

**Vergleich der Körpermassezusammensetzung von intakten,  
immunologisch und konventionell kastrierten Ebern mittels  
MRT und DXA unter gleichzeitiger Betrachtung der  
Ebergeruchskomponenten bei der Schlachtung**

von Sebastian Schwanitz

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde  
der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität  
München

**Vergleich der Körpermassezusammensetzung von intakten,  
immunologisch und konventionell kastrierten Ebern mittels  
MRT und DXA unter gleichzeitiger Betrachtung der  
Ebergeruchskomponenten bei der Schlachtung**

von Sebastian Schwanitz  
aus Aachen

München 2016

Aus dem Lehr- und Versuchsgut der Tierärztlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Arbeit angefertigt unter der Leitung von: Prof. Dr. Armin M. Scholz

Mitbetreuung durch: Dr. Maren Bernau

**Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät  
der Ludwig-Maximilians-Universität München**

**Dekan:** Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun

**Berichterstatter:** Prof. Dr. Armin M. Scholz

**Korreferent:** Univ.-Prof. Dr. Holm Zerbe

**Tag der Promotion:** 16. Juli 2016

Meinen Eltern

&

Marie

Teilergebnisse aus dieser Dissertation wurden in folgenden Publikationen veröffentlicht:

**Schwanitz, S.**, M. Bernau, L.S. Kreuzer, A.M. Scholz (2014): Ebergeruch und Körperzusammensetzung – vergleichend für Eber, immunokastrierte und konventionell kastrierte Schweine. Tagungsband der Gemeinschaftstagung der Deutschen Gesellschaft für Züchtungskunde, Dummerstorf, 17.-18.09.14; S. D10

**Schwanitz, S.**, M. Bernau, L.S. Kreuzer, P.V. Kremer, A.M. Scholz (2014): Boar taint and body composition – evaluated in boars, immunological castrated pigs and barrows by dual-energy X-ray absorptiometry. Proceedings of the Third Annual conference on carcass evaluation, meat quality, software and traceability (FAIM), 25.-26.09.14, Copenhagen, Denmark; S. 43

# **I. INHALTSVERZEICHNIS**

<b>I.</b>	<b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>	<b>6</b>
<b>II.</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>9</b>
<b>III.</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>12</b>
<b>IV.</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>14</b>
<b>V.</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>17</b>
<b>VI.</b>	<b>LITERATURÜBERSICHT .....</b>	<b>19</b>
<b>1.</b>	<b>Kastration .....</b>	<b>19</b>
1.1	Chirurgische Kastration .....	19
1.1.1	Kastration ohne Anästhesie .....	19
1.1.2	Kastration mit Anästhesie.....	20
1.1.2.1	Lokalanästhesie.....	20
1.1.2.2	Allgemeinanästhesie .....	22
1.2	Alternativen zur chirurgischen Kastration .....	23
1.2.1	Immunologische Kastration.....	23
1.2.2	Ebermast.....	25
1.2.3	Zucht .....	28
1.2.4	Sperma-Sexing .....	28
<b>2.</b>	<b>Ebergeruch .....</b>	<b>29</b>
2.1	Ebergeruchskomponenten .....	29
2.1.1	Androstenon (5 $\alpha$ -androst-16en-3on) .....	29
2.1.1.1	Einflüsse auf die Androstenonbildung .....	31
2.1.2	Skatol (3-methylindol) .....	32
2.1.2.1	Einflüsse auf die Skatolbildung.....	32
2.1.3	Indol (1H-Benzopyrrol):.....	33
2.2	Schwellenwerte und Verbraucherakzeptanz.....	33
2.3	Sensorische Analyse auf Ebergeruch.....	35
2.3.1	Mikrowellen-Diathermieverfahren.....	36
2.3.2	Kochproben .....	36
2.3.3	Ausschmelzprobe .....	37
2.4	Chemische Analyse auf Ebergeruch .....	37

<b>3.</b>	<b>Analyse der Körperzusammensetzung .....</b>	<b>38</b>
3.1	Analyse auf Atomniveau .....	38
3.2	Analyse durch Gewebeinteraktion .....	39
3.3	Verdünnungsmethoden .....	39
3.4	Bildgebende Verfahren .....	40
3.4.1	Ultraschall (US) .....	40
3.4.2	Magnetresonanztomographie (MRT) .....	41
3.4.2.1	Geschichte und Aufbau der MRT .....	41
3.4.2.2	Physik der MRT .....	44
3.4.3	Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) .....	52
3.4.3.1	Geschichtliches und Aufbau der DXA .....	52
3.4.3.2	Physik der DXA .....	54
3.5	Computertomographie (CT) .....	64
<b>VII.</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN .....</b>	<b>66</b>
<b>1.</b>	<b>Tiermaterial .....</b>	<b>66</b>
1.1	Unterbringung der Tiere .....	66
1.2	Fütterung in Aufzucht und Mast .....	67
1.3	Untersuchungsschema der Tiere .....	68
1.4	Anästhesie .....	69
<b>2.</b>	<b>MRT-Untersuchung .....</b>	<b>69</b>
2.1	Auswertung der MRT-Bilder .....	70
<b>3.</b>	<b>DXA-Untersuchung .....</b>	<b>80</b>
3.1	Auswertung der DXA-Untersuchung .....	81
<b>4.</b>	<b>Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse .....</b>	<b>81</b>
<b>5.</b>	<b>Ebergeruchs-Sensorik .....</b>	<b>82</b>
<b>6.</b>	<b>Statistische Datenanalyse .....</b>	<b>82</b>
<b>VIII.</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>84</b>
<b>1.</b>	<b>DXA-Scans .....</b>	<b>84</b>
1.1	DXA-Scan 1 .....	84
1.2	DXA-Scan 2 .....	86
1.3	DXA-Scan 3 .....	88
<b>2.</b>	<b>MRT-Scans .....</b>	<b>90</b>



2.1	MRT-Scan 1 .....	90
2.2	MRT-Scan 2 .....	92
2.3	MRT-Scan 3 .....	94
<b>3.</b>	<b>Ebergeruchsanalysen .....</b>	<b>96</b>
3.1	Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse.....	96
3.1.1	Skatol.....	96
3.1.2	Indol.....	98
3.1.3	Androstenon .....	100
3.1.4	LogAndrostenon .....	102
3.2	Sensorik .....	104
3.2.1	Skatol.....	104
3.2.2	Indol.....	105
3.2.3	Androstenon .....	106
3.2.4	LogAndrostenon .....	107
<b>IX.</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>108</b>
<b>1.</b>	<b>Ergebnisse der DXA .....</b>	<b>108</b>
1.1	Knochenmineraldichte (BMD) .....	108
1.2	Knochenmineralgehalt (BMC).....	109
1.3	Absoluter und prozentualer Fettanteil .....	109
1.4	Absoluter Magerweichgewebeanteil.....	110
<b>2.</b>	<b>Ergebnisse der MRT .....</b>	<b>111</b>
2.1	Musculus longissimus dorsi (MLD).....	111
2.2	Schulter (Schu).....	111
2.3	Schinken (Schi) .....	112
<b>3.</b>	<b>Ergebnisse der Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse .....</b>	<b>113</b>
<b>4.</b>	<b>Ergebnisse der Sensorik .....</b>	<b>115</b>
<b>5.</b>	<b>Ausblick und Schlussfolgerung .....</b>	<b>117</b>
<b>X.</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>119</b>
<b>XI.</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>122</b>
<b>XII.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>125</b>
<b>XIII.</b>	<b>DANKSAGUNG.....</b>	<b>143</b>

## II. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Drei Komponenten-Modell der Körperzusammensetzung aus SCHOLZ (2002) .....	56
Abbildung 2: CT-Prinzip der Bilderfassung modifiziert nach JACKSON und THOMAS (2009) .....	64
Abbildung 3: CT-Prinzip mit Photonenquelle und Detektorenreihe modifiziert nach JACKSON und THOMAS (2009) .....	64
Abbildung 4: Injektion von Improvac® (Pfizer) mit Sicherheits- Impfpistole.....	68
Abbildung 5: Untersuchungsschema und Eingriffe an den Versuchstieren; Scan 1: LT $77\pm 1$ ; Scan 2: LT $112\pm 1$ ; Scan 3: LT $152\pm 1$ ; Schlachtung: LT $165\pm 1$ .....	68
Abbildung 6: Venen-Verweilkatheter in einer Ohrvene.....	69
Abbildung 7: Manuell definierte Bereiche für Muskel (Rot) und Fettauflage (Grün) des MLD .....	72
Abbildung 8: 3D-Modell des ersten Schnittbildes, Muskel (Rot) und Fettauflage (Grün) des MLD .....	73
Abbildung 9: 3D-Modell der fünf Schnittbilder, Muskel (Rot) und Fettauflage (Grün) des MLD .....	73
Abbildung 10: Halbautomatische Definition von Fettgewebe und (Mager-)Weichgewebe im ersten Schnittbild der Schulter (Schu_1s) .....	74
Abbildung 11: 3D-Modell des ersten Schnittbildes in der Schulter, Muskel (Grün) und Fettgewebe (Orange), luftgefüllte Bereiche und Knochen (Schwarz) .....	75
Abbildung 12: 3D-Modell der 5 Schnittbilder der Schulter (Schu_5s), Muskel (Grün) und Fett (Orange) .....	75
Abbildung 13: Manuelle Definition der Bereiche auf Höhe des Kniegelenks, die von der halbautomatischen Auswertung ausgenommen werden .....	76

Abbildung 14: Halbautomatische Definition von Muskel- und Fettgewebe im Schnittbild Schi_1s .....	77
Abbildung 15: 3D-Modell des Schnittbildes Schi_1s, Muskel (Magenta) und Fett (Türkis) .....	77
Abbildung 16: Manuelle Definition der Bereiche auf Höhe des Hüftgelenkes, die von der halbautomatischen Auswertung ausgenommen werden (Blau) .....	78
Abbildung 17: Halbautomatische Definition von Muskel- und Fettgewebe im ersten Schnittbild von Schi_3s.....	78
Abbildung 18: 3D-Modell der drei Schnittbilder Schi_3s, Muskel (Lila) und Fett (Gelb), Knochen und luftgefüllte Bereiche (Schwarz).....	79
Abbildung 19: Position der Tiere im DXA-Scan (hier bei Scan 2) .....	80
Abbildung 20: DXA-Untersuchungsbericht (nach manueller Definition der Ganzkörperregion) .....	81
Abbildung 21: Skatol in ng/g, nach Geschlechtern getrennt.....	96
Abbildung 22: Skatol in ng/g, nach Gruppen getrennt.....	96
Abbildung 23: Interaktionseffekt von Geschlecht und Gruppe auf den Skatol-Gehalt (ng/g) .....	97
Abbildung 24: Indol in ng/g, nach Geschlechtern getrennt.....	98
Abbildung 25: Indol in ng/g, nach Gruppen getrennt .....	98
Abbildung 26: Interaktionseffekt von Geschlecht und Gruppe auf den Indol-Gehalt (ng/g) .....	99
Abbildung 27: Androstenon in ng/g, nach Geschlechtern getrennt .....	100
Abbildung 28: Androstenon in ng/g, nach Gruppen getrennt .....	100
Abbildung 29: Interaktionseffekt von Geschlecht und Gruppe auf den Androstenon-Gehalt (ng/g).....	101
Abbildung 30: LogAndrostenon in ng/g, nach Geschlechtern getrennt	102
Abbildung 31: LogAndrostenon in ng/g, nach Gruppen getrennt .....	102

---

Abbildung 32: Interaktionseffekt von Geschlecht und Gruppe auf den LogAndrostenon-Gehalt (ng/g).....	103
---	-----

### III. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Repetitionszeit (TR), Echozeit (TE) und Gewichtung, modifiziert nach WEISHAUPT et al. (2009) .....	47
Tabelle 2: Massenschwächungskoeffizienten ( $\mu_m$ ) bei 40 keV und 70 keV und R-Werte von 11 Elementen modifiziert nach WANG <i>et al.</i> (2010).....	55
Tabelle 3: Prozentuale Anteile der Futterkomponenten in den verwendeten Futtermischungen .....	67
Tabelle 4: MRT Protokolle .....	70
Tabelle 5: Übersicht der ausgewerteten anatomischen Strukturen aus den MRT-Bildern .....	71
Tabelle 6: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 1 nach Geschlechtern getrennt .....	84
Tabelle 7: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 1 nach Gruppen getrennt .....	84
Tabelle 8: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 2 nach Geschlechtern getrennt .....	86
Tabelle 9: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 2 nach Gruppen getrennt .....	86
Tabelle 10: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 3 nach Geschlechtern getrennt .....	88
Tabelle 11: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 3 nach Gruppen getrennt .....	88
Tabelle 12: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Geschlechtern getrennt in MRT-Scan 1.....	90
Tabelle 13: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Gruppen getrennt in MRT-Scan 1 .....	91
Tabelle 14: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Geschlechtern getrennt in MRT-Scan 2.....	92

Tabelle 15: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Gruppen getrennt in MRT-Scan 2 .....	93
Tabelle 16: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Geschlechtern getrennt in MRT-Scan 3.....	94
Tabelle 17: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Gruppen getrennt in MRT-Scan 3 .....	95
Tabelle 18: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für Skatol in ng/g ....	104
Tabelle 19: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf Skatol; $p \leq 0,05$ .....	105
Tabelle 20: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für Indol in ng/g .....	105
Tabelle 21: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf Indol; $p \leq 0,05$ .....	105
Tabelle 22: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für Androstenon (Andro) in ng/g .....	106
Tabelle 23: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf Androstenon; $p \leq 0,05$ .....	106
Tabelle 24: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für LogAndrostenon .....	107
Tabelle 25: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf LogAndrostenon; $p \leq 0,05$ .....	107

## IV. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

€ *Euro*

µg *Mikrogramm*

µGy *Mikrogray*

<sup>40</sup>K *Kalium Isotop*

AutoFOM *Automatischer Fat-O-Meater*

AVV LMHyg *Allgemeinen Verwaltungsvorschrift über die Durchführung  
der amtlichen Überwachung der Einhaltung von  
Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen  
Ursprungs und zum Verfahren zur Prüfung von Leitlinien  
für eine gute Verfahrenspraxis*

BIA *Bioelektrische Impedanz*

C *Kohlenstoff*

Ca *Calcium*

Ce *Cerium*

CO<sub>2</sub> *Kohlendioxid*

CT *Computertomographie*

DL *Deutsche Landrasse*

DPA *Dual-Photonenabsorptiometrie*

DXA *Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie*

E *Intakte Eber*

ELISA *Enzymgekoppelter Immunadsorptionstests*

FSH *Follikelstimulierendes Hormon*

GC *Gaschromatographie*

GLM *Generalisiert lineares Modell*

GnRF *Gonadotropin releasing factor*

GnRH *Gonadotropin-Releasing-Hormon*

Gr I *Gruppe I*

Gr II *Gruppe II*

Gr III *Gruppe III*

H *Wasserstoff*

HF *Hochfrequenz*

HPLC *Hochdruckflüssigkeitschromatographie*

Hz *Hertz*

I *Immunologisch kastrierte Tiere (Immunokastraten)*  
K *Chirurgisch kastrierte Tiere (Kastraten)*  
keV *Kiloelektronenvolt*  
kV *Kilovolt*  
LH *Luteinisierendes Hormon*  
LogAndro *Werte für Androstenon logarithmiert*  
LT *Lebenstag*  
MDV *Mikrowellen-Diathermieverfahren*  
mg *Milligramm*  
MHz *Megahertz*  
ml *Milliliter*  
MLD *Musculus longissimus dorsi*  
MR *Magnetresonanz*  
MRT *Magnetresonanztomographie*  
msec *Millisekunden*  
N *Stickstoff*  
Na *Natrium*  
ng *Nanogramm*  
NIR *Nahinfrarot-Interaktanz*  
nm *Nanometer*  
Nr. *Nummer*  
O *Sauerstoff*  
OT *Organoleptic test*  
P *Phosphor*  
Pi *Piétrain*  
RMSEP *Root Mean Square Error of Prediction*  
Schi *Schinken*  
Schu *Schulter*  
SIDA *Stable Isotope Dilution Assay*  
SIVA *Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse*  
Sm *Samarium*  
SNP *single nucleotide polymorphisms*  
SPA *Single-Photonenabsorptiometrie*  
T *Tesla*  
T<sub>1</sub> *Longitudinale Relaxationszeit*



$T_2$  *Transversale Relaxation*

TE *Time to echo*

TOBEC *Total Body Electrical Conductivity*

TR *Time to repeat*

US *Ultraschall*

VO *Verordnung*

vs. *Versus*

z.B. *zum Beispiel*

## V. EINLEITUNG

In Deutschland werden 28,1 Millionen Schweine gehalten (Stand Mai 2015). Im ersten Halbjahr 2015 wurden 29,3 Millionen Schweine in Deutschland geschlachtet, im Vergleich zum Vorjahreszeitraum ein Plus von 2,3 % (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2015a). Männliche Ferkel werden bislang weltweit zum größten Teil kastriert, um unerwünschten Geruch und Geschmack des Fleisches zu vermeiden und aggressives Verhalten zu unterbinden (PLONAIT, 2004; THUN, 2006; BAUMGARTNER, 2008).

Mit der Düsseldorfer Erklärung, vom 29.09.2008, haben sich der Deutsche Bauernverband, der Verband der Fleischwirtschaft und der Hauptverband des Deutschen Einzelhandels auf nationaler Ebene darauf geeinigt, nach einer Alternative zur betäubungslosen Kastration männlicher Ferkel zu suchen, die praktikabel und flächendeckend einsetzbar ist (DEUTSCHER BAUERNVERBAND *et al.*, 2008; BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2014). Die Umsetzung sollte bis zum 01.01.2017 erfolgen, allerdings hat sich der Deutsche Bundestag mit der Novelle des deutschen Tierschutzgesetzes vom 28.07.2014 (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2014) über die Empfehlung des Bundesrates vom 01.02.2013, zur Beibehaltung dieses Stichtages (DEUTSCHER BUNDESRAT, 2013), hinweggesetzt und die Frist um zwei Jahre, auf den 31.12.2018, verschoben. Dies ist in §21 des Tierschutzgesetzes festgelegt (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2014).

Mit der Düsseldorfer Erklärung wurde gleichzeitig vereinbart, bis zur Findung einer Alternative zur betäubungslosen Kastration, in Deutschland nur noch nach Verabreichung eines schmerzstillenden Medikamentes zu kastrieren (DEUTSCHER BAUERNVERBAND *et al.*, 2008). Das deutsche Tierschutzgesetz in der Fassung vom 28.07.2014 schreibt dies verpflichtend erst ab dem achten Lebenstag vor. Die betäubungslose Kastration von Ferkeln durch sachkundige Personen ist bis zum siebten Lebenstag erlaubt. Danach muss der Eingriff in jedem Fall unter Anästhesie und Analgesie von einem Tierarzt durchgeführt werden (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2014).

Das Hauptproblem bei unkastrierten männlichen Schweinen ist die Ausbildung von Ebergeruch. Dieser kann von Verbrauchern als nicht akzeptable Beeinträchtigung angesehen werden. Die Gewohnheiten in verschiedenen Ländern haben allerdings einen großen Einfluss auf die Akzeptanz (BONNEAU, 1998). Zusätzlich zu den Gewohnheiten in den einzelnen Ländern ist die physische Möglichkeit, Androstenon wahrzunehmen individuell sehr variabel (WEILER *et al.*, 2000). Im Jahr 2014 wurden an deutschen Schlachthöfen 133 513 Schweine für genussuntauglich erklärt, 8,6 % wegen organoleptischer Anomalien (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2015b).

Die Evaluation von Fett- und Magerfleischanteil von männlichen immunologisch kastrierten, chirurgisch kastrierten und intakten Schweinen beschränkt sich in den meisten bisherigen Untersuchungen auf Erhebungen am Schlachtband oder die Untersuchung von Schlachthälften. Eine vergleichende Untersuchung mittels Magnetresonanztomographie (MRT) und Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) fand bisher nicht statt. Diese bildgebenden Verfahren bieten den Vorteil der Untersuchung *in vivo* über den gesamten Mastzeitraum.

Ziel dieser Doktorarbeit ist es, durch den Vergleich der Körperzusammensetzung von intakten Ebern, chirurgisch und immunologisch kastrierten Ebern mittels MRT und DXA, Hinweise auf die zu erwartende Schlachtleistung zu erhalten. Mit der gleichzeitigen Betrachtung des Ebergeruchs und der Ebergeruchs-Komponenten Skatol, Indol und Androstenon soll auf Basis dieser Daten eine Empfehlung über mögliche Alternativen zur konventionellen Kastration ohne Betäubung gegeben werden können.

## **VI. LITERATURÜBERSICHT**

### **1. Kastration**

Die chirurgische Kastration männlicher Ferkel dient der Sicherung der Fleischqualität durch Vermeidung der Bildung von Ebergeruch (PLONAIT, 2004; THUN, 2006; BAUMGARTNER, 2008). Sie ist zudem weltweit gängige Praxis in der Schweineproduktion um aggressives Verhalten zu unterbinden (THUN, 2006; BAUMGARTNER, 2008; ANDERSON & ST. JEAN, 2012). Im Folgenden werden die verschiedenen Möglichkeiten der chirurgischen Kastration beschrieben.

#### **1.1 Chirurgische Kastration**

Im Allgemeinen werden Ferkel im Alter weniger Tage kastriert. Hierfür werden die Tiere mit Hilfe spezieller Vorrichtungen oder einfach mit einer Hand in Rückenlage auf den Knien fixiert und die Hinterbeine nach vorne gestreckt. Diese frühe Kastration hat den Vorteil, dass sie von einer Person alleine durchgeführt werden kann. Zudem heilen die kleinen Operationswunden schneller und neigen weniger zur Abszedierung (PLONAIT, 2004). Bei der Kastrationstechnik hat es sich bewährt, die Hoden mit einem Finger nach *caudal* zu drücken und dann mit einem quer laufenden Schnitt oder zwei kleinen senkrechten Schnitten jeweils bis in das Hodenparenchym zu schneiden. Durch Druck können die Hoden dann aus dem Skrotum und dem eröffneten Processus vaginalis vorverlagert und mittels Skalpellschnitt oder Scherenschlag abgesetzt werden. Die Hautwunden werden nicht verschlossen und lediglich mit Blauspray lokal antibiotisch versorgt (BUER & PALZER, 2012).

##### **1.1.1 Kastration ohne Anästhesie**

In Deutschland erlaubt das momentan geltende Tierschutzgesetz in §6 Absatz 1, Satz 2a die betäubungslose Kastration nach der oben beschriebenen Methode bis zum siebten Lebenstag bei Ferkeln, bei denen keine anatomischen Besonderheiten auftreten (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2014). Auf europäischer Ebene schreibt die Richtlinie 91/630 die Kastration mit Anästhesie erst ab einem Alter von 4 Wochen vor (RAT DER EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT, 1991). Mit der Düsseldorfer

Erklärung haben sich im Jahr 2008 der Deutsche Bauernverband, der Verband der deutschen Fleischwirtschaft und der Hauptverband des deutschen Einzelhandels darauf geeinigt, bei der betäubungslosen Kastration ein geeignetes Schmerzmittel zu verabreichen (DEUTSCHER BAUERNVERBAND *et al.*, 2008). Die Ziele der Düsseldorfer Erklärung wurden im Jahr 2010 mit der Brüsseler Erklärung auf europäischer Ebene geregelt (COPA-COGECA (EUROPEAN FARMERS AND EUROPEAN AGRICULTURAL COOPERATIVES), 2010). Zeitgleich hat in Deutschland das Qualität und Sicherheit Label (QS) am 12.11.2010 ein Positionspapier veröffentlicht, in dem alle Mitgliedsbetriebe zur Schmerzmittelgabe bei der Kastration verpflichtet werden (QS QUALITÄT UND SICHERHEIT GMBH, 2010).

Bei der Kastration mit Schmerzmittelgabe kommt es gegenüber der Kastration ohne Behandlung zu einem höheren Arbeitsaufwand von 16,8 Sekunden (0,28 Minuten) pro Ferkel (DE ROEST *et al.*, 2009).

### **1.1.2 Kastration mit Anästhesie**

Im Zuge der Suche nach einer Alternative zur betäubungslosen Ferkelkastration sind verschiedene Methoden der Schmerzausschaltung untersucht worden. Von der Lokalanästhesie mittels Injektion oder Vereisungsspray, bis hin zu apparativ aufwändigen Gasnarkosen. Eine Auswahl der verschiedenen Methoden wird im Folgenden vorgestellt.

#### **1.1.2.1 Lokalanästhesie**

Die Lokalanästhesie mittels Lidocainhydrochlorid (2 %), beschrieben von EDMONDSON (2014) in Farm Animal Anesthesia, ist in Deutschland wegen der fehlenden Zulassung beim Schwein nicht möglich. Als Alternative steht beispielsweise Procainhydrochlorid (2 %) zur Verfügung. Dieser Wirkstoff ist für lebensmittelliefernde Tiere zugelassen (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2009).

Bei der Durchführung der Kastration unter Lokalanästhesie erfolgt die Fixation der Tiere analog zur Kastration ohne Anästhesie oder senkrecht aufgehängt an den Hinterbeinen (NEWCOMER & WALZ, 2014). Dann werden für die beiden Hautschnitte 0,5 – 1,0 ml Lokalanästhetikum *subcutan* über den beiden Hoden appliziert. Zusätzlich erfolgt die Injektion von je 0,5 ml Lokalanästhetikum in die beiden Samenstränge im

Leistenkanal. Eine weitere Methode, die von ZÖLS *et al.* (2006) untersucht wurde, besteht in der intratestikulären Injektion von Procainhydrochlorid. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen annehmen, dass die lokale Injektion des Anästhetikums ähnlich schmerzhaft ist wie der Eingriff ohne Betäubung. BAUMGARTNER (2008) hält die Kastration an sich mit Lokalanästhesie für weniger schmerzhaft, nicht jedoch die intratestikuläre Injektion.

Wird das Lokalanästhetikum bei dieser Kastrationsmethode von einem Tierarzt appliziert, bedeutet dies einen Mehraufwand von 28,2 Sekunden (0,47 Minuten). Der Landwirt hat hier einen Arbeitsaufwand von 13,2 Sekunden (0,22 Minuten) pro Ferkel. Werden Anästhesie und Kastration von derselben Person durchgeführt, sinkt der Aufwand auf 25,8 Sekunden (0,43 Minuten) pro Ferkel. Bei zusätzlicher Gabe eines postoperativen Schmerzmittels steigt er auf 34,8 Sekunden (0,58 Minuten) pro Ferkel (DE ROEST *et al.*, 2009).

Eine weitere Möglichkeit der lokalen Schmerzausschaltung haben GASTEINER *et al.* (2008) untersucht. Hierbei wurde Vereisungsspray *cutan* angewendet. Die Methode scheint nach Meinung der Autoren ökonomisch sowie vom Mehraufwand, verglichen mit der betäubungslosen Kastration, vertretbar. Allerdings ist die Durchtrennung des Samenstranges bei dieser Methode nach wie vor schmerzhaft. In einer weiteren Untersuchung brachte eine zusätzliche Vereisung des freigelegten Samenstranges keine zuverlässige Schmerzausschaltung in diesem Bereich (HAIMEL, 2008). Nach dem deutschen Tierschutzgesetz, §5, Abschnitt 4, Absatz 1 muss, bei ausschließlich äußerer Anwendung eines betäubenden Tierarzneimittels mit lokaler Wirkung, dieser Schritt nicht durch einen Tierarzt erfolgen (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2014).

### **1.1.2.2 Allgemeinanästhesie**

#### **1.1.2.2.1 CO<sub>2</sub>-Anästhesie**

Die CO<sub>2</sub>-Anästhesie induziert eine hervorragende chirurgische Toleranz, bedeutet aber nach einer Studie von KOHLER *et al.* (1998) erheblichen Stress für die Ferkel, der sich in Abwehrbewegungen, angestrenzter Atmung und Lautäußerungen in der Anflutungsphase äußert. Dieser subjektive Eindruck der Autoren wird durch die ermittelten ACTH- und  $\beta$ -Endorphin-Werte, als Stress-Parameter, untermauert. Die zusätzlichen Kosten pro Ferkelkastration liegen hier bei 34 Cent (DE ROEST *et al.*, 2009).

#### **1.1.2.2.2 Halothan-Anästhesie**

Die Halothan-Anästhesie stellt nach den Ergebnissen von KOHLER *et al.* (1998) keine Alternative dar, obwohl sie leichter anflutet, weniger Abwehrbewegungen hervorruft und ebenfalls zufriedenstellende chirurgische Toleranz induziert. Sie ist potentiell gesundheitsgefährdend für den Anwender und zudem in Deutschland nicht für lebensmittelliefernde Tiere zugelassen. Die zusätzlichen Kosten für eine Kastration mit dieser Anästhesie liegen zwischen 1,67 € und 5,85 €, abhängig davon, ob ein Landwirt oder ein Tierarzt die Narkose durchführt (DE ROEST *et al.*, 2009).

#### **1.1.2.2.3 Injektionsanästhesie**

Bei der Kastration mit Injektionsanästhesie ist die Betäubung, nach dem deutschen Tierschutzgesetz, durch einen Tierarzt durchzuführen (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ, 2014). Die Methode ist unter diesen Gesichtspunkten mit ca. 2 € pro Ferkel sehr kostenintensiv (DE ROEST *et al.*, 2009). Zudem birgt sie die Gefahr der postoperativen Erdrückung einzelner Tiere aufgrund der langen Nachschlafphase (BAUMGARTNER, 2008). In Deutschland sind nach aktuell geltendem Recht lediglich Ketamin und Azaperon als Wirkstoffe für eine Injektionsnarkose beim Schwein zugelassen (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2009). Diese Anästhesie ist nicht antagonisierbar, wie es mit Midazolam und Sarmazenil möglich wäre (DE ROEST *et al.*, 2009).

## **1.2 Alternativen zur chirurgischen Kastration**

### **1.2.1 Immunologische Kastration**

In Deutschland ist zur immunologischen Kastration lediglich das Präparat Improvac®(Pfizer) zugelassen. Es handelt sich um ein synthetisch hergestelltes Gonadotropin releasing factor (GnRF)-Analogon. Das Peptid ist, verglichen mit natürlichem GnRF, unvollständig und verkürzt und an ein Diphtherietoxoid als Trägerprotein gekoppelt (mindestens 300 µg/2 ml). Diese Kopplung und der Zusatz von Diethylaminoethyl-Dextran (300 mg/2 ml) als Adjuvans sollen eine immunogene Wirkung induzieren und verstärken (CRANE, 2006; VETIDATA, 2015).

Die immunologische Kastration basiert auf einer aktiven Immunisierung der Schweine gegen endogenes GnRF. Diese Unterbrechung der Hypothalamus-Hypophysen-Gonaden-Achse bewirkt eine reversible Ausschaltung der Androgenproduktion in den Hoden, einschließlich Androstenon. Die Impfung beinhaltet zwei Injektionen von jeweils 2 ml Impfstoff ab einem Alter von acht Wochen. Der Mindestabstand zwischen beiden Injektionen sollte 4 Wochen betragen, wobei die zweite Dosis 4 bis 6 Wochen vor der Schlachtung zu verabreichen ist (EUROPEAN MEDICINES AGENCY, 2009). „Die Verabreichung erfolgt durch subkutane Injektion am Ohrgrund mit Hilfe einer Sicherheitsimpfpistole. Es sollte eine kurze Nadel mit einer Einstichtiefe von 12 bis 15 mm verwendet werden....“(EUROPEAN MEDICINES AGENCY, 2009). Die Sicherheitsimpfpistole ist notwendig, um eine versehentliche Selbstinjektion des Anwenders zu vermeiden, da der Impfstoff beim Menschen ähnliche Wirkung wie beim Schwein haben kann (EUROPEAN MEDICINES AGENCY, 2009).

Die Akzeptanz der immunologischen Kastration bei Verbrauchern wurde von VANHONACKER und VERBEKE (2011) für Belgien, Deutschland, Frankreich und die Niederlande untersucht. Laut dieser Studie würde die Mehrheit der Verbraucher, nachdem sie über die konventionelle Kastration und die Alternative der Impfkastration informiert wurden, unabhängig von Moral-, Gesundheits- und Preisorientierung die immunologische Kastration bevorzugen.

In einer Studie von HÜGEL (2010) an 560 Tieren wurden die Wirksamkeit



und die Wirtschaftlichkeit der immunologischen Kastration im Vergleich mit chirurgisch kastrierten Tieren untersucht. Nach der zweiten Improvac®(Pfizer)-Injektion waren signifikant höhere Tageszunahmen bei den immunologisch kastrierten Tieren messbar. Nach der Schlachtung wurden 60 Bauchfettproben zu gleichen Teilen von Kastraten und Immunokastraten auf den Androsteningehalt untersucht. Der Höchstwert lag hier bei: 0,22 mg/kg. Sensorisch war keines der Tiere auffällig. In der Körperzusammensetzung erreichten die immunologisch kastrierten Tiere signifikant magerere Schlachtkörper und einen höheren Magerfleischanteil als konventionell kastrierte Tiere. Die Schlachtgewichte der konventionell kastrierten Tiere lagen signifikant höher.

WEILER *et al.* (2013) fanden in einer Fütterungs-Studie signifikante Unterschiede bei der Futteraufnahme von Immunokastraten. In dieser Studie wurden insgesamt 134 Tiere untersucht. Die Geschlechtergruppen waren aufgeteilt in Immunokastraten, Sauen, konventionell kastrierten Schweine und Eber. Alle Tiere erhielten *ad libitum* Fütterung. Eber verbrachten am wenigsten Zeit mit Fressen und nahmen am wenigsten Futter auf. Sauen fraßen öfter, aber nicht signifikant mehr als Eber. Konventionell kastrierte Tiere zeigten eine signifikant höhere Futteraufnahme durch vermehrtes Fressen über den Tag verteilt. Immunokastraten nahmen ähnlich häufig Futter auf wie Eber. Dieses Verhalten behielten sie auch nach der zweiten Improvac®(Pfizer) Injektion bei. Allerdings überstieg ab diesem Zeitpunkt die Menge des pro Mahlzeit aufgenommenen Futters die der anderen Geschlechtergruppen um 25 %.

In einem Fütterungsversuch, in dem Eber und immunologisch kastrierte Eber verglichen wurden, konnten EBSCHKE *et al.* (2014) ebenfalls Unterschiede in der Häufigkeit und der Dauer der Futteraufnahme zeigen. Auch hier fiel auf, dass Immunokastraten Ebern in der Futterverwertung ab der zweiten Improvac®(Pfizer) Injektion signifikant überlegen sind, wenn sie mit demselben Futter gefüttert werden. Allerdings erreichten Eber in dieser Studie eine signifikant höhere Ausschachtung. Immunologisch kastrierte Tiere wiesen am Schlachtband deutlich weniger Geruchsabweichungen auf.

Die lokale Reaktion der Versuchstiere auf die Injektion von

Improvac®(Pfizer) ist als gering einzustufen. Bei der Schlachtung gab es in der Studie von DUNSHEA *et al.* (2001) keine sichtbaren Veränderungen an der Injektionsstelle. Nach der zweiten Improvac®-Injektion zeigten nur 12 von 192 Tieren eine tastbare Impfreaktion. CRANE (2006) beschreibt, dass 90 % der Tiere keinerlei Impfreaktion zeigten, weder nach der ersten, noch nach der zweiten Impfung. Allerdings weist der Autor darauf hin, dass bei 2 % der Tiere am Schlachtband Gewebe an der Injektionsstelle verworfen werden musste. In einem Vergleich von Impfreaktionen verschiedener Schweineimpfstoffe an lebenden Tieren, zeigten BERNAU *et al.* (2015a) mittels MRT, dass ein GnRF-Analogon bereits nach der ersten Impfung die größte, signalintensitätsbedingte Volumendifferenz zwischen Impfseite und Kontrollseite aufweist.

### 1.2.2 Ebermast

Die Ebermast ist eine nichtinvasive Methode zur Vermeidung der betäubungslosen Ferkelkastration, die es den Ebern erlaubt, natürliches Verhalten zu zeigen (BÜNGER *et al.*, 2014). Eber sind aktiver als Sauen und Kastraten. Mit zunehmender Geschlechtsreife zeigen sie zudem vermehrt aggressives Potential und Sexualverhalten wie z.B. Aufreiten (HOPPENBROCK, 1995; FREDRIKSEN *et al.*, 2008; BÜNGER *et al.*, 2014; EBSCHKE *et al.*, 2014). Ähnliche Beobachtungen machte auch ISERNHAGEN (2015). In dieser Untersuchung wurde festgestellt, dass die Penisse von mehr als 30 % der Tiere bei der Schlachtung Narben sowie frische Bissverletzungen aufwiesen. Werden Eber in gemischtgeschlechtlichen Gruppen gemästet, zeigen sie signifikant weniger Aufreitversuche als Eber aus einer rein männlichen Gruppe (BÜNGER *et al.*, 2014). Auch ADAM (2014) berichtet, dass sich die Tiere in gemischtgeschlechtlichen Gruppen mit Ebern und Sauen ruhiger verhalten. Die Gefahr bei der gemischtgeschlechtlichen Mast sind Trächtigkeiten der weiblichen Tiere. In einem Versuch des Hauses Düsse waren bei der Schlachtung 1,5 % der weiblichen Schweine aus gemischtgeschlechtlichen Haltungsguppen frühtragend (ADAM, 2014). Die Inzidenz ungewollter Trächtigkeiten steigt mit längerer Mastdauer (BÜNGER *et al.*, 2014). Werden Eber (in geschlossenen Systemen) in Geschwistergruppen gemästet, sind sie weniger aggressiv als Tiere, die in

gemischten Gruppen gemästet werden (FREDRIKSEN *et al.*, 2008). Dieser Effekt lässt sich auch beobachten, wenn die Ferkel während der Säugezeit Kontakt zu wurffremden Ferkeln haben und nach dem Absetzen mit diesen zusammen gemästet werden (RYDHMER *et al.*, 2013). In Gruppen die erst zur Mast mit 10 Lebenswochen zusammengestellt wurden, konnte beobachtet werden, dass die Tiere gegenüber „Nicht-Wurfgeschwistern“ aggressiver waren als gegenüber Wurfgeschwistern (RYDHMER *et al.*, 2013).

Eber haben einen anabolen Stoffwechsel, ausgelöst durch synergistische Effekte von Androgenen und Östrogen (CLAUS *et al.*, 1994). Beide Hormone werden bei Ebern im Hoden gebildet. Androgene verhindern den Abbau von Muskelprotein, Östrogene steigern die Proteinsynthese (CLAUS *et al.*, 1994). Zudem regen Östrogene die Aktivität von Osteoblasten an und aktivieren so den Knochenaufbau (SILBERNAGL & DESPOPOULOS, 2007). Die bessere Mastleistung von Ebern gegenüber Kastraten wurde in einer Studie von HOPPENBROCK (1995) bestätigt. Die Vorteile werden hier vor allem in der geringeren Futteraufnahme und der besseren Futterverwertung gesehen. Diese Vorteile zeigten Eber auch in einer Untersuchung von FREITAG *et al.* (2014) gegenüber Sauen.

Aufgrund des hormonell anders beeinflussten Stoffwechsels muss die Fütterung von Ebern an die Ansprüche der Tiere angeglichen werden: der höhere Muskelansatz macht eine höhere Aminosäureversorgung, besonders in der Endmast, notwendig. Eine geringere Futteraufnahme in der Anfangsmast kann teilweise durch einen höheren Energiegehalt ausgeglichen werden (FREITAG *et al.*, 2014).

Eber liefern eine geringere Ausschachtung als Sauen und Kastraten (MATTHES *et al.*, 2014; SCHRADE *et al.*, 2014). Die Studie von SCHRADE *et al.* (2014) zeigt im Vergleich von Ebern, Kastraten und weiblichen Tieren, dass Eber und weibliche Schweine einen signifikant höheren Muskelfleischanteil besitzen als Kastraten. In der Ausschachtung sind weibliche Masttiere Ebern und Kastraten signifikant überlegen. Diese Daten wurden bei einer Mast in einem Aussenklimastall erhoben. Eine Zerlegungsstudie von BAUER und JUDAS (2014) zeigt, dass Eber gegenüber Sauen und Kastraten den signifikant höchsten Muskelfleisch-

und den niedrigsten Gesamtfettanteil haben. Zu einer ähnlichen Interpretation kamen bereits BABOL und SQUIRES (1995). Die Autoren vertreten die Meinung, dass Eberfleisch, welches nicht geruchsbelastet ist, die gleichen sensorischen Qualitäten und Verarbeitungs-Charakteristika aufweist wie das Fleisch anderer Geschlechter. In einer Untersuchung von BONNEAU (1998) wird der geringere Gesamtfettanteil im Fleisch von Ebern aus Verbrauchersicht positiv bewertet. Für die Industrie können der geringere Fettanteil und die schlechtere Fettqualität zum Problem werden, da Mindestgehalte und -qualität von Fett zur Verarbeitung notwendig sind (BONNEAU, 1998). Die nachteiligen Eigenschaften von Eberfleisch für die industrielle Verarbeitung werden von ADAM (2014) bestätigt. Bei höherem Muskelfleischanteil zeigen Eber gleichzeitig einen signifikant höheren Anteil an Knochen, Sehnen und Schwarte (BAUER & JUDAS, 2014). Der vollständige Geschlechtstrakt (Hoden und akzessorische Geschlechtsdrüsen) von Ebern ist schwerer und deshalb für die geringere Ausschachtung verantwortlich (BONNEAU, 1998; PAULY *et al.*, 2008; BOLER *et al.*, 2014).

Eber wachsen langsamer, haben aber eine signifikant bessere Futterverwertung als Kastraten (PAULY *et al.*, 2008). Dieser Unterschied konnte in der Untersuchung von SCHRADE *et al.* (2014), im Vergleich mit kastrierten Ebern und weiblichen Mastschweinen, nicht signifikant beobachtet werden. Der Vergleich zwischen der konventionellen Mast auf Vollspaltenboden und der Mast in einem Aussenklimastall hat gezeigt, dass die Mast in einem Außenlimastall für Eber besser geeignet ist, da die Tiere mit signifikant höheren Tageszunahme und geringerem Futterverbrauch eine bessere Leistung zeigen. Dass die Mast in einem Aussenklimastall positiven Einfluss auf die Körperzusammensetzung von Schweinen hat, fand auch BÖTTINGER (2006) heraus. Allerdings beschränkte sich der Vorteil hier auf die Mast im Sommer. Die Tiere in Aussenklimahaltung zeigten bessere Futterverwertung, höhere Tageszunahmen, einen signifikant höheren, absoluten Anteil an Magerweichgewebe, aber auch einen höheren, absoluten Anteil an Fettgewebe, verglichen mit einem konventionellen Maststall.

Negativ beeinflusst wird die Qualität des Eberfleisches durch den häufiger

auftretenden Ebergeruch (BONNEAU, 1998; SCHRADE *et al.*, 2014), auf den in Kapitel 2 genauer eingegangen wird. In einer Untersuchung von FREITAG *et al.* (2014) wurden 5,4 % der geschlachteten Eber wegen Geschlechtsgeruchs am Schlachtband aussortiert.

### 1.2.3 Zucht

In Bayern wird seit dem Jahr 2013 von der Erzeugergemeinschaft für Zucht- und Hybridzuchtschweine in Bayern w. V. eine Eberlinie angeboten, die unter dem Namen Bavarian-Piétralou für weniger geruchsauffällige Schlachtkörper steht (EISENREICH *et al.*, 2014). Möglich wurde diese Schweineline durch Entwicklung einer Schätzformel für den genomischen Zuchtwert, der Parameter des Ebergeruchs beinhaltet. Die genomische Selektion beruht darauf, genetische „Marker“ (SNPs = single nucleotide polymorphisms) im Genom zu betrachten, die für ein bestimmtes Merkmal codieren. SNPs sind zufällige DNA-Varianten für ein Merkmal, die über das gesamte Genom verteilt sind. Für den genomischen Zuchtwert wird der Einfluss dieser DNA-Varianten auf jedes einzelne Merkmal an einer Referenzpopulation berechnet. Die Summe aller SNP-Effekte im Genom ergibt den genomischen Zuchtwert für ein Merkmal (BUSKE & GENGLER, 2009). Möglich wurde diese Form der Zuchtwertschätzung durch DNA-Chips. Auf diesen können gleichzeitig mehrere tausend SNPs pro Tier typisiert werden (DODENHOFF, 2014). In klassischen zuchtplanerischen Berechnungen zeigten FRIEDEN *et al.* (2014b) hohe Variationen für Androstenon- und Skatol-Werte in verschiedenen Zuchtlinien mit Piétrain-Besamungsebern. Die Autoren fanden allerdings auch heraus, dass in den Mutterlinien der Prüfeber ebenfalls züchterisch an dem Problem Ebergeruch gearbeitet werden muss, bei tendenziell antagonistischen Beziehungen zwischen Fruchtbarkeit und Ebergeruch. Eine Empfehlung konnte aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse noch nicht gegeben werden.

### 1.2.4 Sperma-Sexing

Die bisher gängigste Methode des Sperma-Sexing stellt nach MORRELL und RODRIGUEZ-MARTINEZ (2011) die Sortierung von x- und y-chromosomenhaltigen Spermien mittels Durchfluß-Zytometrie dar.

Allerdings bleibt dieses Verfahren immer noch sehr kostenintensiv und zeitaufwändig, da bei Schweinen deutlich höhere Spermienzahlen bei der künstlichen Befruchtung benötigt werden als bei Rindern oder Pferden. Vor allem dieser Tatsache ist es geschuldet, dass sich Sperma-Sexing in der Schweineproduktion bisher nicht etablieren konnte.

## **2. Ebergeruch**

Eine genaue Definition des Ebergeruchs ist schwierig, da er von verschiedenen Menschen unterschiedlich wahrgenommen wird, je nach Anteil der enthaltenen Komponenten Androstenon, Skatol und Indol (MÖRLEIN, 2014). Als hauptverantwortlich werden die Komponenten Androstenon und Skatol angesehen (LUNDSTRÖM *et al.*, 2009), wobei Indol und andere Steroide die Wahrnehmbarkeit beider gravierend beeinflussen können (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997a). Häufig wird der komplexe Geruch als schweißig, moschusartig, sowie urin- und fäkalien-ähnlich beschrieben (ALDAL *et al.*, 2005; FISCHER & WÜST, 2012; MÖRLEIN, 2014). Das Fleisch ist meist auch geschmacklich beeinträchtigt. Besonders stark tritt diese Beeinträchtigung beim Erwärmen auf (BONNEAU, 1998; FISCHER *et al.*, 2011). Nachdem Anfang der 80er Jahre Skatol als mitverantwortlich für „Ebergeruch“ identifiziert wurde, haben dänische Schlachthäuser Verfahren eingeführt, bei dem Schlachtkörper mit auffälligen Skatol-Werten noch am Schlachtband aussortiert werden (PEARSON *et al.*, 1994). Dieses Verfahren findet in Deutschland ebenfalls, statt, allerdings nicht automatisch, da geruchlich beeinträchtigte Schlachtkörper nach VO (EG) Nr. 85/2004 als nicht genusstauglich zu beurteilen sind (EUROPÄISCHES PARLAMENT & RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2004).

### **2.1 Ebergeruchskomponenten**

#### **2.1.1 Androstenon (5 $\alpha$ -androst-16en-3on)**

Androstenon ist ein Steroid mit Pheromonwirkung, gehört zu den Androgenen und wird, neben den hormonell aktiven Steroiden Testosteron und Dihydrotestosteron, bei Ebern in den Leydigzellen der Hoden aus den Vorstufen Pregnenolon und Progesteron gebildet. Es dient der Kommunikation zwischen Eber und Sau, aber auch zwischen Ebern

(WEILER & WESOLY, 2012). Zudem wird der Zyklus von Sauen durch den Geruch von Androstenon beeinflusst (CLAUS *et al.*, 1994; WEILER & WESOLY, 2012). Der Geruch von Androstenon wird oft als urinartig (SCHNURRBUSCH, 2001; WEILER & WESOLY, 2012), von anderen Autoren zusätzlich als schweißig, beschrieben (ALDAL *et al.*, 2005; FISCHER *et al.*, 2011; MÖRLEIN, 2014). Die Umwandlung von Androstenon in  $\alpha$ - und  $\beta$ -Androstenol ( $5\alpha$ -androst-16en-3 $\alpha$ -ol und  $5\alpha$ -androst-16en-3 $\beta$ -ol) findet hauptsächlich in den Speicheldrüsen statt. Diesen Reduktionsprodukten wird ein moschusartiger Geruch nachgesagt (SCHNURRBUSCH, 2001; WEILER & WESOLY, 2012), der Mottenkugeln ähnelt (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997a). Sowohl Androstenon, als auch seine Reduktionsprodukte werden aus dem Speichel freigesetzt. Dies geschieht beim „Patschen“ des Ebers und löst bei rauschenden Sauen unter anderem den Duldungsreflex aus. Ein geringer Teil des Androstenons wird noch im Hoden umgewandelt und mit dem Urin ausgeschieden (WEILER & WESOLY, 2012).

Die Steuerung der Androgenbildung in den Hoden erfolgt über die Hypothalamus-Hypophysen-Gonaden-Achse: Das Gonadotropin-Releasing-Hormon (GnRH), ein Peptidhormon neurokriner Zellen im Hypothalamus, wird pulsatil in das venöse Pfortadersystem an die Adenohypophyse (Hypophysenvorderlappen) abgegeben. Es löst dort die Synthese und Freisetzung der Gonadotropine FSH (Follikelstimulierendes Hormon) und LH (Luteinisierendes Hormon) aus. Die LH-Freisetzung erfolgt hierbei aus intrazellulären Speichern, analog zur Pulsfrequenz der GnRH-Signale aus dem Hypothalamus. Die FSH-Synthese läuft nach GnRH-Stimulation kontinuierlich, ohne Zwischenspeicherung, ab. Sowohl bei FSH, als auch bei LH handelt es sich um Glykoproteine. Ihnen kommt beim männlichen Tier eine zentrale Rolle in der Steuerung der Hodenfunktion zu: LH regt die Synthese von Androgenen in den Leydigzellen über zellmembranständige Rezeptoren an. FSH wirkt auf die Sertolizellen und steuert hier die Spermatogenese (MEINECKE, 2005).

Androstenon ist lipophil und wird im Fettgewebe gespeichert. Bei einem Abfall des Blutplasmaspiegels wird es freigesetzt.  $\alpha$ - und  $\beta$ -Androstenol

sind wasserlöslich und werden nur zu geringen Teilen in Fettgewebe eingelagert (SCHNURRBUSCH, 2001).

#### **2.1.1.1 Einflüsse auf die Androstenonbildung**

Die Heritabilität für den Androstenongehalt im Fettgewebe ist sehr hoch ( $h^2 = 0,6$ ) (FRIEDEN *et al.*, 2014b). Die Selektion auf niedrigere Androstenon- und Östrogenproduktion hat wahrscheinlich Einfluss auf Wachstum und Fortpflanzungsreife (BONNEAU, 1998). Dass diese Selektion mit modernen Methoden ohne negative Auswirkungen, beispielsweise auf die Fruchtbarkeit, möglich ist wurde in Kapitel 1.2.3 beschrieben. Eine weitere Methode, die heutzutage zur Verfügung steht, ist die „Impfung“ männlicher, unkastrierter Schweine mit einem GnRH-Analogon zur Induktion einer humoralen Immunität gegen endogenes GnRH. Siehe Kapitel 1.2.1.

Die Autoren CLAUS *et al.* (1994), WEILER und WESOLY (2012) führen photoperiodische Einflüsse bei der Bildung von Hodensteroiden an. Abnehmende Tageslichtlänge stimuliert den Pubertätseintritt und verursacht höhere Androstenonwerte; zunehmende Tageslichtlänge verzögert die Pubertät und führt zu niedrigeren Androstenonwerten. Allerdings können diese jahreszeitlichen Effekte nicht in allen Untersuchungen nachgewiesen werden (WEILER & WESOLY, 2012). Für Androstenon konnten in einer Studie von FRIEDEN *et al.* (2014a) jahreszeitliche Unterschiede belegt werden: bei abnehmender Tageslichtlänge wurden höhere Werte gemessen als bei langer Tageslichtlänge. In einer Studie von ANDERSSON *et al.* (1998) fiel auf, dass die alleinige Interpretation von Androstenon- und Skatol-Werten als Ebergeruchs-Indikatoren, verglichen mit der sensorischen Beurteilung, zu Fehlern führen kann. In diesem Experiment wurden durch künstliches Lichtregime jahreszeitliche Unterschiede erzeugt. Obwohl die ermittelten Androstenon- und Skatol-Werte in der Kontrollgruppe am höchsten waren, wurde der Herbst/Winter-Gruppe sensorisch der stärkste Ebergeruch zugeordnet (ANDERSSON *et al.*, 1998). WALSTRA *et al.* (1999) konnten in einem Ländervergleich zeigen, dass die Werte für Androstenon und Skatol in Schlachtkörperproben stark variieren. Hohe Androstenon-Konzentrationen ließen in dieser Studie nicht zwangsläufig auf hohe



Skatol-Konzentrationen schließen. Zudem ließ sich ein jahreszeitlicher Unterschied nicht einheitlich darstellen.

### **2.1.2 Skatol (3-methylindol)**

Skatol ist ein mikrobielles Abbauprodukt der Aminosäure L-Tryptophan. Es wird im Verdauungstrakt vieler Nutztiere von Bakterien gebildet; hauptsächlich von der Gattung *Lactobacillus* (CLAUS *et al.*, 1994; DESLANDES *et al.*, 2001). Der Hauptort der Skatolbildung liegt beim Schwein im Colon (CLAUS *et al.*, 1994; WEILER & WESOLY, 2012). Besonders stark ist die Skatolbildung, wenn die Bakterien in eine Energiemangelsituation geraten. Als hauptsächliche Quelle des Tryptophan für die Skatolsynthese wird nicht das Futter, sondern der Zelldebris des Verdauungstraktes gesehen. Im Dickdarm wird das gebildete Skatol über die Schleimhaut absorbiert und über das Pfortaderblut zur Leber transportiert, wo der größte Teil abgebaut werden kann. Ein Teil gelangt allerdings in den peripheren Blutkreislauf und wird aufgrund seiner Lipophilie in Fettgewebe angereichert. Die Skatolbildung ist geschlechtsunabhängig, findet also sowohl bei Ebern, als auch bei Sauen und Kastraten statt. Geschlechtsspezifisch wird die Bildung allerdings hormonell beeinflusst: Androstenon hemmt die Skatolabbauenden Enzyme in der Leber, wodurch der Skatolgehalt des peripheren Blutes ansteigt und mehr Skatol in Fettgewebe eingelagert wird (WEILER & WESOLY, 2012).

#### **2.1.2.1 Einflüsse auf die Skatolbildung**

In einem Fütterungsversuch von LÖSEL (2006) wurde nachgewiesen, dass der Zusatz von 30 % Kartoffelstärke zu einer deutlichen Abnahme des Skatolgehaltes im Darminhalt und im Fettgewebe führt. Die Abnahme der Werte beruht auf einer verringerten Zelltod-Rate im Colon, wodurch weniger Tryptophan für die Skatol-Synthese zur Verfügung steht (LÖSEL, 2006). Positive Effekte auf den Skatol-Level im Fettgewebe konnten zudem durch Sauberkeit der Tiere, durch die Haltung auf Vollspaltenboden statt auf planbefestigtem Boden und durch Flüssigfütterung beobachtet werden. Die Bildung von Skatol lässt sich maßgeblich durch Haltungs- und Fütterungsbedingungen beeinflussen (WEILER & WESOLY, 2012). In einer

Studie von FRIEDEN *et al.* (2014a) zeigt sich zwar, bezogen auf die Saison, ein signifikanter Effekt für den Skatolgehalt der Proben, allerdings führen die Autoren diesen eher auf Unterschiede in der Hygiene und Haltung verschiedener Versuchsgruppen zurück. Die Möglichkeit, Schweine züchterisch auf niedrigen Skatolgehalt im Fett zu selektieren, scheint mit klassischen Selektionsmethoden gering, da das Merkmal nicht immer phänotypisch exprimiert wird (BONNEAU, 1998).

### **2.1.3 Indol (1H-Benzopyrrol):**

Indol ist, wie Skatol, ein mikrobielles Abbauprodukt von L-Tryptophan, hauptsächlich gebildet im Dickdarm. Genau wie Skatol wird Indol über die Schleimhäute des Verdauungstraktes resorbiert und in Fettgewebe angereichert. Indol wird ebenfalls ein fäkaler Geruchscharakter nachgesagt (FISCHER *et al.*, 2011). Es scheint aber nur eine Rolle bei der Entwicklung von Ebergeruch zu spielen, wenn die Skatol-Level niedrig sind (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997b).

## **2.2 Schwellenwerte und Verbraucherakzeptanz**

Die Wahrnehmbarkeit der Ebergeruchskomponenten wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich beurteilt. Der Gehalt der einzelnen Komponenten wird in der meisten Literatur in  $\mu$ -Gramm pro Gramm Fett ( $\mu\text{g/g}$ ) angegeben. 1  $\mu\text{g}$  entspricht 100 ng. 5 $\alpha$ -androst-16en-3on, 5 $\alpha$ -androst-16en-3 $\alpha$ -ol und 5 $\alpha$ -androst-16en-3 $\beta$ -ol sind ab 0,1  $\mu\text{g/g}$  wahrnehmbar (PEARSON *et al.*, 1994). In Verbraucherstudien zur Akzeptanz von geruchsauffälligem Fleisch wurden für Androstenon Grenzwerte von 0,5  $\mu\text{g/g}$  bis 1,0  $\mu\text{g/g}$  ermittelt (BABOL & SQUIRES, 1995). Die Grenzwerte für die Akzeptanz differieren stark zwischen den einzelnen Studien: 0,5  $\mu\text{g/g}$  bis 1,0  $\mu\text{g/g}$  für Androstenon und 0,2  $\mu\text{g/g}$  bis 1,0  $\mu\text{g/g}$  für Skatol und seine Äquivalente (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997b). Bei 10 trainierten Testpersonen in der Studie von ANNOR-FREMPONG *et al.* (1997b), variierten die persönlichen Wahrnehmbarkeitsgrenzen für Androstenon zwischen 0,2  $\mu\text{g/g}$  und 1  $\mu\text{g/g}$  und für Skatol zwischen 0,008  $\mu\text{g/g}$  und 0,6  $\mu\text{g/g}$ . Eine andere Studie von VESTERGAARD *et al.* (2006) kommt zu dem Ergebnis, dass die Grenzwerte von 0,5  $\mu\text{g/g}$  für Androstenon und 0,25  $\mu\text{g/g}$  für Skatol als Grundlage einer elektronischen Nase im kommerziellen Gebrauch an nationale Verbrauchergewohnheiten

angepasst werden müssen. Die Wahrnehmbarkeitsgrenzen sind individuell sehr unterschiedlich und hängen unter anderem vom Geschlecht, dem Zyklusstand und der genetischen Prädisposition ab (HAVLICEK *et al.*, 2010). Frauen sind prinzipiell sensitiver für Androstenon als Männer (FISCHER, 1999; WEILER *et al.*, 2000; LUNDSTRÖM *et al.*, 2009). Etwa 25 % der Bevölkerung können Androstenon gar nicht wahrnehmen (CLAUS *et al.*, 1994), während Skatol von 99 % der Verbraucher wahrgenommen werden kann (CLAUS *et al.*, 1994; LUNDSTRÖM *et al.*, 2009). Die Zahlen für die Nichtwahrnehmung von Androstenon schwanken zwischen 7,6 % und 75 %, abhängig vom Geschlecht und der Prüfmethode (HAVLICEK *et al.*, 2010). Die höhere Sensitivität von Frauen für Androstenon äußert sich, verglichen mit Männern, in einer geringeren Akzeptanz von Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigungen bei Schweinefleisch (FISCHER, 1999; FONT I FURNOLS *et al.*, 2003). Auch das Alter hat einen hohen Einfluss auf die Androstenonsensitivität und die Akzeptanz von Schweinefleisch: Im Alter zwischen 41 und 60 Jahren gibt es die meisten sensitiven, aber auch die meisten insensitiven Menschen. Danach nimmt die Sensitivität drastisch ab (FONT I FURNOLS *et al.*, 2003).

Die Akzeptanz von geruchsauffälligem Fleisch bei Konsumenten ist länderspezifisch sehr unterschiedlich, da es in Ländern wie Großbritannien, Irland, Spanien und Portugal üblich ist, Eber zu schlachten (BONNEAU, 1998; FISCHER, 1999; KALLAS *et al.*, 2013).

KALLAS *et al.* (2013) fanden heraus, dass gesundheitsbewusste Verbraucher, und solche, die Ebergeruch negativ wahrnehmen, in verschiedenen Ländern bereit sind, im Sinne des Tierwohls mehr Geld für geruchsunauffälliges Fleisch zu bezahlen. Preisbewusste Verbraucher würden auch in Zukunft nicht mehr bezahlen wollen. Länderübergreifend stuften die Testpersonen die konventionelle, chirurgische Kastration in Bezug auf das Tierwohl eher niedrig ein.

In einer schwedischen Untersuchung von LAGERKVIST *et al.* (2006) fiel auf, dass sich Verbraucher einen Vorteil beim Verzehr von immunologisch kastrierten Tieren versprechen, verglichen mit konventionell kastrierten Tieren. Negativ wird das Fleisch von intakten Ebern bewertet. Die Autoren

schlussfolgern, dass bei Verbrauchern in Europa das Bewusstsein für Tierwohl die Angst vor Biotechnologie im Lebensmittel überwiegt und damit die immunologische Kastration eine Alternative zur chirurgischen Kastration und der Ebermast darstellt.

Skatol wird bei Verbrauchern in allen Ländern vor allem als geruchliche Abweichung wahrgenommen. Geschmacklich wird die Beeinträchtigung durch Androstenon und Skatol gleich abwertend beurteilt, allerdings weniger als die rein geruchliche (BONNEAU *et al.*, 2000a; BONNEAU *et al.*, 2000b). Diese Ergebnisse hängen mit dem individuell sehr unterschiedlichen Wahrnehmungsvermögen für Androstenon und Skatol zusammen: Personen, die beide Stoffe mittel bis stark ausgeprägt wahrnehmen, empfinden den Geruch auch als unangenehm (FISCHER, 1999). Die Empfindlichkeit für Skatol ist hierbei deutlich weiter verbreitet als für Androstenon (FISCHER, 1999; WEILER *et al.*, 2000; LUNDSTRÖM *et al.*, 2009). Die Intensität des Geruchs wird durch die Kombination von Skatol und Androstenon verstärkt: In einer Untersuchung von ANNOR-FREMPONG *et al.* (1997b) wurde von den Versuchspersonen die Skatol-Note bei Anwesenheit von Androstenon drei Mal stärker beurteilt als Skatol alleine. Bei Beurteilung der Androstenon-Note trat dieser Effekt nicht auf. Daraus resultiert, dass bei Androstenon der Grenzwert für die Wahrnehmbarkeit ausschlaggebend ist, bei Skatol der Akzeptanzgrenzwert.

### **2.3 Sensorische Analyse auf Ebergeruch**

Die sensorische Analyse ist aus den oben genannten Gründen schwierig. Sie wird je nach Prüfvorgabe entweder von trainierten Testpersonen durchgeführt, die sowohl Androstenon als auch Skatol wahrnehmen können, oder aber von Laien (MÖRLEIN, 2014). Allerdings gibt es auch bei trainierten Testgruppen länderspezifische Unterschiede (DIJKSTERHUIS *et al.*, 2000).

Im Anhang I, Abschnitt II, Kapitel V, Absatz 1.p) der EU-Verordnung 854/2004 ist festgelegt, dass die Mitgliedsstaaten dafür Sorge zu tragen haben, dass auch geruchlich und/oder geschmacklich verändertes Fleisch nicht in die Lebensmittelkette gelangt (EUROPÄISCHES PARLAMENT &

RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2004). Qualitativ und quantitativ wird die Veränderung nicht definiert (MÖRLEIN, 2014). Die Verordnung 854/2004 wurde mit der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift über die Durchführung der amtlichen Überwachung der Einhaltung von Hygienevorschriften für Lebensmittel tierischen Ursprungs und zum Verfahren zur Prüfung von Leitlinien für eine gute Verfahrenspraxis (AVV LMHyg) in deutsches Recht umgesetzt. In Anlage 4 der AVV LMHyg ist definiert, dass die organoleptische Beurteilung 24 Stunden nach der Schlachtung, im Idealfall von zwei erfahrenen Prüfern, durchzuführen ist. Die Beurteilung soll in der Abstufung negativ (-), mäßig abweichend (+) und hochgradig abweichend (++) erfolgen. Wenn sich beide Prüfer im Urteil uneinig sind, muss die Prüfung wiederholt werden. Besteht weiterhin eine Differenz in den Urteilen der Prüfer, ist im Falle einer Abweichung das Urteil eines Prüfers ausreichend (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2014).

### **2.3.1 Mikrowellen-Diathermieverfahren**

Das Mikrowellen-Diathermieverfahren (MDV) eignet sich zur orientierenden Beurteilung organoleptischer Abweichungen. Mittels einer handelsüblichen Mikrowelle werden bevorzugt Proben aus dem Kopfbereich mit Backenspeck, Muskel- und Speicheldrüsenanteil untersucht. 50 g Probe pro Schlachtkörper werden in Würfel von 1 cm Kantenlänge zerteilt und dann in einem Bratschlauch in der Mikrowelle bis zur Dampfbildung gegart. Die sensorische Beurteilung erfolgt zum einen direkt nach der Erhitzung und wird nach wenigen Minuten der Abkühlung wiederholt. Gegebenenfalls erfolgt zusätzlich eine Geschmacksprobe. Auffällige Proben bedürfen der weiteren Differenzierung durch die Koch- und/oder die Ausschmelzprobe (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2014).

### **2.3.2 Kochproben**

Bei den Kochproben unterscheidet man zwischen Kalt- und Heißansatz. Für den Kaltansatz werden 60 g Muskelfleisch grob gewürfelt (2 cm Kantenlänge), mit 90 ml Wasser aufgegossen und bis zum Sieden erhitzt.

Bei Ebern können zur Beurteilung zusätzlich separat Fett- und Speicheldrüsengewebe im gleichen Verfahren erhitzt werden. Beurteilt werden der austretende Dampf, der Extrakt und das gegarte Fleisch, jeweils bei 75 °C und nach dem Abkühlen bei 25 °C.

Im Heißansatz wird ein Stück Fleisch von 10 cm Kantenlänge für 5 Minuten in einem Liter siedendem Wasser gegart und danach aufgeschnitten. Direkt nach dem Anschnitt sind Geruch und Geschmack des Fleischstückes zu beurteilen (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2014).

### **2.3.3 Ausschmelzprobe**

Für die Ausschmelzprobe soll die Probenmenge 150 g betragen und vorzugsweise aus dem Rückenfett, ohne Muskeln und Bindegewebe entnommen werden. 20 g der Probe werden fein gewürfelt (5 mm Kantenlänge) und in einem feuerfesten Gefäß erhitzt, bis flüssiges Fett austritt. Die Erhitzung des Gewebes darf dabei nicht zu einer Bräunung führen. Die auftretenden Dämpfe werden nach dem in Anlage 4 der AVV LMHyg beschriebenen Schlüssel auf Abweichungen beurteilt und die Geruchseigenschaften beschrieben (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ, 2014).

## **2.4 Chemische Analyse auf Ebergeruch**

Um die Ebergeruchs-Komponenten Androstenon und Skatol bestimmen zu können, müssen diese aus dem Fett extrahiert werden. Die gebräuchlichste Methode ist heute die flüssig-flüssig-Extraktion. Nach der Extraktion erfolgt die Aufreinigung, danach die Bestimmung der Anteile der Komponenten. Die Auftrennung der Proben in die einzelnen Komponenten erfolgt mit Hilfe der Hochdruckflüssigkeitschromatographie (HPLC), Gaschromatographie (GC), Spektralphotometrie und enzymgekoppelter Immunadsorptionstests (ELISA). Die aufgetrennten Proben werden mittels Massenspektrometrie quantifiziert (HAUGEN *et al.*, 2012).

In einer Studie von BONNEAU *et al.* (2000a) wurde untersucht wie groß die Beziehung zwischen HPLC, Labor-ELISA und Schnelltest-ELISA ist. Für Androstenon zeigte sich, dass Laborwerte und Schnelltest differierten.

Bei Skatol und Indol konnte eine enge Beziehung zwischen HPLC und Schnelltest dargestellt werden. Die Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse (SIVA) bietet eine Verbesserung der bisherigen chemischen Analyseverfahren, da Androstenon,  $\alpha$ - und  $\beta$ -Androstenol, Skatol und Indol gleichzeitig bestimmt werden können. Durch den Einsatz von Deuterium-markierten Isotopen, mit den gleichen chemischen Eigenschaften wie die jeweiligen Analyten, lassen sich schneller, einfacher und günstiger genaue und belastbare Ergebnisse erzielen (FISCHER *et al.*, 2011).

### 3. Analyse der Körperzusammensetzung

#### 3.1 Analyse auf Atomniveau

Über die Bestimmung des **Gesamtkörper-Kalium** lässt sich am lebenden Untersuchungsobjekt der Magerweichgewebe-Anteil direkt schätzen, da Kalium nicht in Fett vorkommt. Hierbei dient das natürlich vorkommende Kalium Isotop  $^{40}\text{K}$  als Indikator (WARD, 1967; SCHOLZ & BAULAIN, 2009). Wird von der Körpermasse der ermittelte Magerweichgewebeanteil abgezogen, erhält man den Fettanteil (WARD, 1967). Ermittelt wird der  $^{40}\text{K}$ -Gehalt in einem Ganzkörper-Zähler, der die von  $^{40}\text{K}$  emittierte Gammastrahlung misst (WARD, 1967). Da diese Strahlung sehr gering ist, muss das Gerät gut abgeschirmt sein, um Störstrahlung von außen zu vermeiden (ANDERSON, 1967).

Die **Neutronenaktivierungsanalyse** ermöglicht, im Gegensatz zur Bestimmung des Gesamtkörper-Kalium, eine genaue Analyse des Anteils mehrerer Elemente gleichzeitig im Körper. Das Prinzip basiert auf dem Beschuss mit Neutronen. Atomkerne fangen diese Neutronen ein (Aktivierung), es entstehen instabile Isotope der Elemente H, C, N, O, Na, P, Cl und Ca. Je nach Energiegehalt der Neutronenstrahlung werden andere Elemente aktiviert. Kehren diese wieder in ihren stabilen Zustand zurück emittieren sie Gammastrahlung, deren Energieniveau für jedes Element charakteristisch ist und gemessen werden kann. Mit den Messergebnissen lässt sich über Formeln die Körperzusammensetzung berechnen (SCHOLZ, 2002). Aufgrund der hohen Kosten und der langen

Untersuchungszeiten hat sich diese Methode bisher im Bereich der Nutztierwissenschaften nicht durchgesetzt (SCHOLZ & BAULAIN, 2009).

### 3.2 Analyse durch Gewebeinteraktion

Mittels **Bioelektrischer Impedanz (BIA)** lässt sich der Anteil des Körperwassers und damit der fettfreien Körpermasse schätzen. Das Prinzip beruht auf der unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit der verschiedenen Kompartimente eines Körpers. Intra- und extrazelluläres Wasser hat aufgrund der Elektrolyte eine gute Leitfähigkeit und einen geringen Widerstand, Fett dagegen eine schlechte Leitfähigkeit und einen hohen Widerstand (KYLE *et al.*, 2004). Wird mittels Elektroden ein schwacher Wechselstrom durch den Körper geschickt, lässt sich der Widerstand, den dieser Strom auf der Strecke durch den Körper erfährt, messen. Mittels Schätzformeln, in die Widerstand, Körpergewicht und -länge einfließen, wird der Anteil fettfreier Körpermasse bestimmt (SCHOLZ, 2002). Die Messgeräte sind leicht zu transportieren, sicher und einfach bedienbar. Die Untersuchungsergebnisse sind reproduzierbar und liegen schnell vor (KYLE *et al.*, 2004).

Wie die BIA ist die **Total Body Electrical Conductivity (TOBEC)** eine Möglichkeit zur Bestimmung des Anteils des Körperwassers. Die Elektroden der BIA werden hierbei durch eine elektrische Spule ersetzt, mit der die Energieabsorption des Körpers in der Spule gemessen werden kann. „Die absorbierte Energiemenge ist eine Funktion von Fläche, Magnetfeldstärke und Leitfähigkeit (Konduktivität) pro Volumeneinheit bei einer spezifischen Frequenz“ (SCHOLZ & BAULAIN, 2009).

Im Gegensatz zu den beiden vorgenannten Methoden, basiert **Nahinfrarot-Interaktanz (NIR)** nicht auf der Messung von Impedanz, sondern auf der Absorption und Reflexion infraroter Strahlung im Wellenbereich von 850 bis 2600 nm. Limitierender Faktor bei dieser Technik sind die geringe Eindringtiefe und die fehlende Genauigkeit der Vorhersage bei alleinigem Einsatz dieser Technik in der Bestimmung der Körperzusammensetzung *in vivo* (MITCHELL *et al.*, 2005).

### 3.3 Verdünnungsmethoden

Diese Technik basiert darauf, dass sich ein **spezifisches Indikatorelement**



gleichmäßig in einem Kompartiment des Körpers verteilt und sein Anteil darin bestimmt wird. Wasser hat einen verhältnismäßig konstanten Anteil an der fettfreien Körpermasse und kann deswegen zur Bestimmung der Körperzusammensetzung genutzt werden. Um eine Analyse durchführen zu können, muss dem Patienten oral oder intravenös ein Indikator, z.B. **Deuterium-Oxid**, verabreicht werden. Nach einer definierten Zeit, in der sich der Indikator gleichmäßig im spezifischen Kompartiment verteilt, wird eine Blutprobe genommen und der Indikatorgehalt analysiert (SCHOLZ & BAULAIN, 2009).

### **3.4 Bildgebende Verfahren**

#### **3.4.1 Ultraschall (US)**

Der US arbeitet mit Schallwellen, die im Bereich zwischen 2,5 und 15 MHz liegen. Diese werden im Schallkopf mit einem Kristall aus Piezokeramik erzeugt. Die Ultraschallwellen werden an den Grenzflächen unterschiedlicher Gewebe reflektiert oder gebrochen. Wie groß der Anteil der reflektierten Schallwellen ist, hängt von der akustischen Impedanz der benachbarten Gewebe ab: Je größer der Unterschied ist, desto mehr Schallwellen werden an der Grenzfläche reflektiert. Die Intensität des Signals und die Zeit, die es zurück zum Schallkopf braucht, werden gemessen und für die Bildgebung in Grauwerte umgewandelt. Das Real-time-Verfahren ist das heute gebräuchlichste in der Bildgebung. Damit werden Gewebestrukturen und Bewegungen in Echtzeit dargestellt (JACKSON & THOMAS, 2009). US ist in der praktischen Anwendung weit verbreitet, weil die Geräte transportabel und vergleichsweise günstig sind (SCHOLZ & BAULAIN, 2009).

In der Eigenleistungsprüfung von Zuchttieren wird bei Schweinen die Rückenspeckdicke mittels US gemessen. Der gemittelte Wert wird auf ein konstantes Lebendgewicht korrigiert. Er fließt mit der Tageszunahme und der Bemuskelung in die Berechnung des Zuchtwertes ein (VON LENDERKEN & WICKE, 2006). In der Schlachtleistungsprüfung wird zusätzlich zur Rückenspeckdicke bzw. der Rückenspeckfläche, der Durchmesser des Musculus longissimus dorsi ermittelt, um daraus die Fläche des Muskels zu berechnen. Daraus lässt sich das Fleisch : Fett Verhältnis berechnen (STRACK, 2005).

An Schlachthöfen wird US in der AutoFOM-Klassifizierung von Schlachtkörpern eingesetzt, wobei es sich um einen Echtzeit-Ganzkörper-Ultraschall-Scan handelt (BRØNDUM *et al.*, 1998).

### 3.4.2 Magnetresonanztomographie (MRT)

Die MRT ist ein bildgebendes Verfahren, dass Schnittbilder mit hervorragendem Weichteilkontrast einzelner Körperregionen, oder ganzer Körper ermöglicht. Für die Bildgebung wird keine ionisierende Strahlung verwendet. Sie basiert auf der Autorotation, dem Spin, von Wasserstoffatomen (Protonen), die in Wechselwirkung mit einem starken externen Magnetfeld und einem Hochfrequenzimpuls treten (HENDRIX, 2003).

#### 3.4.2.1 Geschichte und Aufbau der MRT

Das Unternehmen Fonar stellte im Jahr 1980 den ersten, kommerziell nutzbaren Magnetresonanztomographen vor, der 1981 in Serie ging (FONAR CORPORATION, 2003-2006). Im Jahr 1983 installiert das Unternehmen Siemens seinen ersten, kommerziellen Magnetresonanztomographen für klinische Anwendungen in St. Louis, Missouri, USA (ZENER, 2014; RADIOLOGIE.DE, 2015). Von der Pionierzeit bis heute wurden Systeme entwickelt die sich unter anderem durch höhere Magnetfeldstärken, geringeres Gewicht, höheren Weichgewebekontrast und geringere laufende Kosten auszeichnen (ZENER, 2014).

Im tiermedizinischen und -züchterischen Bereich wurde der erste, ausschließlich für die Untersuchung von Nutztieren verwendete MR-Tomograph 1988 am Institut für Tierzucht und Tierverhalten in Mariensee aufgestellt (BAULAIN, 1997).

Physikalisch basieren alle MRT-Systeme auf dem gleichen Prinzip. Technisch lassen sich verschiedene Systeme anhand der verwendeten Magnete und ihrer Bauart unterscheiden:

- a) **Permanentmagnete:** Diese benötigen keine externe Energiezufuhr um magnetisch zu sein und halten somit die Unterhaltskosten niedrig. Allerdings lassen sich mit dieser Technik nur Feldstärken bis 0,5 Tesla erreichen (SCHILD, 1997). Durch ihre Bauart können

sie in offenen Systemen verbaut werden. Die Polschuhe liegen über bzw. unter dem Patienten. Das Hauptfeld liegt somit senkrecht zur langen Körperachse (HENDRIX, 2003).

- b) Elektromagnete** erzeugen nur ein Magnetfeld, wenn elektrischer Strom durch eine (Kupfer-)Drahtspule geleitet wird. Durch die eingesetzte elektrische Energie erwärmen sich diese Magnete und müssen im laufenden Betrieb gekühlt werden. Je höher die Magnetfeldstärke, desto größer die Wärmeentwicklung. Diese Magnete erzeugen aufgrund der ständigen Energiezufuhr relativ hohe, laufende Kosten (SCHILD, 1997; HENDRIX, 2003).
- c) Supraleitende Magnete** sind Elektromagnete, deren spezielle Stromleiter auf -269 Grad Celsius gekühlt werden. Bei diesen Temperaturen nahe des absoluten Nullpunktes verlieren Stromleiter ihren Widerstand. Der Supraleiter wird, im Gegensatz zu normalen Elektromagneten, nur einmal bis zur gewünschten Feldstärke mit Strom geladen. Dann fließt der Strom bei bestehender Kühlung mit konstant hoher Stärke über sehr lange Zeit im System (HENDRIX, 2003). Flüssiges Helium oder flüssiger Stickstoff sind als Kühlmittel in solchen Systemen im Einsatz. Bei älteren MRT-Systemen musste das Helium nach etwa sechs Wochen nachgefüllt werden (SCHILD, 1997). Moderne Siemens-MAGNETOM- Systeme arbeiten mit der sogenannten Zero Helium Boil-Off-Technologie. Mit dieser Technologie verbrauchen MRT-Systeme im normalen Betrieb kein Helium (ZENGER, 2014). Vorteil der supraleitenden Magnete sind die hohe Flussdichte und die Homogenität des Magnetfeldes (SCHILD, 1997).
- d) Ultra-Hochfeld-Magnete** ermöglichen auch in röhrenförmigen Systemen Feldstärken von bis zu 3 Tesla im klinischen Einsatz (HENDRIX, 2003). Hochfeld-MR-Tomographen sind die neueste technische Entwicklung. Diese Geräte ermöglichen Magnetfeldstärken von 2 bis 8 Tesla. Durch die hohe Magnetfeldstärke wird das Signal-zu-Rausch-Verhältnis besser, da das MR-Signal proportional mit der Magnetfeldstärke ansteigt. Allerdings bleiben die Geräte in der Praxis hinter den theoretischen

Werten zurück (WEISHAUPT *et al.*, 2009).

Das grundsätzliche Bauprinzip einer MR-Anlage ist immer gleich. Allen gemeinsam sind der Tomograph und das Computersystem. Der Tomograph besteht aus der Patientenliege (beweglich), dem Hauptmagneten, dem Gradientensystem und dem Hochfrequenzsystem. Das Hochfrequenzsystem wird weiter unterteilt in Sende- und Empfangsspulen sowie Sende- und Empfangsverstärker. Das Computersystem besteht aus dem Steuercomputer mit der Bedienkonsole, dem Bildrechner sowie der Steuerungs- und Auswertungssoftware (HENDRIX, 2003). Trotz des gleichen Bauprinzips lassen sich in der Systembauweise verschiedene Anlagen unterscheiden:

**a) Röhrenförmige Systeme:**

Hier wird das Magnetfeld innerhalb einer Röhre erzeugt. In solchen Systemen lassen sich alle Regionen des Körpers untersuchen. Der Vorteil liegt in dem starken, äußerst homogenen Magnetfeld. Nachteil dieser Bauform ist der eingeschränkte Raum in der Röhre. Patienten können sich eingengt und unwohl fühlen (HENDRIX, 2003).

**b) Offene Systeme:**

Diese sind an bis zu drei Seiten offen, ermöglichen also einen direkten Zugang zum Patienten, beispielsweise für Bewegungsstudien an Gelenken. Das Gefühl der Einengung für den Patienten wird umgangen. Nachteilig bei dieser Bauweise sind die geringere Feldstärke und geringere Homogenität, verglichen mit den röhrenförmigen Systemen (HENDRIX, 2003).

**c) Spezialsysteme:**

Diese Systeme werden im klinischen Bereich überwiegend für Untersuchungen an den Extremitäten und Gelenken verwendet. Sie haben meist niedrige, auf ihren Einsatzbereich angepasste Feldstärken (HENDRIX, 2003).

### 3.4.2.2 Physik der MRT

Atome bestehen aus einem Kern mit positiv geladenen Protonen und neutral geladenen Neutronen. Umgeben wird der Kern von der Elektronenhülle mit negativer Ladung. Da sich positive und negative Ladung gegeneinander aufheben ist ein Atom nach außen hin neutral (ZEECK *et al.*, 2005). Das einfachste Atom ist das Wasserstoff-Atom:  ${}^1_1\text{H}$  mit einem Proton im Kern und einem Elektron in der Hülle. Das Proton besitzt die Eigenschaft, sich immer um sich selbst zu drehen, den sogenannten Spin. Da es gleichzeitig eine elektrische Ladung besitzt, hat das Proton ein magnetisches Moment und verhält sich wie ein kleiner Magnet, der von Magnetfeldern und elektromagnetischen Wellen beeinflusst werden kann.

Versucht ein äußeres Magnetfeld die Spins entlang der Feldlinien auszurichten, vollführen sie eine Ausweichbewegung, ähnlich einem taumelnden Kreisel, die Präzessionsbewegung (WEISHAUPT *et al.*, 2009). Die Geschwindigkeit dieser Bewegung ist abhängig von der Stärke des Magnetfeldes ( $B_0$ ) das in Tesla (T) gemessen wird ( $1\text{T} = 10.000\text{ Gauß}$ ). Sie wird als Präzessionsfrequenz ( $\omega_0$ ) bezeichnet und in Hertz (Hz) beziehungsweise Megahertz (MHz) gemessen. Die Berechnung der Präzessionsfrequenz erfolgt durch die Lamor-Gleichung:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

weshalb sie auch Lamorfrequenz genannt wird.  $\gamma$  bezeichnet das gyromagnetische Verhältnis, das die Relation zwischen Präzessionsfrequenz und Magnetfeldstärke angibt. Diese liegt für Protonen bei 42,5 MHz/T (SCHILD, 1997).

Das externe Magnetfeld bewirkt die parallele, sowie die antiparallele Ausrichtung der Protonen, auch Spins genannt, entlang dieses Feldes. Da die parallele Ausrichtung energetisch günstiger ist, richten sich mehr Protonen parallel aus. Entgegengesetzt ausgerichtete Protonen heben ihre Magnetvektoren gegeneinander auf, der geringfügige Überschuss parallel ausgerichteter Spins ist verantwortlich für die Longitudinalmagnetisierung, da sich ihre Magnetvektoren addieren (WEISHAUPT *et al.*, 2009). Die Longitudinalmagnetisierung ist nicht direkt messbar, da sie

parallel zum externen Magnetfeld verläuft (SCHILD, 1997).

Wird in das angelegte Magnetfeld ein Hochfrequenz (HF)-Impuls, in Form von Radiowellen, mit der gleichen Frequenz wie die Larmorfrequenz eingebracht, können einige Protonen Energie aus dem Hochfrequenzimpuls aufnehmen und auf ein höheres Energieniveau gelangen. Sie werden „angeregt“. Die Möglichkeit der Energieaufnahme wird als Resonanz bezeichnet. Zusätzlich synchronisieren die Radiowellen die Präzession der Protonen in einer Richtung (SCHILD, 1997). Mit einem Hochfrequenzimpuls der richtigen Leistung und Dauer kann eine Auslenkung des Spin-Systems um  $90^\circ$  erreicht werden. Hierdurch entsteht eine Transversalmagnetisierung, deren Spins messbar sind. Die Longitudinalmagnetisierung nimmt zeitgleich ab. Das Umklappen der Magnetvektoren aus der Longitudinal- in eine Transversalmagnetisierung induziert in einer Empfangsspule einen elektrischen Strom, ähnlich einem Generator, der nach der Verstärkung vom Computer für die Bildgebung genutzt wird (WEISHAUPT *et al.*, 2009).

Sobald der HF-Impuls abgestellt wird, kehren die Protonen wieder in ihre energetische Ausgangslage zurück. Das bedeutet, aufgenommene Energie wird an die Umgebung, das Gitter, abgegeben. Dieser Vorgang wird als Spin-Gitter-Relaxation bezeichnet; die Longitudinalmagnetisierung nimmt wieder zu. Die longitudinale Relaxationszeit wird mit der Zeitkonstanten  $T_1$  beschrieben. Gleichzeitig nimmt die Transversalmagnetisierung ab, da die Präzession der Protonen nicht mehr „in Phase“ synchronisiert wird. Die transversale Relaxation, auch als Spin-Spin-Relaxation bezeichnet, wird mit der Zeitkonstanten  $T_2$  beschrieben. Die  $T_1$  Relaxation findet in einer Zeitspanne von 300 bis 2000 msec statt, die  $T_2$  Relaxation ist deutlich schneller und benötigt nur 30 bis 150 msec, wobei beide Konstanten nicht die Zeit beschreiben, in der die Relaxation komplett abgeschlossen ist.  $T_1$  ist die Zeit, nach der ca. 63 % der ursprünglichen Longitudinalmagnetisierung wieder erreicht sind.  $T_2$  beschreibt die Zeit in der die Transversalmagnetisierung auf 37 % des ursprünglichen Wertes zurückgegangen ist (SCHILD, 1997).

Der Kontrast in der MR-Bildgebung wird durch die Parameter

Protonendichte,  $T_1$ -Zeit sowie  $T_2$ -Zeit spezifischer Gewebe beeinflusst.

**Protonendichte** beschreibt die Anzahl der anregbaren Spins pro Volumeneinheit und damit das maximale Signal, das ein Gewebe im Bild abgeben kann. Bei protonengewichteten Bildern muss der Einfluss von  $T_1$  und  $T_2$  möglichst gering gehalten werden (WEISHAUPT *et al.*, 2009).

Die  **$T_1$ -Zeit** eines Gewebes ist die Zeit, die die Spins nach einer Anregung benötigen um sich zu erholen und wieder anregbar zu werden (WEISHAUPT *et al.*, 2009). Sie ist abhängig von der Gewebezusammensetzung und der Umgebung. Wenn sich die Larmorfrequenz der Spins und die Fluktuationsfrequenz der Magnetfelder im Gitter etwa gleichen, erfolgt die Energieabgabe schnell, das heißt die  $T_1$  ist kurz. In Flüssigkeit dauert diese Energieabgabe der Spins an die Umgebung dagegen lang, weil ein festes Gitter fehlt (SCHILD, 1997).

Die  **$T_2$ -Zeit** beschreibt, wie schnell nach der Anregung das MR-Signal wieder zerfällt (WEISHAUPT *et al.*, 2009).

Um ein ausreichendes Signal für die Bildgebung zu erhalten muss die Anregung mittels HF-Impuls viele Male hintereinander erfolgen. Die Zeit zwischen zwei Anregungen wird **Repetitionszeit (TR = Time to repeat)** genannt. Über die TR lässt sich der  $T_1$  Kontrast eines Bildes beeinflussen: Gewebe mit kurzer  $T_1$  sind schnell wieder anregbar und erzeugen dann wieder ein starkes Signal. Diese Gewebe erscheinen im Bild hell. Gewebe mit langer  $T_1$  sind nach der gleichen TR noch nicht vollständig relaxiert und stellen weniger Longitudinalmagnetisierung zur Anregung bereit. Das Signal ist schwächer und sie erscheinen dunkel. Bei einer kurzen TR wird von einer (starken)  $T_1$ -Gewichtung gesprochen (WEISHAUPT *et al.*, 2009).

Mit der **Echozeit (TE = Time to echo)** wird die Zeitspanne beschrieben, die zwischen der Anregung und der Messung des Signals vergeht. TE bestimmt den Einfluss von  $T_2$  auf den Kontrast: Gewebe mit kurzer  $T_2$  haben bei langer TE eine geringe Signalintensität und erscheinen dunkel, Gewebe mit langer  $T_2$  erscheinen dagegen hell, da sie noch ein hohes Signal liefern. Bei langer TE wird von (starker)  $T_2$  Gewichtung gesprochen.

Protonendichtegewichtete Bilder werden als „intermediär gewichtete“

Bilder bezeichnet, da sie Charakteristika von  $T_1$  und  $T_2$  gewichteten Bildern ineinander vereinen (WEISHAUPT *et al.*, 2009). Die folgende Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen TR, TE und Gewichtung:

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Repetitionszeit (TR), Echozeit (TE) und Gewichtung, modifiziert nach WEISHAUPT *et al.* (2009)

	TR	TE
$T_1$ -Gewichtung	Kurz ( $\leq 500$ msec)	Kurz ( $\leq 30$ msec)
$T_2$ Gewichtung	Lang ( $\geq 1500$ msec)	Lang ( $\geq 80$ msec)
Protonengewichtet	Lang ( $\geq 1500$ msec)	Kurz ( $\leq 30$ msec)

Um aus den gewonnenen Daten ein Bild berechnen zu können, müssen dem Computersystem Orientierungshilfen gegeben werden. Dies geschieht mit Hilfe der **Gradienten**. Das sind Spulen, die das externe Magnetfeld mit einem eigenen Feld überlagern und es in der Stärke modifizieren. Das Gradientenfeld, mit dem eine bestimmte Schicht untersucht werden kann wird **Schichtselektions-Gradient** genannt. Dieser wird nur eingeschaltet während der HF-Impuls eingestrahlt wird. Die Dicke der Schicht lässt sich durch die Frequenz-Bandbreite des HF-Impulses oder durch die Steilheit des Gradientenfeldes variieren.

Um den Ursprung des empfangenen Signals genauer lokalisieren zu können wird zusätzlich der **Frequenzcodier-Gradient** zugeschaltet. Dieser hat innerhalb der untersuchten Schicht von links nach rechts eine abnehmende Frequenz, womit auch die Präzessionsfrequenz entsprechend abnimmt. Die untersuchte Schicht wird in Spalten eingeteilt. Da mit dieser Information nur bestimmt werden kann aus welcher Spalte der Schicht das Signal stammt und dort alle Protonen die gleiche Präzessionsfrequenz haben, bedarf es zusätzlich des **Phasencodier-Gradienten**. Hierbei handelt es sich um ein kurzzeitiges Magnetfeld, das von oben nach unten an Stärke abnimmt und so die Protonen mit der gleichen Präzessionsfrequenz (innerhalb eine Spalte) außer Phase bringt. Durch die Phasenverschiebung lassen sich die einzelnen Signale aus der gleichen Frequenz identifizieren.

Die **Fourier-Transformation**, ein mathematisches Verfahren, ermöglicht es dem Steuerungscomputer, zu bestimmen, wie stark das Signal einer bestimmten Frequenz und Phase in den empfangenen Daten ist. Durch



Frequenz und Phase lassen sich die Signale einem bestimmten Ort in der Schicht zuordnen (SCHILD, 1997). Dies geschieht über ein zweidimensionales Raster aus Reihen und Spalten, der sogenannten Matrix. Jedes Quadrat dieses Rasters entspricht einem Pixel in der Bildgebung. Mit Betrachtung der Schichtdicke (das Volumen), entsteht das sogenannte Voxel, deren Gesamtheit die räumliche Auflösung des Bildes bestimmt (WEISHAUPT *et al.*, 2009).

Dass die MRT als Referenzmethode für die Bestimmung der Körperzusammensetzung von Nutztieren geeignet ist, haben bereits verschiedene Autoren untersucht:

BAULAIN (1997) fasst in seiner Veröffentlichung zusammen, dass mittels der MRT Mager- und Fettgewebe sehr genau bestimmt werden können. Er bezieht sich hierbei auf Untersuchungen an Schweinen und Schafen. Das Bestimmtheitsmaß für den Anteil an Mager- und Fettgewebe variiert zwischen  $R^2=0,89$  und  $R^2=0,97$ , je nach Gewichtsgruppe und Referenzwert. Zusätzlich bietet MRT die Möglichkeit einer dreidimensionalen Rekonstruktion einzelner Körperregionen.

MITCHELL *et al.* (2001a), untersuchten insgesamt 111 männliche und weibliche Schweine in vier Experimenten mittels MRT. Die Tiere hatten ein Gewicht zwischen 6,1 kg und 97,8 kg. Die Zielsetzung der Experimente war unterschiedlich: In einer Studie wurden die Organvolumina sowie Muskel- und Fettvolumina von definierten Körperregionen von 28 Schweinen mittels MRT erfasst und in der Zerlegung überprüft. Für die Muskulatur wurde das höchste Bestimmtheitsmaß zwischen MRT-Volumen und Gewicht in der Zerlegung im rechten Schinken gefunden ( $R^2 = 0,97$ ). Insgesamt unterschätzte die MRT das tatsächliche Gewicht je nach Körperregion um 2 – 20 %. In einem weiteren Experiment mit 22 Schweinen wurden die mittels MRT ermittelten Volumina verschiedener Körperregionen in einer schrittweisen Regression verwendet, um den Gesamtkörperfettanteil, Mageranteil und Proteinanteil vorherzusagen. Das höchste Bestimmtheitsmaß für den Gesamtkörperfettanteil erreichte das Volumen der Fettauflage eines 10 cm Abschnittes des Musculus longissimus dorsi sowie das Muskel-Fett-Verhältnis eines 15cm-Abschnittes des Schinkens mit  $R^2 = 0,9$ . Die Autoren kommen zu dem

Ergebnis, dass die MRT eine gute Möglichkeit der nichtinvasiven *in vivo* Untersuchung von Volumina sowie der Vorhersage von Fettgewebe und Magerweichgewebe bietet. Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt hierbei stark von der Schichtdicke der MRT-Bilder und den Ausmaßen des untersuchten Gewebes ab.

COLLEWET *et al.* (2005) untersuchten, wie genau die MRT die Zusammensetzung von Schweineschlachtkörpern vorhersagen kann. Gescannt wurden 120 weibliche und männliche, kastrierte Schweine, deren Schlachtkörper exakt in der Mitte zerteilt wurden. Die rechte Schlachthälfte wurde mittels MRT untersucht, die linke Schlachthälfte wurde zerlegt. In der Auswertung der MRT kamen zwei Auswertungsmethoden zum Einsatz: In der ersten Methode wurde ein fester Grenzwert für Muskel- und Fettgewebe-Pixel für den kompletten Datensatz festgelegt. In der zweiten Methode wurden die Grenzwerte für jedes Bild und jedes Tier angepasst. Die genaueren Ergebnisse erzielte hierbei die Methode mit den festgelegten Grenzwerten. Mittels MRT-Untersuchung der rechten Schlachthälfte und automatischer Bildauswertung konnte der Anteil an Magerweichgewebe der linken Schlachthälfte mit einer Abweichung (RMSEP) von 586 g bzw. 1,10 % relativ genau vorhergesagt werden. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die MRT geeignet ist, die Zerlegung als Referenzmethode zu ersetzen. Vorausgesetzt wird allerdings, dass der Kontrast zwischen Fett- und Muskelgewebe größer und somit die automatische Auswertung genauer wird. Die Autoren empfehlen, das Experiment zu wiederholen und dabei dieselbe Schlachthälfte mittels MRT und Zerlegung zu untersuchen.

MOHRMANN *et al.* (2006) haben an 440 Schweinen verschiedene Methoden der *in vivo* Untersuchung miteinander verglichen. Die Autoren verwendeten MRT, Deuterium-Verdünnungsmethode und chemische Analyse. Die Versuchsschweine wurden in sechs Gewichtsklassen von 20 kg bis 140 kg eingeteilt. Den höchsten Magergewebeanteil erreichten Kastraten in dieser Studie bei einem Körpergewicht von 59,5 kg, Jungsauen mit 118,75 kg. Die höchste tägliche Fetteinlagerung trat im Gewichtsbereich zwischen 90 kg und 120 kg auf. In der Auswertung der MRT-Untersuchungsergebnisse wurde insgesamt deutlich, dass der

Magerweichgewebeanteil eine geringere Variation aufweist als der Fettgewebeanteil. Bei der geschlechtsspezifischen Betrachtung der MRT-Untersuchungsergebnisse fiel auf, dass männliche, kastrierte Tiere in allen untersuchten Körperregionen höhere Wachstumsraten für Fettgewebe hatten. Weibliche Tiere zeigten dagegen in der Lenden- und Bauchregion höheren Zuwachs an Muskelgewebe als Kastraten. Die geschlechtsspezifischen Unterschiede waren allerdings erst oberhalb einer Körpermasse von 120 kg signifikant. Mit den Ergebnissen ihrer Studie verdeutlichen die Autoren, dass der Fettgewebeanteil, die absolute Fettgewebemasse und die Magerweichgewebemasse, ermittelt mit MRT, jeweils signifikante allometrische Beziehungen zum Lipidgehalt (%) in Weichgewebe ( $r = 0,87$ ;  $RMSE = 1,6$ ), der Lipidmasse ( $r = 0,98$ ;  $RMSE = 1,588$ ) und Proteinmasse ( $r = 0,98$ ;  $RMSE = 0,773$ ), ermittelt mittels Deuterium-Verdünnungsmethode, aufweisen.

MONZIOLS *et al.* (2006) untersuchten 24 Schweineschlachtkörper (weibliche und männlich, kastrierte) mittels MRT. Die Autoren zerteilten die Schlachtkörper in vier Hauptteilstücke, die nach der MRT-Untersuchung komplett zerlegt wurden. Die höchste Beziehung erreichten die Schnittbilder aller Teilstücke zum Muskulaturgewicht in der Zerlegung mit  $R^2 = 0,996$ . Die Auswertung der MRT-Bilder und das Gesamtfettgewicht aus der Zerlegung erreichte für alle 4 Teilstücke zusammen ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,986$ . Subkutanes Fett konnte mit einer Bestimmtheit von  $R^2 = 0,994$  für alle 4 Teilstücke vorhergesagt werden. Probleme gab es in der Beurteilung des intramuskulären Fettes, da die Signalintensität keine deutliche Definition zulässt. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die MRT gute Ergebnisse bezüglich der Bestimmung des Muskelgehaltes in den Teilstücken und im gesamten Schlachtkörper liefert. Besonders im Hinblick auf den intramuskulären Fettgehalt gibt es noch Forschungs- und Verbesserungsbedarf.

BERNAU (2011) untersuchte 117 Schweine, verschiedener Genetik, mittels MRT. DXA diente hierbei mit einem Ganzkörperscan als Referenzmethode. Es wurde die mögliche Vorverlegung der Schlachtleistungsprüfung beim Schwein evaluiert. In der MRT wurden bei den sedierten Tieren die Regionen Schinken und Kotelett untersucht.

Jedes Schwein wurde zweimal gescannt: mit  $84,5 \pm 11,4$  kg durchschnittlichem Körpergewicht sowie mit  $102,2 \pm 13,3$  kg durchschnittlichem Körpergewicht.

Die Ergebnisse der ersten Untersuchung zeigen, dass die MRT-Bilder der Kotelettregion mit einem hohen Bestimmtheitsmaß ( $R^2 = 0,86$  [13,3 %] bzw.  $0,91$  [7,3 %]) die Muskel- und Fettvolumina dieser Region in der zweiten Untersuchung vorhersagen können. In der Schinkenregion war das Bestimmtheitsmaß niedriger ( $R^2 = 0,79$  [12,3 %] bzw.  $0,44$  [5,2 %]). Der Vergleich der ermittelten Volumina aus 5 MRT-Schnittbildern des *Musculus longissimus dorsi* und der jeweiligen Fettauflage mit den Ergebnissen der DXA als Referenzmethode, zeigt eine hohe Genauigkeit, wenn die MRT-Ergebnisse der zweiten Untersuchung für die Vorhersage des DXA-Gesamtkörperfettanteils in der zweiten Untersuchung herangezogen werden ( $R^2 = 0,84$ ; RMSE = 3,10 %). Für die Beziehung zwischen den Ergebnissen der MRT-Bildauswertung des *Musculus longissimus dorsi* und der jeweiligen Fettauflage aus der ersten Untersuchung und dem DXA-Gesamtkörperfettanteil fällt das Bestimmtheitsmaß nur leicht niedriger aus ( $R^2 = 0,82$ ; RMSE = 3,31 %).

BAULAIN (2012) zeigt in einem Vergleich verschiedener Gewichtsgruppen (20 kg, 50 kg, 90 kg), dass sich mittels MRT die Gewichte von Mager- und Fettgewebe in Beziehung zur Referenzzzerlegung sehr genau vorhersagen lassen. Die höchsten Bestimmtheitsmaße mit  $R^2 > 0,96$  für das Gewicht von Magergewebe und Fett wurden in der Gewichtsgruppe 50 kg erreicht. Bei der Betrachtung der prozentualen Anteile wurden sowohl in der 50 kg Gruppe als auch in der 90 kg Gruppe hohe Bestimmtheitsmaße erreicht ( $R^2 > 0,80$ ). Lediglich in der 20 kg Gruppe war die Vorhersagegenauigkeit nicht hoch ( $R^2 < 0,68$ ).

KREMER *et al.* (2013) untersuchten 77 Schweine unterschiedlicher Rassen und unterschiedlichen Geschlechts mit einem Gewicht zwischen 42 kg und 102 kg. Die Autoren wollten mit dieser Untersuchung analysieren, ob die MRT eine verlässliche Methode ist, um die Körperzusammensetzung von Schweinen *in vivo* zu bestimmen. Als Vergleichsmethode diente DXA. Die Fläche der Muskelanteile des *Musculus longissimus dorsi* (MLD) zwischen dreizehnter und vierzehnter Rippe und die Fettauflage wurden im MRT-

Bild definiert und diese Ergebnisse über Regressionsgleichungen mit den Ergebnissen der DXA-Ganzkörperscans verglichen. In der linearen Einzelregressionsanalyse zeigten sich hohe Beziehungen zwischen prozentualem Fettanteil der DXA-Untersuchung und der Fläche der Fettauflage der MLD ( $R^2 = 0,89$ ;  $RMSE = 2,39\%$ ), DXA-Fettgewebe absolut und MRT-Fettfläche ( $R^2 = 0,82$ ;  $RMSE = 2757g$ ) sowie DXA Magerweichgewebe und Muskelfläche aus der MRT-Untersuchung ( $R^2 = 0,82$ ;  $RMSE = 4018g$ ).

Lediglich zwischen dem prozentualen Anteil von Magergewebe aus der DXA-Untersuchung und der Muskelfläche aus der MRT-Untersuchung zeigte sich keine Korrelation.

In der multiplen Regressionsgleichung zeigte sich, dass sowohl DXA-Magerweichgewebe als auch DXA-Fettgewebe hohe Bestimmtheitsmaße zu den Merkmalen MRT-Muskelfläche, MRT-Fettfläche und Körpergewicht haben. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die MRT eine geeignete Methode ist, um die Schlachtkörperzusammensetzung an lebenden Tieren vorherzusagen.

### **3.4.3 Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA)**

Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie ist eine Untersuchungsmethode, die in der Humanmedizin entwickelt wurde, um Knochenmineralgehalt und -dichte zu messen und so unter anderem Osteoporose zu diagnostizieren. Auch für die Bestimmung des Körperfettes lassen sich die Geräte (GE Lunar) bei guter Schätzgenauigkeit, verglichen mit anderen Bestimmungsmethoden, einsetzen (WANG *et al.*, 2010). In der Tierproduktion wird die Technologie seit mittlerweile zwei Jahrzehnten unter anderem erfolgreich zur *in vivo* Bestimmung der Körperzusammensetzung genutzt (MITCHELL *et al.*, 1996; LUKASKI *et al.*, 1999; SCHOLZ, 2002; SCHOLZ & BAULAIN, 2009; BERNAU *et al.*, 2015b).

#### **3.4.3.1 Geschichtliches und Aufbau der DXA**

Vorläufertechnologien waren die Single- (SPA) und Dual-Photonenabsorptiometrie (DPA) (PLOURDE, 1997). Alle Systeme arbeiten auf dem Prinzip der, für verschiedene Gewebe im Körper, spezifischen Schwächung von Röntgenstrahlung (SCHOLZ *et al.*, 2015). Bei SPA und

DPA werden Radionuklidquellen zur Erzeugung der Photonenstrahlung genutzt, bei DXA erfolgt die Erzeugung der Strahlung über eine spannungsgesteuerte Röntgenquelle. Das DXA-Gerät besteht aus einer fest stehenden Patientenliege und einer beweglichen Scanner-Einheit aus einem Detektor und einer Röntgenquelle, die fest miteinander verbunden sind. Je nach Bauart befindet sich hierbei der Detektor oberhalb der Liege, die Röntgenquelle darunter, oder umgekehrt. Die Scannereinheit bewegt sich in Längsrichtung über die komplette Länge der Patientenliege und kann so definierte Bereiche oder auch den gesamten Körper densitometrisch erfassen.

Technisch lassen sich **Fan-beam** Geräte (Fächerstrahlsystem) sowie **Pencil-beam** Geräte (Punktstrahlsystem) unterscheiden (SCHOLZ *et al.*, 2015).

Fächerstrahlsysteme lassen sich in **Fan-beam**-Technik und **Cone-beam** (auch Flash-beam genannt) -Technik unterteilen. Bei Geräten mit Flash-beam-Technik wird die Spannung (kV) der Röntgenröhre gepulst und so Photonenstrahlung mit zwei unterschiedlichen Energieniveaus erzeugt (PIETROBELLI *et al.*, 1996). Bei der Fan-beam-Technik wird aus der energetisch breit gefächerten Röntgenstrahlung (~15 keV – 80 keV) mit Hilfe eines K-Kantenfilters aus seltenen Erden wie Cerium (Ce) oder Samarium (Sm) simultan Photonenstrahlung auf zwei Energieniveaus selektiert, die für die Bildgebung genutzt wird. Cerium hat eine Absorptionskante von 40,45 keV und ermöglicht Photonenstrahlen von ca. 40 keV und ca. 70 keV. Die Absorptionskante von Samarium liegt bei 46,85 keV, woraus Photonenstrahlen mit ca. 40 keV und ca. 80 keV resultieren. Die Wirkung des K-Kantenfilters beruht auf der Interaktion der Atome des Filtermaterials mit der Photonenstrahlung (PIETROBELLI *et al.*, 1996).

Sowohl bei Fan-beam-, als auch bei Cone-beam-Technik wird die Schwächung der Photonen von einem Detektorenverbund gemessen.

Ein wesentlicher, physikalischer Nachteil der Fan-beam-Technik ist, dass es bei großen Abtastwinkeln zu Verzerrungen und Vergrößerungen der untersuchten Objekte kommt, je weiter sie von der Photonenquelle entfernt sind. Durch Überlagerung der Fächerstrahlbilder in Höhe des Patiententisches werden diese Nachteile minimiert und von der Software

herausgerechnet. Ähnlich funktioniert die Rekonstruktion der Bilder in der Computertomographie (GENERAL ELECTRIC HEALTHCARE, 2006).

Vor allem ältere Geräte nutzen die **Pencil-beam**-Technik. Hierbei wird der Patient von einem punktförmigen Photonenstrahl mit nur einem gegenüberliegenden Detektor mäanderförmig, Pixel für Pixel, abgetastet (SCHOLZ *et al.*, 2012). Diese Technik hat gegenüber den modernen Fächerstrahlssystemen den Nachteil der deutlich längeren Untersuchungszeit (KOO *et al.*, 2003). Sie bietet aber den Vorteil einer höheren Genauigkeit (SCHOLZ *et al.*, 2015), da es keine Winkelverzerrungen gibt und der Abstand zwischen Röntgenquelle und Photonen-sensor immer identisch ist.

#### 3.4.3.2 Physik der DXA

Atome bestehen aus einem positiv geladenen Kern, der von einer Elektronenhülle mit negativer Ladung umgeben ist. Die Elektronen besitzen unterschiedliche Energieniveaus, die sich in einem Schalenmodell erklären lassen. Auf der innersten Schale, die dem Atomkern am nächsten ist, ist das Energieniveau am niedrigsten. Diese Schale wird als K-Schale bezeichnet, weiter außen folgende Schalen werden dem Alphabet folgend bezeichnet (ZEECK *et al.*, 2005). Die Elektronen der K-Schale interagieren mit der Photonenstrahlung auf energetisch gleichem Niveau und werden auf ein höheres Energieniveau gehoben. Durch das höhere Energieniveau verlassen sie die K-Schale. Die Photonenstrahlung wird auf diesem Energieniveau abgeschwächt, was sich grafisch in der charakteristischen Absorptionskante zeigt (PIETROBELLI *et al.*, 1996).

Durchdringt die Photonenstrahlung Materie, kommt es zur Interaktion zwischen Strahlung und Atomen der durchstrahlten Materie. Diese Interaktion macht sich als Schwächung der Strahlung bemerkbar und beruht vor allem auf zwei Phänomenen: Der Compton-Streuung und dem Photo-Effekt (PIETROBELLI *et al.*, 1996). Bei der Compton-Streuung werden Photonen von ihrer Bahn abgelenkt, nachdem sie ein Elektron aus den äußeren Schalen eines Atoms herausgeschlagen haben; beim Photoeffekt wird die Energie der Photonen beim Auftreffen auf Elektronen

der inneren Schalen absorbiert (LAUBENBERGER & LAUBENBERGER, 2007). Diese Effekte liegen auch dem K-Kantenfilter zugrunde. Zusätzlich zu Compton-Streuung und Photo-Effekt haben noch Dicke (L) und Dichte ( $\rho$ ) des Gewebes einen maßgeblichen Einfluss auf die Schwächung der Photonenstrahlung. Die Endintensität (I) der Strahlung wird, nachdem sie den zu untersuchenden Körper passiert hat, jeweils für das hohe (H) und das niedrige (N) Energieniveau vom Detektor erfasst. In Beziehung zur Anfangsintensität ( $I_0$ ) der Strahlung, kann daraus die Messzahl (R) berechnet werden, welche für jedes Element, aber auch für heterogene Gewebe spezifisch ist (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Massenschwächungskoeffizienten ( $\mu_m$ ) bei 40 keV und 70 keV und R-Werte von 11 Elementen modifiziert nach WANG *et al.* (2010)

Element	$\mu_m$ bei 40keV (cm <sup>2</sup> /g)	$\mu_m$ bei 70keV (cm <sup>2</sup> /g)	R
H	0.346	0.317	1.091
C	0.208	0.167	1.246
N	0.229	0.171	1.339
O	0.259	0.177	1.463
Na	0.397	0.198	2.001
Mg	0.488	0.218	2.239
P	0.810	0.275	2.945
S	0.987	0.312	3.163
Cl	1.12	0.332	3.373
K	1.54	0.413	3.729
Ca	1.83	0.472	3.877

Mit dem gewebespezifischen linearen Schwächungskoeffizienten ( $\mu$ ) ergibt sich für homogene Gewebe folgende Formel:

$$-d\left(\frac{I}{I_0}\right) = \mu \cdot dL$$

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot L}$$

Da der lineare Schwächungskoeffizient ( $\mu$ ) dichteabhängig ist, wird bei heterogenen, unterschiedlich dichten Geweben der



Massenschwächungskoeffizient ( $\mu_m$ ) =  $\mu/\rho$  für die Berechnung herangezogen, wobei  $f_i$  die Massefraktion der  $i$ -ten Komponente in einem heterogenen Gemisch ist.  $\mu_{mi}$  beschreibt den Massenschwächungskoeffizienten der  $i$ -ten Komponente (PIETROBELLI *et al.*, 1996).

Für die Berechnung der R-Werte gilt in Folge:

$$R = \frac{\sum [f_i \cdot (\mu_{mi})^N]}{\sum [f_i \cdot (\mu_{mi})^H]}$$

$$R = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)^N}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)^H}$$

Die Komponentenbestimmung mittels DXA basiert auf einem Drei-Komponenten-Modell, bei dem davon ausgegangen wird, dass Menschen aus Fett-, Knochenmineral- und Magerweichgewebe bestehen (PIETROBELLI *et al.*, 1996). Zur Veranschaulichung dient Abbildung 1.

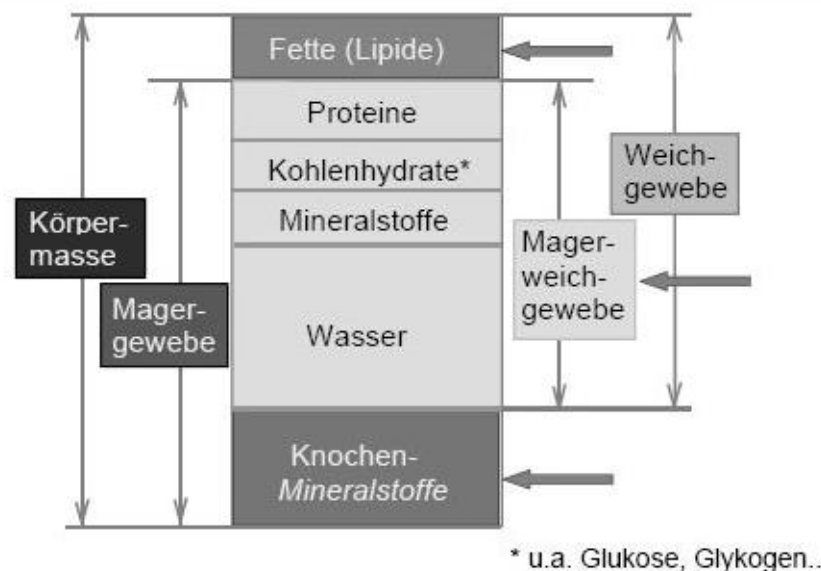


Abbildung 1: Drei Komponenten-Modell der Körperzusammensetzung aus SCHOLZ (2002)

Diese Annahme gilt für Tiere (Schweine) analog (MITCHELL *et al.*, 1996). Physikalisch können mit der Photonenstrahlung auf den beiden emittierten Energieniveaus nur zwei dieser Komponenten des untersuchten Körpers direkt bestimmt werden. Mit Hilfe der R-Werte lassen sich die Komponenten schätzen: Unterschiedliche R-Werte werden im DXA-Scan

als variable Grauwerte in Pixeln abgebildet. Da der R-Wert von Knochenmineralstoffen deutlich höher liegt, als der R-Wert von Weichgewebe lässt sich hier eine klare Einteilung der Pixel vornehmen, wobei ein Grenzwert festgelegt werden muss, um Pixel mit sowohl Knochenmineral- als auch Weichgewebeanteil einer der beiden Komponenten zuordnen zu können. Für Bildpunkte mit Knochenmineralcharakteristik wird von der Analysesoftware außerdem angenommen, dass sie nur in Gruppen zusammenhängend vorkommen. Eine direkte Unterteilung von Magerweich- und Fettgewebe allein mit Hilfe der Pixel ist aufgrund der nahe beieinanderliegenden R-Werte nicht möglich. Hier werden Software-Algorithmen genutzt, die basierend auf den R-Werten der Elemente eine Berechnung ermöglichen (PIETROBELLI *et al.*, 1996).

Dass DXA in der Lage ist, die Körperzusammensetzung von Schweinen genau zu schätzen, haben folgende Autoren bereits bestätigt:

MITCHELL *et al.* (1996) untersuchten 48 weibliche Schweine mit Gewichten zwischen 10,2 kg und 60,5 kg. Die Tiere wurden getötet, einem Ganzkörperscan mittels DXA unterzogen und anschließend chemisch analysiert. Der durchschnittliche Fettanteil in Prozent in der DXA ( $18,2 \pm 0,9$  %) unterschied sich nicht signifikant von den Ergebnissen der chemischen Analyse ( $17,8 \pm 0,6$  %). Allerdings zeigte die Überprüfung, dass in der DXA der Fettanteil bei mageren Tieren unter- und bei fetten Tieren überschätzt wird. Die Messung des absoluten Körperfettes zeigte mit  $r = 0,989$  eine hohe Korrelation zwischen den Ergebnissen der DXA ( $7,31 \pm 0,62$  kg) und der chemischen Analyse ( $7,20 \pm 0,50$  kg). Die Beziehung zwischen Magerweichgewebe im DXA-Scan und Proteingehalt in der chemischen Untersuchung ergab eine Korrelation von  $r = 0,968$ . Die im DXA-Scan erhobene Gesamtgewebe-Masse war mit  $r = 0,999$  hoch korreliert mit dem gewogenen Körpergewicht. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Ganzkörperuntersuchung von Schweinen mittels DXA eine geeignete und zuverlässige Methode zur Bestimmung der Körperzusammensetzung darstellt.

MITCHELL *et al.* (1998) untersuchten 231 Schweine mit Gewichten

zwischen 5 kg und 97 kg mittels DXA Lunar DPXL. 98 Tiere mit einem Gewicht < 30kg wurden im Kleinkind-Modus untersucht. 133 Tiere mit einem Gewicht > 30 kg im Erwachsenen-Modus. Die Tiere wurden *in vivo* in Narkose untersucht und nach der Untersuchung euthanasiert. Im Anschluß wurden die Tierkörper jeweils zermahlen und chemisch auf Fett-, Wasser-, Protein- und Mineralgehalt analysiert. Der Mittelwert der im DXA-Scan erhobenen Gesamtgewebe-Masse (37,1 kg) unterschied sich nicht signifikant vom durchschnittlichen gewogenen Körpergewicht (37,7 kg). Der Mittelwert des Fettanteils in Prozent in der DXA (14.6 %) lag in dieser Untersuchung signifikant unter dem Mittelwert der chemischen Analyse (17.1 %). Die größte Abweichung trat bei mageren Schweinen auf (Körperfettanteil von < 15 %). Wird einer Regressionsgleichung der R-Wert aus der DXA-Messung zugrunde gelegt, wird der prozentuale Fettanteil auf 17,4 % geschätzt. Er unterscheidet sich nicht signifikant von der chemischen Analyse (17,1 %). Der DXA-Schätzwert für Ganzkörper-Proteinanteil lag mit 17,8 % über dem Wert der chemischen Analyse (17,1 %). Der von DXA gemessene Magerweichgewebe-Wert hat zum chemisch ermittelten Wert für den Gesamtproteingehalt nur eine geringe Korrelation ( $r = 0,39$ ). Die Beziehung zwischen Magerweichgewebe-Wert in der DXA und dem Gesamtkörperwasser in der chemischen Analyse lag bei  $r = 0,99$ . Diese höhere Beziehung wird darauf zurückgeführt, dass Wasser einen höheren Anteil am Magerweichgewebe hat als Protein. Bei der Bestimmung des Knochenmineralgehaltes ergab der DXA-Scan 2,40 %, und damit signifikant weniger als in der chemischen Analyse (2.54 %). Diesem Unterschied können Ungenauigkeiten in der chemischen Analyse zugrunde liegen.

LUKASKI *et al.* (1999) untersuchten 10 Kastraten und 10 Jungsauen mittels DXA in Bauch- und Seitenlage und verglichen diese Ergebnisse mit der chemischen Analyse. Ziel der Studie war es, die Richtigkeit der DXA-Schätzung bezüglich der Körperzusammensetzung in Abhängigkeit der Gewebedicke zu untersuchen. Aus diesem Grund hatten die Tiere eine weite Gewichtsspanne zwischen 52 kg und 114 kg. Die Scans wurden mit einem Hologic 2000W (Hologic Inc., Waltham, MA, USA) durchgeführt. Ermittelt wurden Körpermasse, Knochenmineralgehalt,

Magerweichgewebe, Fettgewebe, fettfreie Masse und Fettanteil in Prozent. Die Messgenauigkeit war, für alle Variablen ausser Fettgewebe, in Seitenlage höher. Zwischen den Geschlechtern wurde in der chemischen Analyse der Tierkörper kein Unterschied festgestellt. Es fiel auf, dass der Aschegehalt signifikant höher lag, als die in der DXA ermittelten Werte für Knochenmineralgehalt. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass in der chemischen Untersuchung auch Weichgewebe-Mineralstoffe erfasst werden. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine Körperdicke zwischen 18 cm und 28 cm die Genauigkeit der DXA nicht nachteilig beeinflusst. Zudem ermöglicht DXA eine genaue Bestimmung des Magerweichgewebes und der fettfreien Masse, unterschätzt allerdings Fettanteil und Fettmasse.

SCHOLZ (2002) fand Unterschiede im Vergleich der DXA-Untersuchungsergebnisse von 15 Ferkeln mit einem Durchschnittsgewicht von 9,91 kg mit der chemischen Ganzkörperanalyse. Mit den Tieren wurde jeweils ein Ganzkörperscan mit einem Lunar DPX-L Scanner durchgeführt und anschließend eine chemische Analyse des gesamten, homogenisierten Tierkörpers durchgeführt. DXA unterschätzte in dieser Untersuchung den Fettgehalt und den Knochenmineralgehalt und überschätzte gleichzeitig den Magerweichgewebeanteil.

SUSTER *et al.* (2003) untersuchten 151 lebende Schweine mit Körpergewichten zwischen 10 kg und 120 kg mittels eines Hologic QDR 4500A Fan-beam-Gerätes. Ermittelt wurden in einem Ganzkörperscan Gesamtgewebe, Magerweichgewebe, Fettgewebe absolut und Knochenmineralgehalt. Nach der DXA-Untersuchung wurden die Tiere geschlachtet, der Schlachtkörper komplett und eine Schlachthälfte erneut mittels DXA untersucht. Zudem erfolgte eine chemische Analyse der Körperzusammensetzung. Für das in der DXA ermittelte Gesamtgewebe wurde eine hohe Beziehung zum gewogenen Körpergewicht ermittelt. Im lebenden Tier wurde die Magerweichgewebemasse durch DXA, verglichen mit den chemisch ermittelten Daten für Protein und Wasser, überschätzt. Die Masse des Fettgewebes wurde durch DXA für große Tiere unter- und für kleine Tiere überschätzt. Die DXA-Vorhersage unterschätzte den Knochenmineralgehalt verglichen mit den chemisch ermittelten Werten

für Rohasche. Nach Meinung der Autoren hat DXA, als bedienerfreundliche und genaue Methode zur *in vivo* Bestimmung der Körperzusammensetzung von Schweinen, ein großes Potential in Forschung, Tierproduktion und Schlachtkörperbewertung. Gegebenenfalls müssen Schätzungenauigkeiten, hervorgerufen durch die systeminternen Softwarealgorithmen, über geeignete Regressionsgleichungen ausgeglichen werden.

SCHOLZ *et al.* (2004) zeigten, dass DXA eine geeignete Schnellmethode ist, um die Knochenmineralisierung beim Schwein zu bestimmen, ohne jedoch Aussagen über die Zusammensetzung der verschiedenen Bestandteile treffen zu können.

BÖTTINGER (2006) untersuchte 88 Schweine in zwei Durchgängen mittels DXA, um Unterschiede in der Körperzusammensetzung zwischen verschiedenen Haltungssystemen zu evaluieren. Im Herbst/Winter-Durchgang wurden keine signifikanten Unterschiede in der Körperzusammensetzung ermittelt. Im Sommer-Durchgang konnten signifikante Unterschiede in der Körperzusammensetzung zwischen Tieren aus konventioneller Haltung und Aussenklimahaltung ermittelt werden. Hervorzuheben sind hierbei die höhere Knochenmineraldichte und der höhere Knochenmineralgehalt der Tiere aus Aussenklimahaltung. Die Autorin führt dies unter anderem auf die vermehrte Bewegungsaktivität der Tiere zurück.

SCHOLZ und FÖRSTER (2006) verglichen die mittels DXA gemessene Körperzusammensetzung mit Daten aus der EU-Referenzzерlegung. Untersucht wurden insgesamt 123 Schweine in zwei Gewichtsgruppen (30 - 50 kg und 70 - 90 kg) mit einem DXA GE Lunar DPX-IQ. In der DXA-Untersuchung an den anästhesierten Tieren wurden Gewebemasse, Magerweichgewebemasse, Fettgewebemasse absolut und Knochenmineralgehalt ermittelt. Drei Tage nach der DXA-Untersuchung wurden die Tiere geschlachtet und die linke Schlachthälfte nach der EU-Referenzmethode grobgeweblich in Muskelfleisch, Fett, Sehnen, Faszien und Schwarte zerlegt. In der Gewichtsklasse 30 – 50 kg fanden die Autoren das höchste Bestimmtheitsmaß für Magerweichgewebemasse ( $R^2 = 0,94$ ),

gefolgt von Muskelfleischmasse ( $R^2 = 0,93$ ). Fettgewebemasse absolut erreichte eine Bestimmtheit von  $R^2 = 0,78$ . Der Knochenmineralgehalt aus der DXA-Untersuchung zeigte, verglichen mit der Asche aus der Zerlegung, nur eine Vorhersagegenauigkeit von  $R^2 = 0,73$ . Die ermittelten Werte der prozentualen Gewebeanteile aus beiden Untersuchungsmethoden wiesen eine deutlich niedrigere Beziehung auf. Dieses Ergebnis wurde in der Gewichtsklasse 70 – 90 kg bestätigt, wenngleich die Übereinstimmung hier größer ausfiel. In dieser Gruppe wies, beim Vergleich der korrespondierenden Gewebemassen, die Fettgewebemasse mit  $R^2 = 0,89$  eine höhere Beziehung auf als Magerweichgewebe- und Muskelfleischmasse ( $R^2 = 0,82$ ). Die Vorhersagegenauigkeit war auch hier für den Knochenmineralgehalt am niedrigsten ( $R^2 = 0,72$ ). Die Ergebnisunterschiede zwischen der *in vivo* Untersuchung mit DXA und der Zerlegung liegen nach Meinung der Autoren zum großen Teil in der Methode begründet. Beispielsweise werden in der DXA-Messung für Magerweichgewebe Muskel (Wasser, Protein, Glykogen), nicht-lipidhaltige Sehnenbestandteile und nicht-knochengebundene Mineralstoffe berücksichtigt. In der Referenzzzerlegung liegt der prozentuale Anteil des Muskelfleisches deshalb unter den Werten der DXA-Untersuchung. Aussagen über die Über- bzw. Unterschätzung von Gewebeanteilen lassen sich aus dieser Untersuchung nicht treffen, da in der Referenzzzerlegung nur die linke Schlachthälfte untersucht wurde.

SCHOLZ *et al.* (2007) haben die Beziehung zwischen *in vivo*- und Schlachtkörperuntersuchung mit zwei verschiedenen Geräten untersucht. Zum Einsatz kamen ein GE Lunar DPX-L und ein DPX-IQ Pencil-beam-Gerät. Insgesamt wurden 140 Tiere untersucht; 78 mit dem DPX-L Gerät und 62 mit dem DPX-IQ Gerät. Drei Tage nach der DXA-Untersuchung am lebenden Tier wurden die Schweine geschlachtet und die rechte Schlachthälfte (ohne Innereien) erneut mittels DXA untersucht. Geschlechtsspezifische sowie genetische Unterschiede in den Ergebnissen wurden nicht ermittelt. Die zusammengefassten Daten beider Geräte erreichten in der Betrachtung *in vivo* zu Schlachthälfte eine mittlere bis hohe Beziehung für Gesamtgewebemasse, Magerweichgewebe,

Fettgewebe und Knochenmineralgehalt. Die prozentualen Gewebeanteile wiesen eine deutlich niedrigere Beziehung auf. Im Vergleich der beiden unterschiedlichen Geräte desselben Herstellers, konnten deutliche Unterschiede für Fett und Knochenmineralgehalt dargestellt werden. Bei getrennter Betrachtung der von den Geräten jeweils ermittelten DXA-Variablen, konnten im Vergleich zu den zusammengefassten Daten höhere Korrelationskoeffizienten errechnet werden. Die Autoren konnten zeigen, dass DXA geeignet ist, eine Aussage über die Schlachtkörperzusammensetzung am lebenden Tier zu treffen. Dennoch sollte für eine bessere Vergleichbarkeit auf eine einheitliche Genetik, einheitliche Fütterung und einheitliches Alter/Gewicht geachtet werden. Zusätzlich empfehlen die Autoren in einer Untersuchung einheitliche Untersuchungs-Hard- und -Software zu nutzen.

LAUTERBACH (2012) untersuchte 83 Eberschlachthälften mittels DXA bezüglich der Körperzusammensetzung. Die Tiere stammten aus verschiedenen Herkunftten und wiesen eine gemischte Genetik auf. In der DXA-Untersuchung zeigten Tiere mit einem Schlachtgewicht  $> 90$  kg signifikant höhere Werte für Knochenmineraldichte und Knochenmineralgehalt als Tiere mit einem Schlachtgewicht  $\leq 90$  kg.

SCHOLZ *et al.* (2012) haben die Beziehung zwischen Körperzusammensetzung *in vivo* und Schlachtkörperzusammensetzung mittels DXA und der Referenzzzerlegung bzw. chemischer Analyse zwischen verschiedenen Nutztierarten verglichen. In die Studie flossen Daten von Schweinen, Lämmern, Kälbern und Truthähnen ein. Schweine erreichten im Vergleich Schlachtkörper-DXA zu Zerlegung mit chemischer Analyse für den prozentualen Fettanteil ( $R^2 = 0,80$ ), Fettgewebe absolut ( $R^2 = 0,90$ ) und den prozentualen Magerweichgewebeanteil ( $R^2 = 0,70$ ) jeweils das höchste Bestimmtheitsmaß der vier Arten. Im Vergleich *in vivo*-DXA zu Zerlegung zeigten Schweine für die vorgenannten Variablen erneut das höchste Bestimmtheitsmaß verglichen mit den anderen Tierarten, allerdings liegen die Werte unter denen der Schlachtkörper. Als Schlussfolgerung sehen die Autoren, dass DXA den Fettgehalt und somit indirekt auch Magergewebe verglichen mit der Zerlegung oder der chemischen Analyse über- oder unterschätzen kann. Dies ist abhängig vom

Fettanteil im Schlachtkörper oder im lebenden Tier, und abhängig von Untersuchungs-Hard- sowie -Software.

WENCZEL (2013) überprüfte die Beziehung der Messergebnisse zwischen den Geräten GE Lunar DPX-IQ (Pencil-Beam-Technik) und GE Lunar *iDXA* (Fan-Beam-Technik) anhand von narkotisierten Schweinen und Schafen *in vivo* sowie Schweine- und Schafschlachtkörpern. Es wurden 218 lebende Schweine, 21 Eberschlachtkörperhälften und 20 lebende Schafe sowie 17 Schafschlachtkörper jeweils mit beiden Geräten gescannt. Am GE Lunar *iDXA*-Gerät wurden zudem die Beziehung zwischen den Messergebnissen Scan-Modi „Dick“ und „Standard“ untersucht. Diese war mit  $R^2 = 0,82-1,0$  sehr eng. Das *iDXA*-Gerät unterschätzte verglichen mit dem DPX-IQ jeweils das Fettgewebe, den Knochenmineralgehalt und die Knochenmineraldichte. Magerweichgewebe und Gesamtgewebe wurden überschätzt. Bei der Überprüfung von Genauigkeit und Präzision erzielte *iDXA* in der Fettgewebemessung bessere Werte als DPX-IQ.

SCHOLZ *et al.* (2015) verglichen mehrere nichtinvasive Verfahren: CT, MRT, DXA und US anhand von Schweinen. Als Referenz diente der prozentuale Magergewebeanteil aus der Zerlegung. In der Schlachtkörperuntersuchung erreichten alle vier Methoden erwartungsgemäß höhere Beziehungen als in der *in vivo*-Analyse. In der Vorhersagegenauigkeit lag CT vor MRT vor DXA vor US. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass jedes technische System seine Vor- und Nachteile hat. Daran hat sich in den letzten 20 Jahren nicht viel geändert. Mit schnellerem technischem Fortschritt besteht in der Zukunft die Möglichkeit neuer Entwicklungen.



### 3.5 Computertomographie (CT)

„CT-Aufnahmen liefern überlagerungsfreie Schichtbilder der Anatomie mit guter Dichteauflösung“ (FLOHR, 2011). Die Röntgenquelle rotiert kontinuierlich 360° um den Patienten. Der Patient wird währenddessen in Längsrichtung durch den rotierenden Röntgenstrahl bewegt (siehe Abbildung 2). Die abgeschwächten Röntgenstrahlen werden vom

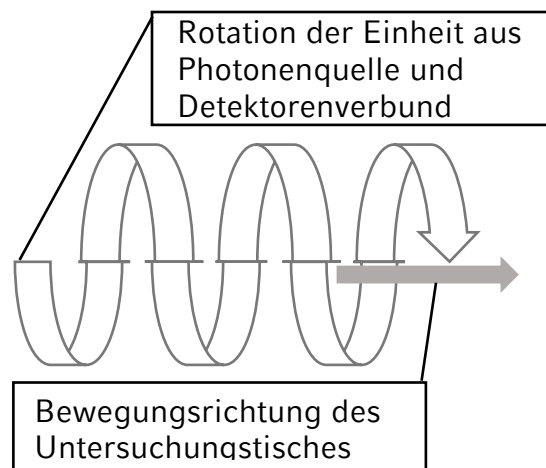


Abbildung 2: CT-Prinzip der Bilderfassung modifiziert nach JACKSON und THOMAS (2009)

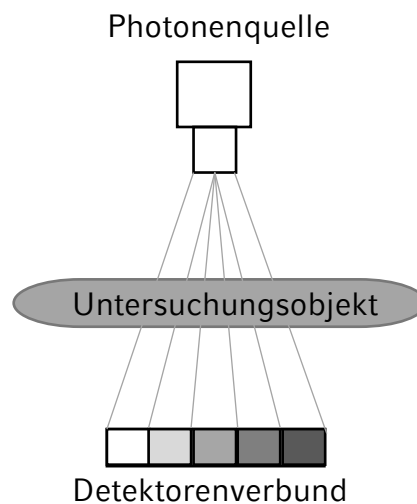


Abbildung 3: CT-Prinzip mit Photonenquelle und Detektorenreihe modifiziert nach JACKSON und THOMAS (2009)

gegenüberliegenden Detektorsystem kontinuierlich erfasst (siehe Abbildung 3). Dadurch entstehen mit Geräten der neuesten Generation keine einzelnen Schnittbilder mehr, die anschließend zusammengerechnet werden, sondern ein kontinuierlicher Volumendatensatz aus dem sich dreidimensionale Abbildungen errechnen lassen (JACKSON & THOMAS, 2009). Gemessen wird bei der CT die Schwächung des Photonenstrahls,

wie bei der DXA beschrieben.

Bei CT-Bildern lässt sich ein guter Kontrast zwischen Weichgewebe und Knochen erkennen. Im Gegensatz zum MR-Bild sind Weichgewebe dagegen weniger gut durch den Kontrast voneinander unterscheidbar (SCHOLZ, 2002).

## **VII. MATERIAL UND METHODEN**

### **1. Tiermaterial**

In der vorliegenden Studie wurden 101 Kreuzungstiere in drei Durchgängen (Gr I – III) untersucht. Die Studie wurde unter dem Geschäftszeichen 55.2-1-54-2532.2-12-13 bei der Regierung von Oberbayern angezeigt.

Bei den Tieren handelt es sich um konventionelle Masthybriden: Vaterlinie Piétrain (Pi) x Mutterlinie Deutsche Landrasse (DL). Die verwendeten Piétrain-Eber stammten von der Besamungsstation Bergheim: Gr I: Mainz, Gr II: Wadko, Gr III: Bozach. Gr. I, geboren am 05.07.2013, Gr II geboren vom 25.-27.09.2013, Gr III geboren am 31.01.2014. Alle Gruppen wurden jeweils nach  $165 \pm 1$  Lebenstagen geschlachtet.

In allen Durchgängen (Gr I - III) wurden die Tiere nach der Geburt gewichtsabhängig in drei „Geschlechtergruppe“ eingeteilt. Die Festlegung in Eber (E), chirurgisch kastrierte Tiere (K) und immunologisch kastrierte Tiere (I) erfolgte anhand des Geburtsgewichtes mit dem Ziel, dass alle drei Geschlechtergruppen ein möglichst einheitliches Durchschnittsgewicht aufweisen. Zudem wurde auf eine gleichmäßige Verteilung der Wurfgeschwister auf alle drei Geschlechtergruppen geachtet. Die Einteilung erfolgte am zweiten Lebenstag (LT) (Gr I und Gr III) bzw., ebenfalls ausgehend vom Geburtsgewicht, an LT zwei und drei (Gr II) mit der Vergabe von tierindividuellen Ohrmarkennummern. Die Säugezeit betrug 28 Tage. Ab LT 32 wurden die Versuchstiere bis zur Schlachtung jeweils zusammen in einer Gruppe gehalten. Genetik, Fütterung, Aufstallung und zeitlicher Ablauf wurden in allen Untersuchungsgruppen gleich gehalten um eine hohe Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten. Tierverluste gab es im Zeitraum der MRT- und DXA-Untersuchungen nicht.

#### **1.1 Unterbringung der Tiere**

Ab LT 32 bis zur ersten Untersuchung mit  $77 \pm 1$  LT wurden die Gruppen im Flatdeck in einer Bucht mit  $0,45 \text{ m}^2$  bis  $0,54 \text{ m}^2$  Platz pro Tier eingestallt. Bis zur Schlachtung nach Scan 3 wurden die Tiere in einem

Aussenklimastall auf Tiefstreu gemästet. Das Platzangebot betrug zwischen 1,46 m<sup>2</sup> und 1,74 m<sup>2</sup> pro Tier. Die unterschiedlichen Quadratmeterangaben ergeben sich aus den Gruppengrößen (Gr I n = 37; Gr II n = 33; Gr III n = 31).

## 1.2 Fütterung in Aufzucht und Mast

Ab LT 8 bis zur Umstellung in die Ferkelaufzucht wurden die Ferkel mit einem Saugferkel-Futter (FK.Früh) manuell zugefüttert. In der Ferkelaufzucht (ab LT 32 ± 1) stand den Tieren ein Ferkelfutter (FK.10.09) (MJ ME/kg 14,80; *ad libitum*) an einem Rndomaten (PigTek®) mit Intervallfütterung zur Verfügung. Für die Mast im Aussenklimastall (ab LT 77 ± 1) wurden die Tiere mit einem Mastfutter (VM.10.09) (MJ ME/kg 15,0; *ad libitum*) an einer Doppel-Fitmix-Station (PigTek®) gemästet. Alle Futtermischungen stammen aus eigener Herstellung des Lehr- und Versuchsgutes Oberschleißheim und sind pelletiert. Die folgende Tabelle 3 zeigt die Zusammensetzung der Futtermischungen.

Tabelle 3: Prozentuale Anteile der Futterkomponenten in den verwendeten Futtermischungen

Komponente	FK.Früh	Fk.10.09	VM.10.09
<b>Gerste</b>	20,00	21,00	31,00
<b>Weizen</b>	35,00	38,50	22,30
<b>Weizenflocken</b>	15,00		
<b>Mais</b>		10,00	22,30
<b>Sojaschrot</b>		26,00	20,40
<b>Mineralfutter (proteinreich)</b>	30,00		
<b>Mineralfutter: Herdbuch FM</b>		4,00	
<b>Mineralfutter: Mastkraft</b>			3,00
<b>Addcon Formi (Säureadsorbat)</b>		0,50	0,50

### 1.3 Untersuchungsschema der Tiere

Die konventionelle Kastration erfolgte am fünften Lebenstag. Die Kastration mittels einem GnRH-Analogen (Improvac®, Pfizer) durch zweimalige Injektion: Die erste Injektion im Alter von  $77 \pm 1$  LT (Körpergewicht ca. 30kg), die zweite Injektion vier Wochen vor der Schlachtung mit  $137 \pm 1$  LT. Die Injektionsstelle befand sich immer auf der rechten Halsseite am Ohrgrund (siehe Abbildung 4).



Abbildung 4: Injektion von Improvac® (Pfizer) mit Sicherheits-Impfpistole

Eine Übersicht der Eingriffe, der MRT-, sowie der DXA-Untersuchungen wird in Abbildung 5 gezeigt.

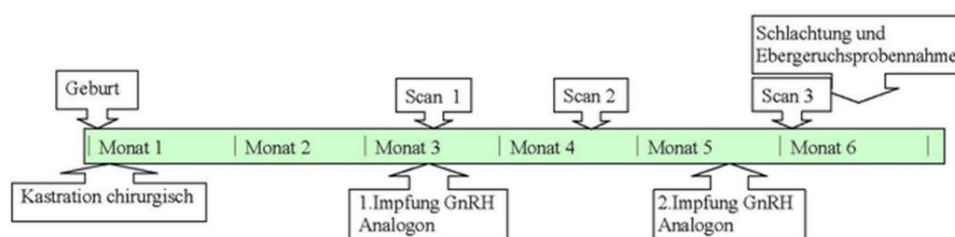


Abbildung 5: Untersuchungsschema und Eingriffe an den Versuchstieren; Scan 1: LT  $77 \pm 1$ ; Scan 2: LT  $112 \pm 1$ ; Scan 3: LT  $152 \pm 1$ ; Schlachtung: LT  $165 \pm 1$

Unter Einhaltung der vorgeschriebenen Wartezeit auf die Narkose wurden die Tiere 12 Tage nach der letzten Untersuchung geschlachtet. Sie hatten zum Schlacht-Zeitpunkt ein Alter von  $165 \pm 1$  Tagen.

### 1.4 Anästhesie

Bei jeder Untersuchung wurden die Tiere gewogen, um die Anästhesie zu dosieren. Hierfür wurden Azaperon (2 mg/kg, Stresnil®, Elanco Animal Health) und Ketaminhydrochlorid (10-15 mg/kg, Ursotamin®, Serumwerk Bernburg AG) intramuskulär injiziert. Nach Eintritt der Narkose wurde den Tieren ein Verweilkatheter in eine Ohrvene gelegt (siehe Abbildung 6), um bei Bedarf über intravenöse Folgeapplikationen von Ketaminhydrochlorid, in einer Dosierung von 5 - 10 mg/kg, die Narkosetiefe steuern zu können.



Abbildung 6: Venen-Verweilkatheter in einer Ohrvene

## 2. MRT-Untersuchung

Die Untersuchungen mittels Magnet-Resonanz-Tomographie wurden mit einem Siemens Kernspintomographen Magnetom Open mit einer Betriebsfeldstärke von 0,2 Tesla am Lehr- und Versuchsgut Oberschleißheim durchgeführt. Die anästhesierten Tiere wurden in Bauchlage mit nach vorne gestreckten Vorderbeinen und nach hinten gestreckten Hinterbeinen auf dem Untersuchungstisch des MRT platziert und ein Ganzkörperscan von ca. 25 Minuten Dauer durchgeführt. Bei Scan 1 wurden die Tiere aufgrund ihrer Größe mit der kleinen Körperspule und Lagerungshilfen untersucht. Ab Scan 2 wurde die große Körperspule verwendet. Die Spin-Echo-Sequenz, mit der die Untersuchung

durchgeführt wurde, war T<sub>1</sub>-gewichtet. Pro Sequenz wurden 10 axiale Schnittbilder mit einer Schichtdicke von 15 mm angefertigt, der Distanzfaktor lag bei 0,25. Zwischen jeder Sequenz wurde ein Übersichtsbild (Scout) angefertigt, das bei der Auswertung der Bilder als Orientierungshilfe diente. Um eine Ganzkörperuntersuchung zu erreichen wurde der Untersuchungstisch anhand von Markierungen manuell bewegt. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der MRT Protokolle.

Tabelle 4: MRT Protokolle

	Scout	Spin-Echo-Sequenz
Pixelgröße	3,13 x 1,56 mm	1,8 x 1,8 mm
Zeit pro Sequenz	19 Sekunden	3 Minuten 17 Sekunden
TR	40 ms	380 ms
TE	10 ms	15 ms
Flipwinkel	40°	90°
Anzahl Schnittbilder	3	10
Schichtdicke	15 mm	15 mm
Distanzfaktor	--	0,25
Bildwinkel (FOV)	400 mm	461 mm
Matrix (Phase x Frequenz)	128 x 156	256 x 256
Anzahl Erfassungen	1	2
Anzahl Messungen	1	1

## 2.1 Auswertung der MRT-Bilder

Für die Auswertung der MRT-Bilder wurden die Software 3D Doctor® 4.0 (ABLE SOFTWARE CORP., 1998-2007) verwendet. Bei der Auswertung wurden Fett- und Muskelgewebe jeweils manuell oder halbautomatisch anhand der verschiedenen Grauwerte definiert. Folgende Regionen wurden ausgewertet:

- Musculus longissimus dorsi (MLD): beginnend beim letzten rippentragenden Brustwirbel, ein und vier weitere Schnittbilder nach *caudal*.
- Schulter (Schu): ein Schnittbild beginnend mit dem Bild, in dem der erste Anschnitt der Scapula mit Spina scapulae sichtbar ist und vier weitere Schnittbilder nach *cranial*.
- Schinken (Schi): ein Schnittbild auf Höhe des Kniegelenks, drei Schnittbilder, beginnend im Hüftgelenk nach *caudal*.

Tabelle 5 stellt die verschiedenen Variablen und anatomischen Strukturen dar.

Tabelle 5: Übersicht der ausgewerteten anatomischen Strukturen aus den MRT-Bildern

Variable	Schnitt- bilder	Anatomische Region	Auswertung
<b>MLDM_1s</b>	1	<i>Musculus longissimus dorsi</i> auf Höhe des letzten rippentragenden Brustwirbels	manuell
<b>MLDF_1s</b>	1	Fettauflage des MLDM_1s	manuell
<b>MLDM_5s</b>	5	<i>Musculus longissimus dorsi</i> auf Höhe des letzten rippentragenden Brustwirbels, fünf Schnittbilder nach <i>caudal</i>	manuell
<b>MLDF_5s</b>	5	Fettauflage des MLDM_5s	manuell
<b>SchuM_1s</b>	1	Muskulatur in dem Schnittbild, in dem der erste Anschnitt der <i>Scapula</i> mit <i>Spina scapulae</i> sichtbar ist	halbautomatisch
<b>SchuF_1s</b>	1	Fettgewebe in dem Schnittbild, in dem der erste Anschnitt der <i>Scapula</i> mit <i>Spina scapulae</i> sichtbar ist	halbautomatisch
<b>SchuM_5s</b>	5	Muskulatur fünf Bilder nach <i>cranial</i> ab dem Schnittbild, in dem der erste Anschnitt der <i>Scapula</i> mit <i>Spina scapulae</i> sichtbar ist	halbautomatisch
<b>SchuF_5s</b>	5	Fettgewebe fünf Bilder nach <i>cranial</i> ab dem Schnittbild, in dem der erste Anschnitt der <i>Scapula</i> mit <i>Spina scapulae</i> sichtbar ist	halbautomatisch
<b>SchiM_1s</b>	1	Muskulatur im Bereich der Kniekondylen	halbautomatisch
<b>SchiF_1s</b>	1	Fettgewebe im Bereich der Kniekondylen	halbautomatisch
<b>SchiM_3s</b>	3	Muskulatur, drei Schnittbilder nach distal ab dem Schnittbild in dem beide <i>Capiti ossis femoris</i> sichtbar sind	halbautomatisch
<b>SchiF_3s</b>	3	Fettgewebe, drei Schnittbilder nach distal ab dem Schnittbild in dem beide <i>Capiti ossis femoris</i> sichtbar sind	halbautomatisch



Alle Angaben beziehen sich auf die beidseitige Auswertung der entsprechenden anatomischen Strukturen und Regionen am Tierkörper. Bei der Auswertung der MLD wurden Muskelgewebe und Fettauflage manuell definiert. In den Bildern wurde jeweils eine Gewebebrücke zwischen den beiden MLD belassen, die Anteile des *Processus spinosus* sowie die *Musculi multifidii* enthält (siehe Abbildung 7).

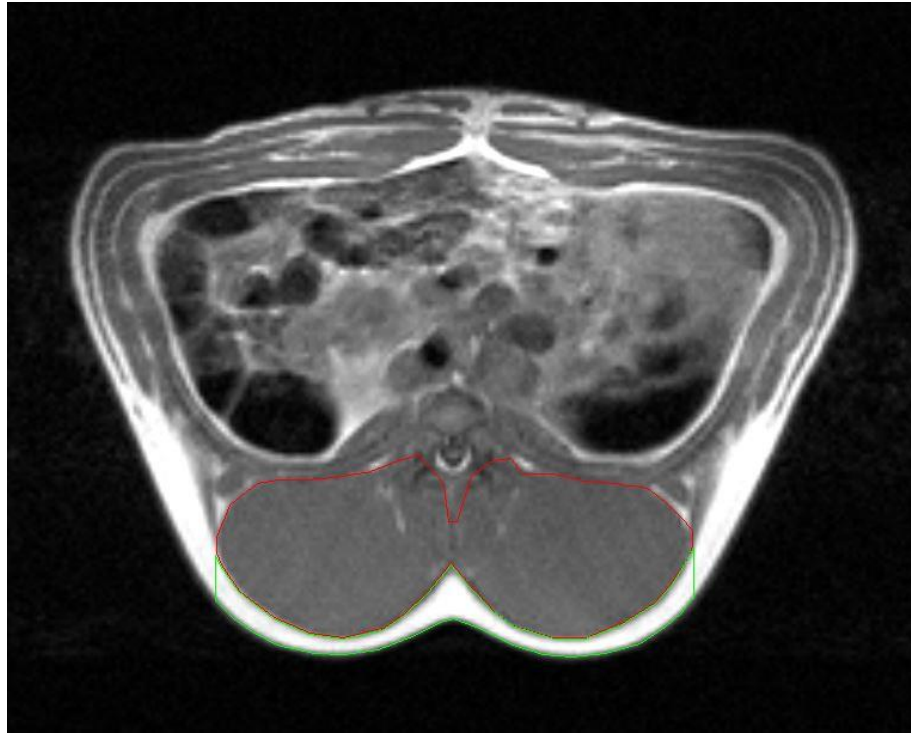


Abbildung 7: Manuell definierte Bereiche für Muskel (Rot) und Fettauflage (Grün) des MLD

Im Anschluss an die Auswertung des ersten Schnittbildes auf Höhe des letzten rippentragenden Brustwirbels wurden in 4 weiteren Schnittbildern nach *caudal* Muskel und Fettauflage der MLD manuell definiert und im

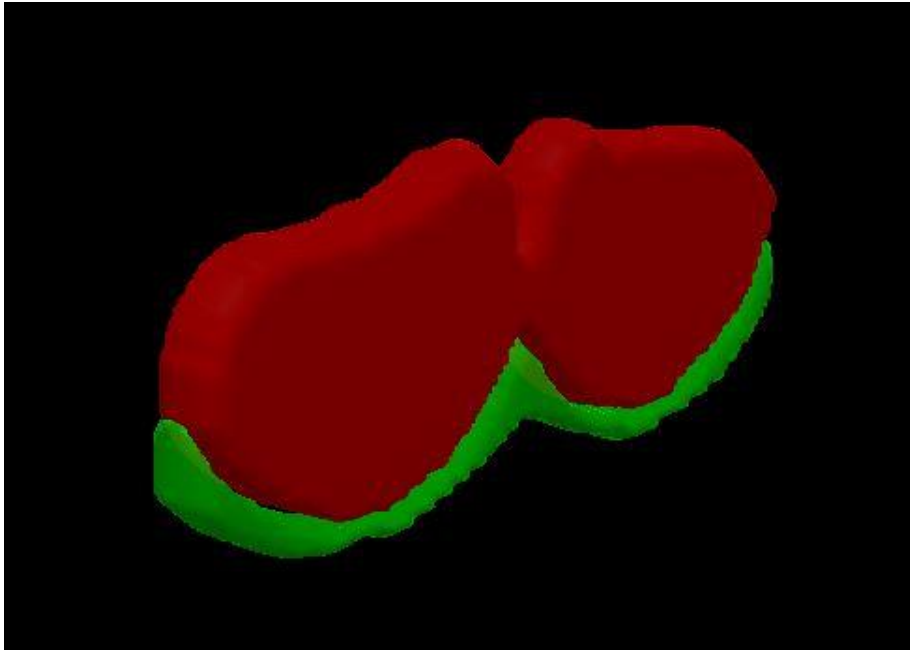


Abbildung 8: 3D-Modell des ersten Schnittbildes, Muskel (Rot) und Fettauflage (Grün) des MLD

Anschluss eine 3D-Rekonstruktion mit Berechnung der Volumina erstellt (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9).

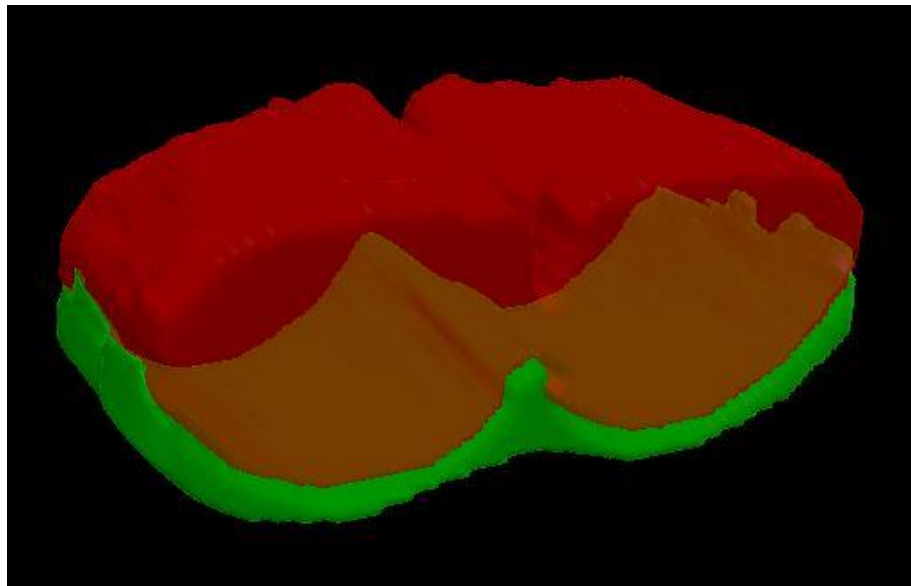


Abbildung 9: 3D-Modell der fünf Schnittbilder, Muskel (Rot) und Fettauflage (Grün) des MLD

Bei der halbautomatischen Auswertung der Schulterregion wurden Muskel und Fettanteile anhand ihrer Grauwerte im Bild definiert. Diese Definition wurde tierindividuell vorgenommen, da die Bildqualität sehr unterschiedlich war. Knochen und *Mediastinum* wurden nicht manuell aus dem Untersuchungsbereich ausgeschlossen, da eine genaue Definition aufgrund der Komplexität des Schnittbildes nicht reproduzierbar war. Im Anschluss an das erste Schnittbild wurden in 4 weiteren Schnittbildern nach *cranial* Muskel- und Fettgewebe der Schulter halbautomatisch definiert und im Anschluss eine 3D-Rekonstruktion mit Berechnung der Volumina erstellt. Vorgehen und Ergebnis werden in Abbildung 10 bis Abbildung 12 gezeigt.

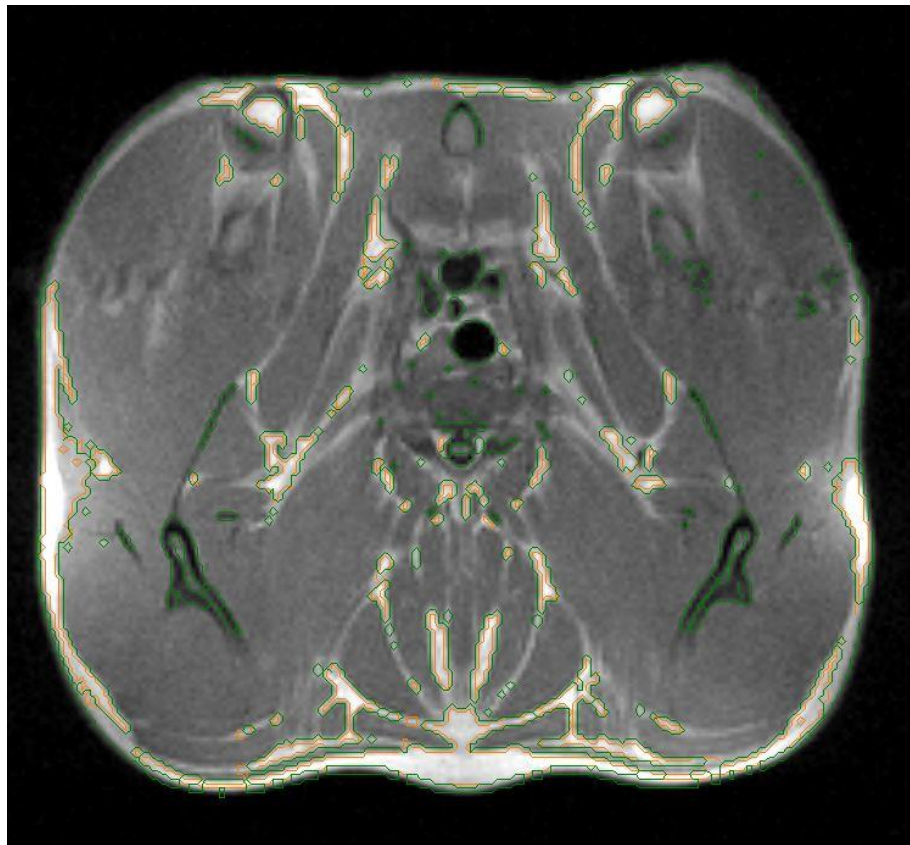


Abbildung 10: Halbautomatische Definition von Fettgewebe und (Mager-)Weichgewebe im ersten Schnittbild der Schulter (Schu\_1s)

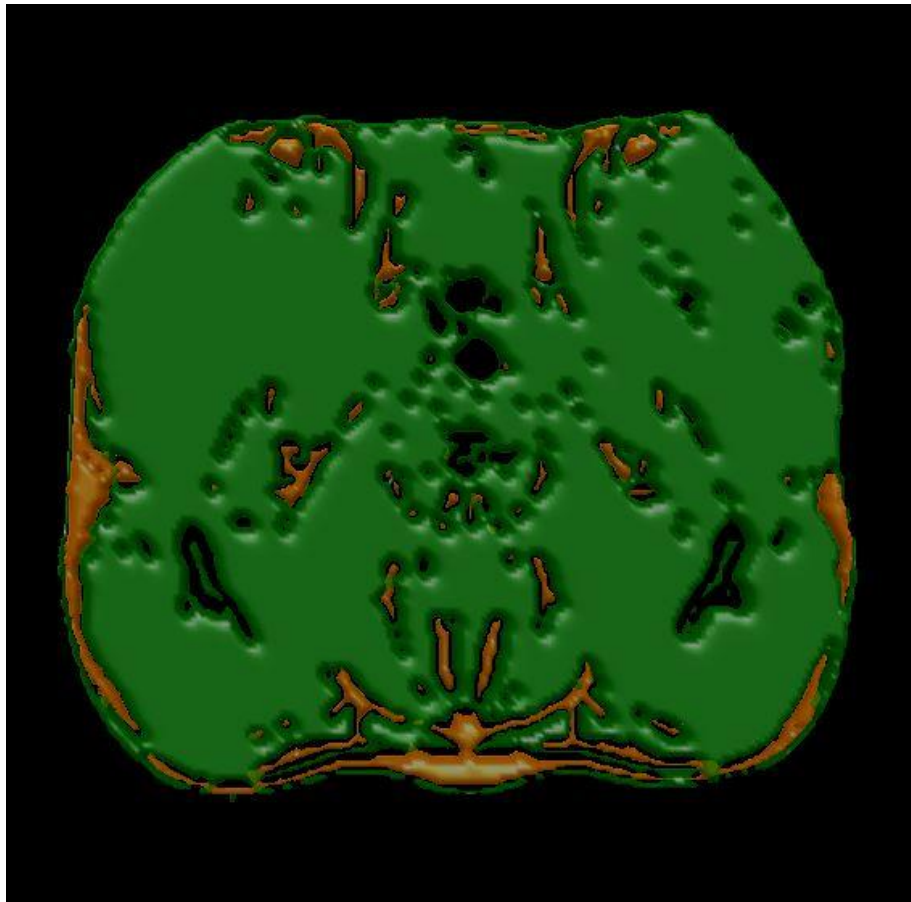


Abbildung 11: 3D-Modell des ersten Schnittbildes in der Schulter, Muskel (Grün) und Fettgewebe (Orange), luftgefüllte Bereiche und Knochen (Schwarz)

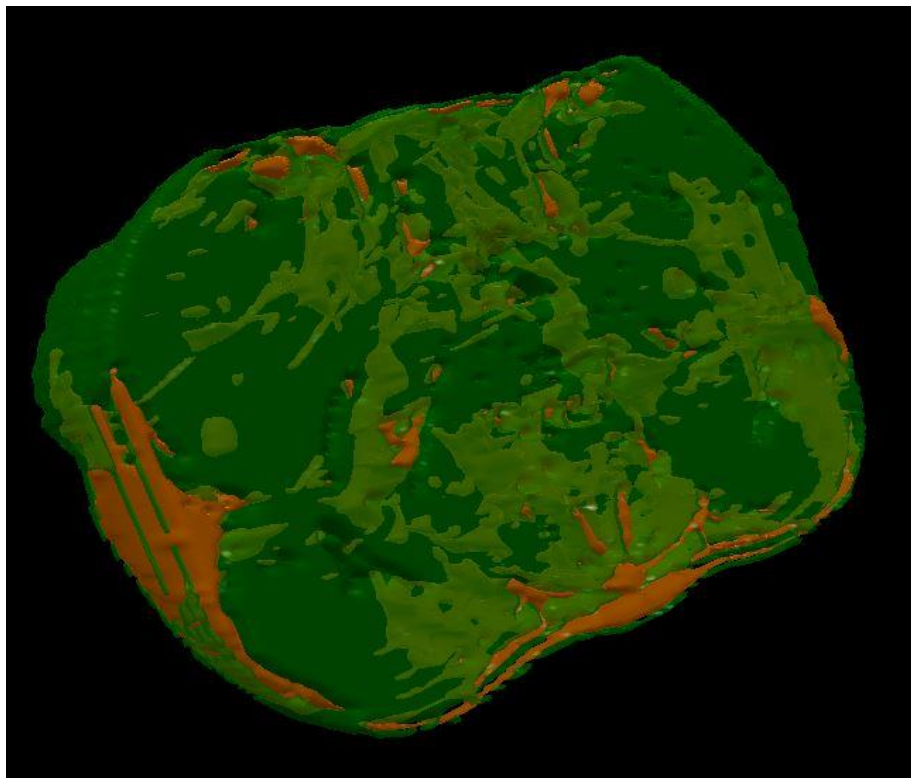


Abbildung 12: 3D-Modell der 5 Schnittbilder der Schulter (Schu\_5s), Muskel (Grün) und Fett (Orange)

Bei der Auswertung der Schnittbilder des Schinkens wurden zwei Bereiche betrachtet:

- a) Ein Schnittbild auf Höhe des Kniegelenkes, auf dem beidseitig beide Rollkämme des Kniegelenkes sichtbar sind. Kniegelenke, Schwanz, Penis und (geschlechtsabhängig) Hoden wurden vor der halbautomatischen Auswertung des Bildes aus dem Untersuchungsbereich ausgenommen (siehe Abbildung 13).
- b) Drei Schnittbilder nach *distal* ab dem Schnittbild auf Höhe der Hüftgelenke, in dem beide *Capiti ossis femoris* sichtbar sind. Von der Auswertung wurden hier knöcherne Anteile des Beckens mit Beckeninhalt, der Oberschenkelknochen und der Geschlechtsapparat ausgenommen (siehe Abbildung 16).

Die Bildfolge auf den nächsten Seiten verdeutlicht die einzelnen Arbeitsschritte der halbautomatischen Auswertung des Schinkens (siehe Abbildung 13 bis Abbildung 18).

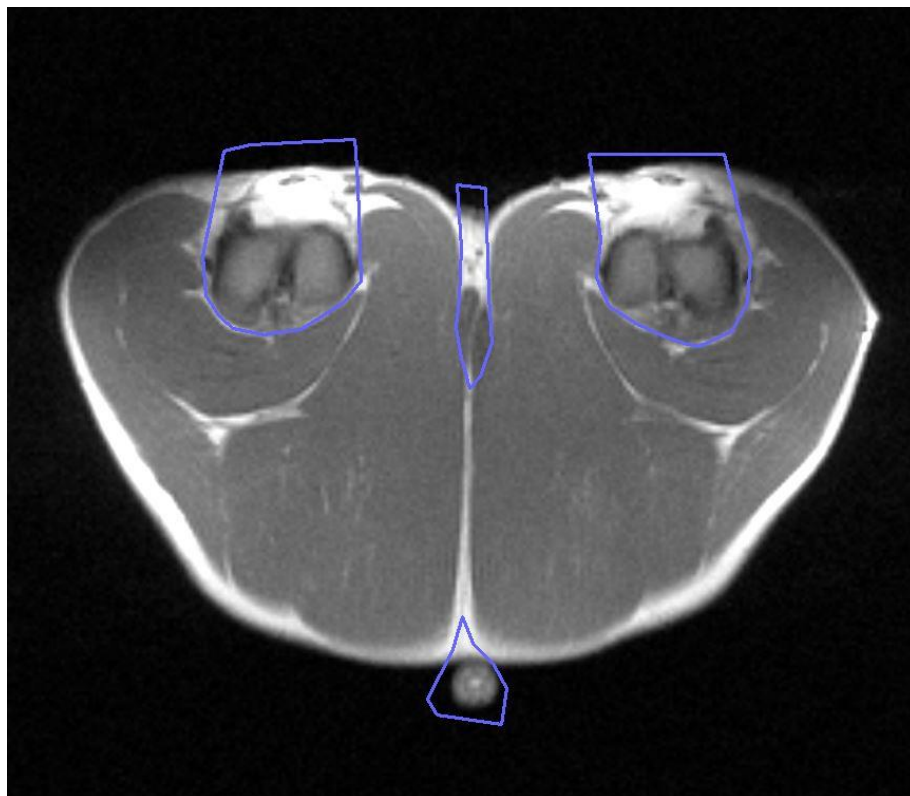


Abbildung 13: Manuelle Definition der Bereiche auf Höhe des Kniegelenks, die von der halbautomatischen Auswertung ausgenommen werden



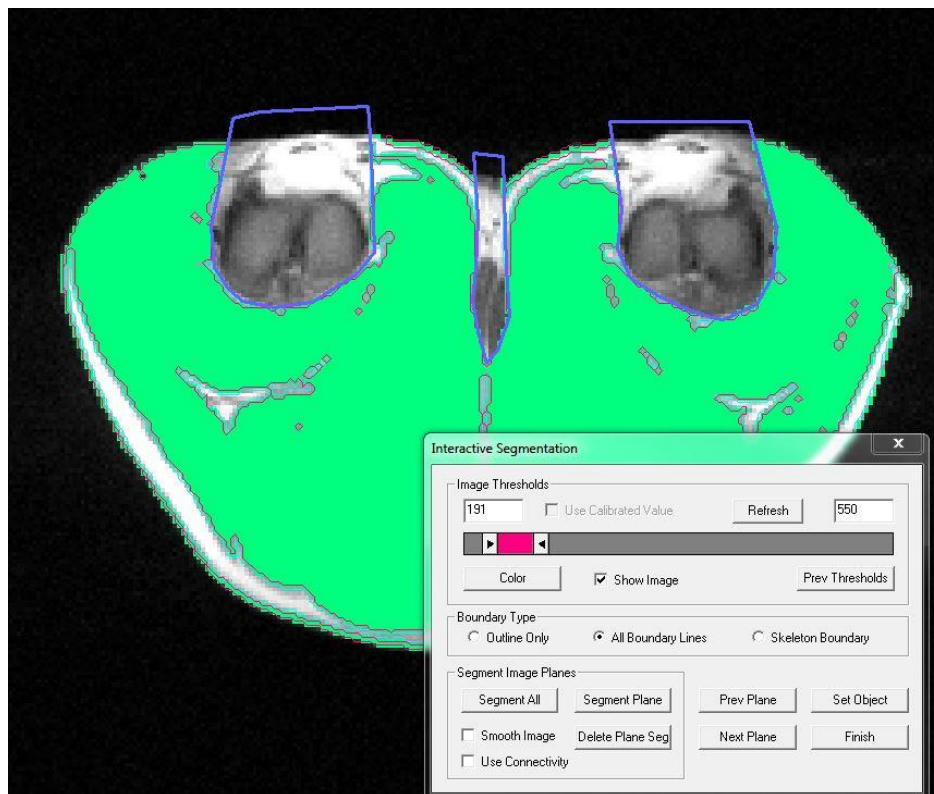


Abbildung 14: Halbautomatische Definition von Muskel- und Fettgewebe im Schnittbild Schi\_1s

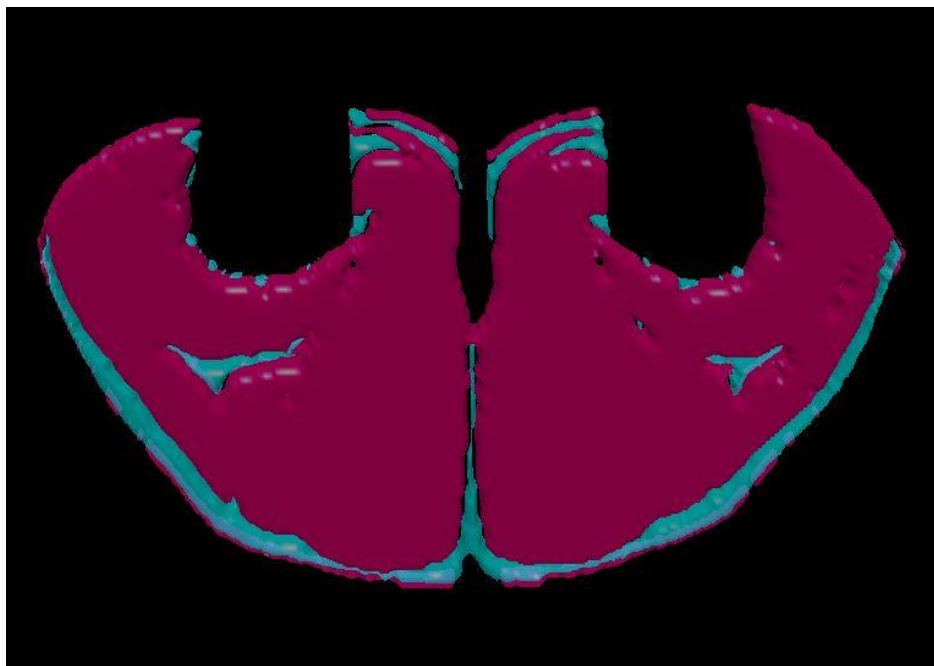


Abbildung 15: 3D-Modell des Schnittbildes Schi\_1s, Muskel (Magenta) und Fett (Türkis)

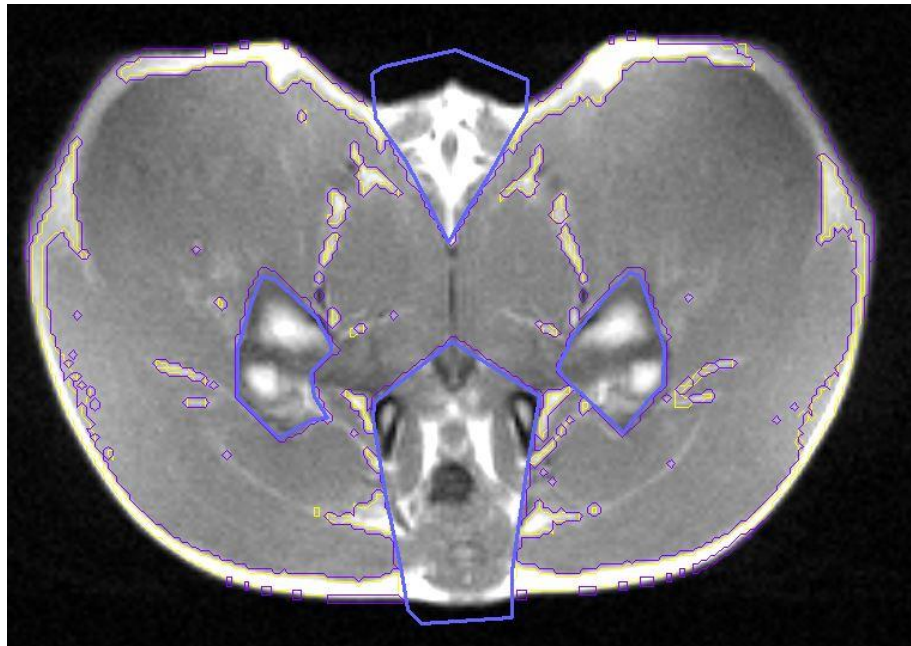


Abbildung 16: Manuelle Definition der Bereiche auf Höhe des Hüftgelenkes, die von der halbautomatischen Auswertung ausgenommen werden (Blau)

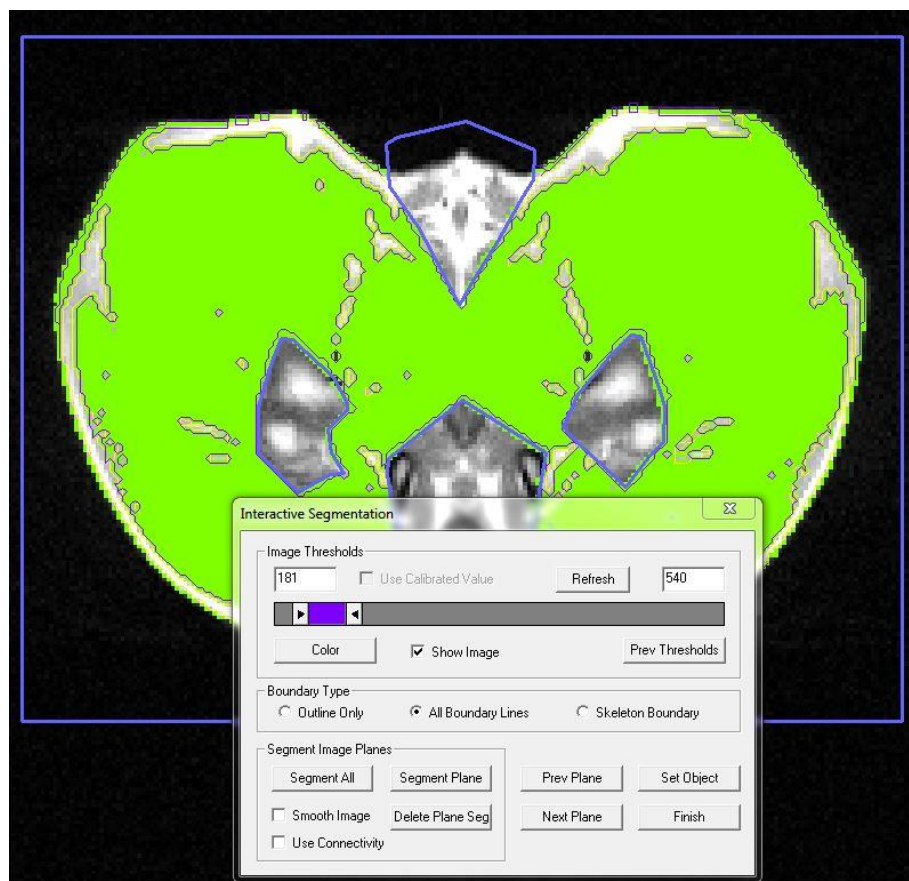


Abbildung 17: Halbautomatische Definition von Muskel- und Fettgewebe im ersten Schnittbild von Schi\_3s

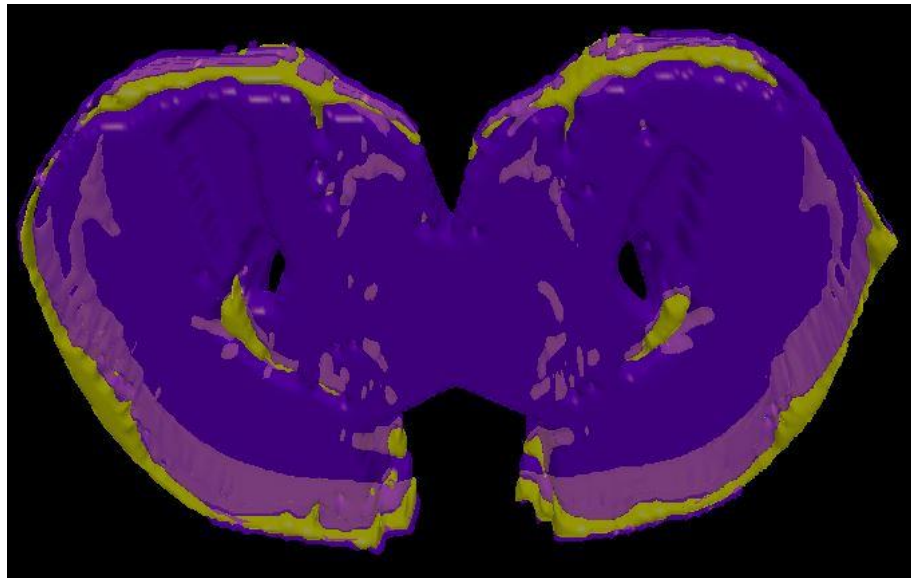


Abbildung 18: 3D-Modell der drei Schnittbilder Schi\_3s, Muskel (Lila) und Fett (Gelb), Knochen und luftgefüllte Bereiche (Schwarz)



### 3. DXA-Untersuchung

Bei den Untersuchungen mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie für diese Dissertation, kam ein GE Healthcare Lunar *iDXA*™ zum Einsatz.

Das Gerät hat die Abmessungen (LxBxH) 2,87 m x 1,31 m x 1,25 m, die Tischhöhe beträgt 0,63 m. Die Liege ist für eine maximale Belastung von 205 kg ausgelegt. Die GE Performa Röntgenröhre, welche unter der Patientenliege läuft, erlaubt es, Patienten bis 182kg Körpermasse zu untersuchen. Aus einer konstanten Stromversorgung von 100 kV erzeugt die Röntgenquelle mit Hilfe eines K-Kantenfilters aus Samarium (Sm) simultan Photonenstrahlung auf zwei Energieniveaus von ca. 40 keV und ca. 80 keV.

Die anästhesierten Tiere kamen im Anschluss an die MRT-Untersuchung in Bauchlage mit nach hinten gestreckten Beinen auf den DXA-Tisch, wo ein Ganzkörperscan im Modus „Dick“ (6,0  $\mu$ Gy) durchgeführt wurde. Abbildung 19 zeigt die Positionierung der Tiere im DXA-Scan.



Abbildung 19: Position der Tiere im DXA-Scan (hier bei Scan 2)

In diesem Modus dauert die Untersuchung 10-13 Minuten pro Tier. Im Anschluss an die Untersuchungen wurden die Tiere in eine, mit Stroh eingestreute, Aufwachbox gebracht.

### 3.1 Auswertung der DXA-Untersuchung

Die Auswertung des DXA-Ganzkörper-scans erfolgte automatisch mittels enCORE® Software (GENERAL ELECTRIC MEDICAL SYSTEMS IT GMBH, 1998-2010). Es wurde lediglich, anstelle der vollautomatischen Regioneneinteilung, der gesamte Tierkörper manuell als Region of Interest definiert. Somit lagen für jeden Scan tierindividuell folgende Variablen vor: Knochenmineraldichte (BMD) in  $\text{g}/\text{cm}^2$ , absoluter Knochenmineralgehalt in Gramm (BMC), Fettgewebeanteil in Prozent (Fett\_%), Fettgewebe absolut in Gramm (Fett\_g), Magerweichgewebe in Gramm (Mager\_g). Abbildung 20 zeigt einen vollständigen Untersuchungsbericht der DXA-Untersuchung.

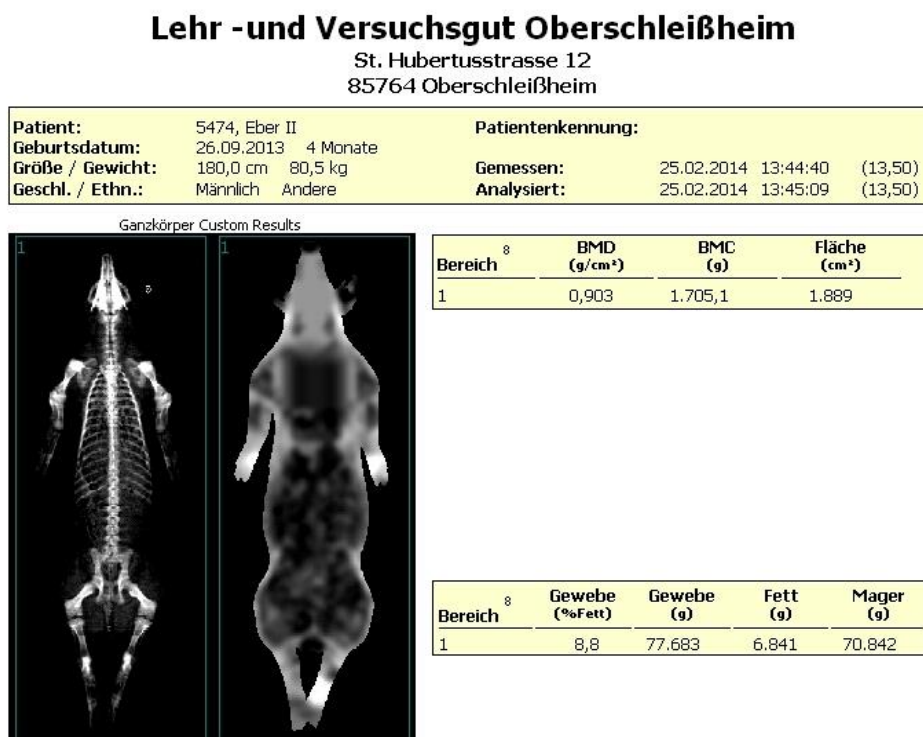


Abbildung 20: DXA-Untersuchungsbericht (nach manueller Definition der Ganzkörperregion)

## 4. Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse

Für die Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse (SIVA) wurden nach der Schlachtung aus der rechten Schlachthälfte Nackenspeckproben mit Muskelanteil mit 4 cm x 4 cm x 4 cm Kantenlänge verwendet. Die Proben sind tiefgekühlt und auf Trockeneis zur Analyse an die ELFI Analytik GmbH in Bonn geschickt und dort analysiert worden. Ermittelt wurden die Werte

für Skatol, Indol und Androstenon in Nanogramm pro Gramm (ng/g) Fettgewebe.

Bei der Analyse fielen zwei konventionell kastrierte Tiere mit Androstenonwerten über 4000 ng/g auf. Diese Werte wurden als Messfehler eingestuft und aus der statistischen Bewertung ausgeschlossen. Um bei der statistischen Analyse eine Normalverteilung zu erreichen wurden die Werte für Androstenon logarithmiert ( $\text{LogAndro} = \text{Log}(\text{Androstenon}) + 3$ ).

## 5. Ebergeruchs-Sensorik

Für die sensorische Untersuchung wurden direkt nach der Schlachtung aus der linken Schlachthälfte jeweils Proben (10 cm x 10 cm x 10 cm) aus dem Backenspeck mit Muskel- und Speicheldrüsenanteilen genommen. Diese wurden 24 Stunden gekühlt gelagert und dann gemäß Anlage 4 der AVV LMHyg beim bayerischen Tiergesundheitsdienst in Poing beurteilt. Das Mikrowellen-Diathermieverfahren (MDV) wurde zur orientierenden Beurteilung aller Proben eingesetzt. Nur positive Proben wurden in den nächsten Untersuchungsschritt nach Anlage 4 der AVV LmHyg mit einbezogen. Die Kochprobe wurde im Prüflabor als Kaltansatz durchgeführt (siehe Kapitel VI.2.3.2).

## 6. Statistische Datenanalyse

Die statistische Berechnung der Daten wurde mit der Software SAS 9.3 (SAS INSTITUTE INC., 2014) durchgeführt. Es wurde für die Körperzusammensetzung und die Werte der SIVA ein generalisiertes lineares Modell (GLM) verwendet.

$$y_{ijk} = \text{Ge}_i + \text{Gr}_j + \text{Ge}_i * \text{Gr}_j + \beta \text{Gew}_{ijk} + e_{ijk}$$

$y_{ijk}$  = Betrachtete Variable (MLDF\_1s, etc.)

$\text{Ge}_i$  = Geschlecht (i = 1-3)

(E=Eber, I=immunologisch kastrierte Tiere, K=chirurgisch kastrierte Tiere)

$\text{Gr}_j$  = Gruppe (j = 1-3) (Durchgang 1-3)

$\text{Ge}_i * \text{Gr}_j$  = Interaktion von Geschlecht und Gruppe (i \* j = 1-9)

$\beta \text{Gew}_{ijk}$  = DXA-Gewicht Einzeltier (bei Scan 1-3)

$e_{ijk}$  = Restfehler

Die Signifikanzgrenze, sowohl für den F-, als auch den folgenden t-Test, wurde mit  $p \leq 0,05$  festgelegt. Die Ergebnisse werden in den Tabellen als Least-Squares-Means (LSM)  $\pm$  Standard Error of Estimation (SEE) dargestellt. Die LSM (kleinste Quadrate Mittelwerte) sind auf das Durchschnittsgewicht aller Tiere im jeweiligen Scan (1-3) korrigiert, da das Gewicht der Tiere zum Untersuchungszeitpunkt als Kovariable in das Varianzanalysemodell aufgenommen wurde.

Für die statistische Analyse der Ebergeruchsdaten mittels SAS 9.3 (SAS INSTITUTE INC., 2014) wurde ebenfalls ein GLM angewendet. Die Signifikanzgrenze wurde mit  $p \leq 0,05$  festgelegt.

$$y_{ijkl} = Ge_i + Gr_j + Ge_i * Gr_j + S_k + \beta Gew_{ijkl} + e_{ijkl}$$

$y_{ijkl}$  = Betrachtete Variable (Skatol, etc.)

$Ge_i$  = Geschlecht (i = 1-3)

(E=Eber; I=immunologisch kastrierte Tiere; K=chirurgisch kastrierte Tiere)

$Gr_j$  = Gruppe (j = 1-3) (Durchgang 1-3)

$S_k$  = Sensorik (k = 1-4)

(„Unauffällig“=1; MDV positiv=2; Kochansatz positiv=3; Ausschmelzprobe positiv=4)

$Ge_i * Gr_j$  = Interaktion von Geschlecht und Gruppe (i \* j = 1-9)

$\beta Gew_{ijkl}$  = DXA-Gewicht Einzeltier (bei Scan 3, vor der Schlachtung)

$e_{ijkl}$  = Restfehler

## VIII. ERGEBNISSE

### 1. DXA-Scans

#### 1.1 DXA-Scan 1

Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigen die Ergebnisse des Scan 1, aufgeschlüsselt nach Geschlechtern und nach Gruppen.

Tabelle 6: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 1 nach Geschlechtern getrennt

<b>DXA</b>	<b>Scan 1</b>		
	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>K</b>
<b>BMD g/cm<sup>2</sup></b>	0.544 ± 0.004	0.551 ± 0.004	0.555 ± 0.004
<b>BMC g</b>	566.33 ± 4.91	580.21 ± 4.87	573.36 ± 4.96
<b>Fett g</b>	2392.03 ± 53.24	2336.27 ± 52.77	2519.91 ± 53.80
<b>Fett %</b>	<b>8.67 ± 0.18<sup>ab</sup></b>	<b>8.50 ± 0.18<sup>a</sup></b>	<b>9.13 ± 0.18<sup>b</sup></b>
<b>Mager g</b>	25030.97 ± 488.92	25110.93 ± 484.59	24184.13 ± 494.05

Alle Werte LSM ± SEE; p ≤ 0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; E = Eber, I = Improvac, K = Kastrat; BMD = Knochenmineraldichte, BMC = Knochenmineralgehalt, Fett g = absoluter Fettgewebegehalt in g, Fett % = prozentualer Fettgewebegehalt; Mager g = Magerweichgewebe in g

Tabelle 7: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 1 nach Gruppen getrennt

<b>DXA</b>	<b>Scan 1</b>		
	<b>Gr I</b>	<b>Gr II</b>	<b>Gr III</b>
<b>BMD g/cm<sup>2</sup></b>	<b>0.538 ± 0.004<sup>a</sup></b>	<b>0.550 ± 0.004<sup>b</sup></b>	<b>0.563 ± 0.004<sup>c</sup></b>
<b>BMC g</b>	<b>559.16 ± 4.87<sup>a</sup></b>	<b>572.91 ± 4.94<sup>a</sup></b>	<b>587.83 ± 5.26<sup>b</sup></b>
<b>Fett g</b>	<b>2211.98 ± 52.75<sup>a</sup></b>	<b>2546.60 ± 53.60<sup>b</sup></b>	<b>2489.63 ± 56.98<sup>b</sup></b>
<b>Fett %</b>	<b>8.06 ± 0.18<sup>a</sup></b>	<b>9.19 ± 0.18<sup>b</sup></b>	<b>9.05 ± 0.19<sup>b</sup></b>
<b>Mager g</b>	25496.64 ± 484.47	24043.87 ± 492.25	24785.52 ± 523.25

Alle Werte LSM ± SEE; p ≤ 0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3; BMD = Knochenmineraldichte, BMC = Knochenmineralgehalt, Fett\_g = absoluter Fettgewebegehalt, Fett g = absoluter Fettgewebegehalt in g, Fett % = prozentualer Fettgewebegehalt; Mager g = Magerweichgewebe in g

Einfluss auf die Variable BMD in Scan 1 hatte neben der Gruppenzugehörigkeit das Gewicht der Tiere zum Zeitpunkt der DXA Untersuchung. Im Vergleich der Gruppen unterscheiden sich alle signifikant voneinander (siehe Tabelle 7). Gr I hat die geringste Knochenmineraldichte, gefolgt von Gr II und Gr III.

Die Variable BMC wurde beeinflusst von der Gruppe, der Interaktion Gruppe\*Geschl sowie dem Gewicht. Zwischen den drei Geschlechtern ist kein signifikanter Einfluss feststellbar. Beim Vergleich der Gruppen untereinander zeigen Gr I und Gr II signifikant niedrigeren BMC als Gr III.

Der absolute Fettgehalt in Gramm wurde beeinflusst von Gruppenzugehörigkeit und Gewicht. Die Geschlechtergruppen haben in der Varianzanalyse nur knapp keinen signifikanten Effekt. Im Gruppenvergleich weist Gr I den signifikant niedrigsten prozentualen Fettanteil auf, während sich Gr II und Gr III voneinander nicht signifikant unterscheiden. Den höchsten Wert erreicht Gr II.

Die Ergebnisse des ersten Scans in Bezug auf den prozentualen Körperfettanteil weisen Parallelen zum absoluten Fettgehalt auf. Es konnte ein signifikanter Einfluss auf die Variable von Geschlecht, Gruppe und Gewicht beobachtet werden. I und K unterscheiden sich signifikant. I weisen den geringsten Körperfettanteil auf. K zeigen bereits hier den größten Wert. E liegen zwischen I und K, unterscheiden sich jedoch nicht signifikant (siehe Tabelle 6). Im Gruppenvergleich weist Gr I den signifikant niedrigsten prozentualen Fettanteil auf, während sich Gr II und Gr III voneinander nicht signifikant unterscheiden. Den höchsten Wert erreicht Gr II (siehe Tabelle 7).

Im ersten Scan gab es für Magerweichgewebe in der Varianzanalyse einen signifikanten Einfluss des Gewichts. Zwischen den Geschlechtern und den Gruppen konnte weder im t-, noch im F-Test, ein signifikanter Unterschied ermittelt werden.

## 1.2 DXA-Scan 2

Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen die Ergebnisse des Scan 2, aufgeschlüsselt nach Geschlechtern und nach Gruppen.

Tabelle 8: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 2 nach Geschlechtern getrennt

<i>DXA</i>	<i>Scan 2</i>		
	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>K</i>
<b><i>BMD g/cm<sup>2</sup></i></b>	<b>0.719 ± 0.006<sup>a</sup></b>	<b>0.730 ± 0.006<sup>ab</sup></b>	<b>0.746 ± 0.006<sup>b</sup></b>
<b><i>BMC g</i></b>	<b>1039.83 ± 8.90</b>	<b>1062.70 ± 8.82</b>	<b>1050.18 ± 8.97</b>
<b><i>Fett g</i></b>	<b>4671.46 ± 90.77<sup>a</sup></b>	<b>4693.22 ± 89.91<sup>a</sup></b>	<b>5258.91 ± 91.48<sup>b</sup></b>
<b><i>Fett %</i></b>	<b>9.18 ± 0.17<sup>a</sup></b>	<b>9.15 ± 0.17<sup>a</sup></b>	<b>10.37 ± 0.17<sup>b</sup></b>
<b><i>Mager g</i></b>	<b>46129.56 ± 92.07<sup>a</sup></b>	<b>46084.88 ± 91.20<sup>a</sup></b>	<b>45531.87 ± 92.79<sup>b</sup></b>

Alle Werte LSM ± SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; E = Eber, I = Improvac, K = Kastrat; BMD = Knochenmineraldichte, BMC = Knochenmineralgehalt, Fett g = absoluter Fettgewebegehalt in g, Fett % = prozentualer Fettgewebegehalt; Mager g = Magerweichgewebe in g

Tabelle 9: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 2 nach Gruppen getrennt

<i>DXA</i>	<i>Scan 2</i>		
	<i>Gr I</i>	<i>Gr II</i>	<i>Gr III</i>
<b><i>BMD g/cm<sup>2</sup></i></b>	<b>0.716 ± 0.006<sup>a</sup></b>	<b>0.744 ± 0.006<sup>b</sup></b>	<b>0.736 ± 0.006<sup>b</sup></b>
<b><i>BMC g</i></b>	<b>1008.04 ± 9.26<sup>a</sup></b>	<b>1062.61 ± 9.03<sup>b</sup></b>	<b>1082.06 ± 9.76<sup>b</sup></b>
<b><i>Fett g</i></b>	<b>4895.61 ± 94.45<sup>a</sup></b>	<b>4182.22 ± 92.01<sup>b</sup></b>	<b>5545.76 ± 99.52<sup>c</sup></b>
<b><i>Fett %</i></b>	<b>9.56 ± 0.18<sup>a</sup></b>	<b>8.15 ± 0.17<sup>b</sup></b>	<b>10.99 ± 0.19<sup>c</sup></b>
<b><i>Mager g</i></b>	<b>46129.56 ± 92.07<sup>a</sup></b>	<b>46084.88 ± 91.20<sup>b</sup></b>	<b>45531.87 ± 92.79<sup>c</sup></b>

Alle Werte LSM ± SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3; BMD = Knochenmineraldichte, BMC = Knochenmineralgehalt, Fett\_g = absoluter Fettgewebegehalt, Fett g = absoluter Fettgewebegehalt in g, Fett % = prozentualer Fettgewebegehalt; Mager g = Magerweichgewebe in g

Einfluss auf BMD in Scan 2 hatten Geschlecht, Gruppe, die Interaktion Geschl\*Gruppe und Gewicht. In der BMD zeigen E bei Scan 2 einen signifikant niedrigeren Wert als K. I liegen zwischen beiden, unterscheiden sich aber nicht signifikant (siehe Tabelle 8). Im Gruppenvergleich zeigt Gr I signifikant weniger BMD als Gr II und Gr III, wobei Gr II den höchsten Wert aufweist (siehe Tabelle 9).

Einfluss auf BMC in Scan 2 hatten die Gruppe, die Interaktion Geschl\*Gruppe und Gewicht. Gr I zeigt den signifikant niedrigsten Wert

verglichen mit Gr II und Gr III. Den höchsten Wert für BMC erreicht Gr III (siehe Tabelle 9).

Signifikanten Einfluss auf den absoluten Fettgehalt in g hatten Geschlecht, Gruppe, Geschl\*Gruppe und Gewicht. E und I weisen signifikant niedrigere Werte auf als K (siehe Tabelle 8). Im Gruppenvergleich unterscheiden sich alle Gruppen signifikant voneinander: Gr II < Gr I < Gr III (siehe Tabelle 9).

Wie bereits beim ersten Scan weist auch in Scan 2 der prozentualen Körperfettanteil Parallelen zum absoluten Fettanteil auf: Die Variable wurde signifikant von Geschlecht, Gruppe, der Interaktion Geschl\*Gruppe und Gewicht beeinflusst. E und I weisen deutlich niedrigere Werte auf als K (siehe Tabelle 8). Im Gruppenvergleich unterscheiden sich alle Gruppen signifikant voneinander: Gr II < Gr I < Gr III (siehe Tabelle 9).

Signifikanten Einfluss auf die Variable Magerweichgewebe hatten Geschlecht, Gruppe, Geschl\*Gruppe und Gewicht. Bei E und I liegen die Werte signifikant höher als bei K. E erreichen den höchsten Wert (siehe Tabelle 8). Alle Gruppen unterscheiden sich in Bezug auf das Magerweichgewebe signifikant voneinander: Gr I erreicht den höchsten Magerweichgewebeanteil, Gr III den niedrigsten. Gr II liegt signifikant verschieden zwischen beiden Werten (siehe Tabelle 9).



### 1.3 DXA-Scan 3

Tabelle 10 und Tabelle 11 zeigen die Ergebnisse des Scan 3 aufgeschlüsselt nach Geschlechtern und nach Gruppen.

Tabelle 10: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 3 nach Geschlechtern getrennt

<i>DXA</i>	<i>Scan 3</i>		
	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>K</b>
<b><i>BMD g/cm<sup>2</sup></i></b>	<b>0.957 ± 0.007<sup>a</sup></b>	<b>0.978 ± 0.007<sup>b</sup></b>	<b>0.990 ± 0.007<sup>b</sup></b>
<b><i>BMC g</i></b>	<b>1796.31 ± 21.90<sup>a</sup></b>	<b>1877.04 ± 21.77<sup>b</sup></b>	<b>1817.53 ± 22.15<sup>ab</sup></b>
<b><i>Fett g</i></b>	<b>10130.80 ± 241.86<sup>a</sup></b>	<b>11032.85 ± 240.48<sup>b</sup></b>	<b>13786.26 ± 244.68<sup>c</sup></b>
<b><i>Fett %</i></b>	<b>11.41 ± 0.27<sup>a</sup></b>	<b>12.37 ± 0.26<sup>b</sup></b>	<b>15.59 ± 0.27<sup>c</sup></b>
<b><i>Mager g</i></b>	<b>77737.96 ± 244.67<sup>a</sup></b>	<b>76755.01 ± 243.27<sup>b</sup></b>	<b>74054.40 ± 247.52<sup>c</sup></b>

Alle Werte LSM ± SEE; p≤0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; E = Eber, I = Improvac, K = Kastrat; BMD = Knochenmineraldichte, BMC = Knochenmineralgehalt, Fett g = absoluter Fettgewebegehalt in g, Fett % = prozentualer Fettgewebegehalt; Mager g = Magerweichgewebe in g

Tabelle 11: Ergebnisse der DXA-Untersuchung Scan 3 nach Gruppen getrennt

<i>DXA</i>	<i>Scan 3</i>		
	<b>Gr I</b>	<b>Gr II</b>	<b>Gr III</b>
<b><i>BMD g/cm<sup>2</sup></i></b>	<b>0.953 ± 0.007<sup>a</sup></b>	<b>0.983 ± 0.007<sup>b</sup></b>	<b>0.989 ± 0.007<sup>b</sup></b>
<b><i>BMC g</i></b>	<b>1730.58 ± 21.74<sup>a</sup></b>	<b>1884.39 ± 22.08<sup>b</sup></b>	<b>1875.91 ± 24.14<sup>b</sup></b>
<b><i>Fett g</i></b>	<b>11975.91 ± 240.10<sup>b</sup></b>	<b>10769.03 ± 243.83<sup>a</sup></b>	<b>12204.96 ± 266.65<sup>b</sup></b>
<b><i>Fett %</i></b>	<b>13.43 ± 0.26<sup>b</sup></b>	<b>12.03 ± 0.27<sup>a</sup></b>	<b>13.91 ± 0.29<sup>b</sup></b>
<b><i>Mager g</i></b>	<b>75957.91 ± 242.89<sup>b</sup></b>	<b>77011.39 ± 246.66<sup>a</sup></b>	<b>75578.07 ± 269.75<sup>b</sup></b>

Alle Werte LSM ± SEE; p≤0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3; BMD = Knochenmineraldichte, BMC = Knochenmineralgehalt, Fett\_g = absoluter Fettgewebegehalt, Fett g = absoluter Fettgewebegehalt in g, Fett % = prozentualer Fettgewebegehalt; Mager g = Magerweichgewebe in g

Bei der DXA Untersuchung in Scan 3 gab es für alle Variablen in der Varianzanalyse einen signifikanten Einfluss von Geschlecht, Gruppe und Gewicht.

E weisen einen signifikant niedrigeren Wert für BMD auf als I und K (siehe Tabelle 10). Im Vergleich der Gruppen zueinander, zeigt Gr I eine signifikant niedrigere Knochenmineraldichte als Gr II und Gr III (siehe Tabelle 11).

Im Knochenmineralgehalt (BMC) weisen E in Scan 3 einen signifikant niedrigeren Wert auf als I. K liegen zwischen beiden Werten, unterscheiden sich aber nicht signifikant (siehe Tabelle 10). Im Vergleich der Gruppen zueinander, zeigt Gr I einen signifikant niedrigeren Knochenmineralgehalt als Gr II und Gr III (siehe Tabelle 11).

Beim absoluten Fettgehalt in Gramm zeigen E signifikant niedrigere Werte als I und K. Jedoch unterscheiden sich auch die Werte von I und K signifikant. K erreichen den höchsten Wert (siehe Tabelle 10). Im Gruppenvergleich zeigt Gr II den signifikant niedrigsten absoluten Fettgehalt. Gr I und Gr III unterscheiden sich nicht signifikant voneinander. Den höchsten Wert erreicht Gr III (siehe Tabelle 11).

Der prozentuale Körperfettanteil ist bei allen Geschlechtern signifikant verschieden. E zeigen den niedrigsten Wert, K den höchsten (siehe Tabelle 10). Im Vergleich der Versuchsgruppen zeigt Gr II signifikant weniger prozentualen Fettanteil als Gr I und Gr III (siehe Tabelle 11).

Für den Magerweichgewebegehalt zeigen alle drei Geschlechter signifikant unterschiedliche Werte. E erreichen den höchsten, K den niedrigsten Wert (siehe Tabelle 10). Im Vergleich der Versuchsgruppen zeigt Gr II den signifikant höchsten Magerweichgewebegehalt. Gr I und Gr III unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (siehe Tabelle 11).

## 2. MRT-Scans

### 2.1 MRT-Scan 1

Tabelle 12 und Tabelle 13 zeigen die ermittelten Volumina der Regionen MLD, Schinken und Schulter in Scan 1, aufgeschlüsselt nach Geschlechtern und Gruppen.

Tabelle 12: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Geschlechtern getrennt in MRT-Scan 1

<i>MRT</i>	<i>Scan 1</i>		
	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>K</i>
<i>MLDF_1s mm<sup>3</sup></i>	7970.22 ± 277.04	7589.87 ± 274.59	8419.11 ± 279.95
<i>MLDM_1s mm<sup>3</sup></i>	68412.60 ± 1098.15	65759.44 ± 1088.43	66659.18 ± 1109.69
<i>MLDF_5s mm<sup>3</sup></i>	69592.16 ± 1973.09	69522.10 ± 1955.61	71031.74 ± 1993.80
<i>MLDM_5s mm<sup>3</sup></i>	397894.11 ± 6144.28	390990.26 ± 6089.85	390283.46 ± 6208.79
<i>SchiF_1s mm<sup>3</sup></i>	<b>22901.52 ± 1046.22<sup>a</sup></b>	<b>21566.78 ± 1036.95<sup>a</sup></b>	<b>26671.44 ± 1057.20<sup>b</sup></b>
<i>SchiM_1s mm<sup>3</sup></i>	412197.86 ± 7289.22	402443.01 ± 7224.65	402520.86 ± 7365.76
<i>SchiF_3s mm<sup>3</sup></i>	<b>54770.13 ± 2542.66<sup>b</sup></b>	<b>44791.27 ± 2520.13<sup>a</sup></b>	<b>55129.14 ± 2569.36<sup>b</sup></b>
<i>SchiM_3s mm<sup>3</sup></i>	1427798.44 ± 21205.06	1405182.94 ± 21017.22	1393567.59 ± 21427.72
<i>SchuF_1s mm<sup>3</sup></i>	28689.67 ± 1459.79	24615.94 ± 1446.85	25309.16 ± 1475.11
<i>SchuM_1s mm<sup>3</sup></i>	513150.98 ± 10261.30	528168.59 ± 10170.40	518277.62 ± 10369.05
<i>SchuF_5s mm<sup>3</sup></i>	202204.17 ± 8618.28	177241.26 ± 8541.93	185556.08 ± 8708.77
<i>SchuM_5s mm<sup>3</sup></i>	2877691.37 ± 42083.80	2878381.73 ± 41711.00	2896726.11 ± 42525.69

Alle Werte LSM ± SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; E = Eber, I = Improvac, K = Kastrat; MLD = Musculus longissimus dorsi, Schi = Schinken, Schu = Schulter, F = Fett, M = Muskel, 1s = 1 Schnittbild, 5s = 5 Schnittbilder

Bei Auswertung der MRT-Schnittbilder des ersten Scans kann zwischen den unterschiedlichen Geschlechtern im Volumen des MLD und seiner Fettauflage kein signifikanter Unterschied ermittelt werden.

Im Vergleich der drei Geschlechter treten im Schinken bei Scan 1 nur signifikante Unterschiede im Fettgewebe auf. Bei Auswertung eines Schnittbildes zeigen E und I signifikant weniger Fettgewebenvolumen als K. Bei Auswertung von drei Schnittbildern im Schinken weisen I signifikant niedrigeres Volumen auf als E und K.

Bei der Auswertung der Schnittbilder der Schulter aus Scan 1 zeigt sich weder für eines, noch für fünf Schnittbildern ein signifikanter Unterschied der Muskel- und Fettvolumina zwischen den Geschlechtern.

Tabelle 13: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Gruppen getrennt in MRT-Scan 1

<b>MRT</b>	<b>Scan 1</b>		
	<b>Gr I</b>	<b>Gr II</b>	<b>Gr III</b>
<b>MLDF_1s mm<sup>3</sup></b>	7670.75 ± 274.53	8319.67 ± 278.94	7988.78 ± 296.50
<b>MLDM_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>73334.73 ± 1088.17<sup>a</sup></b>	<b>63216.72 ± 1105.65<sup>b</sup></b>	<b>64279.77 ± 1175.28<sup>b</sup></b>
<b>MLDF_5s mm<sup>3</sup></b>	69011.36 ± 1955.15	71271.99 ± 1986.55	69862.64 ± 2111.65
<b>MLDM_5s mm<sup>3</sup></b>	<b>431440.27 ± 6088.43<sup>a</sup></b>	<b>371497.83 ± 6186.21<sup>b</sup></b>	<b>376229.73 ± 6575.77<sup>b</sup></b>
<b>SchiF_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>19916.31 ± 1036.71<sup>a</sup></b>	<b>26379.33 ± 1053.36<sup>b</sup></b>	<b>24844.09 ± 1119.69<sup>b</sup></b>
<b>SchiM_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>458979.85 ± 7222.97<sup>a</sup></b>	<b>382340.63 ± 7338.97<sup>b</sup></b>	<b>375841.24 ± 7801.13<sup>b</sup></b>
<b>SchiF_3s mm<sup>3</sup></b>	<b>30614.91 ± 2519.55<sup>a</sup></b>	<b>58833.97 ± 2560.01<sup>b</sup></b>	<b>65241.67 ± 2721.22<sup>b</sup></b>
<b>SchiM_3s mm<sup>3</sup></b>	<b>1643163.53 ± 21012.32<sup>a</sup></b>	<b>1310922.38 ± 21349.79<sup>b</sup></b>	<b>1272463.06 ± 22694.25<sup>b</sup></b>
<b>SchuF_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>17792.26 ± 1446.52<sup>a</sup></b>	<b>27518.23 ± 1469.75<sup>b</sup></b>	<b>33304.28 ± 1562.30<sup>c</sup></b>
<b>SchuM_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>559875.54 ± 10168.03<sup>a</sup></b>	<b>507667.89 ± 10331.34<sup>b</sup></b>	<b>492053.77 ± 10981.93<sup>b</sup></b>
<b>SchuF_5s mm<sup>3</sup></b>	<b>120462.63 ± 8539.94<sup>a</sup></b>	<b>212479.48 ± 8677.10<sup>b</sup></b>	<b>232059.40 ± 9223.52<sup>b</sup></b>
<b>SchuM_5s mm<sup>3</sup></b>	<b>3070378.60 ± 41701.27<sup>a</sup></b>	<b>2862528.44 ± 42371.02<sup>b</sup></b>	<b>2719892.16 ± 45039.24<sup>c</sup></b>

Alle Werte LSM ± SEE; p ≤ 0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3; MLD = Musculus longissimus dorsi, Schi = Schinken, Schu = Schulter, F = Fett, M = Muskel, 1s = 1 Schnittbild, 5s = 5 Schnittbilder

Im Vergleich der Gruppen zeigt Gr I sowohl in der Auswertung eines, als auch von fünf Schnittbildern ein signifikant höheres Volumen des MLD als Gr II und Gr III. Das Volumen der Fettauflage unterscheidet sich nicht signifikant.

Im Gruppenvergleich der Region Schinken unterscheidet sich Gr I signifikant von den beiden anderen Gruppen: das Fettgewebenvolumen ist jeweils am niedrigsten, das Muskelvolumen am höchsten.

Im Vergleich der Region Schulter der verschiedenen Gruppen zeigt Gr I in Scan 1 das signifikant niedrigste Fettgewebe-Volumen sowohl im ersten, als auch in fünf Schnittbildern. Diese Gruppe zeigt in der Auswertung auch die höchsten Volumina für Muskelgewebe.

## 2.2 MRT-Scan 2

Die Ergebnisse des MRT-Scan 2 für die Regionen MLD, Schinken und Schulter werden in Tabelle 14 und Tabelle 15 dargestellt, aufgeschlüsselt nach Geschlechtern und Gruppen.

Tabelle 14: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Geschlechtern getrennt in MRT-Scan 2

<i>MRT</i>	<i>Scan 2</i>		
	<i>E</i>	<i>I</i>	<i>K</i>
<i>MLDF_1s mm<sup>3</sup></i>	<b>14823.73 ± 424.07<sup>a</sup></b>	<b>14410.08 ± 411.66<sup>a</sup></b>	<b>16553.14 ± 427.11<sup>b</sup></b>
<i>MLDM_1s mm<sup>3</sup></i>	124373.68 ± 1437.43	120462.69 ± 1395.34	121681.50 ± 1447.71
<i>MLDF_5s mm<sup>3</sup></i>	<b>110996.49 ± 2826.05<sup>a</sup></b>	<b>111747.09 ± 2388.80<sup>a</sup></b>	<b>124095.67 ± 2477.49<sup>b</sup></b>
<i>MLDM_5s mm<sup>3</sup></i>	692062.11 ± 9209.75	678804.36 ± 7784.80	689873.23 ± 8073.84
<i>SchiF_1s mm<sup>3</sup></i>	<b>42770.50 ± 1502.50<sup>a</sup></b>	<b>42262.36 ± 1488.27<sup>a</sup></b>	<b>48628.81 ± 1514.32<sup>b</sup></b>
<i>SchiM_1s mm<sup>3</sup></i>	672500.25 ± 8011.21	673760.77 ± 7935.39	666697.57 ± 8074.24
<i>SchiF_3s mm<sup>3</sup></i>	<b>113238.165 ± 5171.20<sup>a</sup></b>	<b>114308.089 ± 5122.26<sup>a</sup></b>	<b>136858.823 ± 5211.89<sup>b</sup></b>
<i>SchiM_3s mm<sup>3</sup></i>	<b>2212629.19 ± 21039.35<sup>a</sup></b>	<b>2191679.74 ± 20840.22<sup>ab</sup></b>	<b>2149117.86 ± 21204.89<sup>b</sup></b>
<i>SchuF_1s mm<sup>3</sup></i>	<b>54485.11 ± 2243.91<sup>ab</sup></b>	<b>49485.47 ± 2222.67<sup>a</sup></b>	<b>57550.31 ± 2261.57<sup>b</sup></b>
<i>SchuM_1s mm<sup>3</sup></i>	865300.49 ± 11377.09	844879.60 ± 11269.41	843407.49 ± 11466.60
<i>SchuF_5s mm<sup>3</sup></i>	<b>455289.99 ± 16784.21<sup>ab</sup></b>	<b>412013.85 ± 16865.56<sup>a</sup></b>	<b>489878.68 ± 16918.33<sup>b</sup></b>
<i>SchuM_5s mm<sup>3</sup></i>	4604280.23 ± 40430.64	4521529.82 ± 40626.60	4464051.47 ± 40753.73

Alle Werte LSM ± SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; E = Eber, I = Improvac, K = Kastrat; MLD = Musculus longissimus dorsi, Schi = Schinken, Schu = Schulter, F = Fett, M = Muskel, 1s = 1 Schnittbild, 5s = 5 Schnittbilder

In Scan 2 unterscheiden sich die Muskelvolumina des MLD zwischen den Geschlechtern nicht signifikant. Bei der Fettauflage zeigen K sowohl im ersten, als auch in 5 Schnittbildern ein signifikant höheres Volumen als E und I.

Im Schinken zeigen sich in Scan 2 signifikante Unterschiede in den Volumina des Fettgewebes: K erreichen signifikant höhere Volumina in einem und in drei Schnittbildern.

Bei Auswertung der Schnittbilder von Scan 2 haben I in der Schulter signifikant niedrigere Volumina im Fettgewebe als K. E liegen, nicht signifikant verschieden, zwischen diesen Werten. Die Muskelvolumina der Schulterregion unterscheiden sich zwischen den Geschlechtern nicht signifikant.

Tabelle 15: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Gruppen getrennt in MRT-Scan 2

<i>MRT</i>	<i>Scan 2</i>		
	Gr I	Gr II	Gr III
<i>MLDF_1s mm<sup>3</sup></i>	15880.46 ± 431.33 <sup>b</sup>	13941.27 ± 421.66 <sup>a</sup>	15965.22 ± 471.98 <sup>b</sup>
<i>MLDM_1s mm<sup>3</sup></i>	127624.24 ± 1462.03 <sup>a</sup>	119732.54 ± 1429.25 <sup>b</sup>	119161.10 ± 1599.82 <sup>b</sup>
<i>MLDF_5s mm<sup>3</sup></i>	118607.76 ± 2489.72 <sup>b</sup>	109182.53 ± 2451.58 <sup>a</sup>	119048.95 ± 3080.60 <sup>b</sup>
<i>MLDM_5s mm<sup>3</sup></i>	717142.59 ± 8113.67 <sup>a</sup>	684403.38 ± 7989.41 <sup>b</sup>	659193.72 ± 10039.28 <sup>c</sup>
<i>SchiF_1s mm<sup>3</sup></i>	50353.34 ± 1563.42 <sup>b</sup>	36956.08 ± 1523.05 <sup>a</sup>	46352.24 ± 1647.47 <sup>b</sup>
<i>SchiM_1s mm<sup>3</sup></i>	701413.22 ± 8336.08 <sup>a</sup>	661599.49 ± 8120.82 <sup>b</sup>	649945.88 ± 8784.21 <sup>b</sup>
<i>SchiF_3s mm<sup>3</sup></i>	130134.70 ± 5380.90 <sup>b</sup>	107626.55 ± 5241.96 <sup>a</sup>	126643.83 ± 5670.17 <sup>b</sup>
<i>SchiM_3s mm<sup>3</sup></i>	2298435.92 ± 21892.54 <sup>a</sup>	2146030.34 ± 21327.22 <sup>b</sup>	2108960.53 ± 23069.43 <sup>b</sup>
<i>SchuF_1s mm<sup>3</sup></i>	43489.93 ± 2334.91 <sup>a</sup>	46268.13 ± 2274.61 <sup>a</sup>	71762.82 ± 2460.42 <sup>b</sup>
<i>SchuM_1s mm<sup>3</sup></i>	841239.52 ± 11838.45 <sup>b</sup>	883431.11 ± 11532.75 <sup>a</sup>	828916.95 ± 12474.86 <sup>b</sup>
<i>SchuF_5s mm<sup>3</sup></i>	383590.28 ± 17857.49 <sup>a</sup>	398573.06 ± 17014.01 <sup>a</sup>	575019.17 ± 18410.68 <sup>b</sup>
<i>SchuM_5s mm<sup>3</sup></i>	4558285.38 ± 43016.01 <sup>a</sup>	4645082.46 ± 40984.20 <sup>a</sup>	4386493.68 ± 44348.56 <sup>b</sup>

Alle Werte LSM ± SEE; p≤0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3; MLD = Musculus longissimus dorsi, Schi = Schinken, Schu = Schulter, F = Fett, M = Muskel, 1s = 1 Schnittbild, 5s = 5 Schnittbilder

Im Gruppenvergleich des MLD zeigt Gr II ein signifikant niedrigeres Volumen der Fettauflage als Gr I und Gr III im ersten und in fünf Schnittbildern. Das Muskelvolumen ist bei Gr I signifikant am höchsten. Bei Auswertung von fünf Schnittbildern unterscheiden sich alle Gruppen signifikant im Muskelvolumen des MLD.

Werden die drei Gruppen miteinander verglichen, zeigt Gr II die signifikant niedrigsten Fettgewebe-Volumina im Schinken. Gr I weist hier die signifikant höchsten Muskelvolumina auf.

Im Vergleich der Schulterregion bei Scan 2 können für Gr I und Gr II signifikant niedrigere Fettgewebe-Volumina festgestellt werden, als für Gr III. Bei der Auswertung von fünf Schnittbildern können umgekehrt für Gr I und Gr II signifikant höhere Muskelvolumina in der Schulter festgestellt werden. Den höchsten Wert erreicht hierbei Gr II.

### 2.3 MRT-Scan 3

Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die ermittelten Volumina der Regionen MLD, Schinken und Schulter in Scan 3, aufgeschlüsselt nach Geschlechtern und Gruppen.

Tabelle 16: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Geschlechtern getrennt in MRT-Scan 3

<b>MRT</b>	<b>Scan 3</b>		
	<b>E</b>	<b>I</b>	<b>K</b>
<b>MLDF_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>29064.35 ± 1001.29<sup>a</sup></b>	<b>31084.67 ± 995.56<sup>a</sup></b>	<b>40709.42 ± 1012.97<sup>b</sup></b>
<b>MLDM_1s mm<sup>3</sup></b>	202303.83 ± 2037.01	203936.14 ± 2025.34	201641.10 ± 2060.77
<b>MLDF_5s mm<sup>3</sup></b>	<b>204244.73 ± 5043.61<sup>a</sup></b>	<b>213957.98 ± 5014.72<sup>a</sup></b>	<b>266344.34 ± 5102.44<sup>b</sup></b>
<b>MLDM_5s mm<sup>3</sup></b>	1128322.31 ± 12972.77	1123580.93 ± 12898.48	1117384.69 ± 13124.11
<b>SchiF_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>69189.71 ± 2625.86<sup>a</sup></b>	<b>73515.78 ± 2610.82<sup>a</sup></b>	<b>91167.70 ± 2656.49<sup>b</sup></b>
<b>SchiM_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>994706.19 ± 16191.51<sup>a</sup></b>	<b>982758.27 ± 16098.79<sup>a</sup></b>	<b>930651.27 ± 16380.40<sup>b</sup></b>
<b>SchiF_3s mm<sup>3</sup></b>	<b>181588.174 ± 7300.09<sup>a</sup></b>	<b>196425.300 ± 7258.28<sup>a</sup></b>	<b>283044.161 ± 7385.25<sup>b</sup></b>
<b>SchiM_3s mm<sup>3</sup></b>	<b>3281210.93 ± 31806.84<sup>a</sup></b>	<b>3228264.87 ± 31624.69<sup>a</sup></b>	<b>3091580.14 ± 32177.90<sup>b</sup></b>
<b>SchuF_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>107913.92 ± 5751.45<sup>a</sup></b>	<b>124754.18 ± 5718.51<sup>b</sup></b>	<b>153447.03 ± 5818.54<sup>c</sup></b>
<b>SchuM_1s mm<sup>3</sup></b>	<b>1298583.54 ± 19268.72<sup>a</sup></b>	<b>1243924.08 ± 19158.38<sup>b</sup></b>	<b>1205401.61 ± 19493.51<sup>b</sup></b>
<b>SchuF_5s mm<sup>3</sup></b>	<b>745140.94 ± 32307.46<sup>a</sup></b>	<b>761345.10 ± 32122.44<sup>a</sup></b>	<b>1062421.98 ± 32684.36<sup>b</sup></b>
<b>SchuM_5s mm<sup>3</sup></b>	<b>6814253.66 ± 68721.34<sup>a</sup></b>	<b>6698392.17 ± 68327.79<sup>a</sup></b>	<b>6369954.15 ± 69523.05<sup>b</sup></b>

Alle Werte LSM ± SEE; p ≤ 0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; E = Eber, I = Improvac, K = Kastrat; MLD = Musculus longissimus dorsi, Schi = Schinken, Schu = Schulter, F = Fett, M = Muskel, 1s = 1 Schnittbild, 5s = 5 Schnittbilder

Bei Auswertung der Schnittbilder aus Scan 3 zeigen E und I sowohl bei Auswertung des ersten, als auch von fünf Schnittbildern signifikant niedrigere Volumina in der Fettauflage des MLD als K. Die Muskelvolumina unterscheiden sich nicht signifikant.

Bei Auswertung der Schnittbilder des Schinkens aus Scan 3 zeigen E und I hochsignifikante Unterschiede zu K: Die Fettvolumina sind deutlich niedriger, die Muskelvolumina deutlich höher.

Im Scan 3 zeigen sich nach Auswertung eines Schnittbildes der Schulter signifikante Unterschiede zwischen allen drei Geschlechtern in den Fettgewebervolumina. E erreichen den niedrigsten, K den höchsten Wert. Bei der Auswertung von fünf Schnittbildern erreichen K erneut denn signifikant höchsten Wert. E und I unterscheiden sich voneinander nicht signifikant. Die Muskelvolumina der Schulter unterscheiden sich bei

Auswertung eines Schnittbildes für alle drei Geschlechter signifikant. E erreichen den höchsten, K den niedrigsten Wert. Bei der Auswertung von fünf Schnittbildern erreichen E und I signifikant höhere Volumina als K.

Tabelle 17: Volumina des MLD, des Schinkens und der Schulter nach Gruppen getrennt in MRT-Scan 3

<b>MRT</b>	<b>Scan 3</b>		
	<b>Gr I</b>	<b>Gr II</b>	<b>Gr III</b>
<b>MLDF_1s mm<sup>3</sup></b>	34681.63 ± 993.99 <sup>b</sup>	30122.67 ± 1009.45 <sup>a</sup>	36054.15 ± 1103.91 <sup>b</sup>
<b>MLDM_1s mm<sup>3</sup></b>	214223.24 ± 2022.15 <sup>a</sup>	198016.70 ± 2053.60 <sup>b</sup>	195641.13 ± 2245.78 <sup>b</sup>
<b>MLDF_5s mm<sup>3</sup></b>	232806.26 ± 5006.82 <sup>b</sup>	207198.22 ± 5084.67 <sup>a</sup>	244542.57 ± 5560.53 <sup>b</sup>
<b>MLDM_5s mm<sup>3</sup></b>	1164192.66 ± 12878.15 <sup>a</sup>	1106574.13 ± 13078.40 <sup>b</sup>	1098521.13 ± 14302.35 <sup>b</sup>
<b>SchiF_1s mm<sup>3</sup></b>	90645.68 ± 2606.71 <sup>a</sup>	66066.89 ± 2647.24 <sup>b</sup>	77160.62 ± 2894.98 <sup>c</sup>
<b>SchiM_1s mm<sup>3</sup></b>	1033201.31 ± 16073.42 <sup>a</sup>	961121.26 ± 16323.35 <sup>b</sup>	913793.17 ± 17850.98 <sup>b</sup>
<b>SchiF_3s mm<sup>3</sup></b>	233870.97 ± 7246.85 <sup>b</sup>	201294.22 ± 7359.53 <sup>a</sup>	225892.45 ± 8048.28 <sup>b</sup>
<b>SchiM_3s mm<sup>3</sup></b>	3311931.51 ± 31574.86 <sup>a</sup>	3185266.57 ± 32065.83 <sup>b</sup>	3103857.86 ± 35066.73 <sup>b</sup>
<b>SchuF_1s mm<sup>3</sup></b>	124739.47 ± 5709.50 <sup>a</sup>	106785.37 ± 5798.28 <sup>b</sup>	154590.30 ± 6340.92 <sup>c</sup>
<b>SchuM_1s mm<sup>3</sup></b>	1258868.91 ± 19128.18 <sup>a</sup>	1290490.46 ± 19425.62 <sup>a</sup>	1198549.86 ± 21243.58 <sup>b</sup>
<b>SchuF_5s mm<sup>3</sup></b>	928344.16 ± 32071.82 <sup>a</sup>	712301.86 ± 32570.52 <sup>b</sup>	928262.01 ± 35618.66 <sup>a</sup>
<b>SchuM_5s mm<sup>3</sup></b>	6659149.57 ± 68220.11 <sup>a</sup>	6778473.06 ± 69280.91 <sup>a</sup>	6444977.33 ± 75764.60 <sup>b</sup>

Alle Werte LSM ± SEE; p≤0,05; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3; MLD = Musculus longissimus dorsi, Schi = Schinken, Schu = Schulter, F = Fett, M = Muskel, 1s = 1 Schnittbild, 5s = 5 Schnittbilder

Im Gruppenvergleich zeigt Gr II im MLD die signifikant niedrigsten Volumina in der Fettauflage, während die signifikant höchsten Muskelvolumina in Gr I nachgewiesen werden.

Bei Betrachtung eines und dreier Schnittbilder im Schinken der Versuchsgruppen fällt auf, dass Gr I signifikant höhere Muskelvolumina aufweist als Gr II und Gr III. Gr III weist die niedrigsten Muskelvolumina auf. Die signifikant niedrigsten Fettvolumina zeigt dagegen Gr II.

Vergleicht man die Schulterregion der drei Gruppen miteinander, so erreicht Gr II signifikant niedrigere Fettgewebervolumina als Gr I und Gr III. Bei den Muskelvolumina liegen Gr I und Gr II signifikant über Gr III.



### 3. Ebergeruchsanalysen

#### 3.1 Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse

##### 3.1.1 Skatol

Bei der Auswertung der Ebergeruchswerte für die drei Geschlechter zeigen Eber für Skatol einen signifikant höheren Wert als Kastraten. Der Wert für Immunokastraten liegt, nicht signifikant verschieden, dazwischen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 21 zu sehen.

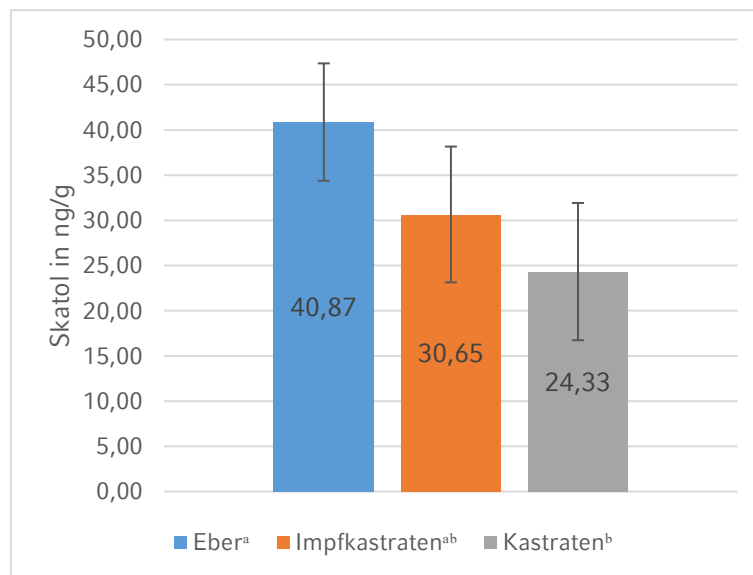


Abbildung 21: Skatol in ng/g, nach Geschlechtern getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede

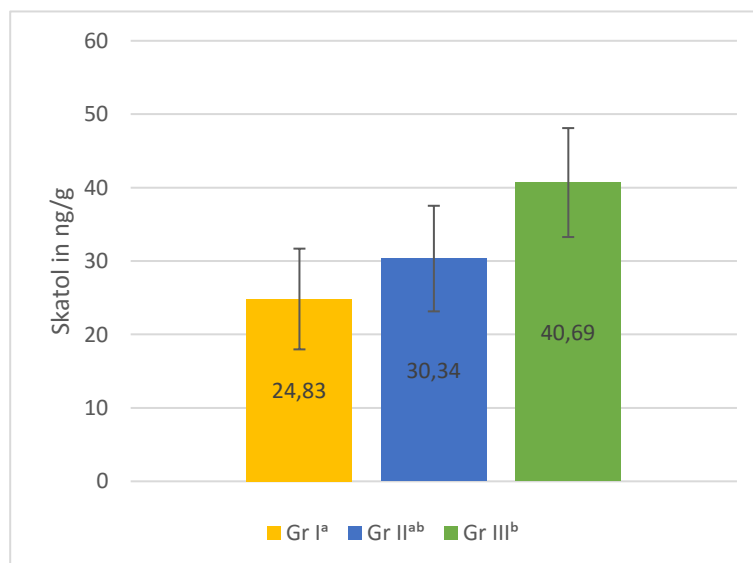


Abbildung 22: Skatol in ng/g, nach Gruppen getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3



### 3.1.2 Indol

Bei Indol zeigt sich im Geschlechtervergleich ein ähnliches Bild wie bei Skatol: Eber weisen den höchsten Wert auf. Dieser unterscheidet sich signifikant vom Wert der Kastraten. Immunokastraten liegen, nicht signifikant verschieden, zwischen beiden Werten (siehe Abbildung 24).

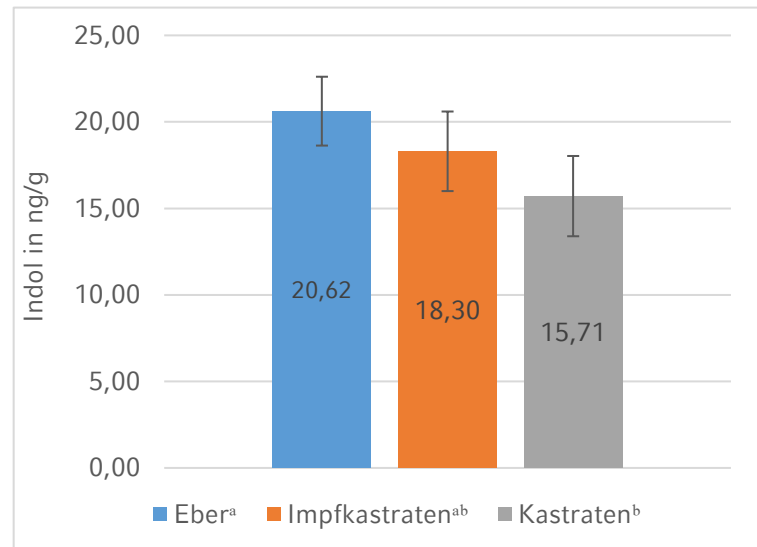


Abbildung 24: Indol in ng/g, nach Geschlechtern getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede

Gr I weist den niedrigsten Indol-Wert auf. Sie unterscheidet sich signifikant von Gr II, die den höchsten Wert erreicht. Gr III liegt, nicht signifikant verschieden, zwischen beiden Werten (siehe Abbildung 25).

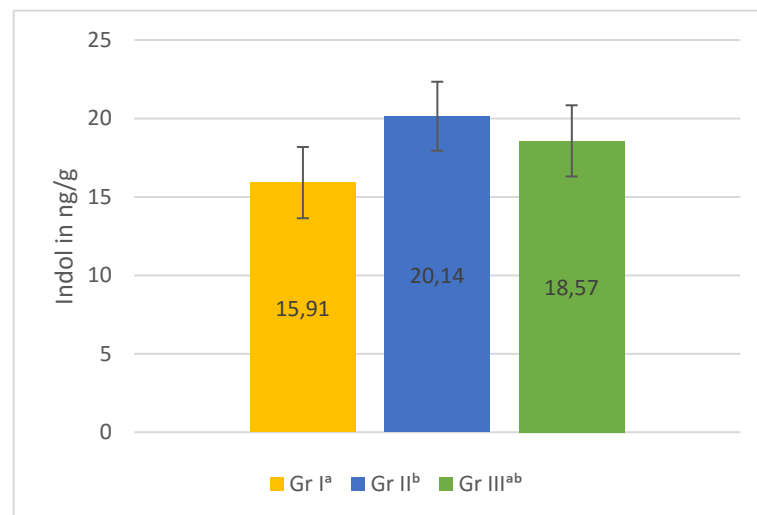


Abbildung 25: Indol in ng/g, nach Gruppen getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3

Werden die Indol-Werte der verschiedenen Geschlechter und Gruppen verglichen, fällt auf, dass E2 die höchsten Werte erreichen, E3 die zweithöchsten. Die signifikanten Unterschiede zu den anderen Geschlechtern fallen allerdings weniger deutlich aus, als bei Skatol. Dies zeigt Abbildung 26.

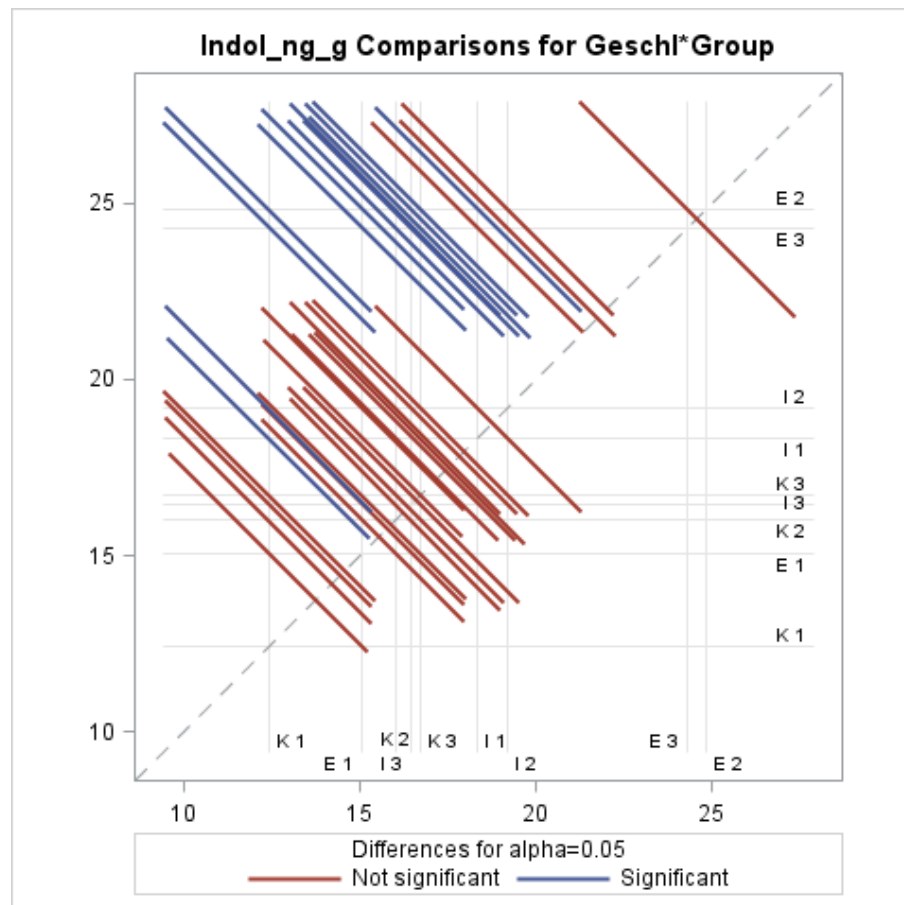


Abbildung 26: Interaktionseffekt von Geschlecht und Gruppe auf den Indol-Gehalt (ng/g)

### 3.1.3 Androstenon

Bei Betrachtung der LSM für Androstenon, in Abbildung 27, zeigen Eber, verglichen mit Immunokastraten und Kastraten, hochsignifikant verschieden, den höchsten Wert.

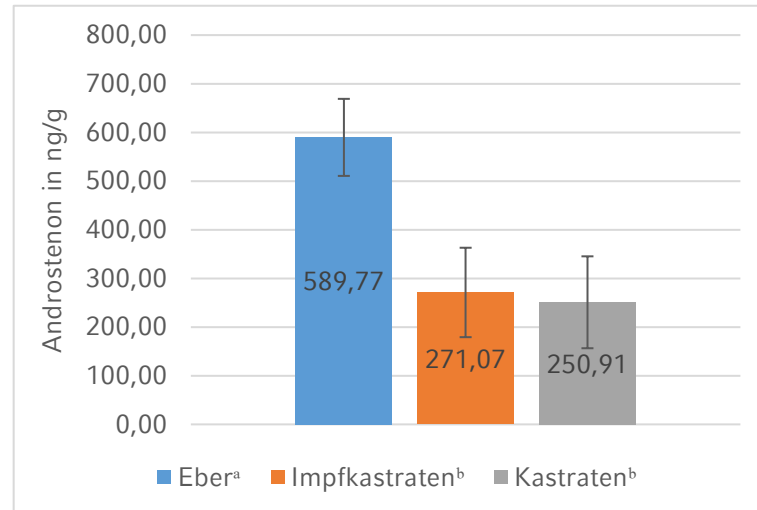


Abbildung 27: Androstenon in ng/g, nach Geschlechtern getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede

Bei der Betrachtung der unterschiedlichen Gruppen, weist Gr I den signifikant niedrigsten Wert auf. Gr III zeigt den höchsten Androstenon-Wert, unterscheidet sich aber nicht signifikant von Gr II (siehe Abbildung 28).

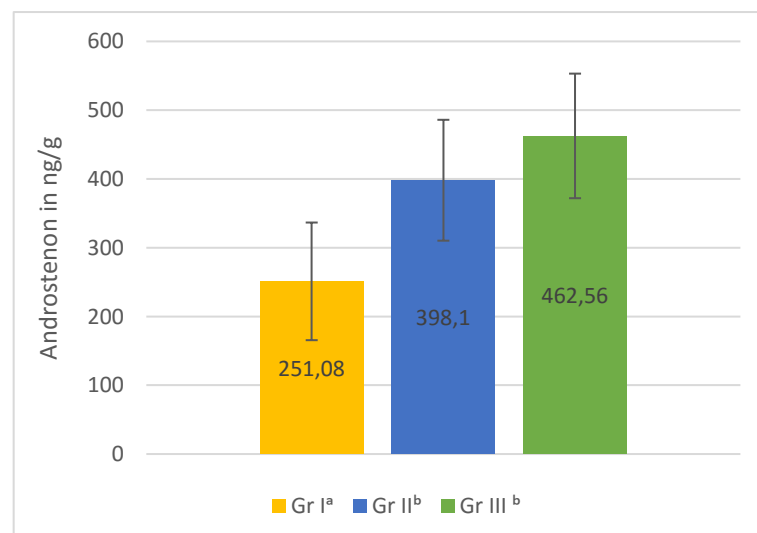


Abbildung 28: Androstenon in ng/g, nach Gruppen getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3

In der Auswertung der Androstenon-Werte der einzelnen Geschlechter und Gruppen (siehe Abbildung 29), zeigen erneut E3 den höchsten Wert, E2 den zweithöchsten. Sie unterscheiden sich damit signifikant von allen anderen Geschlechtern und Gruppen. E3 weisen zudem signifikant höhere Werte auf als E2.

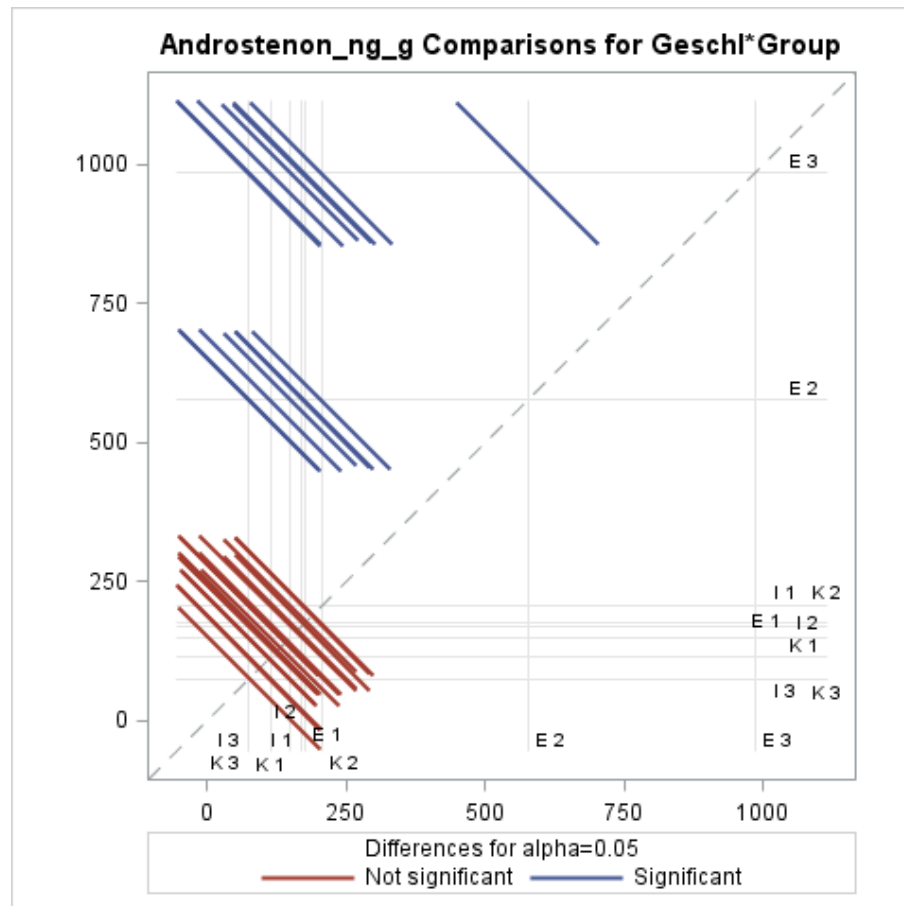


Abbildung 29: Interaktionseffekt von Geschlecht und Gruppe auf den Androstenon-Gehalt (ng/g)

### 3.1.4 LogAndrostenon

Um bei der statistischen Analyse eine Normalverteilung zu erreichen wurden die Werte für Androstenon logarithmiert. In Abbildung 30 ist zu sehen, dass Eber, wie bei den unlogarithmierten Werten, den signifikant höchsten Wert zeigen. Immunokastraten und Kastraten unterscheiden sich voneinander nicht signifikant.

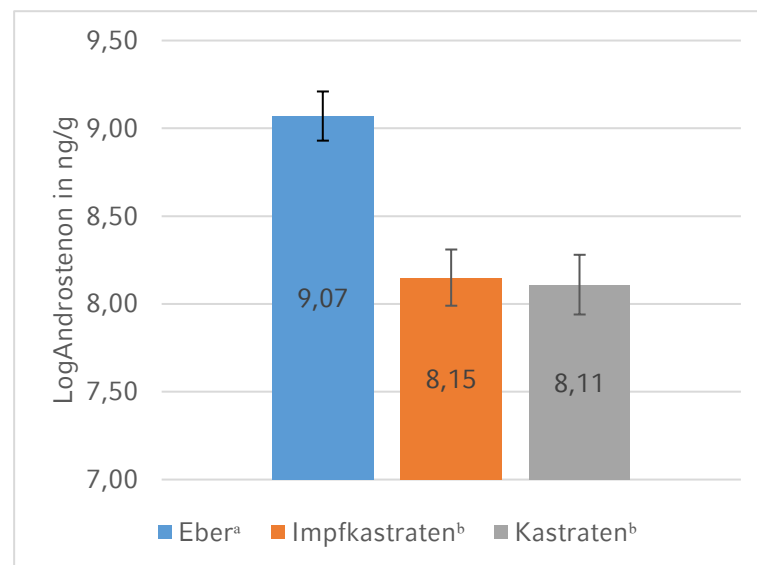


Abbildung 30: LogAndrostenon in ng/g, nach Geschlechtern getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; LogAndrostenon = Werte für Androstenon logarithmiert (ng/g)

Verglichen mit den unlogarithmierten Werten, fällt bei der Betrachtung der unterschiedlichen Gruppen in Abbildung 31 auf, dass Gr I ebenfalls den signifikant niedrigsten Wert aufweist. Gr II zeigt den signifikant

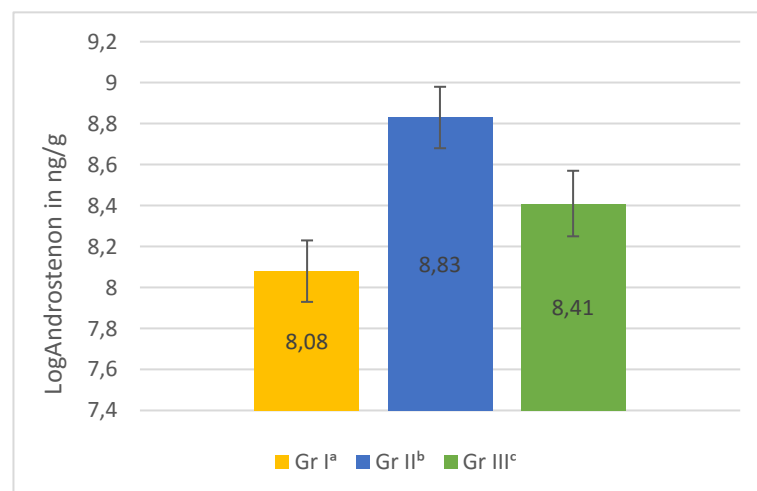


Abbildung 31: LogAndrostenon in ng/g, nach Gruppen getrennt

Alle Werte LSM mit SEE;  $p \leq 0,05$ ; Verschiedene Superskripts kennzeichnen signifikante Unterschiede; Gr I = Durchgang 1, Gr II = Durchgang 2, Gr III = Durchgang 3; LogAndrostenon = Werte für Androstenon logarithmiert (ng/g)

höchsten LogAndrostenon-Wert. Gr III unterscheidet sich ebenfalls signifikant von den beiden anderen Gruppen. Der Wert liegt zwischen Gr I und Gr II.

Bei Betrachtung der logarithmierten Androstenon-Werte zwischen den einzelnen Geschlechtern der einzelnen Gruppen (siehe Abbildung 32) fällt auf, dass weiterhin E2 und E3 signifikant höhere Werte aufweisen, als alle anderen Geschlechter in den verschiedenen Gruppen. Zusätzlich werden signifikante Unterschiede zwischen den anderen Geschlechtern deutlich.

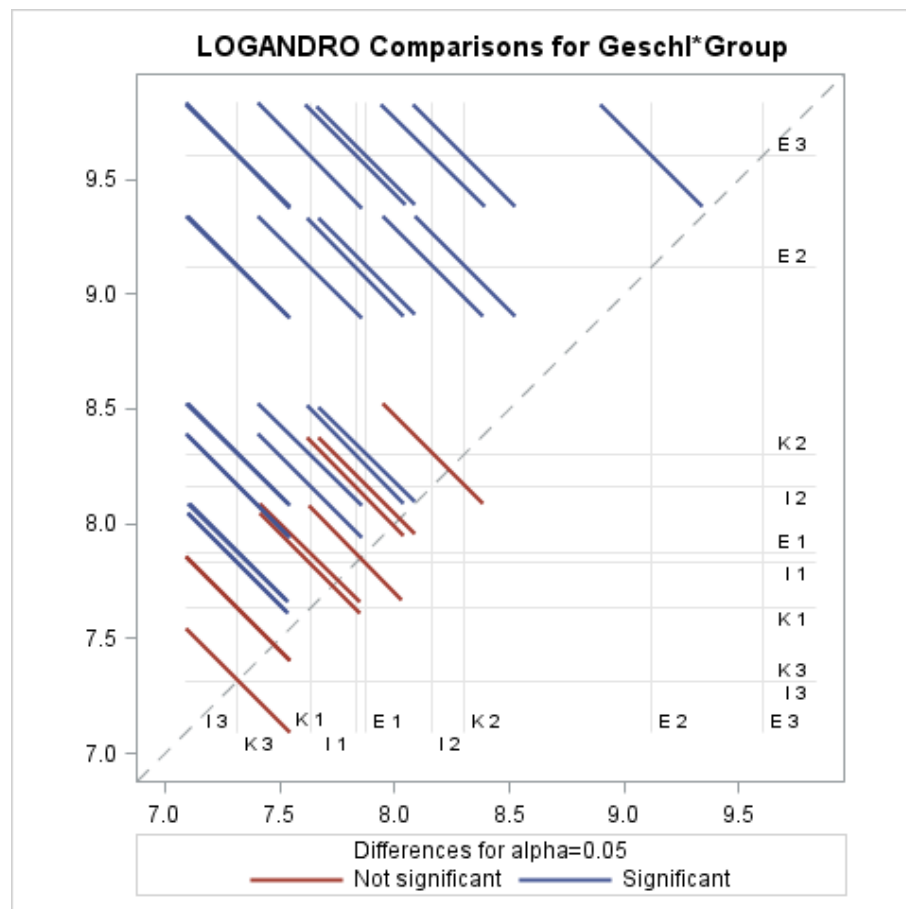


Abbildung 32: Interaktionseffekt von Geschlecht und Gruppe auf den LogAndrostenon-Gehalt (ng/g)



### 3.2 Sensorik

Die Ergebnisse der sensorischen Untersuchung wurden in Abhängigkeit der in der SIVA ermittelten Werte für Skatol, Indol und Androstenon ausgewertet. In der sensorischen Analyse wurden nur positive Proben in den nächsten Untersuchungsschritt nach Anlage 4 der AVV LmHyg mit einbezogen. Für die Darstellung in Tabelle 18 bis Tabelle 24 gelten folgende Konditionen:

- Unauffällig = MDV –
- Mikrowellen-Diathermie: MDV + = im MDV +, im Kochansatz –
- Kochprobe: Koch + = MDV +, Kochansatz +, Schmelzprobe –
- Ausschmelzprobe: Schmelz + = MDV +, Kochansatz +, Ausschmelzprobe +

#### 3.2.1 Skatol

Tabelle 18: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für Skatol in ng/g

Sensorik	Skatol-LSM	SEE	Pr >  t	LSM Nr.
<b>Unauffällig</b>	27,414	2,768	<0,0001	1
<b>MDV +</b>	27,637	6,528	<0,0001	2
<b>Koch +</b>	9,939	23,04	0,6673	3
<b>Schmelz +</b>	62,813	7,882	<0,0001	4

Der Wert stellt die LSM und SEE für die in diesem sensorischen Prüfschritt positiven Proben dar;  $p \leq 0,05$

Werden den Ergebnissen der sensorischen Untersuchung die LSM für Skatol der jeweils positiven Proben zugrunde gelegt, zeigt sich ein besonders niedriger Wert mit hohem SE bei der Kochprobe, der nicht verschieden von Null ist. Dies ist auf die geringe Anzahl an Tieren zurückzuführen, die in der Kochprobe ein positives Ergebnis aufweisen. Die Tiere, die in der MDV unauffällig waren, weisen gleich hohe Skatol-Werte auf, wie die Tiere, die positiv auffielen. Die signifikant höchsten Skatol-Werte wurden bei den Tieren gemessen, die auch noch in der Ausschmelzprobe positiv auf Ebergeruch untersucht wurden (siehe Tabelle 18 und Tabelle 19).

Tabelle 19: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf Skatol;  $p \leq 0,05$

LSM Nr.	1	2	3
2	0.9757		
3	0.4528	0.4582	
4	0.0001	0.0005	0.0346

### 3.2.2 Indol

Tabelle 20: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für Indol in ng/g

Sensorik	Indol-LSM	SEE	Pr >  t	LSM Nr.
Unauffällig	17,309	0,847	<0,0001	1
MDV +	22,684	1,998	<0,0001	2
Koch +	14,342	7,054	0,0450	3
Schmelz +	18,496	2,413	<0,0001	4

Der Wert stellt die LSM und SEE für die in diesem sensorischen Prüfschritt positiven Proben dar;  $p \leq 0,05$

Die LSM für Indol in den einzelnen, sensorischen Untersuchungsschritten unterscheiden sich signifikant von null. Die Standardschätzfehler sind generell kleiner als bei Skatol (siehe Tabelle 20, vgl. Tabelle 18).

Tabelle 21: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf Indol;  $p \leq 0,05$

LSM Nr.	1	2	3
2	0.0180		
3	0.6768	0.2543	
4	0.6639	0.1651	0.5832

Proben von Tieren, die in der MDV positiv waren, weisen signifikant höhere Indol-Werte auf als Proben, die unauffällig waren. Dies gilt nicht für Proben von Tieren, die nach der Koch- bzw. der Ausschmelzprobe weiterhin als auffällig beurteilt wurden. (siehe Tabelle 20 und Tabelle 21).

### 3.2.3 Androstenon

Tabelle 22: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für Androstenon (Andro) in ng/g

Sensorik	Andro-LSM	SEE	Pr >  t	LSM Nr.
Unauffällig	237,029	33,967	<0,0001	1
MDV +	176,364	82,662	0,0357	2
Koch +	435,971	281,310	0,1249	3
Schmelz +	632,967	96,487	<0,0001	4

Der Wert stellt die LSM und SEE für die in diesem sensorischen Prüfschritt positiven Proben dar;  $p \leq 0,05$

Für die Androstenon-Gehalte (siehe Tabelle 22) zeigt sich in der sensorischen Untersuchung ein ähnliches Bild wie für die Werte bei Skatol (vgl. Tabelle 18). Auffällig ist, dass die LSM bei Proben, die im MDV negativ (unauffällig) waren, höher ausfallen als bei positiven Proben. In der Kochprobe wird mit dem hohen Standardschätzfehler erneut deutlich, dass der Kochprobe, neben der hohen Variation der Androstenon-Messwerte, nur wenige positive Ergebnisse zugrunde liegen. Die höchsten Androstenonwerte weisen jedoch Proben auf, die in der Ausschmelzprobe positiv waren. Die Anzahl der positiven Ausschmelzproben ( $n = 12$ ) war dem Untersuchungsprotokoll entsprechend noch niedriger als die der positiven Kochproben ( $n = 13$ ).

Speziell für den Androstenongehalt wird jedoch auf die Auswertung der Ergebnisse nach Logarithmierung verwiesen, da ohne Transformation keine Normalverteilung der Messwerte vorlag.

Tabelle 23: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf Androstenon;  $p \leq 0,05$

LSM Nr.	1	2	3
2	0.5111		
3	0.4838	0.3738	
4	0.0005	0.0003	0.5142

Die Ausschmelzprobe zeigt, verglichen mit den anderen Untersuchungsmethoden, signifikant unterschiedliche Ergebnisse für Androstenon nur im Vergleich mit unauffälligen (1) und positiven (2) Proben der MDV (siehe Tabelle 23).

### 3.2.4 LogAndrostenon

Tabelle 24: Ergebnisse der Sensorikuntersuchung für LogAndrostenon

Sensorik	LogAndro-LSM	SEE	Pr >  t	LSM Nr.
Unauffällig	8.060	0.06	<0,0001	1
MDV +	7.973	0.14	<0,0001	2
Koch +	9.097	0.49	<0,0001	3
Schmelz +	8.631	0.16	<0,0001	4

Der Wert stellt die LSM und SEE für die in diesem sensorischen Prüfschritt positiven Proben dar;  $p \leq 0,05$

Die logarithmierten (normalverteilten) Androstenon-Werte sind, im Unterschied zu den nicht-logarithmierten, jeweils signifikant verschieden von Null (Tabelle 24). Sensorisch unauffällige Proben weisen höhere LSM für LogAndrostenon auf als MDV positive Proben. Der relativ hohe Standardschätzfehler für den LogAndrostenon-Wert in der Kochprobe ist durch die geringe Tierzahl und die hohe Variation in dieser Untersuchungsmethode zu erklären. Die LSM für LogAndrostenon in der Ausschmelzprobe liegen leicht unter denen der Kochprobe, aber dennoch signifikant über den beiden anderen Werten (siehe Tabelle 24 und Tabelle 25).

Tabelle 25: Ergebnis des t-Tests für die Sensorikuntersuchung, bezogen auf LogAndrostenon;  $p \leq 0,05$

LSM Nr.	1	2	3
2	0.5899		
3	0.0397	0.0300	
4	0.0037	0.0025	0.3791

## IX. DISKUSSION

### 1. Ergebnisse der DXA

#### 1.1 Knochenmineraldichte (BMD)

Die Werte für die BMD, die in dieser Studie ermittelt wurden, liegen unter denen, die in Studien von MITCHELL *et al.* (2001b) und BÖTTINGER (2006) in ähnlichen Gewichtsklassen erhoben wurden, aber über den Werten, die SCHOLZ *et al.* (2004) mittels DXA erhoben haben. Hierauf könnte das Futter einen Einfluss gehabt haben. In Abhängigkeit von Haltungsform (Maststall mit Spaltenboden vs. Aussenklimastall mit Stroheinstreu) und Geschlecht (männliche Kastraten vs. Weibliche Schweine) unterschied sich die BMD auch in der Studie von Böttinger. Da die Genetik (Deutsche Landrasse x Piétrain) sowie die Haltung im Außenklimastall in der Studie von Böttinger die gleiche war wie in der vorliegenden Arbeit, sollte der genetische Einfluss eine untergeordnete Rolle spielen. Zudem bestehen nach WENCZEL (2013) Unterschiede zwischen verschiedenen DXA-Geräten in der Hard- sowie der Software, die zu leicht unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Die geringere Knochenmineraldichte und der geringere Knochenmineralgehalt bei E könnte die Prädisposition für Fundamentschäden über die Mastdauer erhöhen. I weisen hier eine höhere Knochenmineraldichte und einen höheren Knochenmineralgehalt auf.

Dass E in der vorliegenden Arbeit in Scan 2 und Scan 3 signifikant niedrigere BMD aufweisen als K, kann auf die niedrigere Futteraufnahme der E, vgl. WEILER *et al.* (2013), und damit verbunden mit der geringeren Mineralstoffaufnahme sowie -verfügbarkeit zurückzuführen sein. Hormonell müssten E gegenüber K im Vorteil sein, da Östrogene die Osteoblastenaktivität fördern und zu vermehrter Knochenbildung anregen. Die Knochenbildung wird durch die, von den Osteoblasten gebildete, alkalische Phosphatase, ein hydrolytisches Enzym, günstig beeinflusst (NELSON & COX, 2001). Östrogene werden bei Ebern unter anderem im Hoden gebildet (CLAUS *et al.*, 1994). E sind aktiver als K. Dies sollte nach vorliegenden Studien zu einer höheren BMD führen, vgl. BÖTTINGER (2006). Allerdings führt die Autorin an, dass in ihrer Studie kein

Unterschied in der, im Blut gemessenen, alkalischen Phosphatase bestand.

Gr I weist in Scan 2 und Scan 3 die signifikant niedrigste BMD auf (siehe Tabelle 9 und Tabelle 11). Da alle Gruppen (I - III) mit dem gleichen Futter unter gleichen Haltungsbedingungen aufgezogen und gemästet wurden, scheinen hier ein jahreszeitlicher Einfluss im Aussenklimastall und genetische Einflüsse wahrscheinlich. Diese könnten, wie in der Studie von SCHOLZ *et al.* (2004) gezeigt wurde, zu einem unterschiedlichen Phosphorgehalt im Knochen geführt haben, der in der DXA allerdings nicht vom Kalziumgehalt und weiteren Mineralsalzen differenziert werden kann.

### **1.2 Knochenmineralgehalt (BMC)**

Der BMC ist in allen Untersuchungen in Gr I signifikant am niedrigsten (siehe Tabelle 7, Tabelle 9 und Tabelle 11). Der Umstand, dass alle Gruppen (I - III) bis zum ersten Scan im klimatisierten Aufzuchtstall unter gleichen Bedingungen aufgezogen wurden, macht einen Witterungseinfluss unwahrscheinlich. Innerhalb der Geschlechtergruppen (E, I, K) zeigt sich lediglich in Scan 3 ein signifikanter Unterschied zwischen E und I. K liegen nicht signifikant verschieden zwischen beiden Werten (siehe Tabelle 10). Dieser Unterschied könnte sich durch die höhere Futteraufnahme von I ab der zweiten Improvac®(Pfizer) Injektion erklären (WEILER *et al.*, 2013), wodurch die Tiere zwangsläufig mehr Mineralstoffe aufnehmen können.

### **1.3 Absoluter und prozentualer Fettanteil**

Dass sich E und I im absoluten Fettgehalt in Scan 2 signifikant von K unterscheiden, haben bisherige Untersuchungen ebenfalls gezeigt. Die zweite Impfung mit Improvac®(Pfizer) erfolgte erst vier Wochen vor der Schlachtung mit  $137 \pm 1$  LT. Somit waren I bis dahin physiologisch mit E gleichzusetzen. In Scan 3, nach der zweiten Impfung mit Improvac®(Pfizer), liegt der absolute Fettgehalt von I signifikant zwischen denen von E und K, was die Wirksamkeit des Präparates indirekt bestätigt. Ab der zweiten Injektion sind I mit dem Aufbau der Immunität gegen endogenes GnRH physiologisch mit K gleichzusetzen. Dies betrifft unter anderem Futterverwertung und Fettansatz. In der

Futteraufnahmekapazität können I ab diesem Zeitpunkt selbst K übertreffen (WEILER *et al.*, 2013). In der Zerlegungs-Studie von BOLER *et al.* (2014) wiesen Immunokastraten, verglichen mit Sauen, Ebern und chirurgisch kastrierten Tieren, den schwersten leeren Magen auf. HÜGEL (2010) konnten eine ähnliche Tendenz in der Futtermittelverwertung anhand der Tageszunahmen im Vergleich von K und I zeigen.

Gr II weist in Scan 2 und Scan 3 den signifikant niedrigsten absoluten Fettgehalt auf (siehe Tabelle 9 und Tabelle 11). Ein jahreszeitlicher Einfluss kann hier nicht ausgeschlossen werden, da diese Gruppe über den kompletten Winter gemästet wurde und der Grundumsatz eines Organismus bei kalter Umgebungstemperatur steigt (PETRY, 2005).

Die signifikanten Unterschiede im prozentualen Fettanteil decken sich, für alle Geschlechter (E, I, K) und alle Gruppen (I - III), in allen Untersuchungen mit dem vorher beschriebenen absoluten Fettanteil.

#### **1.4 Absoluter Magerweichgewebeanteil**

Im absoluten Magerweichgewebeanteil lassen sich, erwartungsgemäß, ab Scan 2 signifikant die höchsten Werte bei E feststellen (siehe Tabelle 8 und Tabelle 10). Hierbei ist zu bemerken, dass sich bisherige Untersuchungen meist auf Schlachtkörper beziehen (BABOL & SQUIRES, 1995; LAUTERBACH, 2012; BAUER & JUDAS, 2014; BERNAU *et al.*, 2015b). Wenn Tiere *in vivo* untersucht wurden, dann meist keine Eber, beziehungsweise nicht im direkten Vergleich zu immunokastrierten und konventionell kastrierten Tieren.

I unterscheiden sich im Magerweichgewebeanteil in Scan 2 noch nicht von E, da dieser vor der zweiten Impfung mit Improvac®(Pfizer) stattfand. In Scan 3, nach vollständiger Immunisierung gegen endogenes GnRH mit  $137 \pm 1$  LT, wiesen I einen signifikant höheren Magerweichgewebeanteil auf als K, lagen aber gleichzeitig signifikant unter dem Wert, den E erreichten. Diese Entwicklung in der Körperzusammensetzung entspricht in umgekehrter Reihenfolge, den Werten, die für prozentualen und absoluten Fettgehalt ermittelt werden konnten.

Gr II zeigt in Scan 3 den signifikant höchsten, absoluten

Magerweichgewebeanteil. Diese Gruppe wies auch den niedrigsten Fettanteil auf. Da ein erhöhter Grundumsatz (PETRY, 2005) in der Wintermast im Widerspruch zu einer anabolen Stoffwechsellage steht, kann hier ein genetischer Einfluss vorliegen. In der vorliegenden Studie wurden drei unterschiedliche Piétrain-Eber eingesetzt, vgl. Kapitel VII.1. Zudem stammten die eingesetzten DL-Sauen größtenteils aus unterschiedlichen Vaterlinien.

## **2. Ergebnisse der MRT**

### **2.1 Musculus longissimus dorsi (MLD)**

Auffällig war, dass sich E, I und K im erfassten Muskelvolumen dieser Region in keinem Scan signifikant unterschieden. In einer Studie von ADAM (2014) zeigten Eber ein niedrigeres Gewicht des Lachses als Sauen. In der Studie von DOBROWOLSKI *et al.* (1995) lag der Gewebeanteil bei Ebern in dieser Region leicht unter dem von Kastraten.

Unterschiede konnten in Scan 2 und Scan 3 im Volumen der Fettauflage, sowohl in einem Schnittbild, als auch bei fünf Schnittbildern analog festgestellt werden. E und I lagen hier deutlich unter dem Volumen von K. Dass die Region des MLD eine geeignete Region ist, um den Gesamtkörperfettanteil anhand der Fettauflage vorherzusagen, bestätigten MITCHELL *et al.* (2001a).

Die Fettvolumina eines Schnittbildes und von fünf Schnittbildern zeigten den signifikant niedrigsten Wert in Gruppe II ab Scan 2. BERNAU (2011) zeigte in einer Studie, dass rassespezifische Unterschiede in den Fettvolumina bestehen. In der vorliegenden Untersuchung weisen zwar alle Tiere die gleiche Genetik auf, allerdings wurden 3 unterschiedliche Piétrain-Eber eingesetzt. Möglich ist, dass die Tiere dieser Gruppe aufgrund eines höheren Grundumsatzes in der Wintermast, weniger Fettdepots aufbauen konnten.

### **2.2 Schulter (Schu)**

Im Schulterbereich wiesen in MRT-Scan 2 K das höchste Fettvolumen auf. I lagen weiterhin unter den Fettvolumina von E. In Scan 3 zeigten E das signifikant niedrigste Fettvolumen, K das höchste. Die Ursache der hohen Fettzunahme bei I ist in der zweiten Impfung mit Improvac®(Pfizer) zu



sehen, die bei den Tieren eine höhere Futteraufnahme auslöst (WEILER *et al.*, 2013). Für die Muskelvolumina von E, I und K ließen sich erst in Scan 3 signifikante Unterschiede darstellen: bei Betrachtung von fünf Schnittbildern zeigten E und I hier signifikant höhere Muskelvolumina als K. Dies bestätigt eine Studie von DOBROWOLSKI *et al.* (1995). Die Autoren fanden ebenfalls höhere Muskelgewebeanteile in der Schulter von Ebern als von Kastraten. Vor der zweiten Impfung mit Improvac® waren I physiologisch gleichgestellt mit E. Die anabole Stoffwechsellaage aufgrund der intakten Hoden wirkt sich in einer vermehrten Muskelbildung aus (CLAUS *et al.*, 1994). Dass die Muskelvolumina von I unter denen von E lagen, sowie die Fettvolumina über denen von E, sich aber nicht signifikant unterschieden, zeigt, dass offenbar bereits 15 LT nach der zweiten Improvac® Injektion eine Umstellung des Stoffwechsels der I stattgefunden hat.

In der Betrachtung der Gruppen fiel auf, dass es insbesondere im Fettvolumen signifikante Veränderungen über den Mastzeitraum gab: In Scan 1 wies Gr I die signifikant niedrigsten Fettvolumina auf. In Scan 2 bestand kein signifikanter Unterschied mehr zu Gr II. Gr III erreichte nach wie vor die höchsten Werte. In Scan 3 wies Gr I bei Betrachtung von fünf Schnittbildern die höchsten Fettvolumina auf, unterschied sich aber nicht signifikant von Gr III, die bei Betrachtung eines Schnittbildes die höchsten Werte erreichte. Gr II erreichte in Scan 3 die niedrigsten Fett- und die höchsten Muskelvolumina. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der DXA-Untersuchung, vgl. Kapitel IX. 1.3 und Kapitel IX. 1.4.

### **2.3 Schinken (Schi)**

Bereits ab Scan 1 zeigten E und I signifikant niedrigere Fettvolumina im Schnittbild auf Höhe der Kniekondylen als K. Die Muskelvolumina unterschieden sich hier erst in Scan 3 signifikant. E und I erreichten die höchsten Werte. In drei Schnittbildern konnten diese Ergebnisse für Fettvolumina in Scan 2 und Scan 3 bestätigt werden. Die Muskelvolumina von I in drei Schnittbildern des Schinkens lagen in Scan 2 noch nicht signifikant über denen von K. In Scan 3 lagen sie auf dem Niveau der E, signifikant über K. Dass die MRT geeignet ist, die

Körperzusammensetzung anhand der Schinkenregion vorherzusagen, zeigt das Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9$ , dass MITCHELL *et al.* (2001b) im Vergleich zur Zerlegung ermittelten. Eine Betrachtung von drei oder mehr Schnittbildern erscheint hier sinnvoll.

Interessant erscheint die Entwicklung der Fettvolumina bei Betrachtung der Gruppen: Gr I zeigte in Scan 1 die niedrigsten Werte, in Scan 2 und 3 die höchsten. Diese Gruppe zeigte gleichzeitig ab Scan 1 die höchsten Muskelvolumina (siehe Tabelle 13, Tabelle 15, Tabelle 17). Da bis Scan 1 alle Tiere unter gleichen Bedingungen aufwuchsen erscheint ein genetischer Einfluss wahrscheinlich, da in der Ferkelerzeugung unterschiedliche Eber zum Einsatz kamen.

### **3. Ergebnisse der Stabilisotopen-Verdünnungsanalyse**

E zeigten signifikant höhere Skatol-Werte als K, I lagen, nicht signifikant verschieden, zwischen beiden Werten. Diese Situation war zu erwarten, da Androstenon und Testosteron den Abbau von Skatol hemmen (WEILER & WESOLY, 2012). Auffällig ist die signifikant höhere Skatol-Belastung der E aus Gr II und Gr III. CLAUS *et al.* (1994) verweisen auf einen engen Zusammenhang von Androstenon-Konzentration und Skatol-Werten. Dies trifft auch in der vorliegenden Arbeit zu ( $r = 0,42$ ). In der vorliegenden Arbeit ist die Korrelation zwischen Indol und Androstenon mit  $r = 0,25$  weniger eng als zwischen Skatol und Androstenon.

Zudem kann ein jahreszeitlicher Einfluss angenommen werden: WEILER und WESOLY (2012) beschreiben tendenziell höhere Skatol-Werte für Eber, die in den Sommermonaten geschlachtet wurden. Ähnliche Unterschiede fanden WALSTRA *et al.* (1999). WEILER *et al.* (2013) konnten einen Zusammenhang zwischen Futteraufnahme und Skatol- bzw. Indol-Werten nachweisen: Die Skatol-Werte von Kastraten ( $r = 0,58$ ) und Immunokastraten ( $r = 0,30$ ) relativ eng positiv korreliert mit der Futteraufnahme. Die Indol-Werte von Ebern waren in dieser Studie negativ korreliert mit der Zeitdauer des Fressens bei niedrigerer Futteraufnahme ( $r = 0,36$ ).

Von Gr I bis Gr III stiegen die Skatol-Werte. Dies könnte auf jahreszeitliche Einflüsse zurückzuführen sein. In dem Sinne, dass die Tiere in der kalten

Periode im Aussenklimastall weniger Kontakt zu Fäkalien haben, da diese gefroren sind. Besonders Gr III (geboren am 31.01.2014, geschlachtet 14.07.2014) benutzte nach Beobachtungen des Autors die feuchte Einstreu zur Kühlung. Allerdings wird diese Möglichkeit der Skatol-Aufnahme in den Organismus von WEILER und WESOLY (2012) als nicht wahrscheinlich angesehen. Die Autoren sehen eher eine erhöhte Stressbelastung der Tiere als Ursache für vermehrte Skatol-Bildung und Einlagerung im Fett. Da die Gruppengrößen in allen drei Gruppen annähernd gleich waren, scheidet die Tierzahl als Stressursache aus. Allerdings kann Hitzebelastung (PETRY, 2005), als jahreszeitlicher Parameter, bei den Tieren Stress ausgelöst haben.

Die Ergebnisse für Indol zeigen bei E, I und K eine analoge Verteilung zu den Skatol-Werten, liegen aber deutlich niedriger. Dies könnte eine Erklärung dafür sein, dass sie in der Entwicklung des Ebergeruchs nur eine Rolle spielen, wenn die Level von Skatol niedrig sind (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997c). Im Gruppenvergleich zeigte Gr II den signifikant höchsten Wert, Gr I den niedrigsten. In der Verteilung fällt auf, dass E aus Gr II und Gr III erneut signifikant höhere Indol-Level erreichen als alle anderen Tiere. WEILER *et al.* (2013) fanden dagegen in ihrer Studie die höchsten Indol-Werte bei Immunokastraten.

Dieses Ergebnis bestätigt sich beim Blick auf die logarithmierten Androstenon-Werte in dieser Arbeit: Gr II weist den höchsten LogAndrostenon-Wert auf. Gr I den signifikant niedrigsten. Die unlogarithmierten (nicht normalverteilten) Werte zeigen eine andere Verteilung: hier zeigt Gr III den höchsten Wert. Aus biologischer Sicht ist nach WEILER und WESOLY (2012) diese Verteilung photoperiodisch bedingt: abnehmende Tageslänge stimuliert die Hodensteroidbildung, zunehmende Tageslänge hemmt sie. E erreichten den höchsten Wert für Androstenon. I und K unterschieden sich nicht signifikant. Diese Daten bestätigen die Ergebnisse von CRANE (2006) und damit die Wirksamkeit von Improvac®(Pfizer). Hierbei fiel erneut auf, dass E aus Gr II und Gr III signifikant höhere Androstenonwerte aufwiesen als alle anderen Tiere. E aus Gr III unterschieden sich sogar signifikant von E aus Gr II. Diese Unterschiede sind vermutlich ebenso auf den jahreszeitlichen Einfluss

zurückzuführen (WEILER & WESOLY, 2012).

#### 4. Ergebnisse der Sensorik

Die cut-off Werte für Skatol variieren. In einer Studie von FREDRIKSEN *et al.* (2006) wurden sie mit 0,2 µg/g festgelegt. Andere Autoren beschreiben 0,008 µg/g bis 0,06 µg/g für Skatol und Derivate (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997a). Im Zusammenhang mit der sensorischen Bewertung dieser Arbeit fällt bei Betrachtung der zugrundeliegenden SIVA Daten auf, dass sich die Skatol-Werte zwischen unauffälligen Proben und auffälligen Proben im MDV nicht unterscheiden. Lediglich die Tiere mit einem positiven Ergebnis in der Ausschmelzprobe zeigen signifikant höhere Skatol-Werte (siehe Tabelle 30). Dass die Übereinstimmung zwischen chemischer Untersuchung und menschlicher Sensorik nicht sehr hoch ist, fasst MÖRLEIN (2014) zusammen. Für die Untersuchung der Proben dieser Arbeit wurde trainiertes Prüfpersonal des bayerischen Tiergesundheitsdienstes in Poing eingesetzt. Daher ist davon auszugehen, dass die Geruchsbewertung aussagekräftig ist. Die Wahrnehmung von Skatol kann allerdings durch Androstenon beeinflusst werden (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997b). Das könnte die identischen Werte bei negativer und positiver MDV erklären (siehe Tabelle 18).

Werden der sensorischen Beurteilung die Werte für Indol zugrunde gelegt, ist auffällig, dass lediglich Tiere mit einem positiven Ergebnis nach dem Mikrowellen-Diathermie-Verfahren signifikant höhere Indol-Werte aufweisen. Dies unterstützt die Ergebnisse von ANNOR-FREMPONG *et al.* (1997c), nach denen Indol nur einen indirekten Einfluss auf die Ausprägung und die Wahrnehmbarkeit von Ebergeruch hat.

Für Androstenon werden in der Literatur Cut-off-Werte von 1,00 µg/g (ALDAL *et al.*, 2005), sowie 0,5 µg/g bis 1,00 µg/g (BABOL & SQUIRES, 1995) angegeben. VESTERGAARD *et al.* (2006) bestätigten den Wert von 0,5 µg/g in ihrer Studie. In Betrachtung der sensorischen Untersuchung mit den Werten für Androstenon als Grundlage fällt auf, dass die LSM der negativen MDV (Klassifizierung als unauffällig, siehe Tabelle 34) leicht höher (nicht signifikant) sind als die der positiven MDV. Für diesen Unterschied könnte die unterschiedliche Wahrnehmung der Prüfer ein

Grund sein (HAVLICEK *et al.*, 2010; MÖRLEIN, 2014). Eine andere Möglichkeit für die unterschiedliche Beurteilung könnte auch die Interaktion der einzelnen Geruchskomponenten sein (ANNOR-FREMPONG *et al.*, 1997c). Die LSM aller Ebergeruchskomponenten differieren sehr stark in den einzelnen Untersuchungsschritten. Dies lässt annehmen, dass von den ermittelten, objektiven SIVA-Werten nicht direkt auf die sensorische Qualität und Quantität des Geruchs geschlossen werden kann. Ähnliche Differenzen zwischen gemessenen Konzentrationen und sensorischer Ausprägung von Ebergeruch beschreiben ANNOR-FREMPONG *et al.* (1997c).

Insgesamt fällt auf, dass die Werte für Skatol in ng/g in der vorliegenden Arbeit weit unter den in der Literatur angegebenen Cut-off-Werten in µg/g liegen. Ausgehend von einem Cut-off-Wert von 1,00 µg/g gilt das auch für Androstenon bei E, während ein Cut-off-Wert von 0,5 µg/g eher den eigenen Ergebnissen für Eber (LSM > 0,5 µg/g) im Vergleich zu chirurgisch und immunologisch erzeugten Kastraten entspricht.

Allerdings fällt auf, dass eine große Zahl von Ebern (n= 10), die einen Androstenongehalt < 0,5 µg/g aufweisen, im MDV sensorisch als abweichend eingestuft wurden.

## 5. Ausblick und Schlussfolgerung

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass sich die Körperzusammensetzung von E in den untersuchten Körperregionen MLD, Schulter und Schinken gegen Ende der Mast nicht signifikant von I unterscheidet. I haben jedoch weniger Muskulaturvolumen beziehungsweise Magerweichgewebe und höhere Volumina in der Fettauflage beziehungsweise Fettgewebe. Unter diesem Gesichtspunkt könnte eine Untersuchung der Fettsäurestruktur von I Auskunft darüber geben, ob Fleisch von I sich industriell besser verarbeiten lässt, als Fleisch von E. In der Ebermast stellen der geringe Fettanteil, ein höherer Wasseranteil im Fett sowie die ungünstigere Zusammensetzung der Fettsäuren ein Problem für die fleischverarbeitende Industrie dar (BONNEAU, 1998; ADAM, 2014). Die geringere Knochenmineraldichte und der geringere Knochenmineralgehalt bei E könnte die Prädisposition für Fundamentschäden über die Mastdauer erhöhen. I weisen hier eine höhere Knochenmineraldichte und einen höheren Knochenmineralgehalt auf. Da die Immunokastration aus Verbrauchersicht akzeptiert wird (LAGERKVIST *et al.*, 2006; VANHONACKER & VERBEKE, 2011; KALLAS *et al.*, 2013), kann sie, bezogen auf die Körperzusammensetzung, eine brauchbare Alternative zu Ebermast und konventioneller Kastration sein.

Die Unterschiede, die zwischen den einzelnen Gruppen (I - III) gefunden wurden, können zum Teil auf einen jahreszeitlichen Einfluss zurückgeführt werden. Dieser lässt sich in einem Aussenklimastall nicht vermeiden. Die Studie von EBSCHKE *et al.* (2014) sowie von SCHRADE *et al.* (2014) belegen, dass insbesondere bei der Mast von Ebern die Vorteile in einem Aussenklimastall überwiegen.

Eingeschränkt wird die Immunokastration durch Tierwohlaspekte: Die Mast von Immunokastraten eignet sich am ehesten für geschlossene Systeme, in denen die Tiere ab dem Absetzen zusammen gemästet werden. So kann übermäßige Aggression der Tiere, die sich bis zur zweiten Injektion des GnRH-Analogons als Eber entwickeln, vermieden werden (FREDRIKSEN *et al.*, 2008; RYDHMER *et al.*, 2013; BÜNGER *et al.*, 2014).

Die Mast zusammen mit weiblichen Tieren ist wegen der Möglichkeit der ungewollten Trächtigkeiten abzulehnen, da die Pubertät bei Ebern in Kreuzungszuchten früher auftritt als bei Reinzuchten und die Spermatogenese etwa ab 115 LT einsetzt (ANDERSSON *et al.*, 1998). Die zweite Impfung mit einem GnRH-Analogon, und damit die Ausschaltung der Gonadenfunktion, erfolgte in dieser Studie an LT  $137 \pm 1$ .

Nicht zu unterschätzen ist die Lokalreaktion nach der Impfung, die BERNAU *et al.* (2015a) bildlich darstellen konnten. Da die Reaktion bei einem geringen Prozentsatz an Tieren zu Gewebeveränderungen im Nacken führen kann, die nicht für den menschlichen Verzehr geeignet sind (CRANE, 2006), sollte der „Impfstoff“ eventuell in seiner Zusammensetzung modifiziert werden.

Für eine Immunokastration spricht wiederum, dass es bei I, verglichen mit E zu einer signifikanten Reduktion der Werte für Skatol, Indol und Androstenon kam. Zu K bestand kein signifikanter Unterschied. Im Hinblick auf das Auftreten von Ebergeruch bietet die Immunokastration die Möglichkeit von weniger geruchsauffälligen Tieren als in der Ebermast.

Die Ergebnisse der sensorischen Untersuchung auf Ebergeruch weisen darauf hin, dass die Aussagekraft der Prüfschritte Mikrowellendiathermie-Verfahren, Koch- und Ausschmelzprobe bezogen auf die einzelnen Ebergeruchskomponenten mit einer größeren Tierzahl überprüft werden sollten.

Für eine künftige automatische Detektion von Ebergeruch sollten die Ausschluss-Schwellenwerte für die Komponenten des Ebergeruchs gesenkt werden, um geruchsbelastete Schlachtkörper sicher aus der Lebensmittelkette ausschließen zu können. Da dies in der momentanen Situation bedeuten würde, dass mehr Schlachtkörper verworfen werden müssten, sollten Selektion auf niedrige Ebergeruchskomponenten und Impfstoff konsequent weiterentwickelt werden.

## **X. ZUSAMMENFASSUNG**

Ziel dieser Doktorarbeit war es, durch den Vergleich der Körperzusammensetzung von intakten Ebern, chirurgisch- und immunologisch kastrierten Ebern mittels MRT und DXA, Hinweise auf die zu erwartende Schlachtleistung zu erhalten. Mit der gleichzeitigen Betrachtung des Ebergeruchs und der Ebergeruchs-Komponenten Skatol, Indol und Androstenon sollte eine Empfehlung über mögliche Alternativen zur betäubungslosen Ferkelkastration gegeben werden können.

Insgesamt wurden 101 Kreuzungstiere, Pi x DL, in drei Durchgängen untersucht. Die Tiere wurden in allen Durchgängen (Gr I - III) in drei „Geschlechtergruppen“ eingeteilt: Eber (E), Immunokastraten (I) und chirurgisch kastrierte Tiere (K). Der Gewichtsdurchschnitt war hierbei annähernd gleich. Ab dem 32. Lebenstag (LT) wurden die Versuchstiere (E, I, K) bis zur Schlachtung jeweils zusammen in einer Gruppe gehalten. Ab dem  $77 \pm 1$  LT wurden die Tiere in einem Aussenklimastall gemästet. Die Fütterung erfolgte in der Mast *ad libitum* mit pelletiertem Futter aus eigener Herstellung (15,0 MJ ME/kg). Die konventionelle Kastration erfolgte am fünften Lebenstag. Die Kastration mittels einem GnRH Analogon (Improvac®, Pfizer) durch zweimalige Injektion: Die erste Injektion im Alter von  $77 \pm 1$  LT (Körpergewicht ca. 30 kg), die zweite Injektion mit  $137 \pm 1$  LT.

Die DXA- (GE Lunar iDXA) und MRT- (Siemens Magnetom Open 0,2 T) Untersuchungen wurden wie folgt terminiert: Scan 1: LT  $77 \pm 1$ , Scan 2: LT  $112 \pm 1$ , Scan 3: LT  $152 \pm 1$ . Für die Untersuchungen wurden die Tiere anästhesiert. In MRT und DXA wurden die Tiere in Bauchlage platziert und jeweils ein Ganzkörperscan durchgeführt. Dieser erfolgt in der DXA automatisch, in der MRT wurde der Tisch manuell bewegt. In der Auswertung wurden folgende Daten erhoben: DXA-Scans, automatisch ermittelt mittels enCORE® Software (GENERAL ELECTRIC MEDICAL SYSTEMS IT GMBH, 1998-2010): Knochenmineraldichte (BMD) in  $\text{g/cm}^2$ , absoluter Knochenmineralgehalt in Gramm (BMC), Fettgewebeanteil in Prozent (Fett\_%), Fettgewebe absolut in Gramm (Fett\_g), Magerweichgewebe in Gramm (Mager\_g).

In den MRT-Scans wurden manuell und halbautomatisch mittels 3D



Doctor® 4.0 (ABLE SOFTWARE CORP., 1998-2007) folgende Regionen untersucht: Musculus longissimus dorsi (MLD) ein und vier weitere Schnittbilder, Muskelvolumen und Fettauflage, manuell definiert; Schulter: ein und vier weitere Schnittbilder, halbautomatisch definiert; Schinken: ein Schnittbild, Höhe des Kniegelenks, drei Schnittbilder, ab den Hüftgelenken, halbautomatisch definiert, manuelle Exklusion der Knochen und des Beckeninhaltes.

Nach der Schlachtung an  $LT\ 165 \pm 1$  wurden Nackenspeckproben für die Stabilisotopenverdünnungsanalyse (SIVA) und Wangenspeckproben für die sensorische Beurteilung genommen. Nur positive Proben im Mikrowellendiathermieverfahren (MDV) wurden in den nächsten Untersuchungsschritt nach Anlage 4 der AVV LmHyg einbezogen. Die quantitative Bestimmung der Ebergeruchskomponenten Skatol, Indol und Androstenon erfolgte mittels SIVA in Nanogramm pro Gramm (ng/g) Fettgewebe. Zwei K mit Androstenon-Werten über 4000 ng/g wurden als Messfehler eingestuft und aus der statistischen Bewertung ausgeschlossen. Die statistische Analyse wurde unter Anwendung eines Generalisierten Linearen Modells (GLM) mittels SAS 9.3 (SAS INSTITUTE INC., 2014) durchgeführt. Fixe Effekte waren Geschlecht, Gruppe sowie der Interaktionseffekt aus Geschlecht und Gruppe; Kovariable war das Gewicht. Die Werte für Androstenon wurden logarithmiert, um eine annähernde Normalverteilung der Messwerte zu erreichen.

Im Ergebnis der DXA-Untersuchungen wiesen E und I ab Scan 2 signifikant niedrigere Fettgewebeanteile in Prozent sowie Fettgewebe absolut in Gramm als K auf. Die absolute Magerweichgewebemasse in Gramm lag bei E und I signifikant höher als bei K. In Scan 3 ändert sich an dieser Verteilung nach der zweiten Injektion eines GnRH Analogons mit  $137 \pm 1$  LT nichts. Zusätzlich wiesen E einen signifikant niedrigeren absoluten und prozentualen Fettgewebeanteil auf als I. Zudem unterscheiden sich auch die Werte von E und I jeweils signifikant.

Die Auswertung der MRT-Bilder zeigte, das K in der Fettauflage des MLD ab Scan 2 ein deutlich höheres Volumen aufwies als E und I. Die Muskelvolumina unterschieden sich in keinem Scan signifikant. In der Schulterregion zeigten K in Scan 2 tendenziell das höchste Fett- und das niedrigste Muskelvolumen. In Scan 3 konnten diese Unterschiede zu E und

I signifikant abgesichert werden. E und I unterschieden sich nicht signifikant. In der Schinkenregion erreichten E und I in Scan 3 die höchsten Muskelvolumina. K bereits ab Scan 2 die signifikant höchsten Fettvolumina. Im Gruppenvergleich fiel Gr I durch die höchsten Muskelvolumina in den Regionen Schinken und MLD auf. Gr II erreichte in diesen Regionen ab Scan 2 die niedrigsten Fettvolumina und wies hingegen in der Region Schulter ab Scan 2 das höchste Muskelvolumen auf.

In der SIVA zeigten E bei Skatol und Indol signifikant höhere Werte als K. Die Werte von I lagen dazwischen, unterschieden sich aber nicht signifikant. Bei den Werten für Androstenon und LogAndrostenon lagen die Werte von E signifikant über denen von I und K. Die E in Gr II und Gr III wiesen deutlich höhere Werte auf als alle anderen Geschlechter in den einzelnen Gruppen. Für Skatol und Androstenon waren diese Unterschiede am höchsten. Die Werte für Skatol in ng/g in dieser Arbeit liegen weit unter den in der Literatur angegeben Grenzwerten in µg/g. Ausgehend von einem Grenzwert von 1,00 µg/g gilt dies auch für Androstenon bei E.

In der Sensorik variierten die kleinsten Quadrate Mittelwerte (Least Squares Means; LSM) in den einzelnen Untersuchungsschritten sehr stark. Signifikante Unterschiede im Vergleich zur „unauffälligen“ Gruppe konnten für Skatol im Ausschmelzverfahren gezeigt werden, für Indol nur im MDV und für Androstenon zwischen MDV und Ausschmelzprobe. Dies lässt annehmen, dass von den ermittelten Werten nicht direkt auf die sensorische Qualität und Quantität des Ebergeruchs geschlossen werden kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit lassen darauf schließen, dass die Immunokastration im Hinblick auf die Körperzusammensetzung und die deutliche Reduktion der Ebergeruchskomponenten im Schlachtkörper eine Alternative zur Ebermast darstellt. Eventuell müsste das GnRH-Analogon aus Tierwohl- und Verbraucherschutz-Gesichtspunkten in der Zusammensetzung modifiziert werden. Die Mast sollte, idealer Weise, in einem Aussenklimastall im geschlossenen System, nicht zusammen mit weiblichen Tieren erfolgen.

## XI. SUMMARY

The aim of this study was to evaluate the body composition of boars, immunological castrated pigs, and barrows in a farrow to finish pen by MRI and DXA. With regard to the boar taint components skatole, indole, and androstenone determined with a stable-isotope-dilution-assay (SIDA) and an organoleptic test (OT), a recommendation should be given towards alternatives of physical castration without anaesthesia.

In this study, 101 crossbred pigs (Pi x DL) were raised in three different groups. Each group included boars (E), immunological castrated pigs (I), and surgically castrated barrows (K). Allocation by birth weight was used to split each group into the three genders, and to obtain the same weight average in each gender. Pigs were housed together in one pen starting at an age of  $32 \pm 1$  days. In the fattening period starting at day  $77 \pm 1$  they were fed a self-assembled diet (15,0 MJ ME/kg). K were castrated five days after birth. I received two subcutaneous injections of a commercial gonadotropin-releasing-factor (GnRF)-analogue. The first vaccination was set at the age of  $77 \pm 1$  days. The second immunisation was administered at an age of  $137 \pm 1$  days.

*In vivo* DXA and MRI examination were scheduled as followed: Scan 1 (day  $77 \pm 1$ ), Scan 2 (day  $112 \pm 1$ ), Scan 3 (day  $152 \pm 1$ ). A GE Lunar iDXA was used for DXA examination. For MRI examination a Siemens Magnetom Open (0,2 T) was used. The anaesthetized pigs were scanned in prone position for a whole body scan. DXA measurements were analysed for each pig individually including bone mineral density (BMD\_g/cm<sup>2</sup>), fat content (Fett\_g), fat percentage (Fett\_%), and soft lean tissue (Mager\_g). MRI Images were analysed manually for the volumes of fat and muscle tissue within the region of the *musculus longissimus dorsi* (MLD) with one or five transversal slices (images) where muscle volume and fat overlay were defined manually. The shoulder region also included one or five transversal slices (images) where muscle volume and fat overlay were defined semiautomatically. The ham region covered one transversal slice (image) in the knee joint and three transversal slices (images), starting from the hip joints. Muscle and fat volumes were also defined semiautomatically with a manual exclusion of bone and innards.

Data were analysed with a general linear model (GLM) by SAS 9.3 (SAS INSTITUTE INC., 2014). The fixed effects in this model were gender, group, and their interactions. Weight was considered as a co-variable. After  $165 \pm 1$  days, 12 days after the last examination, the whole group was slaughtered. Backfat samples were analysed in a stable-isotope-dilution-assay, cheek and salivary samples in an organoleptic test. Two K with values for androstenone  $> 4000$  ng/g were considered to be measurement errors and excluded from statistical analysis. In order to reach a normal distribution, values for androstenone were logarithmised (Logandrostenone).

DXA data from scan 2 showed that E and I had significantly lower fat content and fat percentage than K. For soft lean tissue, E and I showed significant higher values than K. This assumption did not change in scan 3 after the second immunisation was administered at an age of  $137 \pm 1$  days to I. Additionally E differed significantly to I in fat content and fat percentage. Intact boars (E) were even significantly leaner than immunological castrated pigs (I).

MRI data for MLD showed that K, from scan 2 on, had significantly higher volumes in fat overlay than E and I. Muscle volumes did not differ significantly in any scan. In scan 2, K showed highest fat volumes and lowest muscle volumes in the shoulder. This difference could be ensured significantly in scan 3. E and I did not differ significantly from each other in this region. Regarding the ham, E and I showed the highest muscle volumes in scan 3. K showed the highest fat volumes in this body region from scan 2 on. Regarding group differences: Gr I had the highest muscle volumes in the ham- and MLD region. Gr II showed the lowest fat volumes in these two regions from scan 2 on. In the region of the shoulder, Gr II reached the highest muscle volumes from scan 2 on.

In the stable-isotope-dilution-assay (SIDA), E had significantly higher values for skatole and indole than K. I were intermediate and did not differ significantly. Regarding the values for androstenone and logandrostenone, values for E were significantly higher than for I and K. E from Gr II and Gr III showed significantly higher values for boar taint compounds. The highest differences could be found for skatole and androstenone. Overall, values for skatole in ng/g are much lower in this study than the mentioned

cut off values in literature. Regarding a cut off value of 1,00 µg/g, mentioned in literature, even average androstenone values for E in this study are lower.

In the organoleptic test (OT), LSM for boar taint compounds showed high variation in the different test-steps. For skatole, significant differences could only be shown regarding the fat-melting-test. For indole, such differences occurred only between positive or negative microwave-heating-tested animals. For androstenone, significant differences occurred between positive microwave-heating-tested and positive fat-melting-tested animals. Based on this data, it can not be assumed, that the occurrence of boar taint could be predicted in quality and quantity by the values from the SIDA so far.

Based on data from this study, immunological castration seems to be a suitable alternative to intact boar fattening regarding lean body composition and the notable reduction of boar taint compounds in the carcass. The GnRF-analogue, however, should be modified to cause less adverse reaction in the animal(s) neck. Best option for fattening immunologically castrated pigs would be a modern outdoor climate housing. Gilts should not be housed together in the same group either with intact boars or with immunologically castrated ones.

## **XII. LITERATURVERZEICHNIS**

**Able Software Corp.** (1998-2007): 3D Doctor, 4.0.071008. Lexington, USA.

**Adam F.** (2014): Haltungs- und Managementfragen in der Ebermast - Erfahrungen Haus Düsse, In: KTBL Tagungsband. 504. Chapman-Rose M., Freisfeld G., Schrade H., Tölle K. H., von Borell E., Weber M., Ziron M., eds. Hannover. KTBL. ISBN: 9783941583917.

**Aldal I., Andresen Ø., Egeli A. K., Haugen J.-E., Grødum A., Fjetland O., Eikaas J. L. H.** (2005): Levels of androstenedione and skatole and the occurrence of boar taint in fat from young boars. *Livestock Production Science*; 95: 121-9.

**Anderson D. E., St. Jean G.** (2012): Anesthesia and surgical procedures in swine, In: *Diseases of Swine*. Zimmerman J. J., Karriker L. A., Ramirez A., Schwartz K. J., Stevenson G. W., eds. Wiley Verlag. 119-140. ISBN: 9780813822679.

**Anderson E. C.** (1967): Organic scintillation detectors and their use in the study of body composition. Konferenzbeitrag: Body composition in animals and man, 04.-06.05.1967. University of Missouri.

**Andersson H., Wallgren M., Rydhmer L., Lundström K., Andersson K., Forsberg M.** (1998): Photoperiodic effects on pubertal maturation of spermatogenesis, pituitary responsiveness to exogenous GnRH, and expression of boar taint in crossbred boars. *Animal Reproduction Science*; 54: 121-37.

**Annor-Frempong I. E., Nute G. R., Whittington F. W., Wood J. D.** (1997a): The problem of taint in pork: I. Detection thresholds and odour profiles of androstenedione and skatole in a model system. *Meat Science*; 46: 45-55.

- Annor-Frempong I. E., Nute G. R., Whittington F. W., Wood J. D.** (1997b): The problem of taint in pork: II. The influence of skatole, androstenone and indole, Presented individually and in combination in a model lipid base, on odour perception. *Meat Science*; 47: 49-61.
- Annor-Frempong I. E., Nute G. R., Whittington F. W., Wood J. D.** (1997c): The problem of taint in pork: III. Odour profile of pork fat and the interrelationships between androstenone, skatole and indole concentrations. *Meat Science*; 47: 63-76.
- Babol J., Squires E. J.** (1995): Quality of meat from entire male pigs. *Food Research International*; 28: 201-12.
- Bauer A., Judas M.** (2014): Schlachtkörperqualität von Masteborn in Vergleich zu Sauen und Börgen. *Züchtungskunde*; 86: 374-89.
- Baulain U.** (1997): Magnetic resonance imaging for the in vivo determination of body composition in animal science. *Computers and Electronics in Agriculture*; 17: 189-203.
- Baulain U.** (2012): Body composition of farm animals by MRI, In: *Farm animal imaging Dublin 2012*. Maltin C., Craigie C., Bünger L., eds. Quality Meat Scotland. ISBN: 978-0-9570709-3-6.
- Baumgartner J.** (2008): Die Kastration männlicher Ferkel - Methoden und Bewertung. Konferenzbeitrag: Nutztierschutztagung 2008, 29. Mai 2008. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft, A-8952 Irdning.
- Bernau M.** (2011): Untersuchungen zu einer möglichen Vorverlegung der Schlachtleistungsprüfung beim Schwein mit Hilfe der Magnetresonanztomographie (MRT) und Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) in vivo. Dissertationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München.

- Bernau M., Kremer P. V., Pappenberger E., Kreuzer L. S., Cussler K., Hoffmann A., Scholz A. M. (2015a):** Safety testing of veterinary vaccines using magnetic resonance imaging in pigs. *Altex*; 32: 51-8.
- Bernau M., Kremer P. V., Lauterbach E., Tholen E., Petersen B., Pappenberger E., Scholz A. M. (2015b):** Evaluation of carcass composition of intact boars using linear measurements from performance testing, dissection, dual energy X-ray absorptiometry (DXA) and magnetic resonance imaging (MRI). *Meat Science*; 104: 58-66.
- Boler D. D., Puls C. L., Clark D. L., Ellis M., Schroeder A. L., Matzat P. D., Killefer J., McKeith F. K., Dilger A. C. (2014):** Effects of immunological castration (Improvast) on changes in dressing percentage and carcass characteristics of finishing pigs. *Journal of Animal Science*; 92: 359-68.
- Bonneau M. (1998):** Use of entire males for pig meat in the European Union. *Meat Science*; 49, Supplement 1: 257-72.
- Bonneau M., Kempster A. J., Claus R., Claudi-Magnussen C., Diestre A., Tornberg E., Walstra P., Chevillon P., Weiler U., Cook G. L. (2000a):** An international study on the importance of androstenone and skatole for boar taint: I. Presentation of the programme and measurement of boar taint compounds with different analytical procedures. *Meat Science*; 54: 251-9.
- Bonneau M., Walstra P., Claudi-Magnussen C., Kempster A. J., Tornberg E., Fischer K., Diestre A., Siret F., Chevillon P., Claus R., Dijksterhuis G., Punter P., Matthews K. R., Agerhem H., Béague M. P., Oliver M. A., Gispert M., Weiler U., von Seth G., Leask H., Font i Furnols M., Homer D. B., Cook G. L. (2000b):** An international study on the importance of androstenone and skatole for boar taint: IV. Simulation studies on consumer dissatisfaction with entire male pork and the effect of sorting carcasses on the



slaughter line, main conclusions and recommendations. Meat Science; 54: 285-95.

**Böttinger M.** (2006): Untersuchung des Einflusses verschiedener Produktionssysteme auf das Wachstum beim Schwein unter Verwendung der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie zur Messung von Fett, Magerweichgewebe und Knochenmineralansatz. Dissertationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München.

**Brøndum J., Egebo M., Agerskov C., Busk H.** (1998): On-line pork carcass grading with the Autofom ultrasound system. Journal of Animal Science; 76: 1859-68.

**Buer H., Palzer A.** (2012): NutztierSkills: Arbeitstechniken in der Großtierpraxis: Rind, Schwein, Ziege, Schaf, In: MemoVet. Schattauer Verlag GmbH. ISBN: 9783794528851.

**Bundesministerium der Justiz** (2014): Tierschutzgesetz. Bundesgesetzblatt. Fassung vom 18.05.2006. geändert am 28.07.2014.

**Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz** (2014). Anlage 4 der AVV LmH (zuletzt geändert durch Verwaltungsvorschrift vom 20.10.2014 (BAnz AT 07.11.2014 B2)). [http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_09112009\\_329225270006.htm](http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_09112009_329225270006.htm). Zuletzt besucht: 10.03.2015.

**Bünger B., Zacharias B., Schrade H.** (2014): Verhaltensunterschiede bei der Mast von Ebern im Vergleich zu Kastraten und weiblichen Tieren sowie gemischtgeschlechtlichen Gruppen bei unterschiedlichen Haltungs- und Fütterungsbedingungen. Züchtungskunde; 86: 358–73.

**Buske B., Gengler N.** (2009): Genomische Selektion: ein Meilenstein auch in der Schweinezucht? Schweinezucht aktuell; 35: 28-9.

- Claus R., Weiler U., Herzog A.** (1994): Physiological aspects of androstenone and skatole formation in the boar - A review with experimental data. *Meat Science*; 38: 289-305.
- Collewet G., Bogner P., Allen P., Busk H., Dobrowolski A., Olsen E., Davenel A.** (2005): Determination of the lean meat percentage of pig carcasses using magnetic resonance imaging. *Meat Science*; 70: 563-72.
- COPA-COGECA (European farmers and European agri-cooperatives)** (2010): Europäische Erklärung über Alternativen zur chirurgischen Kastration bei Schweinen. Brüssel. November 2010.
- Crane J.** (2006): Improvac® – Ein neuer Weg zur Kontrolle des Ebergeruchs beim männlichen Schwein. IPVS Symposium. 16.-19.07.2006. Copenhagen. Pfizer Tiergesundheit. 8-13.
- de Roest K., Montanari C., Fowler T., Baltussen W.** (2009): Resource efficiency and economic implications of alternatives to surgical castration without anaesthesia. *Animal*; 3: 1522-31.
- Deslandes B. t., Gariépy C., Houde A.** (2001): Review of microbiological and biochemical effects of skatole on animal production. *Livestock Production Science*; 71: 193-200.
- Deutscher Bauernverband, Verband der Fleischwirtschaft e.V., Hauptverband des deutschen Einzelhandels** (2008): Gemeinsame Erklärung zur Ferkelkastration. Düsseldorf. 28.09.2008.
- Deutscher Bundesrat** (2013): Drucksache 4/1/13. Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH. 21.01.2011. Empfehlung zur 906. Sitzung des Bundesrates am 1. Februar 2013.
- Dijksterhuis G. B., Engel B., Walstra P., Font i Furnols M., Agerhem H., Fischer K., Oliver M. A., Claudi-Magnussen C., Siret F., Béague M. P., Homer D. B., Bonneau M.** (2000): An international study on the importance of androstenone and skatole for boar taint: II.

Sensory evaluation by trained panels in seven European countries. Meat Science; 54: 261-9.

**Dobrowolski A., Höreth R., Branscheid W.** (1995): Der Schlachtkörperwert von Ebern und Börgen und Probleme der Klassifizierung, In: Die Ebermast - Fragen und Konsequenzen bei der Produktion von Schweinefleisch. Münster. Deutscher Landwirtschaftsverlag. 6-13. ISBN: 3-7843-0449-4.

**Dodenhoff J.** (2014): Perspektiven der Genomik in der Schweinezucht. Schweinezucht; 12/2014: 48-50.

**Dunshea F. R., Colantoni C., Howard K., McCauley I., Jackson P., Long K. A., Lopaticki S., Nugent E. A., Simons J. A., Walker J., Hennessy D. P.** (2001): Vaccination of boars with a GnRH vaccine (Improvac) eliminates boar taint and increases growth performance. Journal of Animal Science; 79: 2524-35.

**Ebschke S., von Borell E., Weber M.** (2014): Beurteilung der Tiergerechtheit der Ebermast mit intakten und gegen Ebergeruch geimpften Ebern. Züchtungskunde; 86: 342–57.

**Edmondson M. A.** (2014): Local and regional anesthetic techniques, In: Farm Animal Anesthesia. Lin H. C., Walz P., eds. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 9781118886700.

**Eisenreich R., Dodenhoff J., Gerstner K., Dahinten G., Lindner J.-P.** (2014): Jahresbericht 2013 über Leistungsprüfungen und Zuchtwertschätzung beim Schwein in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Institut für Tierzucht. Februar 2014.

**Europäische Kommission** (2009): VO(EU) 37/2010 über pharmakologisch wirksame Stoffe und ihre Einstufung hinsichtlich der Rückstandshöchstmengen in Lebensmitteln tierischen Ursprungs. Amtsblatt der Europäischen Union. 15/1. 20.01.2010.

**Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union** (2004): VO (EG) Nr. 854/2004 mit besonderen Verfahrensvorschriften für die amtliche Überwachung von zum menschlichen Verzehr bestimmten Erzeugnissen tierischen Ursprungs. Amtsblatt der Europäischen Union. 139/206. 29.04.2004.

**European Medicines Agency** (2009): Improvac - EMEA/V/C/000136 - R/0024. Zulassung. Zoetis Deutschland GmbH.

**Fischer J., Elsinghorst P. W., Bücking M., Tholen E., Petersen B., Wüst M.** (2011): Development of a Candidate Reference Method for the Simultaneous Quantitation of the Boar Taint Compounds Androstenone, 3 $\alpha$ -Androstenol, 3 $\beta$ -Androstenol, Skatole, and Indole in Pig Fat by Means of Stable Isotope Dilution Analysis–Headspace Solid-Phase Microextraction–Gas Chromatography/Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*; 83: 6785-91.

**Fischer J., Wüst M.** (2012): Quantitative determination of the boar taint compounds androstenone, skatole, indole, 3 $\alpha$ -androstenol and 3 $\beta$ -androstenol in wild boars (*Sus scrofa*) reveals extremely low levels of the tryptophan-related degradation products. *Food Chemistry*; 135: 2128-32.

**Fischer K.** (1999): Eberfleisch - Was sagt der Verbraucher? *Lohmann Information*; Jan. - März 1/99: 1-6.

**Flohr T.** (2011): Aufbau, Physik und Bildgeneration in der Computertomographie: Messprinzip, Bildrekonstruktion, Gerätetypen und Aufnahmetechniken, In: *Wie funktioniert CT?* Alkadhi H., Leschka S., Stolzmann P., Scheffel H., eds. Springer-Verlag GmbH. 3-13. ISBN: 9783642178030.

**FONAR Corporation** (2003-2006): About Fonar - Our history. <http://www.fonar.com/history.htm>. Zuletzt besucht: 12.02.2016.

- Font i Furnols M., Gispert M., Diestre A., Oliver M. A.** (2003): Acceptability of boar meat by consumers depending on their age, gender, culinary habits, and sensitivity and appreciation of androstenone odour. *Meat Science*; 64: 433-40.
- Fredriksen B., Lium B. M., Marka C. H., Heier B. T., Dahl E., Choinski J. U., Nafstad O.** (2006): Entire male pigs in a farrow-to-finish system. Effects on androstenone and skatole. *Livestock Science*; 102: 146-54.
- Fredriksen B., Lium B. M., Marka C. H., Mosveen B., Nafstad O.** (2008): Entire male pigs in farrow-to-finish pens—Effects on animal welfare. *Applied Animal Behaviour Science*; 110: 258-68.
- Freitag M., Freisfeld G., Walgern B., Meierfrankenfeld U., Ziron M.** (2014): Jungebermast: Mastleistung, Schlachtleistung und Wirtschaftlichkeit in der kommerziellen Schweinehaltung. *Züchtungskunde*; 86: 390–9.
- Frieden L., Große-Brinkhaus C., Neuhoﬀ C., Schellander K., Looft C., Tholen E.** (2014a): Möglichkeiten zur Reduktion von geschlechtsbedingten Geruchsabweichungen am Schlachtkörper von männlichen, unkastrierten Mastschweinen Teil 1: Häufigkeit von Ebergeruch bei der Herkunft Piétrain × Kreuzungssau und Möglichkeiten der haltungsbedingten Beeinflussung. *Züchtungskunde*; 86: 297–318.
- Frieden L., Große-Brinkhaus C., Neuhoﬀ C., Schellander K., Looft C., Tholen E.** (2014b): Möglichkeiten zur Reduktion von geschlechtsbedingten Geruchsabweichungen am Schlachtkörper von männlichen, unkastrierten Mastschweinen Teil 2: Genetische Fundierung des Merkmals Ebergeruch und genetische Beziehungen zu paternalen und maternalen Reproduktionsleistungen. *Züchtungskunde*; 86: 319–41.

- Gasteiner J., Ofner-Schröck E., Guggenberger T., Hubmer I., Schachner E., Steinwidder A., Hagmüller W., Gruber R., Möstl E.** (2008): Eine neuartige Methode zur Schmerzreduktion bei der chirurgischen Ferkelkastration. Konferenzbeitrag: Nutztierschutztagung Raumberg-Gumpenstein 2008, 29.05.2008. Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein.
- General Electric Healthcare** (2006): Lunar iDXA™ Intelligente DXA. Benutzerhandbuch. GE Medical Systems Benelux NV/SA. Diegem, Belgium. BMD-iDb-03.06-EN-EU.
- General Electric Medical Systems IT GmbH** (1998-2010): enCORE, 13.50.040. GE Medical Systems Lunar, 3030 Ohmeda Drive, Madison, WI 53718 USA.
- Haimel M.** (2008): Untersuchungen über eine alternative Methode zur Schmerzkontrolle durch Kryoanalgesie und Lokalanästhesie bei der chirurgischen Kastration von Saugferkeln. Diplomarbeit zur Erlangung der Würde eines Diplomtierarztes, Universität Wien.
- Haugen J. E., Brunius C., Zamaratskaia G.** (2012): Review of analytical methods to measure boar taint compounds in porcine adipose tissue: the need for harmonised methods. Meat Science; 90: 9-19.
- Havlicek J., Murray A. K., Saxton T. K., Roberts S. C.** (2010): Current Issues in the Study of Androstenes in Human Chemosignaling, In: Vitamins & Hormones. Volume 83. Gerald L., ed. Elsevier Academic Press. 47-81. ISBN: 978-0-12-381516-3.
- Hendrix A.** (2003): Magnete, Spins und Resonanzen. Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie. Erlangen. Siemens AG Medical Solutions. Best. Nr.: A91100-M2200-M705-1.
- Hoppenbrock K. H.** (1995): Mastleistung von Ebern, In: Die Ebermast - Fragen und Konsequenzen bei der Produktion von Schweinefleisch. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung Landwirtschaft und Forsten Heft 449. Münster. Deutscher

Landwirtschaftsverlag GmbH. 3-5. ISBN: 3-7843-0449-4.

**Hügel T.** (2010): Überprüfung der Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit der Impfung gegen Ebergeruch im Feldversuch. Dissertationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München.

**Isernhagen M.** (2015): Haltung von Ebern unter herkömmlichen Mastbedingungen – Einfluss auf Tiergesundheit und Wohlbefinden. Dissertationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München.

**Jackson S. A., Thomas R. M.** (2009): CT, MRT, Ultraschall auf einen Blick. Elsevier, Urban & Fischer Verlag. ISBN: 978-3-437-42635-3.

**Kallas Z., Gil J. M., Panella-Riera N., Blanch M., Font-i-Furnols M., Chevillon P., De Roest K., Tacken G., Oliver M. A.** (2013): Effect of tasting and information on consumer opinion about pig castration. Meat Science; 95: 242-9.

**Kohler I., Moens Y., Busato A., Blum J., Schatzmann U.** (1998): Inhalation Anaesthesia for the Castration of Piglets: CO<sup>2</sup> compared to Halothane. Journal of Veterinary Medicine Series A; 45: 625-33.

**Koo W. W., Hammami M., Hockman E. M.** (2003): Interchangeability of pencil-beam and fan-beam dual-energy X-ray absorptiometry measurements in piglets and infants. The American Journal of Clinical Nutrition; 78: 236-40.

**Kremer P. V., Förster M., Scholz A. M.** (2013): Use of magnetic resonance imaging to predict the body composition of pigs in vivo. Animal; 7: 879-84.

**Kyle U. G., Bosaeus I., De Lorenzo A. D., Deurenberg P., Elia M., Gomez J. M., Heitmann B. L., Kent-Smith L., Melchior J. C., Pirlich M., Scharfetter H., Schols A. M., Pichard C.** (2004): Bioelectrical impedance analysis: I: review of principles and methods. Clinical Nutrition; 23: 1226-43.

- Lagerkvist C. J., Carlsson F., Viske D.** (2006): Swedish Consumer Preferences for Animal Welfare and Biotech: A Choice Experiment. *AgBioForum*; 9: 51-8.
- Laubenberger T., Laubenberger J.** (2007): Grundlagen. In: Technik der medizinischen Radiologie: Diagnostik, Strahlentherapie, Strahlenschutz; für Ärzte, Medizinstudenten und MTRA. Köln. Deutscher Ärzte-Verlag. ISBN: 9783769111323
- Lauterbach E.** (2012): Schlachtkörperzusammensetzung und -qualität von Mastebbern. Dissertationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München.
- Lösel D.** (2006): Versuche zur Verbesserung der sensorischen Fleischqualität beim Schwein durch nutritive Hemmung der Skatolbildung. Dissertationsschrift, Universität Hohenheim.
- Lukaski H. C., Marchello M. J., Hall C. B., Schafer D. M., Siders W. A.** (1999): Soft tissue composition of pigs measured with dual x-ray absorptiometry: comparison with chemical analyses and effects of carcass thicknesses. *Nutrition*; 15: 697-703.
- Lundström K., Matthews K. R., Haugen J.-E.** (2009): Pig meat quality from entire males. *Animal*; 3: 1497-507.
- Matthes W., Uetrecht D., Müller A., Delfs H., Büsing K., Claus H., Krüger K., Müller S.** (2014): Wirtschaftlichkeit der Ebermast. Ebermast - Stand und Perspektiven. 02.-03.07.2014. Hannover. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 42-52.
- Meinecke B.** (2005): Endokrinologie, In: Physiologie der Haustiere. von Engelhardt W., Ahrens F., eds. Stuttgart. Enke Verlag. ISBN: 9783830410393.



- Mitchell A. D., Conway J. M., Potts W. J.** (1996): Body composition analysis of pigs by dual-energy x-ray absorptiometry. *Journal of Animal Science*; 74: 2663-71.
- Mitchell A. D., Scholz A. M., Conway J. M.** (1998): Body composition analysis of pigs from 5 to 97 kg by dual-energy X-ray absorptiometry. *Applied Radiation and Isotopes*; 49: 521-3.
- Mitchell A. D., Scholz A. M., Wange P. C., Song H.** (2001a): Body composition analysis of the pig by magnetic resonance imaging. *Journal of Animal Science*; 79: 1800-13.
- Mitchell A. D., Scholz A. M., Pursel V. G.** (2001b): Total body and regional measurements of bone mineral content and bone mineral density in pigs by dual energy X-ray absorptiometry. *Journal of Animal Science*; 79: 2594-604.
- Mitchell A. D., Scholz A. M., Solomon M. B.** (2005): Estimation of body composition of pigs by a near-infrared interactance probe technique. *Archiv für Tierzucht*; 48: 580-91.
- Mohrmann M., Roehe R., Susenbeth A., Baulain U., Knap P. W., Looft H., Plastow G. S., Kalm E.** (2006): Association between body composition of growing pigs determined by magnetic resonance imaging, deuterium dilution technique, and chemical analysis. *Meat Science*; 72: 518-31.
- Monziols M., Collewet G., Bonneau M., Mariette F., Davenel A., Kouba M.** (2006): Quantification of muscle, subcutaneous fat and intermuscular fat in pig carcasses and cuts by magnetic resonance imaging. *Meat Science*; 72: 146-54.
- Mörlein D.** (2014): Ebergeruch: (k)ein Problem? Sensorische Bewertung durch trainierte Prüfer bzw Konsumenten. Ebermast - Stand und Perspektiven. 02.-03.07.2014. Hannover. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 93-100.

- Morrell J. M., Rodriguez-Martinez H.** (2011): Practical Applications of Sperm Selection Techniques as a Tool for Improving Reproductive Efficiency. *Veterinary Medicine International*: 9.
- Nelson D. L., Cox M. M.** (2001): *Lehninger Biochemie*. 3. edn. Springer. ISBN: 3-540-41813-X.
- Newcomer B., Walz P.** (2014): Anesthetic management for specific procedures, In: *Farm Animal Anesthesia*. Lin H. C., Walz P., eds. John Wiley & Sons, Inc. 9781118886700.
- Pauly C., Spring P., O'Doherty J. V., Ampuero Kragten S., Bee G.** (2008): Performances, meat quality and boar taint of castrates and entire male pigs fed a standard and a raw potato starch-enriched diet. *Animal*; 2: 1707-15.
- Pearson A. M., Gray J. I., Brennand C. P.** (1994): Species specific flavors and odors, In: *Quality Attributes and Their Measurement in Meat, Poultry and Fish Products*. Pearson A. M., Dutson T. R., eds. Blackie Academic Verlag. ISBN: 9780751401851.
- Petry H.** (2005): Energiehaushalt, In: *Physiologie der Haustiere*. von Engelhardt W., Ahrens F., eds. Stuttgart. Enke Verlag. ISBN: 9783830410393.
- Pietrobelli A., Formica C., Wang Z., Heymsfield S. B.** (1996): Dual-energy X-ray absorptiometry body composition model: review of physical concepts. *American Journal of Physiology*; 271: E941-51.
- Plonait H.** (2004): Erkrankungen und Operationen an den Fortpflanzungsorganen des Ebers: Ferkelkastration. In: *Lehrbuch der Schweinekrankheiten*. Plonait H., Bickhardt K., Waldmann K. H., Wendt M., eds. Parey Verlag. ISBN: 9783830441045.
- Plourde G.** (1997): The Role of Radiologic Methods in Assessing Body Composition and Related Metabolic Parameters. *Nutrition Reviews*; 55: 289-96.

**QS Qualität und Sicherheit GmbH** (2010): Erklärung zum Verzicht auf Ferkelkastration. Konferenzbeitrag: Expertenworkshop "Verzicht auf Ferkelkastration", 12.11.2010. Berlin.

**Radiologie.de** (2015): Die Entwicklung der Magnetresonanztomographie <http://www.radiologie.de/hintergruende-und-fakten/geschichte-der-radiologie/magnetresonanztomographie/magnetresonanztomographie-1.html>. Zuletzt besucht: 24.09.2015.

**Rat der Europäischen Gemeinschaft** (1991): Richtlinie 91/630/EWG. Amtsblatt Nr. L 340 vom 11.12.1991.

**Rydhmer L., Hansson M., Lundström K., Brunius C., Andersson K.** (2013): Welfare of entire male pigs is improved by socialising piglets and keeping intact groups until slaughter. *Animal*; 7: 1532-41.

**SAS Institute Inc.** (2014): SAS, 9.3. Cary (North Carolina), USA.

**Schild H. H.** (1997): MRI: made easy. Berlin. Schering Aktiengesellschaft. ISBN: 3921817412.

**Schnurrbusch U.** (2001): Andrologie beim Eber - Physiologie und Pathologie der Kopulation - Endokrine Steuerung. In: Veterinärmedizinische Andrologie: Physiologie und Pathologie der Fortpflanzung bei männlichen Tieren. Busch W., Holzmann A., eds. Schattauer Verlag. ISBN: 9783794519558.

**Scholz A. M.** (2002): In-vivo-Methoden zur Analyse von Muskelstoffwechsel und Körperzusammensetzung beim Schwein unter besonderer Berücksichtigung genetischer Einflüsse. Habilitationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München.

**Scholz A. M., Heller P., Waldmann K. H., Wolf P., Kamphues J., Förster M.** (2004): Eignung der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie zur Erfassung der Knochenmineralisierung von Ebern. *Züchtungskunde*; 76: 94-107.

- Scholz A. M., Förster M.** (2006): Genauigkeit der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) zur Ermittlung der Körperzusammensetzung von Schweinen in vivo. Archiv für Tierzucht; 49: 462-76.
- Scholz A. M., Mitchell A. D., Förster M., Pursel V. G.** (2007): Two-site evaluation of the relationship between in vivo and carcass dual energy X-ray absorptiometry (DXA) in pigs. Livestock Science; 110: 1-11.
- Scholz A. M., Baulain U.** (2009): Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung am lebenden Nutztier. Züchtungskunde; 81: 86-96.
- Scholz A. M., Kremer P. V., Wenczel R., Pappenberger E., Bernau M.** (2012): Body composition in farm animals by dual energy X-ray absorptiometry, In: Farm animal imaging Dublin 2012. Maltin C., Craigie C., Bünger L., eds. Quality Meat Scotland. ISBN: 978-0-9570709-3-6.
- Scholz A. M., Bünger L., Kongsro J., Baulain U., Mitchell A. D.** (2015): Non-invasive methods for the determination of body and carcass composition in livestock: dual-energy X-ray absorptiometry, computed tomography, magnetic resonance imaging and ultrasound: invited review. Animal; 9: 1250-64.
- Schrade H., Wild A., Zacharias B., Bünger B.** (2014): Mast- und Schlachtleistungen von Ebern in konventioneller und Außenklimahaltung. Ebermast - Stand und Perspektiven. Hannover. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.
- Silbernagl S., Despopoulos A.** (2007): Hormone, Reproduktion, In: Taschenatlas Physiologie. 7. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart. Thieme Verlag. ISBN 9783135677071.

- Statistisches Bundesamt** (2015a): Aktuelles.  
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/TiereundtierischeErzeugung/AktuellSchweine.html>. Zuletzt besucht: 05.10.2015.
- Statistisches Bundesamt** (2015b): Schlachttier- und Fleischuntersuchung 2014. Fachserie 3 Reihe 4.3 - 2014. Statistisches Bundesamt. 23.07.2015.
- Strack K. E.** (2005): Schweineproduktion, In: Tierproduktion. 13. Weiß J. W., Pabst W., Strack K. E., Granz S., eds. Stuttgart. Parey Verlag. 3-8304-4140-1.
- Suster D., Leury B. J., Ostrowska E., Butler K. L., Kerton D. J., Wark J. D., Dunshea F. R.** (2003): Accuracy of dual energy X-ray absorptiometry (DXA), weight and P2 back fat to predict whole body and carcass composition in pigs within and across experiments. Livestock Production Science; 84: 231-42.
- Thun R.** (2006): Kastration oder keine Kastration: Ein Tierschutz- und Produktionsaspekt. IPVS Symposium. Copenhagen. Pfizer Tiergesundheit. 3-7.
- Vanhonacker F., Verbeke W.** (2011): Consumer response to the possible use of a vaccine method to control boar taint v. physical piglet castration with anaesthesia: a quantitative study in four European countries. Animal; 5: 1107-18.
- Vestergaard J. S., Haugen J.-E., Byrne D. V.** (2006): Application of an electronic nose for measurements of boar taint in entire male pigs. Meat Science; 74: 564-77.
- Vetidata** (2015): Improvac.  
[http://www.vetidata.de/praepview/impfstoff\\_alleangaben.php?rei=1&reisuche=2&pra=ODE3Mw==](http://www.vetidata.de/praepview/impfstoff_alleangaben.php?rei=1&reisuche=2&pra=ODE3Mw==). Zuletzt besucht: 13.03.2015.

- Von Lengerken G., Wicke M.** (2006): Schweinezüchtung. In: Tierzucht. von Lengerken G., Ellendorff F., von Lengerken J., eds. Ulmer Verlag. 310-1. ISBN: 9783800147809.
- Walstra P., Claudi-Magnussen C., Chevillon P., von Seth G., Diestre A., Matthews K. R., Homer D. B., Bonneau M.** (1999): An international study on the importance of androstenone and skatole for boar taint: levels of androstenone and skatole by country and season. *Livestock Production Science*; 62: 15-28.
- Wang Z., Heymsfield S. B., Chen Z., Zhu S., Pierson R. N.** (2010): Estimation of percentage body fat by dual-energy x-ray absorptiometry: evaluation by in vivo human elemental composition. *Physics in Medicine and Biology*; 55: 2619–35.
- Ward G. M.** (1967): Introduction to whole body counting. Konferenzbeitrag: Body composition in animals and man, 04.-06.05.1967. University of Missouri.
- Weiler U., Font i Furnols M., Fischer K., Kemmer H., Oliver M. A., Gispert M., Dobrowolski A., Claus R.** (2000): Influence of differences in sensitivity of Spanish and German consumers to perceive androstenone on the acceptance of boar meat differing in skatole and androstenone concentrations. *Meat Science*; 54: 297-304.
- Weiler U., Wesoly R.** (2012): Physiologische Aspekte der Androstenon- und Skatolbildung beim Eber. *Züchtungskunde*; 84: 365–93.
- Weiler U., Götz M., Schmidt A., Otto M., Müller S.** (2013): Influence of sex and immunocastration on feed intake behavior, skatole and indole concentrations in adipose tissue of pigs. *Animal*; 7: 300-8.
- Weishaupt D., Köchli V. D. K., Marincek B., Froehlich J. M., Nanz D., Prüßmann K. P.** (2009): Eine Einführung in Physik und Funktionsweise der Magnetresonanzbildgebung, In: Wie funktioniert MRI? Weishaupt D., Köchli V. D. K., Marincek B., eds.

Springer Verlag. ISBN: 9783540895732.

**Wenczel R.** (2013): Untersuchungen zur Messung der Körperzusammensetzung und Knochenmineraldichte beim Schwein und beim Schaf mittels "Pencil-" und "Fan-Beam"-Dualenergie Röntgenabsorptiometrie. Dissertationsschrift, Ludwig-Maximilians-Universität München.

**Zeeck A., Grond S., Papastavrou I., Zeeck S. C.** (2005): Allgemeine Chemie, Atombau, In: Chemie für Mediziner. München. Urban & Fischer Verlag. 3-12. ISBN: 9783437444357.

**Zenger I.** (2014): Magnetresonanztomographie bei Siemens, eine Erfolgsgeschichte. Siemens AG Healthcare. Best. Nr.: A91MR-100-66.

**Zöls S., Ritzmann M., Heinritzi K.** (2006): Einsatz einer Lokalanästhesie bei der Kastration von Ferkeln. Tierärztliche Praxis Großtiere; 34: 103-6.

### **XIII. DANKSAGUNG**

Ich danke besonders meinem Doktorvater, Herrn Professor Armin M. Scholz, für die Überlassung dieses interessanten Themas. Zudem möchte ich mich für die hervorragende Betreuung bedanken und die stete Bereitschaft, jedwede Frage geduldig zu beantworten.

Frau Dr. Maren Bernau danke ich nicht nur für die tatkräftige Unterstützung an den Scan-Tagen, die geduldige Einarbeitung sowie die Hilfe in der Planung des Versuchs. Auch für die gute Zusammenarbeit über die Doktorarbeit hinaus möchte ich einen besonderen Dank aussprechen.

Für die Unterstützung an den Scan-Tagen und die erheiternde Zusammenarbeit in der gemeinsamen Doktorandenzeit möchte ich Frau Dr. Lena Kreuzer danken.

Ein herzlicher Dank gebührt den Mitarbeitern des LVG, die mich nach Kräften bei der Durchführung der Untersuchungen für meine Dissertation unterstützt haben: Herrn Gert Kaiser, Herrn Richard Bätz, Herrn Dominik Stieler, Herrn Max Schachtner, Frau Sara Stürzer, Herrn Florian Obersojer, Herrn Johannes Heimrath, Herrn Tobias Heidingsfelder und Herrn Martin Burmeister.

Ich danke zudem Herrn Dr. Stefan Nüske, Herrn Michael Saller für die gute Zusammenarbeit im tierärztlichen Dienst.

Frau Christa Gurgui möchte ich für die gute Verköstigung in den letzten drei Jahren danken, ohne die der Bauch an den Scan-Tagen öfter leer geblieben wäre.

Meinen Eltern danke ich besonders für die Unterstützung vor, während und nach dem Studium. Danke, dass ich auch auf Umwegen Tierarzt werden konnte.

Meiner Partnerin Marie danke ich für die Geduld und die Unterstützung bei dieser Doktorarbeit, aber vor allem: Danke, dass es Dich gibt!