BCS**) with lamb body weight (**LBW**). In addition, levels for marco- and microelements, and the metabolic status of the ewe *pre*- and *postpartum* does not only affect health, fertility and physical performance (e.g. milk yield) of the animal itself, but also viability and body weight development of the offspring (Fthenakis *et al.*, 2012; Pesántez-Pacheco *et al.*, 2019). Such time-lagged effects of macromineral-related diseases were also identified in dairy cows (Goff, 2006).

In sheep production, fodder costs are of overriding importance (Ellison *et al.*, 2017), implying to focus on feed efficiency. Methane (**CH_4**) emissions reflect an unused proportion of gross energy intake. Hence, there is an increasing interest to breed animals with improved health, productivity and feed efficiency (i.e., feed intake in relation to body weight gain), suggesting selection of animals with proper physiological serum mineral concentration and low individual CH_4 emissions (Tsiamadis *et al.*, 2016; Reintke *et al.*, 2020b). Caldeira *et al.* (2007) studied associations between BCS and blood metabolites in ewes, but they did not stretch influences in an across-generation approach.

Consequently, we hypothesize that optimal levels of maternal blood concentrations for minerals and metabolic indicators *pre- and postpartum* are associated with desired ewe BCS, reduced ewe CH_4 emissions, and increased LBW. In this regard, we aimed on inferring the trait associations considering dam-offspring pairs in a commercial (Merinolandsheep (**ML**)) and a robust (Rhönsheep (**RH**)) sheep breed.

Materials and methods

Production system

For trait recording, we considered sheep from the University Giessen research station “Oberer Hardthof”, Germany, reflecting a high-input production system with more than 33% of concentrates in the fodder ration. The sheep flock includes 342 ewes, seven rams and 164 hoggets of the breeds ML and RH. During pregnancy and lambing season, the flock was fed hay *ad libitum*. Hay quality was as follows: 90.3% DM, 40.2% crude fibre (**CF**), 6.8% CP, 1.3% crude lipid (**EE**) and 7.8 MJ metabolizable energy (**ME**) per kg in DM. Ewes within the last third of gestation received additional concentrates of up to 1 kg per day. Concentrates consisted of barley, wheat, rapeseed meal extract, wheat bran and triticale (6.8% CF, 18% CP, 2.6% EE, 10.8 ME MJ per kg DM). The daily ration for a twin suckling ewe with an average body weight of 85 kg contained 1.8 kg hay and 900 g concentrates (21.84 MJ ME per ewe and day). The fodder ration reflected the general sheep feeding conditions in central Germany and was not artificially changed in this study. Lambs had *ad libitum* access to concentrates at an age of

21 to 28 days. They were weaned in groups at a mean age of 66.4 ± 2.6 days, with an average body weight of 23.4 ± 4.8 kg.

Animals and traits

Data recording spanned a period from 2017 to 2019. The present study considered 46 ewes (24 ML, 22 RH) and their purebred 87 lambs (35 ML, 52 RH) kept inside in one barn compartment. None of the animals showed clinical abnormalities at any time. The age of ewes ranged from 22.1 to 81.9 months (mean = 54.3 ± 11.7 months). A longitudinal data structure was generated, implying ewe trait and LBW recording at the same days in intervals of three weeks from the beginning of gestation (ewe traits) until weaning (ewe traits and LBW). Such approach implied three repeated measurements per lamb and four repeated measurements per ewe. The following ewe traits were recorded: ewe body weight (**EBW**) (digital scale: model 703, TRU-TEST Group, Auckland, New Zealand), BCS, backfat thickness (**BFT**) in millimeter, individual CH_4 concentration (µL/L) in the exhaled air, macro- and microelement concentrations and metabolic indicators in the serum (Table 1). Body condition score was assessed by palpating the transverse and spinous processes of the lumbar region around the backbone. Scores ranged on a scale from 1.0 (emaciated) to 5.0 (obese) with increments of 0.5 (Russel *et al.*, 1969). Backfat thickness was measured on the right side directly behind the thirteenth rip using a mobile ultrasound transducer (EasiScan ultrasound scanner, 4.5 – 8.5 MHz linear, BCF Technology Ltd., Bellshill, Scotland). Individual CH_4 concentrations in the exhaled air were measured using a laser methane detector (**LMD**) (Crowcon LaserMethane Mini, Tokyo Gas Engineering Co Ltd., Tokyo, Japan). Trait recording of lambs considered LBW.

Table 1. Blood parameter reference ranges for sheep.

Blood parameter	Reference range	Reference
Calcium (Ca)	2.10 – 2.70 mmol/L	COGA Giessen[1]
Potassium (K)	3.50 – 4.50 mmol/L	COGA Giessen[1]
Sodium (Na)	140.00 – 160.00 mmol/L	COGA Giessen[1]
Magnesium (Mg)	0.80 – 1.20 mmol/L	COGA Giessen[1]
Phosphate (P)	1.30 – 1.90 mmol/L	COGA Giessen[1]
Copper (Cu)	9.00 – 12.00 µmol/L	IDEXX Laboratories[2]
Iron (Fe)	12.50 – 35.10 µmol/L	IDEXX Laboratories[2]
Zinc (Zn)	10.70 – 21.40 µmol/L	IDEXX Laboratories[2]
Selenium (Se)	0.67 – 2.20 µmol/L	IDEXX Laboratories[2]
Non-esterified fatty acids (NEFA)	0.10 – 0.50 mmol/L	Laboklin GmbH and Co. KG[3]
β-hydroxybutyrate (BHB)	< 0.85 mmol/L	Fürll (2014)
Glutamate dehydrogenase (GLDH)	≤ 6.50 U/L	COGA Giessen[1]

[1]Clinic for Obstetrics, Gynaecology and Andrology of Large and Small Animals with Veterinary Ambulance, Justus-Liebig-University, Giessen, Hesse, Germany.

[2]IDEXX Laboratories, Vet Med Labor GmbH, Kornwestheim, Baden-Wuerttemberg, Germany.

[3]Laboklin GmbH and Co. KG, Bad Kissingen, Bavaria, Germany.

Blood Sampling

Close to day 44 of pregnancy, at lambing, three weeks *postpartum* and at weaning, blood samples (9 mL) were taken from the jugular vein into vacuum tubes (S-Monovette 9 mL, clotting activator/serum, SARSTEDT AG and Co. KG, Nümbrecht, Germany). Blood sample collection was conducted two hours after morning feeding. Blood samples were centrifuged not later than two hours after the last sample collection considering 4 000 rounds per minute for five minutes at room temperature (Rotina 35 R, Hettich AG and Co KG, Tuttlingen, Germany).

Chemical blood analysis

After centrifugation, blood samples were directly analyzed. Supplementary Table S1 presents methods applied and manufacturers for analyzed blood parameters. Serum concentrations for calcium (**Ca**), sodium (**Na**) and potassium (**K**) were determined via flame photometer EFOX 5053 applications (Eppendorf, Hamburg, Germany). Serum concentrations for phosphate (**P**), non-esterified fatty acids (**NEFA**), β-hydroxybutyrate **(BHB)**, and glutamate dehydrogenase (**GLDH**) were determined using the photometer EPAC 6140 (Eppendorf, Hamburg, Germany).

The blood parameters selenium (**Se**; isotope 78), copper (**Cu**), iron (**Fe**), zinc (**Zn**) and magnesium (**Mg**) were analyzed by IDEXX Laboratories (Vet Med Labor GmbH, Kornwestheim, Germany). Table 1 indicates the reference ranges for all blood parameters.

Laser methane detector for CH_4 recording and CH_4 data preparation

According to the recording protocols as defined by Ricci *et al.* (2014) and Reintke *et al.* (2020b), the interval between feeding and LMD CH_4 recording was two to five hours. Ricci *et al*. (2014) and Reintke *et al*. (2020b) identified significant impact of meteorological data on individual CH_4 emissions. Consequently, a wind still environment during CH_4 recording was provided, and temperature and humidity were considered as effects in statistical models. In order to avoid data bias due to uncontrolled head movements of the ewes during CH_4 recording, CH_4 measurements were carried out after weighing

in the weighing facility. Additionally, the distance between the operator (i.e., the LMD) and the sheep's nostrils was exactly one meter. The LMD recorded CH_4 concentrations in the exhaled air at 0.5 s intervals. The duration of CH_4 recording in the present study was three minutes per animal. The CH_4 concentration in the exhaled air was expressed in µL/L (Reintke *et al*., 2020b). Ongoing preparation of CH_4 data in R 3.3.2 (R Development Core Team, 2016) followed the protocol proposed by Reintke *et al.* (2020b). The minimum CH_4 concentration of each measurement was defined as the CH_4 background concentration, i.e., to reflect environmental CH_4 influence. The CH_4 background concentration was then subtracted from the remaining CH_4 records. Since LMD detection bases on CH_4 in exhaled air, the dynamics of the respiratory cycle were also considered. In this regard, two different ways of CH_4 excretion i) CH_4 absorption from the rumen or lower digestive tract and emission via the lungs (respiration) and ii) CH_4 emission directly from the rumen (eructation) were differentiated. Therefore, a double normal distribution was assumed to distinguish between the respiration CH_4 fraction and the eructation CH_4 fraction. Each normal distribution (for respiration CH_4 and for eructation CH_4) represents a separate CH_4 data set with separate mean and maximum. For further analyses, the mean CH_4 concentration during respiration was considered based on previous experiences (Reintke *et al.*, 2020b) and due to the Gaussian trait distribution. The supplementary tables S2 and S3 show descriptive statistics for the analyzed maternal traits.

Statistical analysis

Three different models were defined to analyze separately the effects of maternal blood parameters on i) LBW during lactation, ii) on ewe body condition traits (EBW, BCS, BFT) during gestation and lactation, and iii) on maternal CH_4 output during gestation and lactation. The classification effects considered in the models in addition to the blood parameters were significantly associated ($P < 0.05$) with the respective trait of interest. Statistical modelling was performed using the software package SAS Studio Version 3.8 (SAS Institute Inc., 2018).

Impact of ewe blood parameter concentrations on lamb body weight during lactation

The effect of ewe blood parameter concentrations on LBW during lactation was analyzed via linear mixed model 1 which was was defined as follows:

$y_{ijklmnopq} = \mu + bt_i + sex_j + yr_k + age*breed_l + age*breed*blood_m + blood_n + ewe_o + lamb_p + e_{ijklmnopq}$ *(1)*

where $y_{ijklmnopq}$ were the observations for LBW, μ was the overall mean effect, bt_i was the fixed birth type effect of the lamb (single, twin, triplet*)*, sex_j was the fixed sex effect of the lamb (male, female), yr_k was the fixed year effect (2017, 2018, 2019), $age*breed_l$ was the interaction effect between lamb age class (≤ 9 days, 10 – 29 days, 30 – 51 days, > 51 days) and breed (ML, RH), $age*breed*blood_m$ was the interaction including lamb age class, breed and blood parameter levels (Ca, Cu, P, NEFA, BHB, GLDH, K, Na, Mg, Se, Zn, Fe; modelled as linear regression), $blood_n$ was the blood parameter level modeled as linear regression, ewe_o was the random ewe effect due to several offspring per dam (i.e, the twins), $lamb_p$ the random lamb effect for the repeated LBW data structure, and $e_{ijklmnopq}$ was the random residual effect.

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe body weight, body condition and backfat thickness pre- and postpartum

Associations between ewe blood parameter concentrations and ewe traits EBW, BFT, and BCS were inferred via linear mixed model applications. As a difference compared to model 1, repeated ewe observations during gestation and lactation were considered for EBW, BFT, and BCS. The corresponding statistical model 2 was defined as follows:

$y_{ijklmnop} = \mu + bt*sex_i + yr_j + bcs_k + stadium*breed_l + stadium*breed*blood_m + blood_n + ewe_o + e_{ijklmnop}$ *(2)*

where $y_{ijklmnop}$ were the observations for the ewe traits EBW, BFT and BCS, μ was the overall mean effect, $bt*sex_i$ was the interaction effect between birth type (single, twin, triplet*)* and sex of the lamb (male, female), yr_j was the fixed year effect (2017, 2018,

2019), bcs_k was the fixed effect for ewe BCS (1–5) (apart from the models where BCS and BFT were the traits of interest), $stadium*breed_l$ was the interaction effect between stadium (beginning of gestation, lambing, three weeks postpartum, weaning) and breed (ML, RH), $stadium*breed*blood_m$ *was* the interaction effect including stadium, breed and the blood parameter levels (Ca, Cu, P, NEFA, BHB, GLDH, K, Na, Mg, Se, Zn, Fe; modelled as linear regression), $blood_n$ was the blood parameter level modeled as linear regression, ewe_o was the random ewe effect considering four repeated measurements per ewe, and $e_{ijklmnop}$ was the random residual effect.

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe CH_4 emissions pre- and post-partum

The effect of ewe blood parameter concentrations on mean CH_4 emissions during respiration was studied via linear mixed models. For CH_4 analyses, meteorological data (humidity and temperature during CH_4 recording) were considered as further explanatory variables. The corresponding statistical model 3 was defined as follows:

$$y_{ijklmnop} = \mu + yr_i + tcl_j + hcl_k + stadium*breed_l + stadium*breed*blood_m + blood_n + ewe_o + e_{ijklmnop} \quad (3)$$

where $y_{ijklmnop}$ were the observations for CH_4, μ was the overall mean effect, yr_i was the fixed year effect, tcl_j was the fixed temperature class effect (≤ 9.5 °C, > 9.5 °C), hcl_k was the fixed humidity class effect (≤ 54 %, > 54 %), and remaining effects were defined in analogy to model 2.

Results

In the following, we address results for maternal blood parameters with significant effects ($P < 0.05$) on LBW (model 1), on EBW, BCS, BFT (model 2), and on ewe CH_4 emissions (model 3). The blood parameters K, Na, P, Fe, and GLDH did not significantly ($P > 0.05$) influence any of the considered traits in both breeds.

Impact of ewe blood parameter concentrations on lamb body weight development during lactation

Magnesium

Results from model 1 indicate significant impact of the maternal Mg concentration ($P < 0.05$) on LBW. At weaning, ML ewes with a Mg concentration of 1.4 mmol/L (above reference range; Table 1) had 4.06 ± 0.28 kg heavier lambs compared to ML ewes with a Mg concentration of 1.0 mmol/L (within reference range), and 8.12 ± 0.58 kg heavier lambs compared to ML ewes with an Mg concentration of 0.6 mmol/L (below reference range; Figure 1). Regarding RH ewes and lambs, least squares means (**LSM**) for LBW between low and high ewe serum Mg levels differed only slightly at lambing (3.64 ± 1.14 kg vs. 6.16 ± 1.30 kg), three weeks *postpartum* (11.03 ± 1.47 kg vs. 9.27 ± 1.26 kg) and at weaning (20.67 ± 1.36 kg vs. 22.07 ± 0.83 kg) (Figure 1).

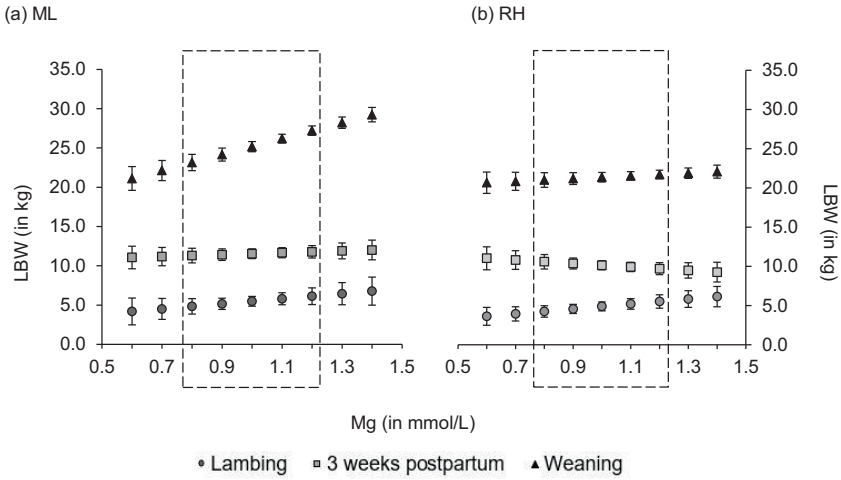


Figure 1. Least squares means for lamb body weight (LBW) with corresponding standard errors depending on ewe serum magnesium (Mg) concentration at lambing, three weeks *postpartum* and at weaning in (a) Merinoland- (ML) and (b) Rhönsheep (RH).
Dashed boxes indicate the reference range for the blood parameter (see Table 1).

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe body weight *pre*- and *postpartum*

Calcium

Results from model 2 indicate significant effects of Ca ($P < 0.001$) and Zn ($P < 0.01$) on EBW. Figure 2 presents LSM of model 2, i.e., the effect of the serum Ca level on EBW. Merino ewes with a serum Ca concentration below the reference range (1.9 mmol/L) had higher EBW at the beginning of gestation (97.65 ± 4.14 kg), at lambing (110.24 ± 4.78 kg) and three weeks *postpartum* (100.27 ± 2.85 kg) compared to ewes with a Ca level within the reference range (Ca = 2.4 mmol/L; EBW = 89.97 ± 1.99 kg, 94.39 ± 1.97 kg, 93.94 ± 1.99 kg, respectively). In RH ewes, LSM for EBW were quite similar for low and high serum Ca concentrations at the beginning of gestation (73.08 ± 4.81 kg to 66.67 ± 2.14 kg), at lambing (77.64 ± 4.00 kg to 75.81 ± 3.18 kg), three weeks *postpartum* (79.24 ± 4.48 kg to 75.88 ± 3.23 kg) and at weaning (74.47 ± 4.70 kg to 75.95 ± 2.73 kg; Figure 2).

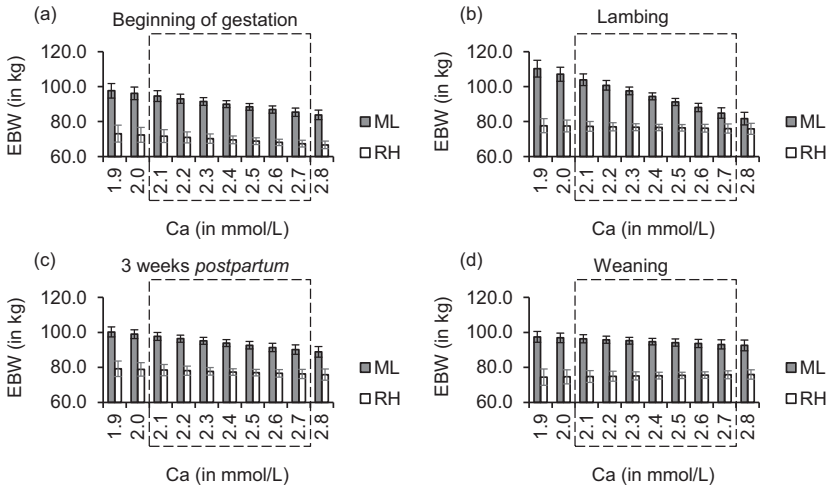


Figure 2. Least squares means for ewe body weight (EBW) with corresponding standard errors depending on ewe serum calcium (Ca) concentration (a) at the beginning of gestation, (b)

at lambing, (c) three weeks *postpartum* and (d) at weaning in Merinoland- (ML) and Rhönsheep (RH).
Dashed boxes indicate the reference range for the blood parameter (see Table 1).

Zinc

In ML ewes, serum Zn concentration significantly affected EBW ($P < 0.01$). At lambing, ewes with a serum Zn concentration of 6 µmol/L (below reference range) had higher EBW (97.95 ± 2.98 kg) than ewes with a serum Zn concentration within the reference range (Zn = 14 µmol/L; EBW = 91.21 ± 2.19 kg), and higher EBW than ewes with a serum Zn concentration above the reference range (Zn = 24 µmol/L; EBW = 82.80 ± 5.11 kg). Accordingly, at weaning, ML ewes with a serum Zn concentration of 6 µmol/L (below reference range) had higher EBW (102.51 ± 3.70 kg) compared to ewes with a serum Zn concentration above the reference range (Zn = 24 µmol/L; EBW = 81.85 ± 5.32 kg), and higher EBW than ewes with a serum Zn concentration within the reference range (Zn = 14 µmol/L; EBW = 93.33 ± 2.00 kg). Ewe body weight in ML was independent from the serum Zn level (6 µmol/L to 24 µmol/L) at the beginning of gestation (92.31 ± 4.16 kg to 84.68 ± 5.23 kg) and three weeks *postpartum* (95.37 ± 2.76 kg to 93.14 ± 5.54 kg). Accordingly, LSM for EBW in RH were similar for the different Zn levels (6 µmol/L; 14 µmol/L; 24 µmol/L) at the beginning of gestation (68.10 ± 4.62 kg to 67.45 ± 4.41 kg), at lambing (76.87 ± 2.51 kg to 74.60 ± 4.16 kg), three weeks *postpartum* (77.61 ± 2.75 kg to 74.34 ± 5.36 kg) and at weaning (76.67 ± 2.80 kg to 72.01 ± 3.67 kg).

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe body condition score and backfat thickness *pre*- and *postpartum*

Copper

Results from model 2 indicate significant effects of Cu and Se on ewe BCS ($P < 0.01$), and a significant effect of Cu on BFT ($P < 0.01$). At weaning, ML and RH ewes with a serum Cu concentration of 15.0 µmol/L (above reference range) displayed the highest BCS (3.04 ± 0.15 and 2.70 ± 0.14; Figure 3).

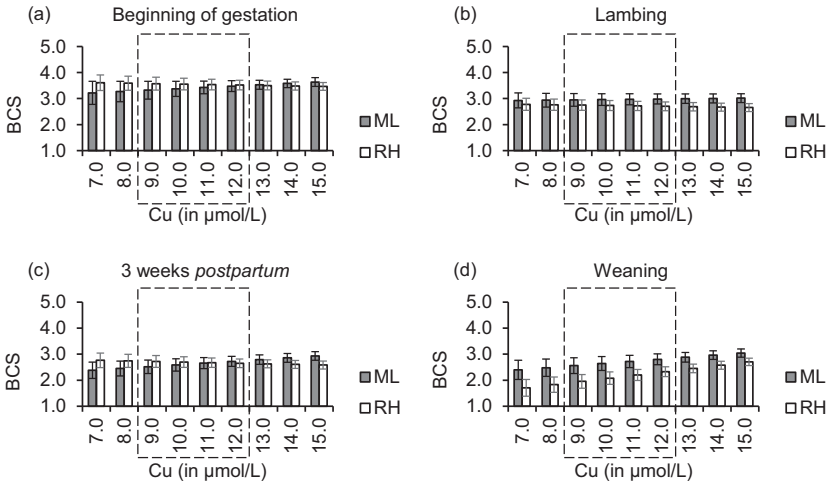


Figure 3. Least squares means for ewe body condition score (BCS) with corresponding standard errors depending on ewe serum copper (Cu) concentration (a) at the beginning of gestation, (b) at lambing, (c) three weeks *postpartum* and (d) at weaning in Merinoland- (ML) and Rhönsheep (RH).
Dashed boxes indicate the reference range for the blood parameter (see Table 1).

In ML ewes, different serum Cu levels displayed differences for BFT at weaning (Figure 4). Ewes with a serum Cu concentration of 7 µmol/L (below reference range) had lower BFT (5.12 ± 1.11 mm) than ewes with a serum Cu concentration above the reference range (Cu = 15 µmol/L; BFT = 6.87 ± 0.47 mm). Accordingly, at weaning, RH ewes with a serum Cu concentration of 7 µmol/L (below reference range) had lower BFT (4.32 ± 0.97 mm) compared to ewes with a serum Cu concentration above the reference range (Cu = 15 µmol/L; BFT = 6.25 ± 0.43 mm). At the beginning of gestation, at lambing and three weeks *postpartum*, LSM for BFT were quite similar for the different ewe serum Cu levels in both breeds ML and RH (Figure 4).

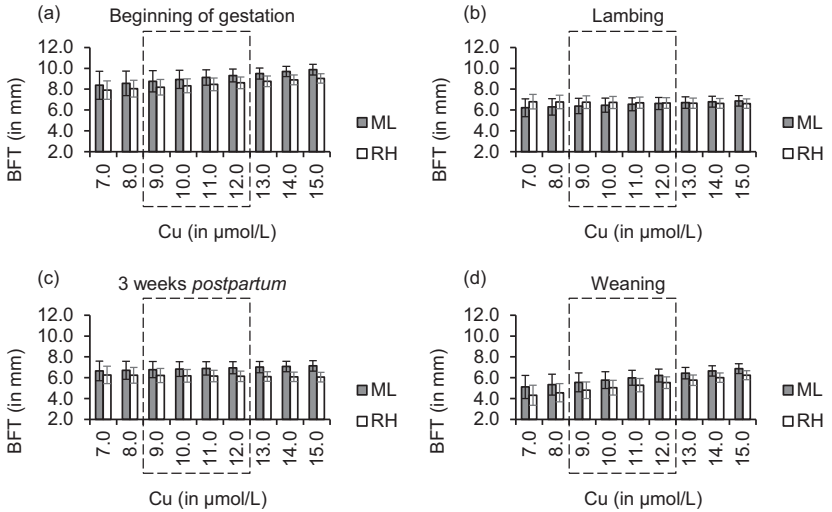


Figure 4. Least squares means for ewe backfat thickness (BFT) with corresponding standard errors depending on ewe serum copper (Cu) concentration (a) at the beginning of gestation, (b) at lambing, (c) three weeks *postpartum* and (d) at weaning in Merinoland- (ML) and Rhön-sheep (RH).

Dashed boxes indicate the reference range for the blood parameter (see Table 1).

Selenium

Results from model 2 indicate that a serum Se concentration above the reference range (2.4 µmol/L) was associated with the highest BCS values in RH ewes at lambing (3.77 ± 0.52), three weeks *postpartum* (4.44 ± 0.71) and at weaning (3.73 ± 0.42). In ML ewes, LSM for BCS were similar for the different ewe serum Se concentrations (0.3 µmol/L to 2.4 µmol/L) at the beginning of gestation (3.75 ± 0.26 to 3.50 ± 0.86), at lambing (2.90 ± 0.44 to 3.40 ± 0.60), three weeks *postpartum* (2.88 ± 0.49 to 3.33 ± 0.74) and at weaning (2.81 ± 0.42 to 3.44 ± 0.42).

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe *CH_4* emissions *pre*- and *postpartum*

Zinc

Results from model (3) indicate significant effects of Zn ($P < 0.05$), BHB ($P < 0.01$) and NEFA ($P < 0.05$) on CH_4 emissions. Merino ewes with a serum Zn concentration of 6 µmol/L (below reference range) had higher CH_4 emissions (13.22 ± 1.10 µL/L) at lambing compared to ewes with a serum Zn concentration within the reference range (Zn = 14 µmol/L; CH_4 =10.45 ± 0.71 µL/L; Figure 5), and higher CH_4 emissions than ML ewes with a serum Zn concentration above the reference range (Zn = 24 µmol/L; CH_4 = 6.99 ± 2.32 µL/L).

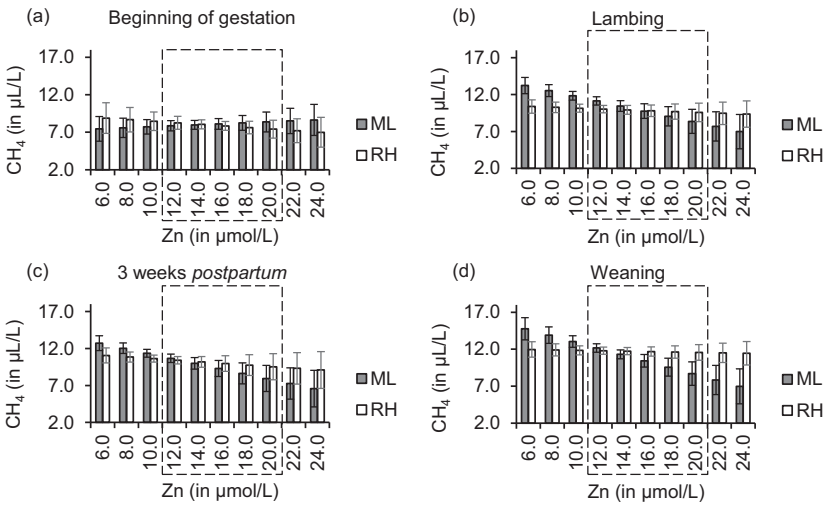


Figure 5. Least squares means for ewe mean methane emissions (CH_4) during respiration with corresponding standard errors depending on ewe serum zinc (Zn) concentration (a) at the beginning of gestation, (b) at lambing, (c) three weeks *postpartum* and (d) at weaning in Merinoland- (ML) and Rhönsheep (RH).
Dashed boxes indicate the reference range for the blood parameter (see Table 1).

Three weeks *postpartum*, ML ewes with a serum Zn concentration of 6 µmol/L (below reference range) had higher CH_4 emissions (12.72 ± 1.01 µL/L) compared to ewes with a serum Zn concentration within the reference range (Zn = 14 µmol/L; CH_4 = 9.99 ± 0.79 µL/L), and higher CH_4 emissions than ML ewes with a serum Zn concentration above the reference range (Zn = 24 µmol/L; CH_4 = 6.57 ± 2.47 µL/L). At weaning, Zn concentration effects on CH_4 were in agreement with the identified associations at lambing and three weeks *postpartum.* In RH ewes, LSM for CH_4 emissions were very similar for the different serum Zn levels (Figure 5).

β-hydroxybutyrate

At the beginning of gestation, ML ewes with a serum BHB concentration within the reference range (0.2–0.5 mmol/L) had lower CH_4 emissions (7.88 ± 0.63 µL/L to 10.17 ± 1.14 µL/L) than ewes with a serum BHB concentration above the reference range (BHB: 0.9–1.1 mmol/L; CH_4 = 15.88 ± 3.98 µL/L to 18.17 ± 5.15 µL/L). With regard to the remaining time periods in ML, LSM for CH_4 emissions were in a narrow range for the different BHB levels at lambing (10.95 ± 0.72 µL/L to 13.19 ± 1.44 µL/L), three weeks *postpartum* (10.67 ± 0.84 µL/L to 11.67 ± 0.73 µL/L) and at weaning (10.98 ± 0.86 µL/L to 12.65 ± 1.00 µL/L). At the beginning of gestation in RH, ewes with a serum BHB concentration within the reference range (0.2–0.4 mmol/L) had lower CH_4 emissions (7.84 ± 0.63 µL/L to 8.85 ± 0.72 µL/L) than ewes with a serum BHB concentration above the reference range (BHB: 0.9–1.1 mmol/L; CH_4 = 14.88 ± 4.27 µL/L to 16.90 ± 5.53 µL/L). Moreover, at lambing, RH ewes with a serum BHB concentration within the reference range (0.2–0.5 mmol/L) had lower CH_4 emissions (9.29 ± 0.79 µL/L to 10.10 ± 0.54 µL/L) than ewes with a serum BHB concentration above the reference range (BHB 0.9–1.1 mmol/L; CH_4 = 12.13 ± 1.27 µL/L to 12.94 ± 1.73 µL/L). For the recording period three weeks *postpartum*, LSM for CH_4 emissions were quite similar for the low (0.2 mmol/L) and the high (1.1 mmol/L) serum BHB concentration (10.18 ± 0.73 µL/L and 10.77 ± 0.51 µL/L, respectively). Also, in RH at weaning, CH_4 emissions were very similar for the different serum BHB levels (11.64 ± 0.65 µL/L to 11.78 ± 0.52 µL/L).

Non-esterified fatty acids

Results from model 3 indicate the highest CH_4 concentration (8.71 ± 0.72 µL/L) in ML ewes with a serum NEFA concentration below the reference range (0.1 mmol/L) at the beginning of gestation. These ewes had 2.74 µL/L higher CH_4 emissions compared to ML ewes with a serum NEFA level above the reference range (0.9 mmol/L). At lambing, ML ewes with a NEFA level of 0.1 mmol/L (below reference range) had 1.42 µL/L, 3.56 µL/L and 5.70 µL/L higher CH_4 concentrations than ML ewes with a NEFA level of 0.3 mmol/L, 0.6 mmol/L and 0.9 mmol/L, respectively. Least squares means for CH_4 emissions were similar for the serum NEFA concentrations (0.1 mmol/L to 0.9 mmol/L) in RH ewes at the beginning of gestation (8.26 ± 0.62 µL/L to 6.69 ± 1.10 µL/L), at lambing (10.09 ± 0.53 µL/L to 9.85 ± 0.76 µL/L) and at weaning (11.94 ± 0.52 µL/L to 10.78 ± 1.55 µL/L).

Discussion

Impact of ewe blood parameter concentrations on lamb body weight development during lactation

Magnesium

Magnesium is an important enzyme-activating element, especially in energy, carbohydrate, lipid, and protein metabolism pathways (Underwood and Suttle, 1999). In the present study, serum Mg levels within the upper reference were associated with increased LBW in ML. Accordingly, Plush *et al.* (2018) described the favorable effects of additional Mg supplementation in sows before farrowing on piglet body weight development. Consequently, offspring growth depended on maternal milk Mg supply. However, in the present study, we observed different associations between Mg concentrations and LBW in both breeds ML and RH, although all animals were kept in the same husbandry system and the same feeding regime was applied to all animals. In contrast to ML, in robust RH, LBW was very similar for the different maternal serum Mg levels. Accordingly, in cattle, Greene *et al.* (1989) found breed-specific mechanisms for Mg

absorption efficiency, supporting the observed differences in Mg level - LBW associations in RH and ML sheep.

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe body weight *pre*- and *postpartum*

Calcium

Calcium is an important macroelement in lactating sheep (Underwood and Suttle, 1999). In the present study, the low serum Ca level (1.9 mmol/L) in ML ewes was associated with increased EBW at the beginning of gestation, at lambing and three weeks *postpartum.* In genetic studies considering a subsample of animals from the present study, Reintke *et al.* (2020b) observed a positive genetic relationship between EBW and LBW during lactation, indicating the higher milk yield production level of heavy ewes. Consequently, in high yielding dams, Ca excretion of the mammary gland exceeded the intestinal Ca absorption (Liesegang *et al.,* 2007), which might explain the negative relationship between serum Ca levels and EBW in the present study for ML. Differing responses for RH are in agreement with results by Willems *et al.* (2013), indicating sheep breed particularities in Ca metabolism under equal feeding conditions.

Zinc

Anorexia is one of the typical symptoms in response to Zn deficiency (Underwood and Suttle, 1999). Nevertheless, with regard to ML in the present study, increasing EBW was associated with decreasing serum Zn levels at lambing and at weaning. In RH, EBW was independent from the Zn levels. Suttle *et al.* (1982) assumed that Zn absorption in sheep strongly depends on individual requirements, explaining the breed particularities. In ML, ewes are able to increase EBW, even in the period of a negative energy balance in early lactation and irrespective low serum Zn levels. In beef cattle, Pereira *et al.* (2018) found breed-specific differences in trace element concentrations of muscle tissue, and they assumed varying biliary or renal excretion rates. Although no biliary or renal excretion rates were measured in the present study, the physiological

associations as identified by Pereira *et al.* (2018) could explain the breed specific mechanisms in response to serum Zn levels.

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe body condition score and backfat thickness *pre*- and *postpartum*

Copper

Copper influences growth rates, the blood hemoglobin status and reproductive performances (Adogwa *et al.,* 2005). In the present study, ML and RH ewes with a serum Cu level above the reference range had a higher BCS and BFT at weaning. Accordingly, Yang *et al.* (2019) calculated a positive correlation between the serum Cu level and the body mass index in humans. Furthermore, intestinal parasitic infections were associated with lower serum Cu levels (Adogwa *et al.,* 2005), and further impact on declining BCS (Calvete *et al.,* 2020).

Selenium

Selenium is a microelement influencing growth, fertility, and disease prevention, such as nutritional muscular dystrophy (Underwood and Suttle, 1999). Selenium deficiency caused an increase of the thyroid hormone tetraiodothyronine (T4) level in ewes (Hefnawy *et al.*, 2014), which, in turn, contributed to a body weight and BCS decline (Peterson *et al.*, 2016). Such mechanisms might explain the BCS decrease for low serum Se levels in RH ewes.

Impact of ewe blood parameter concentrations on ewe CH_4 emissions *pre*- and *postpartum*

Zinc

In the present study, an increased Zn blood concentration contributed to reduced CH_4 emissions during lactation in ML. Zinc catalyzes the conversion of the thyroid hormone thyroxin (**T4**) into triiodothyronine (**T3**) (Alimohamady *et al.*, 2019). Triiodothyronine

reduced the digesta mean retention time (Barnett *et al*., 2012). In causality, a reduced retention period contributes to lower CH_4 emissions. Hence, ML ewes keeping their serum Zn level ≥ 14 µmol/L independent from external, display reduced energy losses (due to CH_4 emissions) during lactation.

β-hydroxybutyrate

Methane production contributes to a loss of an animal's gross energy intake (Moorby *et al*., 2015). Energy deficiency, i.e., through increasing CH_4 emissions during gestation as observed in both breeds ML and RH, and in RH at lambing, stimulates physiological mechanisms such as hepatic ketogenesis. In causality, the liver metabolizes NEFAs, which are increasingly converted into BHB (due to hormonally increased lipolysis (Heitmann *et al*., 1987)). Hence, in the present study, higher BHB levels were identified in ewes with increased CH_4 energy losses. The prevention of a negative energy balance might decrease CH_4 emissions, and vice versa, independent from the breed. Furthermore, an infection with the liver fluke *Fasciola hepatica* was associated with increased milk BHB content in dairy cows (May *et al.,* 2020). Accordingly, lambs that were infected with abomasal parasites had 33% higher CH_4 yield compared to non-infected animals (Fox *et al.,* 2018). In the present study, a certain parasitic burden of ewes was determined (own routine investigations for animals in our research station), which might explain the higher BHB serum concentrations combined with higher CH_4 emissions.

Non-esterified fatty acids

Results from the present study indicate increased CH_4 emissions in ML ewes with decreasing NEFA levels. Accordingly, in dairy cows, Bielak *et al.* (2016) identified increased CH_4 yield in response to low NEFA plasma levels. Furthermore, CH_4 emissions were positively correlated with DMI (Moorby *et al*., 2015). Consequently, a DMI decrease around lambing implies a decline of CH_4 emissions, whilst the serum NEFA level increases (to provide an alternative energy source). Coleman *et al*. (2017) reported breed-specific NEFA levels, supporting the differing CH_4 responses on NEFA

for ML and RH sheep in the present study. Further possible explanations for breed differences include productivity (e.g., milk yield), fat deposition or feeding behavior.

Conclusion

In the present study, breed-specific associations between macroelement, microelement and metabolic parameters *pre-* and *postpartum* with ewe body condition, CH_4 emissions and LBW were found. Although all ewes were kept in the same husbandry system and received the same feeding ration, ewes of a commercial breed (ML) responded more sensitive on blood parameter alterations compared to animals from the robust RH population. Strongest reactions in ML were identified for BCS, CH_4 and also from an across-generation perspective on LBW. The breed differences suggest genetic impact on metabolic robustness, and ongoing genetic studies in this regard. Furthermore, the inclusion of certain blood parameters into overall sheep breeding goals, might contribute to favorably correlated selection response in LBW, BCS and CH_4.

Acknowledgements

Authors are grateful to “H. Wilhelm Schaumann Stiftung” for providing a scholarship to J. Reintke. Authors are also grateful to the staff of the research station “Oberer Hardthof” in Giessen, especially to Mr. Mandler, Mrs. Henning and Mrs. Wagner, and to IDEXX Laboratories Vet Med Labor GmbH for their commitment and support.

Declaration of interest

Authors declare no conflict of interest.

Ethics statement

The handling of animals was carried out in accordance with national and international laws. The study was restricted to routine on-farm observations. The presented procedures have been approved by the regional board of Giessen (V 54-19 c 20 15 h 01 GI 18/14 Nr. G 62/2017).

Software and data repository resources

None of the data were deposited in an official repository.

References

Adogwa A, Mutani A, Ramnanan A and Ezeokoli C 2005. The effect of gastrointestinal parasitism on blood copper and hemoglobin levels in sheep. Canadian Veterinary Journal 46, 1017–1021.

Alimohamady R, Aliarabi H, Bruckmaier RM and Christensen RG 2019. Effect of different sources of supplemental zinc on performance, nutrient digestibility, and antioxidant enzyme activities in lambs. Biological Trace Element Research 189, 75–84. doi:10.1007/s12011-018-1448-1.

Barnett MC, Goopy JP, McFarlane JR, Godwin IR, Nolan JV and Hegarty RS 2012. Triiodothyronine influences digesta kinetics and methane yield in sheep. Animal Production Science 52, 572–577. doi:10.1071/AN11303.

Bielak A, Derno M, Tuchscherer A, Hammon HM, Susenbeth A and Kuhla B 2016. Body fat mobilization in early lactation influences methane production of dairy cows. Scientific Reports 6, 28135. doi:10.1038/srep28135.

Caldeira RM, Belo AT, Santos CC, Vazques MI and Portugal AV 2007. The effect of body condition score on blood metabolites and hormonal profiles in ewes. Small Ruminant Research 68, 233–241. doi:10.1016/j.smallrumres.2005.08.027.

Calvete C, González JM, Ferrer LM, Ramos JJ, Lacasta D, Delgado I and Uriarte J 2020. Assessment of targeted selective treatment criteria to control subclinical gastrointestinal nematode infections on sheep farms. Veterinary Parasitology 277, 109018. doi:10.1016/j.vetpar.2019.109018.

Coleman SW, Chase CC Jr, Riley DG and Williams MJ 2017. Influence of cow breed type, age and previous lactation status on cow height, calf growth, and patterns of body weight, condition, and blood metabolites for cows grazing bahiagrass pastures. Journal of Animal Science 95, 139–153. doi:10.2527/jas2016.0946.

Ellison MJ, Conant GC, Lamberson WR, Cockrum RR, Austin KJ, Rule DC and Cammack KM 2017. Diet and feed efficiency status affect rumen microbial profiles of sheep. Small Ruminant Research 156, 12–19. doi:10.1016/j.smallrumres.2017.08.009.

Fox NJ, Smith LA, Houdijk JGM, Athanasiadou S and Hutchings MR 2018. Ubiquitous parasites drive a 33% increase in methane yield from livestock. International Journal of Parasitology 48, 1017–1021. doi:10.1016/j.ijpara.2018.06.001.

Fthenakis GC, Arsenos G, Brozos C, Fragkou IA, Giadinis ND, Giannenas I, Mavrogianni VS, Papadopoulos E and Valasi I 2012. Health management of ewes during pregnancy. Animal Reproduction Science 130, 198–212. doi:10.1016/j.anireprosci.2012.01.016.

Fürll M 2014. Spezielle Untersuchung beim Wiederkäuer. In Klinische Labordiagnostik in der Tiermedizin (ed. A Moritz), pp.755, 765. Schattauer GmbH, Stuttgart, Baden-Wuerttemberg, Germany.

Goff JP 2006. Macromineral physiology and application to the feeding of the dairy cow for prevention of milk fever and other periparturient mineral disorders. Animal Feed Science and Technology 126, 237–257. doi:10.1016/j.anifeedsci.2005.08.005.

Greene LW, Baker JF and Hardt PF 1989. Use of animal breeds and breeding to overcome the incidence of grass tetany: A review. Journal of Animal Science 67, 3463–3469. doi:10.2527/jas1989.67123463x.

Hefnawy AE, Youssef S, Aguilera PV, Rodríguez CV and Pérez JLT 2014. The relationship between selenium and T3 in selenium supplemented and nonsupplemented ewes and their lambs. Veterinary Medicine International 2014, 1–6. doi:10.1155/2014/105236.

Heitmann RN, Dawes DJ and Sensenig SC 1987. Hepatic ketogenesis and peripheral ketone body utilization in the ruminant. Journal of Nutrition 117, 1174–1180. doi:10.1093/jn/117.6.1174.

IDEXX Laboratories Vet Med Labor GmbH 2019. Im Moltengraben 65, 70806 Kornwestheim, Baden-Wuerttemberg, Germany.

Laboklin GmbH and Co. KG 2020. Klinische Chemie Großtiere. Retrieved on 14 February 2020, from https://laboklin.com/de/infothek/referenzwerte/nutztiere/.

Liesegang A, Risteli J and Wanner M 2007. Bone metabolism of milk goats and sheep during second pregnancy and lactation in comparison to first lactation. Journal of

Animal Physiology and Animal Nutrition 91, 217–225. doi:10.1111/j.1439-0396.2007.00695.x.

May K, Bohlsen E, König S and Strube C 2020. *Fasciola hepatica* seroprevalence in Northern German dairy herds and associations with milk production parameters and milk ketone bodies. Veterinary Parasitology 277, 109016. doi:10.1016/j.vetpar.2019.109016.

Moorby JM, Fleming HR, Theobald VJ and Fraser MD 2015. Can live weight be used as a proxy for enteric methane emissions from pasture-fed sheep? Scientific Reports 5, 17915. doi:10.1038/srep17915.

Pereira V, Carbajales P, López-Alsonso M and Miranda M 2018. Trace element concentrations in beef cattle related to the breed aptitude. Biological Trace Element Research 186, 135–142. doi:10.1007/s12011-018-1276-3.

Pesántez-Pacheco JL, Heras-Molina A, Torres-Rovira L, Sanz-Fernández MV, García-Contreras C, Vázquez-Gómez M, Feyjoo P, Cáceres E, Frías-Mateo M, Hernández F, Martínez-Ros P, González-Martin JV, González-Bulnes A and Astiz S 2019. Maternal metabolic demands caused by pregnancy and lactation: association with productivity and offspring phenotype in high-yielding dairy ewes. Animals 9, 295. doi:10.3390/ani9060295.

Peterson ME, Castellano CA and Rishniw M 2016. Evaluation of body weight, body condition, and muscle condition in cats with hyperthyroidism. Journal of Veterinary Internal Medicine 30, 1780–1789. doi:10.1111/jvim.14591.

Plush K, Weaver A, Staveley L and van Wettere W 2018. Maternal magnesium sulfate supplementation in a pre-farrow diet improves factors important for piglet viability. Animals 8, 185. doi:10.3390/ani8100185.

R Development Core Team 2016. A language and environment for statistical computing. Retrieved on 12 November 2016, from http://www.R-project.org.

Reintke J, Brügemann K, Wagner H, Engel P, Wehrend A, König S 2020a. Phenotypic relationships between maternal energy metabolism and lamb body weight development during lactation for pure- and crossbred sheep populations in low and high

input production systems. Small Ruminant Research 183, 106037. doi:10.1016/j.smallrumres.2019.106037.

Reintke J, Brügemann K, Yin T, Engel P, Wagner H, Wehrend A and König S 2020b. Assessment of methane emission traits in ewes using a laser methane detector: genetic parameters and impact on lamb weaning performance. Archives Animal Breeding 63, 113–123. doi:10.5194/aab-63-113-2020.

Ricci P, Chagunda MGG, Rooke J, Houdijk JGM, Duthie C-A, Hyslop J, Roehe R and Waterhouse A 2014. Evaluation of the laser methane detector to estimate methane emissions from ewes and steers. Journal of Animal Science 92, 5239–5250. doi:10.2527/jas.2014-7676.

Russel AJF, Doney JM and Gunn RG 1969. Subjective assessment of body fat in live sheep. The Journal of Agricultural Science 72, 451–454. doi:10.1017/S0021859600024874.

SAS Institute Inc. 2018. SAS® Studio 3.8: User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

Suttle NF, Davies HL and Field AC 1982. A model for zinc metabolism in sheep given a diet of hay. British Journal of Nutrition 47, 105. doi:10.1079/BJN19820015.

Tsiamadis V, Banos G, Panousis N, Kritsepi-Konstantinou M, Arsenos G and Valergakis GE 2016. Genetic parameters of calcium, phosphorus, magnesium, and potassium serum concentrations during the first 8 days after calving in Holstein cows. Journal of Dairy Science 99, 5535–5544. doi:10.3168/jds.2015-10787.

Underwood EJ and Suttle NF 1999. The mineral nutrition of livestock, 3rd edition. CABI Publishing, Oxon, United Kingdom.

Willems H, Leiber F, Kohler M, Kreuzer M and Liesegang A 2013. Altitude, pasture type, and sheep breed affect bone metabolism and serum 25-hydroxyvitamin D in grazing lambs. Journal of Applied Physiology 114, 1441–1450. doi:10.1152/japplphysiol.01289.2012.

Yang H, Liu C-N, Wolf RM, Ralle M, Dev S, Pierson H, Askin F, Steele KE, Magnuson TH, Schweitzer MA, Wong GW and Lutsenko S 2019. Obesity is associated with copper elevation in serum and tissues. Metallomics 11, 1363–1371. doi:10.1039/c9mt00148d.

Supplementary Table S1. Serum macro- and microelements and metabolic indicators measured in ewes and the methods applied. The measurements were performed according to the manufacturers' instructions.

Blood parameter	Measurement method	Coefficient of variation (CV in %)	Manufacturer
Sodium (Na)	Flame photometry	≤ 0.5	Eppendorf[1]
Potassium (K)	Flame photometry	≤ 0.5	Eppendorf[1]
Calcium (Ca)	Flame photometry	≤ 0.8	Eppendorf[1]
Non-esterified fatty acids (NEFA)	Photometric color test	≤ 1.5	FUJIFILM Wako Chemicals[2]
Phosphate (P)	Photometric color test	intra assay: 2.7 inter assay: 3.7	Labor + Technik Eberhard Lehmann GmbH[3]
Glutamate dehydrogenase (GLDH)	Photometric color test (at 25 °C)	intra assay: 5.0 inter assay: 7.2	Labor + Technik Eberhard Lehmann GmbH[3]
β-hydroxybutyrate (BHB)	Photometric color test (at 25 °C)	intra assay: 3.8 inter assay: 5.2	Randox Laboratories Ltd.[4]
Copper (Cu)	ICP-MS[5]	intra assay: 1.6 inter assay: 4.2	Varian Medical Systems[6], Bruker Daltonik GmbH[7]

Iron (Fe)	ICP-MS[5]	intra assay: 3.5 inter assay: 4.7	Varian Medical Systems[6], Bruker Daltonik GmbH[7]
Zinc (Zn)	ICP-MS[5]	intra assay: 0.8 inter assay: 8.8	Varian Medical Systems[6], Bruker Daltonik GmbH[7]
Selenium (Se)	ICP-MS[5]	intra assay: 3.8 inter assay: 5.3	Varian Medical Systems[6], Bruker Daltonik GmbH[7]
Magnesium (Mg)	ICP-MS[5]	intra assay: 4.7 inter assay: 1.0	Varian Medical Systems[6], Bruker Daltonik GmbH[7]

[1]Eppendorf Vertrieb Deutschland GmbH, Wesseling-Berzdorf, North Rhine-Westphalia, Germany.

[2]FUJIFILM Wako Chemicals Europe GmbH, Neuss, North Rhine-Westphalia, Germany.

[3]LABOR + TECHNIK Eberhard Lehmann GmbH, Berlin, Germany.

[4]Randox Laboratories Ltd., Crumlin, County Antrim, United Kingdom.

[5]ICP-MS, inductively coupled plasma mass spectrometry.

[6]Varian Medical Systems, Inc., Palo Alto, CA, United States.

[7]BRUKER DALTONIK GmbH Microbiology & Diagnostics, Bremen, Germany.

Supplementary Table S2. Descriptive statistics (means, SD, median, minimum, maximum) for ewe body weight (EBW), ewe body condition score (BCS), ewe backfat thickness (BFT), mean CH_4 during respiration and blood parameters in Merinolandsheep (ML).

Parameter	No.	Mean	SD	Median	Min.	Max.
EBW, kg	139	95.84	9.15	95.00	75.00	115.50
BCS	139	3.60	0.67	3.50	2.00	5.00
BFT, mm	139	8.04	2.24	8.00	4.00	14.00
CH_4, µL/L	139	10.67	2.65	10.78	4.11	16.75
Calcium, mmol/L	139	2.40	0.19	2.44	1.61	2.73
Copper, µmol/L	139	15.13	3.07	14.40	9.80	24.70
Sodium, mmol/L	139	149.88	2.62	149.90	143.30	156.90
Potassium, mmol/L	139	4.57	0.51	4.64	2.83	5.53
Magnesium, mmol/L	139	1.05	0.15	1.03	0.75	1.52
Phosphate, mmol/L	139	1.62	0.44	1.57	0.86	3.72
Selenium, µmol/L	139	1.06	0.35	1.06	0.45	1.91
Zinc, µmol/L	139	12.25	2.69	11.9	3.96	18.40
Iron, µmol/L	139	25.37	8.16	24.45	8.00	58.40
NEFA[1], mmol/L	139	0.25	0.20	0.18	0.01	1.10
GLDH[2], U/L	139	16.09	11.92	13.00	3.00	65.00
BHB[3], mmol/L	139	0.48	0.32	0.38	0.10	2.11

[1]NEFA, Non esterified fatty acids.

[2]GLDH, glutamate dehydrogenase.

[3]BHB, β-hydroxybutyrate.

Supplementary Table S3 Descriptive statistics (means, SD, median, minimum, maximum) for ewe body weight (EBW), ewe body condition score (BCS), ewe back fat thickness (BFT), mean CH_4 during respiration and blood parameters in Rhönsheep (RH).

Parameter	No.	Mean	SD	Median	Min.	Max.
EBW, kg	200	69.64	6.98	70.50	51.00	87.50
BCS	200	3.18	0.70	3.00	1.50	5.00
BFT, mm	200	7.29	2.17	7.00	2.00	12.00
CH_4, µL/L	200	10.30	2.64	9.98	4.86	17.50
Calcium, mmol/L	200	2.49	0.13	2.48	2.15	2.80
Copper, µmol/L	200	15.29	3.19	14.40	10.70	27.30
Sodium, mmol/L	200	150.67	3.55	150.60	133.80	160.10
Potassium, mmol/L	200	4.27	0.61	4.18	2.83	5.83
Magnesium, mmol/L	200	1.06	0.14	1.05	0.74	1.44
Phosphate, mmol/L	200	1.48	0.36	1.48	0.53	2.89
Selenium, µmol/L	200	1.12	0.34	1.17	0.42	2.04
Zinc, µmol/L	200	12.53	2.87	12.13	4.96	20.70
Iron, µmol/L	200	27.83	9.06	27.00	6.90	60.00
NEFA[1], mmol/L	200	0.23	0.26	0.14	0.02	1.82
GLDH[2], U/L	200	15.66	11.92	11.00	1.00	51.00
BHB[3], mmol/L	200	0.61	0.46	0.48	0.19	2.97

[1]NEFA, Non esterified fatty acids.

[2]GLDH, glutamate dehydrogenase.

[3]BHB, β-hydroxybutyrate.

KAPITEL 5

5 Diskussion

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, dass die Körperkondition, die Rasse, die Haltungsbedingungen, der CH_4-Ausstoß, die Mengen- und Spurenelementversorgung sowie die Stoffwechselindikatoren BHB und NEFA des Mutterschafes LBW vor und nach der Geburt beeinflussen. Die in den Kapiteln 2, 3 und 4 angewandten Modellierungsansätze lieferten neue Erkenntnisse bezüglich der generationsübergreifenden phänotypischen und genetischen Beziehungen zwischen Indikatormerkmalen der maternalen Energiebilanz und LBW. Neben den in Kapitel 2 und 3 durchgeführten statistischen bzw. genetisch-statistischen Modellierungen werden zu Beginn dieser übergreifenden Diskussion weitere, in dieser These evaluierte oder für zukünftige Studien relevante Modellvarianten diskutiert. Im weiteren Verlauf dieser Diskussion wird an die Ergebnisse für den high input Betrieb aus Kapitel 2 angeknüpft und die phänotypischen Beziehungen zwischen den maternalen Körperkonditionsmerkmalen (EBW, BCS, BFT) und dem LBW ebenfalls auf genetischer Ebene diskutiert. Um die Erkenntnisse aus Kapitel 3 hinsichtlich des CH_4-Ausstoßes bei Mutterschafen und dessen Bedeutung für die Energiebilanz und LBW zu ergänzen, wird der Einfluss des ruminalen Mikrobioms auf die CH_4-Emissionen beleuchtet. In Anlehnung an Kapitel 4 werden bestehende und großangelegte Monitoringprogramme in der Schafhaltung anderer Länder vorgestellt und die Herausforderungen bezüglich der Phänotypisierung von Gesundheitsmerkmalen diskutiert. Abschließend wird das Potential zur Integration von Merkmalen der Energiebilanz in Selektionsinstrumente für die Schafzucht, vor dem Hintergrund der eigenen Ergebnisse aufgeführt und dabei auch die Nutzung genomischer Daten in der Schafzucht diskutiert.

5.1 Genetisch-statistische Modellierungsansätze für maternale Energiebilanzmerkmale unter Berücksichtigung von Genotyp-Umwelt-Interaktion

Mehr denn je stellt sich heutzutage die Frage wie man rassespezifische Energieeffizienzpotentiale unter bestimmten Haltungsbedingungen optimal ausnutzen kann, um gesunde Tiere mit konstant guter Leistung zu züchten, die gleichzeitig geringe Produktionskosten verursachen (Hayes *et al.*, 2013; McLaren *et al.*, 2014). Die Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln zeigten, dass sich die Beziehungen zwischen Mutterkonditionsmerkmalen und dem LBW nicht nur zwischen den Rassen ML, RH und CF unterschieden, sondern Individuen innerhalb Rassen auch unterschiedlich gut dazu in der Lage waren, ihre endo- bzw. exogenen Ressourcen (z.B. Körperfettspeicher, Fütterungsbedingungen) zu nutzen. Eine Erklärung neben den bereits diskutierten physiologischen Ansätzen sind Wechselwirkungen zwischen der genetischen Veranlagung (Genotyp) der Mutterschafe und ihrer Umwelt, da sich die Haltungsbedingungen der in Kapitel 2 beschriebenen Betriebe deutlich voneinander unterschieden (low input vs. high input). Diese Wechselwirkungen werden unter dem Begriff Genotyp-Umwelt-Interaktion (GUI) zusammengefasst. Liegt für ein Merkmal die genetische Korrelation zwischen zwei Umwelten ≤ 0,8, so ist von einer GUI auszugehen (Robertson, 1959). Auf die Tierzucht bezogen bedeutet das Vorhandensein von GUI, dass das Leistungsniveau verschiedener Rassen je nach Umwelt variieren kann, was in genetisch-statistischen Modellierungen von Indikatormerkmalen der maternalen Energiebilanz entsprechend berücksichtigt werden muss. Carter *et al.* (1971a) wiesen beispielsweise GUI für die Anzahl lammender Mutterschafe, für das Merkmal EBW sowie für die Anzahl der abgesetzten Lämmer nach. In einer weiteren Studie zeigten dieselben Autoren, dass sich das Geburtsgewicht der Lämmer und ihr Gewicht nach 120 Tagen *postpartum* je nach Umwelt unterschieden, nicht aber die durchschnittliche tägliche Zunahme von der Geburt bis zum Absetzen (Carter *et al.*, 1971b). Auch die *pränatale* Versorgung des Fetus intrauterin zeigte signifikante Interaktionen mit dem mütterlichen

Genotyp und in der Folge nicht unerhebliche Einflüsse auf das Geburtsgewicht (Hay und Roberts, 2019).

Um relevante Umwelteinflüsse auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Merkmale in den genetisch-statistischen Modellierungen zu berücksichtigen, kamen verschiedene Modellierungsansätze zur Anwendung. Im Allgemeinen wird bei der betriebsübergreifenden Modellierung ein fixer Betriebseffekt berücksichtigt, um auf unterschiedliche Haltungsumwelten zu korrigieren (de Jong und Bijma, 2002). Die in Kapitel 2 beschriebenen Modelle wurden für jeden der beiden Betriebe separat ausgewählt und angepasst, da sich bereits die Datenerhebung zwischen den beiden Betrieben voneinander unterschied und somit keine überbetrieblich einheitliche Datenstruktur vorlag. Diese wäre jedoch für eine gleichzeitige Betrachtung der beiden Betriebe innerhalb eines Modells nötig gewesen. Die in den Modellen berücksichtigten fixen Effekte wurden danach ausgewählt, ob sie sich in den Typ-3-Tests als signifikant ($P < 0,05$) für das jeweilige Merkmal erwiesen. Dabei kam es vor, dass einige Effekte nicht für jedes der betrachteten Merkmale gleichermaßen signifikant waren. In diesem Fall wurde der Fokus zugunsten einer einheitlichen Modellierung innerhalb einer Teilstudie gelegt und auch nicht signifikante fixe Effekte im Modell belassen, um eine Vergleichbarkeit der Merkmale untereinander zu gewährleisten. Darüber hinaus wurden verschiedene fixe Regressionsmodelle miteinander verglichen, um die phänotypischen und genetischen Beziehungen zwischen den maternalen und den Lammmerkmalen über den Laktationsverlauf (Kapitel 2 und 3) hinweg zu schätzen. Als Funktion für die Modellierung des Laktationsverlaufs (Lammalter) wurden in Kapitel 2 und 3 Legendre Polynome genutzt, da die Modelle mit dieser Funktion die beste Modellgüte, d.h. die niedrigsten Akaike Information Criteria (AIC, Akaike, 1973) aufwiesen (**Tabelle 1**). Ferner wurden im Rahmen dieser Arbeit quadratische und kubische Funktionen sowie die Funktionen von Ali und Schaeffer (1987) und Guo und Swalve (1995) evaluiert. Diese zeigten im Vergleich zu den Legendre Polynomen aber deutlich höhere AIC Werte.

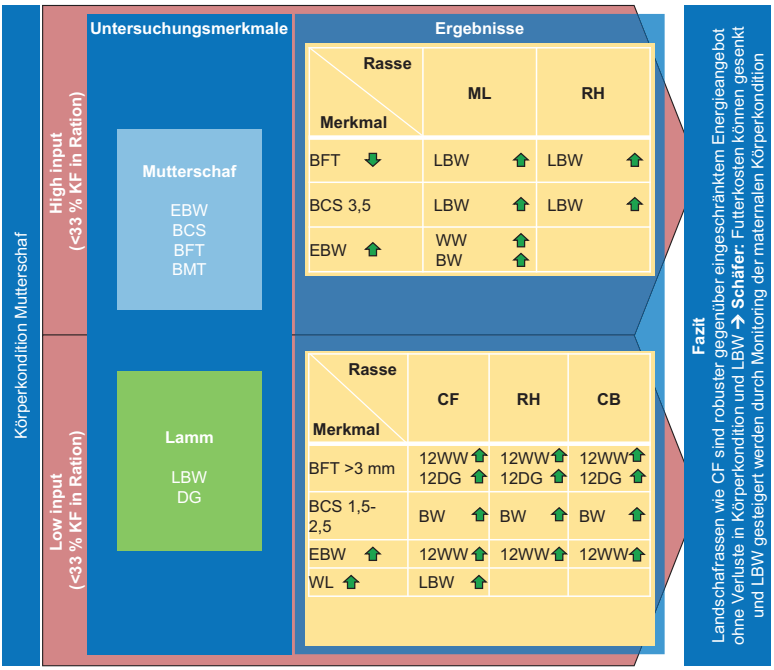
Tabelle 1. Akaike Information Criterion (AIC) für verschiedene Regressionsmodelle bezüglich des Merkmals Lammgewicht (LBW) für die Schafpopulationen des high input Betriebs und des low input Betriebs (Datensatz aus Kapitel 2).

	AIC	
Regression	High input	Low input
Quadratisch	5274	3465
Kubisch	5360	3570
Ali und Schaeffer (1987)	5182	3245
Guo und Swalve (1995)	5229	3365
Legendre Polynome 3. Ordnung	5162	3230

Buttchereit *et al.* (2010) bestätigten die Eignung von Legendre Polynomen für die Modellierung von Energiebilanzen bei Milchkühen. Die Autoren betonten ebenfalls einen Vorteil der Random-Regressions-Methode (RRM) im Vergleich zur Fixen-Regressions-Methode. Bei der RRM ist es möglich (bei großen Datensätzen und der gleichzeitigen Betrachtung vieler Merkmale), kontinuierliche statt nur diskrete Umweltdeskriptoren z.B. über die Zeit oder verschiedene Haltungsumwelten hinweg zu modellieren (Yin und König, 2018). Allerdings wurde die Fixe-Regressions-Methode in der vorliegenden Arbeit bewusst ausgewählt, da es aufgrund eines begrenzten Datenumfangs zu Ungenauigkeiten in den Berechnungen mit der RRM kommen kann (Nobre *et al.*, 2003). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Untersuchungen zu weiteren geeigneten Modellierungsansätzen für die Energiebilanzierung bei Mutterschafen notwendig sind, um die im Rahmen dieser Arbeit generierten Ergebnisse zu verifizieren und die aufgestellten Modelle weiterzuentwickeln. Wenn möglich, sollten diese Untersuchungen dann auf größeren Datensätzen beruhen, um auch für zukünftige großangelegte Zuchtprogramme geeignete Modelle zu etablieren.

5.2 Beziehungen zwischen maternalen Körperkonditionsmerkmalen und dem Lammgewicht auf phänotypischer und genetischer Ebene

In Kapitel 2 wurden die phänotypischen Beziehungen zwischen Merkmalen des maternalen Energiestoffwechsels und LBW während der Laktation in Abhängigkeit von der Rasse und der Haltungsumwelt besprochen. Die Ergebnisse dieser Teilstudie werden in **Abbildung 1** schematisch zusammengefasst.



Legende: KF – Kraftfutter; EBW – Mutterschafgewicht; BCS – Body Condition Score; BFT – Rückenfettdicke; BMT – Rückenmuskeldicke; LBW – Lammgewicht; DG – tägliche Zunahme; ML – Merinolandschaf; RH – Rhönschaf; WW – Absetzgewicht Lamm; BW – Geburtsgewicht Lamm; CF – Coburger Fuchsschaf; CB – Kreuzungstier; 12WW – 12-Wochen-Gewicht Lamm; 12DG – tägliche Zunahme zwischen Woche 9 und 12; WL – tägliche Gewichtsabnahme Mutter (CF: ≥40 g/Tag, <40 g/Tag; RH: ≥25 g/Tag, <25 g/Tag; CB: >30 g/Tag, ≤30 g/Tag)

Abbildung 1. Schematische Darstellung des Studiendesigns sowie der phänotypischen Ergebnisse aus Kapitel 2 bezüglich der Einflüsse von maternalen Körperkonditionsmerkmalen

auf die Lammgewichtsentwicklung in zwei unterschiedlichen Produktionssystemen (high input und low input) und für unterschiedliche Rassen.

In weiteren, in Kapitel 2 nicht dargestellten Analysen wurden für dieselbe Schafpopulation des high input Betriebs genetische Parameter für die Merkmale EBW, BCS und LBW geschätzt. **Tabelle 2** zeigt diesbezüglich die zugrundeliegende Anzahl untersuchter Tiere, die Anzahl der Beobachtungen, sowie die Anzahl der Tiere innerhalb der Verwandtschaftsmatrix für jedes Merkmal. Da im Rahmen der Teilstudie aus Kapitel 3 ebenfalls genetische Analysen für diesen high input Betrieb und die Merkmale EBW, BCS, BFT und LBW erfolgt sind, werden ergänzend ebenfalls die entsprechenden Angaben zu dieser Studie in **Tabelle 2** gezeigt (genetisch-statistische Modelle siehe Kapitel 3).

Tabelle 2. Anzahl der untersuchten Tiere, Anzahl der Beobachtungen sowie die Anzahl der in der Verwandtschaftsmatrix berücksichtigten Tiere für die Merkmale Mutterschafgewicht (EBW), Body Condition Score (BCS), Rückenfettdicke (BFT) und Lammgewicht (LBW).

	n Tiere				n Beobachtungen				n Tiere Verwandtschaftsmatrix			
Kapitel	EBW	BCS	BFT	LBW	EBW	BCS	BFT	LBW	EBW	BCS	BFT	LBW
2	244	244	-	350	791	791	-	1126	25422			
3	330	330	177	629	1493	1493	696	2164	29744			

Für die Schafpopulation aus Kapitel 2 (high input Betrieb) baute das genetisch-statistische Modell für das Merkmal LBW auf dem in Kapitel 2 bereits eingeführten Modell (1) auf. Zusätzlich wurde für die genetischen Analysen der additiv-genetische Effekt des Lammes berücksichtigt:

$$y_{ijklmnop} = \mu + lnr_i + birthtype_j + sex_k + BCS_l + WL_m + WL_m\ (lamb\ age) + L_n + M_o + e_{ijklmnop}$$

mit $y_{ijklmnop}$ als *ijklmnop*-te Beobachtung für LBW; μ als Populationsmittel; lnr_i als fixer Effekt für die *i*-te Laktationsnummer (1–7); $birthtype_j$ als fixer Effekt für den *j*-ten Geburtstyp des Lammes (Einling, Zwilling, Drilling); sex_k als fixer Effekt für das *k*-te Geschlecht des Lammes (m, w); BCS_l als fixer Effekt für den *l*-ten BCS des Mutterschafs (1–5, mit Abstufungen in 0.5 Einheiten); WL_m als fixer Effekt für die *m*-te maternale Gewichtsabnahme pro Tag in Abhängigkeit von der Rasse (ML: ≥ 120 g WL/d; 0−119 g WL/d; keine WL oder Gewichtszunahme; RH: ≥ 100 g WL/d;<100 g WL/d). Die fixe Regression für das Alter des Lammes (0–75 Tage) innerhalb der maternalen WL_m wurde mit Hilfe von Legendre Polynomen dritter Ordnung modelliert. L_n ist der additiv-genetische Effekt des *n*-ten Lammes; M_o ist der zufällige Effekt des *o*-ten Mutterschafes; $e_{ijklmnop}$ ist der zufällige Restfehler.

Für die maternalen Merkmale EBW und BCS wurde folgendes genetisch-statistisches Modell für das Datenmaterial aus Kapitel 2 (high input Betrieb) herangezogen:

$$y_{ijklmno} = \mu + lnr_i + birthtype_j + sex_k + WL_l + WL_l\ (\text{lamb age}) + pe_m + M_n + e_{ijklmno}$$

mit $y_{ijklmno}$ als *ijklmno*-te Beobachtung für LBW; μ als Populationsmittel; lnr_i als fixer Effekt für die *i*-te Laktationsnummer (1–7); $birthtype_j$ als fixer Effekt für den *j*-ten Geburtstyp des Lammes (Einling, Zwilling, Drilling); sex_k als fixer Effekt für das *k*-te Geschlecht des Lammes (m, w); WL_l als fixer Effekt für die *l*-te maternale Gewichtsabnahme pro Tag in Abhängigkeit von der Rasse (ML: ≥ 120 g WL/d; 0−119 g WL/d; keine WL oder Gewichtszunahme; RH: ≥ 100 g WL/d;<100 g WL/d). Die fixe Regression für das Alter des Lammes (0–75 Tage) innerhalb der maternalen WL_l wurde mit Hilfe von Legendre Polynomen dritter Ordnung modelliert. pe_m ist der permanente Umwelteffekt des *m*-ten Mutterschafes; M_n ist der additiv-genetische Effekt des *n*-ten Mutterschafes; $e_{ijklmno}$ ist der zufällige Restfehler.

In **Abbildung 2** sind die geschätzten Heritabilitäten für die Merkmale EBW, BCS und LBW basierend auf den Daten aus Kapitel 2 (rote Punkte) im Vergleich zu den geschätzten Heritabilitäten für die Merkmale EBW, BCS, BFT und LBW basierend auf den Daten aus Kapitel 3 (grüne Punkte) dargestellt. Für einen umfassenderen Vergleich wurden die in Kapitel 1 bereits gezeigten Angaben aus der Literatur auch in

dieser **Abbildung 2** erneut aufgegriffen (blaue Punkte). Es wird deutlich, dass die im Rahmen dieser Arbeit geschätzten Erblichkeiten für die Merkmale EBW, BCS, BFT und LBW zu denen anderer Studien vergleichbar waren. Alle betrachteten maternalen Körperkonditionsmerkmale sowie LBW erwiesen sich als gering bis moderat erblich (h^2 = 0,1 bis h^2 = 0,64), sowohl basierend auf den Daten aus Kapitel 2 als auch basierend auf den Daten aus Kapitel 3. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Merkmale sich für eine Integration in zukünftige Zuchtwertschätzungen eignen. Eine Selektion auf diese Merkmale verspricht darüber hinaus einen guten Zuchtfortschritt. Da für die Tiere des low input Betriebs keine ausreichenden Pedigreeinformationen zur Verfügung standen, konnte eine zuverlässige vergleichende Schätzung genetischer Parameter für diese Population nicht erfolgen.

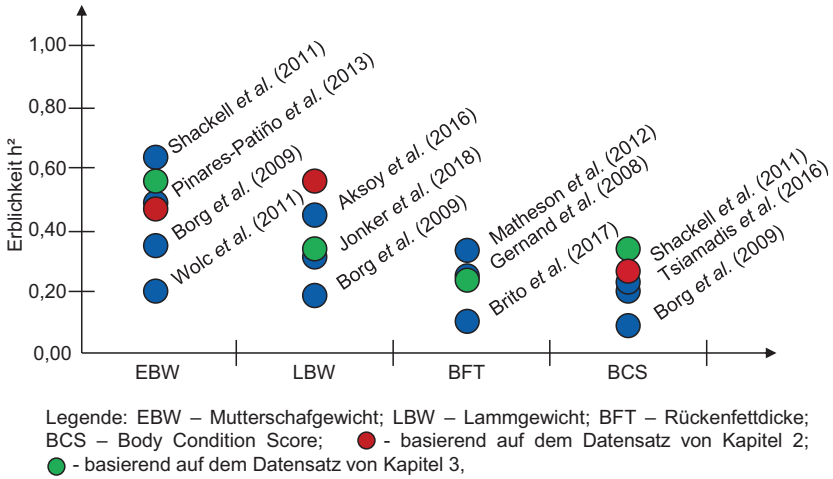


Abbildung 2. Geschätzte Erblichkeiten für die Merkmale Mutterschafgewicht, Body Condition Score, Rückenfettdicke und Lammgewicht basierend auf der in Kapitel 2 beschriebenen Studie (rot) sowie basierend auf der in Kapitel 3 beschriebenen Studie (grün). Vergleichend dazu Angaben aus der Literatur (blau) zu Erblichkeiten der genannten Merkmale.

Auf phänotypischer Ebene zeigten die Korrelationen zwischen LBW, EBW, BCS und BFT für den high input Betrieb sowohl negative als auch positive Beziehungen, wohingegen auf genetischer Ebene für dieselbe Population ausschließlich positive Korrelationen zwischen LBW und den maternalen Körperkonditionsmerkmalen geschätzt wurden (**Abbildung 3**).

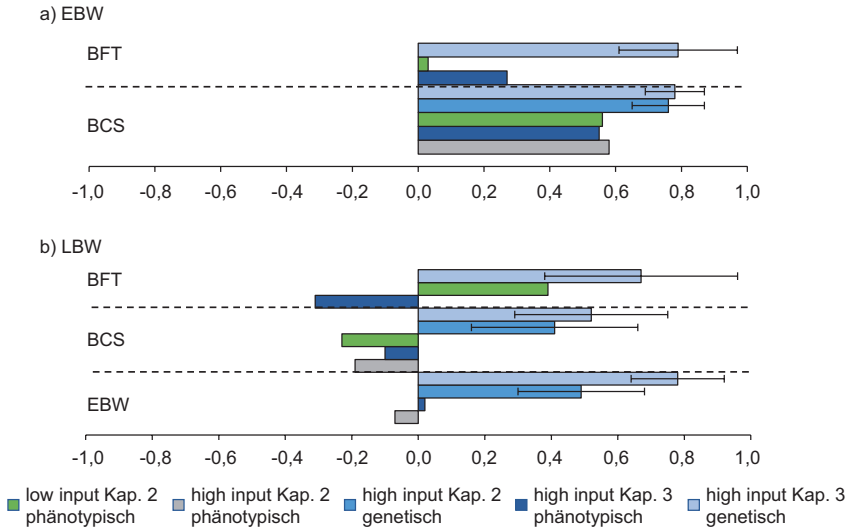


Abbildung 3. Phänotypische und genetische Korrelationen (x-Achse) zwischen dem Merkmal a) Mutterschafgewicht (EBW), der Rückenfettdicke (BFT) und dem Body Condition Score (BCS) bzw. zwischen dem Merkmal b) Lammgewicht (LBW), BFT, BCS und EBW. Für die genetischen Korrelationen sind zusätzlich Standardfehler angegeben.

Die positiven Zusammenhänge zwischen EBW, BCS und BFT bestätigten Ptáček *et al.* (2014) auf phänotypischer Ebene auch für Suffolk Schafe sowie Berry *et al.* (2002) auf genetischer Ebene für Milchrinder. Frutos *et al.* (1997) führten während ihrer Untersuchungen eine kombinierte Erfassung von BCS und EBW durch, welche es ermöglicht, Körperkonditionsbeschreibungen noch exakter zu gestalten. Ein Vorteil der Merkmale BCS und BFT im Gegensatz zum Körpergewicht ist, dass diese nicht durch Faktoren, wie z.B. das Gewicht des Skeletts oder des Inhalts des Magen-Darm-Trakts

beeinflusst werden (Kenyon *et al.*, 2014). Auf züchterischer Ebene implizieren die dargestellten genetischen Ergebnisse für Schafe unter high input Bedingungen die Möglichkeit LBW indirekt zu erhöhen, indem Mutterschafe mit hohem Körpergewicht, hohem BCS und hoher BFT selektiert werden. Snowder *et al.* (2001) fanden dazu einen positiven Zusammenhang zwischen Mutterschafgewicht und der Milchleistung, welcher die positiven Auswirkungen eines hohen EBW auf LBW während der Laktation aus dieser Arbeit ebenfalls erklärt. Darüber hinaus bleibt jedoch zu berücksichtigen, dass eine strenge Selektion auf erhöhtes Mutterschafgewicht mit einer erhöhten Inzidenz für eine Insulinresistenz und hormonelle Imbalancen in der nachfolgenden F1 und F2 Generation assoziiert war (Pankey *et al.*, 2017). Außerdem neigten adipöse Mutterschafe zu einem erhöhten Schwergeburtsrisiko (Bastin *et al.*, 2010; Peel *et al.*, 2012) und das Gesamtwurfgewicht zum Absetzen sank bei sehr hohem maternalen BCS sogar ab (Vatankhah *et al.*, 2012). Ein optimaler BCS lag zum Ablammzeitpunkt bei 2,5 bis 3,0 und war positiv mit dem Absetzgewicht von Lämmern verknüpft (Kenyon *et al.*, 2014; Cranston *et al.*, 2017). In der vorliegenden Arbeit war ein BCS von 3,5 mit dem höchsten LBW verbunden. Die Integration der Ergebnisse eines regelmäßiges BCS Monitorings vor und nach der Geburt in Managemententscheidungen zeigte positive Auswirkungen auf Fruchtbarkeitsmerkmale, wie z.B. auf die Non-return Rate (Bastin *et al.*, 2010).

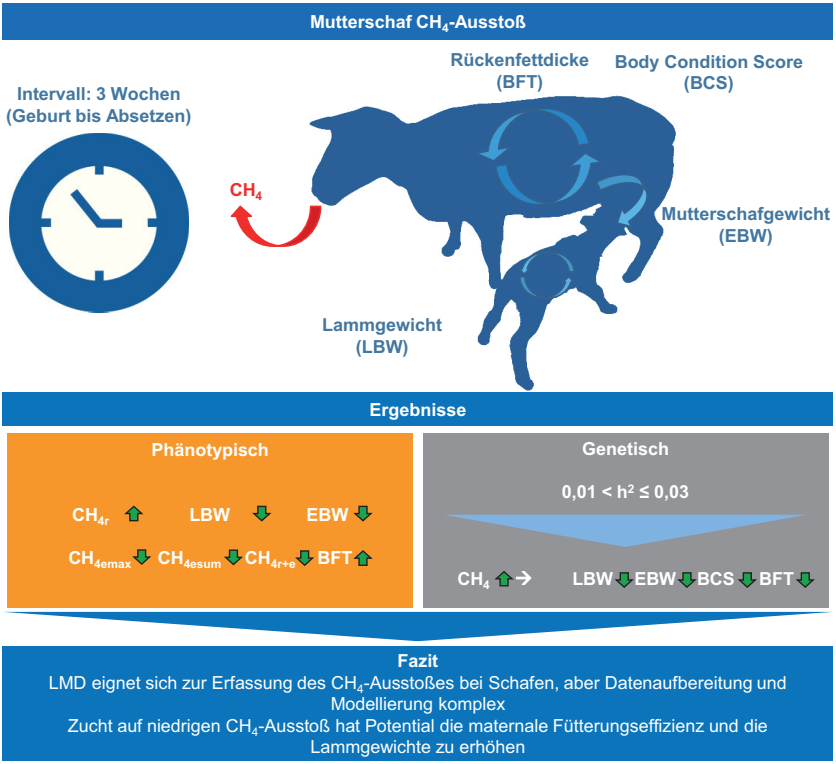
Für Schafe des low input Betriebs fand sich eine positive phänotypische Beziehung zwischen dem maternalen Körperkonditionsparameter BFT und LBW (**Abbildung 3**). Im Vergleich zu den Mutterschafen des high input Betriebs, waren Mutterschafe der Rassen RH und CF des low input Betriebs selbst unter ungünstigeren Fütterungsbedingungen dazu in der Lage, die zur Verfügung stehenden Futterressourcen sehr effizient zu nutzen, indem sie eigene Fettreserven aufbauten und gleichzeitig die Energieversorgung ihres Nachwuchses garantierten. Diesbezüglich zeigten Jobgen *et al.* (2008) in trächtigen Western White-Face Schafen, eine ebenfalls optimal an raue Haltungsbedingungen adaptierte Schafrasse, dass diese Mutterschafe die fetale Aminosäurezufuhr auch bei eingeschränkter Nährstoffaufnahme über das Futter konstant hielten. Ein rassespezifischer Vorteil robuster Rassen (CF, RH) unter low input Bedingungen gegenüber ML des high input Betriebs wird daher weiter angenommen. Hay

und Roberts (2019) bestätigten in ihren Untersuchungen zu Rindern, dass das wahre genetische Potential maskiert sein kann, wenn verbesserte Umweltbedingungen (z.B. kraftfutterreiche Fütterung) die phänotypischen Ergebnisse positiv verzerren. Die Fähigkeit eines Individuums oder eines Systems wichtige Funktionen auch unter sich verändernden Umweltbedingungen aufrechtzuerhalten wird als Resilienz bezeichnet (Scheffer *et al.*, 2018). Um zu verifizieren, ob die phänotypischen Beobachtungen unter low input Bedingungen genetisch determiniert sind, bestimmte Rassen also eine höhere Resilienz aufweisen, müssen für diese Tiere ebenfalls weitere Analysen bezüglich der genetischen Zusammenhänge zwischen den maternalen Körperkonditionsmerkmalen und LBW erfolgen. Eine Möglichkeit, um etwaige Vorteile der Rassen RH und CF unter low input Bedingungen zu evaluieren, ist eine Berechnung der genetischen Korrelation eines Merkmals in zwei Umwelten (Betrieben) mit Hilfe eines bivariaten Modells. Des Weiteren ist eine Modellierung der Schafpopulationen beider Betriebe innerhalb eines Modells und unter Berücksichtigung des Betriebseffekts möglich (siehe auch Kapitel 5.1).

5.3 Zusammenhänge zwischen der maternalen Energiebilanz, dem Methanausstoß und dem ruminalen Mikrobiom

In den Kapiteln 1 und 3 wurden bereits verschiedene Messmethoden für den enteralen CH_4-Ausstoß und unterschiedliche Möglichkeiten der Definition von CH_4-Merkmalen beschrieben. Des Weiteren wurden phänotypische und genetische Beziehungen zwischen maternalen CH_4- und Körperkonditionsmerkmalen sowie LBW diskutiert. **Abbildung 4** fasst die Ergebnisse der Teilstudie aus Kapitel 3 schematisch zusammen.

Nutztiere mit verbesserter Futtereffizienz rücken immer mehr in den Fokus tierzüchterischen Interesses, denn sie verursachen geringere Produktionskosten und geringere Mengen an klimarelevantem CH_4 (Carberry *et al.*, 2012; Ellison *et al.*, 2017). Darüber hinaus stellt der CH_4-Ausstoß einen nicht unerheblichen Verlust (2–18 %) der über das Futter aufgenommenen Bruttoenergie dar (Johnson und Ward, 1996; Baker, 1999; Breves und Leonhard-Marek, 2010).



Legende: CH_4 – Methanausstoß; CH_{4r} – mittlere Methankonzentration während der Respiration; CH_{4emax} – maximale Methankonzentration während des Ruktus; CH_{4esum} – Summe der Methankonzentrationen pro Minute während des Ruktus CH_{4r+e} – mittlere Methankonzentration während Respiration und Ruktus; h^2 – Erblichkeit; LMD – Lasermethandetektor

Abbildung 4. Schematische Darstellung des Studiendesigns sowie der wichtigsten phänotypischen und genetischen Ergebnisse bezüglich der Beziehung zwischen dem maternalen Methanausstoß, der Körperkondition und dem Lammgewicht (basierend auf Kapitel 3).

Was diese zusätzlichen Energieverluste für ein säugendes Mutterschaf und seine Lämmer bedeuten, zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 3. Mutterschafe mit einem vergleichsweise hohen CH_4-Ausstoß während der Laktation wiesen auf phänotypischer Ebene ein geringeres Körpergewicht sowie einen Rückgang in BCS und BFT auf und auch ihre Lämmer waren signifikant leichter verglichen mit Mutterschafen mit einem

geringeren CH_4-Ausstoß. Kandel *et al.* (2017) und Chagunda *et al.* (2009a) zeigten in diesem Zusammenhang negative Einflüsse eines erhöhten enteralen CH_4-Ausstoßes auf die Milchleistung bei Milchkühen. Die negative Beziehung zwischen CH_4-Emissionen und maternaler Körperkondition bzw. LBW bestätigten sich im Rahmen dieser Arbeit auch auf genetischer Ebene (negative genetische Korrelationen). Pinares-Patiño *et al.* (2013) fanden hingegen eine positive genetische Korrelation zwischen der CH_4-Produktion (g/Tag) von acht Monate alten Lämmern und ihrem Körpergewicht. Der negative Zusammenhang zwischen BCS und dem CH_4-Ausstoß war in den Untersuchungen von Zetouni *et al.* (2018) vergleichbar mit den Ergebnissen in der vorliegenden Arbeit.

Methanmerkmale weisen geringe Heritabilitäten auf ($h^2 < 0{,}01–0{,}14$), unabhängig von der Merkmalsdefinition und der Messmethode (Pickering *et al.*, 2015; Paganoni *et al.*, 2017; Reintke *et al.*, 2020). In der vorliegenden Arbeit waren die niedrigen Heritabilitäten der CH_4-Merkmale durch hohe Restvarianzen begründet. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, weitere Umwelteinflüsse in der Modellierung zu berücksichtigen.

In diesem Zusammenhang spielen auch das ruminale Mikrobiom und die damit einhergehende mikrobielle Fermentationsrate eine entscheidende Rolle (Kamke *et al.*, 2016). Besonders methanogene Archaeen sind hier von Bedeutung (Shi *et al.*, 2014). Das Pansenmikrobiom ist eng mit der Fütterung und somit auch mit der Verdauungsphysiologie und Produktivität eines Tieres verknüpft (Mullins *et al.*, 2013) und kann somit zusätzlich zur direkten CH_4-Messung wichtige Erkenntnisse für die Berechnung von Energiebilanzen von Muttertieren liefern. Lima *et al.* (2019) identifizierten diesbezüglich mehrere mikrobielle Gensets, welche bis zu 63 % der Varianz in der Futtereffizienz und 65 % der Varianz der durchschnittlichen täglichen Gewichtszunahme bei Rindern erklärten. Die Zusammensetzung des Mikrobioms lässt also eine Rangierung von Nutztieren bezüglich ihrer Futtereffizienz (Ellison *et al.*, 2019) und ihres CH_4-Ausstoßes (Zhou *et al.*, 2009) zu. Belanche *et al.* (2019) zeigten außerdem Unterschiede in der Zusammensetzung des Mikrobioms von Lämmern, die entweder bis zum Absetzen von der Mutter gesäugt oder mit künstlichen Milchaustauscherpräparaten gefüttert wurden. Auch Ellison *et al.* (2017) bestätigen die

Bedeutung des Mikrobioms für den Energiestoffwechsel bei heranwachsenden Tieren. Darüber hinaus konnte für Milchrinder durch Metagenomanalysen gezeigt werden, dass das Kernmikrobiom erblich ist (h^2 = 0,2–0,6) und unter den erblichen Mikroorganismenspezies waren sieben direkt mit dem CH_4-Ausstoß des Wirts assoziiert (Wallace *et al.*, 2019). Auch Roehe *et al.* (2016) bestätigten die Möglichkeit das Pansenmikrobiom züchterisch zu beeinflussen, da dieses unter Kontrolle des Wirtgenoms steht. Methanogene Bakterienspezies, wie z.B. *Prevotella* konnten vermehrt in weniger effizienten Tieren nachgewiesen werden und dies sogar unabhängig von der Fütterungsintensität (McCann *et al.*, 2014). Eine weitere Erklärung für Unterschiede in der CH_4-Produktion konnte mit Hilfe von Metatranskriptomanalysen in der Art der Verstoffwechselung von Kohlenhydraten gefunden werden (Kamke *et al.*, 2016). Je nach Zusammensetzung des Mikrobioms, wurden Zucker (Hexosen) über die Zwischenstufe des Laktats zu Butyrat umgesetzt. Dabei entstand 24 % weniger CH_4 (0,5 Mol CH_4/Mol Hexose) als bei der direkten Verstoffwechselung von Zuckern zu Acetat und Butyrat. Diese direkte Umsetzung zu flüchtigen Fettsäuren (VFA) wurde folglich vor allem bei Schafen mit hohem CH_4-Ausstoß beobachtet. Shi *et al.* (2014) bestätigten diese Korrelation zwischen dem CH_4-Ausstoß, der Genexpression und den Transkriptionsprofilen von Schafen. Bei der Modellierung der CH_4-Merkmale wurde in Kapitel 3 der fixe Effekt der Rasse (ML, RH) berücksichtigt und auch andere Autoren bestätigten rassebedingte Abweichungen in den CH_4-Emissionen (Douglas *et al.*, 2016). Auch dies unterstreicht die Relevanz zur Berücksichtigung von CH_4-Phänotypen in zukünftigen Zuchtprogrammen, um rassespezifisch Verbesserungen in der Energieeffizienz zu erzielen. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass der gemessene CH_4-Ausstoß bei Mutterschafen und die daraus abgeleiteten Merkmale wichtige Erkenntnisse für die Energiebilanzierung bei Mutterschafen liefern. Sollten CH_4-Merkmale in zukünftige Zuchtprogramme für Mutterschafe integriert werden, so müssen bei der Modellierung von CH_4-Merkmalen Umweltfaktoren wie die relative Luftfeuchtigkeit oder die Temperatur (siehe Kapitel 3), aber auch die Einflüsse des tierindividuellen Pansenmikrobioms berücksichtigt werden, um die Schätzgenauigkeit genetischer Parameter zu erhöhen und Verzerrungen von Zuchtwerten zu vermeiden. Ebenso fehlt es zum jetzigen Zeitpunkt

an Studien, in denen die genetischen Beziehungen zwischen CH_4- und bedeutenden Produktionsmerkmalen (z.B. Fleisch- und Wollqualität, Milchleistung) analysiert werden, um eine negative Beeinflussung ökonomisch wichtiger Merkmale durch eine Selektion auf einen niedrigen CH_4-Ausstoß zu verhindern.

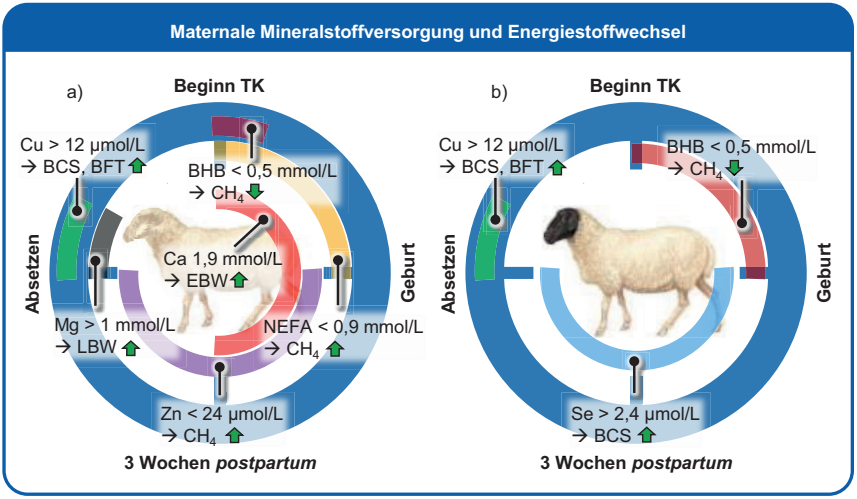
5.4 Methanemissionsmessung als Annäherung an die individuelle Futteraufnahme

Die Grundfutteraufnahme während der Trächtigkeit und während der Frühlaktation gilt als essenzieller Faktor bei Wiederkäuern, wenn es darum geht, Energiebilanzen zu modellieren. Die tierindividuelle Futteraufnahme zu erfassen ist dabei zumeist nur unter Stationsbedingungen und mit Hilfe aufwendiger und kostspieliger Wiegetrogtechnik und somit auch nur für wenige Tiere möglich. Allerdings konnte ein enger Zusammenhang zwischen der Menge an ausgestoßenem CH_4 bei Wiederkäuern und der Futteraufnahme gezeigt werden (de Haas *et al.*, 2011; Moorby *et al.*, 2015). In Linearen Regressionsmodellen erklärte DMI 85 % der Varianz der CH_4-Produktion (Ramin und Huhtanen, 2013). Lagen darüber hinaus noch Kenntnisse zur genauen Futterzusammensetzung vor (z.B. Anteil der verdaulichen organischen Substanz), so konnte der CH_4-Ertrag (g/kg DMI) zuverlässig vorhergesagt werden (Bell *et al.*, 2016). Die zahlreichen Vorhersagemodelle für den CH_4-Ausstoß über die Futteraufnahme bzw. -zusammensetzung implizieren die Möglichkeit eines deduktiven Vorgehens, um die unbekannte DMI mit Hilfe des gemessenen CH_4-Ausstoßes zu berechnen. Die gebräuchlichste CH_4-Kenngröße in der Literatur ist die CH_4-Produktion in g/Tag. Aus diesem Grund muss vor der Berechnung der Futteraufnahme eine Transformation der mit dem LMD gemessenen CH_4-Konzentrationen (µL/L) erfolgen. In diesem Zusammenhang stellten Chagunda *et al.* (2009b) eine mögliche Gleichung zur Berechnung der CH_4-Produktion aus LMD Daten vor, welche hier zweckdienlich ist. Darüber hinaus wurden auch Konditionsmerkmale wie der BCS mit in Modellierungsansätze zu CH_4 und Futteraufnahme eingeschlossen (Løvendahl *et al.*, 2018). Dies bedeutet in der Zusammenfassung, dass die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Merkmale in der Kombi-

nation für die Vorhersage der schwer messbaren Futteraufnahme von Schafen herangezogen werden können und somit kostengünstig Energiebilanzierungen für Mutterschafe im größeren Umfang auch unter Feldbedingungen möglich sind.

5.5 Internationale Beispiele für Monitoringprogramme bei Mutterschafen hinsichtlich der Mineralstoffversorgung und des Energiestoffwechsels

Die Ergebnisse aus Kapitel 4 unterstreichen die Relevanz der maternalen Mengen- und Spurenelementversorgung sowie die Messung von Stoffwechselindikatoren *prä-* und *postpartum* zur Ermittlung der Energiebilanz von Mutterschafen. **Abbildung 5** fasst die Ergebnisse dieser Teilstudie für Mutterschafe der Rassen ML und RH schematisch zusammen. Es konnte gezeigt werden, dass Mutterschafe der Rassen RH und ML selbst unter identischen Haltungsbedingungen und ohne Anzeichen klinischer Symptome Unterschiede in der Serumkonzentration bestimmter Mineralstoffe sowie bestimmter Stoffwechselindikatoren aufwiesen. Diese Unterschiede zeigten wiederum signifikante Effekte auf die maternale Körperkondition (EBW, BCS, BFT), auf den CH_4-Ausstoß sowie auf LBW. In Ländern, in denen die Schafhaltung einen größeren Stellenwert als in Deutschland einnimmt, sind flächendeckende Gesundheitsmonitoringprogramme bereits etabliert. In Großbritannien beispielsweise empfiehlt der Dairy Herd Health and Productivity Service (DHHPS) der Universität von Edinburgh den Schäfern vor jeder Zuchtsaison (pre-mating profile) sowie vor dem Ablammen (pre-lambing profile) routinemäßige Blutprofile ihrer Schafe anfertigen zu lassen, um sicherzustellen, dass i) die Tiere über eine optimale Körperkondition sowie Mengen- und Spurenelementversorgung für die Decksaison verfügen und, ii) einem erhöhten Risiko für eine negative Energiebilanz frühzeitig entgegengewirkt werden kann, noch bevor es zu einer klinischen Manifestation (Gestationsketose, mangelhafte Kolostrumsynthese) kommt (DHHPS, 2020).



Legende: TK – Trächtigkeit; BHB – ß-Hydroxybutyrat; Ca – Calcium; EBW – Mutterschafgewicht; CH_4 – Methan; NEFA – nicht veresterte freie Fettsäuren; Zn – Zink; Mg – Magnesium; LBW – Lammgewicht; Cu – Kupfer; BCS – Body Condition Score; BFT – Rückenfettdicke; Se – Selen

Abbildung 5. Schematische Darstellung der phänotypischen Ergebnisse aus Kapitel 4 für die Rassen a) Merinolandschaf und b) Rhönschaf. Einflüsse der Serumkonzentration verschiedener Mineralstoffe und Stoffwechselindikatoren auf maternale Körperkonditionsmerkmale und das Lammgewicht zu Beginn der Trächtigkeit, zur Geburt, drei Wochen *postpartum* und zum Absetzen.

Ist ein Schäfer Mitglied im DHHPS, so reduzieren sich für ihn die Kosten der genannten Blutanalysen, was umgekehrt die Attraktivität einer Teilnahme an einem solchen Programm auf Seiten der Schäfer steigern dürfte. Durch solche Programme ist es also möglich Gesundheitsdaten im großen Umfang zu generieren und diese gegebenenfalls auch tierzüchterisch zu nutzen. Im Rahmen des genannten Monitoringprogramms in Großbritannien erwiesen sich, vergleichbar zu den Ergebnissen aus Kapitel 4, die Parameter BHB, Mg, Se und Cu als besonders relevant für die Lammproduktion. Auch der DHHPS betont die Wichtigkeit einer bedarfsgerechten Se Versorgung im Hinblick auf die embryonale Gesundheit sowie die maternale Produktivität. In der vorliegenden Arbeit war eine Se Konzentration >2,4 µmol/L zusätzlich mit dem höchsten BCS bei

RH verbunden, was ein zusätzlicher Anreiz für die routinemäßige Kontrolle dieses Parameters darstellt. Ebenso betont der DHHPS die Bedeutung von Cu für die Ausbildung des embryonalen Nervensystems, für gute Wachstumsraten und ein belastbares Immunsystem. Auch die Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit zeigten bei ML und RH, dass sich ein routinemäßiges Cu Monitoring positiv auf BCS und BFT auswirkte. Der Stoffwechselindikator BHB eignet sich für die Ketoseprophylaxe (DHHPS, 2020) und die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigten, dass eine Verhinderung erhöhter BHB Konzentrationen im Blut gleichzeitig ermöglichte, erhöhte Energieverluste in Form von CH_4 zu reduzieren. Darüber hinaus wird Mg als Indikator für die physiologische Muskelfunktion und als wichtiger Cofaktor im Ca Stoffwechsel in die Blutprofile vom DHHPS miteingeschlossen. Auch eine Steigerung des Absetzgewichts der Lämmer durch eine erhöhte Mg Konzentration im Blut des Mutterschafs ist möglich, wie den Ergebnissen aus Kapitel 4 zu entnehmen ist. Über die Durchführung der Blutprofilanalysen hinaus, werden ergänzend auch die Fütterungsbedingungen sowie die Körpergewichte der untersuchten Tiere vom DHHPS erfasst und für die Interpretation der Blutergebnisse herangezogen. Dies unterstreicht die dargestellten Effekte zwischen den genannten Blutparametern und der maternalen Energiebilanz aus Kapitel 4.

In Neuseeland finden Monitoringprogramme bezüglich der Mineralstoffversorgung von Schafen bereits seit einigen Jahren routinemäßig statt (Ellison, 2002). Von Landwirten geführte Branchenorganisationen wie Beef + Lamb New Zealand Ltd. unterstützen und bestärken die neuseeländischen Schäfer darin solche Monitoringprogramme durchzuführen, um ihre Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit zu steigern (Beef + Lamb New Zealand Ltd., 2013). So konnten beispielsweise Farmen, die stark von Se Mangelerscheinungen betroffen waren, durch die Etablierung einer Se Supplementierung vor der Decksaison ihre Ablammraten von 25 auf 90 % steigern und die Anzahl Mutterschafe mit zu geringer Milchleistung für die Lämmeraufzucht reduzieren (Ellison, 2002). In Deutschland gibt es zwar Überwachungsprogramme für meldepflichtige Tierkrankheiten bzw. anzeigepflichtige Tierseuchen wie Maedi/Visna oder die Blauzungenkrankheit, aber es fehlt an einer deutschlandweiten Vernetzung zwischen Tierhaltern, Tierärzten und Tierzuchtvereinigungen, um einen großen Gesundheitsdatenpool für Schafe zu generieren. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, welch großes Potential

in der Etablierung von Monitoringprogrammen und einer Nutzung der neugewonnenen Informationen steckt, um Gesundheitsmerkmale langfristig in Zuchtprogramme zu integrieren und so die Gesundheit, Effizienz und Produktivität von Mutterschafen zu steigern und die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Schäfer zu verbessern.

5.6 Herausforderungen bezüglich der Phänotypisierung von Gesundheitsmerkmalen

Die genetisch determinierte Varianz von Gesundheitsmerkmalen rückt immer mehr in den Fokus der Tierzüchter, da einerseits gesunde Tiere weniger Kosten für den Landwirt bedeuten und andererseits die Ansprüche des Verbrauchers hinsichtlich einer tierwohlgerechten Produktion tierischer Lebensmittel wachsen. Die Ergebnisse aus Kapitel 4 zeigten anhand von Merkmalen der maternalen Mineralstoffversorgung und der Stoffwechselindikatoren BHB und NEFA, dass die Gesundheit des Mutterschafes sich ebenfalls auf die Entwicklung der Lämmer *prä*- und *postnatum* auswirkt. Dabei zeigte keines der Mutterschafe, die im Rahmen dieser Teilstudie betrachtet wurden, zu irgendeinem Zeitpunkt klinische Symptome, welche auf Unterschiede bzw. auf eine Über- oder Unterversorgung an Mineralstoffen im Blut hätten hindeuten können. Dies veranschaulicht die Problematik bei der Phänotypisierung solcher Merkmale. Die Erfassung von Gesundheitsmerkmalen ist häufig komplex sowie mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden und nicht in jedem Fall in praxi auch für den Landwirt durchführbar, wie z.B. eine Blutprobenentnahme. Gleichzeitig ist es aber notwendig eine möglichst große Anzahl Individuen zu phänotypisieren, um in der Folge eine verlässliche Schätzung genetischer Parameter für diese Merkmale durchführen zu können (Neuenschwander *et al.*, 2012). Gerade in der Schafzucht bedeutet aber die stetig abnehmende Schafpopulation in Ländern wie Deutschland eine gleichzeitige Abnahme des theoretisch zur Verfügung stehenden Referenzdatensatzes. Auch zu seltenen bzw. regionalen Schafrassen wie dem CF liegt kaum Datenmaterial für genetische Analysen vor. Eine Möglichkeit, um die Referenzpopulation zu erweitern, wäre z.B. eine länderübergreifende Betrachtung derselben Rasse, doch auch hier spielen

Aspekte wie das Geschlechterverhältnis oder die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen den Populationen eine entscheidende Rolle (Schöpke und Swalve, 2016).

In bisherigen Studien zum Rind wiesen Gesundheitsmerkmale zumeist niedrige bis moderate Heritabilitäten auf (Koeck *et al.*, 2010; Tsiamadis *et al.*, 2016), weshalb Selektionserfolge häufig nicht kurzfristig zu erreichen sind. Von Vorteil diesbezüglich erwiesen sich binär verteilte Gesundheitsmerkmale im Vergleich zu Indikatormerkmalen (wie z.B. der somatischen Zellzahl in der Milch) vorausgesetzt, dass der Datenumfang sowie die Datenqualität ausreichend waren (Gernand und König, 2014). Vollblut als Testmedium hat zwar den Nachteil, dass eine Entnahme durch den Landwirt selbst nicht erfolgen kann, jedoch ist der mögliche Informationsgewinn mit Hilfe einer einzigen Blutprobe (in Abhängigkeit von z.B. der Entnahmetechnik und dem verwendeten Medium) so groß wie er durch Probematerialien (z.B. Haare, Urin) nicht oder nur selten erreicht werden kann. Darüber hinaus sind Veränderungen von Parametern zur Mineralstoffversorgung oder dem Energiestoffwechsel, wie sie in Kapitel 4 aufgegriffen wurden, im Blut sehr schnell erkennbar. Zusätzlich lassen sich im Blut auch gleichzeitig Informationen hinsichtlich der Fütterung (DHHPS, 2020), vorhandener Antikörper (Abd El-Razik *et al.*, 2018) oder genomischer Analysen (Nagdy *et al.*, 2018) ablesen. Die Erforschung alternativer Probematerialien mit einem ähnlich umfangreichen Informationsgehalt bei gleichzeitig leichterer und weniger invasiver Gewinnung wird dennoch auch tierschutzrechtlich immer interessanter. So zeigten brasilianische Studien, dass sich auch Cerumen aus den Ohren von Mutterschafen zur Analyse des Stoffwechselstatus *prä*- und *postpartum* eignet (Shokry *et al.*, 2017).

Die Daten, welche in dieser Arbeit bei klinisch gesunden Tieren untersucht wurden, waren nicht für jeden Blutparameter normalverteilt, da die Anzahl der Tiere mit Blutparametern im Referenzbereich erwartungsgemäß überwog. Dieses Problem einer rechtsschiefen Verteilung von Gesundheitsmerkmalen ist bekannt (Nødtvedt *et al.*, 2002; Mucha *et al.*, 2015; May *et al.*, 2017). Dennoch zeigten May *et al.* (2017), dass es durch eine Transformation nicht-normalverteilter Gesundheitsmerkmale nicht in jedem Fall auch zu Veränderungen in den geschätzten Heritabilitäten kam.

Zusammenfassend lässt sich für die Phänotypisierung von Gesundheitsmerkmalen festhalten, dass Merkmale wie sie z.B. in der vorliegenden Arbeit erfasst wurden, wichtige Erkenntnisse liefern, um eine moderne, auf die Tiergesundheit fokussierte Tierzucht voranzubringen. Um möglichst große Datenmengen zu generieren, ist eine leichte, zuverlässige und kostengünstige Merkmalserfassung im Stall und durch den Landwirt selbst von Vorteil. In diesem Zusammenhang eignen sich binär verteilte Merkmale. Bei komplexeren Merkmalen mit einer hohen Variabilität klinischer Ausprägungen kann es allerdings zu Ungenauigkeiten in der Phänotypisierung kommen. Detaillierte und standardisierte Diagnoseschlüssel ermöglichen in diesem Zusammenhang eine vereinfachte und vergleichbare Phänotypisierung von Gesundheitsmerkmalen. So gibt es für Rinder beispielsweise den Zentralen Tiergesundheitsschlüssel, welcher von Prof. Dr. Staufenbiel entwickelt wurde, um solche komplexen Phänotypen genauer zu beschreiben. Dieser Diagnoseschlüssel kann aber nur begrenzt auch für Schafe herangezogen werden. Das International Committee for Animal Recording (ICAR) hat 2018 einheitliche Definitionen und Richtlinien für die Erfassung von Merkmalen der Eutermorphologie und -gesundheit bei Schafen veröffentlicht (ICAR, 2018). Über die Datenerfassung hinaus bleibt auch die Merkmalsverteilung (häufig nicht normalverteilt) in der genetisch-statistischen Auswertung zu berücksichtigen.

5.7 Potential zur Integration von Merkmalen der Energiebilanz in der Schafzucht

Die verbesserte Energiebilanz von Mutterschafen stellt ein interessantes wenn auch komplexes Zuchtziel dar. Eine Integration von Indikatormerkmalen der maternalen Energiebilanz in zukünftige Zuchtprogramme könnte langfristig das betriebsinterne Gesundheitsmanagement verbessern, Futterkosten senken und bei gleichbleibender oder sogar verbesserter Aufzuchtleistung der Lämmer die betrieblichen Einnahmen erhöhen. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass die untersuchten Merkmale züchterisches Potential besitzen, welches in bisherigen Schafzuchtprogrammen unzureichend ausgeschöpft wird. Maternale Körperkonditionsmerkmale wiesen eine

moderate bis hohe Heritabilität (h^2 = 0,25 bis h^2 = 0,56) und positive genetische Korrelationen (r_g = 0,41 bis r_g = 0,78) zu LBW auf. Sie eignen sich somit auch für eine direkte Selektion. Die dargestellten CH_4-Merkmale hingegen zeigten sehr geringe Heritabilitäten, für solche Merkmale ist es sinnvoll Selektionsindices mit einer entsprechend hohen Gewichtung zu konzipieren, um dennoch Selektionserfolge zu erreichen (Neuenschwander *et al.*, 2012). Gleichzeitig lassen sich die Körperkonditions-, CH_4- und Blutmerkmale zu einem Merkmalskomplex für die Energiebilanz zusammenfassen. In diesem Kontext stellten Snowder und van Vleck (2003) Vorteile der Indexselektion für Energieeffizienzmerkmale und Negussie *et al.* (2017) für CH_4-Merkmale fest, um züchterischen Fortschritt zu erlangen. Voraussetzung für die Konzeption eines Selektionsindex ist das Wissen um die phänotypischen und genetischen Korrelationen der Merkmale untereinander und hinsichtlich ökonomisch bedeutender Merkmale wie LBW. Auch ihre Erblichkeit ist ein wichtiger Faktor. Die ökonomische Gewichtung eines Merkmals hängt dann von dem zu erwartenden Gewinn pro Merkmalseinheit (entsprechend einer genetischen Standardabweichung (Rose *et al.*, 2014)) und von Langzeitbeobachtungen des Marktpreises ab. Entstehende Kosten (z.B. für Futter oder Personal) sollten ebenfalls pro Merkmalseinheit berücksichtigt werden. Dabei können ökonomische Gewichte zwischen Rassen und Regionen variieren (Hazel, 1943). Neuere Forschungen nannten in diesem Zusammenhang die Bedeutung der Resilienz auf der Ebene des Tieres (z.B. gute Leistung auch unter restriktiven Fütterungsbedingungen) und auf Ebene eines Betriebs (z.B. Wettbewerbsfähigkeit trotz Preisschwankungen) für die Wahl entsprechender Gewichtungen (Rose *et al.*, 2014). Wie auch in Kapitel 2 dieser Arbeit ersichtlich wurde, weichen die geschätzten genetischen Parameter für Tiere unterschiedlicher Produktionssysteme deutlich voneinander ab und so müssen neue Selektionsindices für verschiedene Systeme getestet werden und sich als geeignetes Selektionsinstrument in einer Vielzahl an Haltungsbedingungen erweisen, wenn eine breite Anwendung angestrebt wird (Conington *et al.*, 2001).

Eine weitere Möglichkeit für die Etablierung des Merkmalskomplexes „Energiebilanz“ wäre die genomische Selektion. Die Vorteile dieser Methode sind eine Verkürzung des Generationsintervalls und somit eine frühzeitige Selektionsentscheidung (König *et al.*,

2009). Außerdem zeigten Harder *et al.* (2020), dass eine verlässliche Zuchtwertschätzung für die schwer zu erfassenden Merkmale DMI und Energiebilanz auch für genotypisierte Tiere ohne phänotypische Beobachtungen möglich ist. Zu diesem Zweck wurde die single-step Methode verwendet, welche genomische, phänotypische und Pedigreeinformationen gleichzeitig miteinander kombiniert. Im Milchviehsektor ist die genomische Selektion bereits weltweit etabliert und zeigt gute Erfolge (Hayes *et al.*, 2013). Darüber hinaus ermöglichen Genom- und Metabolomanalysen die Möglichkeit neue Erkenntnisse hinsichtlich des Zusammenspiels von Fütterung, Haltung und Leistung bei Schafen zu gewinnen (Osorio *et al.*, 2017). Mit Hilfe von GWAS konnten Genregionen bei Milchrindern identifiziert werden, die mit dem Milchmineralstoffgehalt, mit der individuellen Futteraufnahme, dem Körpergewicht und dem CH_4-Ausstoß assoziiert waren (Buitenhuis *et al.*, 2015; Manzanilla-Pech *et al.*, 2016). Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Anzahl der genotypisierten Schafe in Deutschland leider sehr gering (abgesehen von der Prionprotein-genotypisierung für die Scrapie-Resistenz) und eine Referenzpopulation für eine genomische Selektion sollte wenigstens 2000 Individuen umfassen (Shumbusho *et al.*, 2013). Durch routinemäßige Untersuchungen zu Indikatormerkmalen der Energiebilanz bei verschiedenen Rassen und in unterschiedlichen Haltungsumwelten und durch die Verbesserung einer deutschlandweiten Kooperation zwischen Schäfern, Tierärzten und Tierzuchtvereinigungen, wäre die Etablierung eines solchen Merkmalskomplexes aber möglich.

Referenzen

Abd El-Razik KA, Barakat AMA, Hussein HA, Younes AM, Elfadaly HA, Eldebaky HA und Soliman YA 2018. Seroprevalence, isolation, molecular detection and genetic diversity of Toxoplasma gondii from small ruminants in Egypt. Journal of Parasitic Diseases 42, 527–536. doi:10.1007/s12639-018-1029-4.

Akaike H 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood Principle. In: BN Petrov und F Csaki (Hg.): Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory. Akademiai Kiado. Budapest. S. 267–281.

Aksoy Y, Ulutaş Z, Şen U, Şirin E und Şahin A 2016. Estimates of genetic parameters for different body weights andmuscle and fat depths of Karayaka lambs. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences 40, 13–20. doi:10.3906/vet-1504-16.

Ali TE und Schaeffer LR 1987. Accounting for covariances among test day milk yields in dairy cows. Canadian Journal of Animal Science 67, 637–644. doi:10.4141/cjas87-067.

Baker SK 1999. Rumen methanogens, and inhibition of methanogenesis. Australian Journal of Agricultural Research 50, 1293–1298. doi:10.1071/AR99005.

Bastin C, Loker S, Gengler N, Sewalem A und Miglior F 2010. Genetic relationships between body condition score and reproduction traits in Canadian Holstein and Ayrshire first-parity cows. Journal of Dairy Science 93, 2215–2228. doi:10.3168/jds.2009-2720.

Beef + Lamb New Zealand Ltd. 2020. https://beeflambnz.com/knowledge-hub/PDF/making-every-mating-count. Stand: 18.06.2020.

Belanche A, Yáñez-Ruiz DR, Detheridge AP, Griffith GW, Kingston-Smith AH und Newbold CJ 2019. Maternal versus artificial rearing shapes the rumen microbiome having minor long-term physiological implications. Environmental Microbiology 21, 4360–4377. doi:10.1111/1462-2920.14801.

Bell M, Eckard R, Moate PJ und Yan T 2016. Modelling the Effect of Diet Composition on Enteric Methane Emissions across Sheep, Beef Cattle and Dairy Cows. Animals 6, 54. doi:10.3390/ani6090054.

Berry DP, Buckley F, Dillon P, Evans RD, Rath M und Veerkamp RF 2002. Genetic parameters for level and change of body condition score and body weight in dairy cows. Journal of Dairy Science 85, 2030–2039. doi:10.3168/jds.S0022-0302(02)74280-X.

Borg RC, Notter DR und Kott RW 2009. Genetic analysis of ewe stayability and its association with lamb growth and adult production. Journal of Animal Science 87, 3515–3524. doi:10.2527/jas.2008-1623.

Breves G und Leonhard-Marek S 2010. Funktionen der Vormägen. In: Wolfgang von Engelhardt (Hg.): Physiologie der Haustiere, Aufl. 3. Stuttgart. Enke Verlag. S. 380–389.

Brito LF, McEwan JC, Miller S, Bain W, Lee M, Dodds K, Newman S-A, Pickering N, Schenkel FS und Clarke S 2017. Genetic parameters for various growth, carcass and meat quality traits in a New Zealand sheep population. Small Ruminant Research 154, 81–91. doi:10.1016/j.smallrumres.2017.07.011.

Buitenhuis B, Poulsen NA, Larsen LB und Sehested J 2015. Estimation of genetic parameters and detection of quantitative trait loci for minerals in Danish Holstein and Danish Jersey milk. BMC Genetics 16, 52. doi:10.1186/s12863-015-0209-9.

Buttchereit N, Stamer E, Junge W und Thaller G 2010. Evaluation of five lactation curve models fitted for fat:protein ratio of milk and daily energy balance. Journal of Dairy Science 93, 1702–1712. doi:10.3168/jds.2009-2198.

Carberry CA, Kenny DA, Han S, McCabe MS und Waters SM 2012. Effect of phenotypic residual feed intake and dietary forage content on the rumen microbial community of beef cattle. Applied and Environmental Microbiology 78, 4949–4958. doi:10.1128/AEM.07759-11.

Carter RC, Carman GM, McClaugherty FS und Haydon PS 1971a. Genotype-environment interaction in sheep. I. Ewe productivity. Journal of Animal Science 33, 556–562. doi:10.2527/jas1971.333556x.

Carter RC, Carman GM, McClaugherty FS und Haydon PS 1971b. Genotype-environment interaction in sheep. II. Lamb performance traits. Journal of Animal Science 33, 732–735. doi:10.2527/jas1971.334732x.

Chagunda MGG, Römer DAM und Roberts DJ 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, 323–332. doi:10.1016/j.livsci.2008.09.020.

Chagunda MGG, Ross D und Roberts DJ 2009b. On the use of a laser methane detector in dairy cows. Computers and Electronics in Agriculture 68, 157–160. doi:10.1016/j.compag.2009.05.008.

Conington J, Bishop SC, Grundy B, Waterhouse A und Simm G 2001. Multi-trait selection indexes for sustainable UK hill sheep production. Animal Science 73, 413–423. doi:10.1017/S1357729800058380.

Cranston LM, Kenyon PR, Corner-Thomas RA und Morris ST 2017. The potential interaction between ewe body condition score and nutrition during very late pregnancy and lactation on the performance of twin-bearing ewes and their lambs. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences 30, 1270–1277. doi:10.5713/ajas.16.0641.

de Haas Y, Windig JJ, Calus MPL, Dijkstra J, Haan Md, Bannink A und Veerkamp RF 2011. Genetic parameters for predicted methane production and potential for reducing enteric emissions through genomic selection. Journal of Dairy Science 94, 6122–6134. doi:10.3168/jds.2011-4439.

de Jong G und Bijma P 2002. Selection and phenotypic plasticity in evolutionary biology and animal breeding. Livestock Production Science 78, 195–214. doi:10.1016/S0301-6226(02)00096-9.

DHHPS, Dairy Herd, Health and Productivity Service 2020. https://www.ed.ac.uk/files/imports/fileManager/DHHPS%20sheep%20MP%20leaflet%20aw.pdf. Stand: 13.06.2020.

Douglas J-L, Worgan HJ, Easton GL, Poret L, Wolf BT, Edwards A, Davies E, Ross D und McEwan NR 2016. Microbial diversity in the digestive tract of two different breeds of sheep. Journal of Applied Microbiology 120, 1382–1389. doi:10.1111/jam.13060.

Ellison MJ, Conant GC, Lamberson WR, Austin KJ, van Kirk E, Cunningham HC, Rule DC und Cammack KM 2019. Predicting residual feed intake status using rumen microbial profiles in ewe lambs. Journal of Animal Science 97, 2878–2888. doi:10.1093/jas/skz170.

Ellison MJ, Conant GC, Lamberson WR, Cockrum RR, Austin KJ, Rule DC und Cammack KM 2017. Diet and feed efficiency status affect rumen microbial profiles of sheep. Small Ruminant Research 156, 12–19. doi:10.1016/j.smallrumres.2017.08.009.

Ellison RS 2002. Major trace elements limiting livestock performance in New Zealand. New Zealand Veterinary Journal 50, 35–40. doi:10.1080/00480169.2002.36264.

Frutos P, Mantecón AR und Giráldez FJ 1997. Relationship of body condition score and live weight with body composition in mature Churra ewes. Animal Science 64, 447–452. doi:10.1017/S1357729800016052.

Gernand E und König S 2014. Random regression test-day model for clinical mastitis: genetic parameters, model comparison, and correlations with indicator traits. Journal of Dairy Science 97, 3953–3963. doi:10.3168/jds.2013-7830.

Gernand E, Wassmuth R, Lenz H, Borstel UU von, Gauly M und König S 2008. Impact of energy supply of ewes on genetic parameters for fertility and carcass traits in Merino Long Wool sheep. Small Ruminant Research 75, 80–89. doi:10.1016/j.smallrumres.2007.09.004.

Guo Z und Swalve HH 1995. Modelling of the lactation curve as a sub-model in the evaluation of test day records. Proc. Interbull Mtg. Prague, International Bull Evaluation Service, Uppsala, Sweden. Interbull 11, 22–25.

Harder I, Stamer E, Junge W und Thaller G 2020. Estimation of genetic parameters and breeding values for feed intake and energy balance using pedigree relationships or single-step genomic evaluation in Holstein Friesian cows. Journal of Dairy Science 103, 2498–2513. doi:10.3168/jds.2019-16855.

Hay EH und Roberts A 2019. Genomic evaluation of genotype by prenatal nutritional environment interaction for maternal traits in a composite beef cattle breed. Livestock Science 229, 118–125. doi:10.1016/j.livsci.2019.09.022.

Hayes BJ, Lewin HA und Goddard ME 2013. The future of livestock breeding: genomic selection for efficiency, reduced emissions intensity, and adaptation. Trends in Genetics 29, 206–214. doi:10.1016/j.tig.2012.11.009.

Hazel LN 1943. The Genetic Basis for Constructing Selection Indexes. Genetics 28, 476–490.

ICAR, International Committee for Animal Recording 2018. https://www.icar.org/Guidelines/16-Dairy-Sheep-and-Goats.pdf. Stand: 26.06.2020.

Jobgen WS, Ford SP, Jobgen SC, Feng CP, Hess BW, Nathanielsz PW, Li P und Wu G 2008. Baggs ewes adapt to maternal undernutrition and maintain conceptus growth by maintaining fetal plasma concentrations of amino acids. Journal of Animal Science 86, 820–826. doi:10.2527/jas.2007-0624.

Johnson DE und Ward GM 1996. Estimates of animal methane emissions. Environmental Monitoring and Assessment 42, 133–141. doi:10.1007/BF00394046.

Jonker A, Hickey SM, Rowe SJ, Janssen PH, Shackell GH, Elmes S, Bain WE, Wing J, Greer GJ, Bryson B, MacLean S, Dodds KG, Pinares-Patiño CS, Young EA, Knowler K, Pickering NK und McEwan JC 2018. Genetic parameters of methane emissions determined using portable accumulation chambers in lambs and ewes

grazing pasture and genetic correlations with emissions determined in respiration chambers. Journal of Animal Science 96, 3031–3042. doi:10.1093/jas/sky187.

Kamke J, Kittelmann S, Soni P, Li Y, Tavendale M, Ganesh S, Janssen PH, Shi W, Froula J, Rubin EM und Attwood GT 2016. Rumen metagenome and metatranscriptome analyses of low methane yield sheep reveals a Sharpea-enriched microbiome characterised by lactic acid formation and utilisation. Microbiome 4, 56. doi:10.1186/s40168-016-0201-2.

Kandel PB, Vanrobays M-L, Vanlierde A, Dehareng F, Froidmont E, Gengler N und Soyeurt H 2017. Genetic parameters of mid-infrared methane predictions and their relationships with milk production traits in Holstein cattle. Journal of Dairy Science 100, 5578–5591. doi:10.3168/jds.2016-11954.

Kenyon PR, Maloney SK und Blache D 2014. Review of sheep body condition score in relation to production characteristics. New Zealand Journal of Agricultural Research 57, 38–64. doi:10.1080/00288233.2013.857698.

Koeck A, Egger-Danner C, Fuerst C, Obritzhauser W und Fuerst-Waltl B 2010. Genetic analysis of reproductive disorders and their relationship to fertility and milk yield in Austrian Fleckvieh dual-purpose cows. Journal of Dairy Science 93, 2185–2194. doi:10.3168/jds.2009-2570.

König S, Simianer H und Willam A 2009. Economic evaluation of genomic breeding programs. Journal of Dairy Science 92, 382–391. doi:10.3168/jds.2008-1310.

Lima J, Auffret MD, Stewart RD, Dewhurst RJ, Duthie C-A, Snelling TJ, Walker AW, Freeman TC, Watson M und Roehe R 2019. Identification of Rumen Microbial Genes Involved in Pathways Linked to Appetite, Growth, and Feed Conversion Efficiency in Cattle. Frontiers in Genetics 10, 701. doi:10.3389/fgene.2019.00701.

Løvendahl P, Difford GF, Li B, Chagunda MGG, Huhtanen P, Lidauer MH, Lassen J und Lund P 2018. Review: Selecting for improved feed efficiency and reduced methane emissions in dairy cattle. Animal 12, 336–349. doi:10.1017/S1751731118002276.

Manzanilla-Pech CIV, de Haas Y, Hayes BJ, Veerkamp RF, Khansefid M, Donoghue KA, Arthur PF und Pryce JE 2016. Genomewide association study of methane emissions in Angus beef cattle with validation in dairy cattle. Journal of Animal Science 94, 4151–4166. doi:10.2527/jas.2016-0431.

Matheson SM, Bünger L und Dwyer CM 2012. Genetic parameters for fitness and neonatal behavior traits in sheep. Behavior Genetics 42, 899–911. doi:10.1007/s10519-012-9562-x.

May K, Brügemann K, Yin T, Scheper C, Strube C und König S 2017. Genetic line comparisons and genetic parameters for endoparasite infections and test-day milk production traits. Journal of Dairy Science 100, 7330–7344. doi:10.3168/jds.2017-12901.

McCann JC, Wiley LM, Forbes TD, Rouquette FM und Tedeschi LO 2014. Relationship between the rumen microbiome and residual feed intake-efficiency of Brahman bulls stocked on bermudagrass pastures. PLoS ONE 9, e91864. doi:10.1371/journal.pone.0091864.

McLaren A, Lambe NR, Morgan-Davies C, Mrode R, Brotherstone S, Conington J, Morgan-Davies J und Bunger L 2014. Characterisation of terminal sire sheep farm systems, based on a range of environmental factors: a case study in the context of genotype by environment interactions using Charollais lambs. Animal 8, 867–876. doi:10.1017/S175173111400072X.

Moorby JM, Fleming HR, Theobald VJ und Fraser MD 2015. Can live weight be used as a proxy for enteric methane emissions from pasture-fed sheep? Scientific Reports 5, 17915. doi:10.1038/srep17915.

Mucha S, Bunger L und Conington J 2015. Genome-wide association study of footrot in Texel sheep. Genetics, Selection, Evolution 47, 35. doi:10.1186/s12711-015-0119-3.

Mullins CR, Mamedova LK, Carpenter AJ, Ying Y, Allen MS, Yoon I und Bradford BJ 2013. Analysis of rumen microbial populations in lactating dairy cattle fed diets varying in carbohydrate profiles and Saccharomyces cerevisiae fermentation product. Journal of Dairy Science 96, 5872–5881. doi:10.3168/jds.2013-6775.

Nagdy H, Mahmoud KGM, Kandiel MMM, Helmy NA, Ibrahim SS, Nawito MF und Othman OE 2018. PCR-RFLP of bone morphogenetic protein 15 (BMP15/FecX) gene as a candidate for prolificacy in sheep. International Journal of Veterinary Science and Medicine 6, S68-S72. doi:10.1016/j.ijvsm.2018.01.001.

Negussie E, de Haas Y, Dehareng F, Dewhurst RJ, Dijkstra J, Gengler N, Morgavi DP, Soyeurt H, van Gastelen S, Yan T und Biscarini F 2017. 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, 2433–2453. doi:10.3168/jds.2016-12030.

Neuenschwander TF-O, Miglior F, Jamrozik J, Berke O, Kelton DF und Schaeffer LR 2012. Genetic parameters for producer-recorded health data in Canadian Holstein cattle. Animal 6, 571–578. doi:10.1017/S1751731111002059.

Nobre PRC, Misztal I, Tsuruta S, Bertrand JK, Silva LOC und Lopes PS 2003. Genetic evaluation of growth in Nellore cattle by multiple-trait and random regression models. Journal of Animal Science 81, 927–932. doi:10.2527/2003.814927x.

Nødtvedt A, Dohoo I, Sanchez J, Conboy G, DesCĵteaux L, Keefe G, Leslie K und Campbell J 2002. The use of negative binomial modelling in a longitudinal study of gastrointestinal parasite burdens in Canadian dairy cows. Canadian Journal of Veterinary Research 66, 249–257.

Osorio JS, Vailati-Riboni M, Palladino A, Luo J und Loor JJ 2017. Application of nutrigenomics in small ruminants. Lactation, growth, and beyond. Small Ruminant Research 154, 29–44. doi:10.1016/j.smallrumres.2017.06.021.

Paganoni B, Rose G, Macleay C, Jones C, Brown DJ, Kearney G, Ferguson M und Thompson AN 2017. More feed efficient sheep produce less methane and carbon

dioxide when eating high-quality pellets. Journal of Animal Science 95, 3839–3850. doi:10.2527/jas2017.1499.

Pankey CL, Walton MW, Odhiambo JF, Smith AM, Ghnenis AB, Nathanielsz PW und Ford SP 2017. Intergenerational impact of maternal overnutrition and obesity throughout pregnancy in sheep on metabolic syndrome in grandsons and granddaughters. Domestic Animal Endocrinology 60, 67–74. doi:10.1016/j.domaniend.2017.04.002.

Peel RK, Eckerle GJ und Anthony RV 2012. Effects of overfeeding naturally-mated adolescent ewes on maternal, fetal, and postnatal lamb growth. Journal of Animal Science 90, 3698–3708. doi:10.2527/jas.2012-5140.

Pickering NK, Chagunda MGG, Banos G, Mrode R, McEwan JC und Wall E 2015. Genetic parameters for predicted methane production and laser methane detector measurements. Journal of Animal Science 93, 11–20. doi:10.2527/jas.2014-8302.

Pinares-Patiño CS, Hickey SM, Young EA, Dodds KG, MacLean S, Molano G, Sandoval E, Kjestrup H, Harland R, Hunt C, Pickering NK und McEwan JC 2013. Heritability estimates of methane emissions from sheep. Animal 7, 316–321. doi:10.1017/S1751731113000864.

Ptáček M, Ducháček J, Stádník L und Beran J 2014. Mutual relationships among body condition score, live weight, and back tissue development in meat sheep. Acta Veterinaria Brno 83, 341–346. doi:10.2754/avb201483040341.

Ramin M und Huhtanen P 2013. Development of equations for predicting methane emissions from ruminants. Journal of Dairy Science 96, 2476–2493. doi:10.3168/jds.2012-6095.

Reintke J, Brügemann K, Yin T, Engel P, Wagner H, Wehrend A und König S 2020. Assessment of methane emission traits in ewes using a laser methane detector: genetic parameters and impact on lamb weaning performance. Archives Animal Breeding 63, 113–123. doi:10.5194/aab-63-113-2020.

Robertson A 1959. The Sampling Variance of the Genetic Correlation Coefficient. Biometrics 15, 469–485. doi:10.2307/2527750.

Roehe R, Dewhurst RJ, Duthie C-A, Rooke JA, McKain N, Ross DW, Hyslop JJ, Waterhouse A, Freeman TC, Watson M und Wallace RJ 2016. Bovine Host Genetic Variation Influences Rumen Microbial Methane Production with Best Selection Criterion for Low Methane Emitting and Efficiently Feed Converting Hosts Based on Metagenomic Gene Abundance. PLoS Genetics 12, e1005846. doi:10.1371/journal.pgen.1005846.

Rose G, Mulder HA, Thompson AN, van der Werf JHJ und van Arendonk JAM 2014. Varying pasture growth and commodity prices change the value of traits in sheep breeding objectives. Agricultural Systems 131, 94–104. doi:10.1016/j.agsy.2014.08.007.

Scheffer M, Bolhuis JE, Borsboom D, Buchman TG, Gijzel SMW, Goulson D, Kammenga JE, Kemp B, van de Leemput IA, Levin S, Martin CM, Melis RJF, van Nes EH, Romero LM und Olde Rikkert MGM 2018. Quantifying resilience of humans and other animals. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 115, 11883–11890. doi:10.1073/pnas.1810630115.

Schöpke K und Swalve HH 2016. Review: Opportunities and challenges for small populations of dairy cattle in the era of genomics. Animal 10, 1050–1060. doi:10.1017/S1751731116000410.

Shackell GH, Cullen NG und Greer GJ 2011. Genetic parameters associated with adult ewe liveweight and body condition. Proceeding of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics 19, 103–106.

Shi W, Moon CD, Leahy SC, Kang D, Froula J, Kittelmann S, Fan C, Deutsch S, Gagic D, Seedorf H, Kelly WJ, Atua R, Sang C, Soni P, Li D, Pinares-Patiño CS, McEwan JC, Janssen PH, Chen F, Visel A, Wang Z, Attwood GT und Rubin EM 2014. Methane yield phenotypes linked to differential gene expression in the sheep rumen microbiome. Genome Research 24, 1517–1525. doi:10.1101/gr.168245.113.

Shokry E, Pereira J, Marques Júnior JG, da Cunha PHJ, Noronha Filho ADF, da Silva JA, Fioravanti MCS, Oliveira AE de, Antoniosi Filho NR und Sheweita SA 2017. Earwax metabolomics. An innovative pilot metabolic profiling study for assessing

metabolic changes in ewes during periparturition period. PLoS ONE 12, e0183538. doi:10.1371/journal.pone.0183538.

Shumbusho F, Raoul J, Astruc JM, Palhiere I und Elsen JM 2013. Potential benefits of genomic selection on genetic gain of small ruminant breeding programs. Journal of Animal Science 91, 3644–3657. doi:10.2527/jas.2012-6205.

Snowder GD, Knight AD, van Vleck LD, Bromley CM und Kellom TR 2001. Usefulness of subjective ovine milk scores: I. Associations with range ewe characteristics and lamb production. Journal of Animal Science 79, 811–818. doi:10.2527/2001.794811x

Snowder GD und van Vleck LD 2003. Estimates of genetic parameters and selection strategies to improve the economic efficiency of postweaning growth in lambs. Journal of Animal Science 81, 2704–2713. doi:10.2527/2003.81112704x.

Tsiamadis V, Banos G, Panousis N, Kritsepi-Konstantinou M, Arsenos G und Valergakis GE 2016. Genetic parameters of subclinical macromineral disorders and major clinical diseases in postparturient Holstein cows. Journal of Dairy Science 99, 8901–8914. doi:10.3168/jds.2015-10789.

Vatankhah M, Talebi MA und Zamani F 2012. Relationship between ewe body condition score (BCS) at mating and reproductive and productive traits in Lori-Bakhtiari sheep. Small Ruminant Research 106, 105–109. doi:10.1016/j.smallrumres.2012.02.004.

Wallace RJ, Sasson G, Garnsworthy PC, Tapio I, Gregson E, Bani P, Huhtanen P, Bayat AR, Strozzi F, Biscarini F, Snelling TJ, Saunders N, Potterton SL, Craigon J, Minuti A, Trevisi E, Callegari ML, Cappelli FP, Cabezas-Garcia EH, Vilkki J, Pinares-Patino C, Fliegerová KO, Mrázek J, Sechovcová H, Kopečný J, Bonin A, Boyer F, Taberlet P, Kokou F, Halperin E, Williams JL, Shingfield KJ und Mizrahi I 2019. A heritable subset of the core rumen microbiome dictates dairy cow productivity and emissions. Science Advances 5, eaav8391. doi:10.1126/sciadv.aav8391.

Wolc A, Barczak E, Wójtowski J, Ślósarz P und Szwaczkowski T 2011. Genetic parameters of body weight in sheep estimated via random regression and multi-trait

animal models. Small Ruminant Research 100, 15–18. doi:10.1016/j.smallrumres.2011.05.009.

Yin T und König S 2018. Genetic parameters for body weight from birth to calving and associations between weights with test-day, health, and female fertility traits. Journal of Dairy Science 101, 2158–2170. doi:10.3168/jds.2017-13835.

Zetouni L, Kargo M, Norberg E und Lassen J 2018. Genetic correlations between methane production and fertility, health, and body type traits in Danish Holstein cows. Journal of Dairy Science 101, 2273–2280. doi:10.3168/jds.2017-13402.

Zhou M, Hernandez-Sanabria E und Le Guan L 2009. Assessment of the microbial ecology of ruminal methanogens in cattle with different feed efficiencies. Applied and Environmental Microbiology 75, 6524–6533. doi:10.1128/AEM.02815-08.

Zusammenfassung

Die Lammfleischproduktion repräsentiert die wichtigste Einnahmequelle der deutschen Schafhaltung. In diesem Zusammenhang ist die Zeitspanne von dem Beginn der Trächtigkeit bis zum Absetzen der Lämmer besonders entscheidend für eine erfolgreiche Lämmeraufzucht. Die Gesundheit sowie die Gewichtszunahme des Lammes *prä-* und *postnatum* ist dabei eng mit der maternalen Energiebilanz verknüpft. Gleichzeitig stellen Futterkosten den größten Anteil der Fixkosten eines Schäfereibetriebs dar. Eine frühzeitige Selektion von Mutterschafen hinsichtlich ihrer Energiebilanz und eine langfristige Steigerung ihrer Futtereffizienz durch züchterische Maßnahmen können dazu beitragen, die Futterkosten zu senken. Bei einer gleichbleibenden oder sogar verbesserten Aufzuchtleistung der Lämmer, sind darüber hinaus noch gesteigerte Einnahmen über das Lammfleisch möglich.

Der Begriff der Energiebilanz dient zur quantitativen Beurteilung des Energieumsatzes bzw. des Energiezustandes eines Tieres. Um Rückschlüsse auf die Energiebilanz von Mutterschafen *prä-* und *postpartum* ziehen zu können, werden in der vorliegenden Arbeit Merkmale der Körperkondition, des Methanausstoßes, der Mineralstoffversorgung sowie bestimmter Stoffwechselparameter im Blut untersucht. Vor diesem Hintergrund werden auch verschiedene Rassen und Produktionssysteme betrachtet. Bisherige Forschungen fokussierten sich zumeist nur auf einzelne der genannten Merkmale und ließen darüber hinaus die Auswirkungen der maternalen Energiebilanz auf das Lamm außer Acht. Gerade diese generationsübergreifenden Einflüsse wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit sowohl auf phänotypischer als auch auf genetischer Ebene untersucht.

Kapitel 1 beleuchtet zu Beginn die Besonderheiten und Zuchtziele der untersuchten Schafrassen sowie die allgemeine Struktur der Zuchtwertschätzung für Schafe in Deutschland. Im weiteren Verlauf wird auf die Definition der maternalen Energiebilanz im Rahmen dieser Arbeit und auf die wichtigsten zugrundeliegenden Stoffwechselprozesse während der Laktation eingegangen. Eine Besonderheit der Verdauungsphysiologie bei Wiederkäuern bildet die Methanproduktion. Da es sich bei Methan um ein

potentes Treibhausgas handelt, ist die Reduktion der Methanproduktion von Nutztieren vornehmlich aus Gründen des Klimaschutzes interessant. Darüber hinaus zeigte sich allerdings auch eine enge Verknüpfung zwischen der Menge an produziertem Methan und dem Energiestoffwechsel eines Tieres, weshalb die Analyse des Methanausstoßes von Mutterschafen ebenfalls einen wichtigen Aspekt dieser Arbeit darstellt. In diesem einleitenden Kapitel werden daher die aktuell genutzten Messverfahren zur Bestimmung des enteralen Methanausstoßes bei Schafen beschrieben und die bisherige Nutzung von Methanmerkmalen in der Zucht bei Schaf und Rind erläutert. Des Weiteren werden die untersuchten Körperkonditionsmerkmale und die dazugehörigen Erfassungsmethoden sowie die Relevanz dieser Merkmale für die Zucht zusammengefasst. Als Grundlage für die dritte Teilstudie dieser Arbeit zum Einfluss der Mengen- und Spurenelementversorgung bzw. des Stoffwechselstatus von Mutterschafen auf die Energiebilanz und die Lammgewichtsentwicklung, werden im weiteren Verlauf des ersten Kapitels ebenfalls die dafür untersuchten Blutparameter und ihre klinische Bedeutung erläutert.

Kapitel 2 befasst sich mit dem phänotypischen Einfluss der maternalen Körperkonditionsparameter Mutterschafgewicht, Body Condition Score und Rückenfett- und Rückenmuskeldicke auf die Lammgewichtsentwicklung im *postpartalen* Zeitraum. Im Rahmen der dargestellten Teilstudie werden die Rassen Merinolandschaf und Rhönschaf unter high input Bedingungen (>33 % Kraftfutter in der Ration) im Vergleich zu den Rassen Coburger Fuchsschaf, Rhönschaf und Kreuzungstiere unter low input Bedingungen (<33 % Kraftfutter in der Ration) untersucht. Es zeigte sich für Mutterschafe des high input Produktionssystems während der Laktation eine Abnahme der Rückenfettdicke bei kontinuierlicher Zunahme des Lammgewichts. Für dieselbe Schafpopulation waren die höchsten Lammgewichte mit einem mittleren Body Condition Score von 3,5 assoziiert. Gleichzeitig war das Körpergewicht von ML Mutterschafen positiv mit dem Geburtsgewicht und dem Absetzgewicht der Lämmer korreliert. Unter low input Bedingungen zeigten Mutterschafe mit einer Rückenfettdicke >3 mm signifikant schwerere Lämmer im Alter von zwölf Wochen mit gleichzeitig höheren täglichen Zunahmen zwischen der neunten und zwölften Lebenswoche. Innerhalb des low input Produktionssystems war ein maternaler BCS zwischen 1,5 und 2,5 mit den höchsten

Lammgewichten assoziiert. Auch die tägliche Gewichtsabnahme der Mutterschafe hatte signifikanten Einfluss auf die Lammgewichtsentwicklung in beiden Produktionssystemen. Die Ergebnisse dieser Teilstudie unterstreichen den differentiellen Einfluss maternaler Körperkonditionsmerkmale auf die Lammgewichtsentwicklung in Abhängigkeit der Rasse und Haltungsumwelt.

Kapitel 3 adressiert die phänotypischen und genetischen Beziehungen zwischen innovativen Methanmerkmalen und der maternalen Körperkondition sowie der Lammgewichtsentwicklung während der Laktation. Dabei wurde die Methankonzentration in der Ausatemluft mit Hilfe von Kurzzeitmessungen via Lasermethandetektor bestimmt. Da sich der enterale Methanausstoß in zwei Fraktionen einteilen lässt (Methanausstoß während der Respiration bzw. während des Ruktus), wurden auch die Methanmerkmale entsprechend dieser Physiologie definiert und separat voneinander untersucht. Da mit dem ausgestoßenen Methan ein nicht unerheblicher Teil der zuvor über die Nahrung aufgenommenen Energie ungenutzt verloren geht, waren die Mutterschafe mit einem vergleichsweise hohen Methanausstoß leichter, hatten eine geringere Rückenfettdicke sowie leichtere Lämmer. Diese phänotypischen Beziehungen zwischen den Methanmerkmalen, der Körperkondition und dem Lammgewicht bestätigten sich ebenfalls in den negativen genetischen Korrelationen. Die geschätzten Heritabilitäten für die Methanmerkmale waren niedrig ($h^2 < 0,1$ bis $h^2 = 0,3$). Die Ergebnisse dieser Teilstudie implizieren, dass sich eine Zucht auf reduzierte Methanemissionen (besonders während des Ruktus) positiv auf die Körperkondition von Mutterschafen und ebenfalls positiv auf die Lammgewichtsentwicklung auswirkt.

In **Kapitel 4** wird untersucht, ob es, trotz identischer Haltungsbedingungen, zu rassespezifischen Unterschieden bezüglich der Blutkonzentration von Mineralstoffen und Stoffwechselindikatoren *prä*- und *postpartum* kommt. Darüber hinaus wird auf phänotypischer Ebene untersucht, inwiefern diese Konzentrationsunterschiede der genannten Blutparameter die Körperkondition, den Methanausstoß sowie die Lammgewichtsentwicklung beeinflussen. Es zeigte sich, dass bei Mutterschafen der Rasse Merinolandschaf eine Magnesiumkonzentration >1 mmol/L zu signifikant höheren Absetzge-

wichten bei den zugehörigen Lämmern führte, im Vergleich zu Lämmern von Mutterschafen, die eine geringere Magnesiumkonzentration im Blut aufwiesen. Darüber hinaus war die Kupferkonzentration bei Merinolandschafen und Rhönschafen positiv mit dem Body Condition Score und der Rückenfettdicke zum Zeitpunkt des Absetzens assoziiert. Bei Rhönschafen war zudem die Selenkonzentration positiv mit dem Body Condition Score verknüpft. Eine erhöhte Zinkkonzentration sowie eine geringe Konzentration an ß-Hydroxybutyrat im Serum führte zu einem reduzierten Methanausstoß während der Respiration und eine erhöhte Calciumkonzentration führte zu einem geringeren Mutterschafgewicht bei Merinolandschafen. Die Ergebnisse dieser Teilstudie zeigen die Wichtigkeit der maternalen Mineralstoffversorgung und des Stoffwechselstatus im Hinblick auf die Körperkondition, den Methanausstoß und die Lammgewichtsentwicklung in Abhängigkeit von der Rasse.

Kapitel 5 nimmt erneut Bezug auf die wichtigsten Erkenntnisse der Teilstudien aus den Kapiteln 2 bis 4 und beschreibt darüber hinaus weitere Möglichkeiten der genetisch-statistischen Modellierung von Energiebilanzmerkmalen vor dem Hintergrund möglicher Genotyp-Umwelt-Interaktionen. Des Weiteren werden den phänotypischen Ergebnissen aus Kapitel 2 die entsprechenden genetischen Ergebnisse (für das high input Produktionssystem) gegenübergestellt. Im weiteren Verlauf werden die Zusammenhänge zwischen dem Methanausstoß und der Energiebilanz unter besonderer Berücksichtigung des Pansenmikrobioms vertieft und beschrieben, inwiefern der gemessene Methanausstoß Rückschlüsse auf die individuelle Futteraufnahme eines Schafes geben kann. Bezugnehmend auf die Ergebnisse der Teilstudie aus Kapitel 4, werden die Herausforderungen bei der Phänotypisierung von Gesundheitsmerkmalen dargelegt. Im letzten Teil dieser übergreifenden Diskussion werden die Potentiale von Indikatormerkmalen der maternalen Energiebilanz für die Schafzucht herausgestellt.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass Merkmale der Körperkondition, des Methanausstoßes sowie die Mineralstoffversorgung und der Stoffwechselstatus von Mutterschafen *prä-* und *postpartum* dazu geeignet sind, Rückschlüsse auf die maternale Energiebilanz zu ziehen. Eine Berücksichtigung der genannten

Merkmale im Rahmen zukünftiger Zuchtprogramme kann die Effizienz von Mutterschafen steigern und somit langfristig Futterkosten senken. Gleichzeitig wird auch die Produktivität der Mutterschafe erhöht, da sich die Selektion auf eine verbesserte Energiebilanz ebenfalls positiv auf die Lammgewichtsentwicklung auswirkt.

Summary

Lamb meat production represents the most important source of income for German sheep farming. In this context, the period from the beginning of pregnancy until weaning is crucial for successful lamb rearing. The *pre*- and *postnatal* health and weight gain of the lamb is closely linked to the maternal energy balance. At the same time, feed costs represent the largest share of the fixed costs of a sheep farm. An early selection of ewes with regard to their energy balance and a long-term increase in feed efficiency through breeding measures can reduce feed costs. If the rearing performance of the corresponding lambs remains the same or even improves, it is possible to achieve higher profits from lamb meat production.

The term energy balance is used to quantitatively assess the energy turnover or the energy status of an animal. In order to draw conclusions about the energy balance of ewes *pre*- and *postpartum*, the present study examines traits regarding body condition, methane emissions, mineral supply and certain metabolic parameters in the blood. Against this background, different breeds and production systems are considered. The combined analysis of all these traits and the simultaneous consideration of the effects of the maternal energy balance on the lamb is an innovative approach of this thesis. It is precisely this intergenerational influence that is to be investigated in the present study, both at the phenotypic and genetic level.

Chapter 1 begins by looking at the special characteristics and breeding objectives of the sheep breeds studied and the general structure of the breeding value estimation for sheep in Germany. In the following, the definition of the maternal energy balance in the context of this thesis and the most important underlying metabolic processes during lactation are discussed. Methane production is a special feature of the digestive physiology of ruminants. Since methane is a potential greenhouse gas, the production of methane from livestock is of interest to society primarily for reasons of climate protection. In addition, however, a close link was found between the amount of methane produced and the energy metabolism of an animal, which is why the analysis of methane emissions from ewes is also an important aspect of this work. This introductory

chapter therefore describes the measurement methods currently used to determine enteral methane emissions in sheep and explains the use of methane traits in breeding to date. In addition, the body condition traits examined and the corresponding recording methods as well as the relevance of these traits for breeding are summarized. As a basis for the third study of this thesis regarding the influence of the mineral supply and the metabolic status of ewes on their energy balance and the lamb weight development, the blood parameters investigated in this respect and their clinical significance are presented in the further course of the first chapter.

Chapter 2 deals with the phenotypic influence of the maternal body condition parameters ewe weight, body condition score and backfat and backmuscle thickness on lamb weight development in the *postpartum* period. Within the framework of the presented study, the breeds Merinoland- and Rhönsheep are examined under high input conditions (>33 % concentrate in the ration) in comparison to the breeds Coburger Fuchssheep, Rhönsheep and crossbreds under low input conditions (<33 % concentrate in the ration). Ewes of the high input production system showed a decrease in backfat thickness during lactation with a continuous increase in lamb body weight. For the same sheep population, the highest lamb body weights were associated with a mean body condition score of 3.5. At the same time the body weight of Merinoland-sheep ewes was positively correlated with the lambs' birth weight and weaning weight. Under low input conditions, ewes with a backfat thickness >3 mm showed significantly heavier lambs at 12 weeks of age with simultaneously higher daily gains between the ninth and twelfth week of life. Within the low input production system, a maternal BCS between 1.5 and 2.5 was associated with the highest lamb body weights. The daily weight loss of the ewes also had a significant influence on the lamb body weight development in both production systems. The results of this study underline the differential influence of maternal body condition traits on lamb body weight development depending on the breed and the production system.

Chapter 3 addresses the phenotypic and genetic influences of innovative methane traits on maternal body condition and lamb body weight development during lactation. The methane concentration in the exhaled air was determined by means of short-term

measurements via laser methane detector. Since enteral methane emission can be divided into two fractions (methane emission during respiration and during eructation), the methane traits were defined according to this physiology and analyzed separately. Since a considerable part of the gross energy intake is lost unused with the methane emitted, the ewes with comparatively high methane emissions were lighter, had a lower backfat thickness and lighter lambs. These phenotypic relationships between methane traits, body condition and lamb body weight were also confirmed on a genetic level by negative genetic correlations. Estimated heritabilities for methane traits were low ($h^2 < 0.1$ to $h^2 = 0.3$). The results of this study imply that breeding for reduced methane emissions (especially during eructation) has a positive effect on the body condition of ewes, and also a positive effect on lamb body weight development.

Chapter 4 examines whether, despite identical husbandry conditions, there are breed-specific differences in the blood concentration of minerals and metabolic indicators *pre-* and *postpartum*. In addition, it is investigated on a phenotypic level to what extent these differences in concentration of these blood parameters influence body condition, methane emissions and lamb body weight development. It was found that in Merinoland sheep ewes, a magnesium concentration >1 mmol/L led to significantly higher weaning weights for the corresponding lambs, compared to lambs from ewes with a lower blood magnesium concentration. In addition, the copper concentration in Merinoland- and Rhönsheep was positively associated with the body condition score and the backfat thickness at weaning. In Rhönsheep the selenium concentration was also positively linked to the body condition score. An increased zinc concentration as well as a low concentration of ß-hydroxybutyrate in the serum led to reduced methane emissions during respiration and an increased calcium concentration led to a lower ewe body weight in Merinolandsheep. The results of this study show the importance of the maternal mineral supply and metabolic status in terms of body condition, methane emissions and lamb body weight development depending on the breed.

Chapter 5 again refers to the most important findings of the studies from chapters 2 to 4 and describes further possibilities of genetic-statistical modelling of energy balance traits in ewes against the background of possible genotype-environment-interactions.

Furthermore, the phenotypic results from chapter 2 are compared with the corresponding genetic results (for the high input production system). In the further course of this chapter, the relationships between methane emissions and the energy balance is examined in greater depth, with particular attention to the ruminal microbiome, and the extent to which the measured methane emissions can provide conclusions about the individual feed intake of a sheep is described. With reference to the results of the study from chapter 4, the challenges in phenotyping health traits are presented. In the final part of this comprehensive discussion, the potential of indicator traits of the maternal energy balance for sheep breeding is highlighted.

In summary, the results of this study show that the body condition, methane emissions, mineral supply and metabolic status of ewes *pre-* and *postpartum* can be used to draw conclusions about the maternal energy balance. The consideration of these traits in future breeding programs can increase the efficiency of ewes and thus reduce feed costs in the long run. At the same time, the productivity of the ewes will be increased since selection for an improved energy balance also has a positive effect on lamb body weight development.

Erklärung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten.

Heuchelheim, den 06.07. 2020 Jessica Reintke

Danksagung

Herrn Prof. Dr. König möchte ich danken für die gute Zusammenarbeit im Rahmen meiner Dissertation. Er ermöglichte es mir meine Arbeit auf nationalen und internationalen Fachtagungen vorzustellen, im Bereich der studentischen Lehre tätig zu sein und meine Ergebnisse in internationalen Fachmagazinen zu publizieren. Er half mir bei der Entwicklung und Umsetzung neuer Ideen und motivierte mich stets Kritik Anderer als Chance zu persönlichem Wachstum zu betrachten und bewies darüber hinaus viel Geduld bei der Korrektur meiner ersten Publikationen. Ich danke ihm für seinen Einsatz bezüglich des Erwerbs eines Stipendiums, welches mir ermöglichte während meiner Zeit am Institut finanziell unabhängiger zu sein. Danke, Herr König, dass ich in den letzten drei Jahren so Vieles lernen durfte und intensiv in die verschiedenen Bereiche des wissenschaftlichen Arbeitens eintauchen konnte und, dass Sie niemals den Glauben an mich verloren haben.

Ich möchte Herrn Prof. Dr. Wehrend danken, dass er mir jederzeit beratend zur Seite stand für sämtliche veterinärmedizinischen Fragen bezüglich meiner Arbeit. Er stellte mir Geräte, Materialien und Räumlichkeiten der Klinik für meine Datenaufnahmen und Laborarbeiten zur Verfügung und gab mir darüber hinaus die Möglichkeit in der studentischen Lehre für den Fachbereich Veterinärmedizin mitzuwirken.

Ich danke beiden Professoren für die fachbereichsübergreifende Kooperation innerhalb dieses Projekts, wodurch es mir möglich war, meinen Horizont über die Veterinärmedizin hinaus auch im Bereich Agrarwissenschaften zu erweitern.

Ich möchte der H. Wilhelm Schaumann Stiftung danken für die finanzielle Unterstützung meiner Doktorarbeit.

Mein Dank gilt Herrn Dr. Henrik Wagner für sein Engagement bezüglich dieses Projekts. Er leistete einen großen Beitrag zur Ausarbeitung der wissenschaftlichen Fragestellungen zu Beginn des Projekts sowie bei der praktischen Umsetzung während der letzten drei Jahre. Er stand mir mit Rat und Tat zur Seite bei der Datenaufnahme im

Stall, stellte den Kontakt zu dem Feldbetrieb her und unterstützte mich bei der Betreuung meiner Versuchstiere. Durch seine praktische Erfahrung als Fachtierarzt für kleine Wiederkäuer waren die Fragestellungen dieser Doktorarbeit praxisorientiert und darauf bedacht die Interessen der Schäfer zu berücksichtigen. Ich bin dankbar, dass er mir den Mut gab mich auf die Herausforderung einer Doktorarbeit einzulassen, als ich es mir selbst am wenigsten zugetraut hätte. Ich danke dir für alles, Henrik!

Ich danke Heike Wagner für ihren unermüdlichen Einsatz im Schafstall. Ob bei eisigen Temperaturen auf dem Oberen Hardthof und mit Heizsohlen in den Stiefeln oder in der prallen Sonne auf dem Feldbetrieb mit nur unzureichendem Sonnenschutzfaktor, Heike, du warst immer an meiner Seite und niemals schlecht gelaunt, egal wie viele Stunden es auch dauerte und egal wie chaotisch die Tage manchmal waren. Danke!

Ein besonderer Dank gilt Stefan Mandler und Anja Henning. Ich danke euch, dass ihr mir so viel beigebracht habt und ich erst durch eure Unterstützung diese Arbeit zu dem machen konnte, was sie heute ist. Durch euch habe ich gelernt, welchen Herausforderungen sich Schäfer Tag für Tag und Jahr für Jahr stellen müssen und wie hart aber gleichzeitig auch schön die Arbeit mit Schafen sein kann. Ich musste erkennen, wie weit die theoretische Versuchsplanung im Büro und die praktische Umsetzbarkeit im Schafstall manchmal auseinander liegen können, aber wie leicht es am Ende doch sein kann, Pläne in die Tat umzusetzen, wenn man Menschen an seiner Seite hat, die alles in ihrer Macht Stehende dafür tun. Vielen Dank für euer Vertrauen in mich und eure Geduld!

Ich danke all meinen lieben Kollegen aus der Arbeitsgruppe für ihre Unterstützung bei der Datenaufnahme und -auswertung, die konstruktive Kritik und gemütlichen Kaffeepausen, die netten Gespräche und lustigen Ausflüge. Ein besonderer Dank an Dr. Kerstin Brügemann und Dr. Tong Yin für ihre Geduld bei der statistischen Auswertung meiner Daten und an Dr. Petra Engel für ihre tatkräftige Unterstützung auf dem Oberen Hardthof. Außerdem einen lieben Dank an Dr. Kathrin Halli und Dr. Dr. Katharina May für die Durchsicht meiner Arbeit.

Ich danke meiner geliebten Familie, meinen Eltern, meiner Oma und meiner Schwester. Ich danke euch, denn ohne eure Unterstützung wäre ich nicht die, die ich heute bin. Ihr habt stets an mich geglaubt und mir mein Leben lang den Rücken freigehalten, habt persönliche Entbehrungen in Kauf genommen, um mir diesen Weg zu ermöglichen. Ihr habt es immer wieder geschafft mich zu motivieren weiter für das zu kämpfen, was ich erreichen möchte und dabei unendlich viel Geduld bewiesen. Ich werde euch auf ewig dankbar sein.

Danke an all meine lieben Freunde besonders Magdalena, Tim und Rafael, die mich schon so lange treu begleiten und mein Leben dadurch so viel reicher, lustiger und auch entspannter machen.

édition scientifique
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

VVB LAUFERSWEILER VERLAG
STAUFENBERGRING 15
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890
redaktion@doktorverlag.de
www.doktorverlag.de

ISBN: 978-3-8359-6896-7

Photo cover: © Lukas Gojda @ stock.adobe.com