

**Untersuchungen zum Einfluss
einer unterschiedlichen Phosphorversorgung
auf die Entwicklung und Mineralisation
verschiedener Knochen wachsender Schweine**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades einer

Doktorin der Veterinärmedizin

– Doctor medicinae veterinariae –

(Dr. med. vet.)

vorgelegt von

Hanna Rieger

Celle

Hannover 2017

Bibliografische Informationen der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie;
Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Auflage 2017

© 2017 by Verlag: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft Service GmbH,
Gießen
Printed in Germany

ISBN 978-3-86345-371-8

Verlag: DVG Service GmbH
Friedrichstraße 17
35392 Gießen
0641/24466
info@dvj.de
www.dvj.de

**Untersuchungen zum Einfluss
einer unterschiedlichen Phosphorversorgung
auf die Entwicklung und Mineralisation
verschiedener Knochen wachsender Schweine**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades einer

Doktorin der Veterinärmedizin

– Doctor medicinae veterinariae –

(Dr. med. vet.)

vorgelegt von

Hanna Rieger

Celle

Hannover 2017

Wissenschaftliche Betreuung:

Prof. Dr. J. Kamphues
Institut für Tierernährung

1. Gutachter:
2. Gutachter

Prof. Dr. J. Kamphues
PD Dr. A. Schnapper

Tag der mündlichen Prüfung:

10. Mai 2017

MEINER MUTTER
in Erinnerung

Teile der vorliegenden Dissertation wurden bereits auf folgenden Tagungen präsentiert:

Tierernährung für Tierärzte – im Fokus: Die Fütterung von Schweinen

Hannover, 6. April 2016

RIEGER, H., RATERT, C., HENNIG-PAUKA, I. UND J. KAMPHUES (2016)

Die Knochenzusammensetzung wachsender Schweine – und Bedeutung für die Diagnostik

Tagungsband, S. 165

20th Congress of the European Society of Veterinary and Comparative Nutrition

Berlin, 15.-17. September 2016

RIEGER, H., RATERT, C., HENNIG-PAUKA, I., WENDT, M., SCHWENNEN, C. UND J. KAMPHUES (2016)

Investigations on the suitability of diverse bone characteristics in different bones for the diagnosis of mineral deficiency in growing pigs

Congress Proceedings, S. 108

71. Tagung der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie

Göttingen, 14.-16. März 2017

RIEGER, H., RATERT, C., WENDT, M., SCHWENNEN, C. UND J. KAMPHUES (2017)

Investigations on the influence of a different phosphorus supply on bone's density and chemical composition in weaned piglets

Congress Proceedings, S. 48

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

®	eingetragenes Markenzeichen
\bar{x}	arithmetisches Mittel

Abkürzungen

AAS	Atomabsorptionsspektrometrie
A. dest	<i>Aqua destillata</i> (destilliertes Wasser)
Aug.	August
aP	available P (verfügbarer P)
AP	alkalische Phosphatase
BHZZP	Bundeshybridzuchtprogramm (BHZZP GmbH, Schweinezuchtunternehmen)
BMC	Bone Mineral Content (Knochenmineralstoffgehalt)
BMD	Bone Mineral Density (Knochenmineralstoffdichte)
CrtD	kortikale Dichte
ffr TS	fast fettfreie Trockensubstanz
ffr TS	fettfreie Trockensubstanz
Fa.	Firma
FCR	Feed Conversion Ratio
d	Tag
DCP	Dicalciumphosphat ($\text{CaHPO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)
dP	digestible P (verdaulicher P)
dist.	distal
DG	Durchgang
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
DM	Durchmesser
DXA	Dual-Röntgen- Absorptiometrie
EDTA	Ethylendiamintetraacetat
et al.	<i>et alii</i> (und andere)
Feb.	Februar
Fem	Femur (distale Epiphyse)
FTU	Einheit der Phytaseaktivität

Geb.-Datum	Geburtsdatum
GesD	Gesamtdichte
GfE	Gesellschaft für Ernährungsphysiologie
HP-SES	high protein-Sojaextraktionsschrot
Hum	Humerus (proximale Epiphyse)
i. c.	intrakardial
IE	Internationale Einheit
i. m.	<i>intra musculum</i> (intramuskulär)
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
i. v.	<i>intra venam</i> (intravenös)
JSR	JSR Hybrid Deutschland GmbH (Schweinezuchtunternehmen)
K	Kontrollgruppe (P _i + Phyt +)
k. A.	keine Angabe
KDP	Kaliumdihydrogenphosphat (KH ₂ PO ₄)
KM	Körpermasse
KMZ	Körpermasseszunahme
LT	Lebenstag
m	Masse
MC III	<i>Os metacarpale tertium</i> (dritter Metakarpalknochen)
MCP	Monocalciumphosphat (Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O)
MDCP	Monodicalciumphosphat (CaHPO ₄ -Ca(H ₂ PO ₄) ₂ · H ₂ O)
ME	Metabolisable Energy (umsetzbare Energie)
MinF	Mineralfutter
MNP	Mononatriumphosphat (NaH ₂ PO ₄ · 2 H ₂ O)
mod. n.	modifiziert nach
MT III	<i>Os metatarsale tertium</i> (dritter Metatarsalknochen)
MJ	Megajoule
n	Anzahl
NfE	N-freie Extraktstoffe
nPP	non-phytate P (Nicht-Phytin-P)
NRC	National Research Council

n. u.	nicht untersucht
OM	Ohrmarke
oR	organischer Rest
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
Phyt	Phytase
P _i	inorganic P (anorganischer Phosphor)
PIC	PIC Deutschland GmbH (Schweinezuchtunternehmen)
p. n.	<i>post natum</i> (nach der Geburt)
PP	phytate P (Phytin-P)
prox.	proximal
PTH	Parathormon
qCT	quantitative Computertomografie
Ra	Rohasche
Ra/Ul	Radius/Ulna (distale Epiphyse)
PCV-2	porcines Circovirus Typ 2
resp.	respektive
Rfa	Rohfaser
Rfe	Rohfett
Rp	Rohprotein
s	Standardabweichung
SAS	Statistical Analysis System
TG	Tauchgewicht
Ti/Fi	Tibia/Fibula (proximale Epiphyse)
tP	total P (Gesamt-P)
TrbD	trabekuläre Dichte
TS	Trockensubstanz
uS	ursprüngliche Substanz
V. a.	Verdacht auf
V1	Versuchsgruppe 1 (P _i - Phyt +)
V2	Versuchsgruppe 2 (P _i - Phyt -)
Vit	Vitamin

vP	verdaulicher Phosphor
VT	Versuchstag
Wo	Wochen

Chemische Elemente und Maßeinheiten wurden gemäß der IUPAC-Nomenklatur abgekürzt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	- 1 -
2	Schrifttum.....	- 3 -
2.1	Phosphor in der Fütterung von Schweinen.....	- 3 -
2.1.1	Termini zur näheren Charakterisierung des Phosphors.....	- 9 -
2.2	Symptome eines P-Mangels bei Schweinen.....	- 9 -
2.3	Diagnostik des P-Mangels bei Schweinen	- 14 -
2.3.1	Blutparameter.....	- 14 -
2.3.1.1	Calcium und Phosphor	- 14 -
2.3.1.2	Alkalische Phosphatase (AP).....	- 20 -
2.3.2	Knochencharakteristika	- 21 -
2.3.2.1	Knochenmaße	- 21 -
2.3.2.2	Knochendichte	- 25 -
2.3.2.3	Knochenzusammensetzung.....	- 27 -
3	Material und Methoden	- 35 -
3.1	Versuchsziel.....	- 35 -
3.2	Versuchsablauf.....	- 37 -
3.3	Tiere und Haltung	- 39 -
3.3.1	Tiere.....	- 40 -
3.3.2	Haltung	- 40 -
3.4	Mischfutter und Fütterung.....	- 43 -
3.4.1	Mischfutterherstellung und -zusammensetzung	- 43 -
3.4.2	Probenentnahme.....	- 46 -
3.4.3	Mischfutteranalysen	- 46 -
3.4.3.1	Weender Analyse	- 46 -

3.4.3.2	Kohlenhydrate.....	- 50 -
3.4.3.3	Energiegehalt	- 52 -
3.4.3.4	Mengen- und Spurenelemente	- 52 -
3.4.3.5	Aminosäuren (AS)	- 55 -
3.4.3.6	Vitamine	- 57 -
3.4.3.7	Phytaseaktivität	- 58 -
3.4.3.8	pH-Wert.....	- 58 -
3.4.3.9	Pufferkapazität	- 58 -
3.4.3.10	Partikelgrößenverteilung	- 59 -
3.5	Erhebung allgemeiner Daten während des Versuchs.....	- 59 -
3.5.1	Gesundheitszustand.....	- 60 -
3.5.2	Körpermassenentwicklung, Futtermittelverbrauch und –aufwand	- 60 -
3.6	Auswahl der Tiere für die Sektion.....	- 61 -
3.7	Erhebungen zu Sektionszeitpunkten	- 62 -
3.7.1	Blutprobenentnahme	- 62 -
3.7.2	Analyse der Blutproben.....	- 63 -
3.7.3	Röntgenuntersuchungen	- 64 -
3.7.4	Knochenuntersuchungen	- 65 -
3.7.4.1	Bestimmung der Knochenmaße.....	- 66 -
3.7.4.2	Bestimmung der Knochenmasse.....	- 67 -
3.7.4.3	Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip	- 67 -
3.7.4.4	Periphere quantitative Computertomographie	- 69 -
3.7.4.5	Chemische Analyse	- 70 -
3.8	Statistische Auswertung	- 75 -
4	Ergebnisse.....	- 76 -

4.1	Ergebnisse der Futtermittelanalysen	- 76 -
4.1.1	Chemische Zusammensetzung und Partikelgrößenverteilung des vor Versuchsbeginn verwendeten MF (FAZ _{vorVB}).....	- 76 -
4.1.2	Chemische Zusammensetzung und Partikelgrößenverteilung der drei MF-Varianten K, V1 und V2.....	- 77 -
4.2	Gesundheitszustand.....	- 86 -
4.3	Leistungsdaten	- 88 -
4.3.1	Futtermittelaufwand	- 88 -
4.3.2	Körpermassenentwicklung	- 89 -
4.4	Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der alkalischen Phosphatase (AP) im Serum.....	- 91 -
4.5	Knochenentwicklung und -zusammensetzung	- 94 -
4.5.1	Knochenmaße	- 94 -
4.5.2	Knochenmasse	- 101 -
4.5.3	Knochendichte	- 103 -
4.5.3.1	Knochendichte nach dem Archimedischen Prinzip	- 103 -
4.5.3.2	Periphere quantitative Computertomographie	- 105 -
4.5.3.2.1	Korrelation zwischen den BMD in Tibia und MT III.....	- 107 -
4.5.4	Chemische Zusammensetzung.....	- 108 -
5	Diskussion	- 119 -
5.1	Kritik der Methode.....	- 119 -
5.1.1	MF-Varianten und Fütterung	- 119 -
5.1.2	Tiere.....	- 122 -
5.1.3	Haltung der Tiere und Erfassung der Leistungsparameter	- 123 -
5.1.4	Gruppenaufteilung und Auswahl der Tiere zur Sektion.....	- 125 -
5.1.5	Blutuntersuchung	- 126 -

5.1.6	Knochenuntersuchung	- 127 -
5.2	Leistungsparameter	- 133 -
5.3	Ca und P sowie die Aktivität der AP im Blut.....	- 137 -
5.4	Parameter der Knochenentwicklung und -mineralisation	- 142 -
5.4.1	Knochenmaße	- 142 -
5.4.2	Knochendichten und -massen	- 147 -
5.4.3	Knochenzusammensetzung.....	- 153 -
5.5	Schlussfolgerungen	- 163 -
6	Zusammenfassung.....	- 165 -
7	Summary.....	- 168 -
8	Literaturverzeichnis	- 171 -
9	Anhang	- 201 -
9.1	Tabellen.....	- 201 -
9.1.1	Laboranalysen.....	- 201 -
9.1.2	Mineral- und Mischfuttermittel.....	- 202 -
9.1.3	Score zur Beurteilung des klinischen Allgemeinbefindens und des Bewegungsablaufs	- 205 -
9.1.4	Tiere und Haltung.....	- 207 -
9.1.5	Futtermittelverbrauch und Körpermassenentwicklung	- 209 -
9.1.6	Gesundheitszustand und Therapie.....	- 213 -
9.1.7	Blutwerte.....	- 214 -
9.1.8	Knochenparameter	- 217 -
9.1.8.1	Knochenmaße	- 217 -
9.1.8.2	Knochenmasse und -dichte	- 224 -
9.1.8.3	Chemische Analyse	- 232 -
9.2	Abbildungsverzeichnis	- 239 -

9.3	Tabellenverzeichnis	- 240 -
-----	---------------------------	---------

1 Einleitung

Die bedarfsgerechte Versorgung mit verdaulichem Phosphor (vP) ist für die Tiergesundheit in Schweinebeständen, insbesondere für eine physiologische Skelettentwicklung essentiell und darüber hinaus eine generelle Voraussetzung für hohe Leistungen während der Aufzucht und Mast, aber auch von Zuchtsauen. Eine den Bedarf deutlich übersteigende P-Versorgung hingegen ist aus ökologischen wie auch ökonomischen Gründen kritisch zu sehen. Ein hoher P-Eintrag in landwirtschaftliche Nutzflächen über wirtschaftseigene Düngemittel und eine ggf. nachfolgende Auswaschung in das Grundwasser oder ein direktes Abschwemmen in oberflächliche Gewässer können – wie auch ein unsachgemäßer oder zu hoher N-Eintrag – die Wasserqualität aufgrund übermäßiger Nährstoffanreicherung und Eutrophierung nachhaltig beeinträchtigen (SCHINDLER et al. 2008; LEIP et al. 2015). Dieses Risiko besteht vor allem in Regionen mit hoher Viehdichte. Für Stickstoff und Phosphor gelten daher in Deutschland besondere Regelungen/Restriktionen hinsichtlich der Düngung landwirtschaftlich genutzter Flächen (Düngeverordnung, DüV¹). Verstöße gegen Vorschriften der DüV können als Ordnungswidrigkeiten geahndet werden oder im Rahmen der Cross-Compliance-Prüfung zu Kürzungen bestimmter EU-Direktzahlungen führen² und somit ganz erhebliche wirtschaftliche Einbußen für betroffene Betriebe zur Folge haben.

Vor diesem Hintergrund ist die präzise Beurteilung der P-Versorgung von grundlegender Bedeutung in der Schweinefütterung und -haltung. Dies ist aus tierärztlicher Sicht mitunter eine schwierige Aufgabe. Da das klinische Bild allein keine sichere Diagnose eines P-Mangels erlaubt, sind zumeist weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Durch Futtermittelanalysen, d. h. eine Bestimmung des Gesamt-P-Gehalts im Mischfutter (MF) kann eine erste Einschätzung der P-Versorgung vorgenommen werden. Weil die P-Verfügbarkeit im MF für Schweine jedoch in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren erheblich variiert, ist eine exakte Vorhersage schwierig. Der auf laboranalytische Parameter im Futter ausgerichtete Ansatz zur Beurteilung der P-Versorgung hat daher nur bedingt den gewünschten Informationswert. Als Einflussgrößen auf die P-Verwertung sind neben der Auswahl der eingesetzten P-Quellen (organisch vs. anorganisch) u. a. auch das Ca:P-

¹ BGBl. I 2007, S. 221-240

² Gemäß Verordnung (EU) Nr. 1306/2013 in Verbindung mit dem Agrarzahllungen-Verpflichtungengesetz (BGBl. I 2014, S. 1928-1936) und der Agrarzahllungen-Verpflichtungenverordnung (BANz AT 23.12.2014 V1)

Einleitung

Verhältnis sowie die Aktivität im Futter vorhandener Phytasen (endogen oder zugesetzt) zu berücksichtigen (SIMONS et al. 1990).

Des Weiteren können Blutuntersuchungen zusätzliche Informationen liefern, da es mit steigender P-Versorgung zu einem gewissen Anstieg der P-Konzentration in Serum bzw. Plasma kommen kann. Aufgrund der endokrinen Regulation werden die P-Werte im Blut jedoch relativ unabhängig vom aktuellen Versorgungsniveau vergleichsweise konstant gehalten. In mehreren Studien zeigte sich, dass auch dieser Parameter insgesamt nur bedingt geeignet ist, die tatsächliche P-Versorgung näher zu beurteilen (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985, 1986). Auch die stark altersabhängige Entwicklung dieser Größe (DOORNENBAL et al. 1983; DUBREUIL u. LAPIERRE 1997; FAUSTINI et al. 2000) kann die Interpretation von Analyseergebnissen mitunter erschweren.

In vielen Studien wurden daher Knochenuntersuchungen genutzt, um anhand der Knochendichte und -zusammensetzung (Aschegehalt!) Aussagen zur P-Versorgung treffen zu können. Hinsichtlich der geprüften P-Versorgung besteht dabei eine teils große Heterogenität in den einzelnen Studien, und zwar im Hinblick auf das Tieralter, die Auswahl der analysierten Knochen bzw. Knochenanteile oder die Methoden zur Beurteilung der Integrität des Knochengewebes. Die Unterschiede sind teils so erheblich, dass eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse in vielen Fällen kaum/nicht mehr gegeben ist. Eine Beurteilung der P-Versorgung von Schweinen aus tierärztlicher Sicht stellt aus diesem Grund nach wie vor eine Herausforderung dar.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, an jungen Mastschweinen unter standardisierten Bedingungen zu prüfen, inwieweit verschiedene chemische wie auch physikalische Parameter an unterschiedlichen Knochen bzw. Knochenabschnitten eine differierende P-Versorgung widerspiegeln. Ferner sollten dann jene Parameter näher charakterisiert werden, anhand derer ein P-Mangel möglichst frühzeitig und zuverlässig diagnostiziert werden kann. Dies wurde an Schweinen verschiedener Alters- bzw. Gewichtsklassen näher untersucht, da einzelne Knochen altersabhängig unterschiedlich sensitiv auf einen P-Mangel reagieren können (CRENSHAW et al. 1981). Die so erhobenen Daten sollen darüber hinaus in der Diagnostik als Vergleichswerte für wachsende Schweine dienen, wenn es um Fragen einer adäquaten bzw. klinisch relevanten marginalen oder gar defizitären P-Versorgung geht.

2 Schrifttum

Nachfolgend werden zunächst einige für das vorliegende Dissertationsvorhaben relevante futtermittelkundliche Grundlagen dargestellt. Die weiteren Ausführungen sind dann auf die aktuelle Literatur zur Beurteilung der P-Versorgung von Schweinen anhand von verschiedenen Blut- und Knochenparametern fokussiert.

2.1 Phosphor in der Fütterung von Schweinen

Die Schweinemast in Deutschland erfolgt überwiegend auf Basis getreidereicher Mischfuttermittel (MF), die durch Leguminosen oder Raps bzw. die Nebenprodukte der Öl- und Fettgewinnung (Soja- bzw. Rapskuchen oder –extraktionsschrote) als Proteinquelle ergänzt sind. Sowohl im Getreide als auch in Raps- bzw. Soja-Extraktionsschrot (RES bzw. SES) liegt der Phosphor zu großen Anteilen als Phytin-Phosphor, d. h. an Phytinsäure gebunden vor.

Die von EECKHOUT und DE PAEPE (1994) analysierten Gehalte an Gesamt-P in Weizen und Gerste variierten zwischen 0,31 und 0,38 % bzw. 0,34 und 0,39 %, wobei dieser zu 67 % bzw. 60 % als Phytin-P vorlag. In SES (44 % Rohprotein, Rp) und RES wurden in derselben Untersuchung geringere prozentuale Anteile des Phytin-P bei insgesamt höheren P-Gehalten festgestellt (Gesamt-P: 0,66 % bzw. 1,12 %, davon 53 % bzw. 36 % Phytin-P).

RODEHUTSCORD et al. (2016) stellten in ihrer Studie zur chemischen Zusammensetzung verschiedener Getreidegenotypen im Weizen P-Gehalte im Bereich von 3,24 - 4,43 g/kg TS und in Gerste zwischen 3,91 und 4,73 g/kg TS fest. Die ermittelten Gehalte an Phytin-P (IP₆) betragen 1,38 - 2,29 g/kg TS und 2,17 - 3,52 g/kg TS in Weizen bzw. Gerste.

Untersuchungen von Getreideproben (Ernte 2013) im Zuge eines Kooperationsprojektes der Landwirtschaftskammer Niedersachsen mit fünf Beratungsringen (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN 2016) ergaben P-Gehalte zwischen 2,6 und 3,4 g/kg (88 % TS) in Weizen sowie zwischen 2,7 und 3,8 g/kg (88 % TS) in Gerste. Es wurden hierbei Proben von Böden der Gehaltsklassen C bis E (entspricht mittleren bis sehr hohen Phosphat-Gehalten) analysiert. In ebenfalls von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen durchgeführten Untersuchungen an Getreideproben der Ernte aus dem Jahr 2011 betragen die P-Gehalte 1,6 - 3,0 g/kg Weizen bzw. 2,2 - 3,6 g/kg Gerste.

Der an Phytinsäure gebundene Phosphor steht dem Monogastrier erst nach enzymatischer Spaltung durch Phytasen zur Verfügung. In einer von SCHULZ und OSLAGE (1972) durchgeführten Untersuchung mit technischem Calcium-Magnesium-Phytat in einem Phytase-freien Mischfutter konnte gezeigt werden, dass bei Schweinen weder im Magen noch im Dünndarm eine Hydrolyse des Phytats stattfand. Im Dickdarm hingegen war eine Hydrolyse nachweisbar, was auch von RUTHERFURD et al. (2014) in neueren Arbeiten bestätigt werden konnte.

Die Ergebnisse mehrerer Studien sprechen dafür, dass die P-Absorption bei Schweinen größtenteils im vorderen Verdauungstrakt stattfindet (PARTRIDGE 1978; AJAKAIYE et al. 2003; BOHLKE et al. 2005; RUTHERFURD et al. 2014). LIU et al. (2000) hingegen stellten auch im Caecum von Mastschweinen noch eine erhebliche P-Absorption fest. Die Autoren sehen eine mögliche Funktion dieser Absorption von Ca und P im Colon bzw. Caecum im Erhalt der Homöostase dieser beiden Elemente, insbesondere bei marginaler Versorgung.

Erst eine Aktivität im Futter vorhandener Phytasen ermöglicht im vorderen Verdauungstrakt die Hydrolyse des gebundenen P und nachfolgend die Absorption des gelösten P.

Bei diesen Phytasen handelt es sich zum einen um pflanzeigene Enzyme, die je nach eingesetzten Komponenten mitunter einen wesentlichen Beitrag zur P-Verdaulichkeit leisten können. So fanden EECKHOUT und DE PAEPE (1994) in verschiedenen Getreidearten erhebliche mittlere Phytaseaktivitäten (Roggen: 5130 U/kg, Weizen: 1193 U/kg, Gerste: 582 U/kg). Im Vergleich zu dieser Untersuchung stellten LIU et al. (2006) etwas höhere mittlere Aktivitäten im Weizen fest. In dieser Studie zeigten sich zudem Unterschiede im Vergleich verschiedener Weizen-Genotypen (945 U/kg bis 1560 U/kg). Die von RODEHUTSCORD et al. (2016) ermittelten Phytaseaktivitäten im Weizen wiesen demgegenüber mit 1340 - 2640 U/kg TS eine größere Schwankungsbreite auf.

Unter den üblicherweise in der Mastschweine-Fütterung eingesetzten Getreidearten weist der Roggen die höchsten Phytaseaktivität auf (EECKHOUT u. DE PAEPE 1994; VIVEROS et al. 2000; GREINER u. EGLI 2003; STEINER et al. 2007; RODEHUTSCORD et al. 2016), noch höhere Aktivitäten sind jedoch in einigen Mühlennachprodukten wie Roggen- oder Weizenkleie festzustellen (VIVEROS et al. 2000; STEINER et al. 2007). Die endogene

Phytaseaktivität in Leguminosen- und Ölsaaten-Nebenprodukten dahingegen ist unbedeutend (EECKHOUT u. DE PAEPE 1994; VIVEROS et al. 2000).

Neben den pflanzeigenen Phytasen werden in der Schweinefütterung routinemäßig mikrobiell hergestellte Phytasen eingesetzt, durch deren Wirkung der Anteil des verdaulichen Phosphors (vP) am Gesamt-P-Gehalt erhöht werden kann. Infolge der höheren P-Verdaulichkeit (BRAÑA et al. 2006; POULSEN et al. 2010; TAYLOR et al. 2016) wird trotz gleichbleibenden P-Gehalts im Futter eine Reduktion der P-Exkretion erreicht (BAXTER et al. 2003; LÉTOURNEAU-MONTMINY et al. 2012). Dies wiederum ist im Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen eines hohen P-Eintrags mit der Gülle besonders in Regionen mit intensiver Tierhaltung bedeutsam.

In ihrer Untersuchung prüften BRAÑA et al. (2006) den dosisabhängigen Effekt zweier unterschiedlicher Phytasen auf die P-Verdaulichkeit und -Absorption bei Mastschweinen vor dem Hintergrund einer inadäquaten P-Versorgung. Die geprüften MF enthielten in dieser Studie 40, 56 bzw. 66 % des Bedarfs an verfügbarem P nach Angaben des National Research Council (NRC 1998) in verschiedenen Wachstumsphasen. Die Autoren stellten hierbei eine lineare Beziehung zwischen den eingesetzten Phytasedosierungen (250 - 500 FTU/kg) und der P-Verdaulichkeit sowie der P-Absorption aus einem Mais- und Soja-basierten Mischfutter fest. So stieg die Absorption in dieser Studie um 0,06 g bzw. 0,17 g je 100 FTU zugesetzter Phytase. Insgesamt stieg durch den Phytase-Zusatz die scheinbare Verdaulichkeit (sVQ) von P um 22 bzw. 44 % gegenüber der Kontrollgruppe an. Auch HARPER et al. (1997) stellten in ihren Untersuchungen einen linearen Zusammenhang fest, wohingegen PADITZ et al. (2005) in Dosisbereichen von unter 500 FTU/kg höhere Äquivalenzwerte je Einheit feststellten und vermuteten, dass dies aufgrund einer starken Streuung der Messwerte in vorangegangenen Untersuchungen bisher nicht eindeutig zu erkennen gewesen sei. Einen nicht-linearen Zusammenhang bei geringen Phytasedosierungen beobachteten ebenfalls POULSEN et al. (2010). In ihrer Untersuchung war die Steigerung der P-Verdaulichkeit im Dosisbereich zwischen 0 und 250 FTU/kg Alleinfutter am deutlichsten. Im Dosisbereich zwischen 250 und 750 FTU/kg fanden auch diese Autoren eine lineare Beziehung.

In diesem Zusammenhang befassten sich verschiedene Studien auch mit der Frage, in welchem Ausmaß anorganischer Phosphor durch einen Phytase-Zusatz zum Mischfutter

eingespart werden kann. In Tabelle 1 wird ein Überblick zu den diesbezüglichen Ergebnissen aus verschiedenen Studien gegeben.

YI et al. (1996) zeigten, dass die anhand der tägl. KMZ sowie der scheinbaren P-Absorption kalkulierten P-Äquivalente um mehr als 30 % höher waren als die auf Basis von Knochenparametern (Knochenscherkraft und Aschegehalt) errechneten Werte. Dies stimmt mit den Beobachtungen von HOPPE et al. (1993) überein. Auch diese Autoren stellten fest, dass durch Kalkulation mit dem Ra-Gehalt in der Phalanx I höhere Phytaseaktivitäten zum Austausch von 1 g P errechnet wurden als unter Zuhilfenahme der P-Retention (418 vs. 380 U/g P).

Nach KEMME et al. (1997) ist die Phytase-Effizienz zudem abhängig vom Alter bzw. Reproduktionsstatus der Tiere, bei denen diese eingesetzt wird. So stellten die Autoren in ihrer Untersuchung eine geringere Steigerung der P-Verdaulichkeit bei Ferkeln im Vergleich zu Mastschweinen durch einen Phytase-Zusatz zum Mischfutter fest. Im Vergleich zwischen Mastschweinen und tragenden bzw. laktierenden Sauen war die Phytase-Effizienz bei letzteren um 0,2 g vP höher, wohingegen die Phytase bei den tragenden Sauen (60. Trächtigkeitstag) einen geringeren Effekt auf die P-Verdaulichkeit hatte als bei den Mastschweinen. Die Autoren halten unterschiedliche Milieubedingungen im Magen als Ursache dieser Unterschiede für möglich.

Tabelle 1: Literaturangaben zur Phosphoräquivalenz verschiedener Phytase-Quellen und -Dosierungen in der Fütterung von Schweinen

Alter/KM	Grundlage der Kalkulation	Äquivalenz	Autor
ca. 10 - 22 kg	Ra _{MC} III	500 FTU (<i>P. lycii</i>) \triangleq 0,572 g P 500 FTU (<i>E. coli</i>) \triangleq 0,770 g P (beide: MNP)	ADEOLA et al. (2006)
26 - 49 d	Ra _{Fibula}	400 FTU (<i>E. coli</i>) \triangleq 0,108 % P 400 FTU (<i>P. lycii</i>) \triangleq 0,043 % P 400 FTU (<i>A. niger</i>) \triangleq 0,081 % P (alle: KDP)	AUGSPURGER et al. (2003)
15,3 - 34,8 kg	Bruchfestigkeit _{Fem, MT, MC} Ra _{MT, MC}	100 FTU (<i>A. niger</i>) \triangleq 0,0085 % P (MNP)	CROMWELL et al. (1995)
ca. 19 - 108 kg ca. 30 - 106 kg	tägl. KMZ, P-VQ, Scherkraft _{10. Rippe}	500 FTU (<i>A. niger</i>) \triangleq 0,96 g P (MDCP)	HARPER et al. (1997)
21 - 63 d 7 - 32 kg	P-Retention Ca-Retention P _{Phalanx I} Ra _{Phalanx I}	380 FTU \triangleq 1 g P 357 FTU \triangleq 1 g P 403 FTU \triangleq 1 g P 418 FTU \triangleq 1 g P (alle: <i>A. niger</i> bzw. MCP)	HOPPE et al. (1993)
ca. 10 - 23 kg	tägl. KMZ Ra _{MC} III&IV	500 FTU \triangleq 0,49 g P 500 FTU \triangleq 1,00 g P (beide: <i>E. coli</i> bzw. MNP)	JENDZA et al. (2006)
Absetzferkel	tägl. KMZ, P-Absorption	246 FTU (<i>A. niger</i>) \triangleq 1 g P (entfluoriertes Phosphat)	KORNEGAY und QIAN (1996)
Absetzferkel	tägl. KMZ P-VQ Ra _{Rippe} Scherkraft _{Rippe}	500 FTU \triangleq 1,03 g P 500 FTU \triangleq 0,78 g P 500 FTU \triangleq 0,89 g P 500 FTU \triangleq 0,69 g P (alle: <i>A. niger</i> bzw. MCP)	RADCLIFFE und KORNEGAY (1998)
Absetzferkel	P-sVQ	500 FTU (<i>P. lycii</i>) \triangleq 0,088 % P (DCP)	TAYLOR et al. (2016)
89,7 - 122,5 kg	Bruchfestigkeit _{MC}	450 FTU (<i>A. niger</i>) \triangleq 0,9 g P (DCP)	VEUM und ELLERSIECK (2008)
Absetzferkel	tägl. KMZ, P-Absorption	676 FTU (<i>A. niger</i>) \triangleq 1 g P (entfluoriertes Phosphat)	YI et al. (1996)

Ra: Rohasche-Gehalt, MC: *Os metacarpale*, FTU: Einheit der Phytaseaktivität, MNP: Mononatriumphosphat, KDP: Kaliumdihydrogenphosphat, Fem: Femur, MT: *Os metatarsale*, KMZ: Körpermassezunahme, VQ: Verdaulichkeit, MDCP: Monodicalciumphosphat, MCP: Monocalciumphosphat, sVQ: scheinbare Verdaulichkeit, DCP: Dicalciumphosphat

Die im Futter vorhandenen Phytasen weisen laut YI und KORNEGAY (1996) an verschiedenen Lokalisationen vom Magen zum Dünndarm hin abnehmende Aktivitäten auf.

Die Autoren führten dies auf die Unterschiede in den Milieubedingungen (pH-Wert) und in der Proteaseaktivität in den verschiedenen Abschnitten des Verdauungstraktes zurück.

Auch JONGBLOED et al. (1992) konnten im Chymus des Ileums fistulierter Schweine keine nachweisbare Phytaseaktivität mehr feststellen. Im duodenalen Chymus wurden in dieser Untersuchung für die geprüften Mischfuttermittel mit Phytase-Zusatz Phytaseaktivitäten zwischen 1330 ± 125 und $955 \pm 150 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ermittelt. PAGANO et al. (2007) konnten weder im Chymus des Ileum noch in dem des aboralen Jejunums eine Phytaseaktivität nachweisen.

Hinweise auf die von YI und KORNEGAY (1996) vermuteten Ursachen der abnehmenden Phytaseaktivität entlang des vorderen Verdauungstraktes (s. o.) lieferte auch eine *in-vitro*-Studie von IGBASAN et al. (2000), in der verschiedene bakterielle und von Pilzen produzierte Phytasen hinsichtlich ihrer pH- und Temperatur-Optima sowie ihrer Protease-Stabilität untersucht wurden. Mit Ausnahme der untersuchten „*Bacillus*-Phytase“, deren maximale Aktivität im neutralen pH-Bereich erreicht wurde, lagen die Optimalbereiche zwischen pH 4,5 und 5,5 und somit in einem Bereich, der im Magen- und Duodenum-Inhalt von Schweinen vorzufinden ist (MOORE u. TYLER 1955; JONGBLOED et al. 1992; ARLINGHAUS 2013; VON UND ZUR MÜHLEN 2015). Die Temperatur-Optima wurden bei Werten zwischen 50 und 60 °C erreicht. Eine Inkubation der unterschiedlichen Phytasen mit porcinen Proteasen in dieser Studie ergab, dass lediglich die untersuchte „*E. coli*-Phytase“ sich unempfindlich gegenüber der Einwirkung von Pepsin und Pankreatin zeigte, alle anderen untersuchten Phytasen jedoch durch diese Einwirkung in ihrer Aktivität reduziert wurden.

Die während der Pelletierung bzw. Konditionierung von Mischfutter mitunter erreichten Temperaturen von 60 bis 70 °C können zu einer signifikanten Reduktion der Phytaseaktivität führen (SLOMINSKI et al. 2007). SLOMINSKI et al. (2007) machten diese Beobachtung an zwei verschiedenen Phytaseprodukten; eines davon granuliert und als hitzebeständig deklariert, das zweite lag als Pulver vor. Durch Coating konnte in einer anderen Studie eine hohe Hitzestabilität der untersuchten Phytase erreicht werden (YÁÑEZ et al. 2013).

Auch EECKHOUT (2000) stellte in ihren Untersuchungen eine Reduktion der Phytaseaktivität bei hohen Temperaturen während der Pelletierung fest und zeigte zudem, dass das Ausmaß des Aktivitätsverlustes von weiteren Faktoren wie der

Futterzusammensetzung oder dem Produktionsprozess beeinflusst werden kann, wodurch sich insgesamt die Schwierigkeit ergebe, die nach der Pelletierung verbliebene Enzymaktivität vorherzusagen.

Das Risiko einer möglichen Überschätzung der P-Verdaulichkeit von pelletierten Futtermitteln infolge einer Inaktivierung endogener Phytasen wurde ebenfalls von JONGBLOED und KEMME (1990) dargestellt. Es gibt jedoch auch gegensätzliche Ergebnisse.

In Untersuchungen zum Effekt der Pelletierung von Mais- und Soja-basierten Mischfuttermitteln ohne P_i -Zusatz wurde eine Steigerung der P-Absorption (BAYLEY u. THOMSON 1969) bzw. P-Retention beobachtet (BAYLEY et al. 1975). JONGBLOED und KEMME (1990) diskutieren u. a. eine möglicherweise unzureichende Adaptation der Tiere an die zu prüfenden Mischfuttermittel in der vorangegangenen Studie von BAYLEY et al. (1975) als Ursache der von diesen Autoren berichteten positiven Effekte des Pelletierens von nicht mit P supplementierten Mischfuttermitteln.

2.1.1 Termini zur näheren Charakterisierung des Phosphors

Neben dem laboranalytisch bestimmbar (Gesamt-)Phosphor-Gehalt finden in der internationalen Literatur verschiedene weitere Termini zur näheren Charakterisierung des Phosphors Anwendung. In der vorliegenden Arbeit wurden stets die im Originalartikel verwendeten Begrifflichkeiten übernommen und ggf. wie folgt abgekürzt bzw. aus dem Englischen übersetzt:

- available P (aP): verfügbarer P
- digestible P (dP): verdaulicher P (vP)
- inorganic P (P_i): anorganischer P
- non-phytate P (nPP): Nicht-Phytin-P
- phytate P (PP): Phytin-P
- total P (tP): Gesamt-P

2.2 Symptome eines P-Mangels bei Schweinen

Zu den klinischen Symptomen des P-Mangels bei Schweinen zählen neben einem vermehrten Auftreten von Lahmheiten sowie einer erhöhten Frakturneigung vor allem unspezifische

Störungen des Bewegungsablaufs wie die Parese der Hintergliedmaßen, ein unsicherer oder steifer Gang, Schwierigkeiten beim Ablegen/Aufstehen und eine Durchtrittigkeit (CHAPMAN et al. 1962; COMBS et al. 1962; DOIGE et al. 1975). Zudem sollen gehäuft Deformationen der Wirbelsäule sowie Frakturen an verschiedenen Knochen auftreten (CHAPMAN et al. 1962).

Des Weiteren können unspezifische Symptome wie ein retardiertes Wachstum und damit verbundene Leistungseinbußen in der Aufzucht und Mast zu beobachten sein. In verschiedenen Studien wurde auch ein Einfluss der P-Versorgung auf die Körpermassezunahmen (KMZ) während unterschiedlicher Phasen der Aufzucht und Mast beobachtet (CROMWELL et al. 1970; KETAREN et al. 1993; EECKHOUT et al. 1995; HARPER et al. 1997; AUGSPURGER et al. 2003; ADEOLA et al. 2006; JENDZA et al. 2006; WU et al. 2008; VARLEY et al. 2010a; ADEOLA et al. 2015; DREWS et al. 2016).

Pair-fed-Versuche zeigten, dass es auch bei vergleichbaren Futteraufnahmemengen bei inadäquater P-Versorgung zu einer Reduktion der KMZ kommen und die Feed Conversion Ratio (FCR) auch unter diesen Bedingungen negativ beeinflusst werden kann (LÜDKE et al. 1988; ALEXANDER et al. 2010), was darauf hindeutet, dass dies tatsächlich einen Effekt der unterschiedlichen P-Versorgung darstellt und keine alleinige Folge unterschiedlicher Futteraufnahme-Mengen ist. ALEXANDER et al. (2010) zeigten an wenige Tage alten Ferkeln *in vivo*, dass das verminderte Muskel- und Knochenwachstum mit einer reduzierten Proliferation jener Stammzellen, die für das postnatale Wachstum dieser Gewebe notwendig sind, einhergeht. Die Autoren sehen daher erhebliche Risiken für das spätere Wachstum, wenn es in einer solch frühen Phase der Entwicklung zu einer P-bedingten Wachstumsretardierung komme. Dies gelte insbesondere für Ferkel mit einem geringen Geburtsgewicht.

Dass sich darüber hinaus bei einer defizitären P-Versorgung auch die Körperzusammensetzung verändern kann, berichteten mehrere Autoren (AUBEL et al. 1936; CROMWELL et al. 1970; LÜDKE et al. 1988). LÜDKE et al. (1988) beobachteten an Absetzferkeln (11,1 kg KM zu Versuchsbeginn), dass sich infolge einer unterschiedlichen P-Versorgung die Zusammensetzung des Leerkörpers änderte. So waren die Leerkörper der P-defizitär versorgten Tiere signifikant fettreicher und zugleich proteinärmer als jene der

pair-fed gefütterten Kontrolltiere, wobei der höhere Fettgehalt sowohl im Weichteilgewebe als auch in der Knochensubstanz nachweisbar war. Aus der veränderten Körperzusammensetzung resultierte in dieser Studie trotz erheblicher Unterschiede in der KMZ (33,7 vs. 37,3 kg) ein vergleichbarer Energieansatz in beiden Gruppen ($5,9 \pm 0,6$ vs. $5,7 \pm 0,4$ MJ/Tier/Tag). Die Autoren vermuteten, dass diese Beobachtungen in dem höheren Aufwand für den Protein- im Vergleich zum Fettansatz begründet seien. In anderen Untersuchungen konnte hingegen kein Einfluss der P-Versorgung auf die Körperzusammensetzung festgestellt werden (CROMWELL et al. 1972; VARLEY et al. 2010a; VARLEY et al. 2011a).

Der Einfluss von Phytase- oder P_i -Zulagen auf Leistungsparameter bei Schweinen wurde in zahlreichen Studien untersucht und teils kontrovers diskutiert.

RYAN et al. (2011a) stellten an Absetzferkeln ($8,1 \pm 1,0$ kg KM) nach acht Wochen zweiphasig geringerer ($3,0$ bzw. $2,5$ g vP/kg) oder höherer ($3,7$ bzw. $3,2$ g vP/kg) P-Versorgung keinen Einfluss auf die tägl. Futteraufnahmen (FA), die KMZ oder die FCR fest. Bei älteren Schweinen ($33,9 \pm 2,3$ kg KM) in dieser Studie hatte jedoch eine geringe P-Versorgung ($1,6$ g vP/kg) bis zur Schlachtung verglichen mit einer bedarfsdeckenden P-Versorgung ($2,2$ bzw. $2,8$ g vP/kg) eine signifikante Reduktion der tägl. KMZ sowie der FCR zur Folge.

VARLEY et al. (2010c) beobachteten bei Absetzferkeln ($7,8 \pm 0,78$ kg KM) keinen Einfluss eines Phytase-Zusatzes ($0 - 1500$ FTU/kg, tP: $4,2$ g/kg) auf die KMZ oder die FA; die FCR wurde jedoch in dieser Arbeit signifikant von der Höhe des Phytase-Zusatzes im Mischfutter beeinflusst. In einer weiteren Studie an Absetzferkeln beobachteten VARLEY et al. (2011c) eine lineare Steigerung der FCR mit Zunahme des Phytase-Levels ($0 - 1500$ FTU/kg, P: $4,5$ g/kg). Einen Einfluss auf die tägl. KMZ stellten diese Autoren auch hier nicht fest. In einer Studie von AUGSPURGER et al. (2003) jedoch führten steigende P-Zulagen ($0,34$ % tP ergänzt mit $0,05 - 0,15$ % P_i) zum Mischfutter zu linear ansteigenden KMZ von Absetzferkeln (Ausgangskörpermasse: $8,4$ kg).

In drei Untersuchungen an Schweinen unterschiedlichen Alters (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985, 1986) wurde lediglich bei den jüngeren Tieren ($8,7$ kg bzw. $18,8$ kg KM) eine Steigerung der KMZ sowie eine günstigere FCR mit steigender P-Zulage zum Mischfutter ($0,23 - 0,55$ % tP) registriert, wobei die KMZ im zweiten Versuch ($18,8$ kg KM;

0,12 - 0,50 % tP) zwischen 0,31 und 0,50 % tP ein Plateau erreichten. Eine noch weitere Anhebung der P-Versorgung hatte dann keinen darüber hinaus gehenden positiven Effekt auf die genannten Leistungsparameter mehr zur Folge. In der Mast (64,8 kg KM zu Versuchsbeginn) andererseits blieben sowohl die KMZ als auch die FCR vom P-Gehalt im Mischfutter (0,09 - 0,31 % tP) unabhängig. Nach Meinung der Autoren lassen die Ergebnisse dieses Versuchs darauf schließen, dass die Entwicklung des Weichgewebes nicht im selben Ausmaß durch die geringe P-Versorgung beeinträchtigt wurde, wie sie es in ihrer Untersuchung zu einem früheren Zeitpunkt des Wachstums beobachteten (KOCH et al. 1984). In einer Untersuchung von RUAN et al. (2007) an Mastschweinen (Ausgangskörpermasse: 21,4 kg) führte die höhere P-Versorgung ebenfalls bis zu einem P-Gehalt von 0,34 % vP (wahre Verdaulichkeit) zu signifikant höheren KMZ. Eine Steigerung darüber hinaus hatte dann jedoch keinen weiteren Anstieg der KMZ zur Folge.

PETER et al. (2001) stellten in der Endmast (84 - 123 kg KM) keinen Effekt eines Phytase-Zusatzes zum Mischfutter ohne P_i- und Spurenelement-Zusatz (kalkuliert: 3,3 g tP/kg, 300 od. 500 FTU/kg) auf die KMZ oder die FCR im Vergleich zur Positivkontrolle (kalkuliert: 4,3 g/kg, kein Phytase-Zusatz) fest. Auch in einer Untersuchung von O'QUINN et al. (1997) an Mastschweinen unterschiedlicher Körpermassen (25 - 50, 50 - 80 bzw. 80 - 118 kg KM) hatte eine Absenkung bzw. Erhöhung der vP-Gehalte im Mischfutter um 25 % (0,46 - 0,56 %; 0,42 - 0,53 % bzw. 0,38 - 0,46 % P) keine Einbußen in Bezug auf die KMZ zur Folge. Im Mischfutter der Endmastgruppe war der vP-Gehalt aufgrund des Verzichts auf anorganischen P-Zusatz um 33 % gegenüber dem Mischfutter der Kontrollgruppe reduziert, ohne dass dies die KMZ während dieser Phase beeinflusste.

Demgegenüber leiteten HASTAD et al. (2004) aus ihren Untersuchungen an Endmastschweinen (88,5 kg KM zu Versuchsbeginn) ab, dass der vollständige Verzicht auf einen P-Zusatz in Mischfuttermitteln ohne Phytase-Zusatz (0,30 % P) zu reduzierten KMZ und einem höheren Futteraufwand führe. Diese Autoren ermittelten bei Betrachtung über die gesamte Versuchsdauer (28 d) sowie während der zweiten Versuchshälfte zwar ebenfalls keinen Einfluss einer höheren P-Versorgung (0,30 - 0,45 % P) auf die KMZ, stellten jedoch zwischen Versuchstag 0 und 14 einen linearen Anstieg der KMZ mit steigendem P-Gehalt im Mischfutter fest. Auch an jüngeren Schweinen (33,8 kg KM; 0,45 - 0,57 % P im MF) machten diese Autoren entsprechende Beobachtungen. Als mögliche Erklärung hierfür wird die

beginnende P-Mobilisation aus den Knochen im Verlauf der Versuche als Folge der anhaltend geringen P-Versorgung genannt. Die Autoren vermuteten deshalb, dass der tatsächliche P-Bedarf der Tiere genauer aus den Ergebnissen der frühen Versuchsphase abgeleitet werden könne, da trotz Unterschreitung des Bedarfs diese Regulationsmechanismen hohe KMZ zulassen.

EECKHOUT et al. (1995) untersuchten an Mastschweinen (etwa 37 - 100 kg KM) den Einfluss einer Variation des Ca:P-Verhältnisses bei unterschiedlichem P-Gehalt im Mischfutter. Die KMZ stiegen in dieser Studie mit zunehmendem P-Gehalt im Mischfutter linear an. Mit steigendem Ca-Gehalt im Mischfutter (0,54 - 0,94 % Ca) wurden die KMZ während der ersten fünf Wochen des Versuchs bei einem geringen P-Gehalt (P: 0,36 %) zunehmend beeinträchtigt, bei höheren P-Gehalten im Mischfutter (0,40 bzw. 0,44 % P) wurden die KMZ indessen nicht von der Ca-Versorgung beeinflusst. QIAN et al. (1996) stellten ebenfalls einen Einfluss des Ca:P-Verhältnisses auf die KMZ von Schweinen fest. In ihrer Untersuchung an Absetzferkeln führte ein weiter werdendes Ca:P-Verhältnis (1,2:1 bis 2,0:1) zu linear abnehmenden KMZ. Der Gehalt an verfügbarem Phosphor (0,07 vs. 0,16 % aP) hatte hier keine Auswirkung auf die KMZ der Tiere. Nach GONZÁLEZ-VEGA et al. (2016) wird zum Erreichen einer maximalen Knochenmineralisation ein weiteres Ca:P-Verhältnis benötigt als für die Maximierung der KMZ; ein auf die Optimierung der Knochenmineralisation ausgelegtes Ca:P-Verhältnis könne daher möglicherweise bereits zu reduzierten KMZ führen.

Eine Metaanalyse zum Einfluss verschiedener Faktoren auf die P-Verwertung von Absetzferkeln¹ (LÉTOURNEAU-MONTMINY et al. 2012) ergab einen nicht-linearen Anstieg der KMZ mit Erhöhung des Gehalts an Nicht-Phytin-P (NPP) im Mischfutter. Zwischen dem NPP- und dem vP-Gehalt wurde hingegen ein linearer Zusammenhang ermittelt.

Bisher wurde ein Einfluss der P-Versorgung auf Funktionen des Immunsystems nur in wenigen Studien an Schweinen untersucht. KEGLEY et al. (2001) beobachteten in ihrer Untersuchung an drei Wochen alten Absetzferkeln einen positiven Einfluss des höheren vP-

¹ Im Original: „growing pigs“

Gehalts im Mischfutter auf Parameter der zellulären Immunreaktion, stellten jedoch andererseits eine Reduktion der humoralen Immunantwort fest. Ebenfalls an Absetzferkeln untersuchten METZLER-ZEBELI et al. (2012) den Einfluss einer geringen bzw. hohen Ca- und P-Versorgung auf die intestinale Expression ausgewählter Gene und registrierten dabei eine reduzierte duodenale Expression von IL-1 β bei Fütterung eines Ca- und P-reichen Mischfutters. Nach Meinung der Autoren kann eine hohe Ca- und P-Versorgung dadurch möglicherweise zum Erhalt der Darmfunktion in der Absetzphase beitragen.

Insgesamt sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich, um die Bedeutung der P-Versorgung für die Immunantwort von Schweinen abschließend zu beurteilen (HEYER et al. 2015).

2.3 Diagnostik des P-Mangels bei Schweinen

Zur Diagnostik eines P-Mangels bei Schweinen werden verschiedene Blut- sowie Knochenparameter herangezogen, die nachfolgend näher beschrieben sind.

2.3.1 Blutparameter

Zu den häufig untersuchten Blutparametern zählen, neben verschiedenen Knochenmarkern, vor allem die Konzentrationen von Calcium und Phosphor im Serum bzw. Plasma.

2.3.1.1 Calcium und Phosphor

Die P-Konzentration im Serum unterliegt einer Vielzahl von Einflüssen. In verschiedenen Studien stellte sich das Alter als stärkste Variationsursache heraus (DOORNENBAL et al. 1983; DUBREUIL u. LAPIERRE 1997; FAUSTINI et al. 2000; KIXMÖLLER 2004).

In Tabelle 2 sind Literaturangaben zu Referenzwerten der Ca- und P-Konzentrationen sowie der Aktivität der alkalischen Phosphatase im Blut von Schweinen verschiedener Altersklassen zusammengestellt. Methodische Unterschiede wurden hierbei nicht berücksichtigt, es wurde jedoch ggf. eine Angleichung der Einheiten vorgenommen. Dabei wurden für die Umrechnung von mg/dl zu mmol/l folgende Umrechnungsfaktoren verwendet:

- für Ca: 0,2495
- für P: 0,3229

WEHREND et al. (2003) beschrieben einen Anstieg der P-Konzentration innerhalb der ersten 24 Lebensstunden (s. Tabelle 2) sowie eine große Variation der Werte zum Messzeitpunkt

24 h p. n. (Differenz zwischen Maximum und Minimum: 7,1 mmol/l). Die Ca-Konzentrationen wurden in dieser Studie ebenfalls signifikant vom Alter der Tiere beeinflusst, jedoch insgesamt in geringerem Ausmaß. Die Autoren deuten die festgestellten Schwankungen in den Elektrolytkonzentrationen als Ausdruck postnatal stattfindender Adaptationsvorgänge in der Elektrolythomöostase. NERBAS (2008) sah darüber hinaus einen möglichen Zusammenhang zwischen der mit der Milch aufgenommenen absoluten Phosphatmenge und den P-Konzentrationen im Serum von Saugferkeln. Auch ULLREY et al. (1967) ermittelten die geringsten P-Konzentrationen im Serum unmittelbar *post natum* ($5,3 \pm 0,11$ mg/100 ml¹), gefolgt von einem Anstieg bis auf $11,6 \pm 0,27$ mg/100 ml² in der zweiten Lebenswoche. Zu weiteren Messzeitpunkten bis zum fünften Lebensmonat wurde eine sukzessive Abnahme der P-Konzentrationen festgestellt. Diese Autoren beobachteten insgesamt keinen deutlichen Alterseinfluss auf die Ca-Konzentrationen im Serum. TUMBLESON und KALISH (1972) stellten in ihrer Untersuchung zwischen 24 h und drei Tagen p. n. einen signifikanten Anstieg der Ca-Konzentration im Serum fest; die P-Konzentrationen wiederum stiegen zwischen Tag drei und Tag sieben p. n. signifikant.

An Ferkeln im Alter zwischen acht und 20 Wochen wurden mit zunehmendem Alter steigende P-Serumkonzentrationen (3,11 vs. 3,90 mmol/l) beobachtet (DUBREUIL u. LAPIERRE 1997).

In einer Untersuchung an Miniaturschweinen ermittelten YEOM et al. (2012) bei unter sechs Monate alten Tieren signifikant höhere P-Serumkonzentrationen im Vergleich zu älteren Tieren und auch Ergebnisse einer Studie von NERBAS (2008) zeigten, nach einem signifikanten Anstieg der P-Konzentration innerhalb der ersten drei Lebenswochen, geringere P-Konzentrationen im Plasma von zwei Jahre alten Schweinen gegenüber Läufer-schweinen (s. Tabelle 2).

¹ Entspricht $1,71 \pm 0,04$ mmol/l (gerundete Werte)

² Entspricht $3,75 \pm 0,09$ mmol/l (gerundete Werte)

Schrifttum

Tabelle 2: Referenzwerte zu Ca- und P-Konzentrationen sowie zur Aktivität der alkalischen Phosphatase im Serum bzw. Plasma junger Schweinen (angegebene Referenzintervalle bzw. $\bar{x} \pm s$)

Rasse/ Genetik	Alter (KM)	Ca [mmol/l]	P [mmol/l]	AP [U/l]	Autor
Hampshire- Yorkshire crossbreed	6 Wo (10 – 20 kg)	2,47 – 3,12	2,03 – 3,71	130 – 513	modifiziert nach COOPER et al. (2014) ¹
Yorkshire- Landrace crossbreed	8 Wo	2,29	3,11	303	DUBREUIL und LAPIERRE (1997) ²
	12 Wo	2,46	3,73	351	
	16 Wo	2,44	3,80	280	
	20 Wo	2,40	3,90	255	
Hybrid (JS)	33 – 94 d	2,25 – 3,57 ³	2,10 – 3,49	n. u.	FAUSTINI et al. (2000)
k. A.	Absetzferkel „Feeder Pigs“	2,02 – 3,21 2,16 – 2,92	1,46 – 3,45 2,25 – 3,44	142 – 891 180 – 813	FRIENDSHIP et al. (1984)
Pi	ca. 10 – 12 Wo (25 – 30 kg)	2,32 – 3,52	2,29 – 3,41	127 – 479	KIXMÖLLER (2004)
DL		2,55 – 3,27	2,48 – 3,36	130 – 494	
DE		2,21 – 3,41	2,35 – 3,23	158 – 466	
Pi x DL		2,36 – 3,08	2,33 – 3,37	129 – 465	
LY x LD	12 – 16 Wo (30 – 50 kg)	2,5 – 3,1	2,8 – 4,3	0 – 300	KLEM et al. (2010)
Endprodukt BHZP/PIC	2 d 5 – 27 d	1,8 – 3,3 2,0 – 4,3	0,9 – 2,5 1,9 – 4,0	747 – 3022 234 – 1455	NERBAS (2008)
Endprodukt BHZP/PIC, BHZP	35 – 84 d	2,3 – 3,4	1,6 – 3,5	187 – 579	
Endprodukt BHZP/PIC, BHZP	100 – 180 d	1,6 – 3,8	1,8 – 3,1	74 – 299	

¹Originaldaten im mg/dl; ² \bar{x} ; $SE_{Ca} = 0,04$; $SE_P = 0,07$; $SE_{AP} = 15$; ³ $\bar{x} \pm 1,96 s$, transformierte Werte

Tabelle 2 (Fortsetzung):

Hampshire x Yorkshire, Yorkshire	p. n. ¹	2,69 ± 0,05	1,71 ± 0,04	n. u.	modifiziert nach ULLREY et al. (1967) ²
	24 h	2,32 ± 0,04	2,00 ± 0,06		
	48 h	2,74 ± 0,05	2,29 ± 0,10		
	72 h	2,79 ± 0,05	2,87 ± 0,15		
	5 d	2,77 ± 0,04	3,26 ± 0,09		
	7 d	2,79 ± 0,03	3,46 ± 0,17		
	2 Wo	2,72 ± 0,04	3,75 ± 0,09		
	3 Wo	2,87 ± 0,04	3,07 ± 0,10		
	5 Wo	2,77 ± 0,04	2,58 ± 0,05		
	2 Mo	2,89 ± 0,05	2,62 ± 0,07		
	3 Mo	2,94 ± 0,06	2,58 ± 0,07		
	4 Mo	2,74 ± 0,05	2,52 ± 0,04		
	5 Mo	2,64 ± 0,04	2,29 ± 0,03		
Pi x DL	30 Min	2,6 ± 0,2	1,5 ± 0,3	n. u.	WEHREND et al. (2003)
	6 h	2,4 ± 0,2	1,8 ± 0,5		
	24 h	2,6 ± 0,2	3,1 ± 1,5		
	48 h	2,7 ± 0,3	2,5 ± 0,5		
	1 Wo	2,7 ± 0,2	3,5 ± 0,8		
	2 Wo	2,8 ± 0,1	3,0 ± 0,5		

¹Vor Kolostrumaufnahme, ²Originaldaten im mg/dl; KM: Körpermasse, AP: alkalische Phosphatase, Wo: Wochen, JS: Jungsau, k. A.: keine Angabe, Pi: Piétrain, DL: Deutsche Landrasse, DE: Deutsches Edelschwein, LY: Landrace-Yorkshire, LD: Landrace-Duroc, BHZP: Bundeshybridzuchtprogramm (Zuchtprogramm der Züchtungszentrale Deutsches Hybridschwein GmbH), PIC: PIC Deutschland GmbH (Zuchtverband), d: Tage, n. u.: nicht untersucht

Auch durch die P-Gehalte im Futter kann die P-Konzentration im Serum beeinflusst werden (KORNEGAY u. THOMAS 1981; KOCH et al. 1984; QIAN et al. 1996; MURRY et al. 1997; SANDS et al. 2001; RUAN et al. 2007).

DREWS et al. (2016) versorgten Mastschweine ($23,31 \pm 2,4$ kg KM zu Versuchsbeginn) mit steigenden Gehalten an verfügbarem Phosphor im Mischfutter (0,10 - 0,34 % aP) und beobachteten nach einer Versuchsdauer von 35 Tagen einen linearen Anstieg der P-Konzentration sowie eine lineare Reduktion der AP-Aktivität im Serum. Die Ca-Konzentration im Serum wurde hingegen nicht beeinflusst. EECKHOUT et al. (1995) stellten ebenfalls einen linearen Anstieg der P-Konzentration im Serum beim Angebot von Mischfuttermitteln mit steigenden P-Gehalten fest. Diese Autoren nutzten für ihre Untersuchung Mastschweine mit einer mittleren Körpermasse von etwa 37 kg zu Versuchsbeginn und entnahmen Blutproben nach fünf resp. elf Wochen unterschiedlicher P-Versorgung. Es wurden drei Mischfuttermittel mit P-Gehalten von 0,36, 0,40 bzw. 0,44 %

geprüft. Auch nach RUAN et al. (2007) hat eine höhere P-Versorgung bis zum Erreichen des optimalen Versorgungsniveaus einen Anstieg der P-Konzentration im Serum zur Folge.

Als Indikator für die P-Versorgung von Schweinen verschiedener Altersgruppen scheint die Serum-P-Konzentration dennoch im Vergleich zu anderen Parametern weniger geeignet zu sein (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985, 1986). Auch Ergebnisse einer Untersuchung von FAMMATRE et al. (1977) deuten dies an. So traten in dieser Studie keine signifikanten Unterschiede in den Ca- oder P-Konzentrationen im Serum infolge unterschiedlicher Ca- und P-Versorgung der Mastschweine auf. Die Ra-Gehalte verschiedener Knochen hingegen stiegen mit zunehmend höherer Mineralstoffversorgung an.

CARTER et al. (1996) wiesen in ihrer Studie mit Absetzferkeln ebenfalls nur eine geringe Korrelation (lineare Korrelationskoeffizienten: 0,15 bzw. -0,22) zwischen den Serum-Konzentrationen von Ca und P und der Ca- und P-Aufnahme bei einer Anhebung der Gehalte im Futter von 0,42 % Ca, 0,35 % P auf bis zu 1,14 % Ca und 0,95 % P nach.

Die Beurteilung der P-Versorgung anhand der Serum- bzw. Plasmakonzentration wird u. a. dadurch erschwert, dass diese neben dem P-Gehalt des Mischfutters auch durch das Ca:P-Verhältnis beeinflusst werden können (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985, 1986; EECKHOUT et al. 1995; QIAN et al. 1996; HAGEMOSER et al. 2000).

Abgesehen vom P-Gehalt und dem Ca:P-Verhältnis im Mischfutter kann auch das Fütterungsmanagement von Bedeutung sein. So sind bei *ad libitum* gefütterten Schweinen höhere P-Konzentrationen im Serum festgestellt worden als bei restriktiv gefütterten Vergleichstieren (DOORNENBAL et al. 1983).

In einer Untersuchung an Ratten, die Mischfuttermittel mit unterschiedlichen P-Gehalten (< 0,05 bzw. 0,6 % P) erhielten, wurde der Einfluss eines Futterentzugs über Nacht auf die P-Konzentration im Serum untersucht. Nur eine Gruppe erhielt die übliche morgendliche Fütterung zwei Stunden vor Durchführung der Blutprobenentnahme; eine weitere Gruppe wurde ohne vorherige Fütterung beprobt. In den Gruppen, die das P-arme MF erhielten, wiesen die nüchternen Tiere signifikant höhere P-Konzentrationen im Serum auf als die gefütterten Tiere. Die Ca-Konzentrationen hingegen waren in diesen Gruppen nach der Fütterung höher. An den ausreichend mit P versorgten Tieren wurden keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Ca- und P-Konzentrationen zwischen der nüchternen und der gefütterten Gruppe festgestellt (FELSENFELD et al. 2000). Auch in früheren

Untersuchungen wurden vergleichbare Beobachtungen gemacht (TALMAGE et al. 1976; BONJOUR et al. 1977; TROHLER et al. 1981).

HAGEMOSER et al. (2000) stellten in der defizitär mit Ca und P versorgten Fütterungsgruppe (0,09 % Ca, 0,37 % P im MF) eine Abnahme der P-Serumkonzentration fest; eine moderate Absenkung des Ca- und P-Gehalts im Mischfutter (0,34 % Ca, 0,55 % P im MF) hatte jedoch verglichen mit der Kontrollgruppe (0,83 % Ca, 0,66 % P im MF) keine geringeren P-Konzentrationen im Serum zur Folge. Parallel zur Reduktion der P-Konzentration stieg die Ca-Konzentration im Serum der defizitär versorgten Tiere auf Werte oberhalb derer der Kontrollgruppe an. Auch andere Autoren beobachteten eine inverse Entwicklung der Ca- bzw. P-Werte im Serum (NIMMO et al. 1980b; MAXSON u. MAHAN 1983; EECKHOUT et al. 1995; QIAN et al. 1996).

In verschiedenen Studien wurden weitere mögliche Einflussgrößen auf die P-Konzentration im Blut untersucht.

An Saugferkeln zeigte sich kein Einfluss einer oralen Vitamin D₃-Supplementierung auf die P-Konzentration im Serum (FLOHR et al. 2014). Auch VON ROSENBERG et al. (2016) stellten an Absetzferkeln keinen Einfluss einer oralen Supplementierung von 25-OH-D₃ in Höhe von 50 - 500 µg/kg auf die P-Konzentrationen im Serum gegenüber der Kontrollgruppe (50 µg Vitamin D₃/kg) fest. Die Mineralisation und Bruchfestigkeit des Femur blieben in dieser Studie ebenfalls unverändert.

Auch der mögliche Einfluss einer Azidierung des Stoffwechsels auf die Ca- und P-Konzentrationen im Blut wurde an verschiedenen Spezies geprüft. Bei Schweinen wurde dabei kein Einfluss der Kationen-Anionen-Bilanz ($\text{meq/kg} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$) des Futters auf die P-Konzentration im Serum festgestellt; die Ca-Konzentration im Serum hingegen stieg durch die verringerte Kationen-Anionen-Bilanz (-35 meq/kg MF) signifikant an (BUDDE u. CRENSHAW 2003). NEWELL und BEAUCHENE (1975) beobachteten tendenziell geringere Ca- und P-Konzentrationen im Serum von Ratten, die eine Ammoniumchlorid-Zulage im Mischfutter erhielten; auch für den Menschen wurden im Zusammenhang mit einer Alkalose oder Acidose Änderungen der Ca- und P-Konzentrationen im Serum berichtet (MOSTELLAR u. TUTTLE 1964; LEMANN et al. 1967).

Zudem können verschiedene pathologische Prozesse die P-Konzentration ggf. beeinflussen. So ermittelten ODINK et al. (1990) reduzierte P-Konzentrationen bei Schweinen mit inflammatorischen Veränderungen im Vergleich zu Tieren ohne auffälligen Schlachtbefund.

Ferner können die Wahl der Blutentnahmetechnik sowie die Erfahrungheit des Probennehmers die Ergebnisse verschiedener Blutparameter, darunter die P-Konzentration im Blut, beeinflussen. DUBREUIL et al. (1990) fanden signifikant geringere P-Serumkonzentrationen nach der Venenpunktion im Vergleich den Werten nach der Entnahme aus einem Venenverweilkatheter. Ebenso stellten die Autoren nach der Probennahme durch einen erfahrenen Untersucher signifikant geringere P-Konzentrationen im Serum fest als nach der Probennahme durch eine unerfahrene Person. Als Ursache vermuteten sie die längere Dauer der Probennahme und des damit einhergehenden Stresses für das Tier.

In hämolytischen Proben ist, bedingt durch den mit der Erythrolyse einhergehenden Austritt von intrazellulärem P ins Serum bzw. Plasma, mit erhöhten P-Konzentrationen und folglich einer Überschätzung der tatsächlichen Werte zu rechnen (LIPPI et al. 2006; HUMANN-ZIEHANK u. GANTER 2012). Zudem stellten GRAFMEYER et al. (1995) eine Beeinflussbarkeit verschiedener Analyseverfahren durch hämolysierte oder trübe Proben fest.

2.3.1.2 Alkalische Phosphatase (AP)

Es können verschiedene organspezifische Isoenzyme von der alkalischen Phosphatase differenziert werden (BOURNE u. MACKINNON 1943; MORTON 1954; HODSON et al. 1962; SUSSMAN et al. 1968; MCKENNA et al. 1979), deren Aktivität im Zusammenhang mit verschiedenen Erkrankungen erhöht sein kann (KAY 1929; ROBERTS 1930). Die Aktivität der AP im Blut unterliegt zudem bei Schweinen einem signifikanten Alterseinfluss (TUMBLESON u. KALISH 1972; DOORNENBAL et al. 1983).

Weiterhin kann dieser Parameter durch die Fütterung beeinflusst werden. Mit steigender P-Versorgung wurde in verschiedenen Untersuchungen bis zum Erreichen des Versorgungsoptimums ein Rückgang der AP-Aktivität im Serum von Schweinen beobachtet (BOYD et al. 1983; KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985, 1986) und auch das Ca:P-Verhältnis vermag die Aktivität der AP im Serum eventuell zu beeinflussen (KOCH u. MAHAN 1986; LEI et al. 1994).

Nach EECKHOUT et al. (1995) stellt die Aktivität der AP im Serum keinen sensitiven Parameter zur Diagnostik eines P-Mangels dar. Die Korrelation dieser Größe mit der

P-Versorgung der Schweine variierte jedoch in Abhängigkeit von der Dauer der geprüften Versorgung (BOYD et al. 1983). So waren die von BOYD et al. (1983) beobachteten Korrelationen an Tag 14 und 21 hoch ($r = -0,996$ bzw. $0,983$).

Aufgrund der geringeren relativen Veränderungen der Aktivität im Serum älterer Schweine, sowie möglicher Überlagerungen von Effekten der P-Versorgung bzw. des Ca:P-Verhältnisses, halten auch KOCH und MAHAN (1986) die AP in dieser Altersgruppe für wenig geeignet zur Beurteilung der P-Versorgung. Nach CARTER et al. (1996) korreliert die Aktivität der AP nicht mit Messungen der Knochenmineralisation und reagierte in den Untersuchungen darüber hinaus nur partiell auf Änderungen der Ca- und P-Versorgung. Auch diese Autoren bewerten andere Parameter als überlegen in der Prädiktion der Knochenmineralisation.

2.3.2 Knochencharakteristika

Knochenuntersuchungen stellen ein in vielen Studien genutztes diagnostisches Mittel zur Beurteilung der P-Versorgung von Schweinen dar. Die am Knochen erhobenen Parameter sind dabei vielfältig. Neben chemischen Analysen zur Beurteilung der Mineralisation anhand der Ra-Gehalte sind verschiedene Methoden zur Bestimmung der Knochendichte in der Tiermedizin etabliert.

Verschiedene Autoren berichten, dass eine maximale Knochenmineralisation im Vergleich zu maximalen KMZ erst mit einer höheren Ca- und P-Versorgung erreicht werden (STOCKLAND u. BLAYLOCK 1973; MAHAN et al. 1980; MAHAN 1982) und somit Knochencharakteristika sensitivere Indikatoren der P-Versorgung repräsentieren als Leistungsparameter (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985).

2.3.2.1 Knochenmaße

Mit zunehmendem Alter und steigender KM weisen verschiedene Körpergewebe bei Schweinen unterschiedliche Wachstumsraten auf. So steigt der Anteil des Fettgewebes, während der relative Anteil der Knochenmasse an der Gesamtmasse des Tieres zurückgeht (GU et al. 1992; GILES et al. 2009).

Auch das Längenwachstum der Knochen verändert sich mit zunehmender Körpermasse. RICHMOND und BERG (1972) ermittelten an Mastschweinen bis zum Erreichen einer KM von 91 kg lineare Längenzunahmen von verschiedenen Knochen; in der sich anschließenden

Schrifttum

Phase bis 114 kg KM wurden dann etwas geringere Wachstumsraten der Knochen festgestellt. An den Diaphysen wurden die deutlichsten Umfangssteigerungen zwischen 23 und 68 kg KM beobachtet. Weiterhin lieferte diese Untersuchung Hinweise auf ein anterior-posteriores Muster des Skelettwachstums. Dies bestätigten auch LIU et al. (1999), die in ihrer Studie am Femur im Vergleich zum Humerus höhere Wachstumsraten nachwiesen. An den weiter distal gelegenen Gliedmaßenknochen Radius bzw. Tibia waren diese Unterschiede zwar tendenziell vorhanden, jedoch nicht signifikant.

Die im Zuge physiologischer Wachstumsprozesse stattfindende Längenzunahme erfolgt an Röhrenknochen in den Epiphysenfugen (PAYTON 1932), wobei innerhalb einzelner Röhrenknochen Unterschiede hinsichtlich der Wachstumsraten der proximalen bzw. distalen Epiphysenfuge bestehen können (PAYTON 1932; FARNUM u. WILSMAN 1989; BREUR et al. 1991).

Eine Übersicht zu den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen bei Schweinen gibt Tabelle 3.

Tabelle 3: Wachstumsraten der proximalen und distalen Epiphysenfugen verschiedener Gliedmaßenknochen bei Schweinen ($\bar{x} \pm s$ bzw. Min.- Max)

Rasse/ Genetik	Alter	Knochen	Epiphyse	Wachstumsrate [$\mu\text{m}/\text{d}$]	Autor
Yucatan- Schwein	21 d	Radius	prox. dist.	155 \pm 8,1 290 \pm 34,9	BREUR et al. (1991)
		Tibia	prox. dist.	390 \pm 33,5 295 \pm 20,7	
Yucatan- Schwein	35 d	Radius	prox. dist.	135 \pm 22,1 235 \pm 37,7	BREUR et al. (1991)
		Tibia	prox. dist.	335 \pm 31,6 225 \pm 37,2	
Yucatan- Schwein	4 Wo	Radius	prox. dist.	136 \pm 14,5 242 \pm 35,4	FARNUM und WILSMAN (1989) ¹
Middle-white large x Berkshire	80 – 279 d	Humerus	prox. dist.	62,9 – 376 21,4 – 174	modifiziert nach PAYTON (1932) ²
		Radius	prox. dist.	21,4 – 174 67,1 – 349	
		Femur	prox. dist.	44,3 – 224 78,6 – 400	
		Tibia	prox. dist.	80,0 – 476 22,9 – 224	

¹6 h nach Beginn der Lichtperiode, ²Originaldaten in mm/Wo, Umrechnung: Wachstumsrate [mm/Wo]*1000/7 (Werte gerundet), Ergebnisse von Tieren bei denen einzelne Wachstumsfugen geschlossen waren, wurden nicht berücksichtigt; Min.: Minimum, Max.: Maximum, d: Tage, Wo: Wochen, prox.: proximal, dist.: distal

MAXSON und MAHAN (1983) untersuchten u. a. den Einfluss einer variierenden Ca- und P-Versorgung (0,40-0,90 % P; Ca:P = 1,3:1) auf die Länge sowie den Diaphysen-Durchmesser und die Kompakta-Dicke von Humerus und Femur wachsender Schweine. Sie nutzten für ihre Untersuchung Schweine mit einer mittleren KM von 18,3 kg zu Versuchsbeginn. Mit dem Erreichen einer mittleren KM von 40 kg sowie zu Versuchsende (57 kg KM) wurden jeweils Knochen von mehreren Tieren entnommen und analysiert. Im Gegensatz zum Diaphysen-Durchmesser und der Kompakta-Dicke wurde die Knochenlänge in dieser Untersuchung nicht von der Mineralstoffversorgung beeinflusst. Die Autoren sehen darin eine Bestätigung dafür, dass das Längenwachstum in der Skelettentwicklung priorisiert wird.

VEUM et al. (2002) stellten bei Absetzferkeln weder am dritten Metakarpalknochen noch am Radius einen Fütterungseinfluss (0,14 - 0,30 % aP im MF) auf die untersuchten Knochenmaße (Länge u. Diaphysen-Durchmesser) fest und in einer Untersuchung von

Schrifttum

CROMWELL et al. (1972) verursachte eine Variation der Ca- und P-Gehalte zwischen 0,50 - 0,95 % bzw. 0,50 - 0,65 % (ab 45,4 kg KM: 0,35 - 0,80 % Ca; 0,40 - 0,50 % P) im Mischfutter bei Mastschweinen (etwa 16,7 - 95 kg KM) ebenfalls weder signifikante Unterschiede in der Länge noch im Außendurchmesser der Metakarpalknochen.

In anderen Untersuchungen hingegen wurde ein Einfluss der Ca- und P-Versorgung von Mastschweinen auch auf die Länge der Metakarpal- bzw. Metatarsalknochen nachgewiesen (COMBS et al. 1991; VEUM u. ELLERSIECK 2008).

CERA und MAHAN (1988) versorgten Mastschweine zweiphasig (etwa 19 - 56 kg bzw. 56 - 95 kg KM) unterschiedlich mit Ca und P (0,52 - 0,80 % Ca; 0,40 - 0,60 % P bzw. 0,45 - 0,65 % Ca; 0,32 - 0,50 % P imMF). Der Außendurchmesser der Femur-Diaphyse wurde von der Höhe der Ca- und P-Versorgung über das Mischfutter nicht signifikant beeinflusst, wies jedoch an den Endmastschweinen gegenüber den jüngeren Tieren signifikant höhere Werte auf. Die Kompakta-Dicke wurde hingegen in beiden Gewichtsklassen, mit 56 kg KM jedoch nur tendenziell, durch die Ca- und P-Versorgung beeinflusst.

Die Kompakta-Dicke verschiedener Knochen (Humerus, MC III, MC IV, Femur, MT IV, Rippe; Daten gepoolt) wurde ebenfalls in einer Untersuchung von CRENSHAW et al. (1981) signifikant durch die höhere Ca- und P-Versorgung (0,4 % Ca; 0,4 % P vs. 0,8 % Ca; 0,8 % P) gesteigert.

Auch CARTER et al. (1996) stellten einen Einfluss der Ca- und P-Versorgung über das Mischfutter auf die Kompakta-Dicke des Femurs fest. Sie versorgten Schweine ($19,5 \pm 1,3$ kg KM) unterschiedlich mit Ca und P (0,44 - 1,07 % Ca; 0,4 - 1,06 % P im MF) und beobachteten einen linearen Anstieg der Kompakta-Dicke (Femur) mit zunehmender Mineralstoffversorgung. Aus ihrer Untersuchung an Ratten schlossen (BAYLINK et al. 1971), dass die P-Mangel bedingte Reduktion der Kompakta-Dicke eine Folge vermehrter endostaler Resorption und reduzierter periostaler Knochenbildung sei.

Ferner müssen eventuelle genetische Einflüsse auf die Knochenmineralisation und -entwicklung berücksichtigt werden. GRANDHI et al. (1986) verglichen die Femora und MT III von Jungsauen und Sauen unterschiedlicher Rassen und stellten in verschiedenen physikalischen, chemischen und mechanischen Eigenschaften der untersuchten Knochen signifikante Unterschiede fest. RICHMOND und BERG (1972) wiesen ebenfalls in Bezug auf

einige Knochenmaße sowohl einen Einfluss der Rasse (Umfang von Radius und Ulna) als auch des Geschlechts (Länge von Scapula, Femur u. Tibia) nach. Die Autoren geben jedoch zu bedenken, dass derartige Einflüsse durch den Effekt einer unterschiedlichen KM überlagert worden sein könnten.

2.3.2.2 Knochendichte

Zur Untersuchung der Knochendichte finden verschiedene Methoden Anwendung. So wurden in vielen Untersuchungen an Schweinen radiologische Verfahren wie die Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) (MURRY et al. 1997; MITCHELL et al. 2001; BUDDE u. CRENSHAW 2003; SCHOLZ et al. 2004; RYAN et al. 2011a; RYAN et al. 2011b; RORTVEDT u. CRENSHAW 2012; WEREMKO et al. 2013; LÉTOURNEAU-MONTMINY et al. 2014; SKIBA et al. 2015) oder die quantitative Computertomographie (qCT) (LIESEGANG et al. 2002a; LIESEGANG et al. 2005; SHAW et al. 2006; BÜHLER et al. 2010; GUTZWILLER et al. 2011; NØRGAARD et al. 2014) eingesetzt; doch auch die Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip stellt eine verbreitete Alternative dar (COALSON et al. 1972; KORNEGAY et al. 1994; EECKHOUT et al. 1995; POINTILLART et al. 1995; GIESEMANN et al. 1998; VARLEY et al. 2011b; VIGORS et al. 2014).

Im Gegensatz zu den zwei erstgenannten Methoden erlaubt die Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip keine *in vivo*-Bestimmung (KEENAN et al. 1997). Ein Vorteil der CT- bzw. DXA-Untersuchung als nicht invasive Methoden liegt folglich in der Möglichkeit repetitiver Messungen an ein und demselben Tier (MURRY et al. 1997; LIESEGANG et al. 2002b; GILES et al. 2009).

KEENAN et al. (1997) verglichen in ihrer Studie die mittels DXA bzw. nach dem Archimedischen Prinzip ermittelten Knochendichten an Femora von Ratten und fanden eine enge Korrelation der Ergebnisse beider Methoden ($R^2 = 0,82$, $p < 0,0001$). Auch mit anderen Knochenparametern (Ra [g], Ca [mg]) korrelierten die Resultate eng. Mit beiden Techniken konnten in dieser Untersuchung signifikante Unterschiede in der Knochendichte zwischen unterschiedlich mit Vit. D versorgten Ratten nachgewiesen werden. Im Vergleich der beiden Methoden wurden unabhängig vom Versorgungsstatus in dieser Untersuchung mit DXA geringere Knochendichten ermittelt.

AIYANGAR et al. (2010) versorgten Absetzferkel (9,2 kg KM) vier Wochen lang mit 70 bzw. 150 % des täglichen Ca-Bedarfs nach den Angaben des National Research Council (NRC) von 1998. Im Anschluss wurde eine Gruppe von Tieren zur Gewinnung der Femora euthanasiert. Die verbliebenen Tiere erhielten dann in einer Cross-over-Studie wiederum 70 bzw. 150 % des täglichen Ca-Bedarfs für weitere sechs Wochen. Nach Beendigung der zweiten Phase wurden von diesen Tieren ebenfalls die Femora gewonnen. Während des Versuchs wurden wiederholt DXA-Scans (whole body) zur Bestimmung des Bone Mineral Content (BMC) sowie der Bone Mineral Density (BMD) durchgeführt; die isolierten Femora wurden mittels qCT analysiert. Die Ergebnisse der DXA-Untersuchungen ließen, im Gegensatz zu den ebenfalls durchgeführten Untersuchungen der Knochenbruchfestigkeit, verringerte BMC der vorübergehend Ca-defizitär versorgten Tiere gegenüber den vollversorgten Tieren erkennen. Zwischen der Bruchfestigkeit der Knochen und der mittels CT bestimmten BMC bzw. dem Knochenvolumen wurden in dieser Studie hohe Korrelationskoeffizienten ($R^2 = 0,78$ bzw. $0,84$) festgestellt. Die Autoren sehen daher in diesen beiden Parametern geeignete nicht-invasive Merkmale zur Beurteilung der Knochenbruchfestigkeit.

Auch ZUMSTEIN et al. (2012) stellten einen signifikanten Zusammenhang zwischen der mittels CT-Osteoabsorptiometrie analysierten Knochenmineralisation und der mechanischen Belastbarkeit von humanen, in Formalin fixierten Humerusköpfen fest (Korrelationskoeffizienten: $0,59 - 0,96$) fest. NIELSEN et al. (2007) fanden eine enge Korrelation zwischen der BMD (DXA) und der Knochenfestigkeit im vierten Metakarpalknochen. Sie sehen daher die Möglichkeit, das Frakturrisiko von Schweinen anhand der BMD abzuschätzen. Der BMC (Photon-Absorptiometrie) erlaubt hingegen laut CRENSHAW (1986) keine sichere Vorhersage der Knochenfestigkeit.

GROLL et al. (1999) führten qCT-Messungen an verschiedenen humanen Knochen durch und berichteten von hoher Präzision und einer guten Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Dies gelte insbesondere für Messungen im kortikalen Knochen (Variationskoeffizienten: $0,4 - 4,3$ %).

Auch LIESEGANG et al. (2002b) nutzten qCT-Messungen zur Beurteilung der Knochendichte. Sie prüften den Einfluss einer P-defizitären Fütterung mit bzw. ohne Fumarsäure-Zusatz zum Mischfutter ($3,1$ bzw. $3,3$ g P /kg MF) auf die Knochendichte

und -zusammensetzung von Absetzferkeln ($10,9 \pm 0,3$ kg KM) im Vergleich zu einer Kontrollgruppe (5,8 g P /kg MF). Sie beobachteten eine signifikante Reduktion des BMC und der BMD in Femur und Tibia gegenüber der Kontrollgruppe. Zudem stellten sie signifikante Korrelationen zwischen den Ra-Gehalten der beiden Knochen und dem BMC bzw. der BMD von Femur und Tibia fest.

In einer Untersuchung von HAGEMOSER et al. (2000) wies die Knochendichte, bestimmt nach dem Archimedischen Prinzip, unter den analysierten Knochenparametern (Dichte; Ra [%]; Ra, Ca u. P [g/ml]) den geringsten Variationskoeffizienten auf. Da dieser Parameter zudem einfach und kostengünstig zu erheben sei, empfahlen die Autoren diese Größe zur Beurteilung der Knochenmineralisation. Aus der Bestimmung der Ca- und P-Gehalte im Knochen resultierte nach Meinung der Autoren unter den Bedingungen dieser Studie kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn gegenüber der Dichtemessung oder der Bestimmung der Ra-Gehalte.

Eine Untersuchung von ZHANG und COON (1997) an Legehennen ergab Hinweise darauf, dass an diesen ausgewachsenen Tieren die Ra-Gehalte je Volumeneinheit Änderungen deutlicher widerspiegeln als die Ra-Gehalte in Relation zur fettfreien TS der Knochen. Die Autoren sehen darin einen möglichen Hinweis darauf, dass Ra und die aschefreien Bestandteile des Knochen in ähnlichem Ausmaß auf- oder abgebaut werden, wodurch sich am Verhältnis dieser beiden Größen zueinander wenig ändere. Sie geben jedoch auch zu bedenken, dass an noch im Wachstum befindlichen Tieren eventuell von anderen Voraussetzungen ausgegangen werden muss.

2.3.2.3 Knochenzusammensetzung

Sowohl die TS- als auch die Rfe-Gehalte in Knochen werden vom Alter der untersuchten Tiere stark beeinflusst (FIELD et al. 1974). Auch die Ra-Gehalte im Knochen variieren in Abhängigkeit vom Alter der untersuchten Tiere (CRENSHAW et al. 1981; MAXSON u. MAHAN 1983) sowie in Abhängigkeit vom jeweils ausgewählten Knochen deutlich (BLAIR et al. 1963; FIELD et al. 1974; KOCH u. MAHAN 1985). Doch nicht nur hinsichtlich verschiedener Knochen bestehen Unterschiede in der Mineralisation, sondern auch verschiedene Lokalisationen innerhalb eines Knochens können unterschiedliche Ra-Gehalte aufweisen; so ist z. B. die Diaphyse gegenüber den Epiphysen stärker mineralisiert (CROMWELL et al. 1972; MAXSON u. MAHAN 1983; GIESEMANN et al. 1998).

In Untersuchungen von CRENSHAW et al. (1981) sowie CRENSHAW (1986) zeigte sich infolge einer Variation der Ca- und P-Versorgung zudem hinsichtlich mehrerer Knochenparameter eine unterschiedliche Reaktion verschiedener Knochen von Schweinen in Abhängigkeit vom Alter der untersuchten Tiere.

Da diverse Knochen auch bei Tieren einer Altersgruppe unterschiedlich stark auf eine Variation der Mineralstoffversorgung mit dem Futter reagieren (CROMWELL et al. 1970; REINHARD et al. 1976; GRANDHI et al. 1986), können nicht alle Knochen als gleichwertig zur Beurteilung der Mineralstoffversorgung angesehen werden (CRENSHAW et al. 2009).

CRENSHAW et al. (1981) empfehlen als Analysenmaterial von jüngeren Schweinen den Femur, den Humerus oder die Rippe, da nur in diesen Knochen bei zwei Monate alten Ferkeln Veränderungen in der Mineralisation infolge einer differierenden Ca- und P-Versorgung festzustellen waren. Der ebenfalls untersuchte Brustwirbel, die Metatarsal- und Metakarpalknochen zeigten in dieser Studie erst bei älteren Schweinen (zwischen drei und fünf Monate) Reaktionen auf verschiedene Ca- und P-Gehalte im Mischfutter (0,41 % Ca; 0,44 % P bzw. 0,82 % Ca; 0,86 % P). Bei sieben Monate alten Schweinen zeigten in dieser Studie nur der Humerus, der dritte und vierte Metakarpal- sowie der dritte Metatarsalknochen und der Wirbel die Variation der Mineralstoffversorgung an.

REINHARD et al. (1976) bewerteten die Metakarpalknochen und die proximale Phalanx als weniger sensitive Marker für die Mineralstoffversorgung (0,65 % Ca u. 0,50 % P; 0,90 % Ca u. 0,70 % P bzw. 1,15 % Ca u. 0,90 % P) im Vergleich zu Rippe, Femur und Nasenmuschel. Für ihre Untersuchung nutzten diese Autoren Eber mit einer KM von etwa 16 - 54 kg.

Im Gegensatz dazu stellten FAMMATRE et al. (1977), trotz übereinstimmender Untersuchungsmethoden, an Tieren mit vergleichbarer Körpermasse (etwa 19 - 52 kg) die deutlichsten Veränderungen durch Steigerung der Ca- und P-Versorgung in einem ebenfalls vergleichbaren Maß (0,90 % Ca, 0,70 % P; 0,65 % Ca, 0,50 % P) in den Rohaschegehalten der Rippe und der proximalen Phalanx fest. Die ebenfalls untersuchten Knochen Femur und MC IV zeigten weniger ausgeprägte Reaktionen auf die Variation der Mineralstoffversorgung über das Mischfutter; der Ra-Gehalt in den Nasenmuscheln zeigte keine Unterschiede zwischen den geprüften Versorgungsniveaus. Die Autoren schlussfolgerten daher, dass die

Rippe, die proximale Phalanx und der Femur für die Beurteilung der Mineralstoffversorgung eher geeignet seien als die Metakarpalknochen und die Nasenmuscheln.

Aus ihren Untersuchungen an Mastschweinen (20 - 50 kg KM) leiteten KETAREN et al. (1993) ab, dass der Ra-Gehalt von Radius/Ulna bzw. der Ra- und P-Gehalt des Leerkörpers eine größere Sensitivität gegenüber Veränderungen der P-Versorgung über das Mischfutter (1 - 4 g aP/kg) aufwiesen als beispielsweise das Biegemoment von MC IV und MT IV, die Knochenmassen oder die TS- und Ra-Gehalte und –Mengen. Mit Ausnahme der Metakarpalknochen (MT IV), deren Ra-Gehalt eine lineare Zunahme zeigte, wiesen die Ra-Gehalte in allen anderen untersuchten Knochen (Scapula, Humerus, Radius/Ulna, Brustwirbel, Rippe, Sternum, Coxae, Femur, Tibia/Fibula, MT IV) mit zunehmenden aP-Gehalten im Mischfutter einen quadratischen Anstieg auf. Die Variation des Ca:vP-Verhältnisses (1,7 - 2,9:1) beeinflusste die Ra-Gehalte in keinem der untersuchten Knochen.

In einer Untersuchung an Absetzferkeln (Ausgangskörpermasse: 8,7 kg) stellten KOCH et al. (1984) hingegen nach 35-tägiger Versuchsdauer mit unterschiedlicher P-Versorgung (0,23 - 0,55 % P im MF) an allen untersuchten Knochen (Humerus, MC III, Femur, MT III) ein vergleichbares Ausmaß der Reaktionen (u. a. Biegemoment von MC IV und MT IV, Ra-Gehalt und –Menge) fest. Die Autoren empfehlen daher die Analyse der Metakarpal- bzw. Metatarsalknochen zur Beurteilung der P-Versorgung, da die Entfernung dieser Knochen einfach vorzunehmen sei und nur einen geringen Wertverlust der Karkasse verursache.

In einer weiteren Untersuchung an älteren Schweinen mit etwa 65 - 95 kg KM (KOCH u. MAHAN 1986) wurden durch eine höhere P-Versorgung mit dem Mischfutter (0,09 - 0,31 % P) an allen vier untersuchten Knochen (Hum, MC III, Fem, MT III) Effekte auf die Knochenrohaschegehalte nachgewiesen. Am deutlichsten ausgeprägt waren diese jedoch an den großen Röhrenknochen.

Innerhalb der Röhrenknochen sind verschiedene Knochenanteile nicht nur unterschiedlich stark mineralisiert (s. o.), sondern zeigen einen Mineralstoffmangel auch mit unterschiedlicher Sensitivität an. Verschiedene Autoren stellten an Schweinen – durch separate Veraschung von Dia- bzw. Epiphyse – unterschiedliche Reaktionen an den verschiedenen Lokalisationen fest (CROMWELL et al. 1972; MAXSON u. MAHAN 1983;

POINTILLART et al. 1987; POINTILLART 1991; POINTILLART et al. 2000). Die Rohaschegehalte in den Epiphysen reagierten sensitiver auf Variationen in der Mineralstoffversorgung. SEBASTIAN et al. (1996) stellten bei Broilern an den Tibiae ebenfalls eine deutlichere Reduktion der Rohaschegehalte in den Epiphysen im Vergleich zu den entsprechenden Gehalten in der Diaphyse fest.

Aus den Ergebnissen autoradiographischer Studien wurde abgeleitet, dass die metabolische Aktivität in der Diaphyse geringer sei als in den proximalen bzw. distalen Lokalisationen der langen Röhrenknochen (POND et al. 1969; KRUSEMARK et al. 1974) und auch Untersuchungen des intraossealen Blutflusses mittels radioaktiver Mikrosphären-Untersuchungen bei Schweinen zeigten höhere Flussraten in epi- bzw. metaphysären Knochenanteilen (NAKANO et al. 1986).

BAUER et al. (1929) schlussfolgerten aus ihren Untersuchungen, dass insbesondere trabekulärer Knochen als schnell verfügbarer Ca-Speicher diene, wohingegen die Diaphysen vorwiegend statische Funktionen hätten. Die dortigen Reserven würden erst in Situationen außergewöhnlichen Bedarfs mobilisiert.

Vereinzelt wurde beobachtet, dass nach einer geringen P-Versorgung während der Versuchsphase die zu Versuchsende untersuchten Tiere geringere Rohaschegehalte in den untersuchten Knochen aufweisen können als jüngere Vergleichstiere, die zu Versuchsbeginn untersucht wurden. So ermittelten HOPPE et al. (1993) in ihrer Studie an Absetzferkeln, die während der 42-tägigen Versuchsdauer ein Mischfutter ohne P- und Phytase-Zusatz erhielten (analyisierte Gehalte: 6,2 g Ca/kg; 4,2 g P/kg; Phytaseaktivität: < 50 U/kg) signifikant geringere Rohaschegehalte in der Phalanx I im Vergleich zu den zu Versuchsbeginn untersuchten Tieren (30 % vs. 40,5 % der TS). Bewegungsstörungen wurden in dieser Studie an keinem der Tiere beobachtet.

KOCH et al. (1984) machten, ebenfalls an Absetzferkeln, vergleichbare Beobachtungen. Zu Versuchsbeginn (8,7 kg KM) wurden in dieser Studie die mechanischen Eigenschaften von MC IV u. MT IV (Biegemoment) und die chemische Zusammensetzung des Humerus, des Femur sowie der Metakarpal- und Metatarsalknochen von repräsentativ ausgewählten Ferkeln untersucht. Die weiteren Tiere wurden über das Mischfutter unterschiedlich mit P versorgt (0,23 %, 0,35 % bzw. 0,55 % tP; Ca:P-Verhältnis jeweils 1:1, 1,5:1 oder 3:1). Nach der

Versuchsdauer von 35 Tagen wurden auch von diesen Tieren die beschriebenen Knochenparameter analysiert. Die Autoren stellten bei den Tieren, die das Mischfutter mit dem P-Gehalt von 0,23 % erhalten hatten, am Humerus, am Femur und am MT III einen Rückgang der absoluten Ra-Mengen (Differenz der zu Versuchsbeginn bzw. -ende ermittelten Werte) fest. Sie deuteten dies als einen Hinweis darauf, dass eine Mobilisation von Ca und P aus dem Knochengewebe stattgefunden habe.

In weiteren Studien wurde u. a. ein möglicher Einfluss des Ca:P-Verhältnisses im Futter auf verschiedene Knocheneigenschaften untersucht.

KOCH et al. (1984) stellten an Absetzferkeln (Ausgangskörpermasse: 8,7 kg) keinen Einfluss des Ca:P-Verhältnisses im Mischfutter auf den Ra-Gehalt in verschiedenen Knochen fest. In einer Studie von EECKHOUT et al. (1995) galt dies nur für die Gruppen, denen Mischfuttermittel mit nahezu bedarfsdeckendem P-Gehalt (0,44 % tP) angeboten wurden; bei geringer P-Versorgung (0,36 % tP) hingegen hatte ein zunehmend weiteres Ca:P-Verhältnis (1,50 - 2,61:1) eine Reduktion der Knochenmineralisation (Ra [g] von MC III u. MC IV, Ra [g/100 cm³] in MC IV). Im Gegensatz zu der zuvor genannten Untersuchung von KOCH et al. nutzten EECKHOUT et al. (1995) für ihre Studie ältere Mastschweine mit einer Körpermasse zwischen etwa 37 und 100 kg. QIAN et al. (1996) stellten an Absetzferkeln (9,3 kg KM) eine Veränderung in den Ergebnissen verschiedener Knochenparameter mit weiter werdendem Ca:P-Verhältnis (1,2 - 2,0:1) fest. So beobachteten diese Autoren sowohl an der zehnten Rippe als auch am MC IV eine lineare Reduktion ($p < 0,001$) der Scherkraft, -energie und -spannung sowie der Ra-Gehalte mit zunehmender Ca:P-Relation. GUTZWILLER et al. (2014) berichteten demgegenüber von positiven Effekten eines weiten Ca:P-Verhältnisses (1,9:1; 0,57 bzw. 0,77 % Ca u. 0,4 % P im MF) auf die Knochenmineralisation bei Absetzferkeln (9,7 kg KM). Da dies jedoch mit negativen Auswirkungen auf die Leistung einherging, sehen die Autoren keinen Nutzen eines weiten Ca:P-Verhältnisses im Mischfutter unter Praxisbedingungen. Aus einer Metaanalyse zur P-Verwertung fassten LÉTOURNEAU-MONTMINY et al. (2012) zusammen, dass steigende Ca-Gehalte im Mischfutter mit geringen Anteilen an Nicht-Phytin-Phosphor (NPP) die P-Retention von Schweinen negativ beeinflussen, wohingegen höhere Ca-Gehalte in Mischfuttermitteln mit hohem NPP-Anteil die P-Retention steigern. Die Autoren begründeten dies damit, dass Ca und P im Körper vor

allem im Knochengewebe vorkommen (ca. 96 – 99 % des Ca bzw. 70 – 80 % des P) und dort in Form von Hydroxylapatit gespeichert werden. Da die übrigen 20 – 30 % des P im Körper vorwiegend im Weichteilgewebe enthalten sind, sei die Entwicklung dieses Gewebetyps hauptsächlich von der P-Versorgung abhängig. Für die Knochenmineralisation bestehe dem gegenüber ein besonderer Bedarf an Ca und P. Die Retention dieser beiden Elemente erfolgt daher stets in einem gegebenen Verhältnis.

Neben der Mineralstoffversorgung kann auch der Einsatz bestimmter Futtermittelzusatzstoffe einen Effekt auf bestimmte Knochenparameter haben. So wurde wiederholt die Wirkung verschiedener organischer Säuren auf die Knochenmineralisation untersucht.

In einer Studie von BOLING et al. (2000) führte Zitronensäure in Dosierungen von 3 sowie 6 % bei Ferkeln (etwa 10 - 11 kg KM) zu höheren Ra-Gehalten in den Metatarsalknochen ($p < 0,08$), wenn diese zu einem P-defizitären Mischfutter hinzugefügt wurde. Die Autoren erklärten dies mit der höheren Verwertung von Phytin-P durch den Zitronensäure-Zusatz. Im zweiten Teil der Studie wurden geringere Dosierungen der Zitronensäure (1 - 3 %) eingesetzt, die jedoch keinen Einfluss auf die Mineralisation der Tibiae erkennen ließen. Insgesamt beobachteten die Autoren bei Schweinen geringere Effekte als bei Hühnern, an denen in einem weiteren Versuchsteil ebenfalls der Einfluss verschiedener Zitronensäure-Dosierungen untersucht wurde.

Nach BUDDE und CRENSHAW (2003) beeinflusste der 13 bis 17-tägige Einsatz eines azidierend wirkenden Mischfutters ($-35 \text{ meq/kg} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$) den BMC (DXA) von Absetzferkeln nicht. Auch die weiteren untersuchten Knochenparameter lieferten keine Hinweise auf eine Beeinträchtigung der Knochenentwicklung durch die Einwirkung der negativen Kationen-Anionen-Bilanz. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch KORNEGAY et al. (1994), die den Einfluss des Säuregehalts auf die untersuchten Knochenparameter als minimal bewerten.

Als Langzeiteffekt (36 - 113 kg KM) einer Supplementierung des Mischfutters mit Benzoesäure oder CaCl_2 stellten NØRGAARD et al. (2014) hingegen Auswirkungen auf verschiedene Knochencharakteristika fest. Doch auch diese Autoren gehen nicht von einer schwerwiegenden Beeinträchtigung der Knochenfestigkeit aus. Nach ihrer Meinung könne

lediglich die kombinierte Langzeitfütterung beider Stoffe in dieser Hinsicht ein Risiko darstellen.

BÜHLER et al. (2010) raten davon ab, Benzoesäure in Mischfuttermitteln mit geringem P-Gehalt ohne Phytase-Zusatz einzusetzen, da diese Kombination in ihrer Studie, vorwiegend an den jüngeren Tieren (etwa 25,2 - 66,0 kg KM), zu nachteiligen Effekten in Bezug auf die Knochenzusammensetzung und-stabilität führte. Die Autoren betonen, dass Benzoesäure – im Gegensatz zu allen anderen organischen Säuren, die in der Fütterung von Schweinen zum Einsatz kommen – durch Hippursäure als Metaboliten den Harn-pH senke. Dies habe eine erhöhte Ca-Exkretion mit dem Harn zur Folge und könne somit zu reduzierten Ca-Gehalten im Knochen führen, wie sie es in den Metatarsalknochen der jüngeren Tiere beobachteten.

In einer Studie von GUTZWILLER et al. (2014) an Absetzferkeln reduzierte der Benzoesäure-Zusatz zwar den pH-Wert im Urin, beeinträchtigte jedoch weder die Bruchfestigkeit noch die Mineralisation der Tibia.

In vitro (Osteoblastenkultur) ließen sich infolge der Absenkung des pH-Wertes durch Zugabe von HCl auf bis zu 6,9 eine verringerte Mineralisation der extrazellulären Matrix sowie eine vermehrte Osteoklastenaktivität beobachten (BRANDAO-BURCH et al. 2005).

Dem eventuellen Einfluss des Geschlechts auf die chemische Zusammensetzung von Schweineknöcheln widmeten sich mehrere Studien. CRENSHAW et al. (1981) ermittelten nur tendenziell höhere Ra-Gehalte in den Knochen von Jungsaunen und Börgen gegenüber denen von Ebern; sie stellten jedoch keinen signifikanten Geschlechtseinfluss fest. KORNEGAY und THOMAS (1981) berichteten ebenfalls von höheren Ra-Gehalten in den Knochen von Jungsaunen im Vergleich zu gleichalten männlichen Schweinen. Demgegenüber wurden von HINSON et al. (2009) zwischen Jungsaunen und Börgen keine Unterschiede in den Ergebnissen verschiedener Knochenparameter (u. a. Ra-Gehalt und Bruchfestigkeit von Metakarpal- und Metatarsalknochen) festgestellt.

Auch genetische Einflüsse sollten bei der Beurteilung von Knochenparametern ggf. Berücksichtigung finden. Nach NIMMO et al. (1980a) ist zwar nicht von einem Einfluss der Genetik auf verschiedene Knochenparameter auszugehen, doch GRANDHI et al. (1986) stellten im Gegensatz dazu in einigen Knochenmaßen sowie in einigen chemischen und

Schrifttum

mechanischen Charakteristika signifikante Unterschiede zwischen Sauen der Rassen Lacombe und Yorkshire fest.

3 Material und Methoden

Nachfolgend werden der Ablauf der vorliegenden Untersuchung sowie die durchgeführten Probenahmen und Analysen detailliert beschrieben.

3.1 Versuchsziel

Da eine moderne Nutztierhaltung nicht nur ökonomischen Zielen folgt, sondern verstärkt auch ökologische Belange berücksichtigen muss, sind von verschiedenen Seiten Bemühungen um eine Reduktion der P-Zufuhr mit dem Futter erkennbar.

In der Schweinefütterung werden heutzutage routinemäßig Phytasen eingesetzt, da diese den für Monogastrier kaum verfügbaren Phytin-P aus pflanzlichen Quellen spalten und somit, trotz gleichbleibender Gehalte an verdaulichem Phosphor, eine Reduktion des Gesamt-P-Gehalts im Futter erlauben (HARPER et al. 1997). Mit dem Proteincharakter der Phytase erklären sich jedoch auch Risiken; so kann die Enzymaktivität beispielsweise durch thermische Einflüsse während der Produktion oder durch pH-Werte, die außerhalb des Optimalbereichs des Enzymes liegen, reduziert sein (JONGBLOED u. KEMME 1990; SIMONS et al. 1990). Wird vollständig auf den Zusatz von anorganischem Phosphor im Mischfutter verzichtet und werden dann die unterstellten Phytaseaktivitäten nicht erreicht, so besteht die P-Versorgung hauptsächlich aus Phytin-P mit geringer Verdaulichkeit, sodass Risiken für die Skelettgeseundheit von Schweinen unabweisbar sind.

Mit den im Rahmen des vorliegenden Dissertationsvorhabens durchgeführten Versuchen sollten modellhaft die Auswirkungen einer variierenden P-Versorgung (drei unterschiedliche Konzepte) auf ausgewählte Charakteristika der Knochenentwicklung und -mineralisation an wachsenden Schweinen unterschiedlichen Alters untersucht werden.

Durch das Angebot von drei unterschiedlichen MF-Varianten sollten verschiedene, der Fütterungspraxis entsprechende Strategien zur P-Versorgung simuliert werden:

- Kontrollgruppe (K): MF **mit** anorg. P und **mit** Phytase-Zusatz ($P_i +$; Phyt +)
- Versuchsgruppe 1 (V1): MF **ohne** anorg. P, aber **mit** Phytase-Zusatz ($P_i -$; Phyt +)
- Versuchsgruppe 2 (V2): MF **ohne** anorg. P und **ohne** Phytase-Zusatz ($P_i -$; Phyt -)

Die Versorgung der Kontrollgruppe mit anorganischem P (P_i) und Phytase-Zusatz sollte eine optimale/zumindest physiologische Knochenentwicklung und -mineralisation erlauben, um

die Untersuchungsergebnisse dieser Tiere als Beurteilungsmaßstab/zum Vergleich heranziehen zu können. Auch der MF-Variante von Versuchsgruppe 1 war eine Phytase zugesetzt, im Unterschied zur Kontrollgruppe wurde hier jedoch kein P_i ergänzt. Dies entspricht einer Fütterung, wie sie heute in der Mittel- und Endmast von Schweinen sehr üblich ist (Verzicht auf anorganische P-Verbindungen). Die Versuchsgruppe 2 steht für ein „worst case-Szenario“, das sich ergeben kann, wenn man allein auf die Phytasewirkung setzt, und die Aktivität des Enzyms aufgrund widriger Umstände (therm. Einflüsse) verloren ging.

In zwei Versuchsdurchgängen sollte der Einfluss einer solchen Fütterung an Schweinen unterschiedlicher KM-Bereiche untersucht werden. Im ersten Durchgang wurde zu diesem Zweck eine unterschiedliche P-Versorgung von Ferkeln in der **Aufzucht** (etwa 15 - 35 kg KM) geprüft, während im zweiten Durchgang Schweine in der **Mast** (Beginn mit etwa 30 kg KM; Ende mit etwa 45, 65 bzw. 95 kg KM) genutzt wurden.

Im Fokus der Versuche stand die Untersuchung unterschiedlicher Knochencharakteristika (Knochenmaße, -massen und -dichten; chemische Zusammensetzung) mittels verschiedener chemischer und physikalischer Verfahren. Auch grundlegende Daten zur Leistung (Körpermassenzunahme, Futtermittelverbrauch- und aufwand) wurden erfasst. Zudem erfolgte eine enge Überwachung des klinischen Allgemeinzustands der Tiere, sodass eine Beurteilung auch unter klinischen Aspekten erfolgen konnte. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass nicht alle Knochen bzw. Knochenanteile auf einen Mineralstoffmangel gleich schnell bzw. deutlich reagieren (CROMWELL et al. 1972; CRENSHAW et al. 1981; MAXSON u. MAHAN 1983), und die Reaktionen zudem zu verschiedenen Zeitpunkten in der Entwicklung der Tiere variieren (CRENSHAW et al. 1981), erfolgte auch eine vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Knochen(-anteile) von Tieren verschiedener Alters-/Gewichtsklassen.

Ziel der vergleichenden Anwendung unterschiedlicher analytischer Ansätze und der damit einhergehenden Erfassung vielfältiger Parameter an ein und demselben Knochen war es, eventuelle Unterschiede bezüglich der Sensitivität verschiedener Verfahren zur Beurteilung der P-Versorgung herauszuarbeiten. Die Ergebnisse sollten schließlich einen Beitrag zur Etablierung sensitiver Verfahren für die Diagnostik eines P-Mangels bei Schweinen mit unterschiedlicher Körpermasse leisten und Orientierungswerte für wesentliche Kenngrößen der Knochenentwicklung und -zusammensetzung liefern; nicht zuletzt für den Fall, dass nur einzelne Knochen von seziierten Tieren zur Verfügung stehen.

3.2 Versuchsablauf

Die im Rahmen des vorliegenden Dissertationsvorhabens durchgeführten Untersuchungen an Schweinen wurden vom Niedersächsischen Landesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (LAVES) genehmigt (Az.: 33.19-42502-04-15/2061).

Die Untersuchung gliederte sich in zwei aufeinanderfolgende Durchgänge, in denen der Einfluss einer variierenden P-Versorgung auf verschiedene Knochenparameter von Schweinen mit unterschiedlichen Körpermassen näher geprüft werden sollte. Zu diesem Zweck wurden 12 bzw. 36 Tiere mit einer Körpermasse von etwa 15 bzw. 30 kg auf drei verschiedene Fütterungsgruppen aufgeteilt. Dabei erhielt die Kontrollgruppe (**K**: $P_i +$ | Phyt +) ein Mischfutter, das sowohl anorganischen P (P_i) als auch einen Phytase-Zusatz enthielt (MF-K). Der Versuchsgruppe 1 (**V1**: $P_i -$ | Phyt +) wurde die gleiche Mischung jedoch ohne einen Zusatz von anorganischem P vorgelegt (MF-V1). Die Versuchsgruppe 2 (**V2**: $P_i -$ | Phyt -) erhielt weder anorganischen P noch einen Phytase-Zusatz zum sonst identischen Mischfutter (MF-V2).

Beide Durchgänge waren in eine Adaptationsphase und eigentliche Versuchsphase, die durch das ausschließliche Angebot der drei verschiedenen MF-Varianten gekennzeichnet war, gegliedert.

Als Versuchsbeginn (d0) wurde der Tag der Umstellung der Fütterung auf die unterschiedlichen MF-Varianten definiert. Um eine schrittweise Futterumstellung zu ermöglichen, ohne jedoch schon während der Adaptationsphase eine unterschiedliche P-Versorgung zu verursachen, wurden während der Adaptationsphase alle Gruppen mit der MF-Variante der Kontrollgruppe versorgt. Dies wurde zunächst über mehrere Tage mit dem zuvor während der Aufzucht gefütterten Mischfutter ($FAZ_{\text{vor VB}}$) verschnitten, bevor allen Gruppen an d-1 zu 100 % das Kontrollmischfutter vorgelegt wurde.

Um vor Versuchsbeginn (d-1) Ausgangswerte für die Knochenparameter zu generieren, wurden in beiden Durchgängen jeweils vier Tiere zu diesem Zeitpunkt euthanasiert (Gruppe Versuchsbeginn, VB) und Blutproben von allen Tieren entnommen.

Eine Übersicht zum zeitlichen Ablauf beider Durchgänge geben die Abbildungen 1 und 2.

Material und Methoden

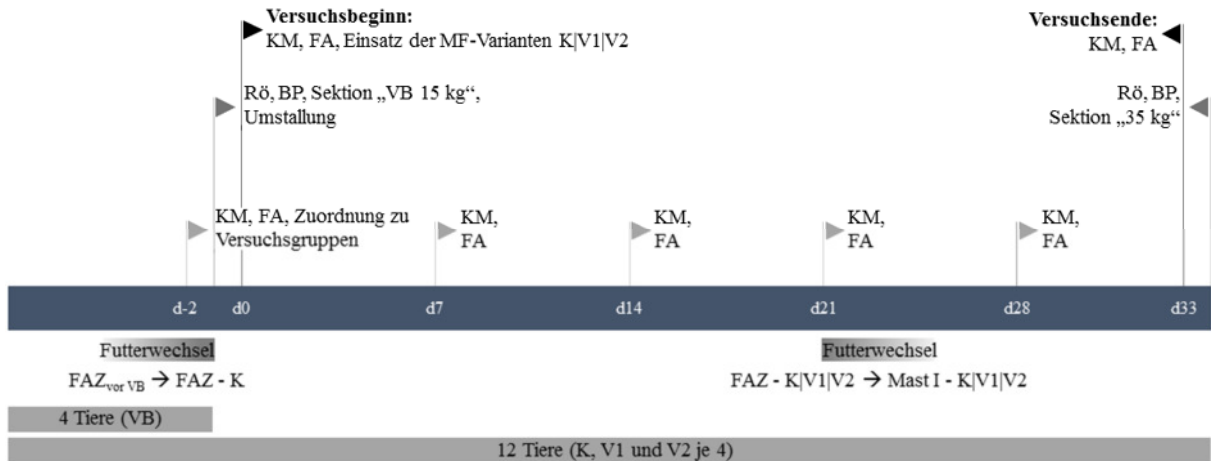


Abbildung 1: Versuchsablauf im Durchgang 1 (Tiere in der Ferkelaufzucht: ca. 15 - 35 kg KM)

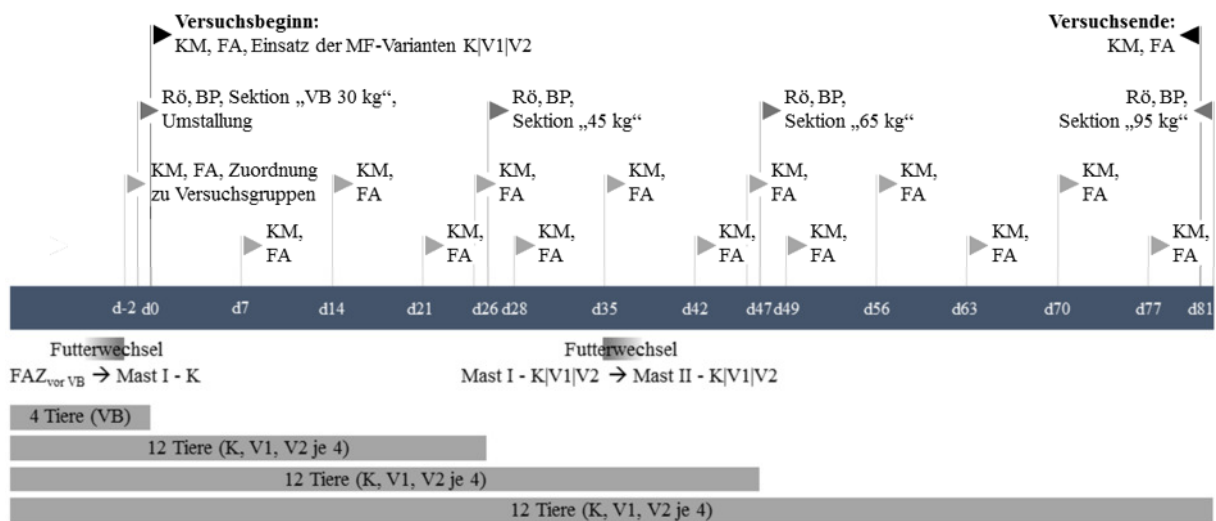


Abbildung 2: Versuchsablauf im Durchgang 2 (Tiere in der Mast: ca. 30 - 95 kg KM)

Legende für die Abbildungen 1 und 2

- BP Blutprobenentnahme
- FA Futteraufnahme
- KM Körpermasse
- Rö Röntgen
- VB Versuchsbeginn

Durchgang 1

Abgesehen von den Tieren der Gruppe VB wurden im ersten Durchgang alle Tiere (n = 12) mit Erreichen einer Körpermasse von etwa 35 kg euthanasiert. Tabelle 4 gibt eine Übersicht zur Gruppeneinteilung im Durchgang 1.

Tabelle 4: Gruppeneinteilung sowie die Tieranzahl (n) und die Zielkörpermassen zum Zeitpunkt der Sektion im Durchgang 1

KM [kg]	Kontrollgruppe		Versuchsgruppe 1		Versuchsgruppe 2		gesamt
	P _i +	Phyt +	P _i -	Phyt +	P _i -	Phyt -	
15			4				4
35		4	4		4		12
							16

P_i: anorganischer Phosphor, Phyt: Phytase

Durchgang 2

Im Durchgang 2 wurden jeweils vier Tiere pro Fütterungsgruppe mit Erreichen einer mittleren Körpermasse aller zu den jeweiligen Zeitpunkten noch im Versuch verbliebenen Tieren von etwa 45, 65 bzw. 95 kg euthanasiert. Einen Überblick zu der Gruppeneinteilung sowie zu der Tierzahl in den Gruppen und der angestrebten KM-Entwicklung bis zum Zeitpunkt der Sektion im zweiten Durchgang gibt Tabelle 5.

Tabelle 5: Gruppeneinteilung sowie die Tieranzahl (n) und die Zielkörpermassen zu den verschiedenen Sektionszeitpunkten im Durchgang 2

KM [kg]	Kontrollgruppe		Versuchsgruppe 1		Versuchsgruppe 2		gesamt
	P _i +	Phyt +	P _i -	Phyt +	P _i -	Phyt -	
30			4				4
45		4	4		4		12
65		4	4		4		12
95		4	4		4		12
							40

P_i: anorganischer Phosphor, Phyt: Phytase

3.3 Tiere und Haltung

Die Auswahl der für die beiden Durchgänge bestimmten Tiere sowie die Haltung während der Versuchsphasen (Feb. - März bzw. Mai - Aug. 2016) sind im Folgenden näher beschrieben.

3.3.1 Tiere

Für die im Rahmen des vorliegenden Dissertationsvorhabens durchgeführten Untersuchungen wurden in zwei Versuchsdurchgängen insgesamt 56 abgesetzte Ferkel bzw. Mastschweine verwendet, von denen jeweils die Hälfte der Tiere weiblich bzw. männlich kastriert war.

Durchgang 1

Aus vier Würfen (JSR x Piétrain Top Vital) wurden 44 Ferkel am 28. bzw. 30. LT mit einer durchschnittlichen Körpermasse von $9,41 \pm 1,53$ kg abgesetzt, gewogen und geimpft (Porcilis® PCV M Hyo; Fa. Intervet International B.V., AN Boxmeer, Niederlande; Dosierung: 2 ml i. m.). Von diesen Tieren wurden 16 Ferkel mit mittleren Körpermassen ausgewählt. Neben den Abweichungen der Körpermassen vom Mittelwert aller Ferkel wurden das Geschlecht sowie eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Würfe als Kriterien zur Auswahl der Tiere für das Versuchsvorhaben berücksichtigt. Im Anschluss erfolgte die Umstallung der ausgewählten Ferkel aus der Abferkelbucht in den Versuchsstall.

Durchgang 2

Es wurden 40 Mastläufer (BHZP-Linie db.Viktoria x Piétrain) aus einem Ferkelerzeugerbetrieb in Niedersachsen mit einer mittleren Körpermasse von 24,6 kg (errechnet: $\text{mittlere KM [kg]} = \frac{\text{Gesamtmasse aller Tiere [kg]}}{\text{Anzahl der Tiere}}$) sechs Tage vor Versuchsbeginn (d-6) eingestallt. Eine aktive Immunisierung gegen PCV-2 und *Mycoplasma hyopneumoniae* erfolgte durch intramuskuläre Injektion von Porcilis® PCV M Hyo (Fa. Intervet International B.V., AN Boxmeer, Niederlande; Dosierung: 2 ml i. m.) im Herkunftsbetrieb in der vierten Lebenswoche. Abgesetzt wurden die Ferkel in diesem Betrieb nach fünfwöchiger Säugezeit.

3.3.2 Haltung

Für die Haltung der drei Versuchsgruppen in beiden Durchgängen standen drei nahezu baugleiche Abteile (4,85 m x 2,5 m) in einem Stallgebäude der Klinik für kleine Klauentiere, Forensische Medizin und Ambulatorische Klinik zur Verfügung (s. Abbildung 3). Die Tiere wurden dort während der Versuchsphasen in Gruppen auf Stroheinstreu gehalten, wobei die endgültige Aufteilung der Tiere auf die verschiedenen Abteile in beiden Durchgängen erst kurz vor Versuchsbeginn (d -1, s. Abbildung 1 bzw. 2) erfolgte, um eine vergleichbare durchschnittliche Körpermasse der Tiere aus den verschiedenen Gruppen zu Versuchsbeginn zu gewährleisten.

Die Raumtemperatur in jedem Abteil wurde während der Versuchszeiträume mit einem in etwa 120 cm Höhe frei im Raum hängenden Datenlogger (EBI 20, Fa. Xylem Analytics Germany Sales GmbH & Co. KG, Weilheim) halbstündlich erfasst und betrug während der Versuchsphase im Mittel etwa 20 – 21 °C (DG 1) bzw. 22,5 – 23,5 °C (DG 2). Die minimal bzw. maximal in den einzelnen Abteilen erreichten Temperaturen sind in Tabelle 60 dargestellt.

Durchgang 1

Im ersten Durchgang waren bis zum Versuchstag 13 zwei Infrarotlampen (Hersteller unbekannt) je Abteil in einer Höhe von etwa 120 cm im Liegebereich der Ferkel installiert. Es erfolgte eine tägliche Reinigung der Abteile mit Erneuerung der Stroheinstreu. Ab d23 wurde auf eine nasse Reinigung des Stallbodens verzichtet.

Durchgang 2

In allen drei Abteilen standen ab dem 7. VT die Außentüren des Stalls aufgrund hoher Außentemperaturen während des Versuchszeitraumes permanent offen. Die Stallabteile wurden täglich entmistet und die entfernte Einstreu durch frisches Stroh ersetzt.

Material und Methoden

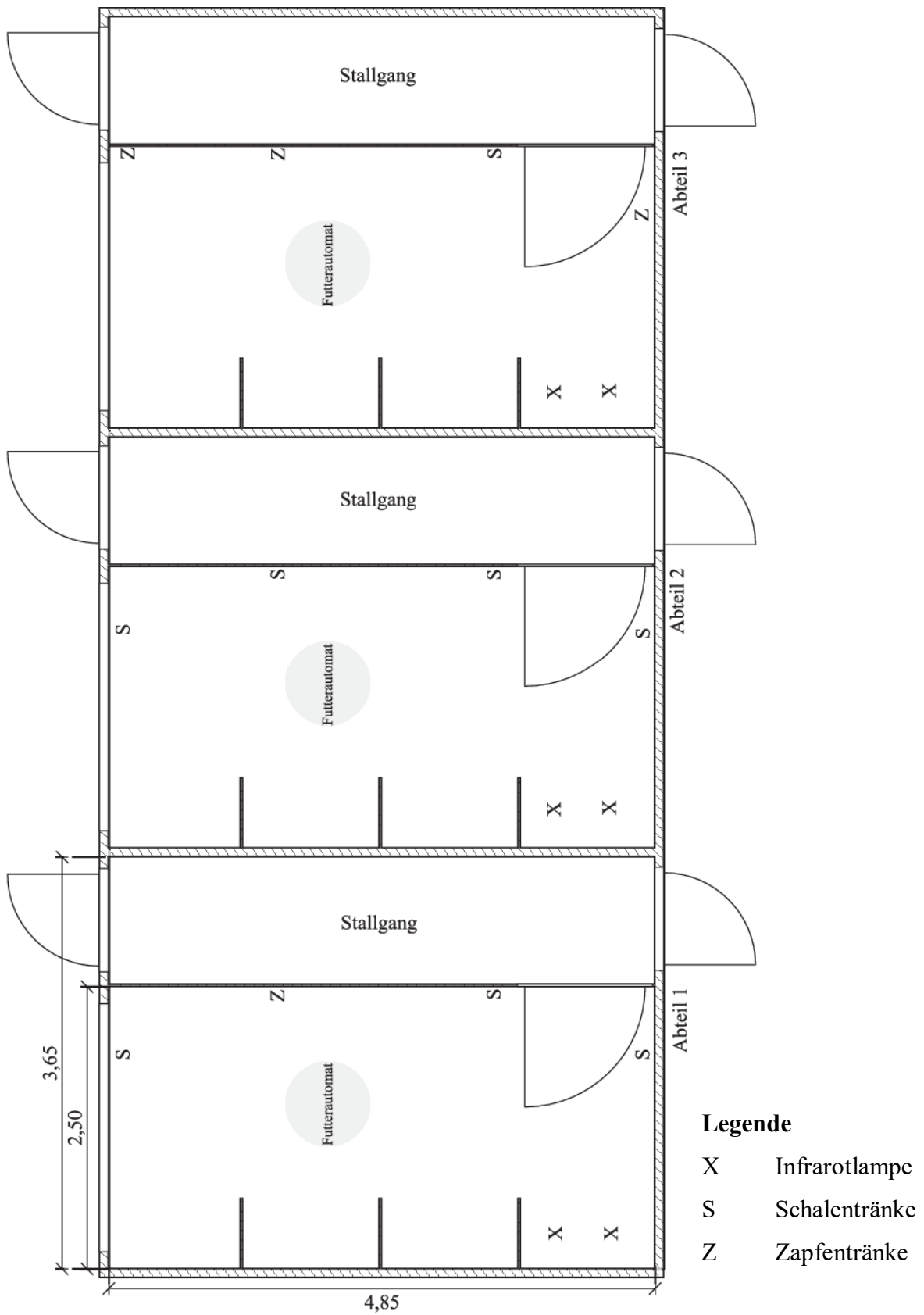


Abbildung 3: Grundriss der drei Stallabteile, Angaben in m

3.4 Mischfutter und Fütterung

Die Fütterung erfolgte ebenso wie die Wasserversorgung über die gesamte Versuchsdauer hinweg *ad libitum*. Zu diesem Zweck stand je Abteil ein Trockenfutterautomat zur Verfügung, aus dem die Tiere das schrotförmige Mischfutter durch Rotation entnehmen konnten. Die Wasserversorgung (öffentliche Wasserversorgung Hannover) wurde über Schalen- bzw. Zapfentränken gewährleistet. Es standen durchweg mindestens zwei Tränken pro Abteil (= maximal 12 Tiere) zur Verfügung.

Die Durchflussraten der einzelnen Tränken wurden jeweils wenige Tage vor Versuchsbeginn ermittelt und entsprachen den Anforderungen der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG; RUDOVSKY 2008). Die Anordnung der Tränken innerhalb der Stallabteile geht aus Abbildung 3 hervor.

Die Art des Mischfutters unterschied sich in den einzelnen Phasern, wobei Futterumstellungen durch stufenweises Verschneiden der betreffenden MF über mehrere Tage vorgenommen wurden. Während des ersten Durchganges erfolgte die Steigerung der Anteile in 20 %-Schritten über einen Zeitraum von fünf Tagen; im zweiten Durchgang wurden aufgrund der im Hinblick auf Futterwechsel geringeren Empfindlichkeit älterer Tiere Steigerungen in 25 %-Anteilen vorgenommen. Die Zeitpunkte der Futterumstellungen sind den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen.

3.4.1 Mischfutterherstellung und -zusammensetzung

Die Herstellung aller im vorliegenden Dissertationsvorhaben zum Einsatz gekommenen Mischfutter erfolgte im hiesigen Institut für Tierernährung der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover in Chargen von bis zu 300 kg.

In beiden Durchgängen erhielten die Schweine auf Weizen, Gerste und Sojaextraktionsschrot basierende, schrotförmige Mischfutter. Als anorganische P-Quelle im Mischfutter der Kontrollgruppe diente Mononatriumphosphat (MNP, $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). Da kein Calciumphosphat verwendet wurde, war die Ca-Versorgung durch den Einsatz eines identischen Mineralfutters (MinF) in allen drei Fütterungsgruppen gleich. Unterschiede bezüglich der Ca-Quellen wurden somit vermieden. Es kamen P-freie Mineralfutter (MinF I, II und III für FAZ, Mast I bzw. Mast II) zum Einsatz, die zu je 3 % in alle MF-Varianten eingemischt wurden. Die Zusammensetzung nach Herstellerangaben sowie die

Analysenergebnisse einiger wichtiger Parameter hierzu sind den Tabellen 52 und 53 zu entnehmen.

Um Ungleichheiten in der Na-Versorgung der Gruppen zu vermeiden, erfolgte eine Na-äquivalente Einmischung von NaCl in die Mischfuttermittel der Versuchsgruppen (V1 und V2). Die so entstandenen Unterschiede in den Cl-Gehalten der Versuchsfuttermittel gegenüber den Kontrollfuttermitteln wiederum wurden durch Cl-äquivalente Ergänzung von KCl ausgeglichen.

Die Gesamtmengen der in die verschiedenen MF-Varianten einzumischenden Mineralstoff- bzw. Phytasemengen unterschieden sich folglich geringfügig. Dies wurde durch anteilige Reduktion in den Mengen der Hauptkomponenten ausgeglichen.

Den MF-Varianten der Kontrollgruppe sowie denjenigen der Versuchsgruppe 1 wurde zudem eine 3-Phytase (Natuphos® 5000 G, BASF SE Animal Nutrition, Lampertheim) in einer Dosierung von 500 FTU/kg uS zugesetzt. Die Phytase kam über eine Vormischung in die herzustellenden Mischfutter. Dazu wurden zunächst die jeweilig erforderlichen Gesamtmengen der Phytase (0,01 % der herzustellenden Futtermenge) berechnet. Dieselbe Menge an Mineralfutter wurde dann auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50) in eine Kunststoffüte eingewogen und die Phytase anschließend hinzugefügt. Durch kräftiges mehrminütiges Schütteln erfolgte anschließend die Mischung der beiden Komponenten. Nachfolgend wurde wiederholt Mineralfutter im Verhältnis 1:1 zur schon vorhandenen Mineralfutter-Phytase-Mischung hinzugegeben und wiederum eingemischt.

Je nach herzustellender Mischfuttermenge wurden teilweise auch NaCl, KCl bzw. $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ auf die beschriebene Weise in die Vormischung eingebracht.

Durchgang 1

Im ersten Durchgang wurde bis zum Erreichen einer mittleren KM von etwa 21 kg ein Ferkelaufzuchtfutter angeboten, im Anschluss kam dann bis zum Versuchsende ein Mastfutter I zum Einsatz. Die Zusammensetzung der eingesetzten Mischfuttermittel ist in den Tabellen 6 und 7 dargestellt.

Tabelle 6: Zusammensetzung [%] der drei Aufzuchtfutter im Durchgang 1

Komponente	K	V1	V2
Weizen	48,1	48,5	48,5
HP-SES	23,9	24,1	24,1
Gerste	21,9	22,1	22,1
Mineralfutter I	3,00	3,00	3,00
Pflanzenöl	2,00	2,01	2,01
Mononatriumphosphat	0,70	-	-
NaCl	-	0,25	0,25
KCl	0,33	-	-
Natuphos® (5000 FTU/g)	0,01	0,01	-

HP-SES: high protein-Sojaextraktionsschrot, FTU: Einheit der Phytaseaktivität

Tabelle 7: Zusammensetzung [%] der drei Mastfutter I im Durchgang 1

Komponente	K	V1	V2
Gerste	70,9	71,1	71,1
HP-SES	16,0	16,0	16,0
Weizen	8,69	8,72	8,72
Mineralfutter II	3,00	3,00	3,00
Pflanzenöl	1,00	1,00	1,00
Mononatriumphosphat	0,30	-	-
NaCl	-	0,10	0,10
KCl	0,13	-	-
Natuphos® (5000 FTU/g)	0,01	0,01	-

HP-SES: high protein-Sojaextraktionsschrot, FTU: Einheit der Phytaseaktivität

Durchgang 2

Der Futterwechsel von Mastfutter I zu Mastfutter II im zweiten Durchgang erfolgte bei Erreichen einer mittleren Körpermasse von etwa 57 kg. In den Tabellen 8 und 9 ist die Zusammensetzung der im Durchgang 2 angebotenen Mastfutter dargestellt.

Tabelle 8: Zusammensetzung [%] der drei Mastfutter I im Durchgang 2

Komponente	K	V1	V2
Gerste	70,5	71,0	71,0
HP-SES	15,9	16,0	16,0
Weizen	8,65	8,72	8,73
Mineralfutter II	3,00	3,00	3,00
Pflanzenöl	1,00	1,00	1,00
Mononatriumphosphat	0,66	-	-
NaCl	-	0,23	0,23
KCl	0,30	-	-
Natuphos® (5000 FTU/g)	0,01	0,01	-

HP-SES: high protein-Sojaextraktionsschrot, FTU: Einheit der Phytaseaktivität

Tabelle 9: Zusammensetzung [%] der drei Mastfutter II im Durchgang 2

Komponente	K	V1	V2
Gerste	42,3	42,7	42,7
Weizen	39,8	40,1	40,1
HP-SES	12,9	13,0	13,0
Mineralfutter III	3,00	3,00	3,00
Pflanzenöl	1,00	1,00	1,00
Mononatriumphosphat	0,70	-	-
NaCl	-	0,24	0,24
KCl	0,31	-	-
Natuphos® (5000 FTU/g)	0,01	0,01	-

HP-SES: high protein-Sojaextraktionsschrot, FTU: Einheit der Phytaseaktivität

3.4.2 Probenentnahme

Die Probenentnahme erfolgte im ersten Durchgang mittels eines Probenstechers im Anschluss an das Absacken des Materials. Die aus einem jeden Sack entnommenen Teilproben wurden nachfolgend zu einer Poolprobe zusammengefasst und der Analyse zugeführt. Im zweiten Durchgang wurden die Proben jeweils unmittelbar nach Beendigung des Mischvorgangs aus dem Mischer entnommen.

3.4.3 Mischfutteranalysen

Aus dem entnommenen Probenmaterial (s. 3.4.2) wurde das zur chemischen Analyse vorgesehene Aliquot mit Hilfe eines Probenteilers (Tyler Probenteiler Typ 1, Fa. Haver & Boecker OHG, Oelde) gewonnen und mit einer Ultra-Zentrifugalmühle (ZM 200, Fa. Retsch, Haan; Siebweite: 0,5 mm, 10.000 Umdrehungen/min) gemahlen. Wenn im Weiteren nicht explizit anders beschrieben, erfolgten die Analysen aus dem gemahlene Material alle im Doppelansatz, und zwar im Institut für Tierernährung der Tierärztlichen Hochschule Hannover in Anlehnung an Band III (inkl. der 8. Ergänzung von 2012) des Methodenbuchs des Verbandes deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten (VDLUFA; NAUMANN u. BASSLER 1976) jedoch mit einigen Modifikationen.

3.4.3.1 Weender Analyse

Zur Bestimmung der Rohnährstoffgehalte diente die Weender Futtermittelanalyse.

Trockensubstanz (1. TS)

Zunächst wurden Aluschalen, deren Trockenmasse zuvor ermittelt wurde, mit etwa 50 - 100 g des ungemahlene Probenmaterials (uS) befüllt und die Masse der Einwaage mit einer Oberschalenwaage (1C4201S, Fa. Sartorius, Göttingen; Wiegegenauigkeit: 0,01 g) erfasst. Über Nacht erfolgte dann die Trocknung der Probe bei 103 °C im Trockenschrank (s. Tabelle 50). Zum Abkühlen wurden die Proben bis zum Erreichen der Raumtemperatur in Exsikkatoren verbracht, bevor die Aluschalen inklusive des Probenmaterials wiederum gewogen und die Auswaage berechnet wurde ($m_{Auswaage} [g] = m_{Aluschale,gefüllt} [g] - m_{Aluschale,leer} [g]$).

Der Trockensubstanzgehalt wurde dann mit folgender Formel berechnet:

$$TS [\%] = \frac{m_{Auswaage} [g]}{m_{Einwaage} [g]} * 100$$

bzw.

$$TS [g/kg] = \frac{m_{Auswaage} [g]}{m_{Einwaage} [g]} * 1000$$

Trockensubstanz (2. TS)

Nach dem Vermahlen des Untersuchungsguts erfolgte erneut eine Bestimmung des TS-Gehalts nach oben genanntem Prinzip. Die Einwaage betrug hier etwa 3 g und erfolgte in einen bis zur Massekonstanz getrockneten, im Exsikkator abgekühlten und daraufhin auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50) gewogenen Tiegel. Die 2. TS wurde als Größe zur Umrechnung der im gemahlene Material analysierten Nähr- und Mineralstoffgehalte auf die Gehalte je kg TS bzw. uS benötigt.

Rohasche

Die zur Bestimmung der 2. TS genutzten Tiegel inklusive des jeweiligen getrockneten und ausgewogenen Probenmaterials wurden für sieben Stunden im Muffelofen (s. Tabelle 50; Aufheizzeit: 4,5 h) bei 600 °C einer Veraschung unterzogen und anschließend zum Abkühlen in Exsikkatoren überführt. Nach Erreichen der Raumtemperatur erfolgte die Auswaage wiederum auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50). Der Rohaschegehalt wurde dann analog zum Trockensubstanzgehalt berechnet.

Rohprotein

Die Bestimmung des Rohprotein-Gehalts (Rp) erfolgte rechnerisch nach Analyse des Stickstoffgehalts mittels Analysator (Vario Max CNS, Fa. Elementar Analysensysteme GmbH, Langenselbold) nach der DUMAS-Verbrennungsmethode. Hierfür wurden zunächst 0,1 - 0,3 g Probenmaterial in einen Keramiktiegel eingewogen und dann im Analysator einer Hochtemperaturverbrennung bei ca. 1.140 °C unterzogen. Die dabei entstandene Menge molekularen Stickstoffs wurde mithilfe eines Wärmeleitfähigkeitsdetektors und nach vorheriger Kalibrierung durch die Software des Gerätes bestimmt.

Da Rohprotein im MF zu etwa 16 % aus Stickstoff besteht, wurde der Rp-Gehalt anhand des ermittelten N-Gehalts mit folgender Formel kalkuliert:

$$Rp [g/kg TS] = N [g/kg TS] * 6,25$$

Rohfett

Vor der Fettextraktion und -quantifizierung erfolgte ein Kochen des Probenmaterials in Salzsäure. Dazu wurden jeweils etwa 3 g des Analysenguts auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50) in ein 600 ml-Becherglas eingewogen und nach Zugabe einiger Siedesteine mit 140 ml Wasser sowie 60 ml 30 %-iger Salzsäure aufgefüllt.

Das Gemisch wurde dann, mit einem Uhrglas bedeckt, auf einer Heizplatte erhitzt und für 30 Minuten gekocht. Während des Kochvorganges wurde wiederholt heißes Wasser hinzugefügt, um das Volumen von etwa 200 ml konstant zu halten.

Im Anschluss wurde das Uhrglas mit heißem Wasser abgespült und die auf ein Volumen von 300 ml aufgefüllte Probe restlos durch einen angefeuchteten Faltenfilter (Faltenfilter MN 615, Ø 185 mm, Fa. Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren) filtriert. Nach mehrfachem Spülen des Filters mit Leitungswasser wurde dieser über Nacht bei 80 °C im Trockenschrank (s. Tabelle 50) getrocknet.

Die sich anschließende 6-stündige Fettextraktion aus dem nach Säureaufschluss gewonnenen Rückstand im Filter erfolgte am folgenden Tag mit Petrolether im Soxhlet-Apparat.

Das zuvor aufgeschlossene Probenmaterial inklusive des Filterpapiers wurde dazu in eine Extraktionshülse gebracht und in den Soxhlet-Aufsatz gegeben. Als Extraktionsmittel wurden etwa 200 ml Petrolether in einen zuvor mit einigen Siedesteinen bestückten und für mindestens eine Stunde bei 103 °C im Trockenschrank getrockneten, im Exsikkator

abgekühlten und ausgewogenen 250 ml-Stehkolben gefüllt und dieser an den Soxhlet-Apparat angeschlossen.

Im Anschluss an die Extraktion und Entfernung des überschüssigen Petrolethers aus dem Siphon erfolgte die Verdampfung des Petrolethers aus dem Stehkolben mit einem Rotationsverdampfer (Hei-VAP Value Digital, Fa. Heidolph Instruments GmbH & Co.KG, Schwabach) bei 500 mbar in einem 80 °C warmen Wasserbad.

Nach Trocknung des Stehkolbens bei 80 °C über Nacht im Trockenschrank (s. Tabelle 50) und anschließender Abkühlung im Exsikkator wurde die Masse des extrahierten Fetts auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50) ermittelt ($m_{Fett} [g] = \frac{m_{Fettkolben\ inkl.\ Fett} [g]}{m_{Fettkolben,\ leer} [g]}$).

Der Rohfettgehalt wurde dann mit folgender Formel berechnet:

$$Rfe [g/kg] = \frac{m_{Fett} [g]}{m_{Einwaage} [g]} * 1000$$

Rohfaser

Die Untersuchung der Proben auf den Rohfasergehalt erfolgte durch Bestimmung des in verdünnter Schwefelsäure und in verdünnter Natronlauge unlöslichen sowie fett- und aschefreien Anteils.

Dazu wurde 1 g des Analysengutes in einem Glasfiliertiegel zunächst mit ca. 150 ml 1,25 %-iger Schwefelsäure versetzt und in einem Rohfaserbestimmungsgerät (Fibertec™ 2010 Hot Extractor, Fa. Foss GmbH, Hamburg) 30 Minuten lang gekocht. Nach Entfernung der Säure schloss sich ein entsprechender Kochvorgang mit 1,25 %-iger Natronlauge an. Mit heißem Wasser wurde das verbliebene, in verdünnter Säure bzw. Lauge unlösliche Material gespült, über Nacht im Trockenschrank (s. Tabelle 50) bei 103 °C getrocknet und anschließend bei 500 °C im Muffelofen (s. Tabelle 50, Aufheizzeit: 1 h) verascht. Nach Auswaage des veraschten Materials konnte der aschefreie, in verdünnter Säure und Lauge unlösliche Anteil der Probe wie folgt berechnet werden:

$$Rfa [g/kg] = \frac{(m_{Tiegel\ nach\ Trocknen} [g] - m_{Tiegel\ nach\ Veraschung} [g])}{m_{Einwaage} [g]} * 1000$$

N-freie Extraktstoffe (NfE)

Der Gehalt an N-freien Extraktstoffen wurde rechnerisch mit folgender Formel bestimmt:

$$NfE = TS - (Ra + Rp + Rfe + Rfa)$$

3.4.3.2 Kohlenhydrate

In den Mischfuttermitteln wurden auch die Stärke- und Zuckergehalte bestimmt. Das Vorgehen wird im Folgenden beschrieben.

Stärke

Die Bestimmung des Stärkegehalts erfolgte mittels polarimetrischer Messung. Neben der Messung zweier Hauptwerte erfolgte die Messung eines Blindwertes nach Entfernung der originär in der Probe enthaltenen Stärke.

In einen 100 ml-Messkolben wurden 2,5 g des Probenmaterials zur Ermittlung der Hauptwerte eingewogen und durch Schütteln mit 50 ml 0,31 molarer HCl vermischt. Daraufhin wurde die Probe zwecks Aufschluss für 15 Minuten in ein siedendes Wasserbad gegeben. Nach Herausnahme aus dem Wasserbad wurden den Proben etwa 30 ml kaltes *A. dest.* hinzugefügt. Parallel erfolgte zur Bestimmung des Blindwerts die Einwaage von 5 g Analysengut in einen 100 ml Messkolben, dem im Folgenden ca. 80 ml 40 %-iger Ethanol hinzugefügt wurden. Der Ansatz für den Blindwert wurde für eine Stunde stehen gelassen und danach wiederum mit 40 %-igem Ethanol auf ein Volumen von 100 ml aufgefüllt, geschüttelt und filtriert (Faltenfilter MN 615, Ø 185 mm, Fa. Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren). Von dem so gewonnenen Filtrat wurden 50 ml in einen 100 ml-Erlenmeyerkolben überführt und mit 2,1 ml einer 25 %-igen HCl versetzt. Im Anschluss erfolgte ein 15-minütiges Kochen des an einen Rückflusskühler angeschlossenen Erlenmeyerkolbens in einem siedenden Wasserbad. Mit etwas destilliertem Wasser wurde das Analysengut dann in einen 100 ml-Kolben überspült. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wurden sowohl dem Ansatz des Haupt- als auch des Blindwertes je 5 ml CARREZ-Reagenz I und II durch jeweils 1-minütiges Schütteln hinzugemischt, bevor das Probenvolumen mit destilliertem Wasser auf 100 ml aufgefüllt und über einen Faltenfilter (Faltenfilter MN 615, Ø 185 mm, Fa. Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren) gegeben wurde.

Die so gewonnenen Lösungen wurden im Anschluss unmittelbar der polarimetrischen Messung (Polatronic E, Fa. Schmidt und Haensch, Berlin) zugeführt.

Der Stärkegehalt wurde anschließend wie folgt berechnet:

$$\text{Stärke [g/kg]} = (\text{Hauptwert} - \text{Blindwert} * 10,87^1) * 10$$

¹ Faktor für Stärkegemische in MF

Zucker

Die Bestimmung des Zuckergehalts erfolgte mit der Methode nach Luff-Schoorl in Anlehnung an das von SCHOORL (1929) beschriebene Vorgehen. Es wurden 2,5 g Probe in einen 250 ml-Messkolben in etwa 200 ml 40 %-igen Ethanol durch einstündiges Schütteln in Lösung gebracht. Anschließend wurden jeweils 5 ml CARREZ-Reagenz I bzw. II hinzugefügt und jeweils durch erneutes, einminütiges Schütteln eingemischt.

Danach folgten das Auffüllen des Probenvolumens auf 250 ml mit 40 %-igem Ethanol und die Filtration des Gemisches durch einen Faltenfilter (Faltenfilter MN 615, Ø 185 mm, Fa. Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren) in einen 250 ml-Messzylinder. 200 ml des Filtrats wurden dann in ein Becherglas überführt und nach Hinzufügen mehrerer Siedesteine auf einer Heizplatte eingedampft, bis sich das Volumen auf unter 100 ml reduziert hatte. Die Lösung wurde dann in 100 ml-Messkolben überführt, auf Raumtemperatur abgekühlt und mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Anschließend wurden 50 ml der so gewonnenen Lösung wiederum in einen 100 ml-Messkolben überführt. Daraufhin wurden einige Tropfen Methylorange zugegeben. Bis zum Auftreten eines deutlichen Farbumschlags ins Rötliche wurde dann 4 molare Salzsäure hinzugefügt und der Lösung dann 15 ml 0,1 molare HCl zugesetzt, bevor der Messkolben für 30 Minuten in ein siedendes Wasserbad gegeben wurde. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wurden der Lösung 15 ml 0,1 molare NaOH hinzugefügt und das Probenvolumen mit *A. dest* auf 100 ml aufgefüllt. In einem Erlenmeyerkolben wurden anschließend 25 ml der Probenlösung mit der gleichen Menge Reagenz nach Luff-Schoorl versetzt und einige Siedesteine hinzugegeben. Nach Anschluss an einen Rückflusskühler erfolgten die Erhitzung und ein zehnminütiges Kochen der Lösung über einer Gasflamme.

Die Lösung wurde auf Raumtemperatur abgekühlt und mit 10 ml 30 %-iger Kaliumjodidlösung sowie 25 ml 6 molarer HCl versetzt. Zur Herstellung einer Lösung zur Bestimmung des Blindwertes wurde ein weiterer Ansatz mit 25 ml destilliertem Wasser anstelle der Probenlösung hergestellt.

Abschließend erfolgten die Zugabe einer Stärkelösung und die Titration der Lösung mittels 0,1 molarer $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Aus entsprechenden Tabellen¹ konnte mit Hilfe der Differenz zwischen

¹ Vgl. VDLUFA Methodenbuch Band III, 7.1.1

den Ergebnissen der Titrations von Proben- und Blindwert-Lösung der Zuckergehalt abgelesen werden.

3.4.3.3 Energiegehalt

Die Energiegehalte der MF-Varianten wurden durch Kalkulation gemäß den Vorgaben der gültigen Futtermittelverordnung¹ anhand der analysierten Nährstoffgehalte (je kg TS) mit folgender Formel ermittelt:

$$ME [MJ/kg TS]$$

$$= 0,021503 Rp + 0,032497 Rfe + 0,016309 Stärke + 0,014701 oR - 0,021071 Rfa$$

Der organische Rest ist dabei wie folgt definiert:

$$oR = oS - (Rp + Rfe + Stärke + Rfa)$$

3.4.3.4 Mengen- und Spurenelemente

Die Messungen der Mengen- und Spurenelementgehalte erfolgten mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS; Solaar AA Spectrometer M Series 602222, Fa. Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) bzw. Photometrie nach Mikrowellenveraschung². Zunächst wurden 0,5 g des gemahlene Probenmaterials in ein Polytetrafluorethylen-Mikrowellengefäß eingewogen und mit 7 ml 65 %-iger Salpetersäure, 3 ml einer 30 %-igen Wasserstoffperoxid-Lösung sowie 3 ml Reinstwasser ergänzt.

Nachfolgend wurden die Proben für 29 Minuten in der Mikrowelle (Ethos.lab, Fa. MLS GmbH, Leutkirch) verascht und auf Raumtemperatur abgekühlt. Mit Reinstwasser erfolgte das vollständige Überspülen des Materials durch einen Schwarzbandfilter (Rundfilter, aschefrei, Ø 90 mm; Fa. IDL GmbH & Co. KG, Nidderau) in einen 50 ml-Messkolben. Im Anschluss wurde das Probenvolumen mit Reinstwasser auf 50 ml aufgefüllt und die Lösung nach kräftigem Schütteln in verschließbare Kunststoff-Probenflaschen überführt.

Calcium

Die Probenlösung wurde mit 0,5 %-iger Lanthanchlorid-Lösung verdünnt, wobei die gewählte Verdünnung in Abhängigkeit von dem zu erwartenden Wert gewählt wurde (1:100 bzw. 1:1000). Im Anschluss erfolgte die Messung mittels Atomabsorptionsspektrometer (Solaar AA Spectrometer M Series 602222, Fa. Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA).

¹ BGBl. I 2016, S. 2026

² nur Selen: Nassveraschung

Phosphor

Die Bestimmung des P-Gehalts in den eingesetzten Futtermitteln erfolgte photometrisch nach der Methode von GERICKE und KURMIES (1952).

In einem ersten Schritt wurde ein Gemisch aus drei verschiedenen Lösungen hergestellt. Für die erste Lösung wurden 65 %-ige Salpetersäure und Reinstwasser im Verhältnis 1:3 gemischt. Zu Herstellung der zweiten Lösung wurden zunächst 500 ml Reinstwasser zum Kochen gebracht und 2,5 g NH_4VO_3 darin gelöst. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur wurden 20 ml einer 65 %-igen Salpetersäure hinzugegeben. Die dritte Lösung bestand aus 50 g $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$, gelöst in einem Liter Reinstwasser. Alle drei Lösungen wurden durch kräftiges Schütteln zu einer Reagenzmischung („Phosphorreagenz“) vermengt.

Je Probe wurden mit Hilfe eines Dispensers 10 ml dieses Phosphorreagenz in einem 50 ml-Messkolben vorgelegt. Drei weitere Messkolben wurden auf die gleiche Weise vorbereitet und dienten der Herstellung zweier Standardlösungen sowie einer Lösung zur Bestimmung des Nullwertes. Die P-Stammlösung bestand aus 4,3963 g KH_2PO_4 , gelöst in einem Liter Reinstwasser. In den Kolben des ersten Standards wurden mit einer Kolbenhubpipette (Fa. Eppendorf AG, Hamburg) 25 μl , in den Kolben des zweiten Standards 100 μl der Stammlösung hinzugegeben. Die sich ergebenden P-Gehalte der beiden Lösungen betragen 0,5 bzw. 2 mg/l. In den Probenansatz wurde dann je nach zu erwartendem P-Gehalt der Probe in 50 - 1000 μl -Schritten eine solche Menge der Aschelösung hinzugegeben, dass die Gelbfärbung der Probelösung zwischen denjenigen der beiden Standards lag. Das Probenvolumen wurde im Anschluss mit Reinstwasser auf 50 ml aufgefüllt und der Kolben nach Verschließen mit einem Stopfen kräftig geschüttelt. Auch die Standardlösungen sowie der Blindwertansatz wurden daraufhin mit Reinstwasser aufgefüllt und geschüttelt. Nachdem die Lösungen mindestens 30 Minuten lang stehen gelassen wurden, erfolgte die photometrische Messung (UV-1602, Fa. Shimadzu Europa GmbH, Duisburg) der Proben bei einer Wellenlänge von 365 nm.

löslicher Phosphor

Die Gehalte an löslichem Phosphor wurden nach fünf verschiedenen Aufschlussverfahren, wie in der Dissertation von KIRCHNER (2015) beschrieben, analysiert.

Für die ersten beiden Ansätze („ohne Inkubation“) wurde ein Aliquot von 3 g in ein Reagenzröhrchen eingewogen und mit 19,5 ml Reinstwasser bzw. 0,4 %-iger Salzsäure

versetzt, bevor das Röhrchen mit einem Stopfen verschlossen wurde. Anschließend wurde die so hergestellte Suspension mit einem Vortexmischer eine Minute lang durchmischt und danach zentrifugiert (3 Min bei 3000 U/Min; Heraeus Megafuge 1.0, Fa. Heraeus Holding GmbH, Hanau). Von dem gewonnenen Überstand wurden 3 ml entnommen und nach Mikrowellenveraschung der P-Bestimmung zugeführt (s. o.).

Für weitere zwei Ansätze („mit Inkubation“) wurde wie zuvor beschrieben verfahren, mit der Ausnahme, dass das Probenmaterial vor der Zentrifugation (10 Min bei 3000 U/Min; Heraeus Megafuge 1.0, Fa. Heraeus Holding GmbH, Hanau) 90 Minuten lang bei Raumtemperatur unter ständigem Rühren inkubiert wurde.

Für den fünften Ansatz („mit Inkubation, Phytase inaktiviert“) wurden 3 g Probe für 30 - 35 Minuten in einem verschlossenen Probenfläschchen bei etwa 103 °C im Trockenschrank inkubiert. Anschließend wurde die abgekühlte Probe mit 19,5 ml Reinstwasser versetzt. Das weitere Vorgehen entsprach dann dem zuvor für die Ansätze „mit Inkubation“ beschriebenen.

Natrium

Vor Durchführung der Messung mittels AAS (Solaar AA Spectrometer M Series 602222, Fa. Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) wurden die Proben im Verhältnis 1:10, 1:100 oder 1:1000 mit einer Caesiumchlorid-Aluminiumnitrat-Pufferlösung nach SCHUHKNECHT und SCHINKEL (1963) verdünnt.

Magnesium

Das Vorgehen zur Bestimmung der Mg-Gehalte entsprach jenem zur Analyse der Ca-Gehalte.

Kalium

Die Vorbereitung der Proben erfolgte wie bei Natrium beschrieben. Anschließend wurde der K-Gehalt mittels Atomabsorptionsspektrometrie (Solaar AA Spectrometer M Series 602222, Fa. Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) bestimmt.

Chlorid

Die Cl⁻-Bestimmung erfolgte nach dem Prinzip der coulometrischen Titration. Dafür wurden zunächst, je nach Quellvermögen des Materials, 5 g der Probe in einen 50 ml-Messkolben eingewogen und etwa 30 - 40 ml destilliertes Wasser hinzugegeben. Nach halbstündigem Schütteln des Ansatzes auf einer Schüttelplatte wurde das Volumen wiederum mit *A. dest* auf

50 ml aufgefüllt und erneut kräftig geschüttelt. Der Suspension wurde anschließend ein Aliquot entnommen und dieses 15 Minuten lang bei 3000 U/min zentrifugiert (Heraeus Megafuge 1.0, Fa. Heraeus, Hanau). Der so entstandene klare Überstand diente nachfolgend als Probenlösung zur Untersuchung im Chloride Analyzer 925 (Fa. Corning Inc., Corning, USA).

Kupfer, Zink, Eisen, Mangan

Mit Ausnahme des Se-Gehalts wurden die Gehalte an Spurenelementen im MF nach Mikrowellenveraschung atomabsorptionsspektrometrisch gemessen. Zuvor wurde bei Bedarf je nach dem zu erwartenden Gehalt eine Verdünnung mit Reinstwasser vorgenommen (1:10, 1:100 oder 1:1000).

Selen

Die Selenbestimmung erfolgte im Anschluss an eine Nassveraschung. Zu diesem Zweck wurde 1 g des Materials in einen 100 ml-Kjeldahlkolben eingewogen und 15 ml eines Veraschungsgemisches, hergestellt aus 70 %-iger Perchlorsäure und 65 %-iger Salpetersäure im Verhältnis 1:4, hinzugegeben.

Durch vorsichtiges Erwärmen wurden die anorganischen Bestandteile in Lösung gebracht, bis ein Farbumschlag der Lösung das Ende des Veraschungsvorganges anzeigte und die verbliebene Säure durch stärkeres Erhitzen abgeraucht werden konnte. Zu der nahezu trockenen, abgekühlten Probe wurden dann 5 ml einer verdünnten Salzsäure ($c = 7,5\%$) hinzugegeben und anschließend verdampft. Dieser Vorgang wurde noch einmal wiederholt, bevor die Probe nach Abkühlung mit 10 ml 18,5 %-iger Salzsäure versetzt und für eine halbe Stunde in einem siedenden Wasserbad inkubiert wurde. Die so entstandene Lösung wurde gefiltert (Rundfilter, aschefrei, Ø 90 mm; Fa. IDL GmbH & Co. KG, Nidderau), mit *A. dest.* in einen 25 ml Messkolben überspült und das Volumen mit *A. dest.* auf 25 ml aufgefüllt. Die Probenlösung wurde dann der Messung mittels eines an ein Atomabsorptionsspektrometer angeschlossenen Hybridsystems zugeführt.

3.4.3.5 Aminosäuren (AS)

Die Bestimmung der AS-Gehalte in den eingesetzten Futtermitteln erfolgte mittels Ionenaustauschchromatographie in einem AS-Analysator (LC 3000 Amino Acid Analyzer,

Fa. Eppendorf Biotronik, Maintal) in hydrolysiertem Probenmaterial. Zur Analyse von Methionin und Cystein ging der Hydrolyse eine Oxidation des Probenmaterials voraus.

Methionin und Cystein

Es wurden 0,2 g der Probe in einem Aufschlussgerät mit 5 ml Perameisensäure (CH_2O_2 , $c = 88\%$ und H_2O_2 , $c = 30\%$ im Verhältnis 9:1) als Oxidationsmittel versetzt und mit Hilfe eines Magnetrührers im Eisbad 30 Minuten lang vermischt. Anschließend wurde das Gemisch über Nacht für 16 h im Kühlschrank bei $4\text{ }^\circ\text{C}$ aufbewahrt. Zur Beendigung der Oxidation wurden 0,84 g Natriumdisulfit hinzugegeben und die Probe 30 Minuten gerührt.

Anschließend erfolgte die Zugabe von 50 ml Salzsäure ($c = 6\text{ mol/l}$ mit $0,1\%$ Phenol) zur Lösung. Die Probe wurde dann über Nacht acht Stunden lang mittels Inkubation in einem Aluminium-Heizblock (Kjeldatherm[®], Fa. C. Gerhardt GmbH & Co. KG, Königswinter) bei $110\text{ }^\circ\text{C}$ aufgeschlossen. Nach Abkühlung im Wasserbad erfolgte die Filtration der Lösung unter Zuhilfenahme einer Wasserstrahlpumpe durch einen Membranfilter (OE 66, Durchmesser: 47 mm, $0,2\text{ }\mu\text{m}$, Fa. GE Healthcare) in einen 1000 ml-Rundkolben. Mit destilliertem Wasser wurde das Probenmaterial vollständig überspült. An einem Rotationsverdampfer (Hei-VAP Value Digital, Fa. Heidolph Instruments GmbH & Co. KG, Schwabach) wurde die Flüssigkeit im Anschluss bei 20 mbar in einem max. $60\text{ }^\circ\text{C}$ warmen Wasserbad verdampft. Danach wurden 100 ml *A. dest.* hinzugegeben, eingemischt und wiederum verdampft. Dieser Vorgang wurde insgesamt dreimal durchgeführt. Die eingetrocknete Probe wurde dann in einige Milliliter Probenverdünnungspuffer aufgenommen, in einen 50 ml-Messkolben überführt und das Volumen anschließend mit Probenverdünnungspuffer bis zur Eichmarke aufgefüllt.

In Abhängigkeit vom Rp-Gehalt der Probe erfolgte vor Durchführung der Messung eine weitere Zugabe von Probenverdünnungspuffer. Es wurde außerdem ein interner Standard zugegeben. Zur Analyse der Met- und Cys-Gehalte wurde abschließend eine Ionenaustauschchromatographie in einem Aminosäureanalysator (LC 3000 Amino Acid Analyzer, Fa. Eppendorf Biotronik, Maintal) durchgeführt.

Nicht-schwefelhaltige Aminosäuren

Für die Analyse aller weiteren Aminosäuren wurde ein Aufschluss durch saure Hydrolyse vorgenommen. Dazu wurden 0,5 g des Probenmaterials in ein Probenaufschlussgerät eingewogen und mit 80 ml 6-molarer HCl versetzt. Die Hydrolyse erfolgte durch Kochen der

Probe bei 110 °C über Nacht für mindestens acht Stunden in einem Aufschlussgerät (Kjeldatherm[®], Fa. C. Gerhardt GmbH & Co. KG, Königswinter). Im Anschluss wurde die im Wasserbad abgekühlte Probe mit Salzsäure ($c = 6 \text{ mol/l}$) durch einen Schwarzbandfilter (Rundfilter, aschefrei, Ø 90 mm; Fa. IDL GmbH & Co. KG, Nidderau) in einen 100 ml-Messkolben überführt.

Es wurde dann ein interner Standard zur Probe hinzugefügt, dessen eingesetzte Menge in Abhängigkeit vom Rp-Gehalt der zu untersuchenden Probe variierte. Das Probenvolumen wurde dann mit Salzsäure ($c = 6 \text{ mol/l}$) auf 100 ml aufgefüllt und 1 ml davon in einen 50 ml-Spitzkolben pipettiert. Im Wasserbad (max. 60 °C) wurde die Probe am Rotationsverdampfer eingetrocknet und anschließend mit etwa 10 ml destillierten Wassers aufgefüllt. Das Wasser wurde verdampft und dieser Vorgang noch zweimal wiederholt. Die Probe wurde in Abhängigkeit vom Rp-Gehalt wiederum mit einem Probenverdünnungspuffer diluiert und der Analyse mittels Ionenaustauschchromatographie in einem Aminosäurenanalysator (LC 3000 Amino Acid Analyzer, Fa. Eppendorf Biotronik, Maintal) zugeführt.

3.4.3.6 Vitamine

In den verwendeten Mischfuttermitteln wurden die Gehalte an Vitamin D₃ sowie an Vitamin E analysiert. Das jeweilige Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

Vitamin D₃

Die Vitamin D₃-Gehalte in den eingesetzten MF wurden durch die LUFA Speyer nach amtlicher Methode (VDLUFA III 13.8.1) bestimmt.

Vitamin E (α-Tocopherol)

Die Vitamin E-Gehalte wurden durch Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) bestimmt. 1 g des Probenmaterials wurde dazu in ein 50 ml-Zentrifugenröhrchen eingewogen und mit 1 ml Ascorbinsäure (15 %-ig), 2 ml Ethanol, 1 ml Methanol und 1 ml KOH-Lösung ($c = 10 \text{ mol/l}$) versetzt.

Im Anschluss wurde das Röhrchen, um vorhandenen Sauerstoff zu verdrängen, mit Stickstoff gespült und verschlossen. Nach Durchmischung der Probe mit einem Reagenzglasschüttler folgte eine 30-minütige Inkubation im Wasserbad bei 60 °C, wobei der Probenansatz im fünf Minuten-Rhythmus erneut durchmischt wurde. Anschließend wurde die Probe zunächst unter fließendem Wasser auf Raumtemperatur herunter gekühlt und dann für 10 Minuten mit 10 ml Hexan (HPLC Grade 0,1 % BHT) in einem Überkopfschüttler gemischt. Der nach

Zentrifugation (zwei Minuten, 3000 U/min) gewonnene Überstand wurde in einen 50 ml-Spitzkolben pipettiert. Das Reagenzröhrchen wurde daraufhin noch weitere drei Mal mit je 10 ml Hexan versetzt und der o. g. sich anschließende Vorgang wiederholt, wobei der gewonnene Überstand in einem Spitzkolben zusammengeführt wurde. Vor dem Verschließen des Reagenzgefäßes wurde dieses jeweils mit Stickstoff gespült.

Nachfolgend wurde die im Spitzkolben vorhandene Flüssigkeit in einem mit Stickstoff belüfteten Rotationsverdampfer bei 40 °C und 200 mbar verdampft. Der verbliebene Rückstand wurde abschließend in 10 ml Methanol (0,2 mg/l BHT) gelöst und der Messung mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) zugeführt. Es wurden dazu 50 µl der Probe in das Analysengerät aufgenommen und in einem Methanol-Wasser-Gemisch (Verhältnis 97:3) über eine Luna[®] Säule (5 µ, C18, 250 x 4,6 mm; Fa. Phenomenex Inc., Torrance, USA) sowie eine entsprechende Vorsäule gepumpt. Mit Hilfe eines Fluoreszenzdetektors wurde das vorhandene α -Tocopherol bei einer Anregungswellenlänge von 296 nm und einer Emission von 330 nm gemessen.

3.4.3.7 Phytaseaktivität

Aliquote der eingesetzten Mischfuttermittel wurden zur Bestimmung der Phytaseaktivität von der LUFA Speyer nach DIN EN ISO 30024 analysiert.

3.4.3.8 pH-Wert

1 g des Analysenguts wurden auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50) in ein Becherglas eingewogen und im Verhältnis 1:5 mit destilliertem Wasser versetzt. Nach 30-minütiger Inkubation bei Raumtemperatur erfolgte die Messung des pH-Werts der Suspension mit einer zuvor kalibrierten Glaselektrode (HI 2211 pH/ORP Meter, Hanna Instruments Inc., Woonsocket, USA).

3.4.3.9 Pufferkapazität

Es wurden 10 g des Probenmaterials in 40 ml *A. dest.* eingerührt. Der so hergestellten Suspension wurde dann unter ständiger Messung des pH-Werts 0,5 molare Salzsäure hinzugefügt. Die zum Erreichen eines konstanten (mind. zwei Minuten) pH-Wertes von 4 bzw. 3 notwendigen Mengen Salzsäure wurde jeweils vermerkt. Die Pufferkapazität für die pH-Stufen 4 bzw. 3 wurde dann wie folgt berechnet:

$$\text{Pufferkapazität [mmol HCl/kg TS]} = \frac{\text{Verbrauch HCl [ml]} * 0,5 \text{ mol/l} * 10000}{\text{TS - Gehalt [\%]}}$$

3.4.3.10 Partikelgrößenverteilung

Die Partikelgrößenverteilung in den schrotförmigen Mischfuttermitteln wurde durch eine trockene Siebanalyse ermittelt. Dazu wurden 30 - 50 g des ungemahlten Probenmaterials auf einer Oberschalenwaage (1C4201S, Fa. Sartorius AG, Göttingen; Wiegegenauigkeit: 0,01 g) abgewogen und auf das oberste Sieb eines zuvor gewogenen Siebturms (Fa. Retsch GmbH, Haan; Siebweiten [mm]: 3,15; 2,00; 1,40; 1,00; 0,80; 0,56; 0,40; 0,20) gegeben. Anschließend wurde dieser auf einer Analysensiebmaschine (Fa. Retsch GmbH, Haan) 15 Minuten lang geschüttelt und die einzelnen Siebe des Turms einschließlich des jeweils darauf verbliebenen Analysenguts ausgewogen. Die Massenanteile der einzelnen Fraktionen wurden erfasst und in Relation zur Masse des eingewogenen Probenmaterials gesetzt.

Zur Analyse der Partikelgrößenverteilung im pelletierten FAZ_{vorVB} erfolgte eine nasse Siebanalyse. Dazu wurden etwa 35 - 50 g des Probenmaterials in einem 1000 ml-Becherglas mit 1 l *A. dest.* in Suspension gebracht und anschließend mindestens eine Stunde lang bei Raumtemperatur gelagert. Des Weiteren wurde ein Siebturm (s. o.) bis zur Gewichtskonstanz bei 103 °C im Trockenschrank getrocknet und nachfolgend zum Abkühlen auf Raumtemperatur in einen Exsikkator verbracht. Nach Bestimmung der Leergewichte der einzelnen Siebe wurde die zuvor hergestellte Suspension vollständig auf das oberste Sieb des Siebturms überführt und dieser anschließend mit 10 l kaltem, destilliertem Wasser langsam durchgespült. Über Nacht erfolgte dann die Trocknung der Siebe inklusive des darauf verbliebenen Probenmaterials bei 103 °C im Trockenschrank. Nach Abkühlung auf Raumtemperatur im Exsikkator wurden die einzelnen Siebe ausgewogen und die Masse der auf ihnen verbliebenen Probenanteile erfasst. Die Berechnung der jeweiligen Massenanteile (in % der TS) erfolgte analog zur trockenen Siebanalyse.

3.5 Erhebung allgemeiner Daten während des Versuchs

Zu den im Versuchszeitraum regelmäßig erhobenen „allgemeinen“ Daten zählten, neben dem Gesundheitszustand der Tiere, die Körpermassen eines jeden Tieres sowie der Futterverbrauch jeder Gruppe. Tabelle 10 zeigt die Frequenz der Erfassung dieser drei Parameter.

Tabelle 10: Frequenz der Erfassung allgemeiner Daten in den Durchgängen 1 und 2

Parameter	Frequenz der Erfassung
Gesundheitszustand	zweimal täglich
Körpermasse	wöchentlich
Futtermverbrauch	wöchentlich, auf Gruppenbasis ¹

¹Durch Rückwaage der im Futterautomaten befindlichen Restmenge

3.5.1 Gesundheitszustand

Alle Tiere wurden während der Versuchsphase zweimal täglich klinisch adspektorisch untersucht sowie mindestens einmal täglich in der Bewegung beurteilt. Das klinische Allgemeinbefinden und der Bewegungsablauf der Tiere wurden nach einem eigens entwickelten Scoring-System (vgl. Tabelle 58 und Tabelle 59 im Anhang) bewertet. Zeigten Tiere klinische Auffälligkeiten, so wurden weiterführende Untersuchungen eingeleitet. Im Erkrankungsfall erfolgte eine Behandlung der Tiere durch die Klinik für kleine Klautiere, Forensische Medizin und Ambulatorische Klinik der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover. Auftretende Bewegungsstörungen bzw. Lahmheiten wurden nach einem zuvor festgelegten Behandlungsplan in Abhängigkeit vom erhobenen Score analgetisch und antiphlogistisch behandelt.

3.5.2 Körpermassenentwicklung, Futtermverbrauch und –aufwand

Die Erfassung der KM-Entwicklung, des Futtermverbrauchs und die Berechnung des Futteraufwands werden im Folgenden näher erläutert.

Körpermassenentwicklung

In beiden Durchgängen wurden die Körpermassen der Tiere zu Versuchsbeginn und -ende sowie wöchentlich während des gesamten Versuchs ermittelt. Zu Versuchsbeginn des ersten Durchgangs wurde dazu eine Oberschalenwaage (Soehnle S 20, Fa. Leifheit AG, Nassau; Wiegegenauigkeit: 1 g) verwendet, für alle anderen Wägungen wurde eine mobile Tierwaage genutzt (WA 200, Fa. Meier-Brakenburg GmbH & Co. KG, Extertal; Wiegegenauigkeit: 0,5 kg). Von Tieren, die vorzeitig aus dem Versuch genommen werden mussten, wurden die Körpermassen anhand der zuvor erfassten tägl. Zunahmen kalkulatorisch auf den eigentlichen Wiegetermin korrigiert.

Die täglichen Körpermasseszunahmen (KMZ) wurden folgendermaßen berechnet:

$$KMZ [g/Tier/Tag] = \frac{Gesamtmasse_{2.Wägung} [kg] - Gesamtmasse_{1.Wägung} [kg]}{Anzahl\ Tage\ zw.\ 1.\ u.\ 2.\ Wägung * Anzahl\ d.\ Tiere} * 1000$$

Die Gesamtmasse entsprach hierbei der Masse aller Tiere zum Messzeitpunkt.

Futtermittelverbrauch und -aufwand

Die Trockenfutterautomaten wurden zweimal täglich auf ihre Funktionsfähigkeit und ihren Füllstand hin überprüft und nach Bedarf befüllt. Die zugeführten Futtermengen wurden auf einer Oberschalenwaage (Soehnle S 20, Fa. Leifheit AG, Nassau; Wiegegenauigkeit: 1 g) erfasst. Im Anschluss an die wöchentliche Wägung der Tiere erfolgte jeweils eine vollständige Leerung der Automaten mit anschließender Rückwaage der Futterreste. Feuchtes oder nasses Material wurde zur Bestimmung des TS-Gehalts separat eingesammelt und anschließend rechnerisch der Futterrestmenge hinzugefügt.

Der Futtermittelverbrauch wurde wie folgt ermittelt:

$$\text{Futtermittelverbrauch [g uS/Tier/Tag]} = \frac{\text{Futtermittelverbrauch [g uS/Gruppe/Woche]}}{\text{Anzahl der Tiere} * 7}$$

Der Futteraufwand wurde nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Futteraufwand} = \frac{\text{Futtermittelverbrauch [g uS/Tier/Tag]}}{\text{tägl. KMZ [g/Tier/Tag]}}$$

3.6 Auswahl der Tiere für die Sektion

Die Verteilung der Tiere auf die verschiedenen Sektionszeitpunkte erfolgte jeweils am Vortag der Sektion anhand folgender Kriterien:

- Gruppenzugehörigkeit (K, V1 od. V2)
- klinischer Allgemeinzustand
- Körpermasse
- Geschlecht

Zeigten Tiere während des Versuchs geringgradige, therapierbare klinische Symptome, so wurden diese Tiere behandelt und zur nächst folgenden Sektion ausgewählt. Traten hochgradige Lahmheitssymptome oder Bewegungsstörungen auf oder blieben Therapieversuche erfolglos, so wurde nach tierärztlicher Indikation eine vorzeitige Euthanasie durchgeführt und der Versuch für diese Tiere vorzeitig beendet.

3.7 Erhebungen zu Sektionszeitpunkten

Zu den jeweiligen Sektionszeitpunkten wurde an den Tieren eine Allgemeinanästhesie mit Azaperon (Stresnil® 40 mg/ml; Fa. Lilly Deutschland GmbH, Abteilung Elanco Animal Health, Bad Homburg; Dosierung: 2 mg/kg KM i. m.) und Ketamin (Ketamin 100 mg/ml, Fa. CP-Pharma Handelsgesellschaft mbH, Burgdorf; Dosierung: 10 - 20 mg/kg KM i. m.) durchgeführt. Die Injektion erfolgte unter Zuhilfenahme einer Spritzenverlängerung (Lectro-Cath 15 cm, Fa. Vygon SA, Ecoen, Frankreich) intramuskulär in die Nackenmuskulatur. Eine ggf. notwendige Verlängerung der Anästhesie erfolgte durch Nachdosierung von Ketamin (Dosierung: ½ der Initialdosis, i. v. in die *V. auricularis lateralis*). Die Euthanasie der Schweine wurde mit Pentobarbital (Euthadorm® 400 mg/ml; Fa. CP-Pharma Handelsgesellschaft mbH, Burgdorf; Dosierung: 0,1 - 0,2 ml/ kg KM i. v. oder i. c.) durchgeführt.

Die Reihenfolge der zur Sektion ausgewählten Tiere wurde zufällig festgelegt, wobei nacheinander jeweils ein Tier aus jeder der drei Fütterungsgruppen narkotisiert, beprobt sowie anschließend euthanasiert und der Sektion zugeführt wurde, um eine gleichmäßige zeitliche Verteilung der Tiere aus den verschiedenen Gruppen zu gewährleisten. Insgesamt durchlief so nacheinander je ein Tier aus den Gruppen K, V1 und V2 die verschiedenen Stationen der Probennahme.

3.7.1 Blutprobenentnahme

In beiden Durchgängen wurden zu Versuchsbeginn sowie zu den jeweiligen Sektionszeitpunkten von allen noch im Versuch befindlichen Tieren Blutproben aus der *V. cava cranialis* bzw. aus der *V. jugularis* entnommen. Es wurden Serum- und Plasmaproben (Lithium-Heparinat und EDTA) mit dem S-Monovette® 9 ml-System (Fa. Sarstedt AG & Co., Nümbrecht) entnommen. Tabelle 11 zeigt die in den Versuchen verwendeten Kanülen.

Tabelle 11: Übersicht zu den in Durchgang 1 und 2 verwendeten Kanülen

KM [kg]	Punktionsort/ Injektionsart	Kanülengröße [mm]	Produkt, Hersteller
< 35	<i>V. cava cranialis</i>	1,2 x 40	Sterican®, Fa. B. Braun
> 35	<i>V. jugularis ext.</i>	1,2 x 75	Sonderkanülen SUPRA, Vivomed GmbH
< 120	<i>V. auricularis lat.</i>	0,8 x 40	Sterican®, Fa. B. Braun
< 120	i. m.	1,2 x 40	Sterican®, Fa. B. Braun

V.: Vena, *ext.:* externa, *lat.:* lateralis, *i. m.:* *intra muscolum* (intramuskulär)

Durchgang 1

Die Blutprobenentnahme sowohl zu Versuchsbeginn als auch zu Versuchsende erfolgte während der für die röntgenologische Untersuchung notwendigen Allgemeinanästhesie, sobald die Tiere eine ausreichende Narkosetiefe erreicht hatten. Zur Punktion der *V. cava cranialis* wurden die Ferkel in Rückenlage fixiert.

Durchgang 2

Zu Versuchsbeginn wurde die Blutentnahme bei jenen 16 Tieren, die zu diesem Zeitpunkt einer röntgenologischen Untersuchung unterzogen wurden, wie im ersten Durchgang während der Narkose durchgeführt. An den verbliebenen 24 Tieren erfolgte die Blutprobenentnahme am wachen Tier aus der *V. jugularis externa*. Zu diesem Zweck erfolgte eine kurzzeitige Fixierung der Tiere mittels einer Oberkieferschlinge. An den folgenden Sektionszeitpunkten wurden wiederum jene Tiere, die röntgenologisch untersucht und anschließend euthanasiert wurden, erst während der Narkose beprobt. Bei allen weiteren Tieren erfolgte die Blutprobenentnahme, wie zuvor beschrieben, am wachen Tier.

3.7.2 Analyse der Blutproben

Unmittelbar nach der Entnahme wurden die Probenröhrchen mehrmals vorsichtig geschwenkt und im Anschluss mindestens für 30 min bis zum Eintritt einer vollständigen Blutgerinnung senkrecht bei Raumtemperatur gelagert, bevor die Blutproben 15 Minuten bei 3000 U/min zentrifugiert wurden (Heraeus Megafuge 1.0, Fa. Heraeus Holding GmbH, Hanau). Nachfolgend wurde das Serum bzw. Plasma in Mikroreaktionsgefäße (Reagiergefäße 2 ml PP, Fa. Sarstedt AG & Co., Nümbrecht) pipettiert. Die zur Ca-, P- und AP-Bestimmung vorgesehenen Aliquote wurden anschließend bis zur Analyse am folgenden Tag im Kühlschrank bei +8 °C gelagert. Die Analysen der Ca- und P-Konzentrationen sowie der Aktivität der alkalischen Phosphatase erfolgten durch das Labor der Klinik für kleine Klauentiere, Forensische Medizin und Ambulatorische Klinik der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover jeweils am Folgetag der Sektion.

Calcium und Phosphor

Die Ca- und P- Konzentrationen wurden photometrisch analysiert. Dabei erfolgte die Ca-Analyse unter Verwendung von Cresolphthalein-Komplexon; die P-Bestimmung wurde nach

Bildung eines Ammonium-Phosphomolybdat-Komplexes durchgeführt. Parallel erfolgte die Messung der Hämoglobin-Konzentration (Hb) im Serum. Bei geringgradig hämolytischen Proben erfolgte eine Korrektur des analysierten Wertes mit folgender Formel:

$$P_{korrigiert} [mmol/l] = P_{analysiert} [mmol/l] - 0,2 * Hb [g/l]$$

Alkalische Phosphatase

Die Bestimmung der Aktivität der AP erfolgte photometrisch durch Messung der Extinktion mit einem Nasschemie-Analysator nach Umsetzung von p-Nitrophenylphosphat zu p-Nitrophenol.

3.7.3 Röntgenuntersuchungen

An den jeweiligen Sektionszeitpunkten wurden in beiden Durchgängen röntgenologische Untersuchungen von allen (DG 1), bzw. einer Auswahl von Tieren (DG 2) durchgeführt. Das Vorgehen dabei ist im Folgenden beschrieben; die Auswertung ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Dissertation, sondern erfolgt seitens der Klinikangehörigen in einer gesonderten Publikation.

Durchgang 1

Zu Versuchsbeginn, d. h. vor Beginn der Versuchsfütterung, und auch zu Versuchsende wurden alle Tiere dieses Durchganges einer röntgenologischen Untersuchung in der Klinik für kleine Klautiere, Forensische Medizin und Ambulatorische Klinik der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover unterzogen. Dazu wurde ein Röntgengenerator mit einer Leistung von 60 kW bei max. 475 mA und 125 kV Scheitelspannung verwendet (Convix 360, Fa. Picker International GmbH, München). Die Untersuchung fand während der Narkose bzw. unmittelbar nach der Euthanasie der Tiere statt und erfolgte im Röntgenraum der o. g. Klinik. Die Tiere wurden auf Rollwagen vom Stallgebäude zum Untersuchungsraum transportiert, wo jeweils Übersichtsaufnahmen der linken Vorder- und Hintergliedmaßen angefertigt wurden.

Durchgang 2

Im zweiten Durchgang wurden zu Versuchsbeginn 16 Tiere für die röntgenologische Untersuchung ausgewählt; dies waren zum einen die vier Schweine der Gruppe VB sowie weitere vier Tiere aus jeder Fütterungsgruppe. Zudem wurden bei allen zu den jeweiligen

Zeitpunkten zur Sektion ausgewählten Tieren röntgenologische Untersuchungen durchgeführt.

3.7.4 Knochenuntersuchungen

Im Anschluss an die Euthanasie erfolgten die Zerlegung der Tierkörper und die grobe Präparation der Gliedmaßenknochen im hiesigen Institut. Die so präparierten Gliedmaßenknochen wurden im Anschluss luftdicht verpackt bis zur weiteren Bearbeitung bei -18 °C tiefgefroren gelagert.

Vor der Durchführung der Untersuchungen waren die Knochen zunächst aufzutauen und manuell frei zu präparieren. Dabei wurde anhaftendes Muskel-, Sehnen- und Bandgewebe sowie das Periost möglichst vollständig entfernt; der Gelenkknorpel verblieb intakt am Knochen. Eine Trennung von Radius und Ulna bzw. Tibia und Fibula wurde nicht vorgenommen. Die abschließende Präparation erfolgte an sämtlichen Knochen durch dieselbe Person, um mögliche individuelle Einflüsse bei diesem Schritt der Probenvorbereitung zu minimieren.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden einzig die Metacarpal- und Metatarsalknochen für die Dichtebestimmung und die chemische Analyse *in toto* genutzt. Von allen anderen Knochen wurde für diese Untersuchungen lediglich eine Epiphyse verwendet.

Die Auswahl der proximalen bzw. distalen Epiphysen erfolgte anhand der aus der Literatur bekannten Wachstumsraten in den unterschiedlichen Epiphysenfugen (s. Tabelle 3), in dem immer jene Epiphyse mit den höheren Wachstumsraten ausgewählt wurde.

Um eine Standardisierung im Hinblick auf die zu untersuchenden Knochenanteile zu erreichen, wurden anatomische Begrenzungen ausgewählt, an denen der jeweilige Knochen senkrecht zu seiner Längsachse durchteilt wurde. Ziel war es, den Knochenabschnitt derart zu wählen, dass die Wachstumsfuge eben noch vollständig mit in den zu untersuchenden Knochenanteil einbezogen war. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht zu den genutzten anatomischen Markierungen sowie zu den verwendeten Epiphysen (inkl. der Epiphysenfugen). Sowohl die Halbierung sämtlicher Knochen zur Messung der Innendurchmesser der Diaphyse als auch das Abtrennen der jeweils zu untersuchenden Epiphysen erfolgte im gefrorenen Zustand mit einer Bandsäge (MBS 240/E, Fa. Proxxon GmbH, Föhren) durch Mitarbeiter des Anatomischen Instituts der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover.

Tabelle 12: Übersicht zu den anatomischen Begrenzungen der für die Dichtebestimmung und die chemische Analyse genutzten Anteile bestimmter Knochen

Knochen	Epiphyse	Anatomische Begrenzung
Humerus	prox.	unmittelbar distal des Gelenkknorpels des <i>Caput humeri</i>
Radius/Ulna	dist.	unmittelbar proximal der Epiphysenfuge des Radius
MC III	-	<i>in toto</i>
Femur	dist.	unmittelbar proximal der distalen Epiphysenfuge
Tibia/Fibula	prox.	maximale Höhe der <i>Tuberositas tibiae</i>
MT III	-	<i>in toto</i>

prox.: proximal, dist.: distal, MC III: *Os metacarpale III*, MT III: *Os metatarsale III*

3.7.4.1 Bestimmung der Knochenmaße

Nach dem Freipräparieren erfolgte ein Vermessen der Knochen mithilfe eines Messschiebers (Messschieber Inox, Fa. Metrax, Standort unbekannt; Mess- und Ablesegenauigkeit: 0,05 mm). Zur Bestimmung der Gesamtlänge von Knochen mit einer Länge von über 14 cm wurde ein Lineal (Ablesegenauigkeit: 1 mm) verwendet. Die Knochenlänge wurde bestimmt, in dem jeweils der maximale Abstand zwischen proximaler und distaler Gelenkfläche, gemessen in Richtung der Längsachse des Knochens, ermittelt wurde. Als Messlokalisierung „Mitte Diaphyse“ wurde die halbe Höhe der Gesamtknochenlänge definiert.

An den Humeri wurde die maximale Distanz zwischen den Gelenkflächen am *Caput humeri* bzw. auf der medialen Seite des *Condylus humeri* gemessen, an den Femora erfolgte die Messung analog zwischen dem *Caput ossis femoris* und dem medialen Condylus. An den Unterarm- bzw- Unterschenkelknochen wurde die Gesamtlänge des Radius bzw. der Tibia bestimmt.

Der Außendurchmesser sowie der Umfang der Diaphyse wurden auf halber Höhe der gesamten Knochenlänge sowohl in cranio-caudaler Richtung als auch im 90°-Winkel dazu in latero-lateraler Richtung gemessen. An den Humeri und Femora wurden an der entsprechenden Messlokalisierung jeweils die minimalen und maximalen Durchmesser bestimmt, da eine exakte Ausrichtung der Messrichtung an diesen Knochen kaum möglich war.

Nach dem Sägen erfolgte die Messung der Innendurchmesser an den distalen Teilstücken ebenfalls in cranio-caudaler und latero-lateraler Richtung, bzw. in Richtung der zuvor ermittelten Außendurchmesser.

Die Kompakta-Dicke ($\text{Dicke}_{\text{Ko., c-c}}/\text{Dicke}_{\text{Ko., l-l}}$ bzw. $\text{Dicke}_{\text{Ko., min}}/\text{Dicke}_{\text{Ko., max}}$) wurde anschließend mit folgender Formel bestimmt:

$$\text{Kompakta - Dicke [mm]} = \frac{\text{Außendurchmesser [mm]} - \text{Innendurchmesser [mm]}}{2}$$

Die mittlere Kompakta-Dicke entspricht dem arithmetischen Mittel der beiden so bestimmten Werte.

3.7.4.2 Bestimmung der Knochenmasse

Die Knochenmasse (uS) wurde an den freipräparierten Knochen ermittelt. An den Metakarpal- und Metatarsalknochen erfolgte dies im Zuge der Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip auf einer Analysenwaage (s. 3.7.4.3). Alle anderen Knochen wurden auf einer Oberschalenwaage (1C4201S, Fa. Sartorius, Göttingen; Wiegegenauigkeit: 0,01 g) gewogen. Dazu wurde zunächst eine Aluschale auf der Waage platziert und diese tariert. Im Anschluss wurde dann der Knochen in die Aluschale gegeben und die Masse ermittelt.

3.7.4.3 Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip

Die Dichtebestimmung erfolgte in Anlehnung an die in der Dissertation von FRITZ (2011) beschriebene Methode nach dem Archimedischen Prinzip durch Wägung der Knochen an Luft und unter Wasser an jenen Knochen bzw. Knochenteilstücken, die im Anschluss der chemischen Analyse zugeführt wurden. Für alle Wägungen, die im Rahmen der Dichteuntersuchung stattfanden, wurde dieselbe Analysenwaage (CP224S, Fa. Sartorius, Göttingen, Wiegegenauigkeit: 0,1 mg) verwendet.

Die zu untersuchenden Knochen bzw. Knochenanteile wurden zunächst aufgetaut und bis zum Erreichen der Raumtemperatur luftdicht verschlossen gelagert. Vor Beginn der Messung wurde dann anhaftendes Tauwasser vorsichtig mit einem Papiertuch entfernt, wobei die Schnittflächen der Knochenteilstücke bei diesem Vorgang ausgespart wurden, um eventuelle Fettverluste hierbei zu vermeiden. Abbildung 4 zeigt den Versuchsaufbau auf der Analysenwaage.

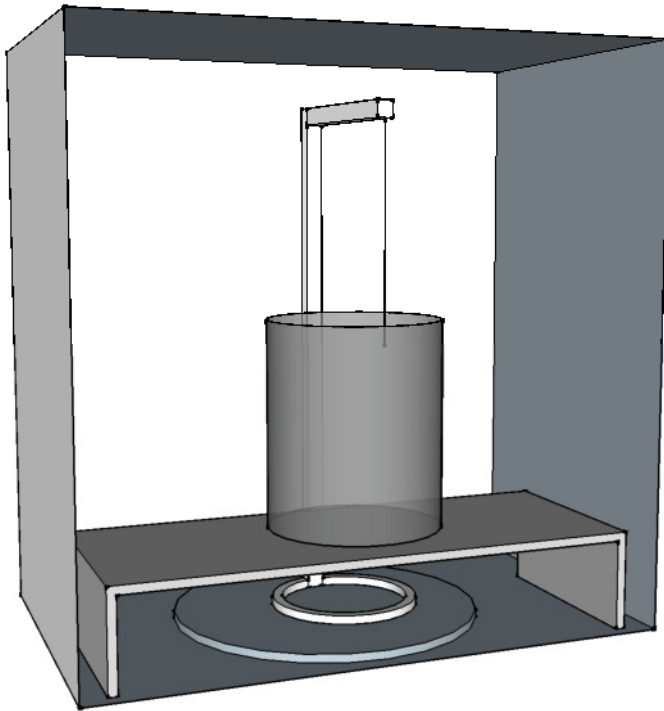


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip

Zu Beginn der Messung wurde ein Stativ mitsamt daran fixiertem Stahldraht (Durchmesser: 0,4 mm) auf der Analysenwaage positioniert und die Waage tariert. Nach Anhängen des Knochens bzw. des zu untersuchenden Teilstücks erfolgte die Bestimmung der Masse (uS). Im Anschluss wurde auf einer über die Wägeplattform reichenden Brücke ein mit *Aqua dest.* gefülltes Becherglas gestellt, in das der Draht zunächst ohne Knochen eingetaucht wurde. Es folgte ein erneutes Trieren der Waage.

Anschließend wurde der Knochen am Draht fixiert und die Masse des eingetauchten Knochens bestimmt. Die Messung wurde je Knochen zweimal wiederholt, wobei das Wasser zwischen den Messungen jeweils ausgetauscht und der Knochen mit einem Papiertuch trockengetupft wurde, um bei jeder Wägung möglichst einheitliche Bedingungen zu schaffen. Da zur Berechnung des Volumens die Temperatur des verdrängten Wasser bekannt sein muss, wurde diese vor jeder Messung mit einem Ausdehnungsthermometer (Hersteller unbekannt) erfasst.

Aus der Differenz der Massen des Knochens an Luft beziehungsweise unter Wasser wurde die Masse des verdrängten Wassers bestimmt. Da das spezifische Gewicht von Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen entsprechenden Listen entnommen werden kann (KÜSTER et al. 1993) und die Gewichts- und Volumendifferenz der Knochen der Masse an verdrängtem Wasser entspricht, ist es möglich die Dichte des Knochens mit der Formel

$$Dichte [g/cm^3] = \frac{uS [g]}{Volumen [cm^3]}$$

zu berechnen.

Von den durchgeführten Wiederholungsmessungen wurden die Mittelwerte berechnet und im Folgenden weiter verwendet, um Ungenauigkeiten der Messungen auszugleichen. Diese können z. B. durch am Knochen anhaftende Luftbläschen verursacht werden.

Eine Auswahl von Knochen wurde im Anschluss an die Dichtebestimmung erneut auf einer Analysenwaage gewogen, um quantifizieren zu können, in welchem Ausmaß das zuvor erfolgte Tauchen der Knochen(-teilstücke) in Wasser den TS-Gehalt (s. 3.7.4.5) dieser beeinflusst. Zu diesem Zweck wurden die Knochen(-anteile) unmittelbar nach Beendigung der Dichtebestimmung wie oben beschrieben mit einem Papiertuch getrocknet und dann nochmals der Wägung zugeführt ($uS_{\text{nach Dichtebestimmung}}$).

3.7.4.4 Periphere quantitative Computertomographie

Die Analyse der Knochendichte mittels peripherer quantitativer Computertomographie wurde an einer Auswahl von Proben durch das Institut für Tierernährung der Vetsuisse Fakultät Zürich durchgeführt. Von den Tieren des ersten Durchgangs wurden alle Tibiae (n = 16) untersucht; aus dem zweiten Durchgang wurden die Tibiae der Gruppe VB sowie aller Tiere der Gewichtsklasse „95 kg“ analysiert.

Des Weiteren wurden, mit Hilfe der ermittelten Knochendichten der Tibiae, aus jedem Durchgang jeweils zwei Tiere mit geringen bzw. hohen Knochendichten zur Untersuchung der Knochendichte in den Metatarsalknochen (MT III) ausgewählt, um eine mögliche Korrelation der Dichte verschiedener Knochen prüfen zu können. Die Tabellen 13 und 14 geben einen Überblick zu den mittels qCT untersuchten Proben.

Die präparierten Knochen wurden vakuumiert (Vakuumverpackungsmaschine Typ VC 999 K3N, Fa. VC 999 Verpackungssysteme AG, Herisau, Schweiz) und gekühlt versendet. Im dortigen Institut für Tierernährung wurden je Knochen an drei Lokalisationen (10, 50 und

90 % der Gesamtlänge) Messungen der Bone Mineral Density (BMD) durchgeführt. Das Vorgehen dabei ist von LIESEGANG et al. (2002b) bzw. von LIESEGANG et al. (2005) beschrieben worden. An den proximalen und distalen Messpunkten wurden jeweils die Gesamtdichte (GesD) sowie die trabekuläre Dichte (TrbD) des Knochens bestimmt, während an der Diaphyse neben der Gesamtdichte die kortikale Dichte (CrD) ermittelt wurde (Stratec XCT 960, Stratec Medizintechnik GmbH, Pforzheim; Schwellenwert für kortikalen Knochen: > 640 mg/cm³, Schwellenwert für trabekulären Knochen: > 710 mg/cm³).

Tabelle 13: Übersicht zu den mittels qCT untersuchten Proben aus dem Durchgang 1

Anzahl	Körpermasse [kg] $\bar{x} \pm s$	Knochen
4	16,3 ± 0,63	Tibia/Fibula
12	33,6 ± 4,01	Tibia/Fibula
4	34,6 ± 4,99	MT III

qCT: quantitative Computertomografie, MT III: *Os metatarsale III*

Tabelle 14: Übersicht zu den mittels qCT untersuchten Proben aus dem Durchgang 2

Anzahl	Körpermasse [kg] $\bar{x} \pm s$	Knochen
4	26,4 ± 6,25	Tibia/Fibula
12	98,9 ± 11,8	Tibia/Fibula
4	98,3 ± 13,9	MT III

qCT: quantitative Computertomografie, MT III: *Os metatarsale III*

3.7.4.5 Chemische Analyse

Vor der chemischen Analyse wurden die tiefgefrorenen Knochen bzw. Knochenanteile mittels einer Bandsäge (MBS 240/E, Fa. Proxxon GmbH, Föhren) in etwa 0,5 - 1 cm x 0,5 - 2 cm breite Streifen gesägt und im Anschluss erneut gewogen ($uS_{\text{gesägt}}$), um die Sägeverluste zu quantifizieren.

Da die Rohasche-Bestimmung ebenso wie die Ca- und P-Analysen an zuvor gefriergetrocknetem und vorentfettetem Material durchgeführt wurden, erfolgte bei diesen Parametern zunächst anhand der 2. TS eine Korrektur der ermittelten Werte auf die Gehalte je kg fast fettfreie TS (fffr TS).

Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

$$\text{Gehalt [g/kg fffr TS]} = \frac{\text{Gehalt [g/kg analysiertes Material]}}{2 \cdot \text{TS [g/kg uS]}} * 1000$$

Anschließend wurde die Berechnung der Gehalte je kg TS bzw. je kg ffr TS vorgenommen:

$$\text{Gehalt [g/kg TS]} = \frac{\text{Gehalt [g/kg fffr TS]} * m_{\text{Knochen nach Vorentfettung [g]}}}{m_{\text{Knochen nach Vorentfettung [g]}} + m_{\text{extrahiertes Fett [g]}}}$$

bzw.

$$\text{Gehalt [g/kg ffr TS]} = \frac{\text{Gehalt [g/kg fffr TS]}}{1000 - Rfe[\text{g/kg fffr TS}]} * 1000$$

Da bei sehr kleinen Knochen nicht ausreichend Material für eine Restfettbestimmung zur Verfügung stand, wurden für die Berechnung der ffr TS in diesen Fällen Durchschnittswerte der in anderen Proben ermittelten Restfettgehalte unterstellt.

Da die Dichtebestimmung an jenen Knochen (-anteilen) durchgeführt wurden, die nachfolgend der chemischen Analyse zugeführt wurden, konnte eine Berechnung der Ra-, Ca- und P-Gehalte je cm³ wie folgt vorgenommen werden:

$$\text{Gehalt [mg/cm}^3] = \frac{uS[\text{g}] * \text{Gehalt [g/kg uS]} * \frac{1}{1000}}{\text{Volumen [cm}^3] * 1000}$$

Der Gehalt je kg uS wurde zuvor folgendermaßen berechnet:

$$\text{Gehalt [g/kg uS]} = \frac{\text{Gehalt [g/kg TS]}}{1000} * 1 \cdot \text{TS [g/kg uS]}$$

Die Durchführung der chemischen Analyse erfolgte in Anlehnung an das in der Dissertation von GÖTTING (2006) beschriebene Vorgehen.

Trockensubstanz (1. TS)

Die Bestimmung des Trockensubstanzgehalts der Knochenstücke erfolgte durch Wiegen des Materials vor und nach 48-stündiger Lyophilisation auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50). Dazu wurden die Knochenstücke auf einer Analysenwaage in zuvor leer gewogene Kunststoffschalen eingewogen und anschließend bei -18 °C eingefroren und der Gefriertrocknung (s. Tabelle 50, Dauer: Mind. 48 h) zugeführt. Nach Beendigung der Trocknung wurden die Proben in Exsikkatoren verbracht, ausgewogen und bis unmittelbar vor Beginn der Vorentfettung wiederum in Exsikkatoren gelagert.

Fast fettfreie Trockensubstanz (fffr TS)

Bei der nachfolgenden Vorentfettung wurden die Knochenstücke im Soxhletapparat mit Petrolether entfettet. Zu diesem Zweck wurden die Knochenstücke in ein Filterpapier (Faltenfilter MN 615, Ø 185 mm, Fa. Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren) gewickelt in einen Soxhlet-Aufsatz gegeben und die leeren Kunststoffschalen erneut gewogen. Die in die Entfettung gegebene uS konnte somit rechnerisch ermittelt werden.

Ein 250 ml-Stehkolben inklusive einiger Siedesteine wurde bis zur Massekonstanz im Trockenschrank bei 103 °C getrocknet und anschließend, nach Auskühlen im Exsikkator, auf einer Analysenwaage (s. Tabelle 50) gewogen. Als Lösungsmittel wurden dann etwa 200 ml Petrolether hinzugefügt und der Kolben anschließend mit dem Soxhlet-Apparat verbunden.

Nach der mindestens sechsstündigen Behandlung mit Petrolether wurden die Filter inklusive des Knochenmaterials aus dem Soxhlet-Apparat entnommen und der Stehkolben entfernt.

Der im Stehkolben enthaltene Petrolether wurde nachfolgend in einem 70 °C warmen Wasserbad am Rotationsverdampfer (Hei-VAP Value Digital, Fa. Heidolph Instruments GmbH & Co.KG, Schwabach) bei 550 - 600 mbar verdampft. Über Nacht wurde der restliche noch im Kolben sowie am Knochenmaterial verbliebene Petrolether im Trockenschrank bei 80 °C verdampft.

Sowohl die Masse des gewonnenen Fettes als auch die Masse der vorentfetteten Knochenstücke wurde nach Abkühlung im Exsikkator auf einer Analysenwaage erfasst.

Der fffr TS-Gehalt wurde wie folgt berechnet:

$$fffr\ TS\ [g/kg\ uS] = \frac{m_{Knochen\ nach\ Vorentfettung}\ [g]}{uS\ [g]} * 1000$$

Vermahlung

Mithilfe einer Kneifzange wurden die Knochen zunächst in etwa kirschkernegroße Stücke geteilt und nachfolgend in einer Knochenmühle (Hammermühle, CZ 13, Fa. Culatti AG, Zürich; Siebweite: 2 mm) gemahlen. Das auf diese Weise gewonnene, getrocknete, vorentfettete und gemahlene Material wurde im Folgenden für alle weiteren Analysen verwendet.

Trockensubstanz (2. TS) und Rohasche

Zur Bestimmung der 2. TS sowie des Ra-Gehalts wurden je nach Größe des untersuchten Knochens bzw. Knochenanteils Einwaagen zwischen 1 und 3 g (s. Tabelle 51) verwendet. Das weitere Vorgehen entsprach dem unter 3.4.3.1 beschriebenen.

Da das Knochenmaterial aufgrund seiner hygroskopischen Wirkung während des Mahlvorgangs Feuchtigkeit aufnahm und zudem davon ausgegangen werden konnte, dass mittels der Gefriertrocknung (1. TS) eine nahezu vollständige Trocknung des Materials erreicht werden konnte (vgl. 5.1.6), wurden nur die Ra-, Ca- und P-Gehalte anhand der 2. TS korrigiert, nicht aber die 1. TS.

Calcium und Phosphor

Standen bei Proben $< 3,6$ g des gefriergetrockneten, vorentfetteten und gemahlten Materials für die weiteren Analysen zur Verfügung, so wurde das gesamte Material zur TS- und Ra-Bestimmung verwendet. Das Vorgehen dabei entsprach dem oben geschilderten, mit der Ausnahme, dass mit HCl ausgekochte Tiegel verwendet wurden. Im Anschluss wurde aus dem veraschten Material eine Aschelösung für die Ca- und P-Analyse hergestellt. Dazu wurden der Rohasche 5 ml konzentrierte HCl zugesetzt und diese im Anschluss durch Erhitzen auf einer Heizplatte abgeraucht. Der so entstandene Rückstand wurde mit 10 ml 20 %-iger HNO_3 versetzt, aufgeköcht und mit Reinstwasser durch einen angefeuchteten Schwarzbandfilter (Rundfilter, aschefrei, \varnothing 90 mm; Fa. IDL GmbH & Co. KG, Nidderau) in einen 50 ml-Messkolben überspült. Nachfolgend wurde der Filter inklusive des Rückstandes im zuvor verwendeten Tiegel für 2 h im Muffelofen bei 600 °C verascht. Nach dem Abkühlen wurden zur Probe 5 ml Salzsäure (7,4 %-ig) hinzugefügt und beides wiederum kurz aufgeköcht. Im Anschluss wurde das Material filtriert (Rundfilter, aschefrei, \varnothing 90 mm; Fa. IDL GmbH & Co. KG, Nidderau) und mit Reinstwasser in den zuvor schon verwendeten Messkolben überspült. Sobald die Probe auf Raumtemperatur abgekühlt war, wurde das Volumen mit Reinstwasser auf 50 ml aufgefüllt.

Bei Probenmengen $\geq 3,6$ g wurde die Probe zur Bestimmung der Mineralstoff-Gehalte mit 10 ml HNO_3 (65 %-ig) und 2 ml H_2O_2 (30 %-ig) versetzt und der Mikrowellenveraschung zugeführt. Die entstandene Lösung wurde dann durch einen Schwarzbandfilter (Rundfilter, aschefrei, \varnothing 90 mm; Fa. IDL GmbH & Co. KG, Nidderau) gegeben und das Filtrat mit Reinstwasser auf ein Volumen von 50 ml aufgefüllt. In der so hergestellten Probenlösung

wurde der Ca-Gehalt atomabsorptionsspektrometrisch und der P-Gehalt photometrisch gemessen.

Restfettbestimmung

Vor der Bestimmung des Restfettgehalts durch Entfettung im Soxhlet-Apparat erfolgte zunächst ein Säureaufschluss des Probenmaterials mit Salzsäure. Im Anschluss wurde die Probe filtriert und der Filterkuchen der Entfettung (s. o.) zugeführt.

Die Restfettbestimmung konnte zum Teil aufgrund zu geringer Probenmengen nicht durchgeführt werden. In diesen Fällen wurden mittlere Restfettgehalte von anderen Proben desselben Knochentyps unterstellt.

3.8 Statistische Auswertung

Zur Erfassung sämtlicher Rohdaten sowie zur Durchführung der nachfolgenden Berechnungen und zur Erstellung von Diagrammen wurde das Programm Microsoft Excel 2010 der Firma Microsoft Corporation, Redmond, USA genutzt.

Die statistische Auswertung erfolgte mit Hilfe des Programms SAS[®] Enterprise Guide[®] 7.1 (Fa. SAS Institute Inc., Cary, USA) und mit Unterstützung des Instituts für Biometrie, Epidemiologie und Informationsverarbeitung der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover.

Die Auswertung der beiden Versuchsdurchgänge wurde getrennt voneinander vorgenommen. Zunächst wurden mit der Anwendungsroutine ANOVA - lineare Modelle die Residuen errechnet und anschließend mittels Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft (normalverteilt, wenn $p > 0,05$). Da die Daten mit wenigen Ausnahmen/Ausreißern als normalverteilt angesehen werden konnten, wurde ein Vergleich der drei Gruppen K, V1 und V2 untereinander mittels 1-faktorieller Varianzanalyse (Prozedur ANOVA) und dem Ryan-Einot-Gabriel-Welsch-Test (versuchsbezogene Irrtumswahrscheinlichkeit) durchgeführt, wobei die Irrtumswahrscheinlichkeit α auf 5 % festgelegt wurde.

Die Korrelationsanalysen wurden mithilfe der Anwendungsroutine ANOVA – Multivariat durchgeführt; es erfolgte die Bestimmung der Korrelationskoeffizienten nach Pearson.

Die Darstellung sämtlicher Ergebnisse erfolgte in Form von Mittelwert (\pm Standardabweichung). Signifikant voneinander abweichende Mittelwerte sind im Folgenden durch unterschiedliche Buchstaben gekennzeichnet, die als hochgestellte Zeichen den Mittelwerten angefügt sind. Bei gleichen Buchstaben liegen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den jeweils miteinander verglichenen Mittelwerten vor.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden Durchgänge werden im Folgenden (teilweise als gerundete Werte) zusammengefasst, die Gliederung entspricht dabei im Wesentlichen der des vorigen Kapitels Material und Methoden. Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zu allen einzelnen Tieren sind im Tabellenanhang zusammengestellt. Die verschiedenen Altersgruppen wurden nicht statistisch miteinander verglichen, sodass sich diesbezügliche Vergleiche im Folgenden nur auf numerische Unterschiede beziehen.

4.1 Ergebnisse der Futtermittelanalysen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der FM-Analysen näher dargestellt. Die Vitamin E- und Aminosäuregehalte der einzelnen MF-Varianten sind dem Tabellenanhang zu entnehmen (vgl. Tabellen 54, 55, 56 und 57).

4.1.1 Chemische Zusammensetzung und Partikelgrößenverteilung des vor Versuchsbeginn verwendeten MF (FAZ_{vorVB})

In beiden Durchgängen wurde allen Tieren vor Versuchsbeginn ein konventionelles, pelletiertes Ferkelaufzuchtfutter (FAZ_{vorVB}) angeboten. Die analysierten Nähr- und Mineralstoffgehalte sind in der folgenden Tabelle 15 dargestellt. Dieses MF wies laut Deklaration einen Energiegehalt von 13,8 MJ ME/kg auf und enthielt einen Phytase-Zusatz in einer Dosierung von 1500 FTU.

Tabelle 15: Analytierte Nähr- und Mineralstoffgehalte des FAZ_{vor VB}

Parameter	Einheit	Gehalt [je kg uS]
TS	g	890
Ra	g	52,6
Rp	g	179
Rfe	g	49,3
Rfa	g	35,8
Stärke	g	401
Ca	g	7,82
Mg	g	2,54
P	g	5,65
Na	g	2,33
Cu	mg	105
Zn	mg	190

FAZ: Ferkelaufzuchtfutter, VB: Versuchsbeginn, uS: ursprüngliche Substanz, TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rp: Rohprotein, Rfe: Rohfett, Rfa: Rohfaser

Die Partikelgrößenverteilung des FAZ_{vor VB}, welche mittels der nassen Siebanalyse ermittelt wurde, ist in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16: Partikelgrößenverteilung im FAZ_{vor VB}

Partikelgröße [mm]	Massenanteile [% i. d. TS]
≥ 1,00	32,4
< 1,00 bis ≥ 0,20	32,7
< 0,20	34,9

FAZ: Ferkelaufzuchtfutter, VB: Versuchsbeginn, TS: Trockensubstanz

4.1.2 Chemische Zusammensetzung und Partikelgrößenverteilung der drei MF-Varianten K, V1 und V2

Ziel war die Herstellung von jeweils drei MF-Varianten mit identischer botanischer und – mit Ausnahme des P-Gehalts – auch vergleichbarer chemischer Zusammensetzung. Nur den MF-Varianten K und V1 wurde dabei eine Phytase in einer Dosierung von 500 FTU/kg uS zugesetzt. Zur Prüfung der drei MF-Varianten auf eventuelle Abweichungen der chemischen Zusammensetzung wurde ein Vergleich der Werte in den verschiedenen MF unter Berücksichtigung der jeweiligen Analysenspierräume der VDLUFA¹ vorgenommen.

¹ Vgl. Analysenspierräume zur Futtermitteluntersuchung Version 10 (2016), Kapitel 32.1 des VDLUFA Methodenbuchs Band III (inkl. der 8. Ergänzung von 2012)

Durchgang 1

Die Tabellen 17 und 19 zeigen die chemische Zusammensetzung sowie die Phytaseaktivitäten und kalkulierten Energiegehalte in den verschiedenen MF-Varianten im Durchgang 1. Die Partikelgrößenverteilungen dieser MF gehen aus den Tabellen 18 und 20 hervor.

Die MF-Variante K des Aufzuchtfeeders enthielt 5,08 g P/kg uS (entspricht 0,565 % der TS). Die P-Gehalte in den beiden anderen MF-Varianten waren aufgrund des Verzichtes auf den Zusatz von anorganischem Phosphor geringer als im MF-K; diese unterschieden sich nicht über den analytischen Spielraum hinaus voneinander (4,02 bzw. 3,72 g P/kg uS in MF-V1 bzw. MF-V2). Die Phytaseaktivität im MF-V2 betrug 521 FTU/kg uS und beruhte auf dem originären Gehalt. Damit war die Phytaseaktivität wie erwartet geringer als in den MF-Varianten, denen eine Phytase zugesetzt war (1155 bzw. 1071 FTU/kg uS). Das MF-K hatte mit 8,79 g/kg uS einen etwas höheren Ca-Gehalt als die beiden anderen MF-Varianten (8,22 bzw. 8,23 g/kg uS in MF-V1 bzw. MF-V2), auch diese Abweichung blieb jedoch im Bereich des Analysenspielraums. Der Rp-Gehalt war in den drei MF nahezu identisch (204, 205 bzw. 205 g/kg uS), jedoch hatte das MF-V2 mit 14,0 MJ ME/kg uS einen etwas geringeren Energiegehalt als die beiden anderen MF-Varianten (beide 14,2 MJ ME/kg uS). Die Spurenelement-Gehalte variierten alle im Bereich des analytischen Spielraums, d. h. waren dennoch absolut vergleichbar.

Ergebnisse

Tabelle 17: Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivitäten sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten für die Aufzucht (Durchgang 1, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
TS	g	900	899	900
Ra	g	51,9	47,5	47,1
Rp	g	204	205	205
Rfe	g	41,3	40,2	40,1
Rfa	g	30,0	29,9	35,2
NfE	g	573	576	573
Stärke	g	411	415	402
Zucker	g	44,5	44,0	45,6
ME	MJ	14,2	14,2	14,0
Ca	g	8,79	8,22	8,23
Mg	g	1,65	1,54	1,50
P	g	5,08	4,02	3,72
Na	g	1,22	1,16	1,24
K	g	8,44	7,51	7,27
Cl	g	3,51	3,72	3,62
S	g	2,25	2,32	2,25
Phytaseaktivität	FTU	1155	1071	521 ¹
lösl. P _{H₂O} ohne Ink.	g	2,41	0,88	0,81
lösl. P _{H₂O} +90min Ink.	g	3,62	1,77	1,67
lösl. P _{H₂O} , inaktiv.	g	2,59	0,86	0,90
lösl. P _{HCl} ohne Ink.	g	2,19	0,54	0,73
lösl. P _{HCl} +90min Ink.	g	3,82	2,25	1,94
Cu	mg	52,5	44,0	46,6
Zn	mg	98,7	88,0	114
Fe	mg	269	290	296
Mn	mg	48,0	46,5	58,6
Se	mg	0,492	0,500	0,437
Vit. D ₃	IE	~ 1000	1045	~ 1000
Lys	g	13,5	13,2	13,7
Met	g	3,52	3,12	3,74
Cys	g	4,17	4,05	4,15
Thr	g	7,25	6,94	7,71
pH		6,26	6,36	6,33
Pufferkapazität _{pH 4}	mmol	535	442	454
Pufferkapazität _{pH 3}	mmol	733	685	671

¹Ohne Zusatz, d. h. endogene Phytaseaktivität; MF: Mischfutter, uS: ursprüngliche Substanz, TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rp: Rohprotein, Rfe: Rohfett, Rfa: Rohfaser, NfE: N-freie Extraktstoffe, ME: umsetzbare Energie, lösl. P: löslicher Phosphor, Ink.: Inkubation

Ergebnisse

Die Ergebnisse der trockenen Siebanalyse zeigten, dass der Anteil der Partikel mit einem Durchmesser $\geq 1\text{ mm}$ in der MF-Variante K mit 48,3 % etwas höher war als im MF für die Gruppen V1 und V2 (41,2 bzw. 39,4 %). Das MF-V2 hatte mit 14,9 % einen höheren Anteil feiner Partikel ($< 0,2\text{ mm}$) als die MF-K und -V1 (6,52 bzw. 6,6 %).

Tabelle 18: Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten für die Aufzucht (Durchgang 1)

Partikelgröße [mm]	K	V1	V2
$\geq 3,15$	0,4	0,71	0,24
$\geq 2,00\text{ bis } < 3,15$	5,7	6,52	6,55
$\geq 1,40\text{ bis } < 2,00$	18,9	14,2	14,3
$\geq 1,00\text{ bis } < 1,40$	23,2	19,7	18,4
$\geq 0,80\text{ bis } < 1,00$	12,0	11,5	9,28
$\geq 0,56\text{ bis } < 0,80$	12,9	14,4	12,8
$\geq 0,40\text{ bis } < 0,56$	8,65	10,2	8,54
$\geq 0,20\text{ bis } < 0,40$	11,6	16,2	15,0
$< 0,20$	6,52	6,6	14,9

MF: Mischfutter, TS: Trockensubstanz

Das Mastfutter I für die Kontrollgruppe wies erwartungsgemäß aufgrund des Zusatzes von anorganischem Phosphor mit 4,07 g/kg uS (entspricht 0,457 % der TS) den höchsten P-Gehalt auf, die beiden anderen MF-Varianten hatten nahezu identische Gesamt-P-Gehalte (3,58 bzw. 3,52 g/kg uS). Die entsprechenden Phytaseaktivitäten in den verschiedenen MF-Varianten K, V1 und V2 betragen 823, 1050 und 365 FTU/kg uS und waren damit im MF-V1 etwas höher als im MF-K. Auch dieser Unterschied bewegte sich jedoch im Bereich des Analysenspielraums. Der Ca-Gehalt in den drei verschiedenen MF variierte innerhalb der analytischen Spielräume. Im Vergleich zum MF-V2 (32,8 mg/kg uS) enthielt die MF-Variante V1 etwa 34 % weniger Mn. Diese Abweichung überstieg damit den Rahmen der vorgegebenen Analysenspielräume von je 19 % (relativ). In allen weiteren Parametern blieben die Unterschiede zwischen den drei MF-Varianten im Bereich des analytischen Spielraums.

Ergebnisse

Tabelle 19: Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivität sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 1, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
TS	g	891	891	893
Ra	g	47,0	42,3	43,8
Rp	g	169	171	171
Rfe	g	34,4	32,2	31,6
Rfa	g	50,2	35,3	37,4
NfE	g	591	610	609
Stärke	g	393	437	429
Zucker	g	35,6	32,9	35,7
ME	MJ	13,0	13,7	13,6
Ca	g	7,31	7,70	7,70
Mg	g	1,35	1,24	1,26
P	g	4,07	3,58	3,52
Na	g	0,89	0,68	0,73
K	g	6,63	5,53	5,76
Cl	g	3,01	2,87	2,99
S	g	1,57	1,68	1,73
Phytaseaktivität	FTU	823	1050	365 ¹
lösl. P _{H₂O} ohne Ink.	g	1,54	0,75	0,84
lösl. P _{H₂O} +90min Ink.	g	2,37	1,34	1,21
lösl. P _{H₂O} , inaktiv.	g	1,41	0,64	0,48
lösl. P _{HCl} ohne Ink.	g	1,23	0,41	0,53
lösl. P _{HCl} +90min Ink.	g	2,07	1,31	1,26
Cu	mg	56,5	57,1	56,5
Zn	mg	107	112	103
Fe	mg	309	337	355
Mn	mg	44,0	49,6	32,8
Se	mg	0,281	0,321	0,288
Vit. D ₃	IE	~ 1000	1048	~ 1000
Lys	g	11,0	10,4	10,8
Met	g	2,7	2,5	2,5
Cys	g	3,0	3,2	2,9
Thr	g	5,6	6,1	6,3
pH		6,1	6,2	6,1
Pufferkapazität _{pH 4}	mmol	414	404	425
Pufferkapazität _{pH 3}	mmol	604	590	595

¹Ohne Zusatz, d. h. endogene Phytaseaktivität; MF: Mischfutter, uS: ursprüngliche Substanz, TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rp: Rohprotein, Rfe: Rohfett, Rfa: Rohfaser, NfE: N-freie Extraktstoffe, ME: umsetzbare Energie, lösl. P: löslicher Phosphor, Ink.: Inkubation

Ergebnisse

Insgesamt war das MF der Kontrollgruppe etwas feiner als die beiden anderen MF-Varianten. So betrug der Anteil der Partikel mit einem Durchmesser $\geq 1,0$ mm im MF-K 33,7 %, im MF-V1 und MF-V2 hingegen 46,4 bzw. 40,5 %. Der Anteil der Partikel $< 0,2$ mm war entsprechend im MF-K am höchsten (14,5 %).

Tabelle 20: Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 1)

Partikelgröße [mm]	K	V1	V2
$\geq 3,15$	0,00	0,12	0,08
$\geq 2,00$ bis $< 3,15$	2,24	3,20	3,08
$\geq 1,40$ bis $< 2,00$	12,8	16,9	14,8
$\geq 1,00$ bis $< 1,40$	18,7	26,1	22,6
$\geq 0,80$ bis $< 1,00$	11,2	12,3	13,1
$\geq 0,56$ bis $< 0,80$	14,6	14,8	14,9
$\geq 0,40$ bis $< 0,56$	10,7	8,82	10,9
$\geq 0,20$ bis $< 0,40$	15,2	13,7	12,4
$< 0,20$	14,5	3,99	8,20

TS: Trockensubstanz, MF: Mischfutter

Durchgang 2

Die Tabellen 21 und 23 zeigen die Ergebnisse der chemischen Analyse der MF-Varianten im Durchgang 2 sowie die entsprechenden Phytaseaktivitäten und die kalkulierten Energiegehalte. Den Tabellen 22 und 24 sind des Weiteren die Partikelgrößenverteilungen dieser MF zu entnehmen.

Um den P-Gehalt im MF-K sowie den Na-Gehalt im MF-V1 und im MF-V2 zu erhöhen, wurde die Rezeptur des Mastfutter 1 im zweiten Durchgang gegenüber dem ersten Durchgang dahingehend verändert, dass höhere Anteile an MNP und KCl im MF-K und entsprechend höhere Anteile an NaCl in den beiden anderen MF-Varianten eingesetzt wurden (vgl. Tabelle 7 und Tabelle 8). Die drei MF-Varianten des Mastfutters I enthielten so im zweiten Durchgang 4,76 (K; entspricht 0,539 % der TS) bzw. 3,08 g P/kg uS (V1 und V2). Die Phytaseaktivitäten in den beiden MF-Varianten mit einem Phytase-Zusatz (K und V1) variierten im Bereich der analytischen Spielräume; im MF-V2 war die Phytaseaktivität mit 393 FTU/kg uS erwartungsgemäß geringer als in MF-K und MF-V1. Auch in sämtlichen weiteren Parameter bestanden keine Unterschiede zwischen den MF-Varianten, die über den Analysespielraum hinausgingen.

Ergebnisse

Tabelle 21: Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivität sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 2, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
TS	g	884	883	884
Ra	g	51,2	47,3	45,8
Rp	g	166	166	167
Rfe	g	34,4	35,8	34,4
Rfa	g	44,2	45,8	44,0
NfE	g	588	588	592
Stärke	g	411	394	406
Zucker	g	35,1	34,8	36,3
ME	MJ	13,1	13,1	13,2
Ca	g	7,39	6,92	7,04
Mg	g	1,20	1,21	1,24
P	g	4,76	3,08	3,08
Na	g	1,40	1,33	1,29
K	g	7,93	6,75	7,16
Cl	g	3,73	3,46	3,52
S	g	1,94	2,17	2,04
Phytaseaktivität	FTU	998	1169	393 ¹
lösl. P _{H₂O} ohne Ink.	g	2,21	0,85	0,82
lösl. P _{H₂O} +90min Ink.	g	3,03	1,64	1,30
lösl. P _{H₂O} , inaktiv.	g	2,32	0,83	0,68
lösl. P _{HCl} ohne Ink.	g	2,21	0,89	0,68
lösl. P _{HCl} +90min Ink.	g	2,58	1,39	1,07
Cu	mg	49,0	45,4	43,2
Zn	mg	103	104	105
Fe	mg	381	372	317
Mn	mg	39,5	39,3	40,0
Se	mg	0,323	0,383	0,396
Vit. D ₃	IE	1255	~ 1000	~ 1000
Lys	g	11,2	10,5	10,9
Met	g	3,17	3,15	3,60
Cys	g	2,85	2,77	2,97
Thr	g	6,68	6,94	7,02
pH		5,88	5,99	5,97
Pufferkapazität _{pH 4}	mmol	442	443	424
Pufferkapazität _{pH 3}	mmol	609	619	590

¹Ohne Zusatz, d. h. endogene Phytaseaktivität; MF: Mischfutter, uS: ursprüngliche Substanz, TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rp: Rohprotein, Rfe: Rohfett, Rfa: Rohfaser, NfE: N-freie Extraktstoffe, ME: umsetzbare Energie, lösl. P: löslicher Phosphor, Ink.: Inkubation

Ergebnisse

Mit 45,4 % hatte das MF-K einen gegenüber den MF-Varianten V1 und V2 etwas höheren Anteil an Partikeln mit einem Durchmesser $\geq 1,00$ mm (V1: 42,5 %; V2: 43,6 %). Der Anteil an feinen Partikeln ($< 0,2$ mm) war hingegen mit 8,07 % im MF-V2 am höchsten.

Tabelle 22: Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 2)

Partikelgröße [mm]	K	V1	V2
$\geq 3,15$	0,90	0,39	0,96
$\geq 2,00$ bis $< 3,15$	4,02	4,14	4,26
$\geq 1,40$ bis $< 2,00$	18,0	16,5	16,4
$\geq 1,00$ bis $< 1,40$	22,5	21,5	22,0
$\geq 0,80$ bis $< 1,00$	12,2	12,2	12,3
$\geq 0,56$ bis $< 0,80$	14,0	14,2	14,3
$\geq 0,40$ bis $< 0,56$	9,28	9,83	9,42
$\geq 0,20$ bis $< 0,40$	12,8	17,6	12,4
$< 0,20$	6,29	3,67	8,07

TS: Trockensubstanz, MF: Mischfutter

Das Mastfutter II mit einem Zusatz von anorganischem Phosphor hatte einen P-Gehalt von 4,23 g/kg uS (entspricht 0,479 % der TS); die beiden anderen MF-Varianten enthielten – wie geplant – entsprechend weniger P (2,74 bzw. 2,88 g/kg uS), d. h. nur den originär pflanzeigenen P. Die MF-K und -V1 wiesen höhere Phytaseaktivitäten auf als das MF für die Versuchsgruppe 2, dem keine Phytase zugesetzt war (1022, 1139 bzw. 440 FTU/kg uS). Der Ca-Gehalt war mit 7,64 g/ kg uS im MF-V2 am höchsten. Die MF-Varianten K und V1 enthielten 7,47 bzw. 7,39 g Ca/kg uS. Diese Unterschiede blieben jedoch - ebenso wie die Variationen bezüglich der Spurenelement-Gehalte - innerhalb der analytischen Spielräume.

Ergebnisse

Tabelle 23: Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivität sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter II, Durchgang 2, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
TS	g	883	882	883
Ra	g	48,2	43,9	44,0
Rp	g	165	161	163
Rfe	g	31,3	32,0	31,0
Rfa	g	37,7	35,0	37,8
NfE	g	601	610	607
Stärke	g	430	449	446
Zucker	g	36,2	35,7	36,0
ME	MJ	13,3	13,5	13,4
Ca	g	7,47	7,39	7,64
Mg	g	1,12	1,09	1,10
P	g	4,23	2,74	2,88
Na	g	1,71	1,50	1,63
K	g	7,73	5,83	5,78
Cl	g	3,81	3,81	3,81
S	g	2,02	1,87	1,84
Phytaseaktivität	FTU	1022	1139	440 ¹
lösl. P _{H₂O} ohne Ink.	g	2,40	0,78	0,73
lösl. P _{H₂O} +90min Ink.	g	2,79	1,29	1,24
lösl. P _{H₂O} , inaktiv.	g	2,43	0,75	0,59
lösl. P _{HCl} ohne Ink.	g	2,29	0,89	0,93
lösl. P _{HCl} +90min Ink.	g	2,86	1,47	1,09
Cu	mg	41,8	40,7	32,7
Zn	mg	91,9	92,2	90,0
Fe	mg	345	304	347
Mn	mg	43,5	45,2	48,0
Se	mg	0,383	0,424	0,282
Vit. D ₃	IE	~ 1000	~ 1000	~ 1000
Lys	g	9,69	9,14	9,30
Met	g	3,19	2,96	2,68
Cys	g	3,22	2,88	2,85
Thr	g	6,45	6,97	6,74
pH		5,96	6,13	6,09
Pufferkapazität _{pH 4}	mmol	475	457	447
Pufferkapazität _{pH 3}	mmol	645	611	628

¹Ohne Zusatz, d. h. endogene Phytaseaktivität; MF: Mischfutter, uS: ursprüngliche Substanz, TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rp: Rohprotein, Rfe: Rohfett, Rfa: Rohfaser, NfE: N-freie Extraktstoffe, ME: umsetzbare Energie, lösl. P: löslicher Phosphor, Ink.: Inkubation

Ergebnisse

Der Anteil an Partikeln mit einem Durchmesser $> 1,0$ mm war in allen drei MF-Varianten ähnlich (K: 39,9 %; V1: 41,3 %; V2: 40,0 %) und auch der Anteil der feinen Partikel ($< 0,2$ mm) unterschied sich zwischen den drei MF kaum (vgl. Tabelle 24).

Tabelle 24: Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten (Mastfutter II, Durchgang 2)

Siebweite [mm]	K	V1	V2
$\geq 3,15$	0,73	0,62	0,67
$\geq 2,00$ bis $< 3,15$	3,83	3,21	2,97
$\geq 1,40$ bis $< 2,00$	13,3	15,0	14,4
$\geq 1,00$ bis $< 1,40$	22,1	22,5	22,0
$\geq 0,80$ bis $< 1,00$	12,7	12,0	11,8
$\geq 0,56$ bis $< 0,80$	15,5	15,5	15,3
$\geq 0,40$ bis $< 0,56$	10,1	9,66	9,85
$\geq 0,20$ bis $< 0,40$	13,4	13,0	13,2
$< 0,20$	8,37	8,57	9,85

TS: Trockensubstanz, MF: Mischfutter

4.2 Gesundheitszustand

Der Gesundheitszustand der Tiere in den beiden Durchgängen wird im Folgenden näher beschrieben. Während der Versuche traten bei mehreren Tieren Verletzungen bzw. Erkrankungen auf, die behandelt wurden. Eine detaillierte Beschreibung der erfolgten Therapien ist dem Tabellenanhang zu entnehmen (Tabellen 69 und 70).

Durchgang 1

Während der Versuchsphase zeigten ein Tier aus V1 (OM 11) sowie zwei Tiere aus V2 (OM 10 und OM 13) zwischenzeitlich wiederholt eine hundesitzige Körperhaltung. Bei Aufstehversuchen rutschten diese drei Tiere häufig mit den Hintergliedmaßen aus. Da dies jedoch weder mit einer Lahmheit noch mit einer sonstigen eindeutigen Bewegungsstörung einherging, wurde von einer Behandlung abgesehen. Um den Tieren das Aufstehen zu erleichtern und das Risiko des Ausgrätschens zu minimieren, wurde ab d23 vollständig auf eine nasse Reinigung der Abteile verzichtet. Mit Bildung einer festen „Strohmatratze“ wurde bei den drei genannten Tieren seltener ein Ausrutschen beobachtet.

Ergebnisse

Bei einem weiteren Tier wurde am d23 eine Entzündung der medialen Nebenklaua hinten links festgestellt. Es erfolgte eine analgetische und antiphlogistische Behandlung für sechs Tage.

Durchgang 2

Zwei Tiere der Kontrollgruppe zeigten an d9 (OM 745) bzw. d11 (OM 735) eine hochgradige, gemischte Lahmheit der linken Hintergliedmaße, ein weiteres Tier aus V1 (OM 730) fiel am d11 mit einer mittelgradigen, gemischten Lahmheit der Hinterhand auf. Bei Belastung war ein Zittern der Hintergliedmaßen zu beobachten. Da die sofortige analgetische und antiphlogistische Behandlung die Symptomatik nicht deutlich verbesserte, wurden diese drei Tiere an d13 aus den jeweiligen Gruppen isoliert und für weiterführende Untersuchungen in die Klinik für kleine Klauentiere, Forensische Medizin und Ambulatorische Klinik der Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover gebracht. Die röntgenologische Untersuchung ergab bei den beiden Tieren der Kontrollgruppe den Verdacht auf eine *Epiphyseolysis capitis ossis femoris*. Um den Verdacht ggf. bestätigen zu können, erfolgte die vorzeitige Euthanasie eines der beiden Tiere (OM 735) zu diagnostischen Zwecken. Da die Sektion dieses Tieres jedoch keinen Hinweis auf eine Epiphyseolysis des Femurkopfs ergab, wurde entschieden, das zweite betroffene Tier (OM 745) in Einzelhaltung und unter analgetischer, antibiotischer und antiphlogistischer Therapie weiter zu beobachten. Die Futteraufnahme wurde für dieses Tier während der Einzelhaltung individuell erfasst. An d14 wurde aufgrund der Lahmheit bei diesem Tier auf die Wägung verzichtet. Unter der Therapie verbesserte sich der Zustand zunächst deutlich, an d23 war die Lahmheit jedoch wieder hochgradig, sodass dieses Tier am nächsten Tag vorzeitig euthanasiert wurde. Auch in der Sektion konnte keine Ursache der Lahmheit festgestellt werden. Bei dem Tier aus der Versuchsgruppe 1 blieben sowohl die klinisch-orthopädische als auch die röntgenologische Untersuchung ohne besonderen Befund, sodass dieses Tier aufgrund der insgesamt weniger stark ausgeprägten Symptomatik im Anschluss an die Untersuchungen in die Gruppe zurückgebracht wurde. Dort erfolgte bis zur Besserung des Zustandes ebenfalls eine analgetische, antibiotische und antiphlogistische Behandlung.

Im weiteren Verlauf des Versuchs fielen mehrere Tiere der Gruppen V1 und V2 wiederholt mit – zumeist unspezifischen – Störungen des Bewegungsablaufs auf, die analgetisch und antiphlogistisch behandelt werden konnten. An d45 wurde bei einem Tier (OM 722) eine

mittelgradige, gemischte Lahmheit festgestellt und zunächst ein Therapieversuch unternommen. Am Folgetag zeigte dieses Tier jedoch nach einem traumatischen Insult eine Paraparese der Hintergliedmaßen, sodass sofort eine Euthanasie durchgeführt wurde. In der anschließenden Sektion wurde eine beidseitige Femurfraktur diagnostiziert.

In der Kontrollgruppe fiel ein Tier (OM 744) wiederholt durch Lahmheit bzw. hundesitzige Körperhaltung auf. Es erfolgte eine analgetische und antiphlogistische Therapie bis zur Besserung der Symptomatik.

Da die vorzeitige Euthanasie der Tiere mit den Ohrmarken-Nummern 722 und 745 ein (d46) bzw. drei Tage (d24) vor dem jeweils planmäßigen Sektionstermin erfolgte, wurden die Daten dieser beiden Tiere in der gesamten Auswertung mit in die zugehörigen Gruppen einbezogen. Das Tier mit der Ohrmarken-Nummer 735 wurde bei den Auswertungen der Blut- und Knochenparametern nicht berücksichtigt, sodass zum Zeitpunkt d27 in der Kontrollgruppe lediglich die Werte von drei Tieren in die Auswertung eingingen.

4.3 Leistungsdaten

Zu den erfassten Leistungsdaten zählten der Futtermittelverbrauch und –aufwand auf Gruppenbasis sowie die KM-Entwicklung eines jeden Tieres. Auf die diesbezüglichen Ergebnisse wird im Folgenden näher eingegangen.

4.3.1 Futtermittelverbrauch und –aufwand

Das Angebot von Futter und Wasser erfolgte *ad libitum*. Auf Gruppenbasis wurde wöchentlich der Futtermittelverbrauch durch Futterrückwaage ermittelt und anschließend der Futteraufwand je kg KM-Zunahme berechnet.

Durchgang 1 (KM: ca. 15 bis 35 kg)

Bezüglich des mittleren Futtermittelverbrauchs und –aufwands zwischen d0 und d33 unterschieden sich die drei Gruppen nicht signifikant voneinander (s. Tabelle 25). Der Futteraufwand im ersten Durchgang war numerisch in der Kontrollgruppe am günstigsten (1,66:1), in den Gruppen V1 und V2 hingegen erheblich höher.

Tabelle 25: Mittlerer täglicher Futtermittelverbrauch und -aufwand zwischen d0 und d33 ($\bar{x} \pm s$) im Durchgang 1

Gruppe	K	V1	V2
Futtermittelverbrauch [g/Tier/Tag]	1194 ^a ± 451	1350 ^a ± 411	1123 ^a ± 317
Futtermittelaufwand	1,66 ^a ± 0,269	2,34 ^a ± 0,643	2,24 ^a ± 0,260

Durchgang 2 (KM: ca. 30 bis 95 kg)

Der mittlere tägliche Futtermittelverbrauch sowie der mittlere Futtermittelaufwand über die gesamte Versuchsdauer im Durchgang 2 sind in Tabelle 26 dargestellt. Über die gesamte Versuchsdauer ausgewertet, war der mittlere tägliche Futtermittelverbrauch pro Tier in der Versuchsgruppe 2 signifikant geringer als in der Kontrollgruppe; im Hinblick auf den Futtermittelaufwand bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Gruppen. Numerisch wies die Kontrollgruppe jedoch den günstigsten Futtermittelaufwand auf.

Tabelle 26: Mittlerer täglicher Futtermittelverbrauch und -aufwand zwischen d0 und d80 ($\bar{x} \pm s$) im Durchgang 2

Gruppe	K	V1	V2
Futtermittelverbrauch [g/Tier/Tag]	2781 ^a ± 585	2480 ^{ab} ± 517	2180 ^b ± 374
Futtermittelaufwand	2,71 ^a ± 0,679	2,79 ^a ± 0,320	2,94 ^a ± 0,365

4.3.2 Körpermassenentwicklung

Die wöchentlich erfassten Körpermassen sind als Mittelwerte (\pm Standardabweichung) in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt.

Durchgang 1

An d-2 betrug die mittlere KM aller 16 Ferkel $14,6 \pm 1,36$ kg. Im Anschluss an diese Wägung erfolgte die Aufteilung der Tiere in die Gruppen K, V1 und V2 sowie die Auswahl der vier Tiere zur Sektion am folgenden Tag. Es ergaben sich mittlere KM von $14,1 \pm 1,06$; $14,0 \pm 0,937$ und $14,1 \pm 1,35$ kg in den drei Gruppen K, V1 und V2. Die vier an d-1 für die Sektion vorgesehenen Ferkel (VB) waren signifikant schwerer; diese wiesen eine mittlere KM von $16,3 \pm 0,632$ kg zum Zeitpunkt der Gruppeneinteilung (d-2) auf.

Ergebnisse

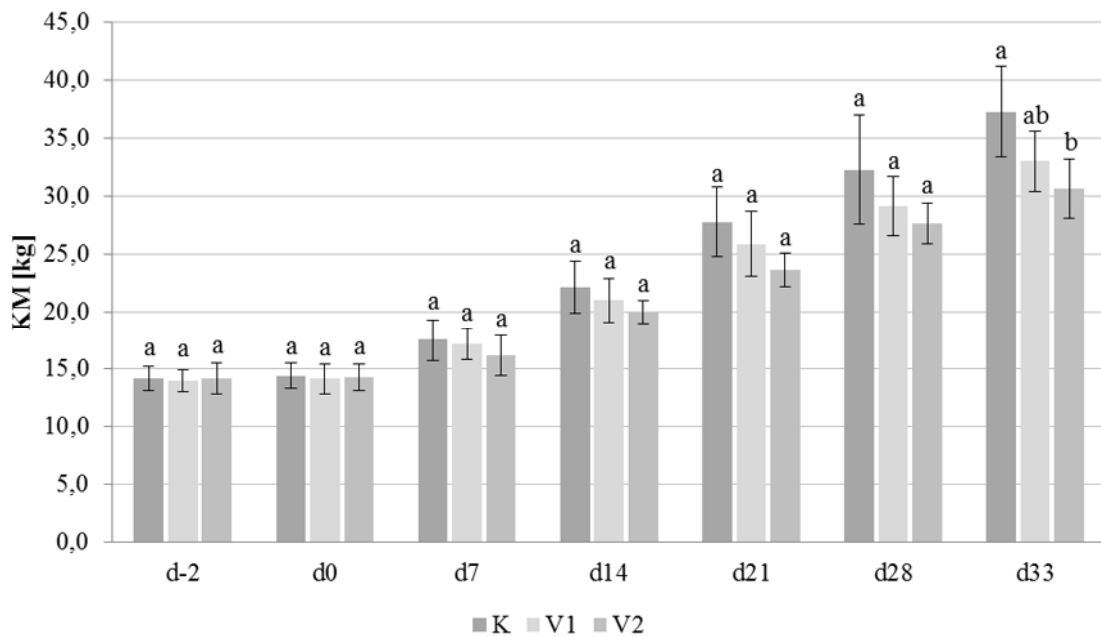


Abbildung 5: KM-Entwicklung [kg] der Ferkel im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$), in jeder Gruppe $n = 4$

^{a, b} kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen zu den jeweiligen Zeitpunkten; KM: Körpermasse, OM: Ohrmarke

Die mittlere KM der Tiere einer jeden Gruppe stieg zwischen den einzelnen Wägungen kontinuierlich an. Ab d7 wurde eine Tendenz zur unterschiedlichen KM-Entwicklung im Mittel der Tiere je Gruppe erkennbar; die Tiere der Kontrollgruppe hatten von diesem Zeitpunkt an stets die höchste mittlere KM. Die Unterschiede waren jedoch erst zu Versuchsende an d33 signifikant.

Durchgang 2

Die mittlere KM aller Tiere ($n = 40$) an d-2 betrug $27,0 \pm 3,68$ kg. Im Anschluss an diese Wägung erfolgte die Aufteilung der Tiere in die drei verschiedenen Fütterungsgruppen und die Auswahl von vier Tieren (Gruppe VB) für die Sektion am Folgetag. Die vier Tiere aus der Gruppe VB wiesen eine mittlere KM von $28,9 \pm 6,70$ kg auf; in den Gruppen K, V1 und V2 betragen die mittleren KM $26,8 \pm 3,48$; $26,8 \pm 3,24$ bzw. $26,9 \pm 3,44$ kg.

Ergebnisse

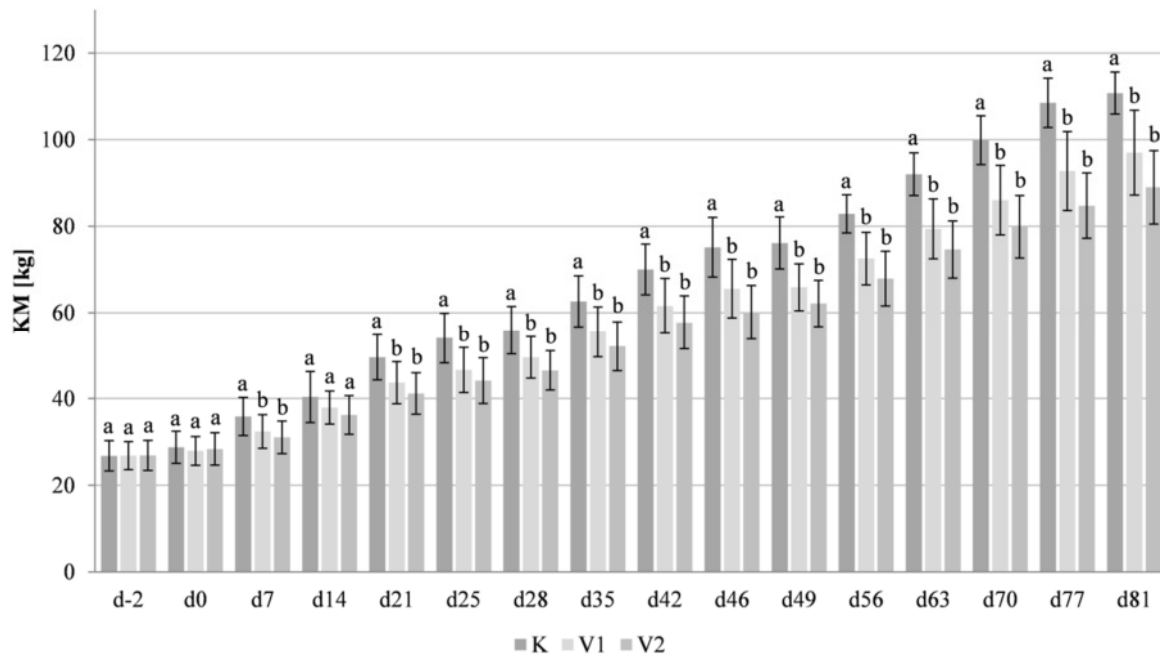


Abbildung 6: KM-Entwicklung [kg] der Schweine im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$); in jeder Gruppe $n = 12$ (d-2 bis d25), $n = 8$ (d28 bis d46) bzw. $n = 4$ (d49 bis d82)¹

^{a, b} kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen zu den jeweiligen Zeitpunkten; ¹ d14: KM eines Tieres (OM 735) kalkuliert; K: $n = 11$, da ein Tier (OM 745) zu diesem Zeitpunkt nicht gewogen wurde; d25: KM eines Tieres (OM 745) kalkuliert; K: $n = 11$ wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; KM: Körpermasse, OM: Ohrmarke

Wie im Durchgang 1 war auch im zweiten Durchgang eine unterschiedliche KM-Entwicklung der Tiere in den drei Gruppen zu beobachten. Bereits an d7 war die mittlere KM der Tiere in der Kontrollgruppe signifikant höher als die der Tiere in den Gruppen V1 und V2. Mit Ausnahme von d14 war dieser Unterschied in den KM zu jedem nachfolgenden Zeitpunkt statistisch signifikant. Zwischen den Gruppen V1 und V2 bestand in Bezug auf die mittlere KM der Tiere zu keinem Zeitpunkt ein signifikanter Unterschied, numerisch hatten jedoch die Tiere aus der Gruppe V1 ab d7 zu jedem Messzeitpunkt eine höhere mittlere KM als die Tiere aus der Gruppe V2.

4.4 Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der alkalischen Phosphatase (AP) im Serum

Die Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP wurden im Serum aller Schweine an d-1 sowie zu den Sektionszeitpunkten gemessen. Die Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Durchgang 1

An d-1, d. h. vor Einsatz der drei MF-Varianten, bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tieren aus den drei Gruppen K, V1 und V2 hinsichtlich der Ca- und P-Konzentrationen sowie der Aktivität der AP im Serum. Die mittleren P-Konzentrationen im Serum variierten um $1,60 \pm 0,222$; $1,37 \pm 0,308$ bzw. $1,61 \pm 0,136$ mmol/l. Die mittleren Werte aller 16 Ferkel zu diesem Zeitpunkt sind in der Tabelle 27 dargestellt.

Nach knapp fünfwöchiger Versuchszeit waren zwischen den drei Gruppen signifikante Unterschiede bezüglich der mittleren P-Konzentration im Serum der Tiere feststellbar: Die Kontrollgruppe hatte mit $2,06 \pm 0,169$ mmol/l den höchsten Wert gefolgt von den Gruppen V1 und V2. Die Ca-Konzentration im Serum zeigte im Gruppenvergleich einen entgegengesetzten Verlauf. Die Unterschiede in diesem Parameter waren jedoch statistisch nicht signifikant. Die Aktivität der AP war im Serum der Tiere aus der Versuchsgruppe 2 mit 732 ± 170 U/l am höchsten und unterschied sich signifikant von der mittleren AP-Aktivität im Serum der Tiere aus der Kontrollgruppe ($447 \pm 61,8$ U/l). Die Aktivität der AP im Serum der Tiere aus der Versuchsgruppe 1 variierte zwischen den Werten der Gruppen K und V2. Der untere Abschnitt von Tabelle 27 zeigt die an d34 gemessenen Werte.

Tabelle 27: Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Serum der Tiere vor Versuchsbeginn an d-1 (n = 16) und zu Versuchsende an d34 (n = 4) im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$)

VT	Ca [mmol/l]			P [mmol/l]			AP [U/l]		
d-1 (n = 16)	$3,21 \pm 0,199$			$1,61 \pm 0,276$			$617 \pm 93,7$		
VT	Ca [mmol/l]			P [mmol/l]			AP [U/l]		
	K	V1	V2	K	V1	V2	K	V1	V2
d34 (n = 4)	$2,85^a$ $\pm 0,278$	$3,33^a$ $\pm 0,419$	$3,56^a$ $\pm 0,400$	$2,06^a$ $\pm 0,169$	$1,65^b$ $\pm 0,082$	$1,21^c$ $\pm 0,059$	447^b $\pm 61,8$	526^{ab} ± 142	732^a ± 170

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte zwischen den Gruppen, AP: alkalische Phosphatase, VT: Versuchstag

Durchgang 2

Auch im zweiten Durchgang bestanden vor Verwendung der drei MF-Varianten hinsichtlich der Ca- und P-Konzentration sowie der Aktivität der AP im Serum keine signifikanten Unterschiede zwischen den Tieren der Gruppen K, V1 und V2. Die Tiere in den drei Gruppen

Ergebnisse

wiesen an d-1 mittlere P-Konzentrationen im Serum von $2,33 \pm 0,194$ (K), $2,20 \pm 0,225$ (V1) und $2,32 \pm 0,184$ mmol/l (V2) auf. In Tabelle 28 werden die mittleren Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Serum aller 40 Schweine an d-1 und die Ergebnisse der Messungen im Serum der Tiere aus den Gruppen K, V1 und V2 zu den verschiedenen Zeitpunkten im Durchgang 2 dargestellt.

Tabelle 28: Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Serum der Tiere aus dem Durchgang 2 vor Versuchsbeginn (d-1; n = 40) und zu den verschiedenen Sektionszeitpunkten an d26 (n = 12), d47 (n = 8) und d82 (n = 4), ($\bar{x} \pm s$)

VT	Ca [mmol/l]			P [mmol/l]			AP [U/l]		
	K	V1	V2	K	V1	V2	K	V1	V2
d-1 (n = 40)	$2,84 \pm 0,186$			$2,28 \pm 0,207$			$471 \pm 81,6$		
d26 ¹ (n = 12)	$2,92^b$ $\pm 0,107$	$3,60^a$ $\pm 0,197$	$3,58^a$ $\pm 0,437$	$2,75^a$ $\pm 0,147$	$1,62^b$ $\pm 0,266$	$1,58^b$ $\pm 0,154$	424^b $\pm 76,3$	559^a $\pm 64,4$	557^a $\pm 92,5$
d47 (n = 8)	$2,69^b$ $\pm 0,125$	$3,28^a$ $\pm 0,226$	$3,32^a$ $\pm 0,247$	$2,38^a$ $\pm 0,423$	$1,65^b$ $\pm 0,111$	$1,32^c$ $\pm 0,325$	378^b $\pm 86,6$	472^a $\pm 67,3$	488^a $\pm 79,9$
d82 (n = 4)	$2,54^b$ $\pm 0,079$	$2,91^a$ $\pm 0,097$	$2,99^a$ $\pm 0,137$	$2,21^a$ $\pm 0,367$	$1,73^{ab}$ $\pm 0,075$	$1,35^b$ $\pm 0,516$	334^a $\pm 65,7$	432^a $\pm 62,7$	496^a ± 134

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte zwischen den Gruppen innerhalb eines Zeitpunktes; ¹K: n = 11 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; VT: Versuchstag, AP: alkalische Phosphatase, OM: Ohrmarke

Das an d13 vorzeitig euthanasierte Tier aus der Kontrollgruppe (OM 735) wies folgende Werte im Serum auf:

- Ca: 2,59 mmol/l
- P: 2,71 mmol/l
- AP: 387 U/l

Zum Zeitpunkt der Sektionen an d26 und d47 unterschieden sich die mittleren Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Serum der Tiere aus der Kontrollgruppe statistisch signifikant von den Werten der Tiere beider Versuchsgruppen. Der Unterschied zwischen den Gruppen V1 und V2 war in Bezug auf die P-Konzentration im Serum der Tiere nur an d47 statistisch abzusichern (V1: $1,65 \pm 0,111$ mmol P/l, V2: $1,32 \pm 0,325$ mmol P/l). Hinsichtlich der Ca-Konzentration und der Aktivität der AP im Serum unterschieden sich die Tiere dieser beider Gruppen zu keinem Zeitpunkt signifikant. Tendenziell zeigte sich im

Gruppenvergleich - wie schon im ersten Durchgang - ein gegensätzlicher Verlauf der Ca- und P-Konzentrationen im Serum. Im Hinblick auf die AP-Aktivität im Serum der Tiere waren an d82 keine statistisch signifikanten Unterschiede mehr zwischen den drei Gruppen K, V1 und V2 festzustellen.

4.5 Knochenentwicklung und -zusammensetzung

Die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen zur Charakterisierung der Knochenentwicklung und -mineralisation werden im Folgenden dargestellt. Werden dabei die Abkürzungen Hum, Ra/Ul, Fem bzw. Ti/Fi verwendet, so sind stets die jeweils untersuchten Knochenanteile und nicht die Knochen als Ganzes gemeint. Es wurden von Humerus und Tibia/Fibula die proximalen Anteile untersucht, wohingegen von Femur und Radius/Ulna die distalen Abschnitte für die Dichtebestimmung und chemische Analyse verwendet wurden (vgl. Tabelle 12).

4.5.1 Knochenmaße

An verschiedenen Knochen wurden jeweils die Gesamtlänge sowie der Umfang der Diaphyse und die Kompakta-Dicke (cranio-caudal und latero-lateral) auf halber Höhe der Gesamtlänge bestimmt.

Durchgang 1

Die verschiedenen Knochenmaße wurden im ersten Durchgang an sechs unterschiedlichen Knochen der Vorder- bzw. Hintergliedmaße eines jeden Tieres ermittelt.

Die Mittelwerte waren in allen Parametern an jedem der sechs Knochen bei den Tieren der Kontrollgruppe im Vergleich zu den Tieren aus den Gruppen V1 und V2 numerisch am höchsten. Statistisch signifikante Unterschiede bezüglich der Knochenlänge der Tiere aus den verschiedenen Gruppen wurden jedoch nur an der Tibia festgestellt (14,0 cm vs. 13,3 cm vs. 13,1 cm). Hinsichtlich des Diaphysen-Umfangs von Radius und MT III unterschieden sich alle drei Gruppen signifikant voneinander (Radius: 4,95 vs. 4,68 vs. 4,35 cm; MT III: 4,23 vs. 4,05 vs. 3,80 cm).

Die beiden Tabellen 29 und 30 zeigen die Knochenmaße verschiedener Knochen der Vorder- bzw. Hintergliedmaße von Tieren aus dem Durchgang 1.

Ergebnisse

Am Humerus war die mittlere latero-laterale Kompakta-Dicke bei den Tieren der Gruppe V2 signifikant geringer als bei den Tieren der Kontrollgruppe (Faktor: 1,74); die cranio-caudale Kompakta-Dicke des Humerus unterschied sich hingegen nicht signifikant zwischen den Tieren dieser beiden Gruppen. Auch am MT III bestanden signifikante Gruppenunterschiede hinsichtlich der Kompakta-Dicke allerdings nur in latero-lateraler Richtung.

Tabelle 29: Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke von verschiedenen Knochen der Vordergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Humerus	Länge [cm]	10,1 ± 0,127		
		Umfang [cm]	4,35 ± 0,129		
		Dicke _{Ko., min.} [mm]	4,21 ± 0,356		
		Dicke _{Ko., max.} [mm]	2,25 ± 0,285		
	Radius	Länge [cm]	7,48 ± 0,206		
		Umfang [cm]	3,95 ± 0,238		
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	1,39 ± 0,075		
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	1,90 ± 0,121		
	MC III	Länge [cm]	4,81 ± 0,058		
		Umfang [cm]	3,48 ± 0,150		
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	0,850 ± 0,119		
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	1,15 ± 0,172		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d34	Humerus	Länge [cm]	12,6 ^a ± 0,285	12,4 ^a ± 0,366	12,1 ^a ± 0,182
		Umfang [cm]	5,63 ^a ± 0,206	5,28 ^{ab} ± 0,126	5,13 ^b ± 0,299
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	5,46 ^a ± 0,767	4,85 ^a ± 0,467	4,92 ^a ± 0,461
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	2,93 ^a ± 0,188	1,96 ^b ± 0,249	1,68 ^b ± 0,294
	Radius	Länge [cm]	10,0 ^a ± 0,513	9,84 ^a ± 0,364	9,67 ^a ± 0,121
		Umfang [cm]	4,95 ^a ± 0,129	4,68 ^b ± 0,126	4,35 ^c ± 0,173
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	1,50 ^a ± 0,497	1,07 ^a ± 0,647	1,38 ^a ± 0,279
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	2,13 ^a ± 0,177	1,90 ^a ± 0,451	1,74 ^a ± 0,399
	MC III	Länge [cm]	6,15 ^a ± 0,166	6,00 ^a ± 0,132	5,91 ^a ± 0,211
		Umfang [cm]	4,20 ^a ± 0,141	4,15 ^a ± 0,129	3,90 ^b ± 0,082
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	1,21 ^a ± 0,239	0,938 ^a ± 0,078	0,888 ^a ± 0,189
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	1,62 ^a ± 0,225	1,28 ^b ± 0,143	1,28 ^b ± 0,121

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; VT: Versuchstag, MC III: *Oss metacarpale III*, Ko: Kompakta, c-c: cranio-caudal, l-l: latero-lateral

Die mittlere cranio-caudale Kompakta-Dicke erreichte an allen drei Knochen der Hintergliedmaße bei den Tieren der Kontrollgruppe signifikant höhere Werte als bei denen aus der Versuchsgruppe 2 (Femur: Faktor 1,50; Tibia: Faktor 1,57 bzw. MT III: Faktor: 1,52).

Ergebnisse

Die latero-laterale Kompakta-Dicke wurde hingegen nur am dritten Metatarsalknochen signifikant von der P-Versorgung der Tiere beeinflusst (K: 1,62 mm vs. V2: 1,18 mm).

Tabelle 30: Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke von verschiedenen Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Femur	Länge [cm]	$11,3 \pm 3,76$		
		Umfang [cm]	$4,78 \pm 0,256$		
		Dicke _{Ko., min.} [mm]	$2,87 \pm 0,268$		
		Dicke _{Ko., max.} [mm]	$2,94 \pm 0,206$		
	Tibia	Länge [cm]	$10,7 \pm 0,196$		
		Umfang [cm]	$4,35 \pm 0,351$		
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	$2,03 \pm 0,181$		
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	$3,13 \pm 0,293$		
	MT III	Länge [cm]	$5,22 \pm 0,129$		
		Umfang [cm]	$3,35 \pm 0,129$		
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	$0,931 \pm 0,138$		
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	$1,30 \pm 0,117$		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d34	Femur	Länge [cm]	$14,4^a \pm 0,515$	$13,9^a \pm 0,484$	$13,7^a \pm 0,199$
		Umfang [cm]	$5,98^a \pm 0,250$	$5,58^a \pm 0,050$	$5,58^a \pm 0,287$
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	$2,84^a \pm 0,417$	$2,46^{ab} \pm 0,394$	$1,89^b \pm 0,277$
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	$2,83^a \pm 0,587$	$2,44^a \pm 0,536$	$1,95^a \pm 0,227$
	Tibia	Länge [cm]	$14,0^a \pm 0,057$	$13,3^b \pm 0,390$	$13,1^b \pm 0,357$
		Umfang [cm]	$5,28^a \pm 0,096$	$5,03^a \pm 0,050$	$5,00^a \pm 0,283$
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	$2,74^a \pm 0,317$	$2,06^b \pm 0,177$	$1,74^b \pm 0,083$
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	$2,99^a \pm 0,769$	$2,10^a \pm 0,352$	$1,96^a \pm 0,404$
	MT III	Länge [cm]	$6,62^a \pm 0,163$	$6,54^a \pm 0,222$	$6,54^a \pm 0,299$
		Umfang [cm]	$4,23^a \pm 0,126$	$4,05^b \pm 0,100$	$3,80^c \pm 0,082$
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	$1,14^a \pm 0,151$	$0,925^{ab} \pm 0,223$	$0,750^b \pm 0,134$
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	$1,62^a \pm 0,256$	$1,38^{ab} \pm 0,259$	$1,18^b \pm 0,132$

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; VT: Versuchstag, Ko: Kompakta, min.: minimal, max.: maximal, c-c: cranio-caudal, l-l: latero-lateral

Die prozentualen Unterschiede der mittleren Knochenlängen und Kompakta-Dicke von den verschiedenen Knochen der Tiere aus den Gruppen K, V1 und V2 gegenüber den jeweiligen Mittelwerten in der Gruppe VB sind in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Prozentuale Unterschiede der mittleren Knochenlänge und der mittleren Kompakta-Dicke von verschiedenen Gliedmaßenknochen der Tiere aus den drei Gruppen K, V1 und V2 an d34 gegenüber denen der Tiere aus der Gruppe VB (d-1) im Durchgang 1, [%]

VT	Gruppe		K	V1	V2
	d34	Humerus	Länge	24,6	22,0
Dicke _{Ko.}			29,9	5,42	2,13
Radius		Länge	34,2	31,5	29,2
		Dicke _{Ko.}	10,3	-9,70	-5,13
MC III		Länge	28,0	24,7	23,0
		Dicke _{Ko.}	41,6	10,6	8,44
Femur		Länge	27,0	23,1	21,3
		Dicke _{Ko.}	-2,26	-15,6	-33,9
Tibia		Länge	30,9	25,1	22,6
		Dicke _{Ko.}	10,9	-19,5	-28,2
MT III		Länge	27,0	25,4	25,3
		Dicke _{Ko.}	23,5	3,36	-13,7

VT: Versuchstag, Ko: Kompakta, MC III: *Os metacarpale III*, MT III: *Os metatarsale III*

Mit Ausnahme der mittleren Kompakta-Dicke des Femur (um 2,26 % geringer in der Kontrollgruppe) waren die Werte in allen anderen Parametern in der Kontrollgruppe höher als in der Gruppe VB (bis zu 41,6 %). In der Versuchsgruppe 1 war die mittlere Kompakta-Dicke sowohl am Radius als auch an Femur und Tibia geringer als in der Gruppe VB (-9,70; -15,6 bzw. -19,5 %). Bei den Tieren der Versuchsgruppe 2 war darüber hinaus die mittlere Kompakta-Dicke des MT III gegenüber dem Wert der Gruppe VB geringer.

Durchgang 2

Im Durchgang 2 erfolgte die Bestimmung der Knochenmaße an Femur, Tibia und dem dritten Metatarsalknochen.

Numerisch wiesen die Tiere der Kontrollgruppe am Femur zu jedem Zeitpunkt und in jedem Parameter die höchsten Mittelwerte auf (vgl. Tabelle 32). Statistisch abzusichernde Unterschiede zwischen den drei Gruppen (K, V1 und V2) bestanden an diesem Knochen nur hinsichtlich der cranio-caudalen Kompakta-Dicke an d47 und der latero-lateralen Kompakta-Dicke an d82. Zu allen drei Sektionszeitpunkten war die mittlere in latero-lateraler Richtung gemessene Kompakta-Dicke am Femur der Tiere aus Versuchsgruppe 2 um mehr als 2 mm geringer als bei den Tieren der Kontrollgruppe; an d82 bedeutete dies einen relativen Unterschied von etwa 43 % in diesem Parameter.

Ergebnisse

Tabelle 32: Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke des Femur von Schweinen im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB				
VT						
d-1	Femur	Länge [cm]	13,5 ± 0,818			
		Umfang [cm]	5,48 ± 0,574			
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	2,75 ± 0,396			
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	3,29 ± 0,662			
Gruppe		K	V1	V2		
VT						
d26 ¹ (KM:	Femur	Länge [cm]	16,2 ^a ± 0,700	15,5 ^a ± 0,616	15,2 ^a ± 0,585	
		Umfang [cm]	6,47 ^a ± 0,611	6,15 ^a ± 0,451	6,25 ^a ± 0,480	
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	3,33 ^a ± 0,813	2,64 ^a ± 0,344	2,86 ^a ± 0,350	
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	4,67 ^a ± 1,10	3,19 ^b ± 0,341	2,66 ^b ± 0,195	
d47 ²	Femur	Länge [cm]	17,5 ^a ± 0,548	17,1 ^a ± 0,359	16,9 ^a ± 0,611	
		Umfang [cm]	7,50 ^a ± 0,294	6,75 ^a ± 0,850	6,67 ^a ± 0,208	
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	4,09 ^a ± 0,278	3,40 ^b ± 0,376	2,19 ^c ± 0,473	
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	5,18 ^a ± 0,632	3,32 ^b ± 0,121	2,68 ^b ± 0,541	
d82	Femur	Länge [cm]	19,3 ^a ± 0,283	18,6 ^{ab} ± 0,589	17,9 ^b ± 0,500	
		Umfang [cm]	8,23 ^a ± 0,310	7,50 ^b ± 0,476	7,25 ^b ± 0,370	
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	4,22 ^a ± 0,591	3,16 ^b ± 0,519	2,53 ^b ± 0,276	
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	4,81 ^a ± 0,809	3,54 ^b ± 0,097	2,73 ^c ± 0,204	

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13, ²V2: n = 3 wegen Femurfraktur eines Tieres (OM 722); VT: Versuchstag, Ko: Kompakta, c-c: cranio-caudal, l-l: latero-lateral, OM: Ohrmarke

In Bezug auf die Knochenmaße der Tibia gab es statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen K, V1 und V2 an d26 und d47 nur hinsichtlich der latero-lateralen Kompakta-Dicke. Zum letzten Sektionszeitpunkt wiesen die Tiere der Kontrollgruppe dann eine gegenüber den Tieren beider Versuchsgruppen höhere cranio-caudale wie auch latero-laterale Kompakta-Dicke an diesem Knochen auf. Bezüglich der mittleren latero-lateralen Kompakta-Dicke unterschieden sich die Gruppen K und V2 zu diesem Zeitpunkt etwa um den Faktor 1,9 (K: 6,44 mm vs. V2: 3,34 mm). Tabelle 33 zeigt die Knochenmaße der Tibia bei den Tieren aus dem Durchgang 2.

Ergebnisse

Tabelle 33: Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke der Tibia von Schweinen im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Tibia	Länge [cm]	12,8 ± 0,812		
		Umfang [cm]	5,00 ± 0,245		
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	2,53 ± 0,072		
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	3,45 ± 0,394		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d26 ¹	Tibia	Länge [cm]	15,0 ^a ± 0,551	14,6 ^a ± 0,680	14,3 ^a ± 0,727
		Umfang [cm]	5,73 ^a ± 0,404	5,35 ^a ± 0,252	5,50 ^a ± 0,356
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	4,13 ^a ± 1,10	2,75 ^a ± 0,096	2,64 ^a ± 0,287
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	4,43 ^a ± 0,645	3,09 ^{ab} ± 0,198	2,27 ^b ± 1,33
d47	Tibia	Länge [cm]	16,4 ^a ± 0,873	16,4 ^a ± 0,526	15,9 ^a ± 0,545
		Umfang [cm]	6,53 ^a ± 0,222	6,00 ^a ± 0,622	5,83 ^a ± 0,222
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	3,79 ^a ± 0,832	2,91 ^a ± 0,344	2,83 ^a ± 0,738
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	5,46 ^a ± 0,869	3,51 ^b ± 0,239	3,05 ^b ± 1,00
d82	Tibia	Länge [cm]	18,2 ^a ± 0,526	17,5 ^a ± 0,872	17,0 ^a ± 0,465
		Umfang [cm]	7,08 ^a ± 0,350	6,58 ^a ± 0,395	6,55 ^a ± 0,480
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	4,07 ^a ± 0,647	3,06 ^b ± 0,496	2,84 ^b ± 0,145
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	6,44 ^a ± 1,02	3,75 ^b ± 0,680	3,34 ^b ± 0,405

^{a, b} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; VT: Versuchstag, Ko: Kompakta, c-c: cranio-caudal, l-l: latero-lateral, OM: Ohrmarke

Die Knochenmaße der dritten Metatarsalknochen der Tiere aus dem Durchgang 2 sind in Tabelle 34 dargestellt.

Am MT III zeigte die mittlere latero-laterale Kompakta-Dicke zu allen drei Sektionszeitpunkten bei Tieren aus der Gruppe K signifikant höhere Werte als bei Tieren der Gruppen V1 und V2, an d82 waren die dritten Metatarsalknochen der Tiere aus den beiden Versuchsgruppen zudem signifikant kürzer als bei den Kontrolltieren (K: 8,70 cm; V1: 7,92 cm; V2: 8,09 cm).

Ergebnisse

Tabelle 34: Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke des MT III von Schweinen im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB				
VT						
d-1	MT III	Länge [cm]	6,30 ± 0,475			
		Umfang [cm]	4,13 ± 0,275			
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	1,09 ± 0,316			
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	1,55 ± 0,401			
Gruppe		K	V1	V2		
VT						
d26 ¹	MT III	Länge [cm]	7,24 ^a ± 0,373	6,98 ^a ± 0,367	7,08 ^a ± 0,248	
		Umfang [cm]	4,57 ^a ± 0,321	4,33 ^a ± 0,096	4,20 ^a ± 0,271	
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	1,52 ^a ± 0,389	1,16 ^a ± 0,144	1,16 ^a ± 0,224	
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	1,99 ^a ± 0,161	1,57 ^b ± 0,113	1,67 ^b ± 0,155	
d47	MT III	Länge [cm]	7,76 ^a ± 0,456	7,77 ^a ± 0,146	7,57 ^a ± 0,299	
		Umfang [cm]	4,95 ^a ± 0,058	4,73 ^{ab} ± 0,236	4,48 ^b ± 0,150	
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	1,50 ^a ± 0,186	1,23 ^{ab} ± 0,219	1,06 ^b ± 0,083	
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	2,34 ^a ± 0,127	1,95 ^b ± 0,256	1,65 ^b ± 0,162	
d82	MT III	Länge [cm]	8,70 ^a ± 0,142	7,92 ^b ± 0,477	8,09 ^b ± 0,188	
		Umfang [cm]	5,13 ^a ± 0,096	4,80 ^a ± 0,271	4,90 ^a ± 0,216	
		Dicke _{Ko., c-c} [mm]	1,71 ^a ± 0,228	1,28 ^b ± 0,055	1,13 ^b ± 0,140	
		Dicke _{Ko., l-l} [mm]	2,61 ^a ± 0,387	2,17 ^b ± 0,031	2,02 ^b ± 0,156	

^{a, b} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; MT III: *Os metatarsale III*, VT: Versuchstag, Ko: Kompakta, c-c: cranio-caudal, l-l: latero-lateral, OM: Ohrmarke

Die Tabelle 35 zeigt die Unterschiede [%] bezüglich der mittleren Knochenlängen und Kompakta-Dicke der Tiere aus den drei Gruppen K, V1 und V2 im Vergleich zu den Werten der vier zu Versuchsbeginn untersuchten Tiere.

Im Vergleich mit den Knochenmaßen der Tiere aus der Gruppe VB wiesen die Tiere aus der Gruppe V2 sowohl am Femur als auch an der Tibia an d26 und d47 im Mittel geringere Kompakta-Dicke auf (bis -19,5 %). Bei den Tieren der Kontrollgruppe hingegen war die Kompakta im Mittel an jedem Knochen zu jedem der drei Zeitpunkte stärker ausgeprägt als an den entsprechenden Knochen der vier zu Versuchsbeginn untersuchten Tiere. Die tibiale Kompakta war bei den Kontrolltieren an d82 im Mittel um 75,7 % dicker als bei den Tieren zu Versuchsbeginn untersuchten Tieren; im Vergleich der diesbezüglichen Werte von Tieren aus den Gruppen VB und V2 betrug der Unterschied hingegen nur 3,34 %.

Ergebnisse

Tabelle 35: Prozentuale Unterschiede der mittlere Knochenlänge und der mittleren Kompakta-Dicke von verschiedenen Gliedmaßenknochen der drei Gruppen K, V1 und V2 an d26, d47 bzw. d82 gegenüber der Gruppe VB (d-1) im Durchgang 2, [%]

Gruppe VT			K	V1	V2
d26	Femur	Länge	19,8	14,6	12,6
		Dicke _{Ko.}	32,2	-3,62	-8,79
	Tibia	Länge	16,9	14,3	11,9
		Dicke _{Ko.}	43,1	-2,40	-18,0
	MT III	Länge	14,9	10,7	12,3
		Dicke _{Ko.}	32,7	3,31	7,09
d47	Femur	Länge	29,4	26,2	24,7
		Dicke _{Ko.}	53,4	11,2	-19,5
	Tibia	Länge	28,3	27,7	23,8
		Dicke _{Ko.}	54,5	7,42	-1,67
	MT III	Länge	23,1	23,2	20,1
		Dicke _{Ko.}	45,2	20,3	2,36
d82	Femur	Länge	42,7	37,5	32,0
		Dicke _{Ko.}	49,4	11,0	13,0
	Tibia	Länge	41,8	36,7	32,6
		Dicke _{Ko.}	75,7	13,8	3,34
	MT III	Länge	38,0	25,6	28,3
		Dicke _{Ko.}	63,4	30,5	19,1

VT: Versuchstag, Ko: Kompakta, MT III: *Os metatarsale III*

4.5.2 Knochenmasse

Im Folgenden werden die mittleren Massen der einzelnen von jeglichem anhaftenden Gewebe freipräparierten Knochen *in toto* wiedergegeben.

Durchgang 1

Die mittleren Massen aller Knochen waren bei den Tieren aus der Kontrollgruppe numerisch immer am höchsten; die Tiere der Gruppe V2 wiesen hingegen im Mittel numerisch stets die geringsten Knochenmassen auf (vgl. Tabelle 36). An Radius/Ulna sowie an Tibia/Fibula bestanden zwischen den drei Gruppen K, V1 und V2 keinerlei statistisch signifikante Unterschiede.

Ergebnisse

Tabelle 36: Massen [g] der verschiedenen Knochen der Vorder- und Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB		
VT				
d-1	Humerus	55,0 ± 1,20		
	Radius/Ulna	41,0 ± 1,87		
	MC III	6,24 ± 0,300		
	Femur	66,9 ± 3,76		
	Tibia/Fibula	48,7 ± 3,70		
	MT III	6,43 ± 0,521		
Gruppe		K	V1	V2
VT				
d34	Humerus	115 ^a ± 10,1	100 ^b ± 9,68	95,3 ^b ± 6,26
	Radius/Ulna	83,8 ^a ± 9,02	72,1 ^a ± 8,62	68,6 ^a ± 5,15
	MC III	12,3 ^a ± 1,23	11,0 ^{ab} ± 0,892	10,2 ^b ± 0,620
	Femur	135 ^a ± 11,7	117 ^b ± 10,5	113 ^b ± 8,90
	Tibia/Fibula	98,2 ^a ± 9,04	85,0 ^a ± 6,48	82,6 ^a ± 8,50
	MT III	13,1 ^a ± 1,40	11,8 ^{ab} ± 0,828	10,7 ^b ± 1,23

^{a, b} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; VT: Versuchstag, MC III: *Os metacarpale III*, MT III: *Os metatarsale III*

Durchgang 2

Zum Zeitpunkt der ersten Sektion (d26), d. h. etwa dreieinhalb Wochen einer unterschiedlichen P-Versorgung, bestanden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Knochenmassen der Tiere aus den Gruppen K, V1 und V2 (vgl. Tabelle 37). An d47 wiesen dann die Tiere der Versuchsgruppe 2 signifikant leichtere Knochen auf als die Tiere der Kontrollgruppe (Femur: 193 vs. 245 g; Tibia/Fibula: 136 vs. 173 g; MT III: 17,2 vs. 22,9 g). Ab d47 traten dann auch zwischen der Kontrollgruppe und der Versuchsgruppe 1 statistisch abzusichernde Unterschiede auf.

Ergebnisse

Tabelle 37: Massen [g] der verschiedenen Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB		
VT				
d-1	Femur	114 ± 22,3		
	Tibia/Fibula	84,2 ± 15,4		
	MT III	12,4 ± 2,68		
Gruppe		K	V1	V2
VT				
d26 ¹	Femur	186 ^a ± 27,0	159 ^a ± 16,9	152 ^a ± 22,5
	Tibia/Fibula	134 ^a ± 25,8	110 ^a ± 11,5	106 ^a ± 17,3
	MT III	17,9 ^a ± 3,22	15,0 ^a ± 1,47	14,3 ^a ± 2,10
d47	Femur	245 ^a ± 28,0	216 ^{ab} ± 25,5	193 ^b ± 11,0 ²
	Tibia/Fibula	173 ^a ± 19,7	157 ^{ab} ± 20,3	136 ^b ± 7,62
	MT III	22,9 ^a ± 2,22	19,9 ^{ab} ± 2,19	17,2 ^b ± 1,30
d82	Femur	335 ^a ± 11,9	271 ^b ± 33,4	245 ^b ± 16,8
	Tibia/Fibula	231 ^a ± 7,19	185 ^b ± 28,5	176 ^b ± 14,9
	MT III	28,3 ^a ± 0,598	22,0 ^b ± 3,45	22,5 ^b ± 1,77

^{a, b} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13, ²V2: n = 3 wegen Femurfraktur eines Tieres (OM 722); VT: Versuchstag, MT III: *Os metatarsale III*, OM: Ohrmarke

4.5.3 Knochendichte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Dichtebestimmung nach dem Archimedisches Prinzip zusammengefasst. Des Weiteren werden die mittels qCT an den verschiedenen Messlokalisationen von Tibia/Fibula bestimmten Knochendichten präsentiert.

4.5.3.1 Knochendichte nach dem Archimedisches Prinzip

An den Metakarpal- und Metatarsalknochen erfolgte diese Untersuchung am ganzen Knochen; von allen anderen Knochen wurden einzelne Epiphysen für die Analysen genutzt.

Durchgang 1

Die Kontrollgruppe wies numerisch in allen Knochen(-anteilen) die höchste mittlere Dichte auf. Die Unterschiede waren jedoch nicht in jedem Fall statistisch signifikant. So bestanden im Hinblick auf die mittlere Dichte von Fem und Ti/Fi keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Gruppen K, V1 und V2 (Fem: 1,1135 vs. 1,0879 vs. 1,0798 g/cm³; Ti/Fi: 1,1100 vs. 1,0866 vs. 1,0780 g/cm³) an d34. In allen anderen Knochen(-anteilen) war die Dichte bei den Tieren der Kontrollgruppe gegenüber der Dichte in den entsprechenden

Ergebnisse

Knochen der Tiere aus den Gruppen V1 und V2 an d34 signifikant höher. Die Ergebnisse der Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1 sind in Tabelle 38 zusammengefasst.

Tabelle 38: Knochendichte [g/cm^3 , nach Archimedischem Prinzip] in den verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Vorder- und Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe $n = 4$)

Gruppe		VB		
VT				
d-1	Hum	1,1267 \pm 0,0114		
	Ra/Ul	1,1327 \pm 0,0049		
	MC III	1,1618 \pm 0,0097		
	Fem	1,1258 \pm 1,0880		
	Ti/Fi	1,1163 \pm 0,0174		
	MT III	1,1267 \pm 0,0114		
Gruppe		K	V1	V2
VT				
d34	Hum	1,1175 ^a \pm 0,0155	1,0603 ^b \pm 0,0294	1,0702 ^b \pm 0,0045
	Ra/Ul	1,1555 ^a \pm 0,0182	1,0749 ^b \pm 0,0347	1,0930 ^b \pm 0,0241
	MC III	1,1991 ^a \pm 0,0180	1,1410 ^b \pm 0,0181	1,1205 ^b \pm 0,0122
	Fem	1,1135 ^a \pm 0,0230	1,0879 ^a \pm 0,0150	1,0798 ^a \pm 0,0133
	Ti/Fi	1,1100 ^a \pm 0,0215	1,0866 ^a \pm 0,0194	1,0780 ^a \pm 0,0119
	MT III	1,1756 ^a \pm 0,0385	1,1317 ^b \pm 0,0164	1,1185 ^b \pm 0,0210

^{a, b} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; VT: Versuchstag, Hum: proximale Humerus-Epiphyse, Ra/Ul: distale Radius/Ulna-Epiphyse, MC III: *Os metacarpale III*, Fem: distale Femur-Epiphyse, Ti/Fi: proximale Tibia/Fibula-Epiphyse, MT III: *Os metatarsale III*

Im Vergleich zur Gruppe VB wiesen die Tiere in der Versuchsgruppe 2 in allen Knochen(-anteilen) geringere Dichten auf.

Durchgang 2

Tabelle 39 zeigt die Knochendichten (Archimedisches Prinzip) in den verschiedenen Knochen(-anteilen) der Hintergliedmaße im Durchgang 2.

Mit Ausnahme der Knochendichte des MT III an d26 wiesen die Kontrolltiere zu jedem Zeitpunkt eine höhere Knochendichte auf als die Tiere der beiden Versuchsgruppen. Die Unterschiede zwischen den Gruppen V1 und V2 hingegen waren nur zum Versuchsende (d82) an Fem sowie Ti/Fi statistisch signifikant.

Verglichen mit den Knochendichten der vier zu Versuchsbeginn euthanasierten Tiere (VB) war die Dichte zu jedem der drei Zeitpunkte in allen drei Knochen(-anteilen) der Tiere der

Ergebnisse

Gruppe V2 geringer. Die Tiere der Kontrollgruppe wiesen demgegenüber zu jedem der drei Sektionszeitpunkte höhere Knochendichten auf als die Tiere der Gruppe VB.

Tabelle 39: Knochendichte [g/cm^3 , nach Archimedischem Prinzip] in den verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe $n = 4$)

Gruppe		VB		
VT				
d-1	Fem	$1,1274 \pm 0,0094$		
	Ti/Fi	$1,1399 \pm 0,0050$		
	MT III	$1,1966 \pm 0,0182$		
Gruppe		K	V1	V2
VT				
d26 ¹	Fem	$1,1451^a \pm 0,0120$	$1,0963^b \pm 0,0198$	$1,1014^b \pm 0,0063$
	Ti/Fi	$1,1595^a \pm 0,0037$	$1,1182^b \pm 0,0144$	$1,1155^b \pm 0,0126$
	MT III	$1,2185^a \pm 0,0099$	$1,1836^a \pm 0,0279$	$1,1843^a \pm 0,0175$
d47	Fem	$1,1617^a \pm 0,0258$	$1,1067^b \pm 0,0094$	$1,0931^b \pm 0,0175$
	Ti/Fi	$1,1957^a \pm 0,0254$	$1,1155^b \pm 0,0156$	$1,1104^b \pm 0,0051$
	MT III	$1,2700^a \pm 0,0161$	$1,1865^b \pm 0,0344$	$1,1687^b \pm 0,0247$
d82	Fem	$1,2118^a \pm 0,0115$	$1,1164^b \pm 0,0087$	$1,0880^c \pm 0,0235$
	Ti/Fi	$1,2319^a \pm 0,0166$	$1,1313^b \pm 0,0184$	$1,1084^c \pm 0,0251$
	MT III	$1,3081^a \pm 0,0366$	$1,2357^b \pm 0,0295$	$1,1912^b \pm 0,0194$

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: $n = 3$ wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; Hum: proximale Humerus-Epiphyse, Ra/Ul: distale Radius/Ulna-Epiphyse, MC III: *Os metacarpale III*, Fem: distale Femur-Epiphyse, Ti/Fi: proximale Tibia/Fibula-Epiphyse, MT III: *Os metatarsale III*, OM: Ohrmarke

4.5.3.2 Periphere quantitative Computertomographie

Für die Untersuchung der BMD wurden an den Tibiae auf Höhe von 10, 50 und 90 % der Gesamtlänge des Knochens (entspricht „prox“, „Mitte“, „dist.“) Messungen durchgeführt. Des Weiteren wurden von acht Tieren zusätzlich die Metatarsalknochen analysiert, um eventuell bestehende Korrelationen zwischen den Knochendichten dieser beiden verschiedenen Knochen prüfen zu können.

Durchgang 1

Im Durchgang 1 wurden die Tibiae aller Tiere mittels qCT untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 40 dargestellt. An den proximalen und den distalen Messlokalisationen wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den BMD der Tiere aus den Gruppen K, V1 und V2 festgestellt. Die kortikale Dichte in der Diaphyse war ebenso wie die Gesamtdichte an dieser

Ergebnisse

Lokalisation bei den Tieren der Kontrollgruppe signifikant höher als bei den Tieren der beiden Versuchsgruppen (CrtD: 930 vs. 820 vs. 717 mg/mm³; GesD: 683 vs. 545 vs. 458 mg/mm³). Zudem wiesen die Knochen der Tiere der Versuchsgruppe 2 in der Diaphyse signifikant geringere BMD auf als die Knochen der Gruppe V1.

Tabelle 40: Mittlere Bone Mineral Density [mg/mm³] an den verschiedenen Lokalisationen innerhalb der Tibia/Fibula von Schweinen zu Beginn und am Ende des Versuchs im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Tibia/ Fibula	GesD _{prox.}	320 ± 27,4		
		TrbD _{prox.}	295 ± 32,8		
		GesD _{Mitte}	660 ± 49,1		
		CrtD _{Mitte}	849 ± 20,8		
		GesD _{dist.}	347 ± 30,3		
		TrbD _{dist.}	338 ± 47,5		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d34	Tibia/ Fibula	GesD _{prox.}	283 ^a ± 50,8	244 ^a ± 6,48	274 ^a ± 26,4
		TrbD _{prox.}	250 ^a ± 44,2	214 ^a ± 18,5	251 ^a ± 44,8
		GesD _{Mitte}	683 ^a ± 53,3	545 ^b ± 63,3	458 ^c ± 30,1
		CrtD _{Mitte}	930 ^a ± 17,4	820 ^b ± 39,7	717 ^c ± 35,9
		GesD _{dist.}	339 ^a ± 32,7	295 ^a ± 31,4	288 ^a ± 12,0
		TrbD _{dist.}	338 ^a ± 36,8	290 ^a ± 41,1	285 ^a ± 18,9

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; VT: Versuchstag, GesD: Gesamtdichte, prox.: proximal, TrbD: trabekuläre Dichte, CrtD: kortikale Dichte, dist.: distal

Sowohl die Tiere der Versuchsgruppe 1 als auch der Versuchsgruppe 2 wiesen gegenüber den vier zu Versuchsbeginn untersuchten Tieren geringere Mittelwerte in allen sechs Parametern auf. Bei der Kontrollgruppe waren die BMD an der proximalen und distalen Lokalisation geringer bzw. gleich der an den Tibiae der Tiere aus Gruppe VB ermittelten BMD.

Durchgang 2

Im Durchgang 2 erfolgten die Analysen an den Tibiae der zu Versuchsbeginn und an denen der zu Versuchsende mit etwa 95 kg KM euthanasierten Tieren. Tabelle 41 zeigt die Ergebnisse der qCT-Untersuchungen im Durchgang 2.

Die Kontrollgruppe unterschied sich in allen sechs Parametern signifikant von der Versuchsgruppe 2. Mit Ausnahme der kortikalen Dichte in der Diaphyse waren die Knochendichten bei den Tieren der Kontrollgruppe auch gegenüber den entsprechenden

Ergebnisse

Knochendichten der Tiere aus Gruppe V1 signifikant höher. Zwischen den Knochendichten der beiden Versuchsgruppen bestanden nur an der distalen Messlokalisierung signifikante Unterschiede und zwar waren sowohl die trabekuläre Dichte als auch die Gesamtdichte hier höher bei den Tieren der Gruppe V1 (TrbD: 376 vs. 300 mg/mm³; GesD: 379 vs. 314 mg/mm³).

Tabelle 41: Mittlere Bone Mineral Density [mg/mm³] an den verschiedenen Lokalisationen innerhalb der Tibia/Fibula von Schweinen zu Beginn und am Ende des Versuchs im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Tibia/ Fibula	GesD _{prox.}	335 ± 27,0		
		TrbD _{prox.}	291 ± 26,4		
		GesD _{Mitte}	690 ± 51,0		
		CrtD _{Mitte}	909 ± 25,7		
		GesD _{dist.}	348 ± 12,0		
		TrbD _{dist.}	331 ± 15,3		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d82	Tibia/ Fibula	GesD _{prox.}	440 ^a ± 36,6	261 ^b ± 13,3	250 ^b ± 25,6
		TrbD _{prox.}	407 ^a ± 55,2	230 ^b ± 17,9	196 ^b ± 31,9
		GesD _{Mitte}	873 ^a ± 45,4	726 ^b ± 62,3	661 ^b ± 66,8
		CrtD _{Mitte}	1050 ^a ± 32,8	1003 ^{ab} ± 55,1	944 ^b ± 18,4
		GesD _{dist.}	509 ^a ± 13,0	379 ^b ± 37,6	314 ^c ± 23,2
		TrbD _{dist.}	498 ^a ± 22,2	376 ^b ± 50,3	300 ^c ± 17,5

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; VT: Versuchstag, GesD: Gesamtdichte, prox.: proximal, TrbD: trabekuläre Dichte, CrtD: kortikale Dichte, dist.: distal

Verglichen mit den BMD der Tiere aus Gruppe VB waren die Werte in nahezu allen Parametern bei den Tieren der Gruppe V2 an d82 geringer (Ausnahme: CrtD_{Mitte}). Die Tiere der Kontrollgruppe hingegen wiesen an allen Lokalisationen höhere Knochendichten auf als die vier zu Versuchsbeginn untersuchten Tiere (VB).

4.5.3.2.1 Korrelation zwischen den BMD in Tibia und MT III

Die Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang der Knochenmineralstoffdichten in Tibia und MT III bei Tieren aus dem Durchgang 1 und Durchgang 2 gehen aus Tabelle 42 hervor.

Ergebnisse

Im Durchgang 1 bestanden signifikante Korrelationen (nach Pearson) zwischen den mittels qCT bestimmten Knochendichten von Tibia/Fibula und MT III zwischen den distalen Gesamtdichten sowie den distalen kortikalen Dichten der beiden Knochen; der Korrelationskoeffizient nach Pearson war mit $R^2 = 0,99959$ ($p = 0,0004$) am höchsten für die distale Gesamtdichte. Im zweiten Durchgang bestanden signifikante Korrelationen zwischen den proximalen und distalen Gesamtdichten von Tibia/Fibula und MT III ($R^2 = 0,96956$; $p = 0,0304$ bzw. $R^2 = 0,97747$; $p = 0,0225$).

In Bezug auf alle anderen Parameter waren die Zusammenhänge nicht signifikant. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick zu den einzelnen Korrelationskoeffizienten und den zugehörigen p-Werten.

Tabelle 42: Korrelationskoeffizienten für die Beziehung zwischen der BMD der Tibia und des MT III bei Tieren aus den Durchgängen 1 und 2 (je $n = 4$)

	Parameter	Korrelationskoeffizient nach Pearson	p-Wert
Durchgang 1	GesD _{prox.}	0,86558	0,1344
	TrbD _{prox.}	-0,74759	0,2524
	GesD _{Mitte}	0,94778	0,0522
	CrtD _{Mitte}	0,89772	0,1023
	GesD _{dist.}	0,99959	0,0004
	TrbD _{dist.}	0,99701	0,0030
Durchgang 2	GesD _{prox.}	0,96956	0,0304
	TrbD _{prox.}	0,93793	0,0621
	GesD _{Mitte}	0,88505	0,1150
	CrtD _{Mitte}	0,94643	0,0536
	GesD _{dist.}	0,97747	0,0225
	TrbD _{dist.}	0,94816	0,0518

BMD: Bone Mineral Density, MT III: *Os metatarsale III*, GesD: Gesamtdichte, prox.: proximal, TrbD: trabekuläre Dichte, CrtD: kortikale Dichte, dist.: distal

4.5.4 Chemische Zusammensetzung

Die chemischen Analysen wurden an den gleichen Knochen bzw. Anteilen von Knochen durchgeführt wie zuvor die Dichtebestimmung nach dem Archimedisches Prinzip, sodass die Ra-, Ca- und P-Gehalte jeweils je kg TS, ffrTS, ffrTS und uS sowie je cm^3 berechnet werden konnten. Im Folgenden werden jedoch nur die Ergebnisse in Bezug auf die fettfreie TS sowie je cm^3 dargestellt, da diese insgesamt deutlichere Unterschiede zwischen den Gruppen erkennen ließen als diejenigen je kg uS bzw. TS.

Durchgang 1

Die chemische Zusammensetzung der verschiedenen Knochen bzw. Anteile von Knochen der Vordergliedmaße der Tiere aus dem Durchgang 1 zeigt Tabelle 43.

An allen drei Knochen der Vordergliedmaße waren die Mittelwerte in jedem der sechs Parameter (Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm³) bei den Tieren der Kontrollgruppe am höchsten. Die Ra-Gehalte je kg ffrTS unterschieden sich in den Knochen der Vordergliedmaße zwischen allen drei Gruppen (K, V1 und V2) statistisch signifikant, wohingegen die Unterschiede zwischen den Gruppen V1 und V2 bezüglich der Ra-Gehalte je cm³ in diesen drei Knochen nicht abzusichern waren. Die prozentualen Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Gruppen K und V2 waren im Hinblick auf die Ra-Gehalten je kg ffrTS in allen Knochen der Vordergliedmaße geringer als die entsprechenden prozentualen Unterschiede in den Ra-Gehalten je cm³ (Ra-Gehalte je kg ffrTS: ca. 15 - 60 % bzw. je cm³ ca. 33 - 64 % höher in den Knochen der Tiere aus Gruppe K). Im Hum betrug der absolute Unterschied im mittleren Ra-Gehalt je kg ffrTS zwischen den Knochen der Tiere aus diesen beiden Gruppen etwa 100 g/kg.

Unterschieden sich die mittleren Ca- oder P-Gehalte in einzelnen Knochen der Tiere unterschiedlicher Gruppen, so war stets auch der Unterschied bezüglich der entsprechenden Ra-Gehalte statistisch signifikant; anders herum galt dies nicht in jedem Fall (vgl. Ra- bzw. Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS im Hum, Gruppe V1 vs. V2).

Ergebnisse

Tabelle 43: Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS und je cm³ in verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Vordergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Hum	Ra [g/kg ffrTS]	433 ± 7,63		
		Ca [g/kg ffrTS]	145 ± 3,82		
		P [g/kg ffrTS]	72,2 ± 1,96		
		Ra [mg/cm ³]	160 ± 7,69		
		Ca [mg/cm ³]	53,5 ± 2,31		
		P [mg/cm ³]	26,7 ± 1,40		
	Ra/Ul	Ra [g/kg ffrTS]	438 ± 5,30		
		Ca [g/kg ffrTS]	150 ± 5,03		
		P [g/kg ffrTS]	77,1 ± 1,45		
		Ra [mg/cm ³]	170 ± 2,63		
		Ca [mg/cm ³]	58,4 ± 0,738		
		P [mg/cm ³]	30,0 ± 0,164		
	MC III	Ra [g/kg ffrTS]	527 ± 4,77		
		Ca [g/kg ffrTS]	188 ± 1,41		
		P [g/kg ffrTS]	89,2 ± 3,60		
		Ra [mg/cm ³]	234 ± 17,1		
		Ca [mg/cm ³]	83,7 ± 5,60		
		P [mg/cm ³]	39,7 ± 3,42		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d34	Hum	Ra [g/kg ffrTS]	427 ^a ± 13,4	367 ^b ± 26,6	328 ^c ± 7,39
		Ca [g/kg ffrTS]	149 ^a ± 6,77	120 ^b ± 11,5	111 ^b ± 30,5
		P [g/kg ffrTS]	72,3 ^a ± 1,54	58,5 ^b ± 6,71	52,4 ^b ± 1,07
		Ra [mg/cm ³]	166 ^a ± 13,1	120 ^b ± 17,7	101 ^b ± 2,51
		Ca [mg/cm ³]	57,9 ^a ± 5,05	39,5 ^b ± 6,79	34,0 ^b ± 1,71
		P [mg/cm ³]	28,0 ^a ± 1,86	19,2 ^b ± 3,56	16,1 ^b ± 0,380
	Ra/Ul	Ra [g/kg ffrTS]	474 ^a ± 20,5	432 ^b ± 30,6	384 ^c ± 23,9
		Ca [g/kg ffrTS]	174 ^a ± 7,36	151 ^b ± 10,0	136 ^c ± 5,92
		P [g/kg ffrTS]	85,2 ^a ± 3,81	72,0 ^b ± 3,28	66,0 ^c ± 3,73
		Ra [mg/cm ³]	197 ^a ± 19,9	155 ^b ± 23,7	131 ^b ± 10,6
		Ca [mg/cm ³]	72,3 ^a ± 7,08	54,4 ^b ± 8,34	46,3 ^b ± 3,22
		P [mg/cm ³]	35,4 ^a ± 3,67	25,8 ^b ± 2,93	22,5 ^b ± 1,70
	MC III	Ra [g/kg ffrTS]	556 ^a ± 8,31	525 ^b ± 10,6	483 ^c ± 10,6
		Ca [g/kg ffrTS]	204 ^a ± 6,68	196 ^a ± 9,25	177 ^b ± 5,40
		P [g/kg ffrTS]	93,4 ^a ± 3,52	87,3 ^b ± 3,68	80,7 ^c ± 3,89
		Ra [mg/cm ³]	279 ^a ± 26,1	232 ^b ± 26,1	210 ^b ± 19,2
		Ca [mg/cm ³]	102 ^a ± 7,02	86,8 ^b ± 11,5	77,0 ^b ± 6,42
		P [mg/cm ³]	46,8 ^a ± 3,42	38,6 ^b ± 5,41	35,0 ^b ± 2,57

a, b, c kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; Ra: Rohasche, ffr TS: fettfreie Trockensubstanz, VT: Versuchstag, Hum: proximale Humerus-Epiphyse, Ra/Ul: distale Radius/Ulna-Epiphyse, MC III: *Os metacarpale III*

Ergebnisse

Die mittleren Ra-, Ca- und P-Gehalte (je kg ffrTS und je cm³) waren bei den Tieren der Versuchsgruppe 2 in jedem der drei Knochen der Vordergliedmaße geringer als die entsprechenden Mittelwerte bei den Tieren der Gruppe VB. Mit Ausnahme des Ca-Gehalts (je kg ffrTS) in Ra/UI sowie der Ca-Gehalte je kg ffrTS und je cm³ im dritten Metakarpalknochen galt dies auch für die Werte der Tiere aus Gruppe V1. Demgegenüber wiesen die Tiere der Kontrollgruppe – mit Ausnahme des Ra-Gehalts je kg ffrTS im Hum – in allen Parametern höhere Mittelwerte auf als die vier zu Versuchsbeginn untersuchten Tiere.

Die Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS sowie je cm³ von verschiedenen Knochen(-anteilen) der Hintergliedmaße bei den Tieren aus dem Durchgang 1 sind der Tabelle 44 zu entnehmen.

Auch an den drei Knochen der Hintergliedmaße wiesen die Tiere der Kontrollgruppe in allen Parametern numerisch die höchsten Mittelwerte auf. Gegenüber beiden Versuchsgruppen waren die Unterschiede jedoch nur am Fem in allen sechs Parametern abzusichern. Wie auch an den Knochen der Vordergliedmaße waren die prozentualen Unterschiede zwischen den mittleren Ra-Gehalten der Knochen der Tiere aus Gruppe K gegenüber denen der Tiere aus Gruppe V2 je kg ffrTS weniger deutlich als die je cm³ (15 - 31 % bzw. 43 - 60 % höher in den Knochen der Tiere aus der Kontrollgruppe). Dennoch unterschieden sich die Ra-Gehalte je kg ffrTS in jedem Knochen(-anteil) der Hintergliedmaße statistisch signifikant, wohingegen dies hinsichtlich des Ra-Gehalts je cm³ nur für den Fem galt. Der absolute Unterschied zwischen den mittleren Ra-Gehalten je kg ffrTS der Knochen der Tiere aus den Gruppen K und V2 war mit 103 g/kg dem im Hum festgestellten vergleichbar.

Wie schon bei den Knochen der Vordergliedmaße zeigten sich auch an den drei Knochen der Hintergliedmaße sämtliche signifikanten Unterschiede bezüglich der Ca- oder P-Gehalte auch in den zugehörigen mittleren Ra-Gehalten, wohingegen dies andersherum nicht immer zutraf (vgl. Ca- bzw. Ra-Gehalt je kg ffrTS im MT III der Gruppen V1 und V2).

Ergebnisse

Tabelle 44: Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm³ in verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Fem	Ra [g/kg ffrTS]	417 ± 11,8		
		Ca [g/kg ffrTS]	145 ± 3,91		
		P [g/kg ffrTS]	74,3 ± 0,869		
		Ra [mg/cm ³]	147 ± 6,48		
		Ca [mg/cm ³]	51,3 ± 2,60		
		P [mg/cm ³]	26,2 ± 0,899		
	Ti/Fi	Ra [g/kg ffrTS]	421 ± 11,3		
		Ca [g/kg ffrTS]	145 ± 9,74		
		P [g/kg ffrTS]	73,8 ± 6,29		
		Ra [mg/cm ³]	154 ± 9,81		
		Ca [mg/cm ³]	53,0 ± 5,35		
		P [mg/cm ³]	27,0 ± 2,88		
	MT III	Ra [g/kg ffrTS]	540 ± 4,15		
		Ca [g/kg ffrTS]	182 ± 1,74		
		P [g/kg ffrTS]	96,1 ± 0,958		
		Ra [mg/cm ³]	245 ± 5,50		
		Ca [mg/cm ³]	82,6 ± 1,59		
		P [mg/cm ³]	43,6 ± 0,594		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d34	Fem	Ra [g/kg ffrTS]	431 ^a ± 23,9	378 ^b ± 24,3	328 ^c ± 17,8
		Ca [g/kg ffrTS]	153 ^a ± 8,93	129 ^b ± 6,72	113 ^c ± 5,27
		P [g/kg ffrTS]	75,1 ^a ± 3,74	62,2 ^b ± 5,07	54,9 ^c ± 2,60
		Ra [mg/cm ³]	156 ^a ± 18,1	122 ^b ± 16,8	97,2 ^c ± 4,59
		Ca [mg/cm ³]	55,5 ^a ± 6,69	41,5 ^b ± 5,31	33,5 ^b ± 1,30
		P [mg/cm ³]	27,2 ^a ± 2,96	20,0 ^b ± 2,98	16,3 ^b ± 0,76
	Ti/Fi	Ra [g/kg ffrTS]	433 ^a ± 20,2	382 ^b ± 17,9	340 ^c ± 10,3
		Ca [g/kg ffrTS]	149 ^a ± 13,4	131 ^b ± 10,3	108 ^c ± 9,63
		P [g/kg ffrTS]	73,5 ^a ± 10,2	63,8 ^{ab} ± 5,47	53,8 ^b ± 4,20
		Ra [mg/cm ³]	165 ^a ± 19,7	128 ^b ± 15,2	106 ^b ± 3,36
		Ca [mg/cm ³]	57,0 ^a ± 9,34	43,9 ^b ± 6,70	33,6 ^b ± 2,88
		P [mg/cm ³]	28,2 ^a ± 5,95	21,4 ^b ± 3,57	16,7 ^b ± 1,25
	MT III	Ra [g/kg ffrTS]	561 ^a ± 5,93	526 ^b ± 1,27	489 ^c ± 15,7
		Ca [g/kg ffrTS]	190 ^a ± 11,9	182 ^{ab} ± 7,11	168 ^b ± 10,1
		P [g/kg ffrTS]	96,7 ^a ± 3,65	91,7 ^a ± 3,21	82,9 ^b ± 4,67
		Ra [mg/cm ³]	264 ^a ± 34,2	211 ^b ± 18,1	185 ^b ± 5,19
		Ca [mg/cm ³]	89,9 ^a ± 16,0	72,7 ^b ± 4,73	63,7 ^b ± 3,95
		P [mg/cm ³]	45,5 ^a ± 6,67	36,8 ^b ± 3,63	31,4 ^b ± 1,63

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; Ra: Rohasche, ffr TS: fettfreie Trockensubstanz, VT: Versuchstag, Fem: distale Femur-Epiphyse, Ti/Fi: proximale Tibia/Fibula-Epiphyse, MT III: *Os metatarsale III*

Ergebnisse

Die Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS ebenso wie je cm³ waren in den Knochen der Tiere aus der Kontrollgruppe – mit Ausnahme des P-Gehalts je kg ffrTS in Ti/Fi – stets höher als in den Knochen der Tiere aus der Gruppe VB. Im Gegensatz dazu variierten die entsprechenden Werte in den Knochen der Tiere aus beiden Versuchsgruppen in nahezu jedem Parameter auf deutlich geringerem Niveau als in den Knochen der Tiere aus der Gruppe VB (Ausnahme: Ca je kg ffrTS im MT III, Gruppe V1).

Tabelle 45 zeigt die mittleren absoluten Ra-Mengen in MC III und MT III der Tiere aus dem Durchgang 1.

Tabelle 45: Absolute Ra-Menge [g] in MC III und MT III im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB		
VT				
d-1	MC III	1,26 ± 0,079		
	MT III	1,37 ± 0,104		
Gruppe		K	V1	V2
VT				
d34	MC III	2,86 ^a ± 0,182	2,21 ^b ± 0,122	1,90 ^c ± 0,203
	MT III	2,93 ^a ± 0,406	2,19 ^b ± 0,089	1,77 ^b ± 0,197

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile; VT: Versuchstag, MC III: *Os metacarpale III*, MT III: *Os metatarsale III*

Die im dritten Metakarpalknochen enthaltene Ra-Menge war im Mittel bei den Tieren der Kontrollgruppe etwa um den Faktor 1,5 höher als bei den Tieren der Gruppe V2. Bezüglich der Ra-Menge im MT III war dieser Unterschied zwischen den Mittelwerten der Gruppen K und V2 noch etwas deutlicher (etwa Faktor: 1,66).

Durchgang 2

Numerisch wiesen die Knochen der Tiere aus der Kontrollgruppe zu allen Sektionszeitpunkten stets die höchsten Ra-, Ca- und P-Gehalte (je kg ffrTS und je cm³) auf, bezüglich der Ra-Gehalte in den verschiedenen Knochen(-anteilen) war dieser Unterschied zu jedem Zeitpunkt auch statistisch abzusichern. Wie im ersten Durchgang waren die prozentualen Unterschiede zwischen den Ra-Gehalten in den Knochen der Tiere aus den Gruppen K und V2 je kg ffrTS weniger stark ausgeprägt als diejenigen je cm³. Unabhängig

Ergebnisse

von der Bezugsgröße (kg ffrTS oder cm^3) waren diese Unterschiede deutlicher in den Fem bzw. Ti/Fi als im MT III.

Verglichen mit den mittleren Ra-Gehalten sowohl je kg ffrTS als auch je cm^3 im Fem und in Ti/Fi der Tiere aus Gruppe VB wiesen die Tiere der Versuchsgruppe 2 zu jedem Zeitpunkt geringere Mittelwerte auf, wohingegen die Ra-Gehalte in diesen beiden Knochen von Tieren der Kontrollgruppe zu jedem Zeitpunkt höher waren (je kg ffrTS: 9,49 - 20,4 %; bzw. je cm^3 : 20,6 - 69,9 % höher) als bei den Tieren aus Gruppe VB.

Tabelle 46 zeigt die chemische Zusammensetzung der distalen Femur-Epiphyse der Tiere aus dem Durchgang 2.

Statistisch signifikante Unterschiede zwischen allen drei Gruppen bestanden am Fem nur in Bezug auf den Ra-Gehalt je cm^3 am Versuchsende (d82). Zu diesem Zeitpunkt war der mittlere Ra-Gehalt je cm^3 in den Knochen der Tiere aus Gruppe K nahezu doppelt so hoch wie in den Knochen der Tiere aus Gruppe V2 (275 vs. 141 mg/cm^3).

Ergebnisse

Tabelle 46: Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm³ in der dist. Femur-Epiphyse im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Fem	Ra [g/kg ffrTS]	447 ± 22,6		
		Ca [g/kg ffrTS]	156 ± 4,22		
		P [g/kg ffrTS]	76,0 ± 3,09		
		Ra [mg/cm ³]	165 ± 14,4		
		Ca [mg/cm ³]	57,2 ± 2,83		
		P [mg/cm ³]	28,0 ± 2,02		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d26 ¹	Fem	Ra [g/kg ffrTS]	493 ^a ± 20,4	429 ^b ± 30,0	400 ^b ± 15,5
		Ca [g/kg ffrTS]	154 ^a ± 8,70	141 ^a ± 18,9	143 ^a ± 5,46
		P [g/kg ffrTS]	79,3 ^a ± 3,43	68,7 ^a ± 8,78	68,6 ^a ± 3,81
		Ra [mg/cm ³]	199 ^a ± 13,0	153 ^b ± 17,7	138 ^b ± 4,81
		Ca [mg/cm ³]	62,1 ^a ± 4,05	50,5 ^a ± 8,92	49,4 ^a ± 2,19
		P [mg/cm ³]	32,1 ^a ± 1,90	24,6 ^b ± 4,18	23,7 ^b ± 1,27
d47	Fem	Ra [g/kg ffrTS]	524 ^a ± 23,8	457 ^b ± 18,3	420 ^b ± 31,5
		Ca [g/kg ffrTS]	171 ^a ± 3,73	149 ^b ± 11,5	142 ^b ± 11,5
		P [g/kg ffrTS]	84,4 ^a ± 1,31	69,6 ^b ± 6,25	67,1 ^b ± 6,41
		Ra [mg/cm ³]	237 ^a ± 16,2	165 ^b ± 9,96	147 ^b ± 16,4
		Ca [mg/cm ³]	77,3 ^a ± 1,60	53,9 ^b ± 4,69	49,8 ^b ± 4,73
		P [mg/cm ³]	38,1 ^a ± 0,655	25,1 ^b ± 2,50	23,5 ^b ± 2,76
d82	Fem	Ra [g/kg ffrTS]	538 ^a ± 13,0	452 ^b ± 37,5	413 ^b ± 46,6
		Ca [g/kg ffrTS]	197 ^a ± 13,2	159 ^b ± 9,57	166 ^b ± 14,3
		P [g/kg ffrTS]	95,6 ^a ± 2,92	76,5 ^b ± 4,08	74,8 ^b ± 4,42
		Ra [mg/cm ³]	275 ^a ± 9,94	170 ^b ± 10,2	141 ^c ± 19,8
		Ca [mg/cm ³]	101 ^a ± 11,5	59,9 ^b ± 6,13	56,5 ^b ± 7,04
		P [mg/cm ³]	48,9 ^a ± 3,90	28,9 ^b ± 2,88	25,5 ^b ± 2,52

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; Ra: Rohasche, ffr TS: fettfreie Trockensubstanz, VT: Versuchstag, Fem: distale Femur-Epiphyse, OM: Ohrmarke

Aus Tabelle 47 gehen die Ra-, Ca und P-Gehalte je kg ffrTS sowie je cm³ in der prox. Tibia/Fibula-Epiphyse der Tiere aus dem Durchgang 2 hervor.

Mit Ausnahme des Ca-Gehalts je kg ffrTS an d47 waren die Mittelwerte in allen Parametern an der Ti/Fi zu allen drei Sektionszeitpunkten in der Kontrollgruppe signifikant höher als in der Versuchsgruppe 1; zwischen den Mittelwerten der Gruppen K und V2 bestanden zu jedem Zeitpunkt signifikante Unterschiede in allen Parametern. Wie auch im Fem wiesen die Tiere der Kontrollgruppe gegenüber den Tieren der Versuchsgruppe 2 zum Versuchsende (etwa

Ergebnisse

95 kg KM) in der Ti/Fi einen etwa doppelt so hohen mittleren Ra-Gehalt je cm³ auf (Faktor: 1,94), der absolute Unterschied betrug hier 145 g/kg.

Tabelle 47: Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm³ in der prox. Tibia/Fibula-Epiphyse im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	Ti/Fi	Ra [g/kg ffrTS]	453 ± 29,3		
		Ca [g/kg ffrTS]	158 ± 5,86		
		P [g/kg ffrTS]	78,9 ± 3,02		
		Ra [mg/cm ³]	176 ± 20,5		
		Ca [mg/cm ³]	61,2 ± 4,48		
		P [mg/cm ³]	30,5 ± 2,31		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d26 ¹		Ra [g/kg ffrTS]	496 ^a ± 23,3	433 ^b ± 29,1	407 ^b ± 25,2
		Ca [g/kg ffrTS]	176 ^a ± 10,7	149 ^b ± 11,8	137 ^b ± 5,26
		P [g/kg ffrTS]	86,0 ^a ± 5,63	72,3 ^b ± 4,73	64,6 ^b ± 4,19
		Ra [mg/cm ³]	215 ^a ± 17,8	165 ^b ± 18,7	150 ^b ± 14,3
		Ca [mg/cm ³]	76,0 ^a ± 5,30	56,8 ^b ± 6,79	50,5 ^b ± 2,90
		P [mg/cm ³]	37,2 ^a ± 2,20	27,5 ^b ± 2,94	23,8 ^b ± 2,00
d47	Ti/Fi	Ra [g/kg ffrTS]	532 ^a ± 14,8	456 ^b ± 23,5	415 ^c ± 23,9
		Ca [g/kg ffrTS]	178 ^a ± 7,01	162 ^a ± 11,7	141 ^b ± 15,0
		P [g/kg ffrTS]	90,2 ^a ± 3,32	78,2 ^b ± 3,40	66,9 ^c ± 7,19
		Ra [mg/cm ³]	263 ^a ± 14,3	174 ^b ± 14,6	151 ^c ± 12,5
		Ca [mg/cm ³]	87,9 ^a ± 5,16	61,8 ^b ± 6,52	51,3 ^c ± 6,53
		P [mg/cm ³]	44,5 ^a ± 2,37	29,8 ^b ± 2,25	24,4 ^c ± 2,94
d82		Ra [g/kg ffrTS]	542 ^a ± 17,0	449 ^b ± 18,6	419 ^b ± 49,4
		Ca [g/kg ffrTS]	191 ^a ± 6,75	167 ^b ± 9,97	151 ^c ± 10,0
		P [g/kg ffrTS]	93,1 ^a ± 4,21	78,3 ^b ± 4,38	71,1 ^c ± 3,60
		Ra [mg/cm ³]	299 ^a ± 20,5	179 ^b ± 13,3	154 ^b ± 19,0
		Ca [mg/cm ³]	105 ^a ± 2,30	66,6 ^b ± 3,47	55,2 ^c ± 4,21
		P [mg/cm ³]	51,4 ^a ± 2,78	31,2 ^b ± 1,31	26,1 ^c ± 1,43

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; Ra: Rohasche, ffr TS: fettfreie Trockensubstanz, VT: Versuchstag, Ti/Fi: proximale Tibia/Fibula-Epiphyse, OM: Ohrmarke

Tabelle 48 zeigt die chemische Zusammensetzung des MT III der Tiere aus dem Durchgang 2.

Die mittleren Ra-Gehalte im MT III (je kg ffrTS und je cm³) waren zu allen drei Zeitpunkten bei den Tieren der Kontrollgruppe signifikant höher als bei den Tieren aus den Gruppen V1

Ergebnisse

und V2. In diesen Parametern ließen sich die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der beiden Versuchsgruppen nur an d86 statistisch absichern.

Tabelle 48: Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm³ im MT III im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB			
VT					
d-1	MT III	Ra [g/kg ffrTS]	559 ± 15,5		
		Ca [g/kg ffrTS]	192 ± 33,0		
		P [g/kg ffrTS]	99,6 ± 2,40		
		Ra [mg/cm ³]	257 ± 20,7		
		Ca [mg/cm ³]	88,5 ± 19,2		
		P [mg/cm ³]	45,7 ± 3,62		
Gruppe		K	V1	V2	
VT					
d26 ¹	MT III	Ra [g/kg ffrTS]	589 ^a ± 11,0	557 ^b ± 16,6	551 ^b ± 11,7
		Ca [g/kg ffrTS]	218 ^a ± 9,10	197 ^b ± 8,01	203 ^{ab} ± 9,96
		P [g/kg ffrTS]	108 ^a ± 3,51	97,0 ^b ± 2,30	95,2 ^b ± 3,51
		Ra [mg/cm ³]	305 ^a ± 15,3	259 ^b ± 25,9	258 ^b ± 15,9
		Ca [mg/cm ³]	113 ^a ± 8,89	91,7 ^b ± 8,43	95,3 ^b ± 9,04
		P [mg/cm ³]	56,3 ^a ± 3,97	45,2 ^b ± 4,23	44,6 ^b ± 3,50
d47	MT III	Ra [g/kg ffrTS]	596 ^a ± 15,2	569 ^b ± 14,2	549 ^b ± 12,1
		Ca [g/kg ffrTS]	220 ^a ± 6,44	207 ^{ab} ± 2,46	195 ^b ± 17,5
		P [g/kg ffrTS]	109 ^a ± 2,71	98,7 ^b ± 1,00	92,8 ^c ± 5,21
		Ra [mg/cm ³]	346 ^a ± 11,8	279 ^b ± 30,0	251 ^b ± 16,1
		Ca [mg/cm ³]	127 ^a ± 4,13	101 ^b ± 8,98	89,0 ^c ± 7,09
		P [mg/cm ³]	63,5 ^a ± 2,85	48,4 ^b ± 4,51	42,4 ^b ± 4,03
d82	MT III	Ra [g/kg ffrTS]	614 ^a ± 3,44	583 ^b ± 5,52	558 ^c ± 19,0
		Ca [g/kg ffrTS]	222 ^a ± 4,67	208 ^b ± 5,62	202 ^c ± 12,2
		P [g/kg ffrTS]	108 ^a ± 3,18	97,5 ^b ± 0,962	95,8 ^c ± 4,25
		Ra [mg/cm ³]	410 ^a ± 29,0	320 ^b ± 30,5	265 ^c ± 21,4
		Ca [mg/cm ³]	148 ^a ± 12,8	114 ^b ± 9,42	96,2 ^c ± 10,0
		P [mg/cm ³]	72,4 ^a ± 6,51	53,5 ^b ± 4,99	45,6 ^b ± 3,62

^{a, b, c} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; Ra: Rohasche, ffr TS: fettfreie Trockensubstanz, VT: Versuchstag, MT III: *Os metatarsale III*, OM: Ohrmarke

Gegenüber den mittleren Ra-Gehalten je kg ffrTS und je cm³ in den dritten Metatarsalknochen der Tiere aus der Gruppe VB wiesen die Tiere aus der Kontrollgruppe zu allen drei Zeitpunkten höhere Mittelwerte auf. Die Tiere der Versuchsgruppe 2 hatten hingegen nur an d26 sowie an d82 höhere Ra-Gehalte je cm³ im MT III als die vier zu

Ergebnisse

Versuchsbeginn untersuchten Tiere; die Ra-Gehalte je kg ffrTS waren stets geringer als bei den Tieren der Gruppe VB.

Die mittleren absoluten Ra-Mengen im MT III waren an d47 und d82 statistisch signifikant höher bei den Tieren der Kontrollgruppe als bei den Tieren der Gruppen V1 und V2 (vgl. Tabelle 49). Die beiden letztgenannten Gruppen unterschieden sich im Mittel zu keinem Zeitpunkt statistisch signifikant hinsichtlich dieses Parameters.

Tabelle 49: Absolute Ra-Menge [g] in MT III im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)

Gruppe		VB		
VT	d-1			
	MT III	$2,68 \pm 0,724$		
Gruppe		K	V1	V2
VT	d26 ¹	$4,52^a \pm 1,00$	$3,29^a \pm 0,524$	$3,11^a \pm 0,495$
	d47	$6,25^a \pm 0,730$	$4,70^b \pm 0,764$	$3,69^b \pm 0,420$
	d82	$8,86^a \pm 0,421$	$5,65^b \pm 0,774$	$5,02^b \pm 0,713$

^{a, b} kennzeichnen signifikant unterschiedliche Mittelwerte innerhalb einer Zeile, ¹K: n = 3 wegen vorzeitiger Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13, MC III: *Os metacarpale III*, MT III: *Os metatarsale III*, OM: Ohrmarke

Im Vergleich zu den Ra-Mengen im MT III der Tiere aus der Gruppe VB waren die bei den Tieren der Gruppen K, V1 und V2 ermittelten Werte zu jedem Zeitpunkt höher. Im Vergleich zu den Knochen der Tiere aus der Kontrollgruppe war die absolute Ra-Menge im MT III der Tiere aus Gruppe V2 im Verlauf des Versuchs um etwa 31, 41 bzw. 43 % geringer. Diese erheblichen Unterschiede waren dabei an d26 und d47 stärker auf die Änderung der Knochenmasse (-20,1 bzw. -24,9 %) zurückzuführen als auf den reduzierten Ra-Gehalt in der uS (-13,1 bzw. 21,3 %). An d82 hingegen war der prozentuale Unterschied zwischen den MT III der Tiere aus den Gruppen V2 bzw. K in Bezug auf den Ra-Gehalt größer als jener hinsichtlich der Knochenmasse (28,8 bzw. 20,5 % geringer in V2).

5 Diskussion

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine kritische Auseinandersetzung mit dem Versuchsdesign und der angewandten Methodik, bevor dann wesentliche Ergebnisse aus beiden Versuchsdurchgängen diskutiert und mit Erkenntnissen aus vorangegangenen Studien anderer Autoren verglichen werden.

5.1 Kritik der Methode

Im Folgenden wird auf jene Faktoren näher eingegangen, die möglicherweise Einfluss auf die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung hatten und daher bei der Bewertung dieser und den abgeleiteten Schlussfolgerungen berücksichtigt werden müssen.

5.1.1 MF-Varianten und Fütterung

Im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit sollten die drei MF-Varianten – mit Ausnahme des P-Gehalts und der Phytaseaktivität – jeweils vergleichbare Energie- und Nährstoffgehalte aufweisen. Dies ist weitestgehend gelungen, da nur im Mastfutter I (DG 1) über den Analysenspielraum hinausgehende Unterschiede (Mn- und Stärke-Gehalt) zwischen den MF-Varianten auftraten. Es war dennoch auch bei den Tieren der Versuchsgruppe 2 von einer mindestens bedarfsdeckenden Mn-Versorgung auszugehen, da der Mn-Gehalt im MF-V2 (Mast I) mit 32,8 mg/kg uS (entspricht 36,7 mg/kg TS) die Empfehlungen des Ausschusses für Bedarfsnormen der Gesellschaft für Ernährungsphysiologie von 20 mg/kg TS im MF für Mastschweine und Zuchtläufer noch überstieg (AUSSCHUSS FÜR BEDARFSNORMEN DER GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE 2006). Nach NRC (1998) sollten im Mastfutter für Schweine mindestens 0,10 % Na enthalten sein. Dieser Mindest-Gehalt wurde im Mastfutter I für den ersten Durchgang nicht erreicht (vgl. Tabelle 19), sodass folglich von einer vorübergehend nicht bedarfsgerechten Na-Versorgung der Tiere auszugehen ist. Zu den möglichen Folgen einer unzureichenden Na-Versorgung zählen bei Schweinen verringerte tägliche KMZ sowie eine ungünstigere FCR (MEYER et al. 1950). Die Unterschiede zwischen den MF-Varianten K, V1 und V2 bezüglich des Na-Gehalts überstiegen den Bereich der analytischen Spielräume nicht, sodass ein Vergleich der Leistungsparameter zwischen den Gruppen K, V1 und V2 dennoch vertretbar war. In der

vorliegenden Arbeit erhielten die Tiere das Na-arme MF über einen Zeitraum von nur etwa zehn Tagen; wohingegen MEYER et al. (1950) ihre Beobachtungen an Schweinen machten, die über einen Zeitraum von vier Wochen MF mit unterschiedlichen Na-Gehalten erhielten. Bei 0,06 % Na im MF stellten diese Autoren noch eine Reduktion der KMZ gegenüber den Kontrolltieren (0,20 % Na im MF) fest, wohingegen die KMZ und die FCR der Tiere bei Einsatz eines MF mit einem Na-Gehalt von 0,09 % (\triangleq 0,9 g/kg) mit denen der Kontrolltiere vergleichbar waren.

Mit den MF-Varianten für die Kontrollgruppe sollte eine optimale Skelettentwicklung ermöglicht werden, um die Werte dieser Tiere als Beurteilungsstandard heranziehen zu können. Laut NRC (1998) sollte ein Alleinfutter für wachsende Schweine mit einer KM zwischen 10 und 20 kg einen Gesamt-P-Gehalt von mindestens 0,6 % bzw. einen aP-Gehalt von 0,32 % aufweisen. Für Tiere mit einer Körpermasse von 20 - 50 kg werden entsprechend 0,5 % P bzw. 0,23 % aP im MF als bedarfsdeckend angegeben. Die Gesamt-P-Gehalte in den MF-Varianten K (Aufzucht und Mast I) für den ersten Durchgang lagen mit 5,08 g/kg im Aufzuchtfutter bzw. 4,07 g/kg im Mastfutter I unterhalb dieser Bedarfsangaben. Durch den Phytase-Zusatz können etwa 0,96 g P zusätzlich unterstellt werden (HARPER et al. 1997), sodass eine knapp bedarfsdeckenden P-Versorgung für die Tiere der Kontrollgruppe im Durchgang 1 anzunehmen ist.

Um in allen drei Gruppen eine sicher bedarfsdeckende Na-Versorgung zu gewährleisten und in der Kontrollgruppe darüber hinaus eine mindestens bedarfsdeckende P-Versorgung sicherzustellen, wurde die Zusammensetzung des Mastfutters I für den zweiten Durchgang dahingehend angepasst, dass der Anteil an MNP (MF-K) bzw. NaCl (MF-V1 und -V2) erhöht wurde (vgl. Tabelle 8 und Tabelle 21).

Aus dem geringeren Stärkegehalt sowie dem höheren Rfa-Gehalt im Mastfutter I für die Kontrollgruppe im ersten Durchgang resultierte ein gegenüber den MF-Varianten V1 und V2 geringerer Energiegehalt (K: 13,0 MJ ME/kg uS; V1: 13,7 MJ ME/kg uS; V2: 13,6 MJ ME/kg uS. Werden die Vorgaben der Verordnung (EG) Nr. 767/2009¹ zu maximal tolerierbaren technischen und analytischen Abweichungen der Energiegehalte von 5 % zugrunde gelegt, so ist jedoch nicht zwingend von einem Unterschied bezüglich der

¹ Vgl. Anhang IV der Verordnung (EG) Nr. 767/2009, ABl. L 229 vom 1.9.2009, S. 1-28

Energiegehalte auszugehen. Dennoch können eine unterschiedliche Energieversorgung während der Zeit des Einsatzes dieses MF und damit eine Beeinflussung der KMZ nicht ausgeschlossen werden. Im Vergleich der verschiedenen MF-Varianten muss insgesamt berücksichtigt werden, dass etwaige Unterschiede bezüglich der Inhaltsstoffe in den MF-Varianten auch auf einer nicht ganz homogenen Verteilung der Komponenten (bzw. Nährstoffe) innerhalb der entnommenen MF-Probe beruhen können. Durch die Nutzung eines Probenstechers bzw. durch Entnahme eines Aliquots direkt aus dem Mischer unmittelbar nach Beendigung des Mischvorgangs wurde zwar versucht, eine repräsentative Probe zu gewinnen, doch kann es trotz dieser Maßnahmen zu einer inhomogenen Verteilung innerhalb der entnommenen Probe gekommen sein. Dies gilt insbesondere für das Mastfutter I, da dieses aufgrund des hohen Anteils an Gerste (etwa 71 %) und folglich auch Spelzen zur Entmischung neigte. Da abgesehen vom Rfa- und Stärkegehalt keine wesentlichen Abweichungen der Nährstoff-Gehalte im MF-K (DG 1) vorlagen, bleibt zu vermuten, dass den festgestellten Variationen nicht Folge einer Fehlmischung waren, sondern auf der Inhomogenität des Probenmaterials beruhten.

In der vorliegenden Untersuchung wurde ein identischer Ca-Gehalt in den drei MF-Varianten K, V1 und V2 angestrebt. Aufgrund der unterschiedlichen P-Versorgung resultierten daraus Unterschiede bezüglich des Ca:P-Verhältnisses im MF zwischen der Kontrollgruppe und den Gruppen V1 bzw. V2 (MF-K: 1,55 - 1,80:1; MF-V1: 2,04 - 2,70:1 und MF-V2: 2,19 - 2,65:1). Bei der Bewertung der in der vorliegenden Untersuchung aufgetretenen Effekte kann somit aufgrund des Versuchsdesigns keine Differenzierung vorgenommen werden, ob die Veränderungen auf die unterschiedliche P-Versorgung oder die Variation des Ca:P-Verhältnisses zurückzuführen sind. In den beiden MF-Varianten V1 und V2 war der Gesamt-P-Gehalt vergleichbar, sodass sich das Ca:P-Verhältnis zwischen diesen beiden MF-Varianten nur in geringerem Ausmaß unterschied. Da jedoch dem MF-V1 eine Phytase (Dosierung: 500 FTU/kg) zugesetzt war und dem MF-V2 hingegen nicht, ist davon auszugehen, dass die P-Verdaulichkeit der MF-Variante V1 höher war und somit das Ca:vP-Verhältnis in dieser MF-Variante enger war als im MF-V2. Nach EECKHOUT et al. (1995) kann eine weite Ca:P-Relation insbesondere bei knapper P-Versorgung von Mastschweinen zu einer Reduktion der KMZ führen. Durch ein weites Ca:P-Verhältnis kann zudem die Effizienz der Phytase

beeinträchtigt werden (QIAN et al. 1996; BRADY et al. 2002), was wiederum – neben den unterschiedlichen Gesamt-P-Gehalten – im Vergleich der Ergebnisse der Gruppen K und V1 Berücksichtigung finden muss. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die KMZ als auch für die Blut- und Knochenparameter, da die P-Konzentration im Serum ebenso wie die Knochenmineralisation vom Ca:P-Verhältnis im Futter beeinflusst werden kann (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985, 1986; EECKHOUT et al. 1995; QIAN et al. 1996; HAGEMOSER et al. 2000; GUTZWILLER et al. 2014).

Die Versuchsgruppe 2 steht für ein „worst case“-Szenario, das sich ergeben kann, wenn auf den Zusatz von anorganischem P zum MF verzichtet wird und dann erwartete/unterstellte Phytaseaktivitäten, beispielsweise aufgrund einer Hitzeschädigung des Enzyms, nicht erreicht werden. Da die MF-Varianten in der vorliegenden Untersuchung als Schrot angeboten wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Aktivität der endogenen Phytase in diesen MF während der Herstellung weitestgehend erhalten blieb und die analysierten Aktivitäten den originär in den MF-Komponenten enthaltenen entsprachen. Wenn es jedoch im Zuge der Pelletierung zu einer übermäßigen Erhitzung eines Mischfutters kommt, so ist – abweichend von der Situation in Versuchsgruppe 2 – auch mit einer reduzierten Aktivität korneigener Phytasen zu rechnen. Die Versorgung mit verdaulichem Phosphor wäre dann unter Umständen noch geringer als in der Gruppe V2. Allerdings ist im Falle einer Hitzeschädigung der Phytase (endogen und/oder zugesetzt) während des Produktionsprozesses nicht von einer 100 %-igen Inaktivierung des Enzyms auszugehen (EECKHOUT 2000; SLOMINSKI et al. 2007).

5.1.2 Tiere

Da in einigen Untersuchungen genetische Einflüsse auf verschiedene Knochencharakteristika festgestellt wurden (RICHMOND u. BERG 1972; GRANDHI et al. 1986) und es zudem Hinweise darauf gibt, dass auch die Regulation der P-Homöostase von Schweinen genetischen Einflüssen unterliegt (ALEXANDER et al. 2008), sollte dies beim Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Studien mit bedacht werden. In den beiden Durchgängen dieser Untersuchung wurden Tiere unterschiedlicher Genetik (vgl. 3.3.1) und unterschiedlichen Alters genutzt, sodass die Auswertung für beide Durchgänge getrennt voneinander vorgenommen wurde.

Im ersten Durchgang wiesen die Tiere einen Altersunterschied von maximal zwei Tagen auf, sodass hier Alterseffekte vernachlässigbar sind. Die Tiere aus Durchgang 2 stammten überwiegend aus Würfen, die im Abstand von einem Tag bzw. einer Woche geboren wurden. Zwei Tiere waren jedoch noch eine Woche älter (vgl. Tabelle 62 im Tabellenanhang). Diese Altersunterschiede müssen bei der Bewertung der Leistungsparameter und auch der Blut- und Knochenparameter berücksichtigt werden.

5.1.3 Haltung der Tiere und Erfassung der Leistungsparameter

Die Haltung erfolgte in Gruppen von bis zu zwölf Tieren auf Stroh und unterschied sich damit von der praxisüblichen Mastschweinehaltung auf Spaltenboden. Je nach Anzahl der Tiere pro Gruppe stand eine nutzbare Bodenfläche von etwa 0,9 m² bis 2,8 m² je Tier zur Verfügung. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Körpermassen der Tiere ergaben sich somit in beiden Durchgängen Besatzdichten deutlich unterhalb der rechtlichen Vorgaben laut Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung¹. Ein Einfluss sowohl der Strohhaltung als auch der Gruppengröße und Besatzdichte auf die Bewegungsaktivität – im Vergleich zur konventionellen Haltung – ist zu vermuten. Da bei Schweinen verschiedene Knochenparameter durch die Bewegungsaktivität der Tiere beeinflusst werden können (RAAB et al. 1991), müssen die jeweiligen Haltungsbedingungen beim Vergleich von Ergebnissen verschiedener Studien berücksichtigt werden. Zu der Frage, ob es sich bei dem Einfluss der Bewegungsaktivität auf die Knocheneigenschaften um einen systemischen Effekt handelt, oder ob dieser auf die tatsächlich der Belastung ausgesetzten Knochen beschränkt ist, sind in verschiedenen Studien unterschiedliche Aussagen zu finden. TOMMERUP et al. (1993) bzw. RAAB et al. (1991) untersuchten einen möglichen Trainingseinfluss (Laufband) auf den Knochenauf- bzw. -umbau an Rippe bzw. Femur von drei Jahre alten Sauen. RAAB et al. (1991) stellten dabei am unmittelbar an der Bewegung beteiligten Femur Veränderungen der kortikalen Knochenbildung fest, wohingegen TOMMERUP et al. (1993) an den Rippen derselben Sauen keinen Effekt des Trainings nachweisen konnten. Die Beobachtungen von MCDONALD et al. (1986) an Ratten unterschiedlichen Alters bestätigen die lokalen Effekte für junge (7 Monate alte) und mittelalte (14 Monate alte) Ratten. Bei älteren Tieren (19

¹ Vgl. BGBl. I 2006, S. 2043-2056

Monate alt) stellten diese Autoren jedoch auch an solchen Knochen, die nicht direkt an der Bewegung beteiligt waren, Veränderungen fest.

Insgesamt zeigen Schweine bei Strohhaltung häufiger exploratives Verhalten und schnellere Bewegungsabläufe als einstreulos gehaltenen Vergleichstiere (DE JONG et al. 1998). Trotz der beobachteten Verhaltensunterschiede stellten DE JONG et al. (1998) jedoch keine unterschiedliche KM-Entwicklung der Tiere in den verschiedenen Haltungssystemen fest. Über eine gesteigerte Bewegungsaktivität und insbesondere durch häufigeres Laufen/Rennen könnte die Strohhaltung in der vorliegenden Untersuchung einen günstigen Einfluss auf die Knochendichte gehabt haben. Bei jenen Tieren, die während der hier durchgeführten Versuche Bewegungsstörungen oder häufiger eine hundesitzige Körperhaltung zeigten (vgl. Tabelle 69 und Tabelle 70), muss zudem bedacht werden, dass auch die Inaktivität eines Tieres oder die Lahmheits-bedingte Schonung einer Gliedmaße die Knochendichte und -mineralisation beeinträchtigen kann. WEILER et al. (2006) stellten bei zehn Wochen alten Mastschweinen schon nach zwei Wochen reduzierter Bewegungsaktivität u. a. eine Verringerung der periostalen Knochenbildung an der Tibia fest. An Ratten wurde beobachtet, dass bei Inaktivität einer Gliedmaße bereits innerhalb von 30 - 72 h u. a. die Anzahl der Osteoklasten je mm Knochenoberfläche anstieg (WEINREB et al. 1989).

In der vorliegenden Untersuchung blieb der Einfluss des Geschlechts unberücksichtigt. Aufgrund der differierenden Mastleistung von Börgen und Sauen (FRIESEN et al. 1994; MORALES et al. 2011) ist davon auszugehen, dass der Einsatz von Tieren beiderlei Geschlechts die Heterogenität in Bezug auf die KM innerhalb der Gruppen erhöhte. Neben der Mastleistung kann das Geschlecht auch das Verhalten und die Bewegungsaktivität von Schweinen während der Mast beeinflussen (ELKMANN u. HOY 2008). Wurde in der Untersuchung von ELKMANN und HOY (2008) Stroh als Einstreumaterial genutzt, so beschäftigten sich die weiblichen Tiere signifikant länger mit dem Stroh als die Börgen. Durch eine unterschiedliche Aktivität männlicher bzw. weiblicher Tiere könnte es demnach zu einer höheren Variabilität diverser Knochenparameter gekommen sein. Vor dem Hintergrund der angestrebten Verwendung der Ergebnisse dieser Arbeit als Orientierungswerte für die Diagnostik erschien es dennoch sinnvoll, Tiere beiderlei Geschlechts einzusetzen. Die männlichen (kastriert) bzw. weiblichen Tiere wurden in der

vorliegenden Untersuchung zudem gleichmäßig auf die drei Versuchsgruppen verteilt, sodass diese möglichen Einflüsse durch das Versuchsdesign berücksichtigt wurden.

Die Ermittlung des Futtermittelsverbrauchs erfolgte durch wöchentliche Futtermittelsrückwaage auf Gruppenbasis, wobei die Futtermittelsverluste aufgrund der Stroheinstreu nicht quantifiziert werden konnten. Folglich ist es möglich, dass das Ausmaß der Futtermittelsverluste (aus dem Trog) durch die Tiere zwischen den Gruppen differierte. Eine stärkere Futtermittelsverschwendung in einer Gruppe würde einen höheren als den tatsächlichen Futtermittelsverbrauch vortäuschen und in der Folge zu einem ungünstigeren Futtermittelaufwand geführt haben. Durch die gewählte Methodik zur Erfassung des Futtermittelsverbrauchs ist es ferner nicht möglich, individuelle Unterschiede zu erkennen. Da die vorliegende Arbeit jedoch nicht primär darauf zielte, die Auswirkungen einer unterschiedlichen P-Versorgung auf die Aufzucht- bzw. Mastleistung zu untersuchen, sondern vielmehr auf die Diagnostik eines P-Mangels anhand von Blut- und Knochenparametern fokussiert war, wurde auf die Erfassung der individuellen Futtermittelaufnahme verzichtet. Die Erfassung der individuellen Futtermittelaufnahme wäre zudem mit einer Gruppenhaltung der Tiere unvereinbar gewesen. Eine Einzelhaltung wiederum wäre mit erheblichem Stress für die Tiere verbunden gewesen, sodass auch aus diesem Grund davon abgesehen wurde.

5.1.4 Gruppenaufteilung und Auswahl der Tiere zur Sektion

Um möglichst einheitliche Körpermassen der Tiere in den drei Gruppen K, V1 und V2 vor Einsatz der drei MF-Varianten zu gewährleisten, wurden für die Sektion zu Versuchsbeginn vor allem jene Tiere ausgewählt, deren KM am deutlichsten von der mittleren KM aller Tiere zu diesem Zeitpunkt abwich. Aus diesem Grund war die mittlere KM der Tiere aus Gruppe VB in beiden Durchgängen höher als bei den Tieren der Gruppen K, V1 bzw. V2 zum jeweiligen Zeitpunkt der Gruppenaufteilung. Diese unterschiedlichen KM müssen vor allem bei einem Vergleich der Knochencharakteristika von Tieren der Gruppen K, V1 und V2 mit den zuvor bei den Tieren der Gruppe VB ermittelten Werten bedacht werden.

Die Einteilung der Tiere in die drei Gruppen K, V1 und V2 erfolgte primär anhand der KM. Weiterhin wurde das Geschlecht berücksichtigt und eine gleichmäßige Aufteilung der Würfe angestrebt, womit eine einheitliche Verteilung eventueller genetischer Einflüsse auf die drei Gruppen gewährleistet werden sollte. Aufgrund der zur Verfügung stehenden Anzahl an Würfen sowie der prioritären Behandlung der Kriterien „Körpermasse“ und „Geschlecht“

konnte dies jedoch nicht vollständig realisiert werden (vgl. Tabelle 61 und Tabelle 62 im Tabellenanhang).

Es muss ferner berücksichtigt werden, dass im Rahmen der vorliegenden Untersuchung jene Tiere, die während der Versuche klinische Auffälligkeiten zeigten, zum nächstmöglichen Sektionstermin ausgewählt wurden, bzw. im Falle nicht therapierbarer Symptome vorzeitig euthanasiert wurden und die Tierausswahl dementsprechend nicht (im engeren Sinne) zufällig erfolgte (vgl. Tabelle 69 und Tabelle 70).

5.1.5 Blutuntersuchung

Im ersten Durchgang erfolgte eine Blutentnahme bei allen Ferkeln während der Narkose, im zweiten Durchgang wurden hingegen einige der Tiere im wachen Zustand beprobt und zu diesem Zweck mittels Oberkieferschlinge fixiert. Durch den damit einhergehenden Stress bei den nicht narkotisierten Tieren kann eine Beeinflussung der Messergebnisse im Serum nicht ausgeschlossen werden (DUBREUIL et al. 1993). Bei den narkotisierten Tieren wiederum könnte die Narkose einen Effekt auf die untersuchten Blutparameter gehabt haben; so ist für verschiedene Metaboliten und Hormone eine Beeinflussung durch die Narkose mit Azaperon und Ketamin beim Schwein nachgewiesen (DAŞ et al. 2016). Im Vergleich der drei Gruppen dürfte dies jedoch ohne Bedeutung sein, da stets die gleich Anzahl von Tieren aus jeder Gruppe narkotisiert bzw. nicht narkotisiert beprobt wurde. Um den möglichen Einfluss der Anästhesie dennoch gering zu halten, wurde die Blutprobenentnahme jeweils unmittelbar nach Erreichen einer ausreichenden Narkosetiefe durchgeführt. Insgesamt könnte dieses Vorgehen dennoch zur Variabilität der Messergebnisse beigetragen haben.

In der vorliegenden Untersuchung stand den Tieren das Futter – auch an den Sektionstagen – ad libitum zur Verfügung. Der zeitliche Abstand zwischen der letzten Futteraufnahme und der Blutprobenentnahme kann folglich zwischen einzelnen Tieren variiert haben. An Miniaturschweinen wurden weder die Ca- und P-Konzentrationen im Serum noch die Aktivität der alkalischen Phosphatase durch 24-stündiges Fasten signifikant beeinflusst (TANAKA et al. 2009), sodass der mögliche Einfluss des Fütterungsregimes auf die Ca- und P-Konzentrationen sowie die AP-Aktivität im Serum insgesamt eher gering ist.

5.1.6 Knochenuntersuchung

Ziel dieser Arbeit war es, unter standardisierten Bedingungen Parameter zu finden, die eine unterschiedliche P-Versorgung möglichst frühzeitig und sicher anzeigen und daher für die Diagnostik des P-Mangels bei wachsenden Schweinen besonders geeignet sind.

Bei den Ergebnissen sämtlicher Untersuchungen an Knochen ist zu berücksichtigen, dass es während beider Durchgänge bei den Tieren der drei Gruppen zu einer unterschiedlichen KM-Entwicklung kam und die Tiere folglich zum Zeitpunkt der Sektion eine unterschiedliche mittlere KM aufwiesen. Ein Einfluss der unterschiedlichen KM auf verschiedene Knochencharakteristika ist nicht von der Hand zu weisen. Die Parameter der chemischen Analyse korrelierten in der vorliegenden Untersuchung beispielsweise insbesondere bei Tieren aus Durchgang 2 teilweise eng mit der Körpermasse der Tiere (vgl. 5.4.3) und auch andere Autoren stellten teils enge Korrelationen zwischen der Körpermasse und den Knochenmaßen oder der Knochendichte von Schweinen fest (TYMCZYNA et al. 2012). Der Einfluss einer unterschiedlichen Körpermasse muss jedoch nicht nur beim Vergleich der drei Versuchsgruppen untereinander bedacht werden, sondern könnte auch beim Vergleich der Tiere dieser drei Gruppen mit den Tieren der Gruppe VB eine Rolle gespielt haben, da diese in beiden Durchgängen zum Zeitpunkt der Gruppenaufteilung (d-2) schwerer waren als die Tiere der Versuchsgruppen. Die Unterschiede in Bezug auf verschiedene Knochenparameter wären möglicherweise bei gleichen mittleren Körpermassen an d-2 weniger deutlich gewesen. Ein alternatives Versuchsdesign – eine Aufzucht/Mast der Tiere bis zum Erreichen einer vergleichbaren KM – hätte jedoch bei den Tieren der verschiedenen Gruppen zu einer unterschiedlichen Dauer der Versuche geführt und dadurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse erheblich eingeschränkt. Da erwartet wurde, dass der Einfluss der Fütterung auf die Knochenentwicklung und -mineralisation jenen einer unterschiedlichen KM übertrifft, erfolgten die Sektionen jeweils in allen Gruppen am selben Versuchstag.

Standardisierung der Probenentnahme

In der vorliegenden Arbeit wurden sämtliche Untersuchungen an den Gliedmaßenknochen der linken Körperseite durchgeführt. Aus Studien am Menschen ist aber bekannt, dass zwischen den beiden Körperhälften Unterschiede bezüglich der Mineralisation einzelner Knochen bestehen können (KANNUS et al. 1994). Von einem signifikanten Unterschied zwischen der linken und rechten Körperhälfte bezüglich der Knochenmineralisation bei Schweinen ist

jedoch nicht auszugehen (NIELSEN et al. 2007; RYAN et al. 2011a), so dass dieser Aspekt hier nicht weiter behandelt wird.

Aufgrund der dort ansetzenden Bänder und Sehnen ist die Präparation der epiphysären Anteile eines Knochens zeitaufwendiger und schwieriger durchzuführen als die der zugehörigen diaphysären Bereiche; auch dürfte der individuelle Einfluss des Probennehmers dabei größer sein. GÖTTING (2006) untersuchte die Diaphyse des Femurs sowie die proximale Epiphyse des Tibiotarsus von wachsenden Puten und verglich beide Knochenanteile hinsichtlich ihrer Eignung für die chemische Analyse. Sie stellte zwar an beiden Knochenanteilen in Bezug auf den Ra-Gehalt eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse fest, die Standardabweichung in diesem Parameter war jedoch an der proximalen Epiphyse des Tibiotarsus etwas größer. Dennoch bewertete die Autorin die Analyse der Femur-Diaphyse als weniger geeignet für diagnostische Zwecke, da in diesem Knochenanteil der wachstumsbedingte Anstieg des Ra-Gehalts nur bei sehr jungen Tieren (bis zur vierten LW) zu beobachten war, wohingegen dies an der Epiphyse des Tibiotarsus über einen längeren Zeitraum hinweg möglich war (etwa bis zur 19. LW). Nach CROMWELL et al. (1972) und MAXSON und MAHAN (1983) werden zudem Änderungen der Ca- bzw. P-Versorgung sensitiver in der Epiphyse eines Knochens angezeigt als in der Diaphyse desselben. Die Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip sowie die nachfolgende chemische Analyse erfolgten daher mit Ausnahme der Metakarpal- und -tarsalknochen nicht an den Knochen *in toto*, sondern nur an einer Epiphyse (vgl. Tabelle 12). Da eine standardisierte Probenentnahme eine Voraussetzung für die spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse darstellt, musste für jeden Knochentyp eine geeignete „Begrenzung“ festgelegt werden. Prinzipiell sind dabei mehrere Vorgehensweisen möglich. So können für die Untersuchungen feste prozentuale Anteile (in Bezug auf die Gesamtlänge des Knochens) genutzt werden, oder es kann eine Standardisierung anhand anatomischer Strukturen vorgenommen werden. Bei der Bestimmung der Knochenmaße zeigte sich, dass aufgrund der individuellen Knochenform die Ergebnisse beider Methoden nicht vollständig deckungsgleich waren. So beinhalteten beispielsweise die proximalen 25 % die Wachstumsfuge an einigen Knochen nur knapp, wohingegen am entsprechenden Knochen anderer Tiere ein größerer Abschnitt der Diaphyse in diesen Bereich inkludiert war. Da in dieser Arbeit Knochen von Tieren unterschiedlichen Alters untersucht wurden, ist es – abgesehen von den individuellen

Proportionen am Knochen – von Bedeutung, ob es während des Wachstums zu einer unterschiedlichen allometrischen Entwicklung verschiedener Knochen kommt. STERN et al. (2015) untersuchten dies an Mäusen und leiteten aus ihren Untersuchungen ab, dass einige Knochenpunkte in Relation zur Gesamtlänge des Knochens lagekonstant seien und die Längenentwicklung an langen Knochen daher einem isometrischen Wachstumsmuster folge. Dass dies für die *Foramina nutritia* verschiedener langer Knochen bei Schweinen nicht zutrifft, berichtete PAYTON (1934). Wie sich die relative Position weiterer Knochenpunkte während des Wachstums beim Schwein verhält, wurde in dieser Studie nicht erfasst. Insgesamt konnten hierzu in der gesichteten Literatur auch sonst keine Angaben gefunden werden.

Aufgrund der eigenen Beobachtungen (s. o.) und weil die Probenentnahme bei der Orientierung anhand anatomischer Strukturen auch an frakturierten Knochen vorgenommen werden konnte, wurden für die vorliegende Untersuchung anatomische „Begrenzungen“ zur Standardisierung der Probenentnahme gewählt. Unabhängig davon, wie die Standardisierung vorgenommen wird, erfolgt dies jedoch anhand äußerer Kriterien und der gewählte Knochenanteil entspricht nicht zwingend einer funktionellen Einheit. Es bleiben folglich auch unter standardisierten Bedingungen Ungenauigkeiten der Aliquotbildung am Knochen bestehen. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit darauf verzichtet, absolute Rängen für die Knochenanteile anzugeben. Diese Berechnungen wurden nur für die *in toto* untersuchten Metakarpal- und Metatarsalknochen vorgenommen.

Knochenmaße

Die Knochenmaße wurden in verschiedenen Studien teils zwischen unterschiedlichen Knochenpunkten bestimmt. So definierten GIESEMANN et al. (1998) in ihrer Studie die Länge des Femur als die Distanz zwischen der *Fossa intercondylaris* und der *Fossa trochanterica*, wohingegen RICHMOND und BERG (1972) den maximalen Abstand zwischen proximalem und distalem Knochenende bestimmten. Um den Einfluss der individuellen Knochenform auf die Ergebnisse der Längenbestimmung der Knochen zu minimieren, blieben einzelne Knochenpunkte wie das *Tuberculum majus* am Humerus oder der *Trochanter major* am Femur bei der Bestimmung der Knochenlänge in der vorliegenden Untersuchung unberücksichtigt; dafür wurde hier der maximale Abstand der Gelenkflächen

als Länge des Knochens definiert, unabhängig davon, ob eventuell andere Strukturen des betreffenden Knochens weiter nach proximal bzw. distal reichten.

Knochendichte

Zu möglichen Fehlerquellen bei der Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip zählen neben Abweichungen der Wassertemperatur vor allem am Probenmaterial anhaftende Luftbläschen, die bei Bestimmung des Tauchgewichts zu ungenauen Ergebnissen führen können. Das Archimedische Prinzip besagt, dass der hydrostatische Auftrieb, den ein Körper beim Eintauchen in ein flüssiges Medium erfährt, der Gewichtskraft des verdrängten Mediums entspricht. Voraussetzung zur Berechnung der Dichte des eingetauchten Körpers ist es daher, die Dichte des Mediums (destilliertes Wasser) zu kennen. Da diese wiederum von der Temperatur abhängig ist, erfolgte in dieser Untersuchung vor jedem Eintauchen die Messung der Wassertemperatur, sodass eine unterschiedliche Wassertemperatur die Ergebnisse der Untersuchung nicht beeinflusste. Aufgrund der unregelmäßigen Oberflächenstruktur des Probenmaterials war jedoch das Anhaften kleiner Luftbläschen nicht vollständig zu verhindern. Insgesamt dürfte dieser methodische Fehler bei der Dichtebestimmung an den Knochenteilstücken größer gewesen sein als bei der Dichtebestimmung an ganzen Knochen (MC und MT), da die spongiöse Knochenstruktur an der Sägefläche ein Haften von Luftbläschen begünstigte. Da es sich bei der Dichte um eine von Druck und Temperatur abhängige Stoffkonstante handelt, wurden die zur Lagerung tiefgefrorenen Knochen(-anteile) vor dieser Untersuchung aufgetaut und erst nach Erreichen der Raumtemperatur der Messung zugeführt. Dennoch können geringe Temperaturunterschiede nicht ausgeschlossen werden.

Eine weitere Ungenauigkeit dieser Messungen könnte durch die unterschiedliche Eintauchtiefe von Knochen unterschiedlicher Dichte und Größe verursacht worden sein. Bei Eintauchen eines größeren Knochens wurde eine entsprechende größere Menge Wasser verdrängt als beim Eintauchen kleinerer Knochen. In beiden Fällen entsprachen die Höhe der Wassersäule im Becherglas und damit die Eintauchtiefe des zur Fixierung der Probe verwendeten Drahtstücks nicht exakt den Bedingungen beim Austarieren der Waage. Aufgrund des insgesamt sehr geringen Volumens des Drahtes wurde dies jedoch vernachlässigt.

Chemische Zusammensetzung

Um den Einfluss der Dichtebestimmung auf die ermittelten TS-Gehalte zu quantifizieren, erfolgte an einer Anzahl von Knochen und –Anteilen ein erneutes Wiegen, unmittelbar nachdem das letzte Tauchgewicht bestimmt und der Knochen trockengetupft wurde. Die uS des Knochens bzw. des Anteils des Knochens, der zur Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip genutzt wurde, war im Mittel nach dem Eintauchen in das destillierte Wasser um 0,415 % höher als vor der Dichtebestimmung (n = 21). Insgesamt dürfte dieser Unterschied bei den Analysen an ganzen Knochen geringer gewesen sein als bei jenen an den einzelnen Epiphysen, da an deren Schnittfläche auf das nachträgliche Trockentupfen verzichtet wurde, um Fettverluste zu vermeiden.

In der vorliegenden Untersuchung erfolgte die TS-Bestimmung von Knochenmaterial mittels Gefriertrocknung. Um eventuell methodisch bedingte Abweichungen zu Ergebnissen anderer Untersuchungen, in denen die TS-Bestimmung durch Trocknung im Trockenschrank erfolgte, bewerten zu können und eine dahingehende Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurde der Femurknochen eines Endmastschweins (Schlachtmaterial) in sechs Teile zersägt (2x prox. Epiphyse; 2x Diaphyse; 2x dist. Epiphyse) und diese einzeln für die Gefriertrocknung eingewogen. Im Anschluss an die Gefriertrocknung wurde das Knochenmaterial ausgewogen und nachfolgend der TS-Bestimmung im Trockenschrank (103 °C) zugeführt. Zwischen den jeweiligen TS-Gehalten aus Gefrier- bzw. Wärmetrocknung wurden Unterschiede im Bereich von 0,69 - 1,74 % festgestellt. Die anschließende erneute Lagerung im Trockenschrank hatte einen fortschreitenden Massenverlust des Materials zur Folge, sodass mögliche Fettverluste durch Oxidation während der Lagerung im Trockenschrank nicht ausgeschlossen werden können. Da sich das Knochenmark zudem nach Hitzeeinwirkung makroskopisch verändert darstellte, schien eine TS-Bestimmung mittels Heißtrocknung nicht mit einer nachfolgenden Fettbestimmung vereinbar.

LAMOUREUX et al. (2011) untersuchten Knochenmarkproben verschiedener Gliedmaßenknochen von Pferden, Rindern und Hunden hinsichtlich des Einflusses unterschiedlicher Lagerungsbedingungen auf den analysierten Fettgehalt. Weder an den Knochen von Pferden noch an denen von Rindern wurde dabei ein signifikanter Effekt festgestellt und auch an den untersuchten Hundeknochen führte lediglich die Lagerung bei

Diskussion

Raumtemperatur zu einem signifikant geringeren Fettgehalt. Kühlung (4 °C) und Tiefgefrieren (-20 °C) blieben auch hier ohne Einfluss. Für die vorliegende Untersuchung, in der die Knochen unmittelbar nach Entnahme bis zur Analyse tiefgefroren waren, ist somit nicht von einer Beeinträchtigung der Ergebnisse der späteren Entfettung auszugehen. Aufgrund der Lagerung unter Luftabschluss kann zudem davon ausgegangen werden, dass auch der TS-Gehalt sich nicht oder nur minimal änderte. Die für die Präparation der einzelnen Knochen benötigte Zeit unterschied sich jedoch teilweise, wodurch möglicherweise aufgrund der Verdunstung eine Beeinflussung des TS-Gehalts stattgefunden haben könnte.

Die Restfettmengen konnten bei sehr kleinen Knochen aufgrund der geringen Probenmengen nicht bestimmt werden. Bei den betreffenden Proben konnte der Restfettgehalt dann nur kalkuliert werden. Da jedoch die Knochen der Tiere aus Gruppe V2 – verglichen mit denen der Kontrolltiere – tendenziell einen höheren Fettgehalt wie auch einen höheren Restfettgehalt (in der fast fettfreien TS) aufwiesen, erschien es dennoch sinnvoll – trotz kalkulatorischer Ungenauigkeiten bei den kleinen Knochen – eine Berechnung der Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg fettfreie TS vorzunehmen, um eine Verzerrung der Ergebnisse durch unterschiedlich hohe Fettgehalte in der fast fettfreien TS zumindest an den größeren Knochen(-anteilen) zu vermeiden.

Standen bei kleinen Knochen weniger als 3,6 g des gefriergetrockneten, vorentfetteten und gemahlten Materials für die chemische Analyse zur Verfügung, so wurde eine Veraschung des gesamten Probenmaterials bei 600 °C im Muffelofen vorgenommen und anschließend aus der gewonnenen Rohasche die Aschelösung zur Bestimmung der Ca- und P-Gehalte hergestellt (s. 3.7.4.5). War eine größere Menge an Knochenmaterial vorhanden, erfolgte die Herstellung der Aschelösung für die Mineralstoffanalyse immer mittels Mikrowellenveraschung. Durch die Verwendung des kompletten Materials bei geringen Probenmengen konnte das Risiko einer inhomogenen Entnahme bei sehr geringen Einwaagen eliminiert werden. Da durch die Behandlung mittels Hammermühle eine vollständig homogene Vermahlung des Knochenmaterials nicht immer gewährleistet werden konnte, wurde der Vorteil einer vollständigen Einwaage des gesamten Probenmaterials stärker gewichtet als der Nachteil der möglicherweise eingeschränkten Vergleichbarkeit aufgrund des methodischen Unterschieds.

Vor der Bestimmung der Ra-, Ca- und P-Gehalte wurde eine Vorentfettung des Knochenmaterials vorgenommen. Der P-Gehalt von Fettgewebe ist jedoch äußerst gering; so stellten FORSBERG et al. (2014) im Fettgewebe von Schweinen (Yorkshire) Gehalte zwischen 62,7 und 74,4 mg P/100 g TS fest. In Kenntnis dieser quantitativen Relationen erschienen die mit diesem Vorgang eventuell verbundenen P-Verluste als absolut vernachlässigbar.

5.2 Leistungsparameter

Sowohl im ersten als auch im zweiten Durchgang blieben die mittleren Körpermassezunahmen der Tiere aus den beiden Gruppen, die keine mineralische P-Ergänzung im Mischfutter erhielten, deutlich hinter jenen der Tiere aus der Kontrollgruppe zurück. Diese Beobachtung deckt sich mit Ergebnissen anderer Untersuchungen, in denen der Verzicht auf einen mineralischen Phosphor-Zusatz während der Aufzucht bzw. Mast ebenfalls zu reduzierten KMZ führte (HAN et al. 1998; MAVROMICHALIS et al. 1999; JENDZA et al. 2006) und zeigt, dass die Tiere dieser beiden Gruppen ihr Wachstumspotential unter diesen Bedingungen nicht voll ausschöpften.

Da letztlich jedoch nicht der Gesamt-P-Gehalt im MF, sondern die Menge des verdaulichen P die P-Versorgung bestimmt, vermuteten ALMEIDA und STEIN (2010), dass unabhängig davon, ob dem Mischfutter P_i zugesetzt wird, kein Einfluss der P-Versorgung auf die Mastleistung zu erwarten sei, wenn verschiedene MF die gleiche P-Verdaulichkeit (standardized total tract digestibility, STTD) aufweisen. In der vorliegenden Untersuchung war der Gesamt-P-Gehalt in den MF-Varianten V1 und V2 jeweils vergleichbar. Dass die Tiere der Gruppe V1 dennoch im Mittel eine tendenziell (7,7 bzw. 9,0 % zu Versuchsende in Durchgang 1 bzw. 2) höhere KM aufwiesen als die Tiere der Gruppe V2, ist mit der unterschiedlichen Phytaseaktivität in diesen beiden MF-Varianten zu erklären, da höhere Aktivitäten der Phytase im MF durch eine günstigere P-Verdaulichkeit bei knapper P-Versorgung zu höheren Körpermassezunahmen führen (VIGORS et al. 2014; TAYLOR et al. 2016; TORRALLARDONA u. ADER 2016).

Möglicherweise hätte durch einen Phytasezusatz in noch höherer Dosierung (> 500 FTU/kg) im MF-V1 die KMZ in dieser Gruppe weiter erhöht werden können. So berichten mehrere Autoren von positiven Effekten höherer Phytasedosierungen (> 500 FTU/kg) auf die Leistung

von Schweinen (KIES et al. 2006; VEUM et al. 2006; ZENG et al. 2014; MILLER et al. 2016). Mögliche Ursachen für diese Beobachtungen werden kontrovers diskutiert: So vermuteten KIES et al. (2006), dass entweder der durch höhere Phytasedosierungen gesteigerte Phytatabbau dazu führt, dass mehr Phytat in Lösung geht und – da nur dieses gelöste Phytat abgebaut werden könne – insgesamt mehr P freigesetzt würde oder dass durch die hohen Phytasedosierungen höhere Phytaseaktivitäten im Dünndarm erreicht würden, die ihrerseits wiederum eine vermehrten P-Freisetzung und -Resorption zur Folge hätten. Neben einer höheren Verdaulichkeit von Phosphor sowie weiteren Mineralstoffen (KIES et al. 2006) wurden teilweise darüber hinausgehende Effekte wie eine höhere Aminosäuren-Verdaulichkeit oder auch Änderungen im Energiestoffwechsel (Energieaufwand für Verdauungsprozesse, Einflüsse auf renale Exkretion, etc.) als Erklärung für höhere Leistungen durch Phytase-Zusatz zum MF vermutet (KIES et al. 2005; ZENG et al. 2014). Nicht alle Studien, in denen sehr hohe Phytasedosierungen geprüft wurden, bestätigten allerdings derartige positive Effekte auf die Leistung von Schweinen. So erreichten LAIRD et al. (2016) in einer Untersuchung an Absetzferkeln (etwa 17 kg KM zu Versuchsbeginn) bereits mit einer Phytasedosierung von 500 FTU/kg MF Körpermassenzunahmen vergleichbar mit denen der Kontrolltiere; eine höhere Phytasedosierung (2000 FTU/kg MF) hatte keinen darüber hinaus gehenden positiven Effekt auf die täglichen KMZ. Auch ADHIKARI et al. (2016) sahen ebenfalls an Absetzferkeln (19,8 kg KM zu Versuchsbeginn) keinen positiven Einfluss einer Phytasedosierung von über 500 FTU/kg MF auf die P-Verdaulichkeit. Da von einer nachteiligen oder gar toxischen Wirkung sehr hoher Phytasedosierungen (bis 40.000 FTU/kg im MF) indes nicht auszugehen ist (GUGGENBUHL et al. 2012), scheint dem Einsatz hoher Dosierungen zumindest aus Sicht der Tiergesundheit nichts entgegenzustehen.

Insgesamt sprechen die im Rahmen dieser Studie erhobenen deutlich unterschiedlichen KM-Entwicklungen der Tiere aus den drei Gruppen dafür, dass die Tiere beider Versuchsgruppen nicht ausreichend mit P versorgt waren, da zum Erreichen maximaler KMZ eine geringere P-Versorgung ausreichend ist als für eine maximale Knochenmineralisation (KOCH et al. 1984) und folglich die KMZ auch bei einer geringen P-Versorgung, die bereits zu einer Beeinträchtigung der Knochenmineralisation führt, weitgehend aufrechterhalten werden können (KETAREN et al. 1993). Die in der vorliegenden Arbeit festgestellten

Leistungsunterschiede ließen demnach erwarten, dass die Knochenentwicklung bzw. -mineralisation bei Tieren beider Versuchsgruppen noch stärker beeinträchtigt sein dürften.

Durchgang 1

Auffällig war im ersten Durchgang, dass der mittlere tägliche Futtermittelverbrauch sich zwar zwischen den drei Gruppen nicht statistisch signifikant unterschied, die Tiere aus Gruppe V1 jedoch mit 1350 g/Tier/Tag numerisch den höchsten Futtermittelverbrauch sowie den ungünstigsten Futteraufwand (2,34 kg MF/kg KM) aufwiesen. Ursächlich hierfür könnten höhere Futtermittelverluste in dieser Gruppe gewesen sein, aber auch eine kompensatorisch forcierte Futteraufnahme infolge einer knappen P-Versorgung wäre denkbar. Die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen zeigen jedoch, dass eine geringere P-Versorgung eher zu einer reduzierten Futteraufnahme von Absetzferkeln führt (KOCH et al. 1984; RADCLIFFE u. KORNEGAY 1998; TORRALLARDONA u. ADER 2016) oder dieser Parameter unbeeinflusst bleibt (VARLEY et al. 2010b; RYAN et al. 2011a; ALMEIDA et al. 2013; TAYLOR et al. 2016). Dementsprechend erscheint es wahrscheinlicher, dass die besonderen Fütterungsbedingungen methodisch den höheren Futtermittelverbrauch in der Versuchsgruppe 1 erklären.

Bereits eine Woche nach Versuchsbeginn begann die unterschiedliche KM-Entwicklung. Auch in anderen Untersuchungen resultierten aus einer unterschiedlichen P-Versorgung schon nach kurzer Zeit Unterschiede in der KM-Entwicklung von Absetzferkeln. So führte das Angebot eines MF mit 0,35 % P sowohl bei Zulage von Phytase als auch von anorganischem Phosphor in der Studie von RADCLIFFE und KORNEGAY (1998) bereits nach zwei Wochen zu signifikant höheren Körpermassezunahmen als beim Einsatz des gleichen MF ohne diese Zusätze. MILLER et al. (1964) stellten ebenfalls nach diesem Zeitraum erste signifikante Unterschiede in den Körpermassen fest. Dass die Regulationsmechanismen zur Aufrechterhaltung der P-Homöostase bereits innerhalb kürzester Zeit anlaufen, zeigt eine Studie von BIKKER et al. (2016): Sie beobachteten an Mastschweinen (90,5 kg KM zu Versuchsbeginn) innerhalb eines Zeitraums von acht Tagen nach Umstellung auf ein nahezu P-freies MF (0,38 g P/kg) einen Abfall der Phosphatkonzentration im Harn bis unter die Nachweisgrenze von 0,01 mmol/l.

Trotz der ausgeprägten KM-Unterschiede zwischen den Tieren der drei Gruppen waren im ersten Durchgang bei keinem der Tiere klinisch auffällige Symptome eines P-Mangels

feststellbar. Auch LÜDKE et al. (1988) beobachteten an Absetzferkeln Leistungseinbußen in Folge einer P-armen Fütterung, ohne dass klinische Auffälligkeiten erkennbar wurden.

Durchgang 2

Im zweiten Durchgang war der mittlere Futtermittelverbrauch der Tiere aus Versuchsgruppe 2 signifikant geringer als bei den Tieren der Kontrollgruppe. Von AUBEL et al. (1936) wurde beschrieben, dass es bei Schweinen in Verbindung mit einer P-armen Fütterung zu einem reduzierten Appetit kommen kann. Vor dem Hintergrund der deutlich differierenden mittleren Körpermassen in den drei Gruppen, muss darüber hinaus berücksichtigt werden, dass im Verlauf des Versuchs auch die höhere mittlere KM der Tiere aus der Kontrollgruppe zunehmend stärker zum höheren Futtermittelverbrauch in dieser Gruppe beigetragen haben dürfte, da aufgenommene/aufnehmbare Futtermenge u. a. auch von der KM der Tiere beeinflusst wird (QUINIOU et al. 2000; BRUININX et al. 2001).

In der Untersuchung von KOCH und MAHAN (1986) zur P-Versorgung von Mastschweinen blieb eine Variation der P-Gehalte im MF (0,09 bis 0,31 % P im MF) ohne Auswirkungen auf die täglichen KMZ der Tiere, was von den Autoren darauf zurückgeführt wurde, dass der P-Bedarf wachsender Schweine mit zunehmendem Alter geringer und das Wachstum daher durch eine geringe P-Versorgung weniger beeinträchtigt werde. Demnach spricht die unterschiedliche KM-Entwicklung zwischen den Gruppen in der vorliegenden Arbeit dafür, dass auch in der Versuchsgruppe 1 die P-Versorgung den Bedarf der Tiere nicht deckte. Nach den Angaben des NRC (1998) sollte ein Alleinfutter für wachsende Schweine mit einer Körpermasse von 20 - 50 kg mindestens 0,50 % Gesamt-P bzw. 0,23 % verfügbaren P enthalten. Der P-Gehalt im Mastfutter I für die Versuchsgruppen 1 und 2 betrug 3,08 g/kg und lag somit deutlich unterhalb dieser Bedarfsangaben. Legt man die von HARPER et al. (1997) an Mastschweinen ermittelte P-Äquivalenz für eine *Aspergillus niger*-Phytase (Natuphos® 600, BASF Corp.) zugrunde (vgl. Tabelle 1), so kann für das MF-V1 von zusätzlich 0,96 g P/kg durch den Phytase-Zusatz ausgegangen werden. Insgesamt wurde also auch mit dieser MF-Variante keine bedarfsdeckende P-Versorgung erreicht, was auch die im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant geringeren Körpermassenzunahmen widerspiegeln.

MCGLONE (2000) leitete aus den Ergebnissen seiner Untersuchungen ab, dass innerhalb der letzten 30 Tage der Endmast ein Verzicht auf jegliche Mineralstoff- und Vitamin-Supplementierung ohne Einbußen in der Leistung der Tiere oder eine Beeinträchtigung der

Tiergesundheit möglich sei. Dies erlaube zum einen eine Reduktion der Futterkosten und verringere zum anderen die ökologischen Auswirkungen hoher P-Einträge in Böden und Gewässer mit der Gülle. Der Autor ergänzte einschränkend, dass es durch eine derartige Fütterung über den geprüften Zeitraum hinaus zu negativen Effekten auf die Leistung und auch zu einer Beeinträchtigung der Tiergesundheit kommen könne. Die Leistungsdaten der Versuchsgruppe 1 aus der vorliegenden Untersuchung zeigten, dass ein Verzicht auf eine Supplementierung des MF mit anorganischem Phosphor über die gesamte Mastdauer trotz einer Phytaseaktivität von über 1000 FTU/kg im MF hinsichtlich der KMZ zu erheblichen Einbußen führen kann. Vor diesem Hintergrund erscheint es fraglich, ob die ökologischen und ökonomischen Vorteile, die sich aus dem Verzicht auf anorganischen Phosphor im MF während der kompletten Mastphase ergeben würden, den Nachteil der deutlich ungünstigeren Mastergebnisse und eines höheren Risikos für das Auftreten von Lahmheiten oder ähnlichem überwiegen. MCGLONE (2000) gab ferner zu bedenken, dass die geprüfte Fütterungsstrategie nur für die Schweinemast in Frage komme, jedoch nicht für die Aufzucht von Jungtieren geeignet sei, die später für die Zucht vorgesehen sind. Unter Berücksichtigung der klinischen Befunde (vgl. 4.2 und Tabelle 70) und auch in Anbetracht der Ergebnisse der Blut- und Knochenuntersuchungen (vgl. 4.4 und 4.5) aus der vorliegenden Arbeit ist davon auszugehen, dass ein MF-Konzept ohne anorganischen Phosphor über einen längeren Zeitraum mit Risiken für die Skelettgeseundheit verbunden ist, deren Ausmaß auch für die Schweinemast Bedeutung haben könnte.

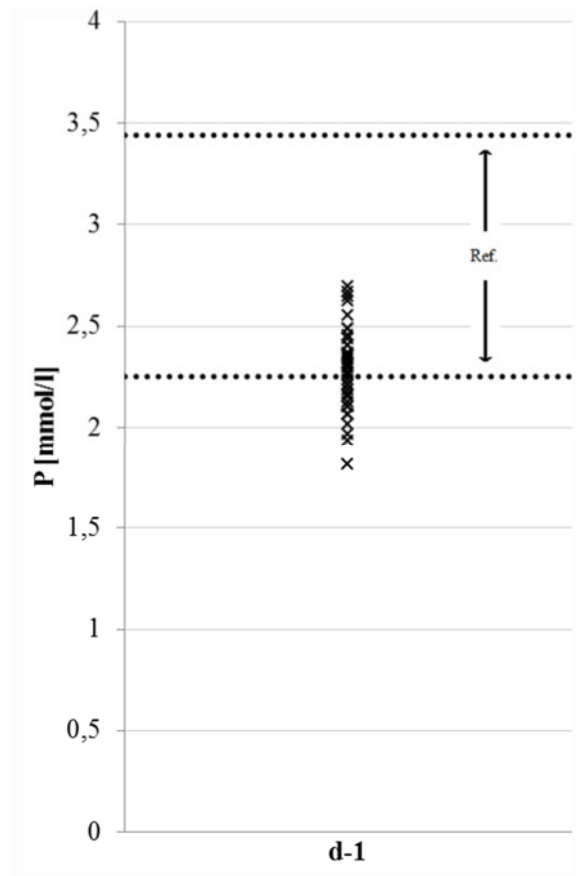
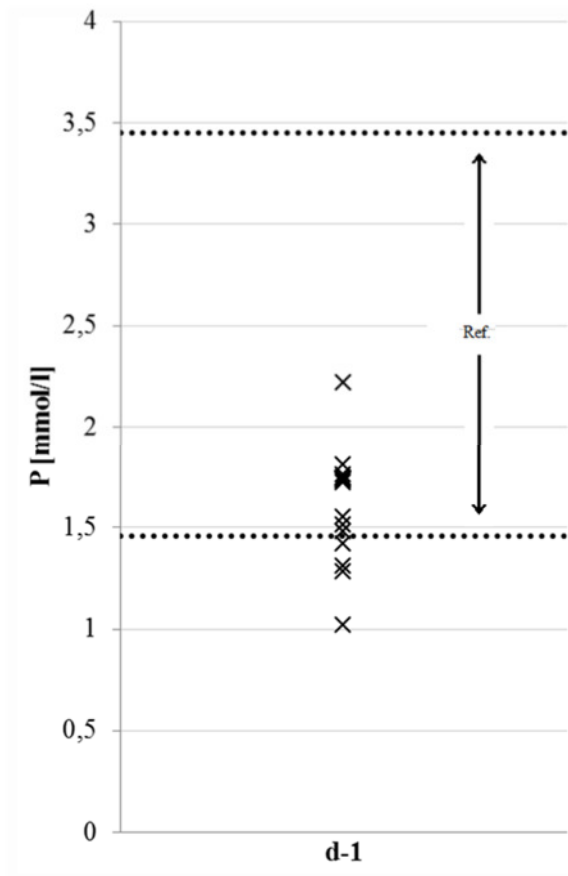
5.3 Ca und P sowie die Aktivität der AP im Blut

Vor dem Hintergrund der teilweise stark variierenden Referenzwerte aus der Literatur (vgl. Tabelle 2) stellt die Bewertung der Ca- und P-Konzentrationen sowie der Aktivität der alkalischen Phosphatase im Serum mitunter eine Herausforderung dar. Werden beispielsweise die von FRIENDSHIP et al. (1984) herausgegebenen Referenzwerte für die P-Konzentration im Serum von Absetzferkeln bzw. „feeder pigs“ zugrunde gelegt, so wiesen bereits vor Versuchsbeginn 25 (DG 1) bzw. 42,5 % (DG 2) der Tiere eine Hypophosphatämie auf (vgl. Abbildung 7 und 8), obwohl alle Tiere bis zu diesem Zeitpunkt ein konventionelles Ferkelaufzuchtfutter erhielten, dessen Ca- und P-Gehalte mit 7,82 bzw. 5,65 g/kg uS (vgl. Tabelle 15, Phytase-Zusatz laut Deklaration: 1500 FTU/kg) unter Berücksichtigung der

Diskussion

analytischen Spielräume absolut den Bedarfsangaben des NRC (1998) entsprachen. Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die P-Konzentrationen im Serum aller Tiere in den Durchgängen 1 und 2 sowie die jeweiligen Referenzintervalle nach FRIENDSHIP et al. (1984). Die Bewertung der Ca-Konzentrationen anhand der entsprechenden Referenzwerte hätte bei 43,8 (DG 1) bzw. 32,5 % (DG 2) der Tiere vor Versuchsbeginn trotz einer dem Bedarf (NRC 1998) entsprechenden Versorgung zur Diagnose einer Hyperkalzämie geführt. Demgegenüber wies keines der Tiere aus den beiden Durchgängen zu Versuchsbeginn von den Referenzbereichen/-werten nach FRIENDSHIP et al. (1984) abweichende AP-Aktivitäten im Serum auf. Allerdings wäre auch im Verlauf der beiden Durchgänge nur ein Tier aus Durchgang 1 (OM 10) mit einer AP-Aktivität im Serum oberhalb des Referenzbereichs aufgefallen, obwohl die Tiere der Versuchsgruppen im Vergleich zu den Tieren aus der Kontrollgruppe teils signifikant höhere Aktivitäten dieses Enzyms im Serum aufwiesen. Eine Beurteilung nach den Referenzwerten anderer Autoren (vgl. Tabelle 2) hätte teilweise ebenfalls bereits vor Versuchsbeginn eine erhebliche Anzahl an abweichenden Befunden hinsichtlich der Ca- und P-Konzentration im Serum im Sinne einer Hyperkalzämie bzw. Hypophosphatämie zur Folge gehabt.

Diskussion



Diskussion

In beiden Durchgängen führte die unterschiedliche P-Versorgung zu deutlich geringeren P-Konzentrationen im Serum der Tiere aus den beiden Versuchsgruppen. Dies zeigt, wie auch die Ergebnisse anderer Studien (HAGEMOSER et al. 2000; RUAN et al. 2007; DREWS et al. 2016), dass – sofern die sonstigen Bedingungen (Alter/Genetik der Tiere, Haltung usw.) vergleichbar sind – die P-Konzentration im Serum sehr wohl eine unterschiedliche P-Versorgung widerspiegelt und Aussagen zur Versorgung der Tiere – zumindest in gewissem Umfang – erlaubt. In der tierärztlichen Praxis dürfte sich jedoch oftmals die Problematik ergeben, dass geeignete und sicher bedarfsgerecht mit P versorgte Vergleichstiere nicht zur Verfügung stehen und daher eine Bewertung von Laborergebnissen nur anhand von Literaturwerten vorgenommen werden kann. Dieses Vorgehen kann allerdings – wie oben gezeigt – die Interpretation der Befunde erschweren bzw. zu vollkommen falschen Aussagen führen.

Eine geringere P-Versorgung hatte in beiden Durchgängen nicht nur eine Reduktion der P-Konzentrationen im Serum zur Folge, sondern ging zudem mit höheren Ca-Konzentrationen im Serum einher (vgl. Tabelle 27 und Tabelle 28). Diese Beobachtung wurde von verschiedenen anderen Autoren ebenfalls gemacht (NIMMO et al. 1980b; KORNEGAY u. THOMAS 1981; MAXSON u. MAHAN 1983; EECKHOUT et al. 1995; QIAN et al. 1996; OSTER et al. 2016). Insgesamt waren beide Effekte an den jüngeren Tieren deutlicher zu erkennen als an den älteren, was darauf hindeutet, dass der P-Mangel mit zunehmendem Alter der Tiere weniger ausgeprägt war. Dies könnte zum einen darauf zurückzuführen sein, dass jüngere Tiere einen relativ höheren P-Bedarf haben als ältere Tiere (HASTAD et al. 2004); zum anderen dürften mit länger anhaltender P-Mangelversorgung verschiedene Regulationsmechanismen darauf zielen, wieder physiologische Serumkonzentrationen zu erreichen. ENGSTROM et al. (1985) berichteten von einer etwa achtfach höheren Aktivität der renalen 1α -Hydroxylase im Plasma von Absetzferkeln (zu Versuchsbeginn etwa vier Wochen alt) nach knapp sieben-wöchiger P-armer Fütterung (0,085 % P im MF) gegenüber den Werten der Kontrolltiere (0,6 % P im MF). Parallel dazu war auch die $1,25\text{-OH}_2\text{-D}_3$ -Konzentration im Serum etwa 1,5 - 2-fach höher. In Verbindung mit einer Reduktion der PTH-Konzentration zeigt sich darin nach Meinung von OSTER et al. (2016) der Versuch des Organismus, durch eine forcierte enterale P-Absorption und zugleich minimierte renale P-Exkretion die P-Homöostase wiederherzustellen. Infolge einer geringen

P-Versorgung stellten CUISINIER-GLEIZES et al. (1976) sowohl an parathyreoidektomierten Ratten als auch an scheinoperierten Kontrolltieren fest, dass parallel zur Hypophosphatämie eine Hyperkalzämie induziert wird. Die Autoren schlossen daraus, dass es sich dabei um eine PTH-unabhängige Reaktion handeln müsse. Neben einer durch $1,25\text{-OH}_2\text{-D}_3$ vermittelten höheren Ca-Absorption vermuteten RADER et al. (1979), dass auch eine reduzierte Ca-Einlagerung in die Knochen eine mögliche Erklärung für die höheren Ca-Konzentrationen im Blut sein könne.

Im Gegensatz zu EECKHOUT et al. (1995), die an unterschiedlich mit P versorgten Mastschweinen (etwa 37 kg KM zu Versuchsbeginn) weder nach fünf noch nach elf Wochen signifikante Unterschiede bezüglich der Aktivität der AP im Serum feststellen konnten und diesen Parameter daher als wenig geeignet beurteilten, die P-Versorgung zu bewerten, traten in der vorliegenden Untersuchung in beiden Durchgängen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen auf. Nur zum Zeitpunkt der letzten Sektion im zweiten Durchgang waren die Unterschiede nicht signifikant, was dafür spricht, dass dieser Parameter bei älteren Tieren weniger sensitiv auf eine knappe P-Versorgung reagiert oder der P-Mangel – relativ gesehen – mit zunehmendem Alter weniger gravierend war. Aufgrund der geringen Unterschiede, die sie in diesem Parameter bei einer unterschiedlichen P-Versorgung von Endmastschweinen feststellten und der Beeinflussbarkeit der AP-Aktivität durch das Ca:P-Verhältnis im MF, kamen KOCH und MAHAN (1986) zu dem Schluss, dass die Messung der Aktivität der AP im Serum keinen großen Nutzen zur Bewertung der P-Versorgung von Schweinen dieser Altersgruppe habe. In ihren vorherigen Untersuchungen an jüngeren Schweinen (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985) hatte die P-Versorgung hingegen einen sehr viel stärkeren Einfluss auf die AP-Aktivität im Blut, weshalb die Autoren davon ausgingen, dass dieser Parameter bei jüngeren Tieren aufgrund des stärkeren Skelettwachstums und der höheren Osteoblastenaktivität für diesen Zweck besser geeignet sei. Nach BOYD et al. (1983) korreliert die Aktivität der AP je nach Zeitpunkt der Probennahme unterschiedlich eng mit der P-Versorgung über das Mischfutter. Es wäre daher auch denkbar, dass neben dem Tieralter auch die Dauer des Versuchs eine Rolle gespielt hat, da die zum Versuchsende beprobten Tiere der unterschiedlichen P-Versorgung länger ausgesetzt waren als jene, die zu früheren Terminen untersucht wurden.

5.4 Parameter der Knochenentwicklung und -mineralisation

Nachfolgend wird näher auf die verschiedenen Knochencharakteristika und ihre Eignung zur Bewertung der P-Versorgung von Schweinen mit unterschiedlichem Alter eingegangen.

In der gesichteten Literatur konnten keine Referenzwerte für physiologische Ra-Gehalte in bestimmten Knochen gefunden werden. Aus diesem Grund und weil die Knochenzusammensetzung von zahlreichen Parametern – insbesondere dem Alter des Tieres – beeinflusst wird (vgl. 2.3.2.3), gilt das für die Beurteilung der Ca- und P-Konzentrationen im Serum Beschriebene im Prinzip auch für die Diagnostik des P-Mangels anhand von Parametern der Knochenentwicklung und –mineralisation (vgl. 5.3). Auch hier resultiert aus der oftmals mangelnden Verfügbarkeit von geeigneten Vergleichswerten eine erhebliche Schwierigkeit bei der Interpretation von Laborbefunden (KAMPHUES 2012).

Insgesamt muss bei den Ergebnissen der Dichtebestimmung und denen der chemischen Analyse berücksichtigt werden, dass in der vorliegenden Untersuchung nicht differenziert werden kann, ob die festgestellten Unterschiede bezüglich der Sensitivität/Reaktivität verschiedener Knochen(-anteile) auf eine prioritäre Versorgung bestimmter Knochen hinweist oder ob die Unterschiede allein auf der schnelleren Ansprechbarkeit der Epiphyse gegenüber der Diaphyse infolge einer Änderung der Mineralstoff-Versorgung beruhen.

5.4.1 Knochenmaße

Die Knochenlänge wurde während der Ferkelaufzucht nur an der Tibia signifikant durch die unterschiedliche P-Versorgung beeinflusst; auch im zweiten Durchgang traten hinsichtlich der Knochenlänge nur an d82 signifikante Unterschiede an Femur und MT III auf und zwar im Sinne einer Reduktion um etwa 7 % (V2) und 7 bis 9 % (V2 bzw. V1) auf. Demgegenüber hatte die unterschiedliche P-Versorgung in beiden Durchgängen an allen Knochen sowie zu jedem Zeitpunkt signifikante Effekte hinsichtlich des Diaphysen-Umfangs und/oder der Kompakta-Dicke zur Folge. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Längenwachstum gegenüber der Entwicklung der Kompakta-Dicke und des Diaphysen-Durchmessers für die Knochenentwicklung von prioritärer Bedeutung ist (MAXSON u. MAHAN 1983).

Dass in verschiedenen Studien eine unterschiedliche Mineralstoff-Versorgung keine signifikanten Effekte auf die geprüften Knochenmaße hatte, obwohl andere

Knocheneigenschaften signifikant durch das Versorgungsniveau beeinflusst wurden (CROMWELL et al. 1972; FORSYTH et al. 1972; VEUM et al. 2002), zeigt, dass bestimmte Knochenmaße gegenüber anderen Parametern weniger sensitiv auf eine Variation der Ca- und/oder P-Versorgung reagieren. Treten jedoch – wie in der vorliegenden Arbeit – Veränderungen auf, so sollte dies aufgrund der engen Korrelation zwischen den geometrischen Knocheneigenschaften und der Knochenfestigkeit (AUGAT et al. 1996; JIANG et al. 2008; SKIBA et al. 2017) besondere Beachtung bei der Bewertung der Mineralstoff-Versorgung finden. Die Ergebnisse aus beiden Durchgängen lassen insgesamt erwarten, dass die Tiere, die ein MF ohne anorganischen Phosphor erhielten (V1 und V2), ein höheres Frakturrisiko hatten als die Tiere der Kontrollgruppe. Dafür spricht auch, dass an einem Tier der Versuchsgruppe 2 (OM 722) an d46 nach einem Trauma eine beidseitige Femurfraktur festgestellt wurde.

Durchgang 1

Im ersten Durchgang traten signifikante Unterschiede hinsichtlich der Knochenlänge nur an der Tibia auf, d. h. nach knapp fünfwöchigem P-Mangel waren die Längen um etwa 5 (V1) bzw. 6 % (V2) geringer. Möglicherweise können die unterschiedlichen Wachstumsraten verschiedener Knochen bei jungen Schweinen eine Erklärung für diese Beobachtung liefern, da eine reduzierte Wachstumsrate an einem schnell wachsenden Knochen in kürzerer Zeit zu deutlich erkennbaren Längenunterschieden führen würde. BREUR et al. (1991) stellten an jungen Schweinen insgesamt höhere Wachstumsraten an den Epiphysenfugen der Tibia als an denen des Radius fest. Diese Tiere waren allerdings mit einem Alter von drei bzw. vier Wochen mehrere Wochen jünger als die Ferkel in der vorliegenden Arbeit (etwa sieben Wochen alt zu Versuchsbeginn). Doch auch an etwa gleich alten Tieren an den Knochen der Hintergliedmaße wurden höhere Wachstumskoeffizienten beobachtet als an den entsprechenden Knochen der Vordergliedmaße (LIU et al. 1999). In der vorliegenden Arbeit zeigten sich allerdings im Vergleich der Knochenlängen der Tiere aus den drei Gruppen K, V1 und V2 mit denen der vier zu Versuchsbeginn untersuchten Tiere die deutlichsten prozentualen Unterschiede am Radius (29,2 - 34,2 %). An der Tibia waren diese prozentualen Unterschiede mit 22,6 - 30,9 % etwas geringer.

Besondere Erwähnung verdient die Reaktion der Kompakta-Dicke. Im Vergleich der drei Gruppen K, V1 und V2 ergaben sich die massivsten Effekte am Humerus in latero-lateraler

Richtung (-43 %), wenn weder anorganischer Phosphor noch Phytase über das MF ergänzt wurden. Hier traten jedoch nicht nur zwischen den drei Gruppen an mehreren Knochen signifikante Unterschiede auf (vgl. Tabelle 29 und Tabelle 30), sondern auch im Vergleich zu den „Ausgangswerten“ (Gruppe VB) wiesen die Tiere beider Versuchsgruppen an Radius, Femur und Tibia um bis zu 33,9 % (Femur, V2) geringere mittlere Kompakta-Dicke auf. Darüber hinaus war auch die mittlere Kompakta-Dicke des MT III der Tiere aus Gruppe V2 um 13,7 % geringer als die der knapp fünf Wochen jüngeren Tiere aus Gruppe VB. Dies spricht dafür, dass bei den Tieren, die keinen anorganischen Phosphor über das MF erhielten, nicht nur die Knochenneubildung beeinträchtigt war, sondern darüber hinaus eine Mobilisation von bereits vorhandenem Knochengewebe stattfand. Demgegenüber wiesen die Tiere bei bedarfsdeckender P-Versorgung zum Ende der Ferkelaufzucht nahezu an allen Knochen eine dickere Kompakta auf als die vier jüngeren Tiere zu Versuchsbeginn (Ausnahme: -2,26 % am Femur). Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass es sich bei den Knochenmaßen in dieser Untersuchung um *post mortem* erhobene Parameter handelt und keine Wiederholungsmessungen an ein und demselben Tier durchgeführt wurden. Zudem wiesen die Tiere aus Gruppe VB an d-2 eine signifikant höhere mittlere Körpermasse auf als jene der drei Gruppen K, V1 und V2 zu diesem Zeitpunkt. Da es sich bei den Tieren der Gruppe VB um Wurfgeschwister der Tiere aus diesen Gruppen handelte, erscheint ein Vergleich dennoch vertretbar. Die Unterschiede bezüglich der Knochenmaße wären jedoch möglicherweise etwas geringer ausgefallen, wenn zwischen den Tieren der Gruppe VB und jenen der drei Versuchsgruppen an d-2 keine Unterschiede hinsichtlich der Körpermassen bestanden hätten.

Die im ersten Durchgang genutzten Absetzferkel waren zu Versuchsbeginn 48 bzw. 50 Tage alt (mittlere KM: 14,2 kg). Im Gegensatz zu VEUM et al. (2002), die an Tieren mit ähnlichen Körpermassen ($13,5 \pm 0,1$ kg zu Versuchsbeginn) nach einer 35-tägigen unterschiedlichen P-Versorgung (zwischen 0,32 und 0,57 % P im MF) weder am Radius noch am MC III hinsichtlich der Längen und der minimalen bzw. maximalen Diaphysen-Durchmesser signifikante Unterschiede feststellten, traten in der vorliegenden Untersuchung an beiden Knochen signifikante Unterschiede hinsichtlich der genannten Knochenmaße auf. So wiesen die Tiere der Versuchsgruppe 2 in der vorliegenden Untersuchung u. a. am Radius signifikant geringere mittlere Außendurchmesser in latero-lateraler Richtung auf als die Tiere der

Kontrollgruppe ($15,5 \pm 0,486$ vs. $16,9 \pm 0,538$ mm). Zudem unterschied sich der mittlere Umfang der Radius-Diaphyse zwischen allen drei Gruppen signifikant. Dieser Parameter wurde allerdings in der Untersuchung von VEUM et al. (2002) gar nicht erfasst. Verglichen mit den von VEUM et al. (2002) ermittelten Werten waren sowohl der Radius als auch der dritte Metakarpalknochen der Tiere der vorliegenden Untersuchung etwas länger. Dies könnte zum einen darauf zurückzuführen sein, dass die Tiere der vorliegenden Studie aufgrund der etwas höheren mittleren Körpermasse tatsächlich im Mittel längere Knochen aufwiesen, zum anderen könnten auch methodische Unterschiede eine Rolle spielen, da VEUM et al. (2002) nicht beschrieben, zwischen welchen Knochenpunkten die Knochenlänge bestimmt wurde. Darüber hinaus könnten beispielsweise durch eine unterschiedliche Knochenform auch genetische Einflüsse hier eine Rolle spielen.

Nach LIU et al. (1999), die das postnatale Knochenwachstum an Ferkeln bis zum 84. LT untersuchten, treten in diesem Altersabschnitt deutlichere Zunahmen der Diaphysen-Durchmesser im Vergleich zu dem Längenwachstum der entsprechenden Knochen auf. Sie vermuteten, dass dies einen *post natum* einsetzenden Adaptationsprozess an die zunehmende Körpermasse sowie die mit laufenden/rennenden Bewegungsabläufen einhergehende mechanische Belastung der Knochen widerspiegeln. Demnach könnten auch unterschiedliche Wachstumskoeffizienten der Längen- bzw. der Diaphysen-Durchmesser-Entwicklung eine Erklärung dafür sein, dass in der vorliegenden Arbeit das Längenwachstum insgesamt weniger stark durch die unterschiedliche P-Versorgung beeinflusst wurde als die Entwicklung von Umfang und Kompakta-Dicke. Auch RICHMOND und BERG (1972) stellten an Schweinen mit Körpermassen zwischen 23 und 68 kg deutlichere Zunahmen in Bezug auf den Diaphysen-Umfang von verschiedenen Knochen als hinsichtlich deren Länge fest.

Durchgang 2

Im Vergleich zu den Knochenmaßen der Tiere aus Gruppe VB fiel besonders auf, dass jene Tiere, die weder anorganischen Phosphor noch einen Phytase-Zusatz über das MF erhielten (V2), bis zum d47, d. h. bei einem Altersunterschied von fast sieben Wochen, teilweise eine geringere mittlere Kompakta-Dicke aufwiesen (Femur, Tibia). Auch hier ist davon auszugehen, dass es – wie schon im ersten Durchgang – während des Versuchs zu einer Mobilisation von Knochensubstanz infolge der ungenügenden P-Versorgung kam. Dies gilt in der frühen Mastphase (bis d26) sogar für die Tiere der Versuchsgruppe 1, obwohl

Phytaseaktivitäten von > 1000 FTU/kg im MF vorhanden waren. Dies spricht insgesamt für eine massive Beeinträchtigung der Knochenentwicklung bei den Tieren beider Versuchsgruppen.

Abweichend von den Ergebnissen der Untersuchungen in der Ferkelaufzucht (DG 1) wurde das Längenwachstum der Tibia bei den Mastschweinen im zweiten Durchgang (etwa 30 bis 95 kg KM) nicht signifikant durch die P-Versorgung beeinflusst. Signifikante Unterschiede hinsichtlich der Knochenlänge traten bei den älteren Tieren erst in der Endmast an d82 auf, wohingegen dies bei den jüngeren Tieren im ersten Durchgang schon nach 34-tägiger Versuchsdauer der Fall war, d. h. es bedurfte bei den älteren Tieren einer längeren Zeit bis Veränderungen feststellbar waren. Wie schon zuvor im Zusammenhang mit den Blutergebnissen diskutiert, könnte dies darauf hindeuten, dass der P-Mangel bei den älteren Tieren weniger stark ausgeprägt war.

Verglichen mit den Werten von SKIBA et al. (2017) für 114-Tage alte Schweine (ca. 68 kg KM) wiesen die zwölf an d47 untersuchten Tiere der vorliegenden Untersuchung (zwischen 116 und 124 Tage alt; mittlere KM an d46: 67,8 kg) etwas längere Femura mit einer deutlich dickeren Kompakta auf. Auch methodische Unterschiede könnten eine Erklärung für diese Beobachtung liefern, da SKIBA et al. (2017) die Kompakta-Dicke zwar ebenfalls aus der Differenz der Außen- und Innendurchmesser berechneten, die genaue Richtung, in der diese Durchmesser ermittelt wurden, jedoch der Versuchsbeschreibung nicht zu entnehmen ist. Interessant ist, dass diese Autoren bei Schweinen, die nur einen Phytase- jedoch keinen mineralischen P-Zusatz im MF (Gruppe LP) erhielten, eine stärker ausgebildete Kompakta am Femur feststellten als bei den Vergleichstieren, denen ein MF angeboten wurden, das zwar anorganischen Phosphor in Form von Monocalciumphosphat jedoch keinen Phytase-Zusatz enthielt (Gruppe SP). SKIBA et al. (2017) führten dies darauf zurück, dass trotz einer höheren Gesamt-P-Aufnahme der Tiere aus Gruppe SP (12,1 vs. 9,81 g/Tier/Tag), die Tiere der Gruppe LP aufgrund der höheren P-Verdaulichkeit dieses MF im Mittel eine größere Menge verdaulichen P aufnahmen (6,48 vs. 5,51 g/Tier/Tag). In der vorliegenden Arbeit hingegen war die Kompakta des Femurs bei jenen Tieren, die keinen P_i -Zusatz im MF erhielten, dünner als bei den Kontrolltieren (V1: -17 bzw. -36 %; V2: -46 bzw. -48 %; jeweils cranio-caudal bzw. latero-lateral an d47). Anders als bei der MF-Variante K der vorliegenden Arbeit, wurde dem MF der Gruppe SP in der Studie von SKIBA et al. (2017) keine Phytase zugesetzt.

5.4.2 Knochendichten und -massen

In der vorliegenden Studie traten hinsichtlich der Massen der jeweiligen Knochen im Vergleich zu anderen Knochencharakteristika seltener signifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen auf. So blieben die Massen von Radius/Ulna ebenso wie diejenigen von Tibia/Fibula der Ferkel (Durchgang 1) von der P-Versorgung über das Mischfutter unbeeinflusst. Im zweiten Durchgang waren dann aber von d47 an signifikante Unterschiede hinsichtlich dieses Parameters festzustellen. Diese Beobachtung entspricht im Wesentlichen den Ergebnissen anderer Untersuchungen.

So wiesen KETAREN et al. (1993) zwar einen linearen Zusammenhang zwischen der aP-Versorgung (1 - 4 g aP/kg im MF) und der Masse verschiedener Knochen von Schweinen zwischen 20 und 50 kg KM nach; die Variation dieses Parameters war allerdings nur zu einem relativ geringen Prozentsatz (8 - 21 %) durch diese Beziehung zu erklären. In einem zweiten Versuchsteil, in dem die Auswirkungen einer unterschiedlichen aP-Versorgung über einen längeren Mastabschnitt geprüft wurden (etwa 20 - 90 kg KM), stieg die Knochenmasse des Femurs von einphasig gefütterten Mastschweinen kurvenförmig an, die Massen von Radius/Ulna und MT IV blieben hingegen von der aP-Versorgung unbeeinflusst. Insgesamt hatte das unterschiedliche Versorgungsniveau in dieser Studie nur einen geringen Effekt auf die Knochenmasse, wenngleich sich die Zusammensetzung der entsprechenden Knochen (u. a. TS- und Ra-Gehalt) zum Teil erheblich änderte. Auch COLUMBUS et al. (2010) stellten an Absetzferkeln (ca. 5,8 bis 22,7 kg KM) keinen Effekt einer unterschiedlichen P-Versorgung (dreiphasig: 0,65 - 0,70; 0,60 - 0,66 bzw. 0,54 - 0,64 % P im MF) auf die Masse des dritten und vierten Metakarpalknochens fest, wohingegen die P-Menge in diesen Knochen signifikant anstieg, wenn die P-Versorgung günstiger wurde. Vergleichbare Beobachtungen anderer Autoren (POINTILLART et al. 1995; POINTILLART et al. 2000; ZENG et al. 2014) bestätigen alles in allem, dass die Knochenmasse im Vergleich zu anderen Parametern wie beispielsweise der Ra-Menge im Knochen oder der Knochenbruchfestigkeit weniger sensitiv auf eine Variation der P-Versorgung reagiert.

Interessanterweise traten signifikante Gruppen-Unterschiede in der vorliegenden Arbeit nicht immer parallel in den Parametern Knochenlänge und -masse auf; so spiegelte sich beispielsweise die reduzierte Femur-Masse der Tiere aus Gruppe V2 im zweiten Durchgang an d47 nicht in der mittleren Gesamtlänge dieses Knochens wider. Die Dichte

Diskussion

(Archimedisches Prinzip) der distalen Femur-Epiphyse war jedoch bei den Tieren beider Versuchsgruppen zu diesem Zeitpunkt geringer als in dem entsprechenden Knochenabschnitt der Kontrolltiere. Vermutlich beruhte also die reduzierte Knochenmasse auf einer geringeren Dichte. Die Knochendichte wurde allerdings im Gegensatz zur Knochenmasse an den langen Röhrenknochen nur an einer Epiphyse bestimmt, so dass die Ergebnisse nicht uneingeschränkt auf den Knochen *in toto* übertragbar sind.

Für die Knochen der Ferkel im ersten Durchgang (LT 82 - 84) bestand keine signifikante Korrelation zwischen der Knochendichte nach dem Archimedisches Prinzip und der mittels qCT bestimmten prox. GesD der Tibia (Korrelationskoeffizient nach Pearson: 0,41641; p-Wert: 0,1781), wohingegen diese beiden Größen bei den älteren Tieren im zweiten Durchgang signifikant korrelierten (vgl. Abbildung 9). Denkbar wäre, dass das unterschiedliche Vorgehen bezüglich der Standardisierung der untersuchten Knochenanteile (prozentual vs. anatomische „Begrenzung“) mit zunehmendem Alter der Tiere weniger bedeutsam war und daher die Ergebnisse beider Methoden nur für die älteren Tiere einen engen Zusammenhang ergaben.

Diskussion

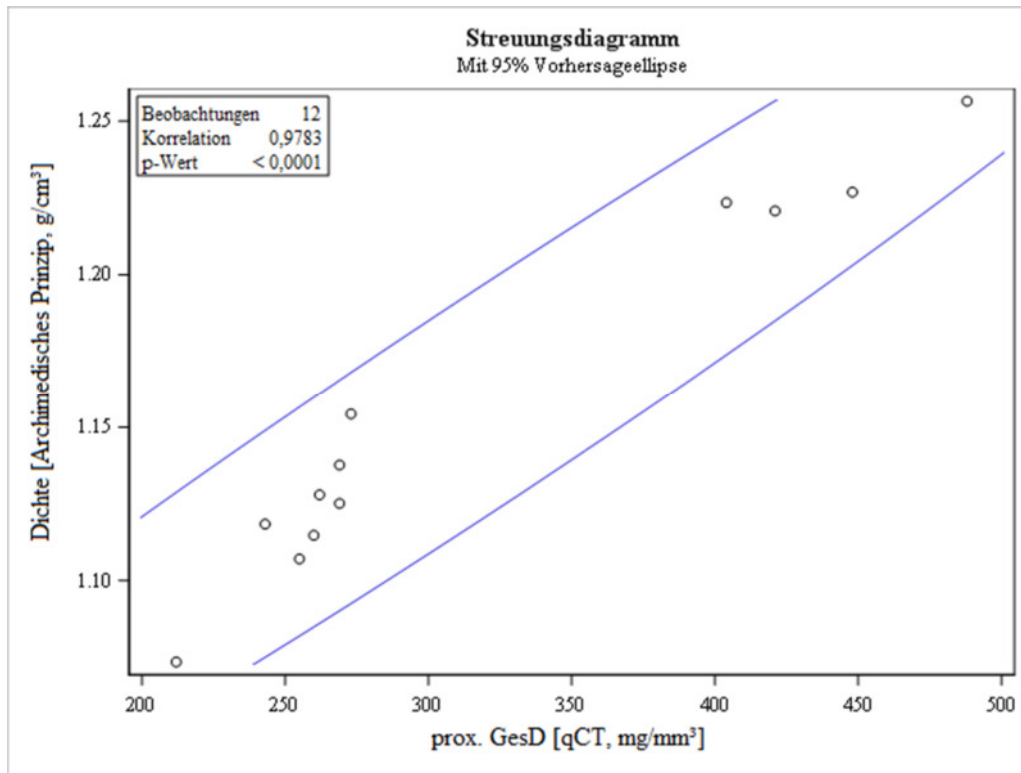


Abbildung 9: Streudiagramm zur Korrelation nach Pearson zwischen der mittels qCT bestimmten prox. GesD [mg/mm^3] und der nach dem Archimedisches Prinzip ermittelten Knochendichte [g/cm^3] der proximalen Tibia-Epiphyse im Durchgang 2 ($n = 12$)

SCHNEIDER et al. (2004) berichteten von einer engen Korrelation der mittels dieser beiden Verfahren bestimmten Knochendichten. So stellten diese Autoren an den Femora von juvenilen und adulten Hunden Korrelationskoeffizienten (nach Pearson) von 0,758 ($p = 0,01$) bzw. 0,953 ($p < 0,001$) fest. Diese Angaben beziehen sich allerdings im Gegensatz zu denen der vorliegenden Untersuchung auf Messungen an diaphysären Knochenabschnitten. Dennoch bestätigen diese Beobachtungen, dass beide Methoden gut übereinstimmende Ergebnisse liefern. In der Studie von SCHNEIDER et al. (2004) wurden neben den beiden genannten Verfahren zur Knochendichtebestimmung weitere Methoden zur Beurteilung der Knochenmineralisation (DEXA, chemische Analyse) angewendet. Insgesamt stellten die Autoren an den Knochen der adulten Hunde weniger enge Korrelationen zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Methoden fest als an jenen der juvenilen Hunde, was von ihnen darauf zurückgeführt wurde, dass sich die Knochengröße und die Knochenmineralisation bei juvenilen Hunden parallel entwickeln, die Knochenmineralisation

bei adulten Tieren aber mit zunehmender Knochengröße rückläufig sei. Der Zusammenhang zwischen der BMD (qCT) und der nach dem Archimedischen Prinzip bestimmten Knochendichte stelle diesbezüglich eine Ausnahme dar, wofür die Autoren allerdings keinen Erklärungsansatz liefern. Da es sich sowohl bei den Tieren des ersten als auch bei denen des zweiten Durchgangs um junge Schweine im Wachstum handelte, bleibt nur zu vermuten, warum in der vorliegenden Studie nur für den zweiten Durchgang ein enger Zusammenhang zwischen den mittels qCT bzw. nach dem Archimedischen Prinzip ermittelten Knochendichten bestand. Möglicherweise führte die längere Versuchsdauer in Zusammenhang mit dem reduzierten Futterverbrauch in Gruppe V2 (vgl. 4.3.1) zu einem sausgeprägteren P-Mangel in der Mast (DG 2) im Vergleich zur Ferkelaufzucht (DG 1), wodurch die BMD stärker reduziert und ein Zusammenhang deutlicher erkennbar war. Im Vergleich der beiden Methoden muss allerdings generell bedacht werden, dass mit den qCT-Messungen die Knochendichte nur an einem bestimmten Abschnitt der Epiphyse (10% der Gesamtlänge) ermittelt wurde, wohingegen für die Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip die komplette proximale Tibia-Epiphyse verwendet wurde.

Durchgang 1

Bezüglich der Knochendichte (Archimedisches Prinzip) waren an den großen Röhrenknochen der Hintergliedmaße keine signifikanten Unterschiede feststellbar, obwohl für diese Untersuchung nur einzelne Epiphysen genutzt wurden und diese eine Änderung der Mineralstoffversorgung schneller durch einen geringeren Ra-Gehalt anzeigen als die zugehörigen Diaphysen (POINTILLART et al. 1987). Zudem war auch an keinem der übrigen Knochen(-anteile) eine Differenzierung der beiden Versuchsgruppen anhand dieses Parameters möglich. Dies spricht für eine eher geringe Sensitivität der Knochendichte als Parameter zur Beurteilung der P-Versorgung bei Flatdeckferkeln. Dennoch wiesen die Tiere der Kontrollgruppe an den Knochen der Vordergliedmaße sowie am MT III im Mittel eine höhere Knochendichte auf als die Tiere beider Versuchsgruppen. An den Metakarpal- bzw. Metatarsalknochen, an denen beide Parameter am Knochen *in toto* ermittelt wurden, beruhten diese Unterschiede dabei stärker auf einer reduzierten Masse (20,6 bzw. 22,4 % höher in Kontrollgruppe im Vgl. zu Gruppe V2) als auf einem verringerten Volumen dieser Knochen (+13,7 bzw. +16,4 % in der Kontrollgruppe gegenüber Gruppe V2).

Diskussion

Die Tiere der Versuchsgruppe 2 wiesen in allen Knochen(-anteilen) eine um 0,7 (MT III) bis 5,0 % (Hum) geringere Knochendichte auf als die Tiere zu Versuchsbeginn (Gruppe VB). Dies verdeutlicht, in welchem Ausmaß die physiologische Knochenentwicklung bei den Tieren gestört war, die während dieser frühen Phase der Skelettentwicklung weder einen anorganischen P- noch einen Phytase-Zusatz im MF erhielten. Ähnliches gilt jedoch auch für die Tiere der Versuchsgruppe 1, bei denen – mit Ausnahme der Dichte des MT III – die Knochendichte ebenfalls geringer war als bei den knapp fünf Wochen jüngeren Tieren (-2,7 bis -5,9 %), sodass die Phytaseaktivität von > 1000 FTU/ kg im MF für die geprüfte Altersgruppe als nicht ausreichend angesehen werden muss, um bei vollständigem Verzicht auf eine anorganische P-Ergänzung im MF eine normale Skelettentwicklung zu ermöglichen.

Die an der Tibia durchgeführten qCT-Messungen ergaben nur für den diaphysären Messpunkt signifikante Unterschiede. Eine Erklärung hierfür könnte die relativ höhere Standardabweichung bei den Messungen an dem proximalen bzw. distalen Messpunkt sein. Dies könnte wiederum darauf zurückzuführen sein, dass aufgrund der dortigen Wachstumsfuge zwischen verschiedenen Abschnitten im Bereich der Epi- bzw. Metaphyse hinsichtlich der Mineralisation deutlichere Unterschiede bestehen dürften als im Knochengewebe der Diaphyse. Kleine Ungenauigkeiten beispielsweise bei der Positionierung der Knochen für die Messung hätten somit an dem diaphysären Messpunkt weniger starke Abweichungen der gemessenen BMD zur Folge als im Bereich der Epi-/Metaphysen. GROLL et al. (1999) berichteten für *in situ* durchgeführte repeated measurements (qCT) an humanen Gliedmaßenknochen von einer höheren Präzision der Messungen an kortikalen Knochenstrukturen im Vergleich zu denen an trabekulärem Knochen. Die Variationskoeffizienten für Wiederholungsmessungen an verschiedenen Knochen bewegten sich in dieser Studie zwischen 0,4 und 0,8 % für die kortikale BMD bzw. zwischen 1,8 und 5,9 % für die trabekuläre BMD. Derartige methodische Einflüsse könnten durch eine Überlagerung fütterungsbedingter Effekte dazu beigetragen haben, dass Änderungen der Mineralisation mittels qCT in der Diaphyse deutlicher zu erkennen waren als an den proximalen und distalen Lokalisationen.

Auch die qCT-Messungen ergaben an den Tibiae der Tiere beider Versuchsgruppen im Vergleich zu jenen der Tiere aus Gruppe VB – unabhängig von gewählten Messpunkt – eine geringere BMD (bis zu -27 % bzw. -31 % geringer in V1 und V2) und bestätigen damit die

oben für die Knochendichte nach dem Archimedischen Prinzip geschilderte Einschätzung der Knochenentwicklung der Tiere beider Versuchsgruppen.

Durchgang 2

Auffällig war, dass bereits an d26, d. h. nach nicht einmal vier Wochen ohne anorganischen P und ohne Phytase-Zusatz im MF die Knochen der Tiere aus Versuchsgruppe 2 im Mittel um 18,3 bis 20,9 % leichter waren als die entsprechenden Knochen der Kontrolltiere. Auch die mittlere Körpermasse der Tiere aus Gruppe V2 war jedoch bereits zu diesem Zeitpunkt in ähnlichem Ausmaß reduziert (um etwa 17,6 % gegenüber der KM der Kontrolltiere). An den prozentualen Unterschieden hinsichtlich der Knochenmassen änderte sich dann im weiteren Verlauf des Versuchs vergleichsweise wenig (-21,4 bis -24,9 % an d47 und -20,5 bis 26,9 % an d82).

Die mittlere Knochendichte nach dem Archimedischen Prinzip war bei Tieren ohne jede anorganische P-Ergänzung zu jedem Zeitpunkt und in jedem Knochen(-anteil) geringer als bei den zu Versuchsbeginn untersuchten Tieren (Gruppe VB). So wiesen die Tiere der Versuchsgruppe 2 (P_i-; Phyt-) mit einer mittleren KM von 89,0 kg zum Versuchsende eine um 0,5 bis 3,5 % geringere Knochendichte auf als die etwa 60 kg leichteren Tiere zum Versuchsbeginn. Im Gegensatz dazu waren die entsprechenden Knochendichten der Kontrolltiere nach schon nach knapp vier Wochen (d26) um 1,6 bis 1,8 % höher als die der vier zu Versuchsbeginn untersuchten Tiere. Dies zeigt deutlich, dass auch in der Mast (ab etwa 30 kg KM) der mineralische Phosphor im MF nicht vollständig durch einen Phytase-Zusatz (500 FTU/kg im MF) zu kompensieren war. Noch prägnanter verdeutlichen dies die Ergebnisse der qCT-Messungen: Hier ergibt der Vergleich mit den Werten der Tiere aus Gruppe VB bei denjenigen Tieren, die weder anorganischen Phosphor noch einen Phytase-Zusatz zum MF erhielten, eine um bis zu 32,6 % (TrbD_{prox.}) reduzierte BMD. Insgesamt waren sowohl die Unterschiede zwischen den drei Gruppen als auch diejenigen zur Gruppe VB an der proximalen Messlokalisation besonders deutlich. Bisher widmeten sich nur relativ wenige Studien den Wachstumsraten bestimmter Epiphysenfugen an langen Röhrenknochen. Sowohl Untersuchungen an Schweinen (PAYTON 1932; BREUR et al. 1991) als auch solche an anderen Spezies (CHURCH u. JOHNSON 1964; GOYAL et al. 1981; BREUR et al. 1991; WILSMAN et al. 1996; WILSMAN et al. 2008) zeigten jedoch, dass die proximale Epiphysenfuge der Tibia höhere Wachstumsraten aufweist als die distale. Unterschiedliche

Wachstumsraten könnten hier also eine mögliche Erklärung für die deutlicheren Effekte an der proximalen Messlokalisation liefern. Allerdings wären unter dieser Prämisse im ersten Durchgang vergleichbare Ergebnisse zu erwarten gewesen. Dies war jedoch nicht der Fall; in der Ferkelaufzucht unterschieden sich die drei Gruppen K, V1 und V2 zwar hinsichtlich der BMD an der Diaphyse signifikant, nicht aber an den epiphysären Lokalisationen. Eine Erklärung hierfür könnte die – im Vergleich zum Längenwachstum – stärkere Zunahme der Kompakta in dieser frühen Entwicklungsphase (LIU et al. 1999) sein.

5.4.3 Knochenzusammensetzung

In sämtlichen analysierten Knochen(-anteilen) waren signifikante Unterschiede infolge der differierenden P-Versorgung in den Ca- und P-Gehalten je kg ffrTS bzw. je cm³ stets auch in den zugehörigen Ra-Gehalten erkennbar. Demnach ergab sich durch die Bestimmung der Ca- und P-Gehalte kein zusätzlicher Informationsgewinn gegenüber der alleinigen Bestimmung der Ra-Gehalte. Zu diesem Schluss kamen auch HAGEMOSER et al. (2000), die eine Analyse der Ca- und P-Gehalte im Knochen auch aufgrund des gegenüber der Ra- oder Knochendichtebestimmung höheren analytischen und finanziellen Aufwandes für nicht gerechtfertigt halten. In der vorliegenden Untersuchung fiel jedoch auf, dass die Knochen von Tieren der Kontrollgruppe – mit Ausnahme von Hum und Tib/Fi im ersten Durchgang – numerisch stets ein engeres Ca:P-Verhältnis aufwiesen als die Knochen jener Tiere, die ein MF ohne anorganischen Phosphor erhielten. Signifikante Unterschiede im Ca:P-Verhältnis der Knochenproben traten jedoch nur vereinzelt auf, ließen dabei insgesamt auch keine gerichtete Entwicklung erkennen. Auch wenn das Ca:P-Verhältnis im Knochen als weitestgehend konstant angesehen wird (FIELD et al. 1974; FERNÁNDEZ 1995; CRENSHAW u. RORTVEDT-AMUNDSON 2014; TEIXEIRA et al. 2016), wurden dennoch in einigen Studien Effekte einer unterschiedlichen Ca- bzw. P-Versorgung auf das Ca:P-Verhältnis im Knochen beobachtet (SHAPIRO u. HEANEY 2003; ADEOLA et al. 2015). Zudem sind Veränderungen in der kristallinen Struktur der extrazellulären Matrix im Knochen mit zunehmendem Alter beschrieben, die mit einem veränderten Ca:P-Verhältnis einhergehen können (BURNELL et al. 1980; LEGROS et al. 1987). CRENSHAW et al. (2013) berichteten darüber hinaus von unterschiedlichen Ca:P-Relationen in verschiedenen Anteilen des Humerus von Sauen (zw. 1,95 und 2,14; engeres Ca:P-Verhältnis in der Anteilen der Diaphyse ggü. Abschnitten der Epiphysen). TERMINE und POSNER (1967) stellten am

Femur von Hühnern einen geringeren Gehalt an kristallinem Apatit in diaphysären Knochenanteilen gegenüber dem metaphysären Knochen fest. An rachitischen Knochen beobachteten diese Autoren – im Vergleich zu gesundem Knochengewebe – sowohl an epiphysären als auch an metaphysären Knochenanteilen einen höheren Anteil von amorphem Calciumphosphat sowie eine größere Kristallstruktur des Apatits, und zwar unabhängig davon, ob die Rachitis durch einen Ca-, P- oder Vit. D-Mangel ausgelöst wurde. Die Autoren schlossen daraus, dass amorphes Calciumphosphat in rachitischem Knochengewebe länger erhalten bleibt, als dies physiologischerweise der Fall wäre. Es wird angenommen, dass amorphes Calciumphosphat eine „Vorläuferstufe“ des kristallinen Hydroxylapatits darstellt und ein anderes Ca:P-Verhältnis aufweist als dieses (MAHAMID et al. 2008). Demnach sprechen die Ergebnisse von TERMINE und POSNER (1967) dafür, dass in rachitischem Knochengewebe die normale Reifung des Knochengewebes gestört ist. Welche quantitative Bedeutung etwaigen Verschiebungen im Ca:P-Verhältnis der Knochen von Schweinen mit einem P-Mangel zukommt, und ob daraus ein diagnostischer Nutzen abzuleiten ist, bedarf weiterer Untersuchungen.

Im Vergleich der Rf-Gehalte je kg TS fiel in der vorliegenden Untersuchung auf, dass die Knochen der Kontrolltiere, also der sowohl mit einer mineralischen P-Ergänzung als auch mit einem Phytase-Zusatz im MF versorgten Tiere, in beiden Durchgängen numerisch stets die geringsten Mittelwerte auswiesen (Ausnahme: Fem und Tib an d26 im Durchgang 2). Für die Rf-Gehalte je kg uS bzw. je cm³ traf dies hingegen nicht zu. Da die Adipozyten und die Osteoblasten im Knochenmark aus den gleichen mesenchymalen Stammzellen hervorgehen (RINGE et al. 2002), vermuteten ALEXANDER et al. (2010) aufgrund ihrer Untersuchungsergebnisse, dass ein P-Mangel zu einer Verschiebung der Differenzierung der mesenchymalen Vorläuferzellen hin zu einer vermehrten Adipozytenbildung führt, die zulasten der Entwicklung zu Osteoblasten ginge. Dies könnte eine Erklärung dafür liefern, dass die Knochen der Tiere beider Versuchsgruppen in Bezug auf die TS allgemein fettreicher waren als die entsprechenden Knochen der Kontrolltiere. Aus der Humanmedizin ist zudem bekannt, dass eine Korrelation zwischen dem viszeralen Fettgehalt und jenem im Knochenmark besteht (BREDELLA et al. 2011). Ob allerdings die P-Versorgung bei den Tieren aus der vorliegenden Studie auch die Körperzusammensetzung beeinflusste, wurde

nicht untersucht. Aufgrund der Ergebnisse anderer Untersuchungen wäre dies aber denkbar (vgl. 2.2).

Insgesamt spiegelten sich Änderungen in der Knochenzusammensetzung infolge der unterschiedlichen P-Versorgung je cm^3 bzw. je kg ffrTS deutlicher wider als je kg uS bzw. je kg TS, wenngleich auch bei diesem Bezug in beiden Durchgängen signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen auftraten. Bezüglich der Unterschiede in der Knochenzusammensetzung von Kontrolltieren und jenen, die ein MF ohne anorganischen P-Zusatz erhielten, war auffällig, dass – obwohl die prozentualen Unterschiede je cm^3 größer waren als jene je kg ffrTS (Ra-Gehalte je ffrTS bzw. je cm^3 : 13 – 24 % bzw. 17 – 39 % (DG 1) und 6 – 23 % bzw. 15 – 49 % (DG 2) geringer in Gruppe V2 als in der Kontrollgruppe) –, dennoch häufiger Signifikanzen auftraten, wenn die Angaben je kg ffrTS erfolgten. Insbesondere die beiden Versuchsgruppen, d. h. jene Tiere, die ein MF ohne mineralische P-Ergänzung und mit bzw. ohne Phytase-Zusatz erhielten, waren anhand der Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS des Knochens häufiger zu differenzieren als mithilfe der entsprechenden Gehalte je cm^3 . Dies dürfte auf die relativ höhere Standardabweichung (Verhältnis von s zu \bar{x}) der Werte je cm^3 zurückzuführen sein. Möglicherweise könnte durch eine Modifikation der Methode zur Bestimmung des Knochenvolumens, die Variation der Untersuchungsergebnisse hier zukünftig minimiert und die Aussagekraft der Ra-, Ca- und P-Gehalte je cm^3 als Parameter erhöht werden. OGUNBAMERU et al. (1990) empfehlen eine 60-minütige Hydratation der gefrorenen Knochen vor der Wägung als Vorgehen zur Volumen- bzw. Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip. Ein der vorliegenden Untersuchung vergleichbares Vorgehen wurde allerdings in der Studie von OGUNBAMERU et al. (1990) nicht untersucht.

Insgesamt ist aus den Ergebnissen der chemischen Analyse der Knochen abzuleiten, dass die Gehalte je kg ffrTS geeigneter Parameter zur Beurteilung der P-Versorgung darstellen als diejenigen je cm^3 und daher eine Entfettung des Knochenmaterials vor der Veraschung durchgeführt werden sollte, um chemische Parameter zur Bewertung der Knochenmineralisation mit höchster Sensitivität zu erheben. Der damit verbundene zusätzliche analytische Aufwand sollte daher in Kauf genommen werden.

Um den möglichen Einfluss der Körpermasse auf verschiedene Parameter der chemischen Knochenzusammensetzung (Ra-Gehalt je kg uS, TS, ffrTS, ffrTS bzw. je cm^3) zu prüfen,

Diskussion

wurden für die Kontrolltiere beider Durchgänge die diesbezüglichen Korrelationskoeffizienten nach Pearson bestimmt.

Im ersten Durchgang konnte dabei keine signifikante Korrelation zwischen den Ra-Gehalten in den jeweiligen Knochen und der Körpermasse festgestellt werden. Im zweiten Durchgang hingegen korrelierten insbesondere die Ra-Gehalte je kg uS sowie je cm³ eng bei den Tieren, die sowohl mineralischen P als auch einen Phytase-Zusatz im MF erhielten. Der Zusammenhang war dabei im dritten Metatarsalknochen ($R^2 = 0,9215$, $p < 0,0001$ bzw. $R^2 = 0,9141$, $p < 0,0001$) deutlicher als in Fem und Ti/Fi (Fem: $R^2 = 0,89010$, $p = 0,0002$ bzw. $R^2 = 0,89611$, $p = 0,0002$; Ti/Fi: $R^2 = 0,87492$, $p = 0,0004$ bzw. $R^2 = 0,87076$, $p = 0,0005$). Dass die Beziehung zur Körpermasse für die Ra-Gehalte im dritten Metatarsalknochen etwas enger war als in Fem und Tib, könnte darauf zurückzuführen sein, dass dieser Knochen *in toto* analysiert wurde und folglich – relativ gesehen – höhere Anteile an kortikalem Knochen enthalten waren. Der Zusammenhang zwischen der Körpermasse und dem Ra-Gehalt je kg uS im MT III der Kontrolltiere aus Durchgang 2 ist in Abbildung 10 grafisch dargestellt.

Möglicherweise ist es der geringeren Tierzahl ($n = 4$ vs. $n = 11$ in der Kontrollgruppe) geschuldet, dass im ersten im Gegensatz zum zweiten Durchgang keine signifikanten Korrelationen auftraten, denn bei getrennter Analyse der einzelnen Sektionszeitpunkte, waren auch für den zweiten Durchgang nur vereinzelt signifikante Korrelationen zwischen den geprüften Parametern der Knochenmineralisation und der Körpermasse der Tiere festzustellen. Auch die kürzere Versuchsdauer (und geringere KM-Differenz zw. Versuchsbeginn und –ende) sowie das geringere Alter der Tiere könnten eine Erklärung für die beobachteten Unterschiede zwischen beiden Durchgängen sein.

Diskussion

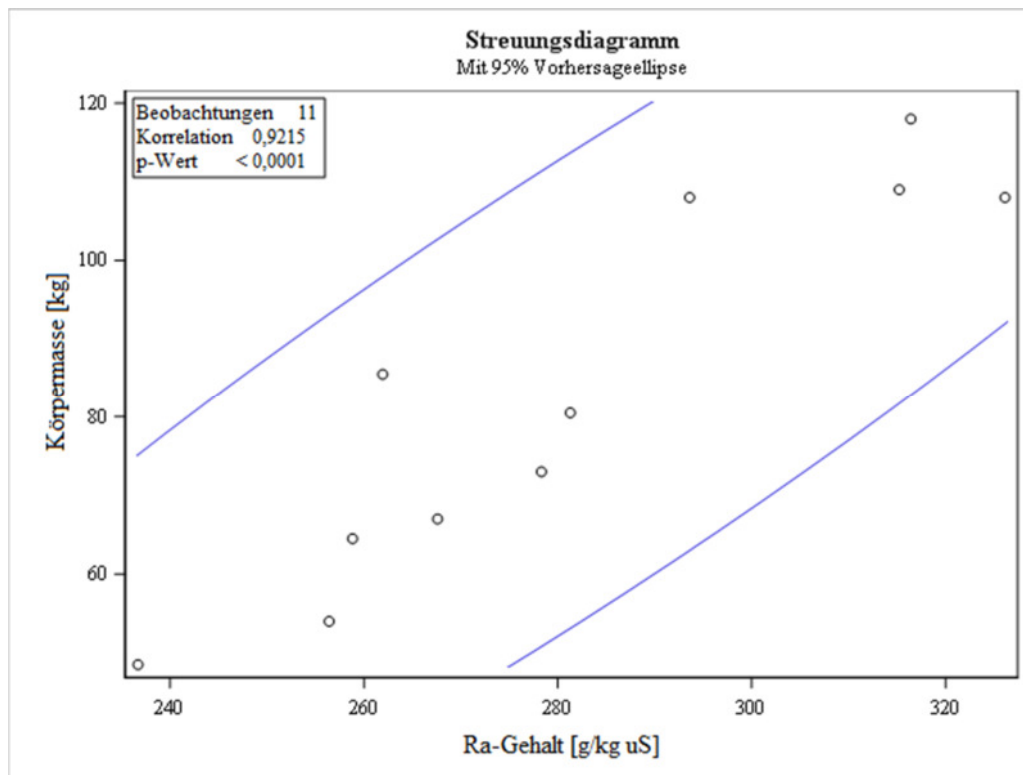


Abbildung 10: Streudiagramm zur Korrelation nach Pearson zwischen der Körpermasse [kg] und dem Ra-Gehalt in der uS [g/kg] im dritten Metatarsalknochen der Kontrolltiere im Durchgang 2 (etwa 30 bis 95 kg Körpermasse)

Die Abbildung 11 zeigt das Streudiagramm zur Korrelation (nach Pearson) zwischen dem Ra-Gehalt je cm³ und der Körpermasse im MT III der Kontrolltiere aus Durchgang 2.

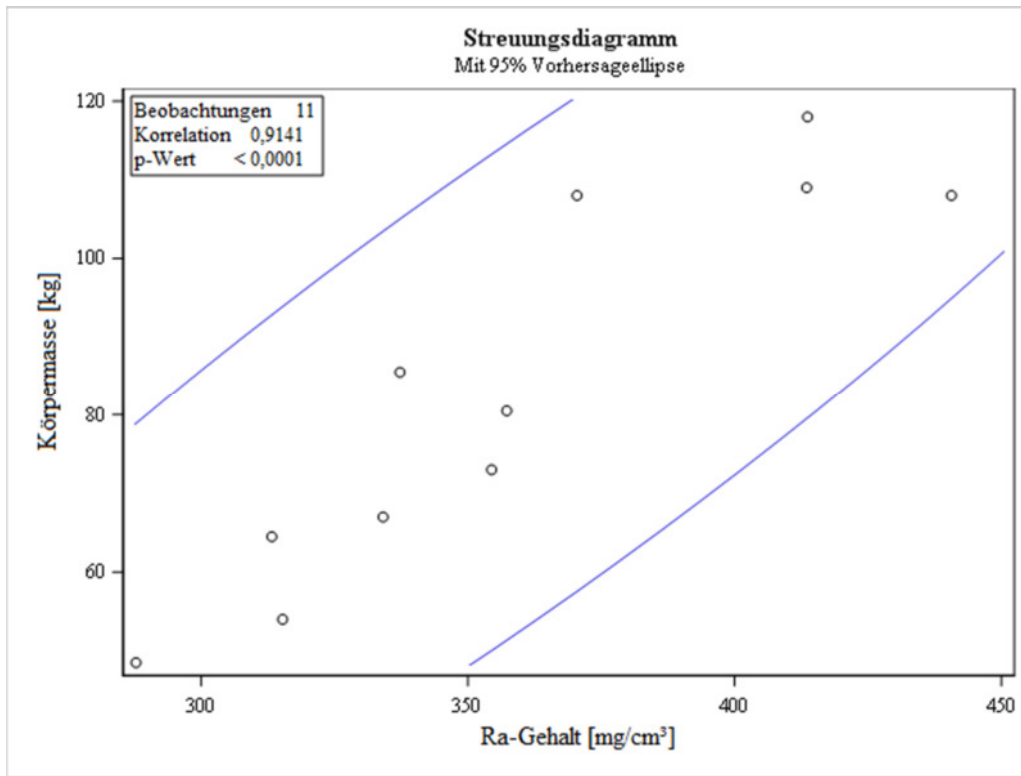


Abbildung 11: Streudiagramm zur Korrelation nach Pearson zwischen der Körpermasse [kg] und dem Ra-Gehalt je Volumeneinheit [mg/cm³] im dritten Metatarsalknochen der Kontrolltiere im Durchgang 2 (etwa 30 bis 95 kg Körpermasse)

Durchgang 1

Mit wenigen Ausnahmen wiesen jene Tiere, die ein MF erhielten, das sowohl anorganischen Phosphor als auch einen Phytase-Zusatz enthielt, in den verschiedenen Knochen(-anteilen) stets höhere Ra-, Ca- und P-Gehalte auf als die knapp fünf Wochen jüngeren Tiere aus Gruppe VB (vgl. 4.5.4). Die P-Versorgung in der Kontrollgruppe reichte demnach aus, um mit zunehmendem Alter und steigender Körpermasse eine höhere Knochenmineralisation zu gewährleisten. Wenngleich es nicht möglich ist, zu beurteilen, ob dabei eine maximale Knochenmineralisation erreicht wurde, so konnte in der Kontrollgruppe doch zumindest ein Anstieg (um bis zu 8 % in der ffrTS und um bis zu 19 % je cm³) der Ra-Gehalte im Knochen mit zunehmendem Alter der Tiere dargestellt werden, wie es grundsätzlich physiologischerweise zu erwarten ist. Im Gegensatz dazu waren bei den Tieren, die ein MF ohne anorganischen Phosphor erhielten, die Ra-, Ca- und P-Gehalte im Knochen zumeist geringer als bei den jüngeren Tieren aus Gruppe VB (vgl. 4.5.4). Vergleichbare

Beobachtungen machten HOPPE et al. (1993) in ihrer Untersuchung an jüngeren Absetzferkeln (etwa 7 kg KM zu Versuchsbeginn). Diese Autoren stellten bei Einsatz eines MF mit 4,2 g P/kg, dem jedoch anders als in der vorliegenden Arbeit eine anorganische P-Quelle zugemischt war (0,218 % MCP im MF), nach 42 Tagen geringere Ra-Gehalte in der Phalanx I fest als bei den zu Versuchsbeginn untersuchten Tieren (30,0 vs. 40,5 % der TS). Die Autoren sahen darin einen Hinweis darauf, dass die Skelettmineralisation in dieser Gruppe verzögert erfolgte und brachten dies mit den hohen KMZ in Zusammenhang, die beobachtet wurden (492 g/Tier/Tag in dieser Gruppe). In einer Studie von KOCH et al. (1984) hatte eine P-arme Fütterung (0,23 % P im MF) von gerade abgesetzten Ferkeln (8,7 kg KM zu Versuchsbeginn) nach 35 Tagen gegenüber sieben Wochen jüngeren Tieren (Versuchsbeginn) geringere absolute Ra-Mengen in Humerus, Femur und MT III zur Folge. Die Autoren schlossen daraus, dass es bei diesen Tieren netto zu einer Mobilisation von Mineralstoffen aus der Rohasche des Knochens gekommen sein muss. Demgegenüber waren in der vorliegenden Untersuchung die absoluten Ra-Mengen in den Metakarpal- und Metatarsalknochen der Tiere aller drei Gruppen aber höher als die der jüngeren Tiere aus Gruppe VB. Dass die absoluten Ra-Mengen in der vorliegenden Untersuchung im Gegensatz zu den Beobachtungen von KOCH et al. (1984) trotz eines deutlichen P-Mangels auch bei den Tieren aus der Versuchsgruppe 2 höher waren als bei den jüngeren Tieren (Gruppe VB) dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die Tiere zu Versuchsbeginn etwa 10 kg schwerer waren und zudem die P-Gehalte im MF (MF-V2: 3,72 bzw. 3,52 g P/kg) etwas höher waren als in der Studie von KOCH et al. (1984). Die Ergebnisse dieser Autoren sprechen jedoch dafür, dass sogar an jungen, schnell wachsenden Ferkeln eine Mobilisation von Knochengewebe zur Aufrechterhaltung anderer Körperfunktionen stattfinden kann. EKLOU-KALONJI et al. (1999) leiteten aus ihren Untersuchungen an Absetzferkeln (KM: $9,5 \pm 0,4$ kg zu Versuchsbeginn) ab, dass die beeinträchtigte Knochenmineralisation infolge einer Ca-Unterversorgung (0,4 bzw. 0,1 % Ca im MF) sowohl auf eine vermehrte Knochenresorption als auch auf eine reduzierte Mineralstoffeinlagerung in den Knochen zurückzuführen sei. Da bei moderater Ca-Unterversorgung zwar die Knochenbildungsrate herabgesetzt war, aber weder die Anzahl der Osteoblasten noch deren Aktivität beeinflusst war, schlussfolgerten die Autoren, dass die Beeinträchtigung der Knochenmineralisation als direkte Folge der geringen Ca-Gehalte im MF für die verringerte Knochenbildungsrate verantwortlich sei.

Diskussion

Im Vergleich zu den Ergebnissen von PETERSEN et al. (2011), die Ferkel mit einer mittleren Körpermasse von 16,8 kg (zu Versuchsbeginn) 28 Tage lang unterschiedlich mit P versorgten (0,20 bzw. 0,26 % P im MF) und in den Metakarpalknochen III und IV dieser Tiere mittlere Ra-Mengen von 3,18 bzw. 3,47 g nachwiesen, enthielten die dritten Metakarpalknochen der Tiere in der vorliegenden Untersuchung trotz höherer Ca- und P-Gehalte im MF und einer höheren KM zum Untersuchungszeitpunkt deutlich geringere absolute Ra-Mengen (1,90; 2,21 bzw. 2,86 g). Mit den Ergebnissen anderer Studien wiederum stimmen die eigenen Werte gut überein (KOCH u. MAHAN 1985; VEUM et al. 2002), sodass unklar ist, worauf die o. g. Differenzen hinsichtlich der absoluten Ra-Mengen in den Metakarpalknochen zurückzuführen sind.

Die absoluten Ra-Mengen im MC III unterschieden sich infolge der unterschiedlichen P-Versorgung zwischen den Tieren der drei Gruppen signifikant, wohingegen die Ra-Menge im MT III keine Differenzierung der beiden Versuchsgruppen erlaubte (ohne anorganischen Phosphor). Diese Beobachtung könnte auf eine höhere Reaktivität/Sensitivität der Metakarpalknochen gegenüber den Metatarsalknochen bei den Flatdeckferkeln hindeuten. Da die Vordergliedmaßen bei Schweinen einer höheren Belastung durch die Körpermasse ausgesetzt sind als die Hintergliedmaßen (SUN et al. 2011), könnte die höhere mechanische Beanspruchung der Metakarpal- im Vergleich zu den Metatarsalknochen eine mögliche Erklärung sein. Vergleicht man die mittleren Knochenlängen und Kompakta-Dicken der Kontrolltiere mit denen der Tiere aus der Gruppe VB, so fällt auf, dass die prozentualen Unterschiede hinsichtlich der Knochenlänge an MC III und MT III vergleichbar waren (28,0 bzw. 27,0 %; vgl. Tabelle 31), die Unterschiede in Bezug auf die Kompakta-Dicke jedoch am MC III mit 41,6% aber deutlich höher waren als am MT III (23,5 %). Demnach könnte ein stärkeres Kompakta-Wachstum am Metatarsalknochen als mögliche Erklärung für dessen deutlichere Reaktion auf die unterschiedliche P-Versorgung vermutet werden. Allerdings waren die Kompakta-Dicken (sowohl in cranio-caudaler als auch in latero-lateraler Richtung) in den Knochen jener Tiere, die ein MF ohne mineralischen P und Phytase-Zusatz erhielten, gegenüber den Werten der Kontrolltiere prozentual im MT III stärker reduziert als im MC III (MC III: -27 bzw. -21 %; MT III: -35 bzw. -27 %; vgl. Tabelle 43 und Tabelle 44). Dies deutet darauf hin, dass die Knochenentwicklung im MT III durch den P-Mangel stärker beeinträchtigt wurde als diejenige im MC III.

Die prozentualen Unterschiede zwischen den Gruppen waren hinsichtlich der Ra-Gehalte je cm^3 und auch in Bezug auf die Ra-Gehalte je kg ffrTS in Fem und Hum nahezu vergleichbar (Fem: -38 bzw. -24 %; Hum: -39 bzw. 23 % in V2 im Vgl. zu K) und auch in Ti/Fi und Ra/Ui in einer ähnlichen Größenordnung (Ti/Fi: -36 bzw. -22 %; Ra/Ui: -34 bzw. -19 % in V2 im Vgl. zu K) verändert. Dennoch waren nur am Fem signifikante Unterschiede zwischen allen drei Gruppen hinsichtlich der Ra-Gehalte je cm^3 nachweisbar. Dies könnte auf eine höhere Reaktivität/Sensitivität des Fem hindeuten. Auch CRENSHAW et al. (1981) empfehlen für etwa zwei Monate alte Ferkeln neben Rippe und Humerus den Femur als Analysenmaterial (vgl. 2.3.2.3). In ihrer Untersuchung wurden allerdings die verschiedenen Knochen *in toto* analysiert. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung die Beobachtungen von KOCH und MAHAN (1986), die – auch gestützt auf eigene frühere Untersuchungen (KOCH et al. 1984; KOCH u. MAHAN 1985) – folgerten, dass die proximalen Gliedmaßenknochen eine variierende Mineralstoff-Versorgung mit höherer Sensitivität anzeigen als weiter distal gelegene Knochen.

Durchgang 2

Verglichen mit den Ergebnissen von DENIS et al. (1994)¹ zu den Ra-Gehalten in den Tibiae der unbehandelten Kontrolltiere (mittlere KM: 41,7 kg; 1,1 % Ca und 0,6 % tP im MF) waren die in der vorliegenden Untersuchung in der proximalen Tibia-Epiphyse der drei Kontrolltiere ermittelten Ra-Gehalte je cm^3 an d26 (KM: ca. 55 kg) etwas geringer (215 vs. 235 mg/cm^3). Allerdings ist zu erwähnen, dass in der Studie von DENIS et al. (1994) der gesamte Knochen zur Volumenbestimmung herangezogen wurde, erscheinen diese Unterschiede plausibel. Diese Autoren führten eine getrennte Veraschung der beiden Epiphysen und der Diaphyse durch. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte dann für die Epiphysen als gemittelter Wert (proximal und distal zusammen). Die von ihnen angegebenen Werte für die mittleren Ra-Gehalte in der TS waren mit 37,8 % etwas geringer als die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Werte für die proximale Tibia-Epiphyse der Kontrolltiere (im Mittel 39,7 % Ra in der TS). Auch verglichen mit den von POINTILLART et al. (1995)² an Kontrolltieren (mittlere KM: 49,2 kg; 9,7 g Ca und 4,9 g P im MF) gemessenen Werten wiesen die Kontrolltiere am d26 in der vorliegenden Arbeit etwas höhere Ra-Gehalte je cm^3 im dritten

¹ Originaldaten in $\text{g}/100 \text{ cm}^3$

² Originaldaten in $\text{g}/100 \text{ cm}^3$

Diskussion

Metatarsalknochen auf (283 vs. 305 mg/cm³; beide: *in toto*). Mit 4,52 g war auch die mittlere absolute Ra-Menge im MT III etwas höher als die entsprechenden Werte (4,4 g Ra) in der Untersuchung dieser Autoren. Neben weiteren Faktoren kommen methodische Unterschiede in der Analytik (TS-Bestimmung durch Wärmetrocknung, Veraschung bei 550 °C für 12 h vs. Gefriertrocknung, Veraschung bei 600 °C für 7 h) als Erklärung für die hier beobachteten Differenzen in Frage.

Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Knochen(-anteile) der Hintergliedmaße waren in der vorliegenden Untersuchung zwischen den drei Gruppen im dritten Metatarsalknochen weniger deutlich als in Fem und Ti/Fi. So führte die MF-Rezeptur ohne anorganischen Phosphor am d82 im Vergleich zu den Kontrolltieren zu 5 bzw. 9 % geringeren Ra-Gehalten in der ffrTS des MT III; in Fem und Ti/Fi waren die entsprechenden Gehalte um 16 bis 23 % bzw. 17 bis 23 % gegenüber der Kontrollgruppe geringer. Nach knapp sieben Wochen (d47) einer unterschiedlichen P-Versorgung zeigte nur die proximale Tibia/Fibula-Epiphyse hinsichtlich der Ra-Gehalte (sowohl je kg ffrTS als auch je cm³) signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen an, die sich bei Verzicht auf anorganischen Phosphor nur im Phytase-Zusatz unterschieden. Aus diesen Beobachtungen lässt sich ableiten, dass unter diagnostischen Gesichtspunkten, die beiden letztgenannten Knochenanteile – und insbesondere die proximale Tibia/Fibula-Epiphyse – besser geeignet waren als das MT III, um eine Bewertung der P-Versorgung vorzunehmen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass das Herauspräparieren der weiter proximal gelegenen Knochen u. U. einen größeren Wertverlust der Karkasse zur Folge hat, als die Freilegung und Gewinnung weiter distal gelegener Knochen. Derartige ökonomische Faktoren müssen bei der Untersuchung von Mastschweinen (außer im Rahmen von diagnostischen Tötungen) gegen den durch die Analysen zu erwartenden Erkenntnisgewinn abgewogen werden. Lassen beispielsweise die Fütterungsanamnese oder die Befunde einer vorherigen Blutuntersuchung einen deutlichen P-Mangel bei den zu untersuchenden Tieren erwarten, so kann es eventuell ausreichend sein, dies allein anhand der Ra-Gehalte der Metakarpal-/Metatarsalknochen nachzuweisen. Werden allerdings nur geringgradige Veränderungen in der Knochenmineralisation erwartet, sprechen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit dafür, die distale Femur- bzw. die proximale Tibia/Fibula-Epiphyse von Mastschweinen als Analysenmaterial zu wählen/verwenden.

5.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen deutlich, dass bei einem Verzicht auf anorganischen Phosphor im MF während der Ferkelaufzucht bzw. über die gesamte Mastperiode mit erheblichen Auswirkungen sowohl auf die Tiergesundheit als auch auf das Leistungsniveau gerechnet werden muss – selbst wenn Phytaseaktivitäten von > 1000 FTU/kg im Mischfutter vorhanden sind. Andererseits haben mehrere Studien gezeigt, dass zumindest in der Endmast ein mehrwöchiger Verzicht auf jeglichen Zusatz von anorganischem Phosphor ohne nennenswerte Leistungseinbußen möglich ist (MAVROMICHALIS et al. 1999; MCGLONE 2000; PETER et al. 2001). Demnach ist anzunehmen, dass eine P-Unterversorgung in der Endmast, d. h. insbesondere von älteren Tieren durchaus kompensiert werden kann, eine P-arme Fütterung ab der Vormast aber – wie in der vorliegenden Arbeit – bereits nach kurzer Zeit (nach knapp vier Wochen) die Adaptationsfähigkeiten übersteigen und in der Folge zu pathologischen Veränderungen am Skelett, d. h. in seiner chemischen Zusammensetzung führen kann. Aus Tierschutzgründen sollte daher ein Fütterungskonzept, das keinen mineralischen Phosphor im MF vorsieht, allenfalls in der Endmast, nicht jedoch bei jüngeren Tieren Anwendung finden. In Anbetracht der ökonomischen Auswirkungen einer längeren Mastdauer sowie einer Beeinträchtigung der Tiergesundheit in einem Bestand durch Behandlungskosten einerseits, aber auch durch die mangelnde Verwertung von Schlachtkörpern (Frakturen/schwere Lahmheiten führen zu „Untauglichkeit“) sollte eine zu knappe P-Versorgung von wachsenden Schweinen dringend vermieden werden.

Auch wenn ein P-Mangel bei Schweinen ab einem gewissen Schweregrad bzw. einer gewissen Zeitdauer unzweifelhaft mit geringeren Tageszunahmen einhergeht und auch in der vorliegenden Arbeit in dieser Hinsicht erhebliche Unterschiede auftraten, so beeinflussen unter Praxisbedingungen neben der P-Versorgung zahlreiche weitere Faktoren das in einem Bestand erreichte Leistungsniveau. Diesem Parameter ist unter diagnostischen Gesichtspunkten – auch aufgrund der geringeren Sensitivität gegenüber Knochenuntersuchungen – kein großer Informationswert beizumessen, da einerseits ein hohes Leistungsniveau nicht beweisend ist für eine ausreichende Versorgung, andererseits eine geringere Leistung aber auch nicht Folge eines P-Mangels sein muss.

Die P-Konzentration im Serum erlaubte unter den Bedingungen dieser Studie zu jedem Zeitpunkt zumindest einer Differenzierung der Kontrolltiere von jenen Tieren, die ein MF

ohne P_i erhielten und scheint sich daher – unter der Bedingung, dass bedarfsdeckend versorgte Vergleichstiere zur Verfügung stehen – grundsätzlich für diesen Zweck zu eignen. Ob die Sensitivität dieses Parameters ausreichend ist, einen moderateren P-Mangel zu diagnostizieren, bleibt fraglich, da im zweiten Durchgang mit zunehmender Versuchsdauer die Effekte geringer wurden (zur Mitte der Mast um bis 45 % geringer in V2 im Vgl. zur Kontrolle, zur Endmast hin nur -39 %).

Im Hinblick auf ihren jeweiligen diagnostischen Nutzen erwiesen sich in der vorliegenden Arbeit zum einen die verschiedenen Knochen(-anteile), zum anderen aber auch die Parameter, die jeweils erhoben wurden als unterschiedlich geeignet für die Bewertung der P-Versorgung bzw. dafür, eine mangelhafte P-Versorgung anzuzeigen, d. h. sie unterschieden sich in ihrer Eignung als „Indikatoren“.

Die chemische Zusammensetzung spiegelte - unabhängig von der gewählten Bezugsgröße – die unterschiedliche P-Versorgung am differenziertesten wider. Insbesondere zur genaueren Beurteilung des Schweregrades eines P-Mangels bzw. der klinischen Relevanz sollten jedoch ggf. auch die Knochenmaße oder -dichte herangezogen werden, da diesbezügliche Veränderungen für die mechanische Belastbarkeit von Knochen und somit für das Frakturrisiko von entscheidender Bedeutung sind (AUGAT et al. 1996; JIANG et al. 2008; SKIBA et al. 2017). In der vorliegenden Untersuchung waren Unterschiede in der chemischen Knochenzusammensetzung in Bezug auf die ffrTS besonders ausgeprägt. Somit erscheint es lohnend, zusätzlich zur TS-Bestimmung eine vollständige Entfettung des Knochenmaterials vor der Analyse der Ra-, Ca- und P-Gehalte vorzunehmen und diesen zusätzlichen analytischen Aufwand in Kauf zu nehmen, um Veränderungen der Knochenmineralisation schneller/deutlicher zu erkennen, bzw. auch geringere Unterschiede nachweisen zu können.

Da die prozentualen Unterschiede zwischen den Gruppen im Bezug auf die Ra-, Ca- und P-Gehalte je cm^3 größer waren als jene in Bezug auf die ffrTS, verdienen diese Parameter unter diagnostischen Gesichtspunkten besondere Beachtung. Gelänge es – beispielsweise durch Modifikation der Methodik – die Streuung der Werte zu reduzieren, stünde hierdurch vermutlich ein besonders sensitiver Parameter zur Beurteilung der Knochenmineralisation von wachsenden Schweinen zur Verfügung.

6 Zusammenfassung

Rieger, Hanna

Untersuchungen zum Einfluss einer unterschiedlichen Phosphorversorgung auf die Entwicklung und Mineralisation verschiedener Knochen wachsender Schweine

Vor dem Hintergrund zunehmend restriktiver Regelungen zur Düngung mit Phosphor (P) und auch in Anbetracht der Preisentwicklung für bestimmte P-Quellen im Mischfutter (MF) hat eine möglichst exakt am Bedarf ausgerichtete P-Versorgung von Schweinen große Bedeutung für die Mischfutterkonzeption. Mit der Zielsetzung, unter standardisierten Bedingungen anhand von Blut- und Knochenuntersuchungen sensitive Parameter zur Bewertung der P-Versorgung wachsender Schweinen zu finden und für die Diagnostik wichtige Vergleichs- bzw. Orientierungswerte zu generieren, wurden drei unterschiedliche Konzepte zur P-Versorgung von Schweinen in der Ferkelaufzucht (Durchgang 1, etwa 15 bis 35 kg Körpermasse) und in der Mast (Durchgang 2, 30 bis max. 95 kg Körpermasse) geprüft.

Die Kontrollgruppe (K) erhielt ein MF, dem sowohl eine anorganische P-Quelle (Mononatriumphosphat) als auch eine Phytase (500 FTU/kg) zugesetzt waren. Der Gesamt-P-Gehalt in den MF für die Kontrollgruppe variierte im Bereich von 4,57 bis 5,65 g/ kg TS in verschiedenen Phasen der Aufzucht bzw. Mast. Den Versuchsgruppen 1 und 2 wurde jeweils ein botanisch und – mit Ausnahme des P-Gehalts – auch chemisch vergleichbares MF angeboten, allerdings ohne jede anorganische P-Verbindung. Die MF-Varianten für die beiden Versuchsgruppen wiesen Gesamt-P-Gehalte zwischen 3,11 und 4,47 g/ kg TS in den verschiedenen Fütterungsphasen auf. Dem MF für die Versuchsgruppe 1 (V1) war – wie dem der Kontrollgruppe – eine Phytase (500 FTU/kg) zugesetzt, wohingegen die Versuchsgruppe 2 (V2) weder anorganischen P (P_i) noch einen Phytase-Zusatz über das MF erhielt („worst case“-Szenario, d. h. Phytase bei der MF-Herstellung inaktiviert).

Zu Beginn beider Durchgänge wurden jeweils vier Tiere seziert, um die Eigenschaften diverser Knochen vor der Phase einer unterschiedlichen P-Versorgung näher zu charakterisieren. Für die Untersuchungen während der Ferkelaufzucht erhielten insgesamt zwölf Tiere knapp fünf Wochen lang die drei unterschiedlichen MF-Varianten. Von diesen Tieren wurden in der Sektion verschiedene Knochen der Vorder- und Hintergliedmaße

Zusammenfassung

entnommen, an denen im Anschluss wesentliche Maße (u. a. Länge, Kompakta-Dicke) bestimmt wurden. Des Weiteren wurde die Dichte und die chemische Zusammensetzung der Knochen *in toto* bzw. zum Teil von einzelnen Epiphysen analysiert.

Der Einfluss der unterschiedlichen P-Versorgung in der Mast wurde an insgesamt 36 Tieren geprüft. Mit Erreichen einer mittleren Körpermasse (KM) von etwa 45, 65 und 95 kg erfolgte im Rahmen einer Sektion von jeweils zwölf Tieren die Entnahme von Knochen der Hintergliedmaße zwecks der o. g. Analysen.

Die wesentlichen Ergebnisse der Versuche werden nachfolgend zusammengefasst:

Leistungsdaten

In beiden Durchgängen blieben die KM-Zunahmen der Tiere beider Versuchsgruppen deutlich hinter jenen der Kontrolle zurück. In der Ferkelaufzucht führte dies nach knapp fünf Wochen zu 11,5 (V1) bzw. 18,0 % (V2) geringeren Körpermassen; in der Mast waren die mittleren Körpermassen am Versuchsende um etwa 12,5 (V1) bzw. 19,7 % (V2) reduziert, wenn dem MF keine anorganische P-Quelle zugesetzt war. Über die gesamte Versuchsdauer unterschied sich der Futteraufwand in den drei Gruppen in keinem der Durchgänge signifikant.

Ca- und P-Konzentration sowie die Aktivität der alkalischen Phosphatase im Serum

In der Ferkelaufzucht (Durchgang 1, DG 1) war am d34 eine Differenzierung der drei Gruppen anhand der P-Konzentration im Serum möglich (**K**: $2,06 \pm 0,169$; **V1**: $1,65 \pm 0,082$; **V2**: $1,21 \pm 0,059$ mmol P/l). Im zweiten Durchgang (DG 2, Mast) gelang dies nach knapp sieben Wochen (**K**: $2,38 \pm 0,423$; **V1**: $1,65 \pm 0,111$; **V2**: $1,32 \pm 0,325$ mmol P/l), weitere fünf Wochen später aber nicht mehr. Die Reduktion der P-Konzentration im Serum ging zumeist mit höheren Ca-Konzentrationen sowie einer höheren Aktivität der AP im Serum einher.

Knochenentwicklung und –mineralisation

Insgesamt wurde die Knochenlänge nur wenig durch die unterschiedliche P-Versorgung beeinflusst. Die Tiere beider Versuchsgruppen wiesen jedoch eine deutlich reduzierte Kompakta-Dicke an verschiedenen Knochen auf (DG 1: bis zu 33 bzw. 43 % in V1 und V2; DG 2: bis zu 42 bzw. 49 % in V1 und V2). Die absoluten Massen der einzelnen Knochen waren bei jenen Ferkeln, die ein MF ohne P_i-Zusatz erhielten, um etwa 10 bis 14 % (V1) bzw. um etwa 16 bis 18 % (V2) geringer als bei den Kontrolltieren; bei den älteren Mastschweinen

Zusammenfassung

(DG 2) waren die Massen (absolut) von Knochen der Hintergliedmaße nach knapp zwölf Wochen um bis zu 22 (V1, dritter Metatarsalknochen) bzw. 27 % (V2, Femur) reduziert.

Verglichen mit den jeweils zu Versuchsbeginn untersuchten Tieren, wiesen die Tiere der Versuchsgruppe 2 in beiden Durchgängen stets eine geringere Knochendichte (archimedisches Prinzip) auf. In der Mast (DG 2) führte das P_i-freie MF ohne Phytase-Zusatz im Vergleich zum Kontrollfutter zu etwa 10 % geringeren Knochendichten. Mittels quantitativer Computertomografie waren im DG 1 an der Tibia nur in der Diaphyse signifikante Unterschiede nachweisbar (Gesamtdichte: 683 vs. 458 mg/mm³ in K und V2). In der Mast hingegen änderte sich die Bone Mineral Density stärker in den Epiphysen (bis zu 52 % geringer in V2 im Vgl. zur Kontrolle).

Die **chemische Zusammensetzung** spiegelte die unterschiedliche P-Versorgung von den verschiedenen Parametern am Knochen am deutlichsten wider; die Veränderungen waren dabei anhand der Ra-, Ca- und P-Gehalte in Bezug auf die fettfreie TS bzw. je cm³ am ausgeprägtesten. Die ohne P_i versorgten Absetzferkel wiesen um bis zu 39 % geringere Ra-Gehalte je cm³ auf; in Bezug auf die ffrTS waren die Ra-Gehalte um bis zu 24 % reduziert. Im DG 2 waren die Ra-Gehalte je cm³ in den Knochen der Kontrolltiere nach 82 Tagen zum Teil nahezu doppelt so hoch wie in den Knochen der Tiere aus Versuchsgruppe 2.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass bei einem Verzicht auf jeglichen Zusatz von mineralischem Phosphor im Mischfutter für die Ferkelaufzucht bzw. im MF für die eigentliche Mast, von erheblichen Risiken für die Skelettgesundheit auszugehen ist – und zwar auch unter der Voraussetzung, dass dem Mischfutter eine Phytase in üblicher Dosierung (500 FTU/kg MF) zugesetzt ist, ganz abgesehen von dem „worst case“-Szenario (Aktivitätsverluste der zugesetzten Phytase).

Unter standardisierten Bedingungen spiegelte die P-Konzentration im Serum die unterschiedliche P-Versorgung weitestgehend wider, insbesondere bei den jüngeren Tieren. An den Knochen beeinflusste die unterschiedliche P-Versorgung den Aschegehalt deutlicher als die Knochendichte (archimedisches Prinzip). Änderungen der Knochenzusammensetzung wiederum waren in Bezug auf die ffrTS sowie je cm³ deutlicher zu erkennen als bezogen auf die uS bzw. TS. Unter den Voraussetzungen dieser Studie erwiesen sich die Ra-Gehalte der distalen Femur-Epiphyse bei sehr jungen Tieren bzw. bei den älteren Tieren auch diejenigen der proximalen Tibia/Fibula-Epiphyse als besonders sensitive Indikatoren der P-Versorgung.

7 Summary

Rieger, Hanna

Effects of a different phosphorus supply on the development and mineralisation of several bones in growing pigs

Due to restrictive regulations for the phosphorus (P) application on agricultural production land and economic importance of adding certain P sources to compound feed, the P supply of pigs is often limited to levels exactly meeting their demands in order to prevent avoidable high P consumption and following –excretion.

For assessment of P supply in growing pigs, three different feeding concepts of weaned piglets (trial 1, approximately 15 to 35 kg body weight) and fattening pigs (trial 2, approximately 30 to 95 kg body weight) were tested to investigate different bone and blood parameters regarding their sensitivity for detecting P deficiency under standardised conditions and to acquire data for bone characteristics in growing pigs as comparative values.

In both trials the control group (C) was offered a diet containing monosodium phosphate as inorganic phosphorus (P_i) source and a phytase (500 FTU/kg). The total P content was 4.57 - 5.65 g/kg dry matter in the control diets for different feeding phases. Group 1 (G1) and 2 (G2) were fed botanically and, except the P content, chemically comparable compound feeds but without inorganic phosphorus. The total P content in the diets for these groups varied between 3.11 and 4.47 g P/kg dry matter. Whereas the diet for group 1 contained added phytase (equally to control diet: 500 FTU/kg) group 2 did neither receive P_i nor added phytase (“worst case” i. e. activity of added phytase was lost during feed production).

At the beginning of each trial four animals were euthanised to characterise bone properties without previous influence of the different P supply. In trial 1 a total of twelve piglets were allotted to the three treatments for nearly five weeks. At the end of the experiment all animals were dissected in order to acquire several fore and hind limb bones. Subsequently different measurements were conducted (including measurements of length, cortical thickness, bone density and chemical composition) using the bone *in toto* resp. one individual epiphyses in some cases. Trial 2 was performed with 36 fattening pigs. At approximately 45, 65 and 95 kg

Summary

body weight each twelve animals were euthanised and within dissection several hind limb bones were removed for analytical purposes (as mentioned above).

Major findings of the present study are summarised below:

Performance

During rearing as well as during the fattening period body weight gain remained lower in group 1 and 2 (no inorganic phosphorus in the diet) compared to the control group. After scarcely five weeks this resulted in 11.5 (G1) resp. 18.0 % (G2) lower final body weights in trial 1. At the end of trial 2 final body weights were reduced by about 12.5 (G1) and 19.7 % (G2) respectively. In none of the trials the feed conversion ratio over the whole period was significantly influenced by the different P supply.

Ca and P concentration as well as the activity of alkaline phosphatase (AP) in the serum

At the end of trial 1 serum P of all three groups differed significantly (C: 2.06 ± 0.169 , G1: 1.65 ± 0.082 , G2: 1.21 ± 0.059 mmol P/l). In trial 2 significant differences in this parameter between all three groups only existed after approximately seven weeks of different P supply (C: 2.38 ± 0.423 , G1: 1.65 ± 0.111 , G2: 1.32 ± 0.325 mmol P/l) whereas another five weeks later serum P concentration differed only significantly between C and G2. In general, the reduction in serum P was accompanied by higher serum Ca concentration as well as higher activity of AP in the serum.

Bone development and mineralisation

Overall, bone length was only slightly reduced in case of bare or insufficient P supply. In contrast, cortical thickness of several bones was markedly reduced in both group 1 and 2 compared to the control group (trial 1: up to 33 and 43 % in G1 and G2; trial 2: up to 42 and 49 % in G1 and G2). In weaned piglets (trial 1) offered a compound feed without P_i weights (absolute) of individual bones were approximately 10 to 14 % (G1) or 16 to 18 % (G2) lower than in control animals. In fattening pigs (trial 2) weight reduction at the end of the experiment was most distinct in the third metatarsal bone (up to 22 % in G1) and femur (up to 27 % in G2).

Compared to the four younger pigs euthanised before the start of each trial bone density (Archimedes principle) was constantly lower in pigs of group 1 in both trials. In trial 2 offering a diet neither containing P_i nor added phytase resulted in approximately 10 % lower

Summary

bone density at the end of the experiment compared to the control group. Bone mineral density (BMD) in tibiae of pigs measured via quantitative computer tomography in trial 1 only differed significantly in diaphyseal region (total BMD: 683 vs. 458 mg/mm³ in C and G2) whereas in trial 2 differences between groups were more severe in the epiphyseal region of the tibia (up to 52 % lower in G2 compared to C).

Considering all bone parameters investigated the different P supply was most precisely reflected by the chemical composition. Changes in Ca, P and bone ash contents were particularly obvious when related to fat-free dry matter or volume unit (cm³). Weaned piglets receiving neither P_i nor added phytase (group 2) showed a reduction in bone ash contents up to 39 (per cm³) or 24 % (in fat-free dry matter) respectively compared to the control group. At the end of trial 2 (after 82 days) bones of control animals partly contained twice as much ash per cm³ as the corresponding bones of animals from group 2.

To conclude, the results of this study demonstrate that rearing piglets as well as fattening pigs from 30 to 95 kg body weight without supplementating inorganic phosphorus to the diet was accompanied by a high risk for the skeletal health of pigs – even if phytase was added in common dosage (500 FTU/kg) to the compound feed. Not to mention the “worst case” scenario (reduction or even total loss of activity of added phytase).

Under standardised conditions serum P concentration did reflect the different P supply especially in the younger pigs. Chemical bone composition (ash content) was a more suitable indicator of the dietary P supply than the bone density (Archimedes principle). Moreover changes in chemical bone composition were more obvious when the data were based on the fat-free dry matter or cm³ than when they were related to fresh weight or dry matter. Therefore the drying and fat extraction before analysing the ash content is recommendable. Under the conditions of this study in very young piglets the ash content of the distal femur and in older individuals likewise of the proximal tibia/fibula were particularly sensitive indicators of P supply in growing pigs.

8 Literaturverzeichnis

ADEOLA, O., M. J. AZAIN, S. D. CARTER, T. D. CRENSHAW, M. J. ESTIENNE, B. J. KERR, M. D. LINDEMANN, C. V. MAXWELL, P. S. MILLER, M. C. SHANNON u. E. VAN HEUGTEN (2015):

A cooperative study on the standardized total-tract digestible phosphorus requirement of twenty-kilogram pigs.

J. Anim. Sci. 93, 5743-5753

ADEOLA, O., O. A. OLUKOSI, J. A. JENDZA, R. N. DILGER u. M. R. BEDFORD (2006):
Response of growing pigs to *Peniophora lycii*-and *Escherichia coli*-derived phytases or varying ratios of calcium to total phosphorus.

Anim. Sci. 82, 637-644

ADHIKARI, P., J. HEO u. C. NYACHOTI (2016):

High dose of phytase on apparent and standardized total tract digestibility of phosphorus and apparent total tract digestibility of calcium in canola meals from *Brassica napus* black and *Brassica juncea* yellow fed to growing pigs.

Can. J. Anim. Sci. 96, 121-127

AIYANGAR, A. K., A. G. AU, T. D. CRENSHAW u. H.-L. PLOEG (2010):

Recovery of bone strength in young pigs from an induced short-term dietary calcium deficit followed by a calcium replete diet.

Med. Eng. Phys. 32, 1116-1123

AJAKAIYE, A., M. Z. FAN, T. ARCHBOLD, R. R. HACKER, C. W. FORSBERG u. J. P. PHILLIPS (2003):

Determination of true digestive utilization of phosphorus and the endogenous phosphorus outputs associated with soybean meal for growing pigs.

J. Anim. Sci. 81, 2766-2775

ALEXANDER, L. S., A. MAHAJAN, J. ODLE, K. L. FLANN, R. P. RHOADS u. C. H. STAHL (2010):

Dietary phosphate restriction decreases stem cell proliferation and subsequent growth potential in neonatal pigs.

J. Nutr. 140, 477-482

ALEXANDER, L. S., A. QU, S. A. CUTLER, A. MAHAJAN, S. M. LONERGAN, M. F. ROTHSCHILD, T. E. WEBER, B. J. KERR u. C. H. STAHL (2008):

Response to dietary phosphorus deficiency is affected by genetic background in growing pigs.

J. Anim. Sci. 86, 2585-2595

ALMEIDA, F. N., u. H. H. STEIN (2010):

Performance and phosphorus balance of pigs fed diets formulated on the basis of values for standardized total tract digestibility of phosphorus.

J. Anim. Sci. 88, 2968-2977

ALMEIDA, F. N., R. C. SULABO u. H. H. STEIN (2013):
Effects of a novel bacterial phytase expressed in *Aspergillus Oryzae* on digestibility of calcium and phosphorus in diets fed to weanling or growing pigs.
J. Anim. Sci. Biotechnol. 4, 1-10

ARLINGHAUS, M. (2013):
Auswirkungen der Mischfutterstruktur (Vermahlung/Konfektionierung) auf die Verdaulichkeit von Nährstoffen sowie anatomisch-morphologische und histologische Parameter im Magen-Darm-Trakt junger Schweine.
Hannover, Stiftung Tierärztliche Hochschule, Diss.

AUBEL, C. E., J. S. HUGHES u. H. F. LIENHARDT (1936):
The effects of low-phosphorus rations on growing pigs.
J. Agric. Res. 52, 149-159

AUGAT, P., H. REEB u. L. E. CLAES (1996):
Prediction of fracture load at different skeletal sites by geometric properties of the cortical shell.
J. Bone Miner. Res. 11, 1356-1363

AUGSPURGER, N. R., D. M. WEBEL, X. G. LEI u. D. H. BAKER (2003):
Efficacy of an phytase expressed in yeast for releasing phytate-bound phosphorus in young chicks and pigs.
J. Anim. Sci. 81, 474-483

AUSSCHUSS FÜR BEDARFSNORMEN DER GESELLSCHAFT FÜR ERNÄHRUNGSPHYSIOLOGIE (2006):
Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Schweinen.
1. Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt/Main

BAUER, W., J. C. AUB u. F. ALBRIGHT (1929):
Studies of calcium and phosphorus metabolism. V. A study of the bone trabeculae as a readily available reserve supply of calcium.
J. Exp. Med. 49, 145-162

BAXTER, C. A., B. C. JOERN, D. RAGLAND, J. S. SANDS u. O. ADEOLA (2003):
Phytase, high-available-phosphorus corn, and storage effects on phosphorus levels in pig excreta.
J. Environ. Qual. 32, 1481-1489

BAYLEY, H. S., J. POS u. R. G. THOMSON (1975):
Influence of steam pelleting and dietary calcium level on the utilization of phosphorus by the pig.
J. Anim. Sci. 40, 857-863

- BAYLEY, H. S., u. R. G. THOMSON (1969):
Phosphorus requirements of growing pigs and effect of steam pelleting on phosphorus availability.
J. Anim. Sci. 28, 484-491
- BAYLINK, D., J. WERGEDAL u. M. STAUFFER (1971):
Formation, mineralization, and resorption of bone in hypophosphatemic rats.
J. Clin. Invest. 50, 2519
- BIKKER, P., H. VAN LAAR, V. SIPS, C. WALVOORT u. W. J. J. GERRITS (2016):
Basal endogenous phosphorus losses in pigs are affected by both body weight and feeding level.
J. Anim. Sci. 94, 294-297
- BLAIR, R., J. R. B. DIACK u. R. M. MACPHERSON (1963):
Bone development in suckled pigs.
Br. J. Nutr. 17, 19-29
- BOHLKE, R. A., R. C. THALER u. H. H. STEIN (2005):
Calcium, phosphorus, and amino acid digestibility in low-phytate corn, normal corn, and soybean meal by growing pigs.
J. Anim. Sci. 83, 2396-2403
- BOLING, S. D., D. M. WEBEL, I. MAVROMICHALIS, C. M. PARSONS u. D. H. BAKER (2000):
The effects of citric acid on phytate-phosphorus utilization in young chicks and pigs.
J. Anim. Sci. 78, 682-689
- BONJOUR, J.-P., H. FLEISCH u. U. TRECHSEL (1977):
Calcium absorption in diphosphonate-treated rats: Effect of parathyroid function, dietary calcium and phosphorus.
J. Physiol. 264, 125-139
- BOURNE, G., u. M. MACKINNON (1943):
The distribution of alkaline phosphatase in various tissues.
Q. J. Exp. Physiol. Cogn. Med. Sci. 32, 1-20
- BOYD, R. D., D. HALL u. J. F. WU (1983):
Plasma Alkaline Phosphatase as a Criterion for Determining Biological Availability of Phosphorus for Swine.
J. Anim. Sci. 57, 396-401
- BRADY, S. M., J. J. CALLAN, D. COWAN, M. MCGRANE u. J. V. O'DOHERTY (2002):
Effect of phytase inclusion and calcium/phosphorus ratio on the performance and nutrient retention of grower–finisher pigs fed barley/wheat/soya bean meal-based diets.
J. Sci. Food Agric. 82, 1780-1790

- BRAÑA, D. V., M. ELLIS, E. O. CASTAÑEDA, J. S. SANDS u. D. H. BAKER (2006):
Effect of a novel phytase on growth performance, bone ash, and mineral digestibility in nursery and grower-finisher pigs.
J. Anim. Sci. 84, 1839-1849
- BRANDAO-BURCH, A., J. C. UTTING, I. R. ORRISS u. T. R. ARNETT (2005):
Acidosis inhibits bone formation by osteoblasts in vitro by preventing mineralization.
Calcif. Tissue Int. 77, 167-174
- BREDELLA, M. A., M. TORRIANI, R. H. GHOMI, B. J. THOMAS, D. J. BRICK, A. V. GERWECK, C. J. ROSEN, A. KLIBANSKI u. K. K. MILLER (2011):
Vertebral bone marrow fat is positively associated with visceral fat and inversely associated with IGF-1 in obese women.
Obesity 19, 49-53
- BREUR, G. J., B. A. VANENKEVORT, C. E. FARNUM u. N. J. WILSMAN (1991):
Linear relationship between the volume of hypertrophic chondrocytes and the rate of longitudinal bone growth in growth plates.
J. Orthop. Res. 9, 348-359
- BRUININX, E. M., C. M. VAN DER PEET-SCHWERING, J. W. SCHRAMA, P. F. VEREIJKEN, P. C. VESSEUR, H. EVERTS, L. A. DEN HARTOG u. A. C. BEYNEN (2001):
Individually measured feed intake characteristics and growth performance of group-housed weanling pigs: effects of sex, initial body weight, and body weight distribution within groups.
J. Anim. Sci. 79, 301-308
- BUDDE, R. A., u. T. D. CRENSHAW (2003):
Chronic metabolic acid load induced by changes in dietary electrolyte balance increased chloride retention but did not compromise bone in growing swine.
J. Anim. Sci. 81, 197-208
- BÜHLER, K., A. LIESEGANG, B. BUCHER, C. WENK u. J. BROZ (2010):
Influence of benzoic acid and phytase in low-phosphorus diets on bone characteristics in growing-finishing pigs.
J. Anim. Sci. 88, 3363-3371
- BURNELL, J. M., E. J. TEUBNER u. A. G. MILLER (1980):
Normal maturational changes in bone matrix, mineral, and crystal size in the rat.
Calcif. Tissue Int. 31, 13-19
- CARTER, S. D., G. L. CROMWELL, T. R. COMBS, G. COLOMBO u. P. FANTI (1996):
The determination of serum concentrations of osteocalcin in growing pigs and its relationship to end-measures of bone mineralization.
J. Anim. Sci. 74, 2719-2729

Literaturverzeichnis

CERA, K. R., u. D. C. MAHAN (1988):

Effect of dietary calcium and phosphorus level sequences on performance, structural soundness and bone characteristics of growing-finishing swine.

J. Anim. Sci. 66, 1598-1605

CHAPMAN, H. L., J. KASTELIC, G. C. ASHTON, P. G. HOMEYER, C. Y. ROBERTS, D. V. CATRON, V. W. HAYS u. V. C. SPEER (1962):

Calcium and phosphorus requirements of growing-finishing swine.

J. Anim. Sci. 21, 112-118

CHURCH, L. E., u. L. C. JOHNSON (1964):

Growth of long bones in the chicken. Rates of growth in length and diameter of the humerus, tibia, and metatarsus.

Am. J. Anat. 114, 521-538

COALSON, J. A., C. V. MAXWELL, J. C. HILLIER, R. D. WASHAM u. E. C. NELSON (1972):

Calcium and phosphorus requirements of young pigs reared under controlled environmental conditions.

J. Anim. Sci. 35, 1194-1200

COLUMBUS, D., C. L. ZHU, J. R. PLUSKE u. C. F. M. DE LANGE (2010):

Body weight gain and nutrient utilization in starter pigs that are liquid-fed high-moisture corn-based diets supplemented with phytase.

Can. J. Anim. Sci. 90, 45-55

COMBS, G. E., J. M. VANDEPOPULIERE, H. D. WALLACE u. M. KOGER (1962):

Phosphorus requirement of young pigs.

J. Anim. Sci. 21, 3-8

COMBS, N. R., E. T. KORNEGAY, M. D. LINDEMANN, D. R. NOTTER, J. H. WILSON u. J. P. MASON (1991):

Calcium and phosphorus requirement of swine from weaning to market weight: II. Development of response curves for bone criteria and comparison of bending and shear bone testing.

J. Anim. Sci. 69, 682-693

COOPER, C. A., L. E. MORAES, J. D. MURRAY u. S. D. OWENS (2014):

Hematologic and biochemical reference intervals for specific pathogen free 6-week-old Hampshire-Yorkshire crossbred pigs.

J. Anim. Sci. Biotechnol. 5, 1-5

CRENSHAW, T. D. (1986):

Reliability of dietary Ca and P levels and bone mineral content as predictors of bone mechanical properties at various time periods in growing swine.

J. Nutr. 116, 2155-2170

- CRENSHAW, T. D., L. E. HOFFMAN, J. R. DANIELSON u. D. K. SCHNEIDER (2009):
Femurs are more accurate than fibulas as predictors of whole body bone mineral content in growing pigs.
J. Anim. Sci. 87, E-Suppl. 2, 510
- CRENSHAW, T. D., E. R. PEO, A. J. LEWIS, B. D. MOSER u. D. OLSON (1981):
Influence of age, sex and calcium and phosphorus levels on the mechanical properties of various bones in swine.
J. Anim. Sci. 52, 1319-1329
- CRENSHAW, T. D., u. L. A. RORTVEDT-AMUNDSON (2014):
Nutritionally induced cellular signals that affect skeletal integrity in swine.
In: Proc. 23rd IPVS Congress, Cancun, México, S. 8-11
- CRENSHAW, T. D., D. K. SCHNEIDER, C. S. CARLSON, J. B. PARKER, J. P. SONDERMAN, T. L. WARD u. M. E. WILSON (2013):
Tissue mineral concentrations and osteochondrosis lesions in prolific sows across parities 0 through 7.
J. Anim. Sci. 91, 1255-1269
- CROMWELL, G. L., R. D. COFFEY, G. R. PARKER, H. J. MONEGUE u. J. H. RANDOLPH (1995):
Efficacy of a recombinant-derived phytase in improving the bioavailability of phosphorus in corn-soybean meal diets for pigs.
J. Anim. Sci. 73, 2000-2008
- CROMWELL, G. L., V. W. HAYS, C. H. CHANEY u. J. R. OVERFIELD (1970):
Effects of dietary phosphorus and calcium level on performance, bone mineralization and carcass characteristics of swine.
J. Anim. Sci. 30, 519-525
- CROMWELL, G. L., V. W. HAYS, C. W. SCHERER u. J. R. OVERFIELD (1972):
Effects of dietary calcium and phosphorus on performance and carcass, metacarpal and turbinate characteristics of swine.
J. Anim. Sci. 34, 746-751
- CUISINIER-GLEIZES, P., M. THOMASSET, F. SAINTENY-DEBOVE u. H. MATHIEU (1976):
Phosphorus deficiency, parathyroid hormone and bone resorption in the growing rat.
Calcif. Tissue Res. 20, 235-249
- DAŞ, G., A. VERNUNFT, S. GÖRS, E. KANITZ, J. WEITZEL, K.-P. BRÜSSOW u. C. METGES (2016):
Effects of general anesthesia with ketamine in combination with the neuroleptic sedatives xylazine or azaperone on plasma metabolites and hormones in pigs.
J. Anim. Sci. 94, 3229-3239

Literaturverzeichnis

DE JONG, I. C., E. D. EKKEL, J. A. VAN DE BURG WAL, E. LAMBOOIJ, S. M. KORTE, M. A. RUIS, J. M. KOOLHAAS u. H. J. BLOKHUIS (1998):
Effects of strawbedding on physiological responses to stressors and behavior in growing pigs.
Physiol. Behav. 64, 303-310

DENIS, I., E. ZERATH u. A. POINTILLART (1994):
Effects of exogenous growth hormone on bone mineralization and remodeling and on plasma calcitriol in intact pigs.
Bone 15, 419-424

DOIGE, C. E., B. D. OWEN u. J. H. L. MILLS (1975):
Influence of calcium and phosphorus on growth and skeletal development of growing swine.
Can. J. Anim. Sci. 55, 147-164

DOORNENBAL, H., A. K. W. TONG, A. H. MARTIN u. A. P. SATHER (1983):
Studies on the performance, development and carcass composition of the growing pig: Effects of sex, feeding regime and age on blood serum parameters.
Can. J. Anim. Sci. 63, 977-984

DREWS, J. E., D. HAESE, J. L. KILL, L. L. LORENZONI, R. B. PIMENTEL, J. P. MOLINO, A. SARAIVA u. C. D. Á. POSSATTI (2016):
Phosphorus on performance, hematological, biochemical, and bone parameters of growing pigs.
Cienc. Rural. 46, 1076-1081

DUBREUIL, P., Y. COUTURE, C. FARMER u. D. PETITCLERC (1993):
Hematological and biochemical changes following an acute stress in control and somatostatin-immunized pigs.
Can. J. Anim. Sci. 73, 241-252

DUBREUIL, P., Y. COUTURE, A. TREMBLAY u. G. P. MARTINEAU (1990):
Effects of experimenters and different blood sampling procedures on blood metabolite values in growing pigs.
Can. J. Vet. Res. 54, 379-382

DUBREUIL, P., u. H. LAPIERRE (1997):
Biochemistry reference values for Quebec lactating dairy cows, nursing sows, growing pigs and calves.
Can. J. Vet. Res. 61, 235-239

EECKHOUT, M. (2000):
Phytase quality suffers from steam pelleting and storage temperature.
Feed. Tech. 4, 18-21

EECKHOUT, W., u. M. DE PAEPE (1994):
Total phosphorus, phytate-phosphorus and phytase activity in plant feedstuffs.
Anim. Feed Sci. Technol. 47, 19-29

- EECKHOUT, W., M. DE PAEPE, N. WARNANTS u. H. BEKAERT (1995):
An estimation of the minimal P requirements for growing-finishing pigs, as influenced by the Ca level of the diet.
Anim. Feed Sci. Technol. 52, 29-40
- EKLOU-KALONJI, E., E. ZERATH, C. COLIN, C. LACROIX, X. HOLY, I. DENIS u. A. POINTILLART (1999):
Calcium-regulating hormones, bone mineral content, breaking load and trabecular remodeling are altered in growing pigs fed calcium-deficient diets.
J. Nutr. 129, 188-193
- ELKMANN, A., u. S. HOY (2008):
Untersuchungen zum Beschäftigungsverhalten von weiblichen und kastrierten männlichen Mastschweinen.
Arch. Tierz. 51, 458-466
- ENGSTROM, G. W., R. L. HORST, T. A. REINHARDT u. E. T. LITLEDIKE (1985):
Effect of dietary phosphorus levels on porcine renal 25-hydroxyvitamin D-1 α - and 24R-hydroxylase activities and plasma 1, 25-dihydroxyvitamin D₃ concentration.
J. Anim. Sci. 60, 1005-1011
- FAMMATRE, C. A., D. C. MAHAN, A. W. FETTER, A. P. GRIFO u. J. K. JUDY (1977):
Effects of dietary protein, calcium and phosphorus levels for growing and finishing swine.
J. Anim. Sci. 44, 65-71
- FARNUM, C. E., u. N. J. WILSMAN (1989):
Condensation of hypertrophic chondrocytes at the chondro-osseous junction of growth plate cartilage in Yucatan swine: Relationship to long bone growth.
Am. J. Anat. 186, 346-358
- FAUSTINI, M., E. MUNARI, C. COLOMBANI, V. RUSSO, G. MAFFEO u. D. VIGO (2000):
Haematology and Plasma Biochemistry of Stamboek Pre-pubertal Gilts in Italy: Reference Values.
J. Vet. Med. A 47, 525-532
- FELSENFELD, A. J., A. JARA, G. AVEDIAN u. C. R. KLEEMAN (2000):
Effects of fasting, feeding, and bisphosphonate administration on serum calcitriol levels in phosphate-deprived rats.
Kidney Int. 58, 1016-1022
- FERNÁNDEZ, J. A. (1995):
Calcium and phosphorus metabolism in growing pigs. II. Simultaneous radio-calcium and radio-phosphorus kinetics.
Livestock Production Science 41, 243-254

FIELD, R. A., M. L. RILEY, F. C. MELLO, J. H. CORBRIDGE u. A. W. KOTULA (1974):
Bone composition in cattle, pigs, sheep and poultry.
J. Anim. Sci. 39, 493-499

FLOHR, J. R., M. D. TOKACH, S. S. DRITZ, J. M. DEROUCHÉY, R. D. GOODBAND, J. L. NELSEN, S. C. HENRY, L. M. TOKACH, M. L. POTTER, J. P. GOFF, N. J. KOSZEWSKI, R. L. HORST, E. L. HANSEN u. E. D. FRUGE (2014):
Effects of supplemental vitamin D₃ on serum 25-hydroxycholecalciferol and growth of preweaning and nursery pigs.
J. Anim. Sci. 92, 152-163

FORSBERG, C. W., R. G. MEIDINGER, A. AJAKAIYE, D. MURRAY, M. Z. FAN, I. B. MANDELL u. J. P. PHILLIPS (2014):
Comparative carcass and tissue nutrient composition of transgenic Yorkshire pigs expressing phytase in the saliva and conventional Yorkshire pigs.
J. Anim. Sci. 92, 4417-4439

FORSYTH, D. M., W. G. POND, R. H. WASSERMAN u. L. KROOK (1972):
Dietary calcium and fluoride interactions in swine: effects on physical and chemical bone characteristics, calcium binding protein and histology of adults.
J. Nutr. 102, 1623-1637

FRIENDSHIP, R. M., J. H. LUMSDEN, I. MCMILLAN u. M. R. WILSON (1984):
Hematology and biochemistry reference values for Ontario swine.
Can. J. Comp. Med. 48, 390-393

FRIESEN, K. G., J. L. NELSEN, J. A. UNRUH, R. D. GOODBAND u. M. D. TOKACH (1994):
Effects of the interrelationship between genotype, sex, and dietary lysine on growth performance and carcass composition in finishing pigs fed to either 104 or 127 kilograms.
J. Anim. Sci. 72, 946-954

FRITZ, K. J. J. (2011):
Effekte einer Nährstoffergänzung (Vit. D₃ / Ca, P) über das Tränkwasser auf den Vit. D₃-, Ca-, und P-Haushalt von Broilern bei Einsatz eines üblichen Alleinfutters.
Hannover, Stiftung Tierärztliche Hochschule, Diss.

GERICKE, S., u. B. KURMIES (1952):
Colorimetrische Bestimmung der Phosphorsäure mit Vanadat-Molybdat.
Fres. J. Anal. Chem. 137, 15-22

GIESEMANN, M. A., A. J. LEWIS, P. S. MILLER u. M. P. AKHTER (1998):
Effects of the reproductive cycle and age on calcium and phosphorus metabolism and bone integrity of sows.
J. Anim. Sci. 76, 796-807

GILES, L. R., G. J. EAMENS, P. F. ARTHUR, I. M. BARCHIA, K. J. JAMES u. R. D. TAYLOR (2009):

Differential growth and development of pigs as assessed by X-ray computed tomography.
J. Anim. Sci. 87, 1648-1658

GONZÁLEZ-VEGA, J. C., C. L. WALK, M. R. MURPHY u. H. H. STEIN (2016):

Requirement for digestible calcium by 25 to 50 kg pigs at different dietary concentrations of phosphorus as indicated by growth performance, bone ash concentration, and calcium and phosphorus balances.
J. Anim. Sci. 94, 5272-5285

GÖTTING, C. M. (2006):

Untersuchungen zu Parametern des Calcium-und Phosphor-Stoffwechsels von Puten im Verlauf der Mast.

Hannover, Stiftung Tierärztliche Hochschule, Diss.

GOYAL, H. O., F. J. MACCALLUM, M. P. BROWN u. J. B. DELACK (1981):

Growth rates at the extremities of limb bones in young horses.
The Canadian Veterinary Journal 22, 31

GRAFMEYER, D., M. BONDON, M. MANCHON u. P. LEVILLAIN (1995):

The influence of bilirubin, haemolysis and turbidity on 20 analytical tests performed on automatic analysers.

Eur. J. Clin. Chem. Clin. Biochem. 33, 31-52

GRANDHI, R. R., A. B. THORNTON-TRUMP u. C. E. DOIGE (1986):

Influence of dietary calcium-phosphorus levels on certain mechanical, physical and histological properties and chemical composition of bones in gilts and second litter sows.
Can. J. Anim. Sci. 66, 495-503

GREINER, R., u. I. EGLI (2003):

Determination of the activity of acidic phytate-degrading enzymes in cereal seeds.
J. Agric. Food Chem. 51, 847-850

GROLL, O., E.-M. LOCHMÜLLER, M. BACHMEIER, J. WILLNECKER u. F. ECKSTEIN (1999):

Precision and intersite correlation of bone densitometry at the radius, tibia and femur with peripheral quantitative CT.

Skeletal Radiol. 28, 696-702

GU, Y., A. P. SCHINCKEL u. T. G. MARTIN (1992):

Growth, development, and carcass composition in five genotypes of swine.
J. Anim. Sci. 70, 1719-1729

GUGGENBUHL, P., D. TORRALLARDONA, I. CECHOVA, N. C. SIMÕES, Y. WACHÉ, F. FRU u. J. BROZ (2012):

The efficacy of a novel microbial 6-phytase expressed in *Aspergillus oryzae* on the performance and phosphorus utilization in swine.

J. Anim. Sci. Adv. 2, 438-452

GUTZWILLER, A., H. D. HESS, A. ADAM, D. GUGGISBERG, A. LIESEGANG u. P. STOLL (2011):

Effects of a reduced calcium, phosphorus and protein intake and of benzoic acid on calcium and phosphorus metabolism of growing pigs.

Anim. Feed Sci. Technol. 168, 113-121

GUTZWILLER, A., P. SCHLEGEL, D. GUGGISBERG u. P. STOLL (2014):

Effects of benzoic acid and dietary calcium:phosphorus ratio on performance and mineral metabolism of weanling pigs.

Asian-australas. J. Anim. Sci. 27, 530-536

HAGEMOSER, W. A., J. P. GOFF, T. P. SANDERSON u. J. S. HAYNES (2000):

Osteopenic disease in growing pigs: Diagnostic methods using serum and urine calcium and phosphorus values, parathormone assay, and bone analysis.

J. Vet. Diagn. Invest. 12, 525-534

HAN, Y. M., K. R. RONEKER, W. G. POND u. X. G. LEI (1998):

Adding wheat middlings, microbial phytase, and citric acid to corn-soybean meal diets for growing pigs may replace inorganic phosphorus supplementation.

J. Anim. Sci. 76, 2649-2656

HARPER, A. F., E. T. KORNEGAY u. T. C. SCHELL (1997):

Phytase supplementation of low-phosphorus growing-finishing pig diets improves performance, phosphorus digestibility, and bone mineralization and reduces phosphorus excretion.

J. Anim. Sci. 75, 3174-3186

HASTAD, C. W., S. S. DRITZ, M. D. TOKACH, R. D. GOODBAND, J. L. NELSEN, J. M. DEROUCHÉY, R. D. BOYD u. M. E. JOHNSTON (2004):

Phosphorus requirements of growing-finishing pigs reared in a commercial environment.

J. Anim. Sci. 82, 2945-2952

HEYER, C. M. E., E. WEISS, S. SCHMUCKER, M. RODEHUTSCORD, L. E. HOELZLE, R. MOSENTHIN u. V. STEFANSKI (2015):

The impact of phosphorus on the immune system and the intestinal microbiota with special focus on the pig.

Nutr. Res. Rev. 28, 67-82

HINSON, R. B., A. P. SCHINCKEL, J. S. RADCLIFFE, G. L. ALLEE, A. L. SUTTON u. B. T. RICHERT (2009):

Effect of feeding reduced crude protein and phosphorus diets on weaning-finishing pig growth performance, carcass characteristics, and bone characteristics.

J. Anim. Sci. 87, 1502-1517

HODSON, A. W., A. L. LATNER u. L. RAINE (1962):

Iso-enzymes of alkaline phosphatase.

Clin. Chim. Acta 7, 255-261

HOPPE, P. P., F. J. SCHÖNER, H. WIESCHE, G. SCHWARZ u. S. SAFER (1993):

Phosphorus equivalency of *Aspergillus-niger*-phytase for piglets fed a grain-soybean-meal diet.

J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 69, 225-234

HUMANN-ZIEHANK, E., u. M. GANTER (2012):

Pre-analytical factors affecting the results of laboratory blood analyses in farm animal veterinary diagnostics.

Animal 6, 1115-1123

IGBASAN, F. A., K. MÄNNER, G. MIKSCH, R. BORRISS, A. FAROUK u. O. SIMON (2000):

Comparative studies on the in vitro properties of phytases from various microbial origins.

Arch. Anim. Nutr. 53, 353-373

JENDZA, J. A., R. N. DILGER, J. S. SANDS u. O. ADEOLA (2006):

Efficacy and equivalency of an-derived phytase for replacing inorganic phosphorus in the diets of broiler chickens and young pigs.

J. Anim. Sci. 84, 3364-3374

JIANG, G.-Z., H. MATSUMOTO, M. HORI, A. GUNJI, K. HAKOZAKI, Y. AKIMOTO u. A. FUJII (2008):

Correlation among geometric, densitometric, and mechanical properties in mandible and femur of osteoporotic rats.

J. Bone Miner. Metab. 26, 130-137

JONGBLOED, A. W., u. P. A. KEMME (1990):

Effect of pelleting mixed feeds on phytase activity and the apparent absorbability of phosphorus and calcium in pigs.

Anim. Feed Sci. Technol. 28, 233-242

JONGBLOED, A. W., Z. MROZ u. P. A. KEMME (1992):

The effect of supplementary *Aspergillus niger* phytase in diets for pigs on concentration and apparent digestibility of dry matter, total phosphorus, and phytic acid in different sections of the alimentary tract.

J. Anim. Sci. 70, 1159-1168

KAMPHUES, J. (2012):

Kontrolle der Phosphor-Versorgung von Schweinen vor Ort.

In: J. KAMPHUES und P. WOLF (Hrsg.): Tierernährung für Tierärzte - Gesundheit und Leistung von Schweinen unter dem Einfluss von Futter und Fütterung.

Hannover 2012, S. 37-44

- KANNUS, P., H. HAAPASALO, H. SIEVÄNEN, P. OJA u. I. VUORI (1994):
The site-specific effects of long-term unilateral activity on bone mineral density and content.
Bone 15, 279-284
- KAY, H. D. (1929):
Plasma phosphatase in osteitis deformans and in other diseases of bone.
Br. J. Exp. Pathol. 10, 253-256
- KEENAN, M. J., M. HEGSTED, K. L. JONES, J. P. DELANY, J. C. KIME, L. E. MELANCON, R. T. TULLEY u. K. D. HONG (1997):
Comparison of bone density measurement techniques: DXA and Archimedes' principle.
J. Bone Miner. Res. 12, 1903-1907
- KEGLEY, E. B., J. W. SPEARS u. S. K. AUMAN (2001):
Dietary phosphorus and an inflammatory challenge affect performance and immune function of weanling pigs.
J. Anim. Sci. 79, 413-419
- KEMME, P. A., A. W. JONGBLOED, Z. MROZ u. A. C. BEYNEN (1997):
The efficacy of *Aspergillus niger* phytase in rendering phytate phosphorus available for absorption in pigs is influenced by pig physiological status.
J. Anim. Sci. 75, 2129-2138
- KETAREN, P. P., E. S. BATTERHAM, E. WHITE, D. J. FARRELL u. B. K. MILTHORPE (1993):
Phosphorus studies in pigs: 1. Available phosphorus requirements of grower/finisher pigs.
Br. J. Nutr. 70, 249-268
- KIES, A. K., W. J. J. GERRITS, J. W. SCHRAMA, M. J. W. HEETKAMP, K. L. VAN DER LINDEN, T. ZANDSTRA u. M. W. A. VERSTEGEN (2005):
Mineral absorption and excretion as affected by microbial phytase, and their effect on energy metabolism in young piglets.
J. Nutr. 135, 1131-1138
- KIES, A. K., P. A. KEMME, L. B. J. ŠEBEK, J. T. M. VAN DIEPEN u. A. W. JONGBLOED (2006):
Effect of graded doses and a high dose of microbial phytase on the digestibility of various minerals in weaner pigs.
J. Anim. Sci. 84, 1169-1175
- KIRCHNER, R. (2015):
Laboruntersuchungen zur Charakterisierung des im Futter für Schweine und Nutzgeflügel enthaltenen Phosphors anhand seiner Löslichkeit im wässrigen und salzsauren Medium.
Hannover, Stiftung Tierärztliche Hochschule, Diss.
- KIXMÖLLER, M. (2004):

Labordiagnostische Referenzbereiche bei unterschiedlichen Schweinerassen sowie histopathologische und immunhistochemische Untersuchung von Gehirnen älterer Sauen und Eber auf transmissible spongiforme Enzephalopathie im Rahmen der TSE-Studie.
München, Tierärztliche Fakultät, Diss.

KLEM, T. B., E. BLEKEN, H. MORBERG, S. I. THORESEN u. T. FRAMSTAD (2010):
Hematologic and biochemical reference intervals for Norwegian crossbreed grower pigs.
Vet. Clin. Pathol. 39, 221-226

KOCH, M. E., u. D. C. MAHAN (1985):
Biological characteristics for assessing low phosphorus intake in growing swine.
J. Anim. Sci. 60, 699-708

KOCH, M. E., u. D. C. MAHAN (1986):
Biological characteristics for assessing low phosphorus intake in finishing swine.
J. Anim. Sci. 62, 163-172

KOCH, M. E., D. C. MAHAN u. J. R. CORLEY (1984):
An evaluation of various biological characteristics in assessing low phosphorus intake in weanling swine.
J. Anim. Sci. 59, 1546-1556

KORNEGAY, E. T., J. L. EVANS u. V. RAVINDRAN (1994):
Effects of diet acidity and protein level or source of calcium on the performance, gastrointestinal content measurements, bone measurements, and carcass composition of gilt and barrow weanling pigs.
J. Anim. Sci. 72, 2670-2680

KORNEGAY, E. T., u. H. QIAN (1996):
Replacement of inorganic phosphorus by microbial phytase for young pigs fed on a maize–soyabean-meal diet.
Br. J. Nutr. 76, 563-578

KORNEGAY, E. T., u. H. R. THOMAS (1981):
Phosphorus in swine. II. Influence of dietary calcium and phosphorus levels and growth rate on serum minerals, soundness scores and bone development in barrows, gilts and boars.
J. Anim. Sci. 52, 1049-1059

KRUSEMARK, L. L., J. BOOMGAARDT, B. G. HARMON u. J. J. B. ANDERSON (1974):
Distribution of injected ⁸⁵SR in tissues and bones of growing pigs.
J. Anim. Sci. 39, 331-334

KÜSTER, F. W., A. THIEL, K. FISCHBACH u. A. RULAND (1993):
Dichte von Wasser.
In: A. RULAND (Hrsg.): Rechentafeln für die chemische Analytik.
104. bearb. Aufl., Verlag Walter de Gruyter & Co., Berlin/New York, S. 204

Literaturverzeichnis

- LAIRD, S., I. KÜHN, P. WILCOCK u. H. M. MILLER (2016):
The effects of phytase on grower pig growth performance and ileal inositol phosphate degradation.
J. Anim. Sci. 94, 142-145
- LAMOUREUX, J. L., S. D. FITZGERALD, M. K. CHURCH u. D. W. AGNEW (2011):
The effect of environmental storage conditions on bone marrow fat determination in three species.
J. Vet. Diagn. Invest. 23, 312-315
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (2016):
Weniger Phosphor im Getreide?
<https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/1/nav/753/article/23547.html>
Zugriff: 01.08.2016
- LEGROS, R., N. BALMAIN u. G. BONEL (1987):
Age-related changes in mineral of rat and bovine cortical bone.
Calcif. Tissue Int. 41, 137-144
- LEI, X. G., P. K. KU, E. R. MILLER, M. T. YOKOYAMA u. D. E. ULLREY (1994):
Calcium level affects the efficacy of supplemental microbial phytase in corn-soybean meal diets of weanling pigs.
J. Anim. Sci. 72, 139-143
- LEIP, A., G. BILLEN, J. GARNIER, B. GRIZZETTI, L. LASSALETTA, S. REIS, D. SIMPSON, M. A. SUTTON, W. DE VRIES, F. WEISS u. H. WESTHOEK (2015):
Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity.
Environ. Res. Lett. 10, 1-13
- LEMANN, J., JR, J. R. LITZOW u. E. J. LENNON (1967):
Studies of the mechanism by which chronic metabolic acidosis augments urinary calcium excretion in man.
J. Clin. Invest. 46, 1318-1328
- LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P., C. JONDREVILLE, D. SAUVANT u. A. NARCY (2012):
Meta-analysis of phosphorus utilization by growing pigs: Effect of dietary phosphorus, calcium and exogenous phytase.
Animal 6, 1590-1600
- LÉTOURNEAU-MONTMINY, M. P., P. A. LOVATTO u. C. POMAR (2014):
Apparent total tract digestibility of dietary calcium and phosphorus and their efficiency in bone mineral retention are affected by body mineral status in growing pigs.
J. Anim. Sci. 92, 3914-3924
- LIESEGANG, A., E. BÜRGI, M. L. SASSI, J. RISTELI u. M. WANNER (2002a):

Literaturverzeichnis

Influence of a vegetarian diet versus a diet with fishmeal on bone in growing pigs.
J. Vet. Med. A 49, 230-238

LIESEGANG, A., L. LOCH, E. BÜRGI u. J. RISTELI (2005):
Influence of phytase added to a vegetarian diet on bone metabolism in pregnant and lactating sows.
J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 89, 120-128

LIESEGANG, A., R. URSPRUNG, J. GASSER, M. L. SASSI, J. RISTELI, J. L. RIOND u. M. WANNER (2002b):
Influence of dietary phosphorus deficiency with or without addition of fumaric acid to a diet in pigs on bone parameters.
J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 86, 1-16

LIPPI, G., G. LUCA SALVAGNO, M. MONTAGNANA, G. BROCCO u. G. CESARE GUIDI (2006):
Influence of hemolysis on routine clinical chemistry testing.
Clin. Chem. Lab. Med. 44, 311-316

LIU, J., D. W. BOLLINGER, D. R. LEDOUX u. T. L. VENUM (2000):
Effects of dietary calcium:phosphorus ratios on apparent absorption of calcium and phosphorus in the small intestine, cecum, and colon of pigs.
J. Anim. Sci. 78, 106-109

LIU, M. F., P. HE, F. X. AHERNE u. R. T. BERG (1999):
Postnatal limb bone growth in relation to live weight in pigs from birth to 84 days of age.
J. Anim. Sci. 77, 1693-1701

LIU, Z. H., H. Y. WANG, X. E. WANG, G. P. ZHANG, P. D. CHEN u. D. J. LIU (2006):
Genotypic and spike positional difference in grain phytase activity, phytate, inorganic phosphorus, iron, and zinc contents in wheat (*Triticum aestivum* L.).
J. Cereal. Sci. 44, 212-219

LÜDKE, H., F. SCHÖNE u. K. GRUHN (1988):
Untersuchungen zur Phosphorversorgung von Schweinen im Lebendmasseabschnitt von 11—38 kg. 1. Mitteilung. Der Einfluß der Phosphorversorgung auf die Leistung, die Nährstoffverdaulichkeit, den Protein- und Fettgehalt im Weichgewebe und Skelett sowie den Protein- und Fettansatz.
Arch. Tierernähr. 39, 61-71

MAHAMID, J., A. SHARIR, L. ADDADI u. S. WEINER (2008):
Amorphous calcium phosphate is a major component of the forming fin bones of zebrafish: Indications for an amorphous precursor phase.
Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105, 12748-12753

MAHAN, D. C. (1982):
Dietary calcium and phosphorus levels for weanling swine.

Literaturverzeichnis

J. Anim. Sci. 54, 559-564

MAHAN, D. C., K. E. EKSTROM u. A. W. FETTER (1980):

Effect of dietary protein, calcium and phosphorus for swine from 7 to 20 kilograms body weight.

J. Anim. Sci. 50, 309-314

MAVROMICHALIS, I., J. HANCOCK, I. KIM, B. SENNE, D. KROPF, G. KENNEDY, R. HINES u. K. BEHNKE (1999):

Effects of omitting vitamin and trace mineral premixes and (or) reducing inorganic phosphorus additions on growth performance, carcass characteristics, and muscle quality in finishing pigs.

J. Anim. Sci. 77, 2700-2708

MAXSON, P. F., u. D. C. MAHAN (1983):

Dietary calcium and phosphorus levels for growing swine from 18 to 57 kilograms body weight.

J. Anim. Sci. 56, 1124-1134

MCDONALD, R., J. HEGENAUER u. P. SALTMAN (1986):

Age-related differences in the bone mineralization pattern of rats following exercise.

J. Gerontol. 41, 445-452

MCGLONE, J. J. (2000):

Deletion of supplemental minerals and vitamins during the late finishing period does not affect pig weight gain and feed intake.

J. Anim. Sci. 78, 2797-2800

MCKENNA, M. J., T. A. HAMILTON u. H. H. SUSSMAN (1979):

Comparison of human alkaline phosphatase isoenzymes. Structural evidence for three protein classes.

Biochem. J. 181, 67-73

METZLER-ZEBELI, B. U., M. G. GÄNZLE, R. MOSENTHIN u. R. T. ZIJLSTRA (2012):

Oat β -glucan and dietary calcium and phosphorus differentially modify intestinal expression of proinflammatory cytokines and monocarboxylate transporter 1 and cecal morphology in weaned pigs.

J. Nutr. 142, 668-674

MEYER, J. H., R. H. GRUMMER, R. H. PHILLIPS u. G. BOHSTEDT (1950):

Sodium, chlorine, and potassium requirements of growing pigs.

J. Anim. Sci. 9, 300-306

MILLER, E., D. ULLREY, C. ZUTAUT, B. V. BALTZER, D. SCHMIDT, J. HOEFER u. R. LUECKE (1964):

Phosphorus requirement of the baby pig.

J. Nutr. 82, 34-40

- MILLER, H. M., R. D. SLADE u. A. E. TAYLOR (2016):
High dietary inclusion levels of phytase in grower-finisher pigs.
J. Anim. Sci. 94, 121-124
- MITCHELL, A. D., A. M. SCHOLZ u. V. G. PURSEL (2001):
Total body and regional measurements of bone mineral content and bone mineral density in pigs by dual energy X-ray absorptiometry.
J. Anim. Sci. 79, 2594-2604
- MOORE, J. H., u. C. TYLER (1955):
Studies on the intestinal absorption and excretion of calcium and phosphorus in the pig: 1. A critical study of the Bergeim technique for investigating the intestinal absorption and excretion of calcium and phosphorus.
Br. J. Nutr. 9, 63-80
- MORALES, J. I., L. CÁMARA, J. D. BERROCOSO, J. P. LÓPEZ, G. G. MATEOS u. M. P. SERRANO (2011):
Influence of sex and castration on growth performance and carcass quality of crossbred pigs from 2 Large White sire lines.
J. Anim. Sci. 89, 3481-3489
- MORTON, R. K. (1954):
The purification of alkaline phosphatases of animal tissues.
Biochem. J. 57, 595-603
- MOSTELLAR, M. E., u. E. P. TUTTLE, JR (1964):
Effects of alkalosis on plasma concentration and urinary excretion of inorganic phosphate in man.
J. Clin. Invest. 43, 138-149
- MURRY, A. C., R. D. LEWIS u. H. E. AMOS (1997):
The effect of microbial phytase in a pearl millet-soybean meal diet on apparent digestibility and retention of nutrients, serum mineral concentration, and bone mineral density of nursery pigs.
J. Anim. Sci. 75, 1284-1291
- NAKANO, T., J. R. THOMPSON, R. J. CHRISTOPHERSON u. F. X. AHERNE (1986):
Blood flow distribution in hind limb bones and joint cartilage from young growing pigs.
Can. J. Vet. Res. 50, 96-100
- NAUMANN, C., u. R. BASSLER (1976):
Methodenbuch VDLUFA - VERBAND DEUTSCHER LANDWIRTSCHAFTLICHER
UNTERSUCHUNGS- UND FORSCHUNGSANSTALTEN
3. Aufl. (inkl. der 8. Ergänzungslieferung von 2012), Bd. III. Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Literaturverzeichnis

NERBAS, E. (2008):

Aktualisierung von Blutparametern beim Schwein.
Hannover, Stiftung Tierärztliche Hochschule, Diss.

NEWELL, G. K., u. R. E. BEAUCHENE (1975):

Effects of dietary calcium level, acid stress, and age on renal, serum, and bone responses of rats.

J. Nutr. 105, 1039-1047

NIELSEN, D. H., F. J. MCEVOY, M. T. MADSEN, J. B. JENSEN u. E. SVALASTOGA (2007):

Relationship between bone strength and dual-energy X-ray absorptiometry measurements in pigs.

J. Anim. Sci. 85, 667-672

NIMMO, R. D., E. R. PEO, B. D. MOSER, P. J. CUNNINGHAM, T. D. CRENSHAW u. D. G. OLSON (1980a):

Response of different genetic lines of boars to varying levels of dietary calcium and phosphorus.

J. Anim. Sci. 51, 112-120

NIMMO, R. D., E. R. PEO, B. D. MOSER, P. J. CUNNINGHAM, D. G. OLSON u. T. D. CRENSHAW (1980b):

Effect of various levels of dietary calcium and phosphorus on performance, blood and bone parameters in growing boars.

J. Anim. Sci. 51, 100-104

NØRGAARD, J. V., O. HØJBERG, K. U. SØRENSEN, J. ERIKSEN, J. M. S. MEDINA u. H. D. POULSEN (2014):

The effect of long-term acidifying feeding on digesta organic acids, mineral balance, and bone mineralization in growing pigs.

Anim. Feed Sci. Technol. 195, 58-66

NRC - NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1998):

Nutrient Requirements of Swine: 10th Revised Edition.

10. überarbeitete Auflage, The National Academy Press, Washington, D. C.

O'QUINN, P. R., D. A. KNABE u. E. J. GREGG (1997):

Digestible phosphorus needs of terminal-cross growing-finishing pigs.

J. Anim. Sci. 75, 1308-1318

ODINK, J., J. F. M. SMEETS, I. J. R. VISSER, H. SANDMAN u. J. M. A. SNIJDERS (1990):

Hematological and clinicochemical profiles of healthy swine and swine with inflammatory processes.

J. Anim. Sci. 68, 163-170

OGUNBAMERU, B. O., J. L. EVANS u. E. T. KORNEGAY (1990):
Technique for the determination of bone volume and specific gravity.
Can. J. Anim. Sci. 70, 1137-1140

OSTER, M., F. JUST, K. BÜSING, P. WOLF, C. POLLEY, B. VOLLMAR, E. MURANI, S. PONSUKSILI u. K. WIMMERS (2016):
Toward improved phosphorus efficiency in monogastrics—interplay of serum, minerals, bone, and immune system after divergent dietary phosphorus supply in swine.
Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol. 310, R917-R925

PADITZ, K., H. KLUTH u. M. RODEHUTSCORD (2005):
Dosis-abhängige Effizienz von mikrobieller Phytase bei Schweinen mit 40, 70 und 100 kg Lebendmasse.
Züchtungskunde 77, 47-57

PAGANO, A. R., K. R. RONEKER u. X. G. LEI (2007):
Distribution of supplemental Escherichia coli AppA2 phytase activity in digesta of various gastrointestinal segments of young pigs.
J. Anim. Sci. 85, 1444-1452

PARTRIDGE, I. G. (1978):
Studies on digestion and absorption in the intestines of growing pigs: 3. Net movements of mineral nutrients in the digestive tract.
Br. J. Nutr. 39, 527-537

PAYTON, C. G. (1932):
The growth in length of the long bones in the madder-fed pig.
J. Anat. 66, 414-425

PAYTON, C. G. (1934):
The position of the nutrient foramen and direction of the nutrient canal in the long bones of the madder-fed pig.
J. Anat. 68, 500

PETER, C. M., T. M. PARR, E. N. PARR, D. M. WEBEL u. D. H. BAKER (2001):
The effects of phytase on growth performance, carcass characteristics, and bone mineralization of late-finishing pigs fed maize–soyabean meal diets containing no supplemental phosphorus, zinc, copper and manganese.
Anim. Feed Sci. Technol. 94, 199-205

PETERSEN, G. I., C. PEDERSEN, M. D. LINDEMANN u. H. H. STEIN (2011):
Relative bioavailability of phosphorus in inorganic phosphorus sources fed to growing pigs.
J. Anim. Sci. 89, 460-466

POINTILLART, A. (1991):
Enhancement of phosphorus utilization in growing pigs fed phytate-rich diets by using rye bran.

J. Anim. Sci. 69, 1109-1115

POINTILLART, A., C. COLIN, H. C. LACROIX u. L. GUÉGUEN (1995):
Mineral bioavailability and bone mineral contents in pigs given calcium carbonate postprandially.
Bone 17, 357-362

POINTILLART, A., V. COXAM, B. SÈVE, C. COLIN, C. H. LACROIX u. L. GUÉGUEN (2000):
Availability of calcium from skim milk, calcium sulfate and calcium carbonate for bone mineralization in pigs.
Reprod. Nutr. Dev. 40, 49-61

POINTILLART, A., A. FOURDIN u. N. FONTAINE (1987):
Importance of cereal phytase activity for phytate phosphorus utilization by growing pigs fed diets containing triticale or corn.
J. Nutr. 117, 907-913

POND, W. G., F. E. LOVELACE, E. F. WALKER u. L. KROOK (1969):
Distribution of parenterally administered ⁴⁵Ca in bones of growing pigs.
J. Anim. Sci. 29, 298-302

POULSEN, H. D., K. BLAABJERG, A. STRATHE, P. ADER u. D. FEUERSTEIN (2010):
Evaluation of different microbial phytases on phosphorus digestibility in pigs fed a wheat and barley based diet.
Livest. Sci. 134, 97-99

QIAN, H., E. T. KORNEGAY u. D. E. CONNER, JR (1996):
Adverse effects of wide calcium:phosphorus ratios on supplemental phytase efficacy for weanling pigs fed two dietary phosphorus levels.
J. Anim. Sci. 74, 1288-1297

QUINIOU, N., S. DUBOIS u. J. NOBLET (2000):
Voluntary feed intake and feeding behaviour of group-housed growing pigs are affected by ambient temperature and body weight.
Livestock Production Science 63, 245-253

RAAB, D. M., T. D. CRENSHAW, D. B. KIMMEL u. E. L. SMITH (1991):
A histomorphometric study of cortical bone activity during increased weight-bearing exercise.
J. Bone Miner. Res. 6, 741-749

RADCLIFFE, J. S., u. E. T. KORNEGAY (1998):
Phosphorus equivalency value of microbial phytase in weanling pigs fed a maize-soyabean meal based diet.
J. Anim. Feed Sci. 7, 197-211

RADER, J. I., D. J. BAYLINK, M. R. HUGHES, E. F. SAFILIAN u. M. R. HAUSSLER (1979):

Calcium and phosphorus deficiency in rats: effects on PTH and 1, 25-dihydroxyvitamin D₃.
Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab. 236, E118

REINHARD, M. K., D. C. MAHAN, B. L. WORKMAN, J. H. CLINE, A. W. FETTER u. A. P. GRIFO, JR (1976):

Effect of increasing dietary protein level, calcium and phosphorus on feedlot performance, bone mineralization and serum mineral values with growing swine.
J. Anim. Sci. 43, 770-780

RICHMOND, R. J., u. R. T. BERG (1972):

Bone growth and distribution in swine as influenced by liveweight, breed, sex, and ration.
Can. J. Anim. Sci. 52, 47-56

RINGE, J., C. KAPS, B. SCHMITT, K. BÜSCHER, J. BARTEL, H. SMOLIAN, O. SCHULTZ, G. R. BURMESTER, T. HÄUPL u. M. SITTINGER (2002):

Porcine mesenchymal stem cells.
Cell Tissue Res. 307, 321-327

ROBERTS, W. M. (1930):

Variations in the phosphatase activity of the blood in disease.
Br. J. Exp. Pathol. 11, 90-95

RODEHUTSCORD, M., C. RÜCKERT, H. P. MAURER, H. SCHENKEL, W. SCHIPPRACK, K. E. BACH KNUDSEN, M. SCHOLLENBERGER, M. LAUX, M. EKLUND, W. SIEGERT u. R. MOSENTHIN (2016):

Variation in chemical composition and physical characteristics of cereal grains from different genotypes.
Arch. Anim. Nutr. 70, 87-107

RORTVEDT, L. A., u. T. D. CRENSHAW (2012):

Expression of kyphosis in young pigs is induced by a reduction of supplemental vitamin D in maternal diets and vitamin D, Ca, and P concentrations in nursery diets.
J. Anim. Sci. 90, 4905-4915

RUAN, Z., Y. ZHANG, Y. YIN, T. LI, R. HUANG, S. W. KIM, G. Y. WU u. Z. Y. DENG (2007):

Dietary requirement of true digestible phosphorus and total calcium for growing pigs.
Asian-australas. J. Anim. Sci. 20, 1236-1242

RUDOVSKY, A. (2008):

Wasserbedarf und Durchfluss der Tränken.
In: DLG (Hrsg.): DLG-Merkblatt 351: Tränketeknik für Schweine.
1. Aufl., DLG-Verlag, Frankfurt am Main, S. 5

RUTHERFURD, S. M., T. K. CHUNG u. P. J. MOUGHAN (2014):

Effect of microbial phytase on phytate P degradation and apparent digestibility of total P and Ca throughout the gastrointestinal tract of the growing pig.

J. Anim. Sci. 92, 189-197

RYAN, W. F., P. B. LYNCH u. J. V. O' DOHERTY (2011a):

Effect of dietary phosphorus on the development of bone mineral density of pigs assessed using dual energy X-ray absorptiometry.

Livest. Sci. 137, 101-107

RYAN, W. F., P. B. LYNCH u. J. V. O'DOHERTY (2011b):

Compensatory effect of dietary phosphorus on performance of growing pigs and development of bone mineral density assessed using dual energy X-ray absorptiometry.

Livest. Sci. 138, 89-95

SANDS, J. S., D. RAGLAND, C. BAXTER, B. C. JOERN, T. E. SAUBER u. O. ADEOLA (2001):

Phosphorus bioavailability, growth performance, and nutrient balance in pigs fed high available phosphorus corn and phytase.

J. Anim. Sci. 79, 2134-2142

SCHINDLER, D. W., R. E. HECKY, D. L. FINDLAY, M. P. STANTON, B. R. PARKER, M. J. PATERSON, K. G. BEATY, M. LYNG u. S. E. M. KASIAN (2008):

Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment.

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 105, 11254-11258

SCHNEIDER, S., S. M. BREIT, S. GRAMPP, W. W. F. KÜNZEL, A. LIESEGANG, E. MAYRHOFER u. J. ZENTEK (2004):

Comparative assessment of bone mineral measurements obtained by use of dual-energy x-ray absorptiometry, peripheral quantitative computed tomography, and chemical-physical analyses in femurs of juvenile and adult dogs.

Am. J. Vet. Res. 65, 891-900

SCHOLZ, A. M., P. HELLER, K.-H. WALDMANN, P. WOLF, J. KAMPHUES u. M. FÖRSTER (2004):

Eignung der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie zur Erfassung der Knochenmineralisierung von Ebern.

Züchtungskunde 76, 94-107

SCHOORL, N. (1929):

Zucker-Titration.

Zeitschrift für Untersuchung der Lebensmittel 57, 566-576

SCHUHKNECHT, W., u. H. SCHINKEL (1963):

Beitrag zur Beseitigung der Anregungsbeeinflussung bei flammenspektralanalytischen Untersuchungen. Universalvorschrift zur Bestimmung von Kalium, Natrium und Lithium in Proben jeder Zusammensetzung.

Z. Anal. Chem 194, 161-183

SCHULZ, E., u. H. J. OSLAGE (1972):

Untersuchungen zur intestinalen Hydrolyse von Inositolphosphorsäureester und zur Absorption von Phytinphosphor beim Schwein. 2. Mitteilung. Untersuchungen zur Hydrolyse der Inositolphosphorsäureester im Verdauungstrakt des Schweines.

Z. Tierphysiol. Tierernähr. Futtermittelkd. 30, 76-91

SEBASTIAN, S., S. P. TOUCHBURN, E. R. CHAVEZ u. P. C. LAGUE (1996):

The effects of supplemental microbial phytase on the performance and utilization of dietary calcium, phosphorus, copper, and zinc in broiler chickens fed corn-soybean diets.

Poult. Sci. 75, 729-736

SHAPIRO, R., u. R. P. HEANEY (2003):

Co-dependence of calcium and phosphorus for growth and bone development under conditions of varying deficiency.

Bone 32, 532-540

SHAW, D. T., D. W. ROZEBOOM, G. M. HILL, M. W. ORTH, D. S. ROSENSTEIN u. J. E. LINK (2006):

Impact of supplement withdrawal and wheat middling inclusion on bone metabolism, bone strength, and the incidence of bone fractures occurring at slaughter in pigs.

J. Anim. Sci. 84, 1138-1146

SIMONS, P. C. M., H. A. J. VERSTEEGH, A. W. JONGBLOED, P. A. KEMME, P. SLUMP, K. D. BOS, M. G. E. WOLTERS, R. F. BEUDEKER u. G. J. VERSCHOOR (1990):

Improvement of phosphorus availability by microbial phytase in broilers and pigs.

Br. J. Nutr. 64, 525-540

SKIBA, G., M. SOBOL u. S. RAJ (2017):

Femur morphometry, densitometry, geometry and mechanical properties in young pigs fed a diet free of inorganic phosphorus and supplemented with phytase.

Arch. Anim. Nutr. 71, 81-92

SKIBA, G., D. WEREMKO, M. SOBOL u. S. RAJ (2015):

Bone mineralisation of weaned piglets fed a diet free of inorganic phosphorus and supplemented with phytase, as assessed by dual-energy X-ray absorptiometry.

Arch. Anim. Nutr. 69, 267-275

SLOMINSKI, B. A., T. DAVIE, M. C. NYACHOTI u. O. JONES (2007):

Heat stability of endogenous and microbial phytase during feed pelleting.

Livest. Sci. 109, 244-246

STEINER, T., R. MOSENTHIN, B. ZIMMERMANN, R. GREINER u. S. ROTH (2007):

Distribution of phytase activity, total phosphorus and phytate phosphorus in legume seeds, cereals and cereal by-products as influenced by harvest year and cultivar.

Anim. Feed Sci. Technol. 133, 320-334

STERN, T., R. AVIRAM, C. ROT, T. GALILI, A. SHARIR, N. KALISH ACHRAI, Y. KELLER, R. SHAHAR u. E. ZELZER (2015):

Isometric scaling in developing long bones is achieved by an optimal epiphyseal growth balance.

PLoS Biol. 13, e1002212

STOCKLAND, W. L., u. L. G. BLAYLOCK (1973):

Influence of dietary calcium and phosphorus levels on the performance and bone characteristics of growing-finishing swine.

J. Anim. Sci. 37, 906-912

SUN, G., R. F. FITZGERALD, K. J. STALDER, L. A. KARRIKER, A. K. JOHNSON u. S. J. HOFF (2011):

Development of an embedded microcomputer-based force plate system for measuring sow weight distribution and detection of lameness.

Appl. Eng. Agric. 27, 475-482

SUSSMAN, H. H., P. A. SMALL, JR u. E. COTLOVE (1968):

Human alkaline phosphatase. Immunochemical identification of organ-specific isoenzymes.

J. Biol. Chem. 243, 160-166

TALMAGE, R. V., S. H. DOPPELT u. J. H. POSTMA (1976):

Observations on the relationship of parathyroid hormone and calcitonin to plasma and liver phosphate.

Proc. Soc. Exp. Biol. Med. 153, 131-137

TANAKA, H., T. IGARASHI, A. T. LEFOR u. E. KOBAYASHI (2009):

The effects of fasting and general anesthesia on serum chemistries in KCG miniature pigs.

Journal of the American Association for Laboratory Animal Science 48, 33-38

TAYLOR, A. E., R. D. SLADE u. H. M. MILLER (2016):

Phosphorus equivalency value of a commercial phytase in weaner pigs.

J. Anim. Sci. 94, 125-128

TEIXEIRA, A. O., A. CORASSA, L. M. MOREIRA, E. T. NOGUEIRA, J. B. LOPES, C. M. ROCHA, JR u. V. P. FERREIRA (2016):

Bone characteristics of pigs fed different sources of phosphorus.

Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias 29, 245-254

TERMINE, J. D., u. A. S. POSNER (1967):

Amorphous/crystalline interrelationships in bone mineral.

Calcif. Tissue Res. 1, 8-23

TOMMERUP, L. J., D. M. RAAB u. T. D. CRENSHAW (1993):

Does weight-bearing exercise affect non-weight-bearing bone?

J. Bone Miner. Res. 8, 1053-1058

TORRALLARDONA, D., u. P. ADER (2016):
Effects of a novel 6-phytase (EC 3.1. 3.26) on performance, phosphorus and calcium digestibility, and bone mineralization in weaned piglets.
J. Anim. Sci. 94, 194-197

TROHLER, U., J.-P. BONJOUR u. H. FLEISCH (1981):
Plasma level and renal handling of P_i: effect of overnight fasting with and without P_i supply.
Am. J. Physiol. Renal Physiol. 241, F509-F516

TUMBLESON, M. E., u. P. R. KALISH (1972):
Serum biochemical and hematological parameters in crossbred swine from birth through eight weeks of age.
Can. J. Comp. Med. 36, 202-209

TYMCZYNA, B., T. BACHANEK, M. R. TATARA, W. KRUPSKI, M. TYMCZYNA-SOBOTKA u. I. ŁUSZCZEWSKA-SIERAKOWSKA (2012):
Interrelationships between morphometric, densitometric, and mechanical properties of mandible in 6-month-old male pigs.
Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy 56, 177-181

ULLREY, D. E., E. R. MILLER, B. E. BRENT, B. L. BRADLEY u. J. A. HOEFER (1967):
Swine hematology from birth to maturity IV. Serum calcium, magnesium, sodium, potassium, copper, zinc and inorganic phosphorus.
J. Anim. Sci. 26, 1024-1029

VARLEY, P., T. SWEENEY, M. RYAN u. J. O'DOHERTY (2011a):
The effect of phosphorus restriction during the weaner-grower phase on compensatory growth, serum osteocalcin and bone mineralization in gilts.
Livest. Sci. 135, 282-288

VARLEY, P. F., J. J. CALLAN u. J. V. O'DOHERTY (2010a):
Effect of phosphorus level and phytase inclusion on the performance, bone mineral concentration, apparent nutrient digestibility, and on mineral and nitrogen utilisation in finisher pigs.
Irish J. Agr. Food Res. 49, 141-152

VARLEY, P. F., J. J. CALLAN u. J. V. O'DOHERTY (2011b):
Effect of dietary phosphorus and calcium level and phytase addition on performance, bone parameters, apparent nutrient digestibility, mineral and nitrogen utilization of weaner pigs and the subsequent effect on finisher pig bone parameters.
Anim. Feed Sci. Technol. 165, 201-209

VARLEY, P. F., B. FLYNN, J. J. CALLAN u. J. V. O'DOHERTY (2011c):
Effect of phytase level in a low phosphorus diet on performance and bone development in weaner pigs and the subsequent effect on finisher pig bone development.

Livest. Sci. 138, 152-158

VARLEY, P. F., P. B. LYNCH, J. J. CALLAN u. J. V. O'DOHERTY (2010b):
Effect of dietary phosphorus level and phytase inclusion on weaner pig performance and subsequent bone development.
Livest. Sci. 134, 215-217

VARLEY, P. F., P. B. LYNCH, J. J. CALLAN u. J. V. O'DOHERTY (2010c):
Effect of phytase concentration in a low phosphorus weaner pig diet and its subsequent effect on bone development in the finished pig.
Livest. Sci. 134, 218-220

VEUM, T. L., D. W. BOLLINGER, C. E. BUFF u. M. R. BEDFORD (2006):
A genetically engineered phytase improves nutrient utilization, growth performance, and bone strength of young swine fed diets deficient in available phosphorus.
J. Anim. Sci. 84, 1147-1158

VEUM, T. L., u. M. R. ELLERSIECK (2008):
Effect of low doses of phytase on growth performance, bone strength, and nutrient absorption and excretion by growing and finishing swine fed corn-soybean meal diets deficient in available phosphorus and calcium.
J. Anim. Sci. 86, 858-870

VEUM, T. L., D. R. LEDOUX, D. W. BOLLINGER, V. RABOY u. A. COOK (2002):
Low-phytic acid barley improves calcium and phosphorus utilization and growth performance in growing pigs.
J. Anim. Sci. 80, 2663-2670

VIGORS, S., T. SWEENEY, C. J. O'SHEA, J. A. BROWNE u. J. V. O'DOHERTY (2014):
Improvements in growth performance, bone mineral status and nutrient digestibility in pigs following the dietary inclusion of phytase are accompanied by modifications in intestinal nutrient transporter gene expression.
Br. J. Nutr. 112, 688-697

VIVEROS, A., C. CENTENO, A. BRENES, R. CANALES u. A. LOZANO (2000):
Phytase and acid phosphatase activities in plant feedstuffs.
J. Agric. Food Chem. 48, 4009-4013

VON ROSENBERG, S. J., G. M. WEBER, A. ERHARDT, U. HÖLLER, U. A. WEHR u. W. A. RAMBECK (2016):
Tolerance evaluation of overdosed dietary levels of 25-hydroxyvitamin D3 in growing piglets.
J. Anim. Physiol. Anim. Nutr. 100, 371-380

VON UND ZUR MÜHLEN, F. (2015):
Einfluss der Mischfutterstruktur (Vermahlung / Konfektionierung) auf den Verlauf einer experimentellen Infektion mit E. coli sowie auf die Überlebensfähigkeit des Erregers im Magen-Darm-Inhalt (in vivo / in vitro) von Absetzferkeln.

Hannover, Stiftung Tierärztliche Hochschule, Diss.

WEHREND, A., K. FAILING, J. TSCHACHTSCHAL u. H. BOSTEDT (2003):
Reference values of electrolyte plasma concentrations in healthy piglets during the first 48 hours of life.
J. Vet. Med. A 50, 67-71

WEILER, U., B. A. SALLOUM u. R. CLAUS (2006):
Influence of short-term confinement and exercise on tibia development in growing pigs.
J. Vet. Med. A 53, 450-455

WEINREB, M., G. A. RODAN u. D. D. THOMPSON (1989):
Osteopenia in the immobilized rat hind limb is associated with increased bone resorption and decreased bone formation.
Bone 10, 187-194

WEREMKO, D., G. SKIBA, S. RAI u. H. FANDREJEWSKI (2013):
The effects of feed and protein restriction between 90 and 118 days of age on performance, bone growth and mineralization of pigs reared to 168 days of age.
Anim. Feed Sci. Technol. 182, 53-60

WILSMAN, N. J., E. S. BERNARDINI, E. LEIFERMAN, K. NOONAN u. C. E. FARNUM (2008):
Age and pattern of the onset of differential growth among growth plates in rats.
J. Orthop. Res. 26, 1457-1465

WILSMAN, N. J., C. E. FARNUM, E. M. GREEN, E. M. LIEFERMAN u. M. K. CLAYTON (1996):
Cell cycle analysis of proliferative zone chondrocytes in growth plates elongating at different rates.
J. Orthop. Res. 14, 562-572

WU, X., Z. RUAN, Y. G. ZHANG, Y. Q. HOU, Y. L. YIN, T. J. LI, R. L. HUANG, W. Y. CHU, X. F. KONG, B. GAO u. L. X. CHEN (2008):
True digestibility of phosphorus in different resources of feed ingredients in growing pigs.
Asian-australas. J. Anim. Sci. 21, 107-119

YÁÑEZ, J. L., J. L. LANDERO, A. OWUSU-ASIEDU, M. CERVANTES u. R. T. ZIJLSTRA (2013):
Growth performance, diet nutrient digestibility, and bone mineralization in weaned pigs fed pelleted diets containing thermostable phytase.
J. Anim. Sci. 91, 745-754

YEOM, S.-C., S.-Y. CHO, C.-G. PARK u. W.-J. LEE (2012):
Analysis of reference interval and age-related changes in serum biochemistry and hematology in the specific pathogen free miniature pig.
Lab. Anim. Res. 28, 245-253

Literaturverzeichnis

YI, Z., u. E. T. KORNEGAY (1996):

Sites of phytase activity in the gastrointestinal tract of young pigs.

Anim. Feed Sci. Technol. 61, 361-368

YI, Z., E. T. KORNEGAY, V. RAVINDRAN, M. D. LINDEMANN u. J. H. WILSON (1996):

Effectiveness of Natuphos phytase in improving the bioavailabilities of phosphorus and other nutrients in soybean meal-based semipurified diets for young pigs.

J. Anim. Sci. 74, 1601-1611

ZENG, Z. K., D. WANG, X. S. PIAO, P. F. LI, H. Y. ZHANG, C. X. SHI u. S. K. YU (2014):

Effects of adding super dose phytase to the phosphorus-deficient diets of young pigs on growth performance, bone quality, minerals and amino acids digestibilities.

Asian-Australasian Journal of Animal Sciences (AJAS) 27, 237-246

ZHANG, B., u. C. N. COON (1997):

The relationship of various tibia bone measurements in hens.

Poult. Sci. 76, 1698-1701

ZUMSTEIN, V., M. KRALJEVIĆ, D. WIRZ, R. HÜGLI u. M. MÜLLER-GERBL (2012):

Correlation between mineralization and mechanical strength of the subchondral bone plate of the humeral head.

J. Shoulder Elbow Surg. 21, 887-893

Gesetze und Verordnungen

2006

Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung

In der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006

Bundesgesetzbl. I 2006, S. 2043-2056

2007

Düngeverordnung

In der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007

Bundesgesetzbl. I 2007, S. 221-240

Literaturverzeichnis

2009

Verordnung (EG) 767/2009 des europäischen Parlaments und des Rates über das Inverkehrbringen und die Verwendung von Futtermitteln

In der Fassung der Bekanntmachung vom 1. September 2009

ABl. L229, S. 1-28

2014

Agrarzahlungen-Verpflichtungengesetz

In der Fassung der Bekanntmachung vom 2. Dezember 2014

BGBI. I 2014, S. 1928-1936

Agrarzahlungen-Verpflichtungenverordnung

In der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Dezember 2014

BAnz AT 23.12.2014 V1

2016

Futtermittelverordnung

In der Fassung der Bekanntmachung vom 29. August 2016

Bundesgesetzbl. I 2016, S. 2004-2029

9 Anhang

Der nachfolgende Abschnitt enthält den Tabellenanhang sowie ein Verzeichnis sämtlicher Abbildungen und Tabellen der vorliegenden Arbeit.

9.1 Tabellen

Die Ergebnisse werden zum Teil als gerundete Werte wiedergegeben.

9.1.1 Laboranalysen

Tabelle 50: Angaben zu den verwendeten Laborgeräten

Laborgerät	Modell (soweit bekannt), Hersteller
Trockenschrank	Modell 600, Fa. Memmert GmbH & Co. KG, Schwabach
Trockenschrank	Fa. Binder GmbH, Tuttlingen
Gefriertrocknung	Alpha 1-4, Fa. Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Osterode am Harz
Gefriertrocknung	Gamma 1-20/LMC-1, Fa. Martin Christ Gefriertrocknungsanlagen GmbH, Osterode am Harz
Analysenwaage	CP 224 S, Fa. Sartorius, Göttingen
Analysenwaage	BP 210 S, Fa. Sartorius, Göttingen
Muffelofen	N 7/H, Fa. Nabertherm GmbH, Lilienthal
Muffelofen	M 110, Fa. Heraeus Holding GmbH, Hanau

Tabelle 51: Angaben zu den bei verschiedenen Knochengrößen verwendeten Einwaagen zur Ra-, Ca- und P-Bestimmung in den Durchgängen 1 und 2

m_{gemahlen} [g]	Parameter	Einwaage [g]
< 3,6	Ra, Ca, P ¹	gesamtes Material
≥ 3,6	Ra Ca, P	1 0,3
> 5	Ra Ca, P	≥ 1 0,5

¹Ca- und P-Bestimmung nach Trockenveraschung bei 600 °C

9.1.2 Mineral- und Mischfuttermittel

Tabelle 52: Deklarierte chemische Zusammensetzung inkl. der Zusatzstoffe der drei Mineralfuttermittel, Angaben je kg uS

Inhaltsstoff	Einheit	MinF I	MinF II	MinF III
TS	%	98,6	98,4	98,4
Ra	%	72,3	76,0	76,2
Ca	%	24,3	23,0	23,1
P	%	0,0005	0,0005	0,0005
Na	%	0,500	1,00	1,50
Lys (ges.)	%	11,0	9,00	9,00
Lys (synth. Zusatz)	mg	110.000	89.996	89.996
Met (ges.)	%	3,00	2,40	1,50
Met (synth. Zusatz)	mg	3.000	23.999	14.999
Thr (ges.)	%	3,50	2,20	3,00
Thr. (synth. Zusatz)	mg	35.000	21.997	29.997
Vit. A als Retinylacetat	IE	204.000	204.000	204.000
Vitamin D ₃	IE	34.000	34.000	34.000
Vit. E/all rac- α -Tocopherol	mg	3.020	3.020	3.020
Vit. K aus MSB (51 %)	mg	100	100	100
Vit. H (Biotin)	mcg	2.000	2.000	2.000
Folsäure	mg	50,0	50,0	50,0
Vit. B ₁ (-mononitrat)	mg	50,0	50,0	50,0
Vit. B ₂	mg	200	200	200
Vit. B ₆	mg	150	150	150
Vit. B ₁₂ (HPLC)	mcg	1.000	1.000	1.000
Nicotinamid	mg	750	750	750
Ca-D-Pantothenat	mg	500	500	500
β -Carotin	mg	20,0	20,0	20,0
Cholinchlorid	mg	35.000	35.000	35.000
Fe (Sulfat)	mg	3.200	3.000	3.000
Cu (Sulfat)	mg	1.500	1.500	1.500
Mn (Oxyd)	mg	700	700	700
Zn (Oxyd)	mg	2.800	2.800	2.800
I (Ca-Jodat)	mg	10,4	10,4	10,4
Se (Na-Selenit)	mg	9,00	9,00	9,00

Anhang

Tabelle 53: Chemische Zusammensetzung der Mineralfuttermittel für die Durchgänge 1 und 2 (Aufzucht, Mast I und II, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	Mineralfutter I	Mineralfutter II	Mineralfutter III
TS	g	988	986	985
Ra	g	666	718	695
Ca	g	227	212	215
P	g	0,67	0,67	0,66
Na	g	4,06	8,60	12,0
Mg	g	2,51	2,71	2,76
Fe	mg	6680	8794	8680
Cu	mg	1525	1501	1532
Zn	mg	2619	3019	3029
Mn	mg	985	1053	1040
Vit. E	mg	2849	3279	2602

Tabelle 54: Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten für die Aufzucht (Durchgang 1, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
Vit. E	mg	108	102	103
Ileu	g	7,94	7,89	8,25
Leu	g	14,4	14,5	15,1
Tyr	g	6,61	6,81	7,10
Phe	g	9,76	9,93	10,5
His	g	5,35	5,07	5,41
NH ₃	g	3,45	3,51	3,57
Arg	g	14,3	13,8	13,6
Pro	g	15,2	15,7	15,6
Asp	g	17,6	18,0	18,5
Ser	g	10,6	10,6	11,1
Glu	g	45,4	46,2	47,3
Gly	g	8,36	8,63	8,54
Ala	g	8,29	8,62	8,67
Val	g	8,79	8,98	9,01

Anhang

Tabelle 55: Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 1, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
Vit. E	mg	96,7	98,2	96,3
Ileu	g	5,84	5,95	5,96
Leu	g	11,4	11,5	11,7
Tyr	g	5,14	5,41	5,74
Phe	g	7,25	7,40	7,65
His	g	4,42	4,33	4,37
NH ₃	g	3,62	3,49	3,41
Arg	g	10,4	10,5	11,1
Pro	g	14,0	14,0	14,0
Asp	g	13,9	13,7	15,0
Ser	g	7,28	8,24	8,55
Glu	g	37,3	38,0	39,1
Gly	g	6,64	6,54	6,69
Ala	g	6,88	6,68	6,75
Val	g	7,48	7,50	7,61

Tabelle 56: Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 2, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
Vit. E	mg	79,7	84,6	79,7
Ileu	g	6,39	6,28	6,57
Leu	g	11,8	11,6	12,0
Tyr	g	5,47	5,49	5,70
Phe	g	8,56	8,33	8,59
His	g	4,20	4,19	4,31
NH ₃	g	3,39	3,16	3,42
Arg	g	10,2	10,4	10,7
Pro	g	13,5	14,1	14,7
Asp	g	13,8	13,6	14,2
Ser	g	8,44	8,45	8,70
Glu	g	34,1	35,3	36,7
Gly	g	6,72	6,74	7,03
Ala	g	8,31	7,52	7,36
Val	g	7,43	7,40	7,78

Anhang

Tabelle 57: Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter II, Durchgang 2, Angaben je kg uS)

Parameter	Einheit	K	V1	V2
Vit. E	mg	66,0	68,6	68,6
Ileu	g	5,88	5,52	5,69
Leu	g	11,1	10,7	10,8
Tyr	g	5,22	5,09	5,35
Phe	g	8,27	8,47	8,12
His	g	3,83	3,77	3,85
NH ₃	g	3,17	3,37	3,19
Arg	g	9,77	9,27	9,27
Pro	g	12,7	12,0	13,4
Asp	g	12,7	12,5	12,2
Ser	g	8,46	8,41	8,34
Glu	g	40,5	40,1	40,6
Gly	g	6,59	6,62	6,53
Ala	g	6,45	6,47	6,45
Val	g	6,89	6,63	6,91

9.1.3 Score zur Beurteilung des klinischen Allgemeinbefindens und des Bewegungsablaufs

Tabelle 58: Scoring System zur Beurteilung des klinischen Allgemeinbefindens der Tiere in den Durchgängen 1 und 2

Symptome	Score
Futter- und Wasseraufnahme ungestört, kein Auftreiben nötig	0
spontane Aktivität reduziert, Auftreiben leicht möglich	1
spontane Futter- und/oder Wasseraufnahme reduziert	1
Auftreiben nur bei wiederholtem Versuch möglich	2
Futter- und/oder Wasseraufnahme nur bei direktem Angebot vorhanden	2
Tier liegt fest, kein Auftreiben möglich	3
Futter- und/oder Wasseraufnahme nicht vorhanden	3
Körpermasseverluste $\geq 10\%$	3

Anhang

Tabelle 59: Scoring System zur Beurteilung des Bewegungsablaufs der Tiere in den Durchgängen 1 und 2

Symptome	Score
keine Lahmheit	0
ggr. Lahmheit bzw. unspezifische Bewegungsstörungen (steifer Gang, Trippeln)	1
mgr. Skelettdeformation	1
mgr. Lahmheit	2
hgr. Lahmheit	3
klinische Symptome (\geq Score 2) trotz analgetischer Behandlung ($>$ 48h)	3

9.1.4 Tiere und Haltung

Tabelle 60: Minimale bzw. maximale Raumtemperaturen [°C] in den verschiedenen Abteilen während der Durchgänge 1 und 2 (Min - Max)

Abteil (Gruppe)	Durchgang 1	Durchgang 2
1 (K)	14,3 – 28,7	16,5 – 29,8
2 (V1)	15,4 – 31,1	16,6 – 30,6
3 (V2)	14,1 – 27,9	16,2 – 30,8

Tabelle 61: Grunddaten zu den Ferkeln und zur Gruppeneinteilung im Durchgang 1

Tier-Nr.	Geb.-Datum	Sau-Nr.	Geschlecht ¹	KM _{p. n.} [kg]	KM _{Absetzen,} 28.01.2016 [kg]	Gruppe
3	30.12.2015	1	w	0,94	8,91	V1
5	30.12.2015	1	w	1,18	10,2	V2
7	30.12.2015	1	m	1,38	9,51	VB
8	30.12.2015	1	w	1,28	9,32	K
9	30.12.2015	1	m	0,67	10,6	VB
10	30.12.2015	1	m	1,26	9,34	V2
11	30.12.2015	4	m	1,50	9,56	V1
13	30.12.2015	4	m	1,85	9,34	V2
15	30.12.2015	4	w	1,71	9,27	K
26	30.12.2015	2	w	1,83	8,87	VB
27	30.12.2015	2	w	2,02	9,99	VB
32	01.01.2016	3	m	1,07	8,76	K
33	01.01.2016	3	m	1,48	8,35	V1
34	01.01.2016	3	m	1,03	10,3	K
39	01.01.2016	3	w	1,20	9,32	V1
40	01.01.2016	3	w	1,07	8,84	V2

¹Alle männlichen Tiere wurden innerhalb der ersten LW kastriert

Anhang

Tabelle 62: Grunddaten zu den Tieren und zur Gruppeneinteilung im Durchgang 2

Tier-Nr.	Geb.-Datum	Sau-Nr.	Geschlecht¹	Gruppe
652	10.03.2016	103	w	V1
653	10.03.2016	103	m	V1
655	10.03.2016	103	w	V1
656	10.03.2016	103	m	K
657	10.03.2016	103	m	V2
659	10.03.2016	103	w	K
660	10.03.2016	103	w	V2
662	10.03.2016	58	w	V2
665	10.03.2016	58	m	VB
666	10.03.2016	58	w	K
667	10.03.2016	58	m	K
668	10.03.2016	58	m	V1
669	10.03.2016	58	m	V2
674	10.03.2016	101	m	K
676	10.03.2016	101	m	VB
677	10.03.2016	101	m	V1
681	10.03.2016	101	w	V1
682	10.03.2016	101	w	V2
710	02.03.2016	122	m	K
714	02.03.2016	122	m	K
722	03.03.2016	139	m	V2
723	03.03.2016	139	w	V2
724	03.03.2016	139	w	V1
727	03.03.2016	139	w	V2
729	03.03.2016	139	w	V2
730	03.03.2016	139	m	V1
734	09.03.2016	92	m	V1
735	09.03.2016	92	m	K
736	09.03.2016	92	m	V2
737	09.03.2016	92	w	VB
738	09.03.2016	92	m	V1
740	09.03.2016	92	w	K
741	09.03.2016	92	w	V1
742	09.03.2016	92	m	V2
744	09.03.2016	92	w	K
745	09.03.2016	92	w	K
748	10.03.2016	- ²	w	VB
749	10.03.2016	- ³	w	K
776	25.02.2016	105	w	V1
786	24.02.2016	104	m	V2

¹Alle männlichen Tiere wurden innerhalb der ersten LW kastriert, ^{2,3}Fehlende Erfassung im Herkunftsbetrieb

9.1.5 Futtermittelverbrauch und Körpermassenentwicklung

Tabelle 63: Futtermittelverbrauch [g] je Gruppe im Durchgang 1

VT	K	V1	V2
0-6	18902	21950	18638
7-13	26342	32867	29049
14-20	33042	37547	30255
21-27	36293	44312	37299
28-33	37603	37392	29955

Tabelle 64: Futtermittelverbrauch [g] je Gruppe im Durchgang 2

VT	K	V1	V2
0-6	151156	128165	111011
7-13	163954 ¹	151494	152161
14-20	173495	158425	157274
21-24	103406	110493	102611
25-27	67382	64238	62036
28-34	158399	138440	129710
35-41	150788	138716	128557
42-45	87240	87080	70030
46-48	44211	38762	30428
49-55	85309	74561	67673
56-62	90821	80665	70680
63-69	94247	77272	62936
70-76	98151	88942	63028
77-80	56504	49449	44386

¹Vorzeitige Euthanasie eines Tieres (OM 735) an d13; ein weiteres Tier (OM 745) ab d13 in Einzelhaltung, der individuell für dieses Tier erfasste Futtermittelverbrauch bis zur vorzeitigen Euthanasie an d24 wurde rechnerisch dem Verbrauch der Kontrollgruppe hinzugefügt

Anhang

Tabelle 65: Körpermassen der Ferkel [kg] im Durchgang 1

Tier-Nr.	KM_{d-2}	KM_{d0}	KM_{d7}	KM_{d14}	KM_{d21}	KM_{d28}	KM_{d33}
3	14,2	15,4	18,5	23,5	29,0	32,0	35,5
5	14,7	14,9	17,0	20,5	24,5	28,5	31,5
7	16,4	-	-	-	-	-	-
8	15,5	15,9	19,5	25,0	32,0	39,0	42,0
9	17,1	-	-	-	-	-	-
10	14,6	14,5	17,0	20,5	24,0	28,0	33,0
11	14,0	14,0	18,0	21,5	27,5	30,5	35,0
13	15,0	15,0	17,0	20,5	24,5	29,0	31,0
15	13,2	13,5	16,5	19,5	25,0	28,0	32,5
26	15,7	-	-	-	-	-	-
27	16,0	-	-	-	-	-	-
32	13,4	13,7	15,5	22,0	27,0	31,0	38,0
33	12,7	12,4	16,0	19,5	24,0	27,0	31,0
34	14,5	14,4	18,5	22,0	27,0	31,0	36,5
39	14,9	14,7	16,0	19,5	23,0	27,0	30,5
40	12,1	12,5	13,5	18,5	21,5	25,0	27,0

Anhang

Tabelle 66: Körpermassen der Tiere [kg] zwischen d-2 und d25 im Durchgang 2

Tier-Nr.	KM _{d-2}	KM _{d0}	KM _{d7}	KM _{d14}	KM _{d21}	KM _{d25}
652	22,0	23,5	28,5	35,0	40,5	42,5
653	29,5	31,0	37,0	44,5	50,5	55,0
655	27,5	27,5	32,0	37,0	42,0	44,5
656	28,5	29,5	36,5	45,0	51,0	55,5
657	28,0	29,0	32,0	38,0	44,0	46,0
659	25,5	26,5	33,0	35,0	45,5	48,5
660	23,0	24,5	28,5	33,0	37,0	40,0
662	32,0	34,0	35,5	34,0	49,0	52,5
665	26,5	-	-	-	-	-
666	32,0	34,0	42,0	48,5	57,5	62,5
667	32,0	34,5	43,5	51,5	60,0	64,5
668	25,0	26,5	29,0	34,5	39,5	43,0
669	26,0	26,5	30,5	33,0	40,0	43,5
674	21,0	22,0	30,0	36,0	44,0	48,0
676	20,5	-	-	-	-	-
677	26,5	26,5	30,5	37,0	42,5	46,0
681	24,0	25,5	29,5	35,5	40,0	42,0
682	24,5	24,5	29,0	43,5	38,0	41,0
710	27,0	27,5	33,5	40,0	48,5	52,5
714	23,0	24,5	30,0	36,5	42,5	47,0
722	25,0	25,5	27,5	32,5	37,0	39,0
723	23,5	26,0	26,5	31,0	36,0	38,5
724	22,5	25,0	30,0	34,0	40,0	42,0
727	27,5	31,0	32,5	38,0	43,0	45,5
729	30,5	33,5	37,5	42,5	48,0	50,5
730	30,5	32,0	36,0	39,5	47,5	49,5
734	32,0	34,5	39,5	44,5	52,5	56,5
735	29,5	31,5	39,5	41,8 ¹	-	-
736	22,0	23,5	25,5	30,5	34,5	36,0
737	35,0	-	-	-	-	-
738	27,5	28,0	34,5	39,5	46,0	49,5
740	26,5	28,5	33,5	35,5	49,0	53,0
741	30,0	30,0	35,0	40,5	46,5	48,0
742	28,5	31,0	34,0	39,5	45,0	49,0
744	23,5	29,0	36,0	38,5	50,0	55,0
745	28,5	31,0	39,0	- ²	47,5	48,4 ³
748	33,5	-	-	-	-	-
749	24,5	26,5	33,5	37,0	49,5	54,0
776	25,0	25,0	27,5	33,5	36,5	40,5
786	32,0	31,5	33,5	39,0	42,5	48,0

¹KM_{d13} wegen vorzeitiger Euthanasie, ²nicht gewogen, da hgr. lahm, ³KM_{d24} wegen vorzeitiger Euthanasie

Anhang

Tabelle 67: Körpermassen der Tiere [kg] zwischen d28 und d49 im Durchgang 2

Tier-Nr.	KM_{d28}	KM_{d35}	KM_{d42}	KM_{d46}	KM_{d49}
653	59,0	66,5	73,5	79,0	-
655	48,0	53,5	60,0	64,0	65,5
656	59,0	64,5	71,5	80,5	-
657	49,0	55,5	61,5	65,0	67,5
659	50,5	56,5	63,5	67,0	-
660	43,0	48,0	52,5	57,0	57,5
666	66,0	72,5	80,0	85,5	-
668	45,5	51,0	58,0	61,5	63,5
669	46,5	53,5	59,5	63,0	66,0
674	50,5	56,5	65,0	69,5	72,0
677	48,5	55,5	60,5	64,0	-
681	44,5	49,0	54,0	58,0	-
682	44,0	49,5	55,5	55,5	57,5
710	55,0	64,5	70,5	73,0	-
714	50,0	55,5	63,0	67,5	70,5
722	41,5	46,5	51,0	53,5	-
723	42,5	45,0	50,5	52,0	-
724	46,0	50,5	55,5	60,0	61,0
729	53,0	60,0	65,0	67,5	-
730	52,5	60,0	67,0	71,0	73,5
740	57,5	65,5	74,5	80,5	83,5
741	52,0	58,0	64,0	67,0	-
742	52,5	59,0	66,0	67,0	-
744	58,5	65,5	72,0	77,5	78,5

Tabelle 68: Körpermassen der Tiere [kg] zwischen d56 und d81 im Durchgang 2

Tier-Nr.	KM_{d56}	KM_{d63}	KM_{d70}	KM_{d77}	KM_{d81}
655	72,5	80,0	86,0	93,5	97,0
657	73,5	80,5	86,5	90,0	95,0
660	61,0	67,5	72,0	76,0	79,0
668	69,5	77,0	83,0	89,0	93,0
669	73,0	80,0	85,5	92,0	97,0
674	80,0	89,0	97,0	105	108
682	64,0	70,5	75,5	81,0	85,0
714	78,5	87,5	94,5	103	108
724	67,0	72,0	78,0	83,5	87,5
730	81,0	88,5	97,0	105	111
740	88,0	98,5	108	115	118
744	85,0	93,0	101	112	109

9.1.6 Gesundheitszustand und Therapie

Tabelle 69: Übersicht zu den behandlungswürdigen Befunden sowie zu Therapiemaßnahmen im Durchgang 1

Tier-Nr.	Befund/Erkrankung	Behandlung	Zeitraum [VT]
15	Entzündung der medialen Nebenklau hi. li.	Meloxicam ¹	23 - 29
7	Karpalgelenk li. ggr. vermehrt gefüllt	Meloxicam, Amoxicillin ²	vor VB

¹Metacam® 15 mg/ml, Boehringer Ingelheim Vetmedica GmbH, Ingelheim/Rhein; Dosierung: 0,4 mg/kg KM,

²Duphamox® LA 150 mg/ml, Zoetis Deutschland GmbH, Berlin; Dosierung: 0,1 ml/kg KM

Tabelle 70: Übersicht zu den behandlungswürdigen Befunden sowie zu Therapiemaßnahmen im Durchgang 2

Tier-Nr.	Befund/Erkrankung	Behandlung	Zeitraum [VT]
657	vermehrtes Liegen	Meloxicam ¹	42 - 46
662	ggr. steifer Gang, Überköten	Meloxicam	21 - 25
665	mgr. gemischte Lahmheit vo. re.	Meloxicam	vor VB
669	ggr. schwankender Gang in Hinterhand, vermehrtes Liegen	Meloxicam	42 - 43, 73
674	hundesitzige Körperhaltung	Meloxicam	70
681	ggr. schwankender Gang in Hinterhand	Meloxicam	46
682	ggr. schwankender Gang in Hinterhand, hundesitzige Körperhaltung, häufiges Ausgrätschen in Hgld.	Meloxicam	68 - 71, 76 - 81
714	Kronsaumverletzung hi. li.	Chlortetracyclin ²	42
722	mgr. gemischte Lahmheit hinten links	Meloxicam	45 - 46
	Paraparese nach Trauma	sofortige Euthanasie	46
730	unsicheres Fuß in Hinterhand, Zittern bei Belastung der Hgld., röntgenologisch o.b.B. (d13)	Meloxicam	11 - 16
	hgr. gemischte Lahmheit hi. li.	Amoxicillin ³	12 - 17
735		Meloxicam	11 - 13
		Amoxicillin	12 - 13
	röntgenolog. V. a. <i>Epiphyseolysis capititis ossis femoris</i> (d13)	Einzelhaltung	13
		vorzeitige Euthanasie	13
738	ggr. undeutl. steifer Gang (Hinterhand), hundesitzige Körperhaltung, vermehrtes Liegen	Meloxicam	21 - 25
742	vermehrtes Liegen	Meloxicam	43 - 46

¹Metacam® 15 mg/ml, Boehringer Ingelheim Vetmedica GmbH, Ingelheim/Rhein; Dosierung: 0,4 mg/kg KM,

²Animedazon® Spray, 2,45 % w/w, aniMedica GmbH, Senden-Bösesel; zur Anwendung auf der Haut,

³Duphamox® LA 150 mg/ml, Zoetis Deutschland GmbH, Berlin; Dosierung: 0,1 ml/kg KM

Anhang

Tabelle 70 (Fortsetzung):

744	ggr. gemischte Lahmheit vo. li., häufiges Ausgrätschen	Meloxicam	28 - 29
	Verletzung an re. Karpus	Chlortetracyclin ¹	34, 72
745	ggr. gemischte Lahmheit hi. li., hundesitzige Körperhaltung	Meloxicam	58 - 61
	hgr. gemischte Lahmheit hinten links, röntgenolog. V. a. Epiphyseolysis capitatis ossis femoris (d13)	Meloxicam	9 - 23
		Amoxicillin	12 - 17
		Einzelhaltung	13 - 24
		Dexamethason ²	23
vorzeitige Euthanasie		24	

¹Animedazon® Spray, 2,45 % w/w, aniMedica GmbH, Senden-Bösesel; zur Anwendung auf der Haut,

²Dexamethason 4 mg/ml, Bela-Pharm GmbH & Co. KG, Vechta; Dosierung: 0,04-0,06 mg/kg KM i. m.

9.1.7 Blutwerte

Tabelle 71: Ca- und P-Konzentrationen sowie der Aktivität der AP im Blut im Durchgang 1

Tier-Nr.	Ca _{d-1} [mmol/l]	Ca _{d34} [mmol/l]	P _{d-1} [mmol/l]	P _{d34} [mmol/l]	AP _{d-1} [U/l]	AP _{d34} [U/l]
3	3,19	3,70	1,42	1,72	630	686
5	2,77	3,48	1,74	1,20	475	619
7	2,97	-	2,22	-	691	-
8	3,11	2,92	1,31	2,24	641	534
9	3,17	-	1,73	-	445	-
10	3,50	3,41	1,48	1,17	798	965
11	3,55	3,41	1,02	1,68	662	359
13	3,14	4,14	1,51	1,29	535	594
15	3,37	2,44	1,55	1,84	710	404
26	3,22	-	1,74	-	688	-
27	3,25	-	1,74	-	661	-
32	3,06	3,05	1,81	2,03	549	446
33	3,26	3,48	1,76	1,53	655	589
34	3,15	2,99	1,73	2,12	530	402
39	3,47	2,73	1,28	1,65	649	469
40	3,19	3,22	1,72	1,16	555	750

Anhang

Tabelle 72: Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Blut im Durchgang 2 - Teil 1¹

Tier-Nr.	Ca_{d-1} [mmol/l]	Ca_{d26} [mmol/l]	Ca_{d47} [mmol/l]	Ca_{d82} [mmol/l]	P_{d-1} [mmol/l]	P_{d26} [mmol/l]
652	2,77	3,78	-	-	2,45	1,28
653	2,77	3,73	3,05	-	2,62	1,88
655	3,08	3,74	3,18	2,97	2,20	1,38
656	2,88	2,74	2,60	-	2,26	2,92
657	2,69	3,52	3,46	3,06	2,23	1,68
659	3,13	3,02	2,66	-	2,10	2,77
660	3,03	3,63	3,18	2,93	2,40	1,51
662	2,93	3,44	-	-	2,18	1,55
665	2,23	-	-	-	2,36	-
666	2,97	3,02	2,52	-	2,35	2,79
667	2,78	2,87	-	-	2,66	2,55
668	2,87	3,66	3,69	3,01	2,16	1,55
669	2,84	3,94	3,17	3,14	2,12	1,39
674	3,07	3,02	2,86	2,64	2,29	2,84
676	2,47	-	-	-	2,48	-
677	2,70	3,73	3,44	-	1,81	1,70
681	2,86	3,73	3,34	-	2,33	1,73
682	2,66	3,74	3,28	2,83	2,64	1,62
710	2,68	2,94	2,54	-	2,34	2,84
714	3,20	2,87	2,80	2,50	2,10	2,82
722	2,77	3,10	3,81	-	2,40	1,50
723	2,99	3,37	3,14	-	2,06	1,38
724	3,04	3,60	2,97	2,83	2,30	2,04
727	2,89	3,97	-	-	2,15	1,68
729	2,75	3,24	3,05	-	2,48	1,83
730	2,94	3,60	3,30	2,82	2,06	1,61
734	2,81	3,26	-	-	2,27	1,82
735	2,85	2,59	-	-	2,43	2,71
736	2,81	4,21	-	-	2,55	1,37
737	2,81	-	-	-	1,96	-
738	3,16	3,68	-	-	1,93	1,10
740	2,92	2,74	2,73	2,46	2,35	2,83
741	2,69	3,18	3,30	-	2,01	1,76
742	2,98	4,05	3,45	-	2,21	1,73
744	3,01	2,98	2,77	2,57	2,10	2,85
745	2,72	2,90	-	-	2,69	2,48
748	2,71	-	-	-	2,06	-
749	2,81	3,02	-	-	2,31	2,56
776	2,82	3,45	-	-	2,25	1,54
786	2,65	2,71	-	-	2,36	1,73

¹Fortsetzung s. nächste Seite

Anhang

Tabelle 73: Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Blut im Durchgang 2 - Teil 2

Tier-Nr.	P _{d47} [mmol/l]	P _{d82} [mmol/l]	AP _{d-1} [U/l]	AP _{d26} [U/l]	AP _{d47} [U/l]	AP _{d82} [U/l]
652	-	-	528	592	-	-
653	1,64	-	448	511	384	-
655	1,81	1,65	456	564	460	392
656	1,88	-	507	507	391	-
657	1,80	1,86	389	420	336	324
659	2,07	-	582	505	497	-
660	1,29	0,68	423	505	526	575
662	-	-	357	425	-	-
665	-	-	384	-	-	-
666	3,12	-	408	368	273	-
667	-	-	428	424	-	-
668	1,56	1,69	541	606	506	416
669	1,60	1,63	427	639	570	461
674	2,72	2,36	641	495	486	397
676	-	-	590	-	-	-
677	1,58	-	481	606	547	-
681	1,64	-	393	563	413	-
682	1,29	1,24	412	610	494	625
710	1,90	-	383	438	286	-
714	2,39	2,54	534	370	421	381
722	1,03	-	493	572	492	-
723	0,83	-	406	576	587	-
724	1,76	1,78	438	569	427	396
727	-	-	412	421	-	-
729	1,58	-	458	689	471	-
730	1,73	1,81	642	651	579	525
734	-	-	417	443	-	-
735	-	-	518	387	-	-
736	-	-	567	593	-	-
737	-	-	448	-	-	-
738	-	-	640	558	-	-
740	2,43	2,25	459	484	361	296
741	1,48	-	465	599	463	-
742	1,13	-	472	609	431	-
744	2,49	1,69	473	461	308	261
745	-	-	365	301	-	-
748	-	-	328	-	-	-
749	-	-	469	308	-	-
776	-	-	439	440	-	-
786	-	-	614	6,29	-	-

9.1.8 Knochenparameter

9.1.8.1 Knochenmaße

Tabelle 74: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Humerus im Durchgang 1

Tier-Nr.	Länge [mm]	Umfang [cm]	DM_{außen, l-l} [mm]	DM_{außen, c-c} [mm]	DM_{innen, l-l} [mm]	DM_{innen, c-c} [mm]
3	120	5,3	13,8	18,7	9,15	10,4
5	123	5,2	13,5	17,5	10,5	8,20
7	103	4,2	10,6	14,4	6,90	6,75
8	128	5,9	15,0	20,8	8,75	7,95
9	102	4,4	11,7	14,9	7,10	6,85
10	122	5,5	14,5	18,5	10,7	7,60
11	129	5,3	12,8	18,2	9,25	8,00
13	123	5,0	13,3	17,7	9,35	7,35
15	122	5,4	14,0	18,8	7,95	8,55
26	100	4,3	10,8	14,9	6,15	6,10
27	101	4,5	11,6	16,4	6,50	7,20
32	127	5,6	14,3	19,6	8,85	8,25
33	123	5,1	12,7	18,4	8,95	8,20
34	128	5,6	15,0	19,2	9,30	9,85
39	122	5,4	14,0	18,6	10,2	8,40
40	119	4,8	12,3	16,4	9,50	7,50

DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

Anhang

Tabelle 75: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Radius im Durchgang 1

Tier-Nr.	Länge [mm]	Umfang [cm]	DM _{außen, l-l} [mm]	DM _{außen, c-c} [mm]	DM _{innen, l-l} [mm]	DM _{innen, c-c} [mm]
3	96,4	4,5	15,0	10,6	12,1	10,4
5	98,3	4,5	15,6	10,2	13,3	8,20
7	72,5	3,7	12,6	9,70	8,65	6,75
8	103	5,0	17,2	11,8	12,5	7,95
9	77,5	4,1	13,8	9,50	10,0	6,85
10	95,4	4,1	16,1	10,7	12,0	7,60
11	103	4,7	16,9	10,8	13,3	8,00
13	96,7	4,4	15,2	10,2	11,3	7,35
15	92,8	4,8	16,2	12,0	12,1	8,55
26	74,5	3,8	12,9	8,75	8,85	6,10
27	74,9	4,2	14,5	10,1	11,0	7,20
32	102	4,9	16,7	11,5	12,9	8,25
33	99,4	4,7	16,0	10,9	11,0	8,20
34	104	5,1	17,4	9,85	13,1	8,30
39	94,7	4,8	16,7	11,3	13,0	8,40
40	96,3	4,4	15,0	10,7	11,5	7,50

DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

Tabelle 76: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des MC III im Durchgang 1

Tier-Nr.	Länge [mm]	Umfang [cm]	DM _{außen, l-l} [mm]	DM _{außen, c-c} [mm]	DM _{innen, l-l} [mm]	DM _{innen, c-c} [mm]
3	59,1	4,0	12,4	10,9	9,55	9,10
5	61,7	4,0	13,0	10,8	10,2	9,30
7	48,8	3,4	10,8	9,55	8,95	8,20
8	61,8	4,1	13,0	11,1	9,70	8,30
9	47,8	3,6	11,1	9,90	8,75	8,15
10	59,0	3,8	12,4	10,8	9,65	9,00
11	61,6	4,2	13,8	12,4	11,2	10,4
13	59,3	3,9	12,3	11,7	10,1	9,35
15	59,1	4,1	12,7	11,7	9,80	9,35
26	47,5	3,3	10,2	9,05	7,65	7,20
27	48,3	3,6	10,8	10,0	8,20	8,15
32	62,5	4,4	14,6	12,9	10,7	10,1
33	60,5	4,3	13,1	12,1	10,9	10,4
34	62,7	4,2	12,9	11,2	10,0	9,40
39	58,7	4,1	13,0	11,1	10,3	9,15
40	56,6	3,9	12,4	10,2	9,90	8,70

MC III: *Os metacarpale III*, DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

Anhang

Tabelle 77: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Femur im Durchgang 1

Tier-Nr.	Länge [mm]	Umfang [cm]	DM_{außen, l-l} [mm]	DM_{außen, c-c} [mm]	DM_{innen, l-l} [mm]	DM_{innen, c-c} [mm]
3	133	5,6	18,1	17,0	12,0	11,8
5	139	5,8	16,7	18,3	13,4	14,9
7	116	4,6	14,7	13,7	8,85	8,35
8	147	6,3	19,7	18,9	12,7	12,4
9	113	5,0	15,4	15,1	10,0	8,65
10	135	5,8	17,7	18,5	13,9	14,7
11	144	5,6	18,0	16,8	14,4	11,6
13	139	5,5	16,8	16,7	12,6	12,2
15	137	5,9	18,1	17,3	12,8	11,0
26	110	4,5	14,2	13,0	7,80	7,60
27	114	5,0	15,3	14,8	9,40	8,95
32	148	5,7	17,8	17,5	11,8	12,4
33	140	5,5	16,5	16,1	11,9	12,4
34	144	6,0	18,0	18,6	13,7	13,7
39	141	5,6	17,9	17,7	12,7	12,2
40	137	5,2	15,7	15,5	11,4	12,1

DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

Tabelle 78: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser der Tibia im Durchgang 1

Tier-Nr.	Länge [mm]	Umfang [cm]	DM_{außen, l-l} [mm]	DM_{außen, c-c} [mm]	DM_{innen, l-l} [mm]	DM_{innen, c-c} [mm]
3	132	5,0	18,0	12,6	12,9	8,05
5	130	5,2	19,2	13,6	14,2	9,85
7	109	4,1	15,1	10,1	8,50	5,95
8	140	5,4	19,8	13,6	11,5	7,60
9	107	4,6	16,9	11,3	10,0	7,75
10	131	5,2	18,3	14,1	14,2	10,8
11	139	5,0	17,9	12,5	14,4	8,20
13	135	5,0	17,2	13,3	14,1	9,75
15	139	5,2	18,2	13,5	12,7	7,85
26	104	4,0	14,9	9,35	9,20	5,20
27	107	4,7	17,9	11,5	12,0	7,05
32	140	5,2	18,6	13,7	13,4	7,85
33	133	5,1	18,7	13,1	14,8	9,30
34	140	5,3	19,4	13,1	14,4	8,50
39	130	5,0	17,8	13,2	13,6	9,30
40	127	4,6	16,6	12,0	13,1	8,50

DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

Anhang

Tabelle 79: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des MT III im Durchgang 1

Tier-Nr.	Länge [mm]	Umfang [cm]	DM_{außen, l-l} [mm]	DM_{außen, c-c} [mm]	DM_{innen, l-l} [mm]	DM_{innen, c-c} [mm]
3	63,5	4,0	13,4	11,5	10,0	8,95
5	67,1	3,9	13,4	11,2	10,8	9,40
7	53,5	3,2	11,0	9,65	8,55	8,15
8	66,6	4,2	13,7	11,5	9,70	8,75
9	52,2	3,4	11,2	9,90	8,40	8,10
10	67,8	3,8	13,0	10,6	10,5	9,10
11	68,6	4,0	13,2	11,4	10,4	9,75
13	65,5	3,8	12,5	11,0	10,5	9,80
15	63,9	4,1	12,9	12,7	9,90	10,4
26	50,4	3,3	10,6	9,15	7,75	7,05
27	52,6	3,5	11,0	10,2	8,60	8,15
32	67,7	4,4	14,3	12,9	11,3	10,7
33	64,7	4,2	13,8	13,1	11,1	11,6
34	66,8	4,2	13,4	12,5	10,5	10,5
39	64,7	4,0	12,9	11,1	10,8	9,35
40	61,1	3,7	12,0	10,4	9,70	8,80

MT III: *Os metatarsale III*, DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

Anhang

Tabelle 80: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Femur im Durchgang 2

Tier-Nr.	Länge [cm]	Umfang [cm]	DM_{außen, l-l} [mm]	DM_{außen, c-c} [mm]	DM_{innen, l-l} [mm]	DM_{innen, c-c} [mm]
652	15,6	5,5	17,5	16,3	11,2	11,5
653	17,4	8,0	26,4	23,9	19,9	16,4
655	19,2	7,8	25,6	22,5	18,7	17,0
656	17,6	7,5	24,9	22,0	15,3	14,4
657	18,5	7,7	24,9	22,8	19,7	18,0
659	16,9	7,1	22,0	20,9	13,0	12,8
660	17,3	7,0	22,9	20,9	17,5	15,3
662	15,7	6,5	19,8	20,0	14,0	13,3
665	12,8	5,2	16,0	15,0	8,00	8,50
666	18,2	7,6	24,0	22,5	12,8	13,5
667	16,9	6,6	21,0	19,4	11,9	12,8
668	18,2	7,8	24,0	25,2	16,8	18,9
669	17,9	7,4	24,1	21,4	18,0	15,9
674	18,9	8,2	24,9	25,3	14,3	17,4
676	12,9	4,8	14,7	14,8	9,85	10,2
677	17,0	6,5	20,3	19,7	13,3	12,6
681	16,6	6,1	19,4	17,8	12,7	12,0
682	17,7	6,9	21,1	21,2	16,0	16,7
710	17,3	7,8	26,6	22,1	15,0	14,2
714	19,3	8,5	28,9	23,5	18,2	15,2
722 ¹	-	-	-	-	-	-
723	16,2	6,6	21,0	19,9	16,9	15,9
724	18,0	6,8	24,0	19,4	16,7	13,8
727	15,0	6,2	19,3	18,4	13,9	13,3
729	17,0	6,9	21,9	21,5	15,9	16,0
730	19,0	7,6	24,6	22,7	17,7	14,9
734	16,2	6,5	21,3	19,0	14,0	12,8
735	14,7	6,2	18,8	18,7	11,8	11,6
736	14,5	5,6	17,7	16,7	12,5	11,2
737	14,5	5,9	18,8	16,9	12,0	11,7
738	15,5	6,2	20,3	18,2	14,3	12,8
740	19,5	8,4	26,9	25,9	17,0	15,8
741	17,3	6,4	19,5	19,7	13,1	13,0
742	17,4	6,5	21,1	18,7	15,2	15,1
744	19,5	7,8	26,2	23,1	18,9	15,6
745	15,5	5,8	18,5	16,9	11,3	11,9
748	13,9	6,0	19,4	18,1	12,6	12,4
749	16,2	7,0	23,3	19,8	11,7	11,5
776	14,7	6,4	20,8	18,7	15,0	13,9
786	15,7	6,7	21,1	20,5	16,3	14,9

¹Femur frakturiert; DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

Anhang

Tabelle 81: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser der Tibia im Durchgang 2

Tier-Nr.	Länge [cm]	Umfang [cm]	DM_{außen, l-l} [mm]	DM_{außen, c-c} [mm]	DM_{innen, l-l} [mm]	DM_{innen, c-c} [mm]
652	14,9	5,0	17,9	13,1	11,9	7,50
653	16,6	6,9	25,0	17,9	17,3	11,7
655	17,8	6,9	24,5	18,7	16,9	13,2
656	17,1	6,4	23,8	15,5	12,8	9,05
657	17,6	7,2	25,4	18,6	17,5	12,6
659	15,2	6,3	22,7	15,8	12,7	9,45
660	16,5	6,3	22,7	16,7	16,4	11,1
662	14,8	5,8	20,3	15,9	13,0	11,0
665	12,2	5,0	17,8	13,0	9,75	7,95
666	17,0	6,6	23,7	17,7	14,4	10,0
667	15,5	6,1	22,1	15,4	14,3	9,45
668	18,0	6,9	24,3	18,9	18,1	12,7
669	17,0	6,6	23,5	17,9	17,2	12,6
674	18,9	6,9	25,0	17,6	9,70	7,65
676	12,0	4,7	16,0	12,1	9,85	7,20
677	16,8	5,7	20,4	15,3	13,6	9,75
681	15,6	5,5	19,8	14,4	13,2	9,40
682	16,8	6,1	21,3	16,7	15,0	10,9
710	16,4	6,8	24,9	17,6	11,6	7,70
714	18,1	7,6	28,6	19,2	17,6	11,9
722	15,9	5,5	19,4	14,6	15,3	9,85
723	15,1	5,9	20,8	15,6	15,9	10,4
724	16,2	6,1	21,6	16,8	14,8	11,6
727	14,1	5,3	19,0	13,9	14,3	9,10
729	16,4	6,0	21,1	16,2	12,5	8,35
730	18,0	6,4	23,0	16,9	13,6	9,40
734	15,3	5,6	19,7	15,1	13,0	9,35
735	13,7	5,3	19,4	13,5	10,7	7,40
736	13,4	5,1	12,7	14,0	11,7	7,95
737	13,5	5,0	17,4	13,5	10,6	8,20
738	14,6	5,4	19,2	14,8	13,1	9,40
740	17,9	6,9	25,4	17,7	14,0	10,7
741	16,4	5,9	20,9	15,7	13,9	9,15
742	16,0	5,9	20,8	16,1	14,0	11,3
744	17,7	6,9	25,5	17,4	11,6	9,10
745	14,4	5,3	18,7	8,85	10,2	6,45
748	13,5	5,3	18,6	14,4	12,0	9,30
749	15,0	5,8	21,5	14,9	11,2	8,45
776	13,7	5,4	18,9	14,1	13,1	8,75
786	15,0	5,8	20,6	15,0	15,5	9,65

DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c:cranio-caudal

Anhang

Tabelle 82: Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des MT III im Durchgang 2

Tier-Nr.	Länge [mm]	Umfang [cm]	DM _{außen, l-l} [mm]	DM _{außen, c-c} [mm]	DM _{innen, l-l} [mm]	DM _{innen, c-c} [mm]
652	70,1	4,2	13,7	12,4	10,9	10,5
653	78,0	4,9	16,0	13,7	11,8	10,6
655	83,1	5,0	17,1	14,1	12,9	11,7
656	79,1	5,0	16,7	13,8	11,9	10,8
657	82,9	5,2	17,4	15,2	13,3	12,7
659	70,8	4,9	16,3	13,6	11,5	11,0
660	78,4	4,8	16,1	13,5	12,2	11,6
662	70,2	4,3	14,3	12,5	11,0	9,85
665	59,7	4,0	13,0	12,2	10,2	9,85
666	80,3	4,9	16,8	13,8	12,1	10,3
667	76,5	4,8	16,2	13,6	12,3	10,7
668	82,0	4,9	17,0	14,0	12,6	11,4
669	80,8	4,9	16,3	13,2	12,5	11,0
674	88,6	5,1	17,1	14,6	12,6	11,4
676	58,3	3,8	12,1	11,0	9,85	9,7
677	78,9	4,9	16,4	14,0	12,8	11,8
681	75,6	4,4	14,9	12,8	11,5	10,6
682	81,5	4,7	16,5	13,4	12,0	11,0
710	80,2	5,0	16,8	13,4	12,5	10,6
714	85,2	5,0	16,9	13,7	12,2	9,65
722	76,0	4,3	14,2	12,4	11,1	10,1
723	72,2	4,6	15,0	13,0	11,4	11,1
724	72,5	4,4	14,9	11,4	10,6	8,8
727	68,0	4,3	14,4	11,9	11,1	9,65
729	75,4	4,4	15,0	12,3	11,5	10,2
730	79,3	4,9	16,6	13,1	12,2	10,4
734	73,0	4,3	14,4	13,2	11,1	10,5
735	69,2	4,3	14,1	12,5	11,2	10,0
736	74,0	3,8	11,9	10,7	8,85	8,95
737	67,2	4,3	14,2	13,1	11,0	10,8
738	71,5	4,4	14,5	13,1	11,2	10,8
740	87,4	5,2	17,8	14,4	11,6	11,4
741	78,2	4,7	16,4	14,0	12,0	11,6
742	79,5	4,6	15,3	13,5	12,3	11,4
744	86,8	5,2	17,8	14,9	12,5	11,4
745	69,2	4,2	13,9	11,9	10,2	9,60
748	67,1	4,4	14,6	13,0	10,4	10,2
749	71,5	4,7	15,9	13,8	11,5	9,95
776	64,6	4,4	14,4	12,2	11,1	9,80
786	71,0	4,4	14,6	12,6	10,8	9,80

MT III: *Os metatarsale III*, DM: Durchmesser, l-l: latero-lateral, c-c: cranio-caudal

9.1.8.2 Knochenmasse und -dichte

Tabelle 83: Knochenmasse und Tauchgewichte des Humerus bzw. der prox. Humerus-Epiphyse sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1

Tier-Nr.	uS_{in toto} [g]	uS_{Teilstück} [g]	Temp. Wasser [°C]	TG₁ [g]	TG₂ [g]	TG₃ [g]
3	95,80	47,9223	19	4,2720	4,2672	4,2786
5	101,39	51,7158	19	3,4648	3,5647	3,6301
7	53,55	26,0027	20	2,9608	2,9803	2,9993
8	121,75	57,9000	19	4,9610	5,1905	5,2644
9	56,35	27,1404	20	3,4076	3,4381	3,4411
10	96,54	50,2705	19	3,0841	3,2568	3,3216
11	114,77	58,2178	19	4,0061	4,0259	4,0291
13	96,74	48,5784	19	3,4719	3,4896	3,5045
15	100,12	44,6211	19	5,2213	5,2636	5,2696
26	55,43	26,6109	20	2,8296	2,8533	2,8751
27	54,54	24,4153	20	2,6025	2,6329	2,6508
32	119,41	58,4542	19	6,2563	6,3100	6,3218
33	96,09	47,4306	19	1,5872	1,7826	1,8060
34	119,35	57,6124	19	6,3852	6,4313	6,4668
39	94,49	43,2457	20	1,5428	1,6132	1,6365
40	86,54	42,6599	20	2,6196	2,7514	2,8061

uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Anhang

Tabelle 84: Knochenmasse und Tauchgewichte von Radius/Ulna bzw. der dist. Epiphyse von Radius/Ulna sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1

Tier-Nr.	uS_{in toto} [g]	uS_{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG₁ [g]	TG₂ [g]	TG₃ [g]
3	67,05	13,2578	19	1,4063	1,4038	1,4106
5	72,63	13,6553	19	0,7198	0,7711	0,7863
7	39,11	7,1350	19	0,8611	0,8745	0,8750
8	92,10	18,0451	19	2,5942	2,6272	2,6473
9	43,53	7,2230	19	0,8703	0,9281	0,9150
10	73,23	15,1295	18	1,4762	1,5299	1,5293
11	84,53	15,2572	18	0,6166	0,6742	0,7174
13	62,86	13,0566	18	1,1829	1,2159	1,2416
15	71,06	15,9436	18	2,1642	2,1973	2,2150
26	40,33	7,3697	18	0,8653	0,8780	0,8915
27	41,21	7,6338	18	0,8018	0,8347	0,8242
32	84,92	17,0396	18	1,9500	1,9654	1,9884
33	71,42	13,5474	18	0,5670	0,6657	0,6969
34	87,24	18,8908	18	2,7223	2,7256	2,7237
39	65,58	13,4792	18	1,0732	1,1367	1,1734
40	65,59	14,1053	18	1,3310	1,3679	1,3572

uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Tabelle 85: Knochenmasse und Tauchgewichte des MC III sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1

Tier-Nr.	uS_{in toto} [g]	uS_{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG₁ [g]	TG₂ [g]	TG₃ [g]
3	10,0841	-	19	1,4555	1,4572	1,4534
5	10,8925	-	19	1,1174	1,1273	1,1215
7	6,3942	-	19	0,8544	0,8699	0,8689
8	12,3780	-	19	2,2780	2,2765	2,2763
9	6,4275	-	19	0,8350	0,8765	0,8914
10	10,1105	-	19	1,0510	1,0874	1,0985
11	11,9987	-	19	1,3350	1,3528	1,3584
13	10,2374	-	19	1,2505	1,2671	1,2627
15	10,6847	-	19	1,8019	1,8029	1,8166
26	5,7912	-	19	0,8644	0,8696	0,8751
27	6,3363	-	20	0,8906	0,9028	0,9093
32	13,6410	-	20	2,1649	2,1724	2,1719
33	11,3687	-	19	1,4175	1,3931	1,3788
34	12,6738	-	19	1,9868	1,9893	1,9905
39	10,3490	-	19	1,2388	1,2383	1,2428
40	9,3802	-	20	0,9561	0,9674	0,9743

MC III: *Os metacarpale III*, uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Anhang

Tabelle 86: Knochenmasse und Tauchgewichte des Femurs bzw. der dist. Femur-Epiphyse sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1

Tier-Nr.	uS _{in toto} [g]	uS _{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG ₁ [g]	TG ₂ [g]	TG ₃ [g]
3	107,77	52,9093	20	4,8893	4,8442	4,8716
5	118,30	57,6988	20	4,8282	4,9890	4,9597
7	69,21	33,5545	20	3,8734	3,9308	3,9365
8	145,35	68,3260	20	8,5799	8,7373	8,7501
9	69,00	31,7314	20	4,0236	4,0509	4,0571
10	119,20	63,2162	19	5,2802	5,4014	5,3707
11	131,76	66,5327	19	4,5516	4,5085	4,4875
13	115,24	59,6865	19	4,0050	4,1179	4,1873
15	120,32	59,5654	19	5,9031	5,9224	5,9554
26	61,32	30,6313	19	2,5523	2,6097	2,6536
27	68,13	34,2698	19	4,1790	4,2149	4,2128
32	130,34	63,3540	19	5,4662	5,5707	4,5926
33	118,29	58,3430	19	4,3151	4,3986	4,4151
34	143,14	67,1448	19	6,9474	6,9743	6,9582
39	111,89	51,7043	19	4,8174	4,8658	4,8701
40	100,11	51,8833	19	3,2088	3,2488	3,2745

uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Tabelle 87: Knochenmasse und Tauchgewichte von Tibia/Fibula bzw. der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1

Tier-Nr.	uS _{in toto} [g]	uS _{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG ₁ [g]	TG ₂ [g]	TG ₃ [g]
3	80,96	33,8200	20	3,3546	3,3984	3,4058
5	89,22	37,8383	20	3,2173	3,2941	3,3057
7	51,90	19,3398	19	2,1631	2,2072	2,2158
8	108,78	42,0135	19	5,0217	5,0885	5,1420
9	49,90	17,8252	20	1,9976	2,0381	2,0524
10	88,53	39,5205	20	2,7958	2,8649	2,8783
11	94,13	40,8970	20	2,7264	2,7824	2,8113
13	81,78	36,6748	20	2,6850	2,7829	2,8461
15	87,01	34,1434	20	3,2353	3,3046	3,2999
26	43,34	17,8289	20	1,4530	1,5225	1,5474
27	49,57	19,9475	20	2,1755	2,2064	2,2226
32	96,48	37,9377	20	2,9257	3,0329	3,0919
33	85,04	32,8435	20	2,1734	2,2190	2,2331
34	100,44	36,9511	20	3,8470	3,8954	3,9115
39	79,87	32,3292	20	2,8747	2,8967	2,9051
40	70,90	30,6088	20	1,8414	1,9053	1,9208

uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Anhang

Tabelle 88: Knochenmasse und Tauchgewichte des MT III sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1

Tier-Nr.	uS_{in toto} [g]	uS_{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG₁ [g]	TG₂ [g]	TG₃ [g]
3	11,0613	-	20	1,4768	1,4745	1,4433
5	11,7880	-	20	1,4133	1,3993	1,3940
7	6,7900	-	20	0,9626	0,9894	0,9899
8	13,9775	-	19	2,6655	2,6638	2,6499
9	6,8507	-	20	0,9873	1,0162	1,0255
10	11,2805	-	19	1,3971	1,3680	1,3546
11	12,4977	-	19	1,2709	1,2824	1,2729
13	10,8343	-	19	1,1442	1,1190	1,0845
15	11,1151	-	19	1,5600	1,5664	1,5707
26	5,7205	-	19	0,6648	0,6897	0,7027
27	6,3542	-	19	0,7424	0,7632	0,7696
32	14,1865	-	19	1,9164	1,9342	1,9291
33	12,5190	-	18	1,5318	1,5248	1,5238
34	13,0946	-	18	1,7432	1,7444	1,7403
39	11,0892	-	18	1,2639	1,2634	1,2619
40	8,9669	-	18	0,7663	0,7655	0,7487

MT III: *Os metatarsale III*, uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Anhang

Tabelle 89: Knochenmasse und Tauchgewichte des Femurs bzw. der dist. Femur-Epiphyse sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedisches Prinzip im Durchgang 2

Tier-Nr.	uS_{in toto} [g]	uS_{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG₁ [g]	TG₂ [g]	TG₃ [g]
652	148,66	72,6858	19	6,5732	6,6293	6,6348
653	248,75	104,0667	20	10,7592	10,8599	10,8868
655	290,87	135,8733	20	13,6103	13,6716	13,7835
656	204,63	121,3287	20	18,9923	18,9935	19,0078
657	259,95	111,1184	19	10,7958	10,9059	10,9127
659	259,29	87,4310	20	11,8163	11,8660	11,8885
660	222,89	99,9021	19	8,4461	8,6070	8,6780
662	165,64	72,5744	20	7,1928	7,2558	7,2525
665	104,54	48,8697	19	5,8235	5,8377	5,8519
666	267,17	119,7216	20	13,6948	13,7937	13,8566
667	211,36	100,1731	20	12,0971	12,2234	12,2353
668	288,17	133,2728	19	12,9860	13,1614	13,3187
669	255,95	110,2137	19	5,6749	5,8111	5,9272
674	350,41	153,3300	19	26,5403	26,5517	26,5652
676	87,2	42,1778	19	4,3943	4,4029	4,3977
677	219,87	109,9946	20	9,5309	9,8101	9,9745
681	188,15	87,5306	20	7,9991	8,3631	8,4107
682	241,39	110,4098	19	9,9432	10,1924	10,2431
710	250,78	106,1926	20	16,3177	16,4152	16,4287
714	331,01	139,2004	20	26,0611	26,1560	26,2185
722	178,68 ¹	83,2550	20	8,4622	8,4395	8,4177
723	180,45	79,4248	20	6,6348	6,7440	6,7625
724	221,46	100,7959	19	11,1089	11,2303	11,2788
727	142,68	68,1137	19	6,2946	6,3459	6,3867
729	201,11	96,9662	20	9,0678	9,0710	9,1063
730	284,94	131,3294	20	14,6868	14,7689	14,7976
734	178,89	87,1165	19	9,6237	9,7041	9,7643
735	150,45	72,1993	20	8,3872	8,4628	8,4613
736	124,78	61,7873	20	5,8192	5,8520	5,8474
737	131,91	56,4434	19	6,8074	6,8011	6,7902
738	165,82	77,7230	20	6,0797	6,2038	6,2379
740	336,62	147,2321	20	25,1199	25,2308	25,2829
741	206,7	96,0418	20	9,9969	10,0512	10,0824
742	197,22	94,1662	20	6,2741	6,3342	6,3419
744	322,02	142,4933	19	24,4798	24,5554	24,6658
745	157,67	75,5291	19	10,4520	10,4589	10,4582
748	133,05	61,7575	19	6,9993	7,0012	7,0047
749	190,11	83,4000	19	10,3292	10,3855	10,3954
776	141,48	63,9220	19	4,8250	4,7774	4,7639
786	174,47	81,7504	19	7,0313	7,1197	7,1587

¹Knochen frakturiert; uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Anhang

Tabelle 90: Knochenmasse und Tauchgewichte von Tibia/Fibula bzw. der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 2

Tier-Nr.	uS_{in toto} [g]	uS_{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG₁ [g]	TG₂ [g]	TG₃ [g]
652	103,54	46,5704	20	4,5730	4,6480	4,6766
653	183,27	76,4088	20	8,5046	8,5956	8,6004
655	204,38	87,7421	20	9,3295	9,4581	9,5038
656	185,34	83,1537	20	14,5349	14,5755	14,6020
657	194,03	74,9489	20	8,5517	8,6342	8,6801
659	144,4	60,2471	20	9,9559	10,0301	10,0551
660	157,56	67,4861	20	6,5246	6,6667	6,7120
662	119,88	51,0805	20	6,0488	6,0699	6,0741
665	77,34	33,1605	19	4,0318	4,0611	4,0591
666	186,34	76,7060	21	10,6557	10,6838	10,7006
667	158,16	72,5688	20	9,9017	9,9862	10,0184
668	196,49	81,3077	20	8,3480	8,5337	8,6183
669	177,79	79,4636	20	5,5012	5,5895	5,6115
674	236,55	95,3781	20	17,7576	17,7943	17,7879
676	65,91	27,0917	19	3,3306	3,3274	3,3254
677	158,82	70,4789	20	6,8063	6,8795	6,9531
681	135,09	59,8686	21	5,4029	5,5277	5,5758
682	175,2	73,4719	20	8,2649	8,2902	8,3115
710	177,05	71,1121	20	12,6824	12,7512	12,7565
714	236,93	91,1522	20	18,7159	18,7485	18,7489
722	129,81	56,2380	20	5,9522	5,9886	5,9903
723	129,5	56,0492	21	5,6214	5,6609	5,6586
724	142,55	62,6632	20	7,6679	7,6924	7,6890
727	97,67	41,8707	21	4,3044	4,3571	4,3912
729	138,29	61,9538	20	6,2335	6,2874	6,2908
730	195,91	83,9532	20	11,3567	11,3594	11,3633
734	125,72	53,0503	20	6,4721	6,5348	6,5735
735	103,38	44,2292	21	5,8667	5,8945	5,9233
736	85,77	37,3430	21	3,8348	3,8794	3,8820
737	94,43	38,2100	19	4,9278	4,9692	4,9813
738	112,06	50,4519	20	4,9143	4,9859	4,9835
740	228,58	90,9848	20	16,5890	16,5963	16,5852
741	148,89	62,6632	20	7,4148	7,4516	7,4573
742	145,41	61,6889	20	5,8724	5,9421	5,9779
744	221,87	89,1491	20	16,3505	16,4252	16,4727
745	106,82	46,2103	20	6,5473	6,5857	6,5925
748	99,29	41,7781	20	5,0838	5,0973	5,0994
749	136,5	59,8114	20	8,1782	8,2526	8,2740
776	99,83	43,6058	20	4,6671	4,7206	4,7342
786	121,08	51,4908	20	4,8146	4,8819	4,8860

uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Anhang

Tabelle 91: Knochenmasse und Tauchgewichte des MT III sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 2

Tier-Nr.	uS _{in toto} [g]	uS _{Teilstück} [g]	Temp.Wasser [°C]	TG ₁ [g]	TG ₂ [g]	TG ₃ [g]
652	14,1542	-	20	1,8652	1,8790	1,8829
653	22,2593	-	20	4,3032	4,2921	4,2720
655	24,1154	-	19	4,0894	4,0671	4,0676
656	24,6182	-	20	5,2764	5,2694	5,2698
657	24,8579	-	19	4,4798	4,4730	4,4601
659	19,6505	-	20	3,9338	3,9425	3,9451
660	20,6769	-	19	3,0293	3,0388	3,0453
662	15,4609	-	20	2,6700	2,6664	2,6644
665	11,3708	-	20	1,9032	1,8948	1,8892
666	23,5135	-	20	5,2919	5,2860	5,2764
667	21,1548	-	20	3,7051	3,7022	3,7123
668	23,2706	-	19	4,2700	4,2626	4,2504
669	22,4934	-	19	3,6157	3,6118	3,6005
674	28,0774	-	19	5,8558	5,8639	5,8670
676	9,0413	-	19	1,3688	1,3526	1,3441
677	21,1965	-	19	2,9340	2,9531	2,9768
681	17,3986	-	19	2,5142	2,5315	2,5412
682	21,7994	-	19	3,4662	3,4800	3,4848
710	23,8637	-	19	5,1620	5,1544	5,1521
714	27,6536	-	19	7,2246	7,2208	7,2156
722	16,2287	-	20	2,3591	2,3652	2,3596
723	15,9634	-	20	1,9419	1,9534	1,9625
724	16,8444	-	19	3,3895	3,4207	3,4312
727	14,1823	-	20	2,0672	2,0711	2,0727
729	17,9070	-	20	2,9908	2,9803	2,9772
730	23,7317	-	19	5,0314	5,0309	5,0283
734	16,3041	-	19	2,9443	2,9417	2,9407
735	14,8355	-	19	2,3986	2,3683	2,3621
736	11,3771	-	19	1,6881	1,6873	1,6764
737	14,4167	-	19	2,3726	2,3737	2,3710
738	16,1984	-	19	2,5751	2,5786	2,5757
740	29,0454	-	19	6,8551	6,8693	6,8700
741	18,9382	-	19	2,9213	2,9306	2,9423
742	18,6492	-	19	2,7715	2,7479	2,7448
744	28,5297	-	19	6,8197	6,8115	6,8185
745	14,7120	-	19	2,6322	2,6306	2,6305
748	14,6632	-	19	2,6557	2,6530	2,6517
749	17,9629	-	19	3,3731	3,3798	3,3771
776	13,3807	-	19	2,0513	2,0364	2,0330
786	16,1203	-	19	2,6055	2,6007	2,5920

MT III: *Os metatarsale III*, uS: ursprüngliche Substanz, TG: Tauchgewicht

Anhang

Tabelle 92: BMD (qCT) der Tibia [mg/mm³] im Durchgang 1

Tier-Nr.	GesD_{Mitte}	CrtD_{Mitte}	GesD_{dist.}	TrbD_{dist.}	GesD_{prox.}	TrbD_{prox.}
3	640	875	333	340	246	206
5	496	747	272	260	276	269
7	690	873	304	274	317	305
8	758	942	352	344	357	313
9	625	845	375	388	359	336
10	424	680	291	286	254	210
11	512	807	266	247	252	235
13	448	693	301	306	256	218
15	682	947	379	387	273	247
26	713	854	355	340	297	264
27	612	823	355	351	306	273
32	657	915	308	303	245	214
33	519	781	273	267	241	223
34	636	914	317	318	256	226
39	510	815	309	304	237	193
40	462	749	289	288	311	305

BMD: Bone Mineral Density, qCT: quantitative Computertomografie, GesD = Gesamtdichte, prox.: proximal, TrbD = trabekuläre Dichte, CrtD = kortikale Dichte, dist.: distal

Tabelle 93: BMD (qCT) der Tibia [mg/mm³] im Durchgang 2

Tier-Nr.	GesD_{Mitte}	CrtD_{Mitte}	GesD_{dist.}	TrbD_{dist.}	GesD_{prox.}	TrbD_{prox.}
655	690	957	338	319	243	223
657	688	967	346	320	262	200
660	589	927	291	284	255	195
665	725	886,4	356	345	325	281
668	662	976	358	348	260	208
669	626	931	306	286	212	156
674	859	1011	500	497	448	437
676	647	903	339	323	307	258
682	740	949	312	308	269	234
714	817	1039	515	520	488	469
724	801	997	400	410	269	240
730	751	1082	420	425	273	248
737	742	946	336	313	371	315
740	894	1088	496	468	421	350
744	922	1062	524	508	404	373
748	645	901	360	342	337	309

BMD: Bone Mineral Density, qCT: quantitative Computertomografie, GesD = Gesamtdichte, prox.: proximal, TrbD = trabekuläre Dichte, CrtD = kortikale Dichte, dist.: distal

Tabelle 94: BMD (qCT) des MT III [mg/mm³] in den Durchgängen 1 und 2

Tier-Nr.	GesD _{Mitte}	CrtD _{Mitte}	GesD _{dist.}	TrbD _{dist.}	GesD _{prox.}	TrbD _{prox.}
8	342	585	359	359	324	234
10	178	317	287	284	284	263
13	170	318	300	317	301	309
15	249	451	395	428	308	273
660	240	432	347	359	281	215
669	267	476	294	283	307	258
714	490	847	544	537	485	411
744	428	753	549	614	425	325

BMD: Bone Mineral Density, qCT: quantitative Computertomografie, MT III: *Os metatarsale III*
 GesD = Gesamtdichte, prox.: proximal, TrbD = trabekuläre Dichte, CrtD = kortikale Dichte, dist.: distal

9.1.8.3 Chemische Analyse

Tabelle 95: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der prox. Humerus-Epiphyse; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	m _{Knochen} ² [g]	m _{extr. Fett} [g]
3	384	963	364	123	59,0	13,3	14,0580	2,1564
5	339	952	300	102	50,3	15,4	13,4590	2,2792
7	363	947	404	138	69,0	14,5	7,8187	0,6193
8	432	963	423	146	69,3	12,5	19,4802	2,6679
9	368	943	412	135	68,1	13,3	8,2368	0,6700
10	334	960	309	107	48,4	14,8	13,6059	1,4013
11	371	964	323	105	49,2	15,1	14,6092	4,3185
13	363	946	304	105	49,1	16,7	12,3911	3,1577
15	414	963	408	148	70,4	12,5	14,2357	2,4939
26	341	945	401	137	67,0	13,8	7,6902	0,4604
27	361	956	399	131	65,3	16,9	7,1656	0,6123
32	389	967	401	140	67,5	11,3	17,2718	2,9489
33	359	961	331	104	51,1	14,5	12,6415	2,3836
34	422	977	400	136	68,9	12,0	17,2904	4,1314
39	445	949	370	122	61,7	15,2	13,1225	4,5912
40	355	960	319	101	49,1	16,6	11,0439	2,6994

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Anhang

Tabelle 96: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der dist. Epiphyse von Radius/Ulna; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	m_{Knochen}² [g]	m_{extr. Fett} [g]
3	439	966	41,8	157	73,1	n. u.	4,3075	1,0607
5	418	958	362	127	61,7	n. u.	4,0034	1,2814
7	390	959	418	142	72,6	n. u.	2,2445	0,2764
8	460	971	474	171	86,3	10,8	6,2916	1,3014
9	389	960	413	145	74,4	n. u.	2,1858	0,3114
10	366	960	339	125	58,7	n. u.	4,3171	0,6883
11	465	964	392	136	68,0	n. u.	4,5289	2,1141
13	439	945	388	135	66,2	n. u.	3,8780	1,3681
15	480	958	459	170	81,8	n. u.	5,6517	1,5803
26	370	959	421	147	74,2	n. u.	2,3021	0,2058
27	406	973	416	138	72,5	n. u.	2,5153	0,3115
32	451	954	421	154	76,5	n. u.	5,3239	1,6292
33	431	952	383	136	67,4	n. u.	4,0179	1,3712
34	481	954	446	165	78,6	n. u.	5,8736	2,1881
39	509	953	446	145	64,7	n. u.	4,3486	1,8997
40	418	945	356	124	61,7	n. u.	3,9125	1,4529

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Tabelle 97: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte des MC III; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	m_{Knochen}² [g]	m_{extr. Fett} [g]
3	638	961	510	194	88,4	n. u.	3,6297	1,7233
5	588	971	469	174	79,1	n. u.	3,4317	2,0736
7	503	968	502	181	80,7	n. u.	2,0483	0,6197
8	615	955	533	184	83,9	n. u.	4,5801	1,7497
9	504	921	481	173	82,6	n. u.	3,4047	1,4933
10	564	939	439	159	70,6	n. u.	2,3759	0,5755
11	629	950	493	186	81,1	n. u.	3,7453	2,5774
13	614	948	467	172	80,0	n. u.	3,2291	2,0596
15	649	923	517	191	88,4	n. u.	3,9346	1,7992
26	494	939	491	174	84,7	n. u.	2,0624	0,4852
27	528	923	489	174	84,2	n. u.	2,2810	0,7057
32	614	940	512	194	88,9	n. u.	4,6149	2,5553
33	581	941	478	171	78,6	n. u.	3,4565	2,1032
34	634	941	513	191	87,4	n. u.	4,3042	2,5285
39	669	943	499	189	81,2	n. u.	3,3625	2,4126
40	593	923	440	161	73,3	n. u.	2,8735	1,7422

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; MC III: *Os metacarpale III*, TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Anhang

Tabelle 98: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der dist. Femur-Epiphyse; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes, im Durchgang 1

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	m_{Knochen}² [g]	m_{extr. Fett} [g]
3	385	966	375	126	60,2	12,0	15,4978	2,7533
5	335	947	309	106	51,6	12,0	14,5025	2,9782
7	339	963	412	142	71,8	12,7	9,6839	0,6812
8	404	966	444	158	75,5	12,1	21,6433	3,5699
9	342	964	388	139	70,6	12,3	9,2161	0,7672
10	315	950	282	98,5	49,6	15,2	16,3063	2,0943
11	401	969	352	118	54,9	13,4	16,3864	7,3642
13	365	947	315	109	49,2	16,9	15,1006	4,6893
15	418	971	404	146	73,5	12,4	18,0196	4,5338
26	333	970	392	134	70,4	12,7	8,9848	0,5249
27	351	947	389	136	69,2	11,7	10,1314	0,8628
32	380	970	394	139	67,4	12,5	19,0274	3,5299
33	342	964	331	117	56,4	15,2	15,2864	2,8307
34	405	980	410	144	71,7	12,3	19,5896	5,6089
39	417	972	385	131	66,0	15,5	14,5145	5,4223
40	359	975	326	111	56,1	15,7	13,5834	3,7426

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Tabelle 99: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	m_{Knochen}² [g]	m_{extr. Fett} [g]
3	381	939	362	130	65,4	15,2	9,6900	1,2848
5	338	954	318	107	53,4	15,6	9,2038	1,6797
7	338	921	371	124	68,0	n. u.	5,4355	0,2922
8	420	959	424	155	80,0	14,0	13,4684	1,5816
9	357	908	371	140	72,5	n. u.	5,2507	0,3383
10	327	947	304	87,3	44,6	15,6	9,6908	1,0328
11	398	941	345	108	54,2	15,6	10,4980	3,7492
13	373	944	324	105	52,6	n. u.	9,3827	2,4844
15	433	946	409	143	72,0	n. u.	10,2277	2,2100
26	345	959	398	129	62,3	n. u.	5,1045	0,2524
27	374	933	400	136	66,7	n. u.	5,2934	0,3835
32	388	968	384	140	68,2	n. u.	10,5689	1,8976
33	353	940	335	121	55,9	n. u.	8,5446	1,4841
34	417	964	417	125	57,3	16,9	10,4661	2,7095
39	427	941	371	125	60,4	17,8	8,9263	3,0203
40	366	958	327	105	50,5	n. u.	7,6705	1,7731

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Anhang

Tabelle 100: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte des MT III; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg]*	Ra [g/kg]*	Ca [g/kg]*	P [g/kg]*	Rfe [g/kg]*	m_{Knochen}[#] [g]	m_{extr. Fett} [g]
3	609	978	515	170	91,1	n. u.	3,7625	2,1513
5	582	981	485	167	86,4	n. u.	3,5298	2,5608
7	517	954	512	171	90,9	n. u.	2,2494	0,7653
8	629	957	539	191	94,3	n. u.	5,5624	2,3646
9	511	962	520	172	90,7	n. u.	2,3504	0,6505
10	555	940	435	145	72,3	n. u.	3,4167	2,1494
11	638	975	505	178	90,4	n. u.	3,9336	3,2058
13	617	937	463	167	76,0	n. u.	3,2057	2,5109
15	673	945	529	188	93,0	n. u.	4,2542	2,5193
26	507	961	510	175	91,8	n. u.	2,0187	0,4996
27	545	973	523	177	94,0	n. u.	2,1753	0,8131
32	622	979	544	174	88,9	n. u.	4,8448	3,0819
33	582	959	488	169	82,8	n. u.	3,7136	2,7783
34	655	977	537	176	94,1	n. u.	4,2283	3,4133
39	678	960	517	182	88,5	n. u.	3,4579	3,1969
40	630	971	479	161	80,9	n. u.	2,6774	2,2861

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Anhang

Tabelle 101: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der dist. Femur-Epiphyse;
Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes, im
Durchgang 2

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	m_{Knochen}² [g]	m_{extr. Fett} [g]
652	413	979	415	135	65,7	10,5	20,0743	5,8840
653	511	971	456	155	73,1	10,8	30,2412	16,3160
655	548	969	465	141	68,1	8,84	37,7093	27,7340
656	538	980	542	165	80,7	9,10	41,6998	14,8750
657	571	966	445	178	77,5	8,93	30,7824	23,7636
659	495	976	487	161	80,9	9,67	30,1232	7,0914
660	536	967	422	146	67,6	9,13	27,1905	19,5918
662	439	976	404	136	64,9	11,8	19,4686	7,5552
665	381	972	420	145	70,4	6,31	13,6045	2,3252
666	555	962	489	167	82,1	8,64	39,8429	17,4385
667	476	961	472	155	78,9	12,7	30,8001	9,4893
668	555	959	444	160	76,4	6,80	39,2133	25,0114
669	540	969	360	154	70,3	8,72	28,6058	22,4480
674	573	971	533	182	90,7	6,05	54,2466	21,7649
676	356	950	397	149	69,7	8,47	11,4838	1,4972
677	487	975	423	148	69,4	12,7	31,1568	15,2448
681	458	966	422	128	58,5	12,7	24,3059	9,7920
682	473	974	360	159	71,8	9,13	30,9274	14,0090
710	490	975	504	167	81,8	9,69	36,0142	9,5884
714	592	977	511	207	96,8	6,82	53,8956	17,2401
722	435	969	395	125	59,9	12,5	21,6957	9,0461
723	410	959	359	131	57,8	12,8	22,2296	6,1385
724	526	968	441	158	75,5	8,48	30,3642	14,7982
727	407	974	387	133	65,5	11,8	18,4239	5,6081
729	484	972	432	137	67,2	11,4	28,4488	11,4125
730	575	981	387	151	74,1	8,64	40,2690	25,2247
734	451	975	454	161	77,8	10,8	25,7908	8,2027
735	409	973	434	143	74,5	11,0	20,7742	4,6201
736	394	969	366	136	62,5	8,87	17,0891	3,8478
737	399	961	444	152	73,9	9,11	16,3563	2,8613
738	416	971	400	117	57,3	9,09	22,3449	5,8056
740	604	972	510	178	90,1	5,62	53,5122	23,6118
741	502	968	450	142	66,0	10,7	27,6330	13,8395
742	494	974	423	152	71,9	12,3	26,1349	14,0436
744	602	974	528	195	92,4	7,04	51,5127	22,4449
745	432	956	445	142	72,5	10,4	22,2623	5,7731
748	406	964	445	148	75,9	9,55	17,3897	3,6981
749	484	975	493	142	75,4	9,58	25,5263	8,3568
776	410	971	385	131	64,1	11,5	17,7243	4,7326
786	403	953	376	142	69,7	11,4	22,7855	5,8807

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Anhang

Tabelle 102: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 2

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	m_{Knochen}² [g]	m_{extr. Fett} [g]
652	425	976	417	137	68,0	11,4	13,5194	3,6091
653	506	979	467	165	78,6	10,5	22,9691	10,0370
655	529	973	419	173	81,7	10,1	25,1287	14,9802
656	545	978	533	182	91,9	8,29	29,5594	8,8895
657	539	956	456	145	69,8	9,52	22,0141	13,1034
659	494	979	501	166	85,9	7,34	21,9957	3,6471
660	512	969	380	156	69,6	6,61	19,7771	10,4225
662	438	972	426	134	64,4	11,6	15,0766	4,1199
665	384	958	416	156	78,9	8,18	9,8807	1,2685
666	532	979	511	172	87,8	7,07	26,4008	8,4263
667	485	974	501	162	77,3	8,32	23,9372	5,8464
668	536	966	455	156	73,2	10,3	24,2703	13,1296
669	551	969	414	143	69,6	10,1	22,3740	15,9746
674	563	966	496	184	85,0	5,72	36,0206	10,2945
676	355	964	401	149	72,5	8,11	7,6166	0,9081
677	461	978	423	144	71,3	10,3	20,0782	7,4243
681	460	971	418	149	74,5	9,44	17,2724	5,9722
682	455	980	357	134	63,9	8,77	21,5765	7,1917
710	501	979	523	172	84,8	6,60	25,4787	5,1180
714	587	968	531	174	87,2	5,50	36,9531	8,9929
722	414	975	399	130	66,4	9,75	15,4220	4,2833
723	416	972	367	119	55,5	11,7	15,5716	4,5287
724	513	974	424	151	72,8	7,32	20,8755	7,3780
727	402	980	384	135	63,2	9,38	11,9883	2,7441
729	457	975	416	141	63,6	9,34	18,2069	6,0319
730	531	968	429	163	73,6	7,64	26,2309	11,8799
734	444	971	455	157	75,1	9,34	16,1435	3,7631
735	420	978	452	154	73,1	7,60	13,5039	2,5133
736	388	975	373	125	56,5	10,5	10,5202	1,9437
737	411	955	448	153	74,2	5,93	11,8203	1,6603
738	415	976	411	133	64,8	8,51	15,1307	3,2351
740	582	973	530	187	94,3	6,18	34,7300	10,8423
741	492	969	450	166	77,2	9,12	19,1289	7,7643
742	472	975	419	153	72,4	11,2	17,6869	7,1744
744	589	969	531	189	92,1	5,67	34,9677	10,8413
745	436	972	455	165	83,4	8,63	14,5533	3,0299
748	421	961	460	144	74,8	7,28	12,8204	2,5929
749	481	953	469	177	86,0	10,7	19,7392	5,2318
776	402	976	389	149	71,0	12,1	12,7363	2,5590
786	394	959	381	134	64,3	10,2	14,7951	2,7101

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

Anhang

Tabelle 103: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte des MT III; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 2

Tier-Nr.	1. TS [g/kg uS]	2. TS [g/kg] ¹	Ra [g/kg] ¹	Ca [g/kg] ¹	P [g/kg] ¹	Rfe [g/kg] ¹	mKnochen ² [g]	mextr. Fett [g]
652	659	975	527	180	91,6	n. u.	4,8345	3,5918
653	696	964	560	198	95,7	6,75	8,9507	5,0541
655	723	930	538	194	91,2	4,58	9,0887	6,6305
656	715	978	587	209	110	6,80	10,4778	5,5077
657	732	928	535	201	92,4	7,22	9,5429	7,1150
659	686	959	547	203	102	5,28	8,3361	3,8532
660	704	956	511	183	89,1	6,78	7,3968	5,9515
662	682	968	543	209	96,1	n. u.	5,7411	3,6652
665	620	953	518	190	95,7	n. u.	3,8652	2,3077
666	726	973	587	218	105	5,71	15,2964	10,2809
667	698	973	580	215	106	7,32	8,3364	5,0648
668	707	929	541	197	89,7	6,51	8,8471	6,1940
669	715	960	538	195	93,5	7,05	7,9467	6,8351
674	744	932	565	202	96,9	5,53	12,6112	6,7630
676	587	949	514	135	91,0	n. u.	2,8400	1,7137
677	691	967	534	196	94,3	6,94	7,5421	5,7734
681	683	953	528	195	92,4	7,08	6,3912	4,3404
682	672	926	503	177	83,6	5,99	8,4177	5,2567
710	707	972	577	217	105	n. u.	10,1258	5,1440
714	745	970	592	220	106	5,36	13,6832	5,3944
722	666	951	521	199	87,5	n. u.	5,4791	4,1894
723	665	951	502	170	80,8	n. u.	5,5796	3,8915
724	703	929	531	185	88,9	5,97	7,4665	3,4387
727	643	950	525	186	90,5	n. u.	4,9247	3,2255
729	679	926	513	166	88,8	5,93	6,5897	4,3338
730	725	928	542	194	90,4	5,00	10,2042	5,5595
734	666	952	547	186	94,3	8,08	6,1541	3,5424
735	673	951	534	170	95,1	n. u.	5,1308	3,2879
736	641	948	515	192	86,9	n. u.	3,9882	2,4415
737	610	951	534	195	93,3	n. u.	4,9782	2,9430
738	625	953	529	192	92,5	n. u.	5,6242	3,4968
740	753	933	571	203	99,6	5,84	13,9191	6,3538
741	707	954	547	199	93,8	6,67	7,1809	4,9454
742	699	953	526	199	91,4	7,32	6,5455	5,0914
744	762	970	596	216	108	5,41	13,4286	6,5173
745	661	953	548	196	98,8	n. u.	5,3948	3,2684
748	635	953	547	205	96,4	n. u.	5,3301	3,0331
749	694	953	555	211	105	6,64	7,1358	4,1120
776	643	948	513	191	90,4	n. u.	4,6681	2,9318
786	613	953	509	185	87,9	n. u.	5,5801	3,2316

¹Gehalte je kg analysiertes Material (gefriergetrocknet, vorentfettet und gemahlen), ²nach Vorentfettung; TS: Trockensubstanz, Ra: Rohasche, Rfe: Rohfett

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsablauf im Durchgang 1 (Tiere in der Ferkelaufzucht: ca. 15 - 35 kg KM).....	- 38 -
Abbildung 2: Versuchsablauf im Durchgang 2 (Tiere in der Mast: ca. 30 - 95 kg KM) ...	- 38 -
Abbildung 3: Grundriss der drei Stallabteile, Angaben in m	- 42 -
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip	- 68 -
Abbildung 5: KM-Entwicklung [kg] der Ferkel im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$), in jeder Gruppe n = 4	- 90 -
Abbildung 6: KM-Entwicklung [kg] der Schweine im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$); in jeder Gruppe n = 12 (d-2 bis d25), n = 8 (d28 bis d46) bzw. n = 4 (d49 bis d82) ¹	- 91 -
Abbildung 7: P-Konzentration im Serum [mmol/l] aller 16 Ferkel im Durchgang 1 an d-1 sowie das Referenzintervall (Ref.) für Absetzferkel nach FRIENDSHIP et al. (1984).....	- 139 -
Abbildung 8: P-Konzentration im Serum [mmol/l] aller 40 Schweine im Durchgang 2 an d-1 sowie das Referenzintervall (Ref.) für „feeder pigs“ nach FRIENDSHIP et al. (1984).....	- 139 -
Abbildung 9: Streudiagramm zur Korrelation nach Pearson zwischen der mittels qCT bestimmten prox. GesD [mg/mm ³] und der nach dem Archimedischen Prinzip ermittelten Knochendichte [g/cm ³] der proximalen Tibia-Epiphyse im Durchgang 2 (n = 12).....	- 149 -
Abbildung 10: Streudiagramm zur Korrelation nach Pearson zwischen der Körpermasse [kg] und dem Ra-Gehalt in der uS [g/kg] im dritten Metatarsalknochen der Kontrolltiere im Durchgang 2 (etwa 30 bis 95 kg Körpermasse)	- 157 -
Abbildung 11: Streudiagramm zur Korrelation nach Pearson zwischen der Körpermasse [kg] und dem Ra-Gehalt je Volumeneinheit [mg/cm ³] im dritten Metatarsalknochen der Kontrolltiere im Durchgang 2 (etwa 30 bis 95 kg Körpermasse).....	- 158 -

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Literaturangaben zur Phosphoräquivalenz verschiedener Phytase-Quellen und -Dosierungen in der Fütterung von Schweinen	- 7 -
Tabelle 2:	Referenzwerte zu Ca- und P-Konzentrationen sowie zur Aktivität der alkalischen Phosphatase im Serum bzw. Plasma junger Schweinen (angegebene Referenzintervalle bzw. $\bar{x} \pm s$)	- 16 -
Tabelle 3:	Wachstumsraten der proximalen und distalen Epiphysenfugen verschiedener Gliedmaßenknochen bei Schweinen ($\bar{x} \pm s$ bzw. Min.- Max)	- 23 -
Tabelle 4:	Gruppenaufteilung sowie die Tieranzahl (n) und die Zielkörpermassen zum Zeitpunkt der Sektion im Durchgang 1	- 39 -
Tabelle 5:	Gruppenaufteilung sowie die Tieranzahl (n) und die Zielkörpermassen zu den verschiedenen Sektionszeitpunkten im Durchgang 2	- 39 -
Tabelle 6:	Zusammensetzung [%] der drei Aufzuchtfutter im Durchgang 1	- 45 -
Tabelle 7:	Zusammensetzung [%] der drei Mastfutter I im Durchgang 1	- 45 -
Tabelle 8:	Zusammensetzung [%] der drei Mastfutter I im Durchgang 2	- 45 -
Tabelle 9:	Zusammensetzung [%] der drei Mastfutter II im Durchgang 2	- 46 -
Tabelle 10:	Frequenz der Erfassung allgemeiner Daten in den Durchgängen 1 und 2 ...	- 60 -
Tabelle 11:	Übersicht zu den in Durchgang 1 und 2 verwendeten Kanülen	- 62 -
Tabelle 12:	Übersicht zu den anatomischen Begrenzungen der für die Dichtebestimmung und die chemische Analyse genutzten Anteile bestimmter Knochen	- 66 -
Tabelle 13:	Übersicht zu den mittels qCT untersuchten Proben aus dem Durchgang 1 .	- 70 -
Tabelle 14:	Übersicht zu den mittels qCT untersuchten Proben aus dem Durchgang 2 .	- 70 -
Tabelle 15:	Analysierte Nähr- und Mineralstoffgehalte des FAZ _{vor VB}	- 77 -
Tabelle 16:	Partikelgrößenverteilung im FAZ _{vor VB}	- 77 -
Tabelle 17:	Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivitäten sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten für die Aufzucht (Durchgang 1, Angaben je kg uS)	- 79 -
Tabelle 18:	Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten für die Aufzucht (Durchgang 1)	- 80 -

Anhang

Tabelle 19:	Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivität sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 1, Angaben je kg uS)	- 81 -
Tabelle 20:	Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 1).....	- 82 -
Tabelle 21:	Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivität sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 2, Angaben je kg uS)	- 83 -
Tabelle 22:	Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 2).....	- 84 -
Tabelle 23:	Chemische Zusammensetzung und Phytaseaktivität sowie die kalkulierten Energiegehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter II, Durchgang 2, Angaben je kg uS)	- 85 -
Tabelle 24:	Partikelgrößenverteilung [% i. d. TS] der drei MF-Varianten (Mastfutter II, Durchgang 2).....	- 86 -
Tabelle 25:	Mittlerer täglicher Futtermittelverbrauch und -aufwand zwischen d0 und d33 ($\bar{x} \pm s$) im Durchgang 1	- 89 -
Tabelle 26:	Mittlerer täglicher Futtermittelverbrauch und -aufwand zwischen d0 und d80 ($\bar{x} \pm s$) im Durchgang 2	- 89 -
Tabelle 27:	Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Serum der Tiere vor Versuchsbeginn an d-1 (n = 16) und zu Versuchsende an d34 (n = 4) im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$)	- 92 -
Tabelle 28:	Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Serum der Tiere aus dem Durchgang 2 vor Versuchsbeginn (d-1; n = 40) und zu den verschiedenen Sektionszeitpunkten an d26 (n = 12), d47 (n = 8) und d82 (n = 4), ($\bar{x} \pm s$) .	- 93 -
Tabelle 29:	Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke von verschiedenen Knochen der Vordergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 95 -
Tabelle 30:	Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke von verschiedenen Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 96 -
Tabelle 31:	Prozentuale Unterschiede der mittleren Knochenlänge und der mittleren Kompakta-Dicke von verschiedenen Gliedmaßenknochen der Tiere aus den	

Anhang

	drei Gruppen K, V1 und V2 an d34 gegenüber denen der Tiere aus der Gruppe VB (d-1) im Durchgang 1, [%].....	- 97 -
Tabelle 32:	Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke des Femur von Schweinen im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 98 -
Tabelle 33:	Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke der Tibia von Schweinen im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 99 -
Tabelle 34:	Länge, Diaphysen-Umfang und Kompakta-Dicke des MT III von Schweinen im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 100 -
Tabelle 35:	Prozentuale Unterschiede der mittlere Knochenlänge und der mittleren Kompakta-Dicke von verschiedenen Gliedmaßenknochen der drei Gruppen K, V1 und V2 an d26, d47 bzw. d82 gegenüber der Gruppe VB (d-1) im Durchgang 2, [%]	- 101 -
Tabelle 36:	Massen [g] der verschiedenen Knochen der Vorder- und Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 102 -
Tabelle 37:	Massen [g] der verschiedenen Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 103 -
Tabelle 38:	Knochendichte [g/cm ³ , nach Archimedischem Prinzip] in den verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Vorder- und Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 104 -
Tabelle 39:	Knochendichte [g/cm ³ , nach Archimedischem Prinzip] in den verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 105 -
Tabelle 40:	Mittlere Bone Mineral Density [mg/mm ³] an den verschiedenen Lokalisationen innerhalb der Tibia/Fibula von Schweinen zu Beginn und am Ende des Versuchs im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 106 -
Tabelle 41:	Mittlere Bone Mineral Density [mg/mm ³] an den verschiedenen Lokalisationen innerhalb der Tibia/Fibula von Schweinen zu Beginn und am Ende des Versuchs im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 107 -
Tabelle 42:	Korrelationskoeffizienten für die Beziehung zwischen der BMD der Tibia und des MT III bei Tieren aus den Durchgängen 1 und 2 (je n = 4)	- 108 -

Anhang

Tabelle 43:	Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS und je cm ³ in verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Vordergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 110 -
Tabelle 44:	Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm ³ in verschiedenen Knochen bzw. Anteilen von Knochen der Hintergliedmaße im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4).....	- 112 -
Tabelle 45:	Absolute Ra-Menge [g] in MC III und MT III im Durchgang 1 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4)	- 113 -
Tabelle 46:	Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm ³ in der dist. Femur-Epiphyse im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4).....	- 115 -
Tabelle 47:	Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm ³ in der prox. Tibia/Fibula-Epiphyse im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4).....	- 116 -
Tabelle 48:	Ra-, Ca- und P-Gehalte je kg ffrTS bzw. je cm ³ im MT III im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4).....	- 117 -
Tabelle 49:	Absolute Ra-Menge [g] in MT III im Durchgang 2 ($\bar{x} \pm s$; in jeder Gruppe n = 4).....	- 118 -
Tabelle 50:	Angaben zu den verwendeten Laborgeräten	- 201 -
Tabelle 51:	Angaben zu den bei verschiedenen Knochengrößen verwendeten Einwaagen zur Ra-, Ca- und P-Bestimmung in den Durchgängen 1 und 2.....	- 201 -
Tabelle 52:	Deklarierte chemische Zusammensetzung inkl. der Zusatzstoffe der drei Mineralfuttermittel, Angaben je kg uS	- 202 -
Tabelle 53:	Chemische Zusammensetzung der Mineralfuttermittel für die Durchgänge 1 und 2 (Aufzucht, Mast I und II, Angaben je kg uS).....	- 203 -
Tabelle 54:	Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten für die Aufzucht (Durchgang 1, Angaben je kg uS)	- 203 -
Tabelle 55:	Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 1, Angaben je kg uS).....	- 204 -
Tabelle 56:	Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter I, Durchgang 2, Angaben je kg uS).....	- 204 -
Tabelle 57:	Vitamin E- und Aminosäuregehalte der drei MF-Varianten (Mastfutter II, Durchgang 2, Angaben je kg uS).....	- 205 -

Anhang

Tabelle 58:	Scoring System zur Beurteilung des klinischen Allgemeinbefindens der Tiere in den Durchgängen 1 und 2	- 205 -
Tabelle 59:	Scoring System zur Beurteilung des Bewegungsablaufs der Tiere in den Durchgängen 1 und 2	- 206 -
Tabelle 60:	Minimale bzw. maximale Raumtemperaturen [°C] in den verschiedenen Abteilen während der Durchgänge 1 und 2 (Min - Max)	- 207 -
Tabelle 61:	Grunddaten zu den Ferkeln und zur Gruppeneinteilung im Durchgang 1.	- 207 -
Tabelle 62:	Grunddaten zu den Tieren und zur Gruppeneinteilung im Durchgang 2 ..	- 208 -
Tabelle 63:	Futtermittelverbrauch [g] je Gruppe im Durchgang 1	- 209 -
Tabelle 64:	Futtermittelverbrauch [g] je Gruppe im Durchgang 2	- 209 -
Tabelle 65:	Körpermassen der Ferkel [kg] im Durchgang 1	- 210 -
Tabelle 66:	Körpermassen der Tiere [kg] zwischen d-2 und d25 im Durchgang 2	- 211 -
Tabelle 67:	Körpermassen der Tiere [kg] zwischen d28 und d49 im Durchgang 2	- 212 -
Tabelle 68:	Körpermassen der Tiere [kg] zwischen d56 und d81 im Durchgang 2	- 212 -
Tabelle 69:	Übersicht zu den behandlungswürdigen Befunden sowie zu Therapiemaßnahmen im Durchgang 1	- 213 -
Tabelle 70:	Übersicht zu den behandlungswürdigen Befunden sowie zu Therapiemaßnahmen im Durchgang 2	- 213 -
Tabelle 71:	Ca- und P-Konzentrationen sowie der Aktivität der AP im Blut im Durchgang 1	- 214 -
Tabelle 72:	Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Blut im Durchgang 2 - Teil 1 ¹	- 215 -
Tabelle 73:	Ca- und P-Konzentrationen sowie die Aktivität der AP im Blut im Durchgang 2 - Teil 2	- 216 -
Tabelle 74:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Humerus im Durchgang 1	- 217 -
Tabelle 75:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Radius im Durchgang 1	- 218 -
Tabelle 76:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des MC III im Durchgang 1	- 218 -

Anhang

Tabelle 77:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Femur im Durchgang 1	- 219 -
Tabelle 78:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser der Tibia im Durchgang 1	- 219 -
Tabelle 79:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des MT III im Durchgang 1	- 220 -
Tabelle 80:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des Femur im Durchgang 2	- 221 -
Tabelle 81:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser der Tibia im Durchgang 2	- 222 -
Tabelle 82:	Länge, Umfang und latero-lateraler bzw. cranio-caudaler Außen- und Innendurchmesser des MT III im Durchgang 2	- 223 -
Tabelle 83:	Knochenmasse und Tauchgewichte des Humerus bzw. der prox. Humerus-Epiphyse sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1	- 224 -
Tabelle 84:	Knochenmasse und Tauchgewichte von Radius/Ulna bzw. der dist. Epiphyse von Radius/Ulna sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1	- 225 -
Tabelle 85:	Knochenmasse und Tauchgewichte des MC III sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1 ..	- 225 -
Tabelle 86:	Knochenmasse und Tauchgewichte des Femurs bzw. der dist. Femur-Epiphyse sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1	- 226 -
Tabelle 87:	Knochenmasse und Tauchgewichte von Tibia/Fibula bzw. der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1	- 226 -
Tabelle 88:	Knochenmasse und Tauchgewichte des MT III sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 1 ..	- 227 -
Tabelle 89:	Knochenmasse und Tauchgewichte des Femurs bzw. der dist. Femur-Epiphyse sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 2	- 228 -

Anhang

Tabelle 90:	Knochenmasse und Tauchgewichte von Tibia/Fibula bzw. der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 2	- 229 -
Tabelle 91:	Knochenmasse und Tauchgewichte des MT III sowie die Wassertemperatur bei Dichtebestimmung nach dem Archimedischen Prinzip im Durchgang 2 ..	- 230 -
Tabelle 92:	BMD (qCT) der Tibia [mg/mm ³] im Durchgang 1	- 231 -
Tabelle 93:	BMD (qCT) der Tibia [mg/mm ³] im Durchgang 2	- 231 -
Tabelle 94:	BMD (qCT) des MT III [mg/mm ³] in den Durchgängen 1 und 2	- 232 -
Tabelle 95:	1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der prox. Humerus-Epiphyse; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1	- 232 -
Tabelle 96:	1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der dist. Epiphyse von Radius/Ulna; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1	- 233 -
Tabelle 97:	1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte des MC III; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1	- 233 -
Tabelle 98:	1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der dist. Femur-Epiphyse; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes, im Durchgang 1	- 234 -
Tabelle 99:	1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1	- 234 -
Tabelle 100:	1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte des MT III; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 1	- 235 -
Tabelle 101:	1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der dist. Femur-Epiphyse; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes, im Durchgang 2	- 236 -

Anhang

- Tabelle 102: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte der prox. Epiphyse von Tibia/Fibula; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 2..... - 237 -
- Tabelle 103: 1. und 2. TS, sowie Ra-, Ca-, P- und Rfe-Gehalte des MT III; Masse des Knochens nach Vorentfettung und Masse des extrahierten Fettes im Durchgang 2 - 238 -

Danksagung

Danksagung

Ich danke besonders meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. J. Kamphues, für die Überlassung dieses vielseitigen und praxisrelevanten Themas sowie für die umfassende wissenschaftliche Betreuung und seine kritischen Anmerkungen zu dieser Arbeit.

Mein herzlicher Dank gilt Frau Dr. Christine Ratert für ihre unermüdliche Unterstützung bei dieser Arbeit, ihre konstruktive Kritik und ihre große Hilfsbereitschaft während der gesamten Zeit.

Ich danke Herrn Prof. Dr. M. Wendt für seine kritischen Anregungen zur Versuchsplanung ebenso wie für seine Unterstützung bei der Untersuchung und Behandlung der Tiere während der Versuche.

Frau Dr. Cornelia Schwennen danke ich sehr für ihre Hilfe bei der Durchführung der zahlreichen Blutprobenentnahmen und Röntgenuntersuchungen.

Für die Durchführung der Messungen der Knochendichte mittels qCT möchte ich mich bei Frau Prof. Dr. A. Liesegang und Frau A. Gimmel bedanken.

Mein Dank für die Betreuung der statistischen Auswertung der Ergebnisse dieser Arbeit gilt Herrn Dr. Martin Beyerbach aus dem Institut für Biometrie.

Ich danke allen Tierpflegern und Praktikanten aus dem Institut für Tierernährung und der Klinik für kleine Klautiere, die bei der Durchführung der Versuche geholfen haben. Weiterhin danke ich allen Labormitarbeitern dieser beiden Einrichtungen für ihre Unterstützung bei der Bearbeitung der zahlreichen Proben – insbesondere Frau Jutta Haferkorn für ihre Hilfe beim Präparieren der Knochen sowie Frau Simone Möbus und Frau Kathrin von dem Hagen, die mit ihrem Einsatz geholfen haben, die Durchführung der Analysen (und damit der Dissertation insgesamt) zeitnah zu bewältigen.

Mein besonderer Dank gilt außerdem dem Team der Anatomie für die große Hilfsbereitschaft in verschiedenen Situationen und insbesondere Herrn Thorben Meyer für das Sägen der zahlreichen Knochen.

Ich möchte all meinen Mitdoktoranden für ihre verlässliche Unterstützung (insbesondere an den langen Sektionstagen!) und die schöne und oftmals lustige Zeit in der Tierernährung

Danksagung

herzlich danken. Ein besonderer Dank gilt Steffi als „Leidensgenossin“ in den letzten Monaten.

Zu guter Letzt gilt ein großer Dank meiner Familie und meinen Freunden für die Unterstützung und den Rückhalt in dieser Zeit der Doktorarbeit.

ISBN 978-3-86345-371-8



Verlag: Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft Service GmbH
35392 Gießen · Friedrichstraße 17 · Tel. 0641 / 24466 · Fax: 0641 / 25375
E-Mail: info@dvj.de · Internet: www.dvj.de