

Aus dem Department für Veterinärwissenschaften
der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Arbeit angefertigt unter Leitung von PD Dr. Armin M. Scholz

**Untersuchungen zu einer möglichen Vorverlegung
der Schlachtleistungsprüfung beim Schwein
mit Hilfe der Magnetresonanztomographie (MRT)
und Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA)
*in vivo***

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

von
Maren Bernau geb. Schmidt
aus
Datteln

München 2011

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

Dekan:	Univ.-Prof. Dr. Braun
Berichterstatter:	Priv.-Doz. Dr. Scholz
Korreferent:	Univ.-Prof. Dr. Meyer-Lindenberg

Tag der Promotion: 30. Juli 2011

Für Hendrik

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Kenntnisstand	3
2.1.	Bedeutung der Schweinefleischproduktion in Deutschland	3
2.2.	Schweinerassen	5
2.2.1.	Die Geschichte der Schweinezucht	5
2.2.2.	Muterrassen	7
2.2.3.	Vaterrassen	8
2.2.4.	Exotische Rassen und Linien	9
2.3.	Bestimmung der Körperzusammensetzung	11
2.3.1.	Anforderungen an Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung	11
2.3.2.	<i>In vivo</i> Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung	12
2.3.2.1.	Bildgebende Verfahren	12
2.3.2.2.	Verfahren mit Gewebeinteraktion	15
2.3.2.3.	Verdünnungsmethoden	17
2.3.2.4.	Analysen auf Atomniveau	17
2.4.	Magnetresonanztomographie	19
2.4.1.	Technischer Aufbau eines Kernspintomographen	19
2.4.2.	Physikalische Grundlagen der Kernspintomographie	23
2.4.2.1.	Das Atommodell	23
2.4.2.2.	Auswirkung eines externen Magnetfeldes auf einem Körper	25
2.4.2.3.	Der Hochfrequenzimpuls	26
2.4.2.4.	T1- und T2-Relaxation	27
2.4.3.	Das MR-Bild	28
2.4.3.1.	Arten von MR-Bildern	29
2.4.3.2.	Das Gradientensystem	30
2.4.3.3.	Die Bildmatrix	30
2.4.4.	Mögliche MR-Sequenzen	31
2.4.5.	Artefakte in der MRT	31
2.4.6.	Einsatz der MRT in der Tierzucht	32
2.4.6.1.	Einsatz der MRT beim Schwein	33
2.5.	Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie	42
2.5.1.	Grundlagen der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie	42
2.5.1.1.	Entwicklung der Photonenabsorptionsmessung	42

2.5.1.2.	Aufbau eines DXA-Scanners	42
2.5.1.3.	Physikalische Grundlagen der DXA	43
2.5.2.	Einsatz von DXA beim Menschen	47
2.5.3.	Einsatz von DXA in der Tierzucht	48
2.5.3.1.	Studien zum Einsatz von DXA beim Schwein	48
2.6.	Leistungsprüfung und Zuchtwertschätzung beim Schwein	54
2.6.1.	Organisation der Schweineproduktion	54
2.6.2.	Leistungsprüfung beim Schwein	55
2.6.2.1.	Grundlagen der Leistungsprüfung	55
2.6.2.2.	Durchführung der Leistungsprüfung	57
2.6.2.3.	Leistungsanforderungen	62
2.6.2.4.	Prüfung auf Stressempfindlichkeit	63
2.6.3.	Zuchtwertschätzung beim Schwein	64
2.6.4.	Literatur über die Leistungsprüfung beim Schwein	67
3.	Versuchstiere und Methoden	70
3.1.	Versuchstiere	70
3.1.1.	Genetik der Versuchstiere	70
3.1.2.	Haltung und Fütterung der Versuchstiere	71
3.2.	Methoden	73
3.2.1.	Vorbereitung der Tiere für die Untersuchungen	73
3.2.2.	Untersuchung mittels Magnetresonanztomographie	74
3.2.2.1.	Lagerung der Versuchstiere für die MRT	74
3.2.2.2.	Verwendete Messprotokolle für die MRT	75
3.2.2.3.	Gewählte Untersuchungsregionen für die MRT	76
3.2.3.	Untersuchung mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie	79
3.2.3.1.	Lagerung der Versuchstiere für die DXA-Analyse	80
3.2.3.2.	Verwendetes Messprotokoll für die DXA	80
3.3.	Auswertung	82
3.3.1.	Auswertung der MR-Bilder	82
3.3.2.	Auswertung der DXA-Ergebnisse	88
3.3.3.	Statistische Analyse der Ergebnisse (statistische Modelle)	88
4.	Ergebnisse	90
4.1.	Ergebnisse der MR-Bildauswertung	90
4.1.1.	Ergebnisse der Auswertung der Lendenregion	90
4.1.1.1.	Volumen des Musculus longissimus dorsi	90
4.1.1.2.	Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden	93

	Speckschicht	
4.1.2.	Ergebnisse der Auswertung der Oberschenkel- und Glutealregion	96
4.1.2.1.	Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion	96
4.1.2.2.	Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion	96
4.2.	Ergebnisse der DXA-Untersuchung	98
4.2.1.	Gesamtkörperfettanteil (%)	98
4.2.2.	Magerweichgewebeanteil (%)	99
4.3.	Beziehung zwischen den Ergebnissen der MRT und denen der DXA	101
4.4.	Ergebnisse der Mischmodellanalyse	103
4.4.1.	Volumen des Musculus longissimus dorsi (MRT)	103
4.4.2.	Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht (MRT)	106
4.4.3.	Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)	107
4.4.4.	Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)	108
4.4.5.	Gesamtkörperfettgehalt bezogen auf das Körpergewicht (DXA)	109
4.4.6.	Magerweichgewebeanteil bezogen auf das Körpergewicht (DXA)	110
4.4.7.	Knochenmineraldichte (g/cm^2) bezogen auf das Körpergewicht (DXA)	112
5.	Diskussion	113
5.1.	MR-Bildauswertung	114
5.1.1.	Die Lendenregion	114
5.1.1.1.	Volumen des Musculus longissimus dorsi	114
5.1.1.2.	Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht	116
5.1.2.	Die Oberschenkel- und Glutealregion	116
5.1.2.1.	Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion	116
5.1.2.2.	Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion	117
5.2.	DXA	120
5.3	Vorhersage der DXA-Ergebnisse mittels der MRT-Ergebnisse	122
5.4.	„Auffällige“ Ergebnisse - Deutsche Landrasse Sauen	124
5.5.	Effekt von Rasse- bzw. Kreuzungsgruppen	126
5.5.1.	Volumen des Musculus longissimus dorsi (MRT)	126
5.5.2.	Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht (MRT)	127
5.5.3.	Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)	128
5.5.4.	Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)	128
5.5.5.	Gesamtkörperfettgehalt bezogen auf das Körpergewicht (DXA)	129

5.5.6.	Magerweichgewebeanteil bezogen auf das Körpergewicht (DXA)	129
5.5.7.	Knochenmineraldichte (g/cm^2) bezogen auf das Körpergewicht (DXA)	129
5.6.	Ausblick	133
6.	Zusammenfassung	144
7.	Summary	147
8.	Literaturverzeichnis	149
9.	Danksagung	163

Abbildungsverzeichnis

Abb.:	Abbildungsunterschrift	Seite
1	Anforderungen an die verschiedenen Produktionsstufen in der Schweineproduktion	4
2	Offenes System; Siemens Magnetom Open des Lehr- und Versuchsgutes der LMU	21
3	Geschlossenes System (Picker Vista MR; 1,5 Tesla); Bild von A.M. Scholz zur Verfügung gestellt	22
4	Vereinfachte Darstellung des Eigendrehimpulses (Spin) eines Atoms; modifiziert nach Schild (1990)	24
5	Vereinfachte Darstellung von Protonen, die sich in einem externen Magnetfeld ausrichten; modifiziert nach Schild (1990)	25
6	Kreiselbewegung (Präzession) des Protons; modifiziert nach Schild (1990)	26
7	T1- und T2-Relaxationskurven; modifiziert nach Schild (1990)	28
8	DPX IQ der Firma GE LUNAR am Lehr- und Versuchsgut der LMU bei der Untersuchung eines Deutschen Edelschweins	43
9	Drei-Komponenten-Modell der Körperzusammensetzung; Quelle: Scholz <i>et al.</i> (2002)	46
10	Ergebnis eines Ganzkörperscans von einem Schwein mittels DPX IQ der Firma GE Lunar	47
11	Eigenleistungsprüfung bei einer Jungsau am Lehr- und Versuchsgut der LMU	59
12	PIGLOG 105-Gerät der Firma SFK Technology	59
13	Darstellung der Genauigkeit der Zuchtwertschätzung in Abhängigkeit von der jeweiligen Informationsquelle und der Heritabilität (EL = Eigenleistung; NK = Nachkommen; HG = Halbgeschwister; VG = Vollgeschwister; h^2 = Heritabilität; c^2 = Koeffizient für gemeinsame Umwelt); Berechnung bzw. Darstellung der Genauigkeiten erfolgte nach den Tabellenwerten aus Flock <i>et al.</i> (1971) und den Formeln aus Schönmath <i>et al.</i> (1985)	66
14	„Legen“ einer Braunüle (Venenverweilkatheter) in die Vena auricularis bei einem Deutschen Edelschwein	74
15	Lagerung eines Deutschen Edelschweins für die Magnetresonanztomographie	75
16	Schematische Darstellung der Regionen, die mittels MRT untersucht wurden; Schweineskelett aus König & Liebich (2001)	76
17	Positionierung der großen Körperspule zur Untersuchung der Lendenregion (der grüne Pfeil deutet auf den Ursprung der letzten Rippe)	76
18	Localizer (Übersichtsbild) der Lendenregion (die grünen Pfeile deuten auf die Rippen, der gelbe Pfeil zeigt auf die Wirbelsäule; jede der	77

- waagerechten blauen Linien repräsentiert einen Querschnitt, der auf der rechten Bildhälfte dargestellt wird)
- 19 Axiale Schnittbildfolge der Lendenregion; der linke Bildteil zeigt schematisch eine Sequenz mit 10 axialen Schnittbildern der Lendenregion (jede blaue Linie repräsentiert einen Querschnitt); korrespondierend dazu ist auf der rechten Bildseite eine Schnittbildfolge der Lendenregion einer Large Black Sau mit 80 kg Körpergewicht dargestellt 78
- 20 Positionierung der großen Körperspule zur Untersuchung der Oberschenkel- und Glutealregion (der grüne Pfeil deutet auf den hinteren Rand der Oberschenkel- und Glutealregion) 78
- 21 Localizer (Übersichtsbild) einer coronar geschnittenen Oberschenkel- und Glutealregion (der gelbe Pfeil zeigt auf die Lendenwirbelsäule; der grüne Pfeil zeigt auf den Bauch); das Schwein liegt für den Betrachter auf der rechten Körperseite 79
- 22 Coronare Schnittbildfolge der Oberschenkel- und Glutealregion; der linke Bildteil zeigt schematisch eine Sequenz mit 10 coronaren Schnittbildern der Oberschenkel- und Glutealregion (jede blaue Linie repräsentiert ein Schnittbild); korrespondierend dazu ist auf der rechten Bildseite eine Schnittbildfolge der Oberschenkel- und Glutealregion einer Deutschen Landrasse Sau mit 80 kg Körpergewicht dargestellt 79
- 23 Positionierung der Schweine für die Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie auf dem DXA-Tisch des GE Lunar DPX IQ am Lehr- und Versuchsgut der LMU 80
- 24 Ergebnis eines DXA-Ganzkörperscans mittels GE Lunar DPX IQ von einem Pietrain-Eber; (1) zeigt das Ergebnis der Untersuchung des DXA-Scans am ersten Untersuchungstag; (2) zeigt das Ergebnis der Untersuchung des DXA-Scans am zweiten Untersuchungstag (R-Wert = Röntgenschwächungskoeffizient, Muskel = Magerweichgewebe) 81
- 25 Referenzbild der Lendenregion (der gelbe Pfeil zeigt auf den Wirbelkörper mit seinem Processus spinosus und dem Ursprung der letzten Rippe; der violette Pfeil deutet auf den Anschnitt des Musculus longissimus dorsi; der grüne Pfeil zeigt auf die Fettauflage; der rote Pfeil deutet auf den Bauch des Schweins) 83
- 26 Ausgewertetes Referenzbild der Lendenregion (die violette Linie stellt die Umrandung des Musculus longissimus dorsi einschließlich dem Processus spinosus des Wirbelkörpers (siehe gelber Pfeil) dar; die grüne Linie umrandet die Fläche des Rückenspecks; die Rückenspeckfläche endet da, wo auch die Muskelfläche an ihrer weitesten Stelle beendet ist, siehe grüner Pfeil) 84
- 27 (1) mittels 3D Doctor ausgewertete Lendensequenz; (2) 3D-Rekonstruktion der fünf ausgewerteten Schnittbilder der Lendenregion 84
- 28 Referenzbild der Oberschenkel- und Glutealregion (der gelbe Pfeil deutet auf den Femurkopf, der grüne Pfeil zeigt das Acetabulum und der rote Pfeil deutet auf den Beckenknochen) 85
- 29 Definition der „Region of interest“ (ROI; blauer Kasten) (die grünen Pfeile 86

- zeigen auf das Acetabulum (Beckenpfanne), die gelben Pfeile deuten auf die Femurköpfe (Oberschenkelköpfe))
- 30 Mittels 3D Doctor Software ausgewertetes Referenzbild der Oberschenkel- und Glutealregion (die pink umrandeten Bereiche stellen die Fettanteile, die grün umrandeten Bereiche die Muskelanteile der Oberschenkel- und Glutealregion dar) 87
- 31 (1) ausgewertete Oberschenkel- und Glutealregion mit vier aufeinanderfolgenden Schnittbildern, beginnend am Referenzbild; (2) 3D-Rekonstruktion der vier ausgewerteten Schnittbilder der Oberschenkel- und Glutealregion 87
- 32 Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] bei 80 kg (LOIN_VOL_80kg_5SL) und bei 100 kg (LOIN_VOL_100kg_) Körpergewicht 91
- 33 Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] bei 80 kg (KLOIN_VOL_80kg_5SL) und bei 100 kg (KLOIN_VOL_100kg); *korrigiert* auf das exakte Gewicht von 80 kg und 100 kg 91
- 34 Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] der DL-Sauen bei 80 kg (Kotelett_80kg_all) und bei 100 kg (Kotelett_100kg_a) 92
- 35 Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] der Eber bei 80 kg (Kotelett_K80_all) und bei 100 kg (Kotelett_K100_a) – nach Gewichtskorrektur 93
- 36 Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage [mm^3] bei 80 kg (BACKFAT_VOL_80kg_5SL) und bei 100 kg (BACKFAT_VOL_100) 93
- 37 Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage [mm^3] der DL-Sauen bei 80 kg (R_ckenspeck_80kg_all) und bei 100 kg (R_ckenspeck_100k); die fünf auffälligen, aus der Berechnung herausgenommenen DL-Sauen sind mit X gekennzeichnet 94
- 38 Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage [mm^3] der Eber bei 80 kg (R_ckenspeck_80kg_all) und bei 100 kg (R_ckenspeck_100) 95
- 39 Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage (R_ckenspeck_80k) [mm^3] und dem Körpergewicht [kg] der Versuchstiere (Gewicht2) am ersten Untersuchungstag (Zielgröße 80 kg), bezogen auf alle Versuchstiere 95
- 40 Beziehung zwischen dem Muskelvolumen [mm^3] in der Oberschenkel- und Glutealregion bei 80 kg (HAM_VOL_80kg_4SL) und bei 100 kg (HAM_Vol_100kg_4) 96
- 41 Beziehung zwischen dem Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion [mm^3] bei 80 kg (FAT_VOL_HAM_80kg_4SL) und bei 100 kg (FAT_VOL_HAM_100) 97
- 42 Beziehung zwischen dem Fettanteil [%] bei 80 kg (DXA_FatPC2) und bei 100 kg (DXA_FatPC3) 98
- 43 Beziehung zwischen dem Fettanteil [%] bei 80 kg (DXA_FatPC2) und dem Körpergewicht [kg] (Gewicht2) der Versuchstiere am ersten Untersuchungstag [kg] (80 kg Körpergewicht im Durchschnitt) 99

44	Beziehung zwischen dem Magerweichgewebeanteil [%] bei 80 kg (DXA_LeanPC2_K80) und bei 100 kg (DXA_LeanPC3_K10)	100
45	Multiple Regression, die die Genauigkeit zeigt, mit der mit Hilfe des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm ³] bei 80 kg (LOIN_VOL_80kg_5SL) und des Volumens der Speckauflage [mm ³] bei 80 kg (BACKFAT_VOL_80kg_5SL) der DXA-Gesamtkörperfettanteil [%] bei 100 kg (DXA_FatPC3) geschätzt werden kann	101
46	Multiple Regression, die die Genauigkeit zeigt, mit der mit Hilfe des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm ³] bei 100 kg (LOIN_VOL_100kg_5SL) und des Volumens der Speckauflage [mm ³] bei 100 kg (BACKFAT_VOL_100kg_5SL) der DXA-Gesamtkörperfettanteil [%] (DXA_FATPC3) bei 100 kg geschätzt werden kann	102
47	Darstellung des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm ³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)	103
48	Darstellung des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm ³] der verschiedenen Rassen und Kreuzungen für die Messung bei 80 kg (LS-Means, SEE)	104
49	Darstellung des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm ³] der verschiedenen Rassen und Kreuzungen für die Messung bei 100 kg (LS-Means, SEE)	105
50	Darstellung der Volumenzunahme des Musculus longissimus dorsi (mm ³) von 80 kg auf 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (Differenz der LS-Means)	106
51	Darstellung des Volumens der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Fettschicht [mm ³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)	107
52	Darstellung des Muskelvolumens der Oberschenkel- und Glutealregion [mm ³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)	108
53	Darstellung des Fettvolumens der Oberschenkel- und Glutealregion [mm ³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)	109
54	Darstellung des DXA-Gesamtkörperfettgehaltes [%] der Schweine bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen	110
55	Darstellung des Gesamtkörpermagerweichgewebes [%] der Schweine bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen	111
56	Darstellung der prozentualen Abnahme des Gesamtkörpermagerweichgewebes [%] der Schweine zwischen 80 kg und 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (Differenz der LS-Means)	111
57	Darstellung der Knochenmineraldichte (g/cm ²) der Schweine bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-	112

	Means, SEE)		
58	Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Leistungsprüfung und Zuchtwernerfassung bei einer potentiellen Zuchtsau	und	139
59	Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Leistungsprüfung und Zuchtwernerfassung bei einem potentiellen Zuchteber	und	140

Tabellenverzeichnis

Tab.:	Tabellenüberschrift	Seite
1	Theoretische R-Werte ausgewählter chemischer Elemente und Verbindungen; modifiziert nach Pietrobelli <i>et al.</i> (1996)	45
2	Vor- und Nachteile von Feld- und Stationsprüfung; modifiziert nach Littmann <i>et al.</i> (2006)	56
3	Ultraschall-Messpunkte bei der Eigenleistungsprüfung; modifiziert nach Littmann <i>et al.</i> (2006)	59
4	Leistungsanforderungen an deckfähige und trächtige Sauen; modifiziert nach Littmann <i>et al.</i> (2006)	62
5	Leistungsanforderungen an Eber; modifiziert nach Littmann <i>et al.</i> (2006)	62
6	Tieranzahl und Aufteilung der verschiedenen Rassen; bei den Kreuzungstieren entspricht die erstgenannte Rasse dem Vatertier (zweite Abkürzung entsprechend für das Muttertier)	71
7	Futtermittelzusammensetzung, die den Tieren während der Versuchszeit gefüttert wurde	72
8	Durchschnittliches Gewicht und Alter der Tiere an den jeweiligen Untersuchungstagen	73
9	Messprotokolle des Localizers und der verwendeten Sequenzen für die MRT	75
10	Kosten einer MRT-Untersuchung beim Schwein bei Verwendung eines offenen Niederfeldmagnetsystems	136- 137

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
BIA	Bioelektrische Impedanz Analyse
CA	chemische Analyse
cSV	centi Sievert
CT	Computertomographie
DE	Deutsches Edelschwein
DL	Deutsche Landrasse
DMS	Diagnostic Medical Systems, 34130 Maugeio, France, http://www.dms.com/
Du	Duroc
DXA	Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie
EGZH	Erzeugergemeinschaft und Züchtervereinigung für Zucht- und Hybridschweine in Bayern w.V.
EUROP	Klassifizierungsgrade für Schlachtkörper
F ₁	Filial- oder Nachkommengeneration
Gy	Gray; Maßeinheit der Energiedosis
Ha	Hampshire
HU	Hounsfield-Unit
Ib	Cerdo Iberico; Iberisches Schwein
keV	Kilo-Elektronenvolt
kg	Kilogramm
KGW	Körpergewicht
K ⁴⁰	Kalium ⁴⁰
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (in Grub)
LF ₂₄	Leitfähigkeitsmessung des Fleisches 24 Stunden nach dem Schlachten
MHS	Malignes Hyperthermie Syndrom
Mio	Million
MRT	Magnetresonanztomographie
NA	Neutronenaktivierungsanalyse
NIR	Nahinfrarot-Interaktanz
NIRS	Nahinfrarot-Spektroskopie
pH ₁	Säuregradbestimmung des Fleisches 45 Minuten nach dem Schlachten
pH ₂₄	Säuregradbestimmung des Fleisches 24 Stunden nach dem Schlachten
Pi	Piétrain
PSE	Pale Soft and Exudative; Ausdruck für blasses, weiches und wässriges Fleisch
r	Korrelation

RN ⁻	Rendement Napole; Hampshire-Faktor
RMSE	Root Mean Square Error; Standardfehler
ROI	Region of interest
R-Wert	Röntgenschwächungskoeffizient
R ²	Regressionskoeffizient
SH	Schwäbisch-Hällisches Schwein
S _{yx}	Schätzfehler
T	Tesla; Maßeinheit der Magnetfeldstärke
Tab.	Tabelle
TE	Time to Echo; Echozeit
TOBEC	Total Body Electric Conductivity
TR	Time to Repeat; Repetitionszeit
T1	longitudinale Relaxationszeit
T2	transversale Relaxationszeit
v.Chr.	vor Christus
Vs	Voltsekunde
z.B.	zum Beispiel
ZDS	Zentralverband der deutschen Schweineproduktion e.V.
¹⁰⁹ Cd	Isotop des Cadmium
¹⁵³ Gd	Isotop des Gadolinium

1. Einleitung

Seit jeher hat die Tierzucht enorme wirtschaftliche Bedeutung für den Menschen und ermöglichte nicht zuletzt dessen sesshafte Lebensweise. Mit einsetzender Industrialisierung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts konnten sich immer größere Bevölkerungsschichten immer öfter Fleisch leisten und die Tierzucht musste diesen Anforderungen gerecht werden. August Crone-Münzebrock (1907) schrieb: *„Die beträchtliche Zunahme der Bevölkerung einerseits und die Steigerung des Wohlstandes in weiten Schichten des deutschen Volkes andererseits hatten eine bedeutende Erhöhung des Konsums von tierischen Produkten zur Folge ... An der steigenden Bedeutung der deutschen Tierzucht hat in ganz besonderer Weise die Schweinezucht Anteil genommen; ihrem Wesen nach vermochte sie besser als die übrigen Zweige der Tierzucht den erhöhten wirtschaftlichen Bedürfnissen einer neuen Zeit gerecht zu werden. ...Sollte aber die deutsche Schweinezucht ihre wichtige Aufgabe erfüllen, so bedurfte es ernster Arbeit von seiten der deutschen Züchter.“* Ging es hierbei zunächst nur um die reine Körperfülle der Tiere, so wurden die Konsumenten in Deutschland nach dem Ende des 2. Weltkrieges immer anspruchsvoller, was vor allem verbesserte Methoden verlangte, um die Körperzusammensetzung der Tiere exakt bestimmen zu können.

Heutzutage sind Methoden, wie sie zu Zeiten August Crone-Münzebrocks verwendet wurden, nicht mehr zielführend. Schlagworte wie Muskel- oder Magerfleischanteil und Rückenspeckdicke bestimmen die Selektion. Diese Merkmale am lebenden Tier exakt zu erfassen, gestaltet sich jedoch schwierig. Die Ultraschallspeckdickenmessung, wie sie für die Jungsau- bzw. Jungeberselektion eingesetzt wird, weist gewisse Schwächen auf. So sind die Messpunkte nicht anatomisch fixiert und „die Mitte des Schweins“ variiert je nach Schweinegröße, wodurch die Messstelle mehr in den Widerristbereich verschoben wird und somit die Messergebnisse verfälscht werden. Zudem kann es durch Verkippen des Messkopfes zu Messungenauigkeiten kommen. Um die wahren Muskel- und Fettverhältnisse im Schlachtkörper zu erfassen und somit Rückschlüsse über die Zuchteignung des geprüften Tieres machen zu können müssen Nachkommen- oder Geschwisterprüfungen durchgeführt werden. Eine Methode, die am lebenden Tier eine Eigenleistungsprüfung ermöglicht, die Muskel- und Fettverhältnisse im Körper darstellt und anatomisch definierte Körperstellen gezielt untersuchen lässt, ist bislang in Deutschland nicht im Einsatz.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) bietet durch die Möglichkeit der Anfertigung von Schnittbildern eine Ermittlung der Körperzusammensetzung an exakt definierten Körperstellen. Mit Hilfe der MRT kann an Zuchttieren eine Eigenleistungsprüfung durchgeführt werden, die weder nachteilig für das Tier noch für seine weitere Nutzung ist. Ein „Warten“ auf die Nachkommen- oder Geschwisterprüfung kann so umgangen und das Generationsintervall¹ verkürzt werden. In Zeiten, in denen Produktionskosten für die Schweinezucht weiter steigen, muss die Selektion möglichst früh und so exakt wie möglich durchgeführt werden, denn nur dann kann Schweinezucht (im nationalen und internationalen Wettbewerb) wirtschaftlich bleiben.

Das Ziel dieser Forschungsarbeit lag darin, herauszufinden ob es möglich ist, mittels MRT bei 80 kg die Körperzusammensetzung bei 100 kg vorherzusagen. Denn dadurch wäre es möglich, die Leistungsprüfung als Eigenleistungsprüfung bei 80 kg durchzuführen und so das Generationsintervall zu verkürzen. Tiere, die eine nicht dem Zuchtziel entsprechende Körperzusammensetzung besitzen, könnten früher aus der Zucht ausscheiden und müssten nicht verpaart und deren Nachkommen erneut geprüft werden.

¹ Das Generationsintervall ist definiert als *der Abstand in Jahren zwischen zwei aufeinanderfolgenden Generationen, bzw. dem mittleren Alter der Zuchttiere bei der Geburt der Nachkommen, die die Zuchttiere ersetzen können* (Brem, 1990).

2. Kenntnisstand

2.1. Bedeutung der Schweinefleischproduktion in Deutschland

Schweinefleisch stellt die am meisten konsumierte Fleischsorte in Europa dar (Resano *et al.*, 2010). Seit der letzten Hälfte des 20. Jahrhunderts steigt der Konsum stetig, mit einer Ausnahme: 2001 nahm der Verbrauch an Schweinefleisch in Europa kurzzeitig ab (Williamson *et al.*, 2005). Seit 2002 liegt der durchschnittliche Pro-Kopf-Verbrauch an Schweinefleisch in der Europäischen Union bei rund 43 kg (ZMP, 2008).

In Deutschland war und ist Schweinefleisch seit dem zweiten Weltkrieg die bedeutendste Fleischart, mit einem Pro-Kopf-Verbrauch von rund 56 kg hinter Spanien, Österreich und Dänemark (ZMP, 2008). Die steigende Nachfrage nach Schweinefleisch führte zu einem Wandel in der Schweinezucht: Betriebe wurden umstrukturiert, die Betriebsgröße aufgestockt und die Züchtung konzentrierte sich auf Schweine mit hohem Muskelfleischanteil, besserer Aufzuchtungsleistung und guter Schlachtkörperqualität. Der Schweinebestand in Deutschland hat sich mit 26 Millionen Schweinen im Vergleich zu 1900 (16,8 Millionen Schweine) fast verdoppelt. Deutschland war 2005 in der EU das wichtigste Land bezogen auf die Schweinefleischproduktion (Meyn, 2005).

Im Jahr 2009 wurden in Deutschland 7,7 Millionen Tonnen Fleisch erzeugt, was einen Zuwachs von 2,5 % im Vergleich zum Vorjahr bedeutet. Schweinefleisch nimmt dabei mit 68 % den höchsten Anteil an der Fleischerzeugung ein, gefolgt von Geflügelfleisch (17 %) und Rindfleisch (15%). Einen Anteil von nur 0,3 % am Gesamtfleisch nimmt Schaf-, Ziegen- und Pferdefleisch ein. Der Anstieg der Fleischproduktion beruht vor allem auf dem stetig ansteigenden Schweinefleischanteil, der im Jahre 2009 einen neuen Höchststand erreicht hatte. Im Jahre 2009 wurden in Deutschland 1,5 Millionen Schweine mehr geschlachtet als im Vorjahr, so dass insgesamt annähernd 5,3 Millionen Tonnen Schweinefleisch erzeugt wurden. Für Rindfleisch stagniert der Markt dagegen weiterhin. Aber nicht nur innerhalb Deutschlands ist ein Aufwärtstrend der Schweinefleischproduktion zu verzeichnen. Auch der Export von Schweinefleisch verzeichnet weiterhin einen Aufwärtstrend. So stieg die Exportmenge im Jahr 2009 um 8 % zum Vorjahr an. Dabei dominieren vor allem die Lieferungen innerhalb der EU. Aber auch die Lieferungen an den wichtigsten Drittmarkt (Russland) konnten weiter ausgebaut werden, so dass ein Zuwachs von 17 % erzielt werden konnte. Dagegen ist der Import von Schweinefleisch um 2,4 % gesunken (VDF, 2010).

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Schweineproduktion ist, dass das Fleisch den Wünschen der Endverbraucher entspricht. Der Endverbraucher wünscht sich inzwischen zartes, saftiges und zugleich fettarmes Fleisch. Zu diesen Wünschen kommen auf jeder Produktionsstufe neue Anforderungen durch Mäster, Züchter und verarbeitenden Betrieb hinzu (Strack, 2005). Einen Überblick über die unterschiedlichen Anforderungen der verschiedenen Produktionsstufen bietet Abbildung 1.

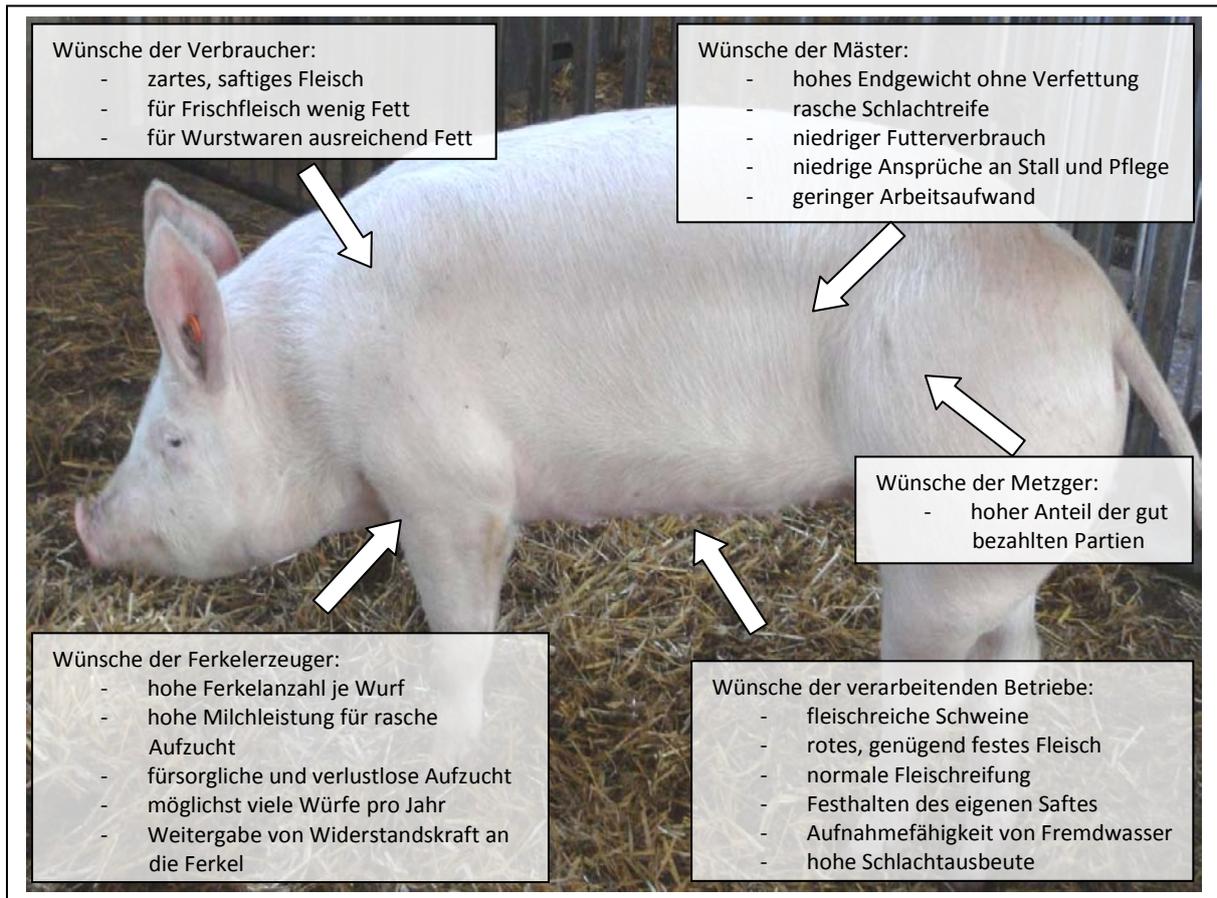


Abb. 1: Anforderungen an die verschiedenen Produktionsstufen in der Schweineproduktion

2.2. Schweinerassen

Im folgenden Abschnitt soll ein Überblick über die Anfänge der Schweinezucht hin zu den heutigen Rassen gegeben werden. Nähere Rassedefinitionen sollen in dieser Dissertation nur für die im Kapitel 3. (Versuchstiere und Methoden) vorkommenden Rassen aufgeführt werden.

2.2.1. Die Geschichte der Schweinezucht

Das Schwein zählt zu den ältesten Haustieren des Menschen. Die Urform des heutigen Hausschweins ist das Wildschwein, dessen Domestikation im Jahre 7800 v. Chr. in Vorderasien begann. Weitere Domestikationszentren sind Südostasien, China und Südschweden (Falkenberg & Hammer, 2006a). Durch unterschiedliche Lebensbedingungen kam es zu genetischen Differenzierungen und so zur Entstehung von Unterarten des Wildschweins. Heute sind 36 Unterarten bekannt, die vor allem in Südostasien und im Mittelmeerraum vorkommen (Herre, 1958; Krautforst, 1975). Das Hausschwein weist gegenüber dem Wildschwein eine geringere Körpergröße, eine veränderte Schädelform, verstärkte Muskel- und Fettausprägungen, sowie Veränderungen der Haut, des Haarkleids und der Pigmentierung auf (Herre & Röhrs, 1990). Vorteile der Hausschweine lagen in ihrer polyöstrischen Veranlagung und der erhöhten Fruchtbarkeit. Aber auch die Tatsache, dass Schweine Allesfresser waren, machte sie zu einer geeigneten Nahrungsquelle für den Menschen (Krautforst, 1975). Im Mittelalter kam es durch wachsende Bevölkerungszahlen und einem Aufschwung in der Landwirtschaft zu einer Intensivierung der Schweinehaltung. Die gehaltenen Schweine waren klein bis mittelgroß, wenig bemuskelt und spätreif (Falkenberg & Hammer, 2006b). Spezielle Schweinerassen sind nicht bekannt, jedoch entwickelten sich aufgrund der regional unterschiedlich intensiven Schweinehaltung Variationen unter den gehaltenen Schweinen (Krautforst, 1975). Mit dem Ende des Hochmittelalters begannen die ersten Bemühungen zur Verbesserung der Schweineleistung. Durch die Verringerung der Waldbestände wurde die Schweinehaltung von der Weidemast auf die Stallmast umgestellt. Das Schwein fand in der Bevölkerung immer mehr Wertschätzung, so dass das Schwein in Bräuche und Bezeichnungen des Alltags Eingang fand (Falkenberg & Hammer, 2006b). In Deutschland kam es im ausgehenden Mittelalter zu einer

Zunahme der Bevölkerung, so dass die Nachfrage nach Nahrungsmitteln stieg (Falkenberg & Hammer, 2007). Wälder und Ackerflächen konnten nicht mehr zur Schweinehaltung genutzt werden, wodurch diese rückläufig wurde. Im 19. Jahrhundert führte der Ernährungswandel der Bevölkerung zu einer Steigerung des Interesses an Schweinefleisch, so dass es in Deutschland nötig wurde, die Schweineproduktion zu steigern. Hierfür wurde die englische Zucht als Beispiel verwendet (Schmidt et al., 1941). Zunächst folgte in Deutschland ein planloses Einkreuzen englischer Rassen in die deutschen Landschläge. Nach diesem „Kreuzungswirrwarr“ folgte in Deutschland eine einheitliche Zuchtperiode, in der neue Rassen entstanden sind, die den Verbraucherwünschen entsprachen. Grundlegend daran beteiligt waren die zahlreich gegründeten Schweinezüchtervereinigungen (Falkenberg & Hammer, 2007). Entscheidend für die Schweinezucht in Deutschland war jedoch die 1863 in Hamburg stattgefundene internationale Ausstellung der Schweinerassen, die aus den englischen Schweinerassen hervorgegangen sind. Die Anlage eines Zuchtbuches bzw. die Einführung des Schweineherdbuches für die Vereinigung deutscher Poland-China-Züchter mit europaweiter Gültigkeit im Jahr 1884 ordneten das Zuchtgeschehen (Schmitt, 1989; Falkenberg & Hammer, 2007). Die Gründung der Landwirtschaftskammern stellte sich als ein effektives System zur Förderung der Schweinezucht heraus (Schmidt et al., 1941).

Durch die Anwendung von Kreuzungszuchtprogrammen sind die heutigen Mastendstufen größtenteils Kreuzungstiere. Der Herdbuchbestand in Deutschland konzentriert sich vor allem auf drei Hauptrassen: Deutsche Landrasse (DL), Deutsches Edelschwein (DE) und Piétrain (Pi). Zusätzliche Zuchtprogramme speziell für die Außenhaltung oder für besondere Marktanforderungen berücksichtigen fast ausgestorbene Rassen, wie zum Beispiel das Deutsche Sattelschwein, das Schwäbisch-Hällische Schwein, das Angler Sattelschwein oder die Bunten Bentheimer (Horst & Gregor, 1997). Nach den Erzeugungs- und Qualitätsregeln der Erzeugergemeinschaft und Züchtervereinigung für Zucht- und Hybridzuchtschweine in Bayern w.V. (EGZH) sind die in den folgenden Abschnitten aufgeführten Rassen als Mutter- oder Vatterassen definiert (Littmann *et al.*, 2006). Im Rahmen der vorliegenden Dissertation sollen nur die in dieser Dissertation berücksichtigten Schweinerassen näher beschrieben werden.

2.2.2. Mutterrassen

Mutterrassen zeichnen sich durch hohe Fruchtbarkeit und gute Aufzuchtleistung aus. Sie sind widerstandsfähig und zeigen gute Mastleistungen bei guter Fleischqualität. Nach den Erzeugungs- und Qualitätsregeln der EGZH (2010) zählen folgende Rassen zu den Mutterrassen:

a. Deutsche Landrasse (DL)

Die Deutsche Landrasse ist die in Deutschland am stärksten vertretene Rasse, wenngleich ihr Anteil durch den Einsatz fleischbetonter Rassen zurückgegangen ist. Als „Deutsches veredeltes Landschwein“ war diese Rasse in Deutschland dominierend. Durch die Forderungen nach einem höheren Fleischanteil kam es zur Einkreuzung dänischer Landschweine, so dass großrahmige Schweine entstanden sind. Seit dem 01.01.1969 ist der Name „Deutsche Landrasse (DL)“ durch die Arbeitsgemeinschaft Deutscher Schweinezüchter eingeführt worden (Averdunk, 1982). Die Deutsche Landrasse besticht durch Länge und Großwüchsigkeit, Haut und Borsten sind weiß, die Ohren hängen (Horst & Gregor, 1997). Die DL zeichnet sich durch Fruchtbarkeit, hohe Milchleistung, gute Aufzuchtleistung, gute Futtermittelverwertung und den hohen Anteil an wertvollen Teilstücken aus (Averdunk, 1982).

b. Deutsches Edelschwein (DE)

Das Deutsche Edelschwein gehört, wie die Deutsche Landrasse zu den großrahmigen Schweinerassen. Schweine dieser Rasse haben weiße Haut und weiße Borsten, die Ohren stehen (Horst & Gregor, 1997). Ursprünglich entstand diese Rasse durch Verdrängungskreuzung mit englischen Yorkshire in die einheimischen Landschweine. Der typische Landschweincharakter ist dadurch verloren gegangen. 1904 wurde der offizielle Name „Edelschwein“ eingeführt. Die besonderen Merkmale des Edelschweins sind Frühreife, gute Futtermittelverwertung, gute Konstitution sowie gute Fruchtbarkeits- und Fleischleistungen (Falkenberg & Hammer, 2007).

c. Schwäbisch-Hällisches Schwein (SH)

Bekannt ist das Schwäbisch-Hällische Schwein seit dem 18. Jahrhundert in Württemberg. Typisch ist die schwarz-weiße Zeichnung. Im 19. Jahrhundert kam es zur Einkreuzung verschiedener Rassen (Falkenberg & Hammer, 2007). Durch Einkreuzung chinesischer

Maskenschweine in die einheimischen Landrassen und darauf folgende Kreuzung mit englischen Schweinerassen (vor allem Berkshire) entstand das Schwäbisch-Hällische Schwein, was erst seit 1929 eine eigene Rasse darstellt (Boettcher, 2006b). Ausgezeichnet hat sich diese Rasse durch ihre gute Konstitution, gepaart mit der dieser Rasse „nachgesagten“ hervorragenden Mutterleistung. Nach einer hohen Nachfrage in den 50er Jahren war diese Rasse nach Änderung der Marktanforderungen (eine zeitlang) nicht mehr gefragt (Horst & Gregor, 1997).

2.2.3. Vatterassen

Die Schweinerassen, die als Vatterassen geführt werden, zeichnen sich durch hohe Mastleistung und hervorragende Fleischleistung aus. Dazu zählen nach der EGZH (2010) folgende Rassen:

a. Piétrain (Pi)

Die Rasse entstammt der belgischen Provinz Brabant und hat ihren Ursprung vermutlich aus einer Kreuzung zwischen der französischen Rasse Bayeux und dem englischen Large White. Seit 1920 sind diese Schweine bekannt. Der Name entstammt dem Dorf, wo zunächst nur ein einziger Züchter diese Rasse hielt (Averdunk, 1982). Rassekennzeichen sind die weiße Haut mit schwarzen Flecken. Sie haben Stehohren und einen kurzen, aber breiten Körperbau mit starker Bemuskelung. Der hohe Fleischanteil (vor allem in Schulter und Schinken) sowie die gute Futtermittelverwertung zählen zu den Vorteilen der Rasse, nachteilig ist jedoch die mit der „Stressanfälligkeit“ verbundene schlechte Fleischqualität (siehe Kapitel 2.6.2.4. Prüfung auf Stressempfindlichkeit). Große Bedeutung kommt dieser Rasse als Vatterasse in der Schweinezucht zu (Horst & Gregor, 1997).

b. Duroc (Du)

Diese rote Schweinerasse entstand Mitte des 19. Jahrhunderts aus verschiedenen roten Schweinerassen. Sie ist weit verbreitet (Averdunk, 1982). Ein Duroc-Rassestandard besteht seit 1885. Nach Deutschland kam diese Rasse erst um 1980. In der Schweinezucht werden Duroc weltweit zur Erzeugung von F₁-Sauen, F₁-Ebern und Endstufenebern sowie Mastendstufen verwendet. Somit gehört diese Rasse je nach Zuchtverband bzw. –

unternehmen in die Gruppe der Mutter- oder der Vaterrassen (Horst & Gregor, 1997). Zudem findet diese Rasse Einsatz in europäischen und deutschen Hybridprogrammen (Strack, 2005). Unterschiedliche Angaben finden sich in der Literatur über die Mutterqualitäten dieser Rasse, sie reichen von „guten Muttereigenschaften“ (Strack, 2005) bis hin zu „aggressiven Verhalten mit mäßigen mütterlichen Ambitionen“ (Pollock, 2009).

c. Hampshire (Ha)

Die Rasse Hampshire entstammt der Grafschaft Hampshire in England. Von dort aus wurde sie 1825 in die USA importiert, wo sie zu den ältesten Rassen zählt (Dittrich, 1997). Diese Schweine sind schwarz mit weißem Schultergürtel und Stehohren. Vorteile dieser Rasse liegen in ihrem hohen Fleischanteil, gepaart mit guter Fleischqualität und Robustheit (Horst & Gregor, 1997). Die Rasse gilt als praktisch frei von stressanfälligen Tieren und wird in Kreuzungsprogrammen mit Piétrain eingesetzt (Strack, 2005).

2.2.4. Exotische Rassen und Linien

Exotische Rassen und Linien sind meist nur von regionaler Bedeutung und finden so häufig nur in ihrer Ursprungsregion Einsatz in der Zucht und Vermarktung. Einige der Rassen, wie zum Beispiel Cerdo Iberico, werden fast ausschließlich in einer Region (Cerdo Iberico in Südwestspanien) gehalten, ihre Produkte sind jedoch weltweit als Delikatesse gefragt.

a. Large Black

Die Rasse stammt ursprünglich aus den Grafschaften Cornwall, Devonshire, Essex und Suffolk. Entstanden ist die Rasse durch Kreuzung zwischen großen, schwarzen, hängeohrigen Devon- bzw. Cornwall-Schweinen und kleineren, schwarzen Suffolk- bzw. Essex-Schweinen. Entstanden sind großrahmige, schwarze Schweine mit Hängeohren. Exportiert wurde die Rasse nach dem zweiten Weltkrieg in die ganze Welt, um dort als Einkreuzung mit heimischen Rassen die Nutzleistung zu steigern. Vor allem Länder mit Extensivhaltung waren an dieser Rasse aufgrund ihrer Pigmentierung interessiert. Die große Nachfrage nach dem zweiten Weltkrieg ebte in den 60er Jahren ab, so dass diese Schweinerasse heutzutage völlig aus der konventionellen Schweinezucht in Deutschland verdrängt ist (Dittrich, 1997). Das Deutsche Cornwall ist eine aus Large Black hervorgegangene Rasse. In Deutschland

konnte sich diese Rasse jedoch nur langsam durchsetzen, so dass es erst 1935 zur Gründung der Deutschen Cornwallherdbuchgesellschaft (DCHG) e.V. kam. Jedoch konnte sich diese Rasse nicht gegen die konventionellen Schweinerassen durchsetzen und so wurde die Zucht bereits 1960 in Bayern wieder aufgegeben (Boettcher, 2006a).

b. Cerdo Iberico (Ib)

Cerdo Iberico ist eine auf den iberischen Halbinseln natürlich vorkommende Schweinerasse. Die halbwild in Eichenwäldern lebenden Schweine wurden aufgrund ihres hohen Fettanteils zur Trockenfleischproduktion eingesetzt. Ihre Produkte erreichen höchste Qualitätsansprüche und sind weltweit als Delikatesse berühmt. Das iberische Schwein zählt zu den am wenigsten züchterisch beeinflussten Rassen. Große Heterogenität besteht in der Färbung, es existieren schwarze, rote, blonde und gefleckte Variationen. Zudem existieren haarlose und behaarte Varianten. Ib ist kleiner als die üblichen Hausschweine und erreicht in der Endphase der Mast bis zu 60 % Schlachtkörperfett, eine Rückenspeckdicke von bis zu 15 cm bei 10-13 % intramuskulärem Fettgehalt. Die geringe Ferkelanzahl pro Wurf sowie die geringe Anzahl an funktionsfähigen Zitzen sollten durch Kreuzung mit anderen Rassen verbessert werden, ohne dadurch die besonderen „iberischen“ Merkmale zu verlieren. Die Einkreuzung führte zu höheren Ferkelzahlen, einer schnelleren Zunahme, einer besseren Futtermittelverwertung und einem höheren Magerfleischgehalt. Seit der Schinken zu einer bekannten Delikatesse geworden ist, werden jährlich 1,5 Millionen iberische Schweine geschlachtet (Lopez-Bote, 1998).

2.3. Bestimmung der Körperzusammensetzung

Die Tatsache, dass Wachstum, Ernährung und Genetik, sowie viele weitere Faktoren die Körperzusammensetzung beeinflussen, erschwert es, diese exakt zu ermitteln. Dennoch ist und bleibt es notwendig, nach Methoden zu suchen, die zuverlässig die Körperzusammensetzung bestimmen. Denn - besonders im Bereich der Tierzucht - ist die Analyse der Körperzusammensetzung am lebenden Tier von großer wirtschaftlicher Bedeutung, um in Bezug auf fleischliefernde Nutztiere deren Schlachtkörperwert bereits zu Lebzeiten adäquat schätzen zu können. Diese Schätzung sollte aus tierzüchterischer Sicht möglichst früh erfolgen und zudem objektiv und wiederholbar sein. Denn nur dann ist es möglich, das Generationsintervall zu verkürzen und die Selektion effektiv und wirtschaftlich zu gestalten.

2.3.1. Anforderungen an Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung

In der Literatur finden sich zahlreiche Autoren, die verschiedene Methoden der *in vivo* Analyse der Körperzusammensetzung vergleichend darstellen. Ferrell und Cornelius (1984) definieren zunächst folgende Anforderungen an eine Meßmethode am lebenden Tier:

- exakt
- einfach in der Durchführung
- kostengünstig
- breites Untersuchungsspektrum bezüglich Alter und Körperzusammensetzung der Tiere
- minimalinvasiv.

Szabo *et al.* (1999) vergleichen verschiedene schnittbilderzeugende Methoden der Körperzusammensetzungsanalyse beim Schwein und definieren zwei grundlegende Faktoren, die das Exaktheitsmaß der Analyse beeinflussen: (1) die Korrelation zwischen dem erzeugten Bild und der dargestellten Körperregion und (2) die Korrelation zwischen der gewählten Körperregion und der gesamten Körperzusammensetzung des Tieres.

2.3.2. In vivo Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung

Grundsätzlich haben bislang die im folgenden Abschnitt beschriebenen Verfahren in der Tierzucht Anwendung gefunden und sind in der Literatur bezüglich ihrer Exaktheit evaluiert worden (Scholz & Baulain, 2009):

1. Bildgebende Verfahren
2. Verfahren mit Gewebeinteraktion
3. Verdünnungsmethoden
4. Analysen auf Atomniveau.

2.3.2.1. Bildgebende Verfahren

a) Ultraschall

Der Ultraschall stellt die bei Mensch und Tier am häufigsten genutzte *in vivo* Methode dar, um in bestimmten Regionen die Körperzusammensetzung zu ermitteln. Die ersten Ultraschalluntersuchungen an lebenden Tieren wurden 1956 durchgeführt (Stouffer, 2004). Mittlerweile ist die Ultraschallmessung in der Schweinezucht zur Speckdickenmessung etabliert (Houghton & Turlington, 1992; Wilson, 1992; Rosner *et al.*, 2000; Müller & Polten, 2004). Das Messprinzip des Ultraschalls beruht darauf, dass elektrische Energie in Hochfrequenzultraschallwellen (>16000 Hz) umgewandelt wird. Diese Wellen durchdringen den Körper in kurzen Pulsabständen. Immer wenn die Schallwellen auf einen Übergangsbereich zwischen zwei Geweben treffen, die unterschiedliche akustische Eigenschaften haben, wird der Schall reflektiert und im Schallkopf als Signal empfangen (Scholz, 2002). Aus der Laufzeit eines Signals kann die Tiefe der Struktur errechnet werden (Scholz & Baulain, 2009). So entsteht ein zweidimensionales Schnittbild anhand dessen Flächen und Dicken von Gewebeschichten messbar sind. Vorteile des Ultraschalls liegen in der schnellen Messung (30-60 Sekunden) und in der Anwendbarkeit am lebenden, nicht narkotisierten Tier (Szabo *et al.*, 1999). Zudem sind Anschaffungs- und Unterhaltskosten geringer als bei anderen bildgebenden Verfahren (Scholz & Baulain, 2009). Nachteilig dagegen ist, dass je nach Gerätetyp und Anwender unterschiedliche Ergebnisse erzielt

werden (McLaren *et al.*, 1991; Müller & Polten, 2004). Hinzu kommt, dass tiefliegende Gewebe nicht oder nur mit geringer Auflösung erfasst werden können (Szabo *et al.*, 1999). Terry *et al.* (1989) ermittelten Werte für die Fettauflage an verschiedenen Körperstellen und erfassten die Longissimus-Muskelfläche beim Schwein vor und nach der Schlachtung mittels Ultraschall. Sie erreichten Beziehungen von $R^2 = 0,83$ für die Fettdicke am Gluteusmuskel und die Longissimusfläche. Für Szabo *et al.* (1999) stellt der Ultraschall in der Tierzucht eine geeignete Methode zur Selektion von Zuchttieren dar.

b) Magnetresonanztomographie (MRT)

Die Magnetresonanztomographie (MRT) stellt in der Humanmedizin eines der bedeutendsten bildgebenden Verfahren dar. Die Arbeitsweise eines Magnetresonanztomographen beruht auf dem Phänomen der Kernspinresonanz und arbeitet somit ohne Röntgenstrahlung. Die MRT zählt zu den deskriptiven Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung (Mitchell & Scholz, 2001). Mittels MRT werden Schnittbilder des Körpers angefertigt, die entsprechend der jeweiligen Fragestellung ausgewertet werden können (Scholz & Baulain, 2009). Für eine genauere Beschreibung der Methodik sei an dieser Stelle auf Kapitel 2.4. verwiesen. Beschreibungen zur Nutzung der MRT in der Nutztierwissenschaft finden sich unter anderem bei Baulain (1997) und Mitchell *et al.* (2001). Vorteile der MRT sind die gute Detailerkennbarkeit, die Arbeitsweise ohne ionisierende Strahlung, sowie die Möglichkeit Schnittbilder durch den zu untersuchenden Körper anzufertigen (Hendrix, 2003). Untersuchungen wurden bislang an verschiedenen Tierarten (Rinderteilstücken, Schweinen, Schafen und Geflügel) durchgeführt (Baulain, 1997; Szabo *et al.*, 1999; Mitchell *et al.*, 2001; Monziols *et al.*, 2006).

c) Computertomographie (CT)

Die Computertomographie (CT) ist wie die MRT ein Schnittbildverfahren, was die räumlichen Verhältnisse im Körperinnern nicht *invasiv*, gestützt durch Computerberechnungen dreidimensional darstellt (Scholz, 2002). Heutzutage ist die CT ebenso wie die MRT ein häufig in der Humanmedizin verwendetes Diagnostikum, was verschiedenste Fragestellungen bedienen kann (Leymaster, 1986). Der Unterschied zur MRT liegt im Messprinzip. Die CT arbeitet mit Röntgenstrahlen und deren Abschwächung, die MRT

dagegen mit Magnetresonanz. Das Untersuchungsobjekt wird von Röntgenstrahlen durchdrungen und deren Abschwächung (μ/ρ =linearer Massenschwächungskoeffizient cm^2/g) mit Detektoren gemessen. Je nach Dicke und Dichte des Gewebes wird der Röntgenstrahl unterschiedlich stark abgeschwächt. Diese Daten werden anschließend am Computer mittels mathematischer Verfahren aufgearbeitet und zu 3D-Bildern zusammengefügt (Leymaster, 1986). Der Schwächungsgrad der Röntgenstrahlung wird in Graustufen angegeben. Die einzelnen Graustufen sind in sogenannte „Hounsfield-Units (HU)“² eingeteilt (Szabo *et al.*, 1999). Nachteile der CT sind die Verwendung ionisierender Strahlung und der, im Vergleich mit der MRT, schlechtere Kontrast zwischen verschiedenen Magergeweben. Vorteile der CT sind die schnelle Untersuchungszeit und die niedrigeren Anschaffungskosten im Vergleich zur MRT. Je nach untersuchter Region bedeutet ein CT-Scan für den Patienten eine Strahlenbelastung zwischen 0,5 cSv und 1 cSv (Scholz, 2002). Heute wird die CT im Nutztierbereich vermehrt zur Schlachtkörperklassifizierung eingesetzt (z.B.: Font i Furnols *et al.*, 2009; Picouet *et al.*, 2010). Szabo *et al.* (1999) sehen die CT als eine geeignete Methode, um die Körperzusammensetzung zu ermitteln. Jedoch wird diese Methode Forschungseinrichtungen und Zuchtverbänden bzw. -unternehmen vorbehalten bleiben, da die Anschaffungs- und Unterhaltskosten hoch sind und das Gerät nicht einfach transportierbar ist.

d) Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA)

Die Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) stellt ein ursprünglich zur Knochendichtemessung beim Menschen entwickeltes Verfahren dar, was sich aber ebenso für die Untersuchung von Weichgeweben eignet. Eine ausführliche Beschreibung der physikalischen Grundlagen findet sich bei Pietrobelli *et al.* (1996). Die DXA arbeitet – vereinfacht - mit Röntgenstrahlung in zwei unterschiedlichen Energieniveaus und misst deren Abschwächung nach Passage durch den Körper. Anhand der Abschwächung kann zwischen Fettgewebe, Magerweichgewebe und Knochen unterschieden werden (Scholz, 2002). Für eine genauere Beschreibung der Messtechnik sei an dieser Stelle auf Kapitel 2.5. verwiesen. Mittels DXA ist es möglich, innerhalb kurzer Zeit Ganzkörpermessungen und

² Hounsfield-Unit (HU)
$$HU = \frac{\mu_x - \mu_{\text{Wasser}}}{\mu_{\text{Wasser}}} \cdot 1000$$

Teilstückmessungen durchzuführen. DXA ist kein bildgebendes Verfahren, wie es die MRT oder die CT sind, da die DXA-Ergebnisse nicht weiter bearbeitet werden müssen. Jedoch bestehen die DXA-Bilder aus einzelnen Pixeln (Bildpunkten), die für weitere Analysen von definierbaren Körperregionen genutzt werden können (Scholz, 2002). In der Literatur finden sich mehrere Angaben darüber, dass die DXA eine geeignete Methode für die Tierzucht darstellt, um die Körperzusammensetzung bei verschiedenen Tierarten (Kleintier, Geflügel, Wiederkäuer, Affe, Schwein) zu bestimmen (Mitchell *et al.*, 1998c; Suster *et al.*, 2003; Mitchell & Scholz, 2009).

2.3.2.2. Verfahren mit Gewebeinteraktion

a) Bioelektrische Impedanz (BIA)

Die bioelektrische Impedanzanalyse wurde zur Messung der fettfreien Masse beim Menschen entwickelt. Für die Messung wird ein schwacher Wechselstrom über zwei Elektroden an den Körper angeschlossen und der Widerstand gemessen (Mitchell & Scholz, 2001). Dadurch können alle Körperkompartimente erfasst werden (Körperzellmasse, Fettmasse, Extrazellulärmasse, Körperwasser; Matthie & Withers, 1996). Grundlage der Erfassung ist, dass der Widerstand des Körpers mit dem Körperfettgehalt zunimmt und mit dem Körperwassergehalt abnimmt. Aufgrund dieser Tatsache, kann aus dem gemessenen Widerstand auf den Körperwasser- und Körperfettgehalt geschlossen werden. Die Messung ist von verschiedenen Variablen abhängig (z.B.: Körperlänge, Luft- und Raumtemperatur, Körpergewicht). Unter den meisten Bedingungen gilt die BIA als verlässliche Analysemethode zur Bestimmung des Gesamtkörperwassers (Scholz, 2002). Dadurch, dass die Technik einfach, preiswert und transportierbar ist, ist auch der Einsatz bei landwirtschaftlichen Nutztieren möglich (Mitchell & Scholz, 2001, 2009; Scholz & Baulain, 2009). Für das Schwein gibt es bislang nur wenige Studien über den Einsatz der BIA (Mitchell & Scholz, 2009). Einige Autoren bestätigen, dass die BIA an lebenden Tieren und an Schlachtkörpern anwendbar ist (Marchello & Slinger, 1992; Swantek *et al.*, 1992; Marchello *et al.*, 1999).

b) Total Body Electrical Conductivity (TOBEC)

Das Messprinzip der TOBEC entspricht dem der BIA. Die Methode beruht auf der unterschiedlichen Leitfähigkeit von Muskel- und Fettgewebe. Der Unterschied zur BIA liegt in der Verwendung einer elektromagnetischen Spule, anstelle von zwei Elektroden (Bell *et al.*, 1994; Scholz & Baulain, 2009). Die Messergebnisse variieren je nach Instrumentenausführung. Um die Messung genau durchzuführen, muss das Gewicht der Probe ermittelt werden. Soll die Untersuchung an lebenden Tieren durchgeführt werden, so müssen Bewegungs- und Positionsartefakte berücksichtigt werden. Bei der Untersuchung von toten Tieren bzw. Schlachtkörpern stellt die Temperatur das entscheidende Kriterium dar (Mitchell & Scholz, 2001).

c) Nahinfrarot-Interaktanz (NIR)

Diese Methode beruht auf dem Prinzip, dass organischen Stoffe Licht in einem für den Stoff spezifischen Wellenlängenbereich absorbieren. Die verwendete Wellenlänge liegt im Nahinfrarotbereich (850–2600 nm; Mitchell & Scholz, 2001). Bei einer bestimmten Wellenlänge kommt es zur Absorption der Strahlung durch Fettgewebe und zu einer Reflektion der Strahlung an fettfreiem Gewebe. Ein Computer ermittelt anhand der Absorptions- und Reflektionswerte die Körperzusammensetzung (Scholz & Baulain, 2009). Für die Berechnung sind jedoch weitere Variablen nötig (z.B.: Körpergewicht oder Geschlecht; Scholz, 2002). Im Nutztierbereich findet diese Messmethodik bislang keinen routinemäßigen Einsatz, da die Genauigkeit der Messungen noch nicht ausreicht. Probleme entstehen durch das Tier selbst (d.h. durch dessen Hautfarbe, Hautdicke und Speckdicke) und aus der Eindringtiefe der Infrarotstrahlung, die nur 1 cm beträgt (Mitchell *et al.*, 2005). Mitchell und Scholz (2001) sind der Meinung, dass diese Methode geeignet ist, die Fettqualität der Speckauflage beim Schwein zu beurteilen, da für diese Untersuchung die maximale Eindringtiefe von 1 cm ausreichend ist.

2.3.2.3. Verdünnungsmethoden

Verdünnungsmethoden (Dilutionsmethoden) werden beim Menschen zur Bestimmung des Gesamtkörperwassers eingesetzt. Das Prinzip dieser Methode beruht auf der Annahme, dass Wasser stets eine feste Fraktion (74,5 %) der fettfreien Masse besetzt. Aufgrund der Annahme, kann einem Probanden oral oder intravenös eine definierte Menge eines Indikators eingegeben werden. Dieser Indikator verteilt sich ebenso wie das Körperwasser. In bestimmten Zeitabständen werden Proben genommen und auf die Konzentration des Indikators hin untersucht. Aus dem Verhältnis zwischen Gesamtkörperwasser und dem Wasser in der fettfreien Masse kann der Fettanteil des Körpers errechnet werden. Diese Technik ist auch für Tiere mit stark variierender Körpergröße anwendbar (Mitchell & Scholz, 2001). Nachteil dieser Methode sind die, je nach Alter, Konstitution, Rasse und Geschlecht variierenden Wassergehalte. Untersuchungen an Schweinen von Ferrell und Cornelius (1984) zeigten, dass es je nach Entwicklungsstadium des Tieres zu Über- und Unterschätzungen der Gesamtkörpermenge, des Fettgehaltes und des Proteingehaltes kommt. Nur durch Berücksichtigung der Körpermasse oder der Rückenspeckdicke konnten genaue Schätzungen zur Körperzusammensetzungen gemacht werden.

2.3.2.4. Analysen auf Atomniveau

a) Gesamtkörper-Kalium (K^{40})

Durch die Messung des natürlichen, radioaktiven Isotops Kalium⁴⁰ kann am lebenden Individuum der Körperfettanteil bestimmt werden. Fett und Knochen sind praktisch kaliumfrei, so dass sich der gesamte Kaliumgehalt in den Körperzellen befindet. Durch die Messung von Kalium⁴⁰ kann das Gesamtkörperkalium und damit die Körperzellmasse bestimmt werden (Mitchell & Scholz, 2001). Diese Technik ist sehr teuer und nur an wenigen Orten verfügbar, so dass sie für die Nutztierwissenschaft nur eine unbedeutende Rolle spielt (Scholz & Baulain, 2009).

b) Neutronenaktivierungsanalyse (NA)

Die Neutronenaktivierungsanalyse ist eine multielementare Analyse der Element- und Isotopenzusammensetzung des Körpers (Scholz, 2002). Dabei wird der zu untersuchende Körper mit Neutronen beschossen. Die Atome im Körper nehmen die Neutronen auf und gewinnen so an Energie. Dieser Energiegewinn kann nicht auf Dauer gehalten werden und wird als Strahlung (instabile Isotope) wieder frei (Mitchell & Scholz, 2001). Diese freiwerdende Gammastrahlung hat, je nachdem um welches Atom es sich handelt, ein unterschiedliches Energieniveau. So kann anhand des entstehenden Strahlenspektrums auf die vorhandenen Atome geschlossen werden (Scholz & Baulain, 2009). Es gibt nur wenige Untersuchungen zur Anwendung der NA beim Nutztier (Mitra *et al.*, 1998), da diese Methode zeitaufwendig (15-30 Minuten) und teuer ist, sowie zudem eine hohe Expertise erfordert (Mitchell & Scholz, 2001).

2.4. Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie (MRT), auch Kernspintomographie genannt, ist ein nicht *invasives* bildgebendes Verfahren zur Erstellung detaillierter Schnittbilder von Körperregionen und einzelnen Körperteilen (Hendrix, 2003). Die MRT arbeitet ohne Röntgenstrahlung. Das Messprinzip beruht auf der Wechselwirkung zwischen starken Magnetfeldern und den Atomkernen im Körper des Patienten, die elektromagnetisch angeregt werden. Bei der Rückkehr in ihren Grundzustand geben diese Atomkerne ein Signal ab, was gemessen und mittels eines Rechners in Bilddaten umgewandelt werden kann (Scholz, 2002).

Seit 1980 wird die MRT in der Medizin eingesetzt und hat sich bis heute dort etabliert. In der Veterinärmedizin wird die MRT seit einigen Jahren genutzt und für verschiedenste Fragestellungen angewandt. Der erste, allein für Nutztiere eingesetzte Magnetresonanztomograph wurde 1988 am damaligen Institut für Tierzucht und Tierverhalten (FAL) in Mariensee, Neustadt am Rübenberge aufgestellt (Baulain, 1997). Zahlreiche Untersuchungen an Schlachtkörpern und *in vivo* Untersuchungen von Schweinen, Schafen und Wassergeflügel zeigen, dass sich die Magnetresonanztomographie für die Nutztierwissenschaft eignet.

In zahlreichen humanmedizinischen und veterinärmedizinischen Publikationen wird die Arbeitsweise eines Kernspintomographen beschrieben. Dementsprechend folgt hier eine kurze Einführung in die Magnetresonanztomographie. Verständlich und übersichtlich beschreiben Schild (1990) bzw. Hendrix (2003) die Grundlagen der MRT.

2.4.1. Technischer Aufbau eines Kernspintomographen

Ein Kernspintomograph besteht aus mehreren Einzelkomponenten: der Bedienungskonsole, einem zentralen Computersystem und dem eigentlichen Tomographen. Die Bedienungskonsole dient der Eingabe der Patientendaten, der Auswahl des Untersuchungsprogramms und der entsprechenden Untersuchungsparameter. Das zentrale Computersystem ist für die Steuerung des Magneten, der Patientenliege und der Sende- und Empfangsspulen zuständig (Hendrix, 2003). Da das statische Magnetfeld des Tomographen

metallische Gegenstände der Umgebung anzieht und elektrische Geräte stören kann, aber auch Radiowellen in der Luft zu einer Störung der Hochfrequenzwellen des Tomographen führen können, muss die Störstrahlung so gering wie möglich gehalten und der Tomograph in einem Faraday'schen Käfig aufgestellt werden (Stöcker & Shah, 2007). Der Tomograph an sich besteht aus der Patientenliege, den Spulen, dem Hochfrequenzsystem und dem Hauptmagneten (Hendrix, 2003).

a) Die Patientenliege

Die Patientenliege ist eine bewegliche Liege. Der Patient wird auf der Liege gelagert, so dass das zu untersuchende Körperteil bzw. der zu untersuchende Körperabschnitt optimal in das Magnetfeld eingebracht und untersucht werden kann. An der Patientenliege befinden sich Vorrichtungen zur Stabilisierung und Fixation einzelner Körperteile des Patienten, da während einer Untersuchung das betreffende Körperteil nicht bewegt werden darf. Die Halterungen für Gurte, sowie die Anschlüsse der Spulen befinden sich ebenfalls im Tisch (Hendrix, 2003).

b) Die Spulen und das Hochfrequenzsystem

Das Hochfrequenzsystem eines Kernspintomographen besteht aus einem Sender und einem Empfänger mit dazugehörigen Sende- und Empfangsspulen. Die Sendespule kann auch gleichzeitig Empfangsspule sein. Alternativ werden getrennte Sende- und Empfangsspulen verwendet. Die Spulen können im Kernspintomographen integriert sein, oder werden um das zu untersuchende Körperteil angelegt (Schild, 1990). Spulen können sich in ihrer Art, Form und Größe unterscheiden:

1. Volumenspulen: Volumenspulen umgeben das zu untersuchende Körperteil und sind gleichzeitig Sende- und Empfangsspule (Schild, 1990).
2. Trimmspulen/Shimspulen: Diese Spulen werden ausschließlich zur Verbesserung der Homogenität eines Magnetfeldes verwendet (beim sogenannten Trimmen/Shimmen) (Stöcker & Shah, 2007).
3. Gradientenspulen: Gradientenspulen erzeugen zusätzlich zum statischen Magnetfeld elektromagnetische Felder, damit das Signal aus dem Körper seinem Ursprungsort zugeordnet werden kann. Das hämmernde Geräusch, was bei einer MRT-

Untersuchung zu hören ist, stammt von den Gradientenspulen, die beim An- und Abschalten gegen ihre Halterung stoßen (Stöcker & Shah, 2007).

4. Oberflächenspulen: Oberflächenspulen werden direkt auf die zu untersuchende Region gelegt. Sie sind reine Empfängerspulen und empfangen Signale aus nächster Nähe, tieferliegende Regionen werden nicht erkannt (Schild, 1990; Scholz, 2002).

c) Der Hauptmagnet

Der Hauptmagnet, der das statische Magnetfeld liefert, kann verschiedenartig aufgebaut sein, bezogen auf den Bau, die Funktionsweise und die Feldstärke des Magneten.

1. *Bezogen auf die Bauweise wird zwischen offenen und geschlossenen Systemen unterschieden (Hendrix, 2003):*

Offene Systeme sind c- förmig aufgebaut. Das bedeutet, dass auf drei Seiten Zugang zum zentralen Magnetfeld möglich ist (siehe Abb. 2). Das Magnetfeld verläuft vertikal, wodurch es in seiner Feldstärke und Homogenität limitiert ist.

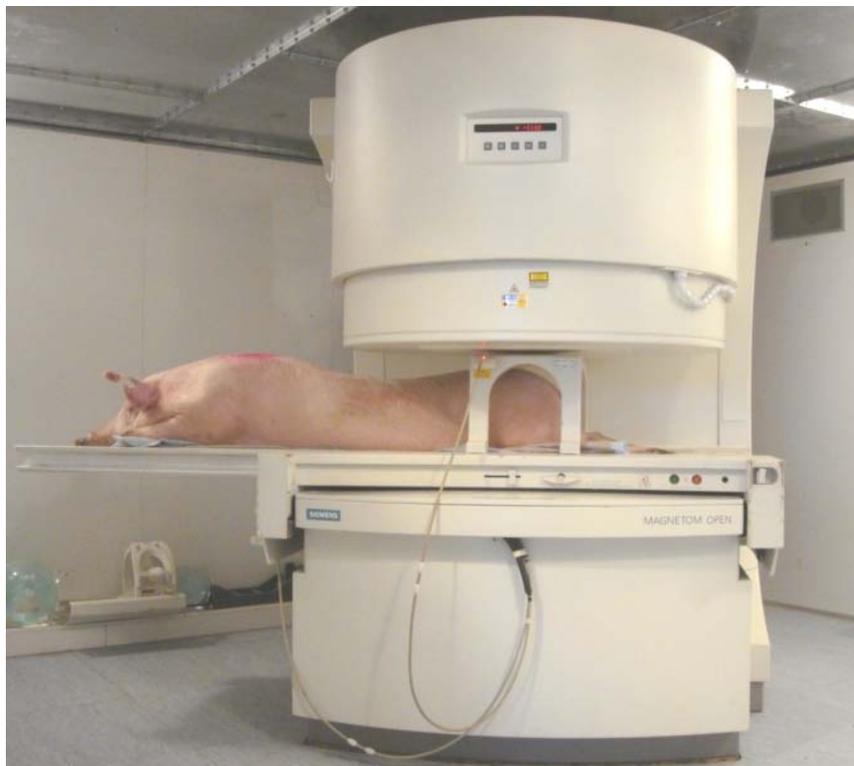


Abb. 2: Offenes System; Siemens Magnetom Open des Lehr- und Versuchsgutes der LMU

Ein geschlossenes System ist röhrenförmig aufgebaut und auf den Röhrendurchmesser beschränkt (siehe Abb. 3). Das Magnetfeld verläuft horizontal innerhalb der Röhre, wodurch höhere Feldstärken und Homogenitäten möglich sind.



Abb. 3.: Geschlossenes System (Picker Vista MR; 1,5 Tesla); Bild von A.M. Scholz zur Verfügung gestellt

2. Weiterhin werden Magneten nach ihrer Funktionsweise unterschieden in Widerstandsmagneten, Permanentmagneten und supraleitenden Magneten:

Widerstandsmagneten sind stromdurchflossene Kupfer- oder Aluminiumspulen sowie Elektromagneten. Sie sind nur magnetisch, solange Strom fließt. Die Höhe des erzeugten Magnetfeldes hängt von der Höhe der angelegten Spannung ab. Die maximale Feldstärke beträgt 0,3 Tesla. Die Nachteile dieser Magneten beruhen auf der erforderlichen hohen und gleichmäßigen Stromzufuhr. Dieser hohe Stromfluss bewirkt eine starke Wärmeentwicklung, die durch Kühlsysteme mit Wasser- und Wärmeaustauschern abgeleitet werden muss, was zu hohen Strom- und Kühlkosten führt (Schild, 1990).

Permanentmagneten benötigen keine externe Energiezufuhr, um ihr magnetisches Feld aufrecht zu erhalten. Somit sind die Unterhaltskosten gering. Die maximal mögliche Feldstärke beträgt 0,3 bis 0,5 Tesla. Nachteilig ist, dass Permanentmagneten konstante Umgebungstemperaturen benötigen und nur eine begrenzte Feldstärke möglich ist, da diese von der Größe und damit vom Gewicht des Magneten abhängt (Schild, 1990).

Supraleitende Magneten sind stromdurchflossene Spulen aus bestimmten Metalllegierungen (meist Niobium-Titan), die bei Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt (-273,15°C) ihren

elektrischen Widerstand verlieren. Wird einmal Strom zugeführt, fließt dieser permanent ohne Verluste und das Magnetfeld bleibt konstant. Der Magnet muss mittels kryogener Gase (häufig flüssiges Helium) ständig gekühlt werden, was die hohen Kosten der Anlage begründet. Vorteile liegen in den erreichbaren hohen Feldstärken und der hervorragenden Magnetfeldhomogenität (Stöcker & Shah, 2007).

3. Unterschiede der Magneten aufgrund der Magnetfeldstärke:

Die Stärke eines Magnetfeldes wird in Tesla ($T = \text{Vs/m}^2$) oder in Gauss angegeben. Üblicherweise wird die Einheit Tesla verwendet ($1 \text{ T} = 10.000 \text{ Gauss}$). Die heutzutage verwendeten Feldstärken liegen zwischen 0,5 und 1,5 Tesla, neuerdings bis 3 Tesla. Hohe Feldstärken bewirken eine bessere räumliche Auflösung der entstehenden Bilder (Hendrix, 2003). Zusätzlich zur MR-Tomographie sind in Magnetsystemen mit hohen Feldstärken spektroskopische Untersuchungen möglich. Diese Untersuchungen liefern *in vivo* Informationen über Chemie- und Stoffwechselforgänge. Niedrige Feldstärken dagegen senken die Anschaffungs- und Betriebskosten der Anlage (Scholz, 2002).

2.4.2. Physikalische Grundlagen der Kernspintomographie

Die Magnetresonanztomographie beruht auf dem physikalischen Effekt der Kernspinresonanz. Um diesen zu verstehen, folgt eine Darstellung des Bohrschen Atommodells sowie der Verhaltensweisen von Atomen in magnetischen und elektrischen Feldern. Detaillierte Beschreibungen der Atomphysik finden sich bei Meschede (2002).

2.4.2.1. Das Atommodell

Nach Ernest Rutherford (1871-1937) besteht ein Atom aus einem positiv geladenem Kern und einer negativ geladenen Hülle. Der Kern ist aus positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen aufgebaut. Rutherford bewies mit Streuversuchen an dünner Goldfolie, dass die positive Ladung des Atoms zusammen mit praktisch seiner gesamten Masse im Kern konzentriert ist. Elektronen können sich demnach im Feld des positiven Kerns nur halten,

wenn sie Bahnen um den Atomkern beschreiben, ähnlich der Planeten, die um die Sonne kreisen.

Niels Bohr (1885-1962) konkretisierte dieses Modell mit zwei Postulaten: (1) Es muss Bahnen geben, auf denen Elektronen ohne Energieverlust kreisen. Denn bewegte Ladung erzeugt ein elektrisches Feld, was wiederum Strahlung erzeugt und somit Energie verliert. Würden die Elektronen bei der Umrundung des Kerns ständig Energie verlieren, würden sie in den Kern stürzen. (2) Beim Übergang zwischen zwei Zuständen wird Energie aufgenommen bzw. in Form von Strahlung abgegeben.

Jedes Teilchen auf einer Bahn um den Atomkern weist einen Drehimpuls auf, der durch den Bahnradius, die Masse des Teilchens und die Geschwindigkeit der Bewegung charakterisiert ist. Zudem weist jedes Teilchen einen Eigendrehimpuls auf, auch Spin genannt (siehe Abb. 4). Dieser beschreibt die Rotation des Teilchens um die eigene Achse, ähnlich der Planeten, die nicht nur um die Sonne kreisen, sondern sich zusätzlich auch um die eigene Achse drehen. Der Eigendrehimpuls von Protonen und Neutronen im Kern wird als Kernspin bezeichnet (Meschede, 2002).

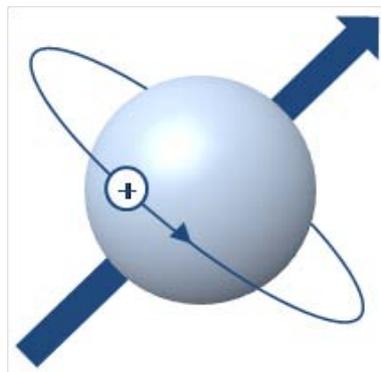


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des Eigendrehimpulses (Spin) eines Atoms; modifiziert nach Schild (1990)

Da jede sich bewegende elektrische Ladung Strom darstellt, welche wiederum eine magnetische Kraft bewirkt, verhält sich ein Atom wie ein kleiner Stabmagnet (Schild, 1990).

2.4.2.2. Auswirkung eines externen Magnetfeldes auf einen Körper

Vor Einbringen in ein Magnetfeld führen die Teilchen innerhalb eines Körpers zwei Bewegungen aus: den Drehimpuls und den Eigendrehimpuls (Spin) (Meschede, 2002). Wird ein Körper in ein Magnetfeld eingebracht, so richtet dieses Magnetfeld die Spins der Protonen entlang seiner Feldlinien aus. Dabei sind zwei Ausrichtungsarten möglich: entweder parallel oder antiparallel zum externen Magnetfeld. Die parallele Ausrichtung ist energetisch günstiger, so dass sich geringfügig mehr Protonen parallel als antiparallel ausrichten (Schild, 1990).

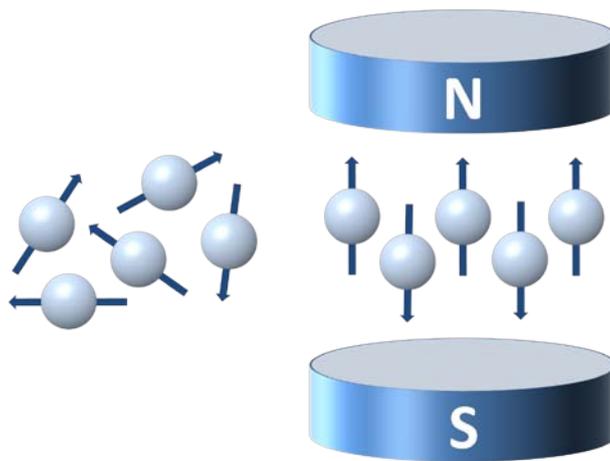


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung von Protonen, die sich in einem externen Magnetfeld ausrichten; modifiziert nach Schild (1990)

Durch die Tatsache, dass Protonen neben dem Spin auch einen Drehimpuls besitzen, kommt es durch das statische externe Magnetfeld nicht direkt zu einer Ausrichtung der Spins entlang der Feldlinien, sondern zu einer Kreisbewegung um die Feldrichtung. Diese wird Präzession genannt und ist anschaulich als Bewegung einer angestoßenen Kegelfigur beschreibbar (Schild, 1990).

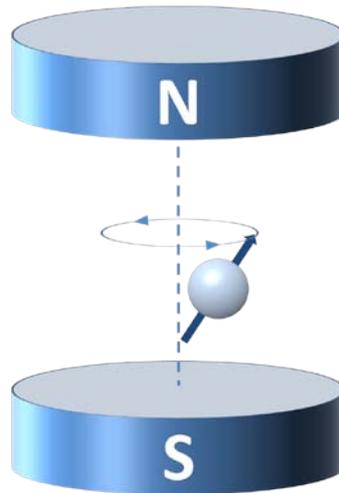


Abb. 6: Kreisbewegung (Präzession) des Protons; modifiziert nach Schild (1990)

Die Geschwindigkeit mit der die Protonen diese Bewegung ausführen wird Präzessionsfrequenz genannt. Sie hängt von der Magnetfeldstärke ab. Je stärker das Magnetfeld, desto höher ist die Frequenz. Die Präzessionsfrequenz wird auch Larmorfrequenz genannt und ist mathematisch mit der Larmorgleichung beschrieben:

$$\omega_0 = \gamma B_0$$

Die im statischen externen Magnetfeld antiparallel und parallel ausgerichteten Protonen heben sich gegenseitig auf. Da mehr Protonen parallel ausgerichtet sind, addieren sich diese zu einem longitudinalen Magnetfeld, was parallel zum externen Magnetfeld liegt. Diese Magnetisierung ist aufgrund ihrer Ausrichtung nicht direkt messbar, denn dafür müssten die durch das statische Magnetfeld ausgerichteten Spins abgelenkt werden (Schild, 1990).

2.4.2.3. Der Hochfrequenzimpuls

Grundlegend für die Magnetresonanztomographie ist, dass eine elektromagnetische Welle Energie auf die im Magnetfeld präzedierenden Protonen übertragen kann. Dieses Phänomen wird Kernspin-Resonanz genannt und wurde erstmals 1946 entdeckt. Wird ein Hochfrequenzimpuls (eine elektromagnetische Welle) mit derselben Frequenz wie die Präzessionsfrequenz der Protonen eingestrahlt, so bewirkt das zwei Vorgänge (Schild, 1990):

³ ω_0 = Präzessionsfrequenz; B_0 = Stärke des Magnetfeldes; γ = gyromagnetisches Verhältnis

1. Einen Energietransfer auf die Protonen (Kernspin-Resonanz), so dass einige Protonen ein höheres Energieniveau erreichen und die Protonen damit antiparallel ausgerichtet werden. Dadurch nimmt die longitudinale Magnetisierung ab.
2. Die Protonen präzedieren durch den Hochfrequenzimpuls alle in Phase (Phasenkohärenz), was bewirkt, dass eine transversale Magnetisierung entsteht.

Die beiden Vorgänge laufen parallel zueinander ab und bewirken eine Richtungsänderung der gesamten Magnetisierung aller Protonen. Diese Richtungsänderung ist abhängig von der Art des Hochfrequenzimpulses. Ein 90° Impuls z.B. bewirkt eine 90° Kippung des Magnetfeldes. Wird dieser Hochfrequenzimpuls wieder abgeschaltet bewirkt das wiederum zwei Vorgänge (Schild, 1990):

1. Die Protonen geben ihre zusätzlich aufgenommene Energie allmählich wieder an die Umgebung ab. Die longitudinale Magnetisierung nimmt wieder zu, da wieder mehr Protonen parallel ausgerichtet sind als antiparallel. Dieser Vorgang wird auch als longitudinale Relaxation oder Spin- Gitter- Relaxation bezeichnet.
2. Die durch den Hochfrequenzimpuls in Phase präzedierenden Protonen geraten außer Phase. Hierdurch nimmt die transversale Magnetisierung wieder ab, was als transversale Relaxation oder als Spin-Spin-Relaxation bezeichnet wird.

2.4.2.4. T1- und T2-Relaxation

Relaxation ist der Vorgang, bei dem die Protonen durch Energieabgabe ihren ursprünglichen Energiezustand wieder erreichen. Der Vorgang der Relaxation verläuft transversal und longitudinal, wodurch zwei Relaxationskurven entstehen. Eine longitudinale Relaxation (T1) und eine transversale Relaxation (T2) (Schild, 1990):

T1 beschreibt die longitudinale Relaxationszeit. Sie ist definiert als *Zeit, nach der 63 % der ursprünglichen Longitudinalmagnetisierung wieder erreicht sind*. Sie beschreibt somit die Zeit, die es dauert bis 63 % der Protonen durch Energieabgabe an ihre Umgebung wieder ihren ursprünglichen Energiezustand erreicht haben. T1 beträgt 300-2000 msec.

T2 beschreibt die transversale Relaxationszeit und ist definiert als *Zeit, nach der die Transversalmagnetisierung auf 37 % der ursprünglichen Werte zurückgegangen ist*. T2 beträgt 30-150 msec.

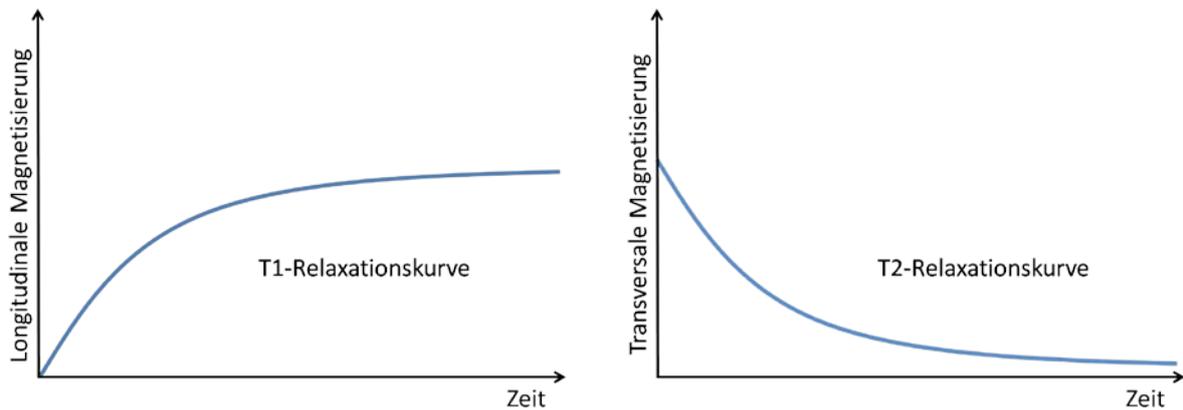


Abb. 7: T1- und T2-Relaxationskurven; modifiziert nach Schild (1990)

Je nachdem um welches Gewebe es sich handelt, lässt sich die, durch einen Hochfrequenzimpuls auf die Protonen übertragene Energie leichter oder schwerer abgeben. T1 hängt von der Gewebeszusammensetzung und der Struktur der Umgebung ab. Eine Energieabgabe ist bei gleicher Frequenz am schnellsten möglich. In Flüssigkeiten bewegen sich die kleinen Wassermoleküle sehr schnell, so dass es länger dauert bis die Protonen ihre aufgenommene Energie wieder abgegeben haben. Was bedeutet, dass T1 in Flüssigkeiten lang ist. Bei festen Geweben mit großen Molekülen (wie zum Beispiel Fett) erfolgt die Energieabgabe schnell, da sich große Moleküle langsam bewegen und damit ihre Frequenz nahe der der Larmorfrequenz liegt. T1 ist somit kurz. Aber auch die Stärke des Magnetfeldes beeinflusst T1. In einem starken Magnetfeld wird T1 länger, da hier mit höheren Larmorfrequenzen gearbeitet wird und die Energieabgabe nur langsam erfolgen kann. Flüssigkeiten haben eine lange T1 und eine lange T2, Fett dagegen hat eine kurze T1 und eine kurze T2 (Schild, 1990).

2.4.3. Das MR-Bild

Der Wechsel zwischen Transversalmagnetisierung und Longitudinalmagnetisierung beschreibt physikalisch sich ändernde magnetische Kräfte. Da sich ändernde magnetische Kräfte elektrischen Strom erzeugen, kann diese Bewegung als Signal mit einer Antenne gemessen werden. Das Signal wird als FID-Signal („free induction decay“ = Abklingen der freien Induktion) bezeichnet (Schild, 1990). Die Entstehung eines MR-Bildes aus diesen resultierenden Signalen wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.4.3.1. Arten von MR- Bildern

Aufgrund der unterschiedlichen Relaxationszeiten der Gewebe kann bei Verwendung mehrerer Hochfrequenzimpulse zwischen den Geweben unterschieden werden. Durch Verwendung verschiedener Impulsfolgen können bestimmte Gewebemerkmale mehr oder weniger stark hervorgehoben werden. Drei Arten von MR-Bildern sind dadurch möglich: T1-gewichtete Bilder, T2-gewichtete Bilder und Protonendichte gewichtete Bilder.

Diese unterscheiden sich in der Art des Hochfrequenzimpulses, der Zeit zwischen den Impulsfolgen (TR = „Time to repeat“ – time between repetitions) und in der Echozeit (TE = „Time to Echo“ – time between echoes):

- *Echozeit (TE = Time to Echo)*

Die Echozeit beeinflusst das Bild: je kürzer sie ist, desto stärker ist das Signal des Gewebes. Je länger TE wird, desto schlechter wird das Gesamtsignal, wodurch sich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verschlechtert. Ein gewisses Rauschen, was sich in der Körnung der MR-Bilder zeigt ist charakteristisch für die MRT. Wird das Signal zu schwach, ist es kaum vom Hintergrund-Rauschen zu unterscheiden (Schild, 1990).

- *Repetitionszeit (TR = Time to repeat)*

Die Repetitionszeit beschreibt die Zeit zwischen zwei Anregungsimpulsen. Sie bestimmt die zeitliche Länge einer Sequenz und beeinflusst die Stärke der Longitudinalmagnetisierung. Ist TR zu kurz, wird das Signal von Impuls zu Impuls schwächer, da dadurch eine vollständige T₁-Relaxation verhindert wird (Stöcker & Shah, 2007).

Bei einem T1-gewichteten Bild (TR<500msec und TE<30msec) beruhen die unterschiedlichen Signalintensitäten auf den T1-Werten der Gewebe. Die kurze TE bewirkt, dass T2 bedingte Unterschiede nicht hervorgehoben werden. Ein T2-gewichtetes Bild entsteht durch Verwendung einer langen TR (>1500msec) und einer langen TE (> 80msec). Durch die lange TR werden Unterschiede der T1-Relaxation unbedeutend. Die lange TE dagegen hebt Unterschiede in der T2-Relaxation hervor. Ein Protonendichte gewichtetes Bild entsteht bei Verwendung einer sehr langen TR, wodurch Unterschiede in der T1-Relaxation nicht mehr erkennbar sind. Der Kontrast wird nur durch die Protonendichte bestimmt. Die kurze TE bewirkt, dass Unterschiede in der T2-Relaxation nicht mehr bedeutsam sind (Schild, 1990).

2.4.3.2. Das Gradientensystem

Um ein Signal einem bestimmten Punkt im Körper zuordnen zu können, bedarf es dem Gradientensystem: Wird ein Patient in ein MRT verbracht, so befindet er sich in einem relativ homogenen Magnetfeld. Soll eine bestimmte Schicht untersucht werden, so wird gleichzeitig mit dem Hochfrequenzimpuls ein zweites Magnetfeld eingeschaltet. Dieses zweite Magnetfeld besitzt einen Gradienten, was bedeutet, dass dessen Magnetfeld nicht überall gleich stark ist. Anhand der resultierenden Signale können nun verschiedene Ebenen definiert werden. Dieses zweite Magnetfeld wird Schichtselektionsgradient genannt und stellt eines von insgesamt drei Gradienten dar. Nach diesem Gradienten wird für kurze Zeit ein weiteres Gradientenfeld eingeschaltet. Dieser zweite Gradient (Frequenzkodiergradient) verläuft entlang einer Schicht und bewirkt, dass die eigentlich gleichen Protonen nun unterschiedlichen Magnetfeldstärken ausgesetzt werden und so Signale in unterschiedlichen Frequenzen abgeben. Um nun das Signal eindeutig in allen drei Raumachsen zu definieren wird der Phasenkodiergradient eingeschaltet. Dieser bewirkt, dass die Präzession der Protonen je nach Feldstärke beschleunigt wird und diese außer Phase geraten. Die Protonen geben letztendlich Signale gleicher Frequenz, diese aber phasenversetzt ab. Durch die Abfolge der drei Gradienten können Signale unterschiedlicher Frequenz und Signale mit gleicher Frequenz, aber unterschiedlichen Phasen nach ihrem Ursprungsort unterschieden werden. Durch ein mathematisches Verfahren (Fourier-Transformation) lässt sich feststellen, wie stark das Signal einer bestimmten Frequenz und Phase ist. Da jeder Ort durch seine Frequenz und Phase definiert ist, ist der Bildaufbau möglich (Stöcker & Shah, 2007).

2.4.3.3. Die Bildmatrix

Das entstehende Bild wird in eine gitterförmige Matrix aus vielen kleinen Einzelquadraten eingebaut. Ein MR-Bild besteht aus einzelnen Bildpunkten (Pixeln). Größe und Rasterung der Matrix bestimmen die Auflösung des Bildes (Schild, 1990). Die Fläche eines Pixels multipliziert mit der Schichtdicke des Gewebes, beschreibt das Volumen eines Voxels. Signalintensitäten unterschiedlicher Gewebe werden durch verschiedene Graustufen dargestellt. Der Grauwert eines Pixels besteht aus der Signalintensität des zugehörigen Voxels und dem sogenannten „Rauschen“. Das Bild-Rauschen überlagert jedes Signal und ist Bestandteil des Signals. Es ist definiert als *Signalintensitätsschwankungen, die nicht zur*

Bildinformation beitragen. Durch das Rauschen entsteht ein regelloses körniges Muster. Es ist unvermeidbar und hat mehrere physikalische Ursachen. Der Rauschanteil ist ein Kriterium für die Bildqualität und wird als Verhältnis von Signal zu Rauschen angegeben (Hendrix, 2003).

2.4.4. Mögliche MR-Sequenzen

Je nach Fragestellung kann zwischen verschiedenen Sequenzen (Impulsabfolgen) gewählt werden. Unterschiede liegen in der Echozeit (TE), der Repetitionszeit (TR) und der Art und Abfolge des Hochfrequenzimpulses (Schild, 1990):

- Partial-Saturation-Sequenz und Saturation-Recovery-Sequenz
- Inversion-Recovery-Sequenz
- Spin-Echo-Sequenz
- Sogenannte „Schnelle Sequenzen“

2.4.5. Artefakte in der MRT

In der Magnetresonanztomographie können verschiedene Artefakte (Abbildungsfehler) auftreten. Einige der Artefakte sind unvermeidbar, so dass deren Kenntnis und Erkennung entscheidend für die Bildauswertung ist. Die wichtigsten Artefakte sollen im Folgenden genannt werden:

- *Fluss- und Bewegungsartefakte:* Da die Aufnahme eines MR-Bildes einige Minuten dauert sind die häufigsten Artefakte auf Bewegungen zurückzuführen. Grundsätzlich muss zwischen Bewegungsartefakten (Bewegungen des Patienten, der Darmperistaltik, des Herzens oder der Atmung) und Artefakten durch Flussbewegungen großer Gefäße unterschieden werden. In der Tiermedizin sind MRT-Aufnahmen nur möglich, wenn das Tier unter Sedation untersucht wird. Moderne Geräte können z.B. Atembewegungsartefakte minimieren, indem sie Messungen in Atempausen durchführen. Herzbewegungen und Flussartefakte großer Gefäße können durch EKG-gesteuerte Geräte minimiert werden (Weishaupt *et al.*, 2009).

- *Partialvolumeneffekte und Teilvolumenartefakte*: Sie treten auf, wenn innerhalb eines Voxels Strukturen mit unterschiedlichen Signalintensitäten (z.B. Muskel und Fett) vorkommen. Die Bildsignale werden gemittelt und als Durchschnittsgrauwert im Bild angegeben (Weishaupt *et al.*, 2009).
- *Chemische Verschiebung*: Dadurch, dass die Resonanzfrequenz der Protonen je nach chemischer Umgebung variiert, können aufgrund von Resonanzfrequenzverschiebungen Signale räumlich verschoben wiedergegeben werden. Das bedeutet, dass z.B. Wasser- und Fettsignale eines Voxels unterschiedlichen Raumelementen zugeordnet werden. Das Fettsignal wird im MR-Bild hyperintens (heller als das Referenzgewebe), das Wassersignal hypointens (dunkler als das Referenzgewebe) dargestellt (Weishaupt *et al.*, 2009).
- *Suszeptibilitätseffekte und –artefakte*: Suszeptibilität besagt, dass jeder Stoff von einem Magnetfeld beeinflusst wird und jeder Stoff ein Magnetfeld beeinflusst. Bestimmte Substanzen (z.B. Metalle, Implantate) führen zu lokalen stationären Feldinhomogenitäten und somit zu einer starken Verzerrung des Magnetfeldes, was in einer Bildverzerrung deutlich wird (Weishaupt *et al.*, 2009).
- *Einfaltungsartefakte (Phase Wrapping)*: Einfaltungsartefakte bezeichnen den Effekt, wenn Strukturen, die außerhalb des Bildausschnittes liegen in das MR-Bild hineingelagert werden. Ragt das zu untersuchende Objekt in der Phasencodierrichtung über das Bildfeld hinaus kommt es zur Wiederholung der Phasen und damit zur Überschneidung der Phaseninformationen von außerhalb und innerhalb des Untersuchungsausschnittes (Weishaupt *et al.*, 2009).

2.4.6. Der Einsatz der MRT in der Tierzucht

Die Magnetresonanztomographie wird vielfach in der Forschung eingesetzt. Klarer Vorteil der Magnetresonanztomographie – gegenüber der ebenfalls genutzten schnittbild-erzeugenden Computertomographie – ist, dass sie ohne Röntgenstrahlen arbeitet (Hendrix, 2003).

Als Methode, mit der am lebenden, wachsenden Tier Muskel- und Fettvolumina bestimmt werden können, ist die MRT in besonderem Maße für die Tierzucht geeignet. Mit Hilfe der MRT lässt sich die Körperkonstitution von Tieren ermitteln, wodurch in der Zucht Qualitätsstandards gehalten und Zuchtziele schneller erreicht werden können (Baulain & Henning, 2001).

Die MRT wurde in der Tierzucht bislang an folgenden Tierarten angewendet:

- Schweine (Bsp.: Scholz *et al.*, 1992; Mitchell *et al.*, 2001; Monziols *et al.*, 2005)
- Schafe (Bsp.: Streitz *et al.*, 1995)
- Rinder (Bsp.: Baulain *et al.*, 1990 – nur Teilstücke)
- Geflügel (Bsp.: Mitchell *et al.*, 1991; Kövér *et al.*, 1998)

2.4.6.1. Der Einsatz der MRT beim Schwein

Zu Untersuchungen über die Eignung der MRT beim Schwein finden sich zahlreiche Angaben in der Literatur. In der vorliegenden Dissertation wird vornehmlich Literatur zur Erfassung der Körperzusammensetzung am lebenden Schwein wiedergegeben.

Bereits Baulain *et al.* (1990) berichten von den Einsatzmöglichkeiten der MRT für die Erfassung der Körperzusammensetzung. Da die MRT aufgrund der guten Detailerkennbarkeit und der wiederholten Einsetzbarkeit für Wachstumsanalysen und damit für die Bestimmung der Körperzusammensetzung hervorragend geeignet ist, empfehlen die Autoren dieses bildgebende Verfahren vermehrt in der Forschung einzusetzen, um letztendlich einen routinemäßigen Einsatz bildgebender Verfahren in der Praxis zu ermöglichen.

Fowler *et al.* (1992) bestätigen mit ihren Untersuchungen, dass mittels MRT Fettgewebsmessungen *in vivo* möglich sind. 12 Schweine wurden dazu in zwei Gruppen gemästet: eine adipöse Gruppe und eine magere Gruppe, die bei einem Gewicht von 76 kg untersucht wurden. Von jedem Tier wurden 13 transaxiale Schnitte mittels MRT angefertigt, jeder Schnitt mit einer Schichtdicke von 12 mm. Die Tiere wurden nach der MRT-Untersuchung getötet, eingefroren und in Scheiben entsprechend der MRT-Schnitte zerlegt (Scheibendicke 20 mm, sägebedingt). Als Referenz dienten Zerlegung und chemische Analyse. Die Schweine der adipösen Gruppen wiesen erwartungsgemäß mehr Fettgewebe

auf als die Schweine der mageren Gruppe. Unterschiede im Knochengewicht oder im Knochenfett wurden nicht festgestellt. Die Korrelationen für das Fettgewebe zwischen MRT und Zerlegung ($r = 0,980$) bzw. zwischen MRT und chemischer Analyse ($r = 0,979$) waren ebenso hoch, wie die zwischen Zerlegung und chemischer Analyse ($r = 0,955$). Unterschiede zwischen den Schweinegruppen fielen für den Fettgehalt in der Schulterregion und in der Bauchregion auf. In den Schnitten vor und hinter der Schulter überschätzte die MRT den Fettgehalt bei Schweinen der adipösen Gruppe. Bei Schweinen der mageren Gruppe überschätzte die MRT den Fettgehalt nur im Schnitt vor der Schulter. Zu Unterschätzungen des Fettgehaltes kam es in der adipösen Gruppe bei Schnitten in der Bauchregion. In der mageren Gruppe dagegen kam es zu Unterschätzungen des Fettgehaltes im Schnitt nach der Schulter und in der Bauchregion. Als mögliche Ursache nannten die Autoren den Partialvolumeneffekt und das in der Nackenregion und an der Schulter diffus verteilte Fettgewebe, was nicht immer als solches erkannt wurde. Der Gesamtfettanteil (ermittelt durch MRT) zeigte größere Übereinstimmungen mit dem Gesamtfett ermittelt aus chemischer Analyse, als das durch Zerlegung ermittelte Fettgewebe. Für Fowler *et al.* (1992) ist die MRT eine genaue, wiederholbare und stabile Methode für die *in vivo* Bestimmung des Fettgewebes. Aufgrund der Genauigkeit der Ergebnisse schließen die Autoren, dass die MRT auch zur Fettgewebsbestimmung beim Menschen geeignet ist.

Henning (1992) untersuchte an 75 Deutschen Landrasse Schweinen (Sauen und Kastraten) die Schulter- und Schinkenregion mittel MRT, um dessen Aussagekraft für die Körperzusammensetzung zu ermitteln. Die linke Schlachtkörperhälfte wurde anschließend zerlegt. Die Regionen wurden gewählt, weil es in der Lendenregion (die, bessere Ergebnisse liefert) leicht zu Bewegungsartefakten kommen kann. Die Ergebnisse zeigten Beziehungen von $R^2 = 0,80$ für die Schulter- und $0,85$ für die Schinkenregion. Henning (1992) kommt zu dem Schluss, dass die MRT geeignet ist das Wachstum von Gewebeanteilen zu erfassen, aber aufgrund der Kosten der Forschung vorbehalten bleibt.

Scholz *et al.* (1992) ermittelten die Aussagekraft der Magnetresonanztomographie, um die Körperzusammensetzung anhand von Schnittbildern zwischen dem 13./14. Brustwirbel am lebenden Schwein zu erfassen. Dafür wurden 75 Deutsche Landrasse Schweine (Sauen und Kastraten) mit einem Lebendgewicht von 90 kg mittels MRT (Bruker-Tomograph; 1,5 T; 10 mm Schichtdicke) untersucht und anschließend getötet. Als Referenz diente die

groggewebliche Zerlegung. Zur Auswertung der MRT-Bilder wurde eine Cluster-Analyse gewählt. Die Ergebnisse zeigen, dass Muskel- und Fettgewebe (%) mit einer Genauigkeit von $R^2 = 0,76$ bzw. $0,80$ vorhergesagt werden können. Für die Autoren stellt die MRT daher eine geeignete Methode dar, um die Körperzusammensetzung lebender Tiere anhand des Schnittes zwischen dem 13./14. Brustwirbel zu erfassen, womit die MRT als Referenzmethode für die Tierzucht bzw. die Leistungsprüfung dienen kann.

Baulain *et al.* (1993) untersuchten 210 Schweine der Rasse Deutsche Landrasse mittels eines BRUKER-MRT (1,5 Tesla; 10 mm Schichtdicke) an fünf anatomisch definierten Körperstellen. Es wurden drei verschiedene Gewichtsgruppen untersucht (20 kg, 50 kg und 90 kg). Anschließend wurden die Schweine getötet und die linke Schlachtkörperhälfte zerlegt. Die Ergebnisse zeigten, dass mittels MRT der Magerweichgewebe- ($R^2 = 0,48-0,76$) und der Fettgehalt ($R^2 = 0,71-0,84$) mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann. Die niedrigen Beziehungen für den Magerweichgewebegehalt wurden auf die geringere Variation zurückgeführt. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die MRT eine genaue Methode ist um die Körperzusammensetzung von Schweinen verschiedenen Alters zu bestimmen.

In einer Studie von Baulain *et al.* (1996) ergaben *in vivo* MRT-Untersuchungen präzise Angaben für die Muskel- und Fettmengen in verschiedenen Gewichtsgruppen. Für die Studie wurden 143 Deutsche Landrasse Schweine in drei Gewichtsgruppen (20 kg, 50 kg und 90 kg) eingeteilt und an fünf Körperregionen mittels MRT (Schichtdicke 10 mm) untersucht. Die Regionen wurden auf ihren Fett- und Muskelanteil ausgewertet und mit den Ergebnissen der Vollzerlegung der Tiere in Beziehung gesetzt. Für alle Gewichtsbereiche lagen die Schätzungen für Fett- und Muskelgewebe im Vergleich zur Zerlegung über $R^2 = 0,9$. Somit bietet die MRT für die Autoren eine Möglichkeit die Körperzusammensetzung frühzeitig (ab 50 kg) zu erfassen und dadurch die Körperzusammensetzung am Mastende vorherzusagen.

Baulain (1997) gibt einen Überblick über die Möglichkeiten eines MRT's und dessen Nutzen für die Nutztierwissenschaften: Nötig für eine MRT-Untersuchung am lebenden Nutztier ist immer ein Anästhesie, da es sonst zu Bildartefakten oder Beschädigungen der MRT-Anlage kommen kann. Eine Spin-Echosequenz bietet einen hohen Gewebekontrast und ist somit für die Bestimmung der Körperzusammensetzung am lebenden Nutztier, was die Hauptnutzung eines MRT's in der Nutztierwissenschaft darstellt, besonders geeignet. Durch die Möglichkeit

der Anfertigung von 3D-Rekonstruktionen können Volumen von Geweben bestimmt werden. Aber auch zur Schlachtkörperklassifizierung ist die MRT eine geeignete Methode. Wachstumsanalysen sind möglich, da eine MRT-Untersuchung mehrmals am selben Tier durchgeführt werden kann. Die MRT stellt für Baulain (1997) eine außergewöhnliche Methode dar, die der Nutztierwissenschaft zahlreiche Möglichkeiten bietet, indem fast alle Körperregionen untersucht werden können. Jedoch wird aufgrund der hohen Kosten und der Größe der Anlage ein MRT Forschungsanstalten vorbehalten bleiben und der Ultraschall weiterhin in der Praxis eingesetzt werden.

In einer weiteren Studie von Baulain *et al.* (1998) mit 197 Schweinebäuchen, die zunächst mittels MRT untersucht und anschließend grobgeweblich zerlegt wurden, fanden sich hohe Übereinstimmungen zwischen den Untersuchungsergebnissen. Baulain *et al.* (1998) empfehlen aufgrund der Ergebnisse eine Kombination aus den konventionellen Leistungsprüfmaßen mit der Messung am Bauch im Bereich der 13./14. Rippe, um die Schätzgenauigkeit zu erhöhen. Für die Autoren bietet die MRT vielfältige und außergewöhnliche Anwendungsmöglichkeiten, da durch spezielle Bildauswertungsmethoden eine äußerst genaue Bestimmung der Körperzusammensetzung am lebenden Tier und am Schlachtkörper durchführbar und zudem auch eine Analyse des individuellen Wachstums möglich ist. Mittels MRT ist eine exakte Trennung von Weichgeweben möglich und Gewebevolumina können direkt bestimmt werden. Nach Baulain *et al.* (1998) sollte die MRT anstelle der zeit- und arbeitsaufwendigen grobgeweblichen Zerlegung als Referenzmethode zur Bestimmung der Körperzusammensetzung genutzt werden. Zudem könnte sie als Referenzmethode in der Leistungsprüfung bei der Weiterentwicklung der Tierzucht nützen.

Szabo *et al.* (1999) vergleichen bildgebende, nicht *invasive* Verfahren (Real-Time-Ultraschall, Computertomographie und Magnetresonanztomographie), um diese Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für die Tierzucht und die Nahrungsmittelforschung zu bewerten. Für Szabo *et al.* (1999) bieten CT und MRT durch die Möglichkeit der Vermessung von Gewebevolumina ein größeres Potential als der Real-Time-Ultraschall, um die Körperzusammensetzung exakt zu ermitteln. Der Ultraschall stellt eine schnelle und günstige Messmethode dar, dringt jedoch nicht tief genug in den Körper ein um ein Schnittbild zu erzeugen. Zudem hängt die Exaktheit der Ergebnisse vom Gerät, der bedienenden Person, der Messstelle und der Konstitution des Tieres ab. Dennoch sehen Szabo *et al.* (1999) die Ultraschallmessung als

eine geeignete Methode zur Selektion von Tieren in Zuchtprogrammen. Die CT enthält nach Szabo *et al.* (1999) in den Bildern nicht mehr Informationen als die Ultraschalluntersuchung, dennoch können Volumina und Flächen von Geweben bestimmt und die Schlachtkörperzusammensetzung am lebenden Tier ermittelt werden. Für die Autoren liefert die MRT mehr Informationen, was hilfreich bei medizinischen und physiologischen Fragestellungen ist. Anhand der MRT-Bilder können, ebenso wie bei der CT, Flächen und Volumina von Geweben ausgewertet werden. Für die Autoren sind beide Verfahren - CT und MRT – zur Bestimmung der Körperzusammensetzung einsetzbar. Durch deren relativ hohe Kosten und die Ausmaße der Geräte werden diese Methoden jedoch für spezielle Zucht- und Forschungsprogramme vorbehalten bleiben, aber zunächst nicht in der Feldprüfung eingesetzt werden können.

In einer Arbeit von Baulain und Henning (2001) werden verschiedene Studien zu *in vivo* und *post mortem* Untersuchungen mittels MRT an Tieren zusammenfassend dargestellt. *In vivo* Studien an verschiedenen Tierarten haben gezeigt, dass eine präzise Schätzung der Fett- und Muskelmengen möglich ist (Scholz *et al.*, 1993; Streitz *et al.*, 1995; Baulain *et al.*, 1996; Kövér *et al.*, 1998). Bei Untersuchungen an Schweinen (Baulain *et al.*, 1996) zeigte sich, dass Schulterquerschnittauswertungen zu einer besseren Schätzung führten als die Auswertung von Bildern aus dem Keulen- und Lendenbereich. Die Genauigkeit einer Untersuchung mit schnittbilderzeugenden Verfahren wird vor allem darüber bestimmt, in wie weit die im Bild enthaltenen Informationen mit der betreffenden Körperstelle übereinstimmen und wie stark diese Körperstelle mit der Gesamtkörperzusammensetzung korreliert. In *post mortem* Studien wurden hohe Korrelationen für die Fleisch- und Fettmengen festgestellt (Baulain *et al.*, 1998). Die MRT bietet den Autoren eine genaue Bestimmung der Körperzusammensetzung sowohl am lebenden Tier als auch am Schlachtkörper. Durch die Möglichkeit, ab einer gewissen Magnetfeldstärke zudem spektroskopische Untersuchungen durchführen zu können ist die MRT gerade in der Tierzucht und der Muskelstoffwechsel- bzw. Fleischforschung von Interesse (Scholz *et al.*, 1995, 2003).

Mitchell *et al.* (2001) suchten nach den aussagekräftigsten Regionen zur Bestimmung der Körperzusammensetzung von Schweinen. 111 Tiere wurden in vier separaten Experimenten mittels MRT untersucht, die entweder als Ganzkörperuntersuchung oder bezogen auf einzelne Teilregionen durchgeführt wurde. Die besten Ergebnisse, bezogen auf die Beziehung zwischen der Volumenmessung (MRT) und dem Gewicht der Zerlegung, erreichte

der Schinken. Aber auch der Musculus longissimus ($R^2 = 0,93$) und der Psoasmuskel ($R^2 = 0,82$) erreichten hohe Bestimmtheitsmaße, ebenso wie die Rückenfettmessungen (MRT) jeweils im Vergleich mit der Zerlegung. Zur Bestimmung der Körperzusammensetzung wurden die Volumina von zwei subcutanen Fettschichten (Backe und Rücken) und die Volumina von vier Muskelregionen (Schulter, Musculus longissimus, Psoasmuskel, Schinken) ausgewertet. Die Volumenmessung des Rückenfettes (MRT) ergab die höchste Beziehung mit dem Fettanteil ($R^2 = 0,78$), dem Magerfleisch ($R^2 = 0,73$) und dem Gesamtgewicht des Fettes ($R^2 = 0,95$). Die höchsten Beziehungen für das Magerfleischgewicht ergaben die Volumina der Schulter, des Musculus longissimus und des Schinkens ($R^2 = 0,97$ bis $0,98$). Des Weiteren wurde die Aussagekraft einzelner Schnittbilder in Bezug zur Gesamtkörperzusammensetzung ermittelt. Dazu wurden Schnittbilder des Musculus longissimus und des Schinkens ausgewertet. Zusammenfassend konnten Mitchell *et al.* (2001) feststellen, dass die größte Übereinstimmung bei großen Organen und Geweben gefunden werden konnte. Die Autoren empfehlen, dass weitere MRT-Untersuchungen an definierten Stellen mit geringer Schichtdicke durchgeführt werden sollten, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu steigern und den Partialvolumeneffekt zu vermeiden. Mitchell *et al.* (2001) sehen die MRT als eine geeignete, nicht *invasive*, *in vivo* Methode, um Volumenmessungen von Organen oder Geweben durchzuführen und damit die Körperzusammensetzung zu bestimmen.

Mohrmann *et al.* (2006) untersuchten die Entwicklung der Körperzusammensetzung während des Wachstums von Schweinen und verglichen verschiedene *in vivo* Methoden auf ihre Nutzbarkeit. Dazu wurden 440 Schweine in sechs verschiedenen Gewichtsklassen (20 kg bis 140 kg) mit drei verschiedenen Methoden (MRT, Deuterium-Verdünnungsmethode (DT) und chemische Analyse) untersucht. Vorteile der MRT liegen in der Möglichkeit eine virtuelle Zerlegung durchzuführen, mit der bestimmte Bereiche detailliert analysiert werden können. Bei der Auswertung der MRT-Untersuchungsergebnisse zeigte sich, dass das Magerweichgewebe eine geringere Variation aufweist als das Fettgewebe. Die höchsten Wachstumsraten für Magerweichgewebe in Relation zum Körpergewicht wurden in der Lenden-/Bauchregion gefunden, niedrige in der Schulter- und der Schinkenregion. Geschlechtsunterschiede zeigten sich ebenfalls in den Wachstumskurven. Jungsauen wiesen in der Lenden-/Bauchregion höhere Wachstumsraten für Magerweichgewebe auf als

Kastraten. In der Schinkenregion war dies umgekehrt. Die Lendenregion wies, im Gegensatz zu Schulter und Schinken, einen höheren Fettzuwachs im Wachstumsverlauf auf. Dies galt vor allem für Kastraten. Geschlechtsbedingte Unterschiede in der Masse oder dem Fettgehalt wurden erst ab 120 kg Körpermasse signifikant und da vor allem in der Lenden-/Bauchregion sowie dem Schinken. Die Variation im Fettgewebe war bei Jungsaunen am größten und das in allen Gewichtsklassen. Das Wachstum des Magerweichgewebes erreichte für Kastraten das Maximum mit 59,5 kg Körpergewicht und bei Jungsaunen mit 118,75 kg. Die größte Fetteinlagerung trat im Gewichtsbereich zwischen 90 kg und 120 kg auf. Die Studie beweist damit die Aussagekraft der indirekten Methoden, die Körperzusammensetzung während des Wachstums zu erfassen.

Neben der Untersuchung von lebenden Schweinen wurden bislang auch Untersuchungen an Schlachtkörpern durchgeführt. Einige ausgewählte Untersuchungen sollen hier zudem genannt werden:

Untersuchungen über die Genauigkeit der MRT zur Erfassung des Magerweichgewebeanteils im Schlachtkörper wurden von Collewet *et al.* (2005) durchgeführt. 120 Schweineschlachtkörper wurden exakt längs geteilt. Die linke Hälfte wurde zerlegt, die rechte Hälfte mittels MRT (1,5 T) untersucht. Die Untersuchung der Schlachtkörper erfolgte als Ganzkörperuntersuchung. Es wurden zwei Auswertungsmethoden angewendet: (1) anhand eines festgelegten Schwellwertes, wonach die Gewebe in Muskel und Fett eingeteilt wurden und (2) anhand adaptiver Grenzen. Die überzeugendsten Ergebnisse wurden mit den festgelegten Schwellwerten erreicht. Zudem stellten Collewet *et al.* (2005) fest, dass anhand der Untersuchung der rechten Schlachtkörperhälfte die Ergebnisse der Zerlegung der linken Schlachtkörperhälfte sehr genau vorhergesagt werden konnten. Allerdings, so meinen die Autoren, müssten für einen standardisierten Einsatz die Aufnahmeprotokolle überarbeitet werden, so dass das Fettsignal stärker und somit deutlicher erkennbar wird. Die MRT ist als Referenzmethode für Collewet *et al.* (2005) denkbar, um die Zerlegung zu ersetzen. Die Autoren schlagen jedoch vor, diese Untersuchungen erneut an ein und derselben Schlachtkörperhälfte durchzuführen.

In einer Studie von Monziols *et al.* (2006) wurde die Eignung der MRT die Gewebezusammensetzung von Schweineschlachtkörpern und einzelnen Teilstücken zu

bestimmen ermittelt. Dazu wurden von 24 Schweineschlachtkörpern die vier Hauptteilstücke mittels MRT (0,2 T) untersucht und diese anschließend zerlegt. Die Lendenregion zeigte die besten Beziehungen für alle drei Gewebe (Muskel-, Fett- und subcutanes Fettgewebe) zwischen MRT- und Zerlegeergebnissen. Die MRT-Querschnitte zeigten sehr hohe Beziehungen in Bezug auf die Muskelgewichte ($R^2 > 0,97$) in allen vier Teilstücken. Ebenso gute Analyseergebnisse lieferten die ausgewerteten Bilder für den Gesamtfettgehalt und die subcutane Fettauflage ($R^2 > 0,92$) der vier Hauptteilstücke. Schwierigkeiten gab es bei der Ermittlung des intermuskulären Fettes, wo nur die Auswertung des Bauches akzeptable Ergebnisse erzielte ($R^2 = 0,82$ für die Bauchzusammensetzung und $R^2 = 0,89$ für die Zusammensetzung des Schlachtkörpers). Die Autoren sehen die Ursache in der Darstellung des Fettgewebes, was im MR-Bild dieselbe Signalintensität wie Knochenmark besitzt und demnach bei einer automatischen Auswertung falsch zugeordnet wird. Eine weitere Fehlerquelle sehen die Autoren im Partialvolumeneffekt, der aber durch Verringerung der Schichtdicke vermindert werden kann. Die Verringerung der Schichtdicke bewirkt allerdings, dass für die gleiche Aufnahmefläche mehr Bilder erforderlich sind und damit die Aufnahmezeit erhöht wird. Monziols *et al.* (2006) kamen zu dem Schluss, dass die MRT gute Ergebnisse für die Bestimmung des Muskelgehaltes ($R^2 = 0,95$ bis $0,99$) in einzelnen Schnitten und im gesamten Körper liefert und die Zerlegung ersetzen könnte, da die Schlachtkörperzusammensetzung ebenso wie die Körperzusammensetzung der lebenden Tiere exakt geschätzt werden kann. Die Autoren bemerken jedoch, dass dafür die Aufnahmezeit deutlich verkürzt werden muss, was aber mit neueren Geräten und höheren Magnetfeldern möglich erscheint.

Um die Eignung der MRT für die Bestimmung der Schlachtkörperzusammensetzung zu bewerten, untersuchten Baulain *et al.* (2010) 202 Schweineschlachtkörper, die sie in 4 Gewichtsgruppen einteilten. Die lebenden Tiere wurden zuerst nach den Richtlinien der Stationsprüfung in Deutschland einer Leistungsprüfung unterzogen und anschließend geschlachtet. Die linke Schlachtkörperhälfte wurde mittels MRT untersucht und nach den Regeln der EU-Zerlegung zerlegt. Die Schweinehälften wurden virtuell anhand der Schnittbilder in die fünf Teilstücke zerlegt und jeder MRT-Schnitt auf den Fett- und Muskelanteil hin ausgewertet. Alle Bestimmtheitsmaße für die Beziehungen zwischen korrespondierenden MRT- und EU-Referenzzerlegungs-Ergebnissen lagen stets über $R^2 =$

0,95. Die Schinkenregion zeigte in allen Rassen den höchsten Standardfehler (RMSE immer > 0,7 kg). Die Autoren zeigten, dass die MRT eine geeignete Technik ist, um die Schlachtkörperzusammensetzung von Rassen mit unterschiedlichem Magerweichanteil vorherzusagen. Für die Autoren ist die MRT anstelle der Zerlegung einsetzbar.

2.5. Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie

Die Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) zählt zu den nicht *invasiven* Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung bei Tier und Mensch, wenngleich sie ursprünglich zur Knochendichtemessung in der Osteoporosediagnostik entwickelt wurde. Anhand der Röntgenschwächung kann auf das bestrahlte Gewebe geschlossen und somit die Körperzusammensetzung bestimmt werden.

2.5.1. Grundlagen der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie

2.5.1.1. Entwicklung der Photonenabsorptionsmessung

Die Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie stellt eine Weiterentwicklung der Dual-Photonen-Absorptiometrie (DPA) dar (Grier *et al.*, 1996). Die DPA wurde in den frühen 60er Jahren genutzt, um die Knochenmasse an Gliedmaßen zu bestimmen (Cameron & Sorenson, 1963).

Das Grundprinzip der Messung liegt in der Aussendung von Röntgenstrahlen und der Messung der Röntgenschwächung nach Passage durch den Körper. Daher besteht sowohl der Grundaufbau der DPA als auch der der DXA aus einer Photonenquelle und einem Detektor. In den frühen 80er Jahren wurden ^{109}Cd und ^{153}Gd als Energiequelle genutzt. Doch mit der Weiterentwicklung der Geräte wurden die Radionuklidquellen durch eine Röntgenquelle ersetzt. Die dadurch erzeugten Röntgenstrahlen weisen ein weites Spektrum von Photonenenergien (15 keV bis 140 keV → Lexxos DR, Fa. DMS) auf. Der Vorteil einer Röntgenröhre gegenüber den Radionuklidquellen liegt in der höheren Photonenflussdichte und resultierend daraus in einer kürzeren Messzeit bei höherer Genauigkeit, was wiederum die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse steigert (Laskey & Phil, 1996).

2.5.1.2. Aufbau eines DXA-Scanners

Der DXA-Scanner, unabhängig von welchem Hersteller, besteht aus einem Tisch, auf dem der Patient positioniert wird und einem mobilem Arm, der über dem Tisch angebracht ist. Je nach Hersteller befindet sich die Röntgenquelle im Inneren der Tisches (Laskey & Phil, 1996) oder im mobilen Arm wie beim Lexxos DR-System (Flashbeam-DXA-Scanner, Fa. DMS,

Frankreich; Boudousq *et al.*, 2003, Blake *et al.*, 2005). Entscheidend ist, dass sich Röntgenquelle und Detektor stets auf einer Ebene befinden und der Detektor so ständig die Strahlung bzw. deren Abschwächung messen kann.

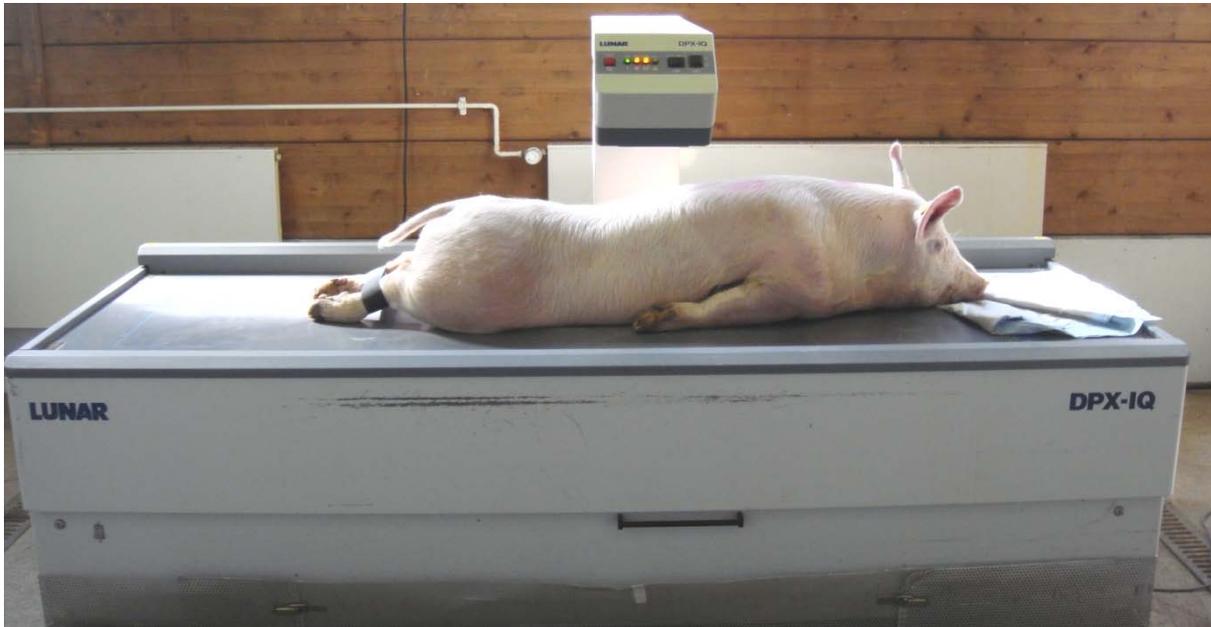


Abb. 8: DPX IQ der Firma GE LUNAR am Lehr- und Versuchsgut der LMU bei der Untersuchung eines Deutschen Edelschweins

2.5.1.3. Physikalische Grundlagen der DXA

Zahlreiche Autoren beschreiben die physikalischen Grundlagen des DXA-Scanners in ihren Arbeiten (Laskey & Phil, 1996; Mitchell & Scholz, 2001). So findet sich zum Beispiel eine detaillierte Beschreibung des physikalischen Konzepts der Photonenabsorptionsmessung und der damit möglichen Analyse der Körperzusammensetzung bei Pietrobelli *et al.* (1996).

Das Prinzip der DXA beruht auf der Messung der Schwächung der Röntgenstrahlen nach ihrer Passage durch den Patienten. Es werden zwei Röntgenstrahlen mit verschiedenen Energieniveaus verwendet. Die Erzeugung dieser zwei Energieniveaus kann verschiedenartig erfolgen: Eine Methode besteht in der Verwendung sogenannter „K-Schalen-Filter“, die aus seltenen Atomen wie Cerium oder Samarium bestehen. Elektronen mit einer Energie, die nahe an der Bindungsenergie der K-Schalen-Elektronen liegt, werden bei Interaktion mit dem Filter abgeschwächt. Ursache dafür ist, dass diese Elektronen in der Lage sind, die Elektronen der K-Schale herauszustoßen, wodurch sie selbst Energie verlieren. Dieses Phänomen verursacht eine charakteristische „Absorptionskante“. Das bedeutet, dass an

diesem Energieniveau die Photonenintensität abrupt geschwächt wird (Pietrobelli *et al.*, 1996; Scholz, 2002). Eine andere Methode, die unter anderem bei Geräten der Firma Hologic verwendet wird, erzeugt Elektronen mit zwei Energieniveaus, indem die an der Röntgenröhre angelegte Spannung gepulst wird (Laskey & Phil, 1996). Unabhängig davon, wie die zwei getrennten Photonenstrahlen entstehen, besitzt der eine Strahl eine niedrige Energie von z.B. 40 keV und der andere eine hohe Energie von z.B. 70 keV (wie für die GE Lunar Geräte DPX-L, -NT, -MD oder -IQ). Andere Hersteller (z.B. Norland, Hologic, DMS) bzw. neuere Gerätegenerationen benutzen andere Energieniveaus (Loesel *et al.*, 2010). Bei Geräten, wie dem GE Lunar *iDXA* wird zudem ein weitwinkliges Fächerstrahlensystem verwendet (GE Lunar, 2010), während für das Lexxos-System der Firma DMS ein pyramidenförmiges Strahlensystem (flash beam oder cone beam) Verwendung findet (Boudousq *et al.*, 2003, Blake *et al.*, 2005).

Die Strahlenintensität wird beim Durchgang durch Gewebe abgeschwächt. Diese Abschwächung ist je nach Gewebeinteraktion unterschiedlich stark. Die Photonenquelle erzeugt einen Photonenstrahl, der eine Anfangsintensität (I_0) besitzt. Nachdem dieser Photonenstrahl Gewebe passiert hat, ist dessen Strahlungsintensität (I) durch die Gewebeinteraktion geringer. Diese verringerte Strahlungsintensität (I) wird mit Hilfe des Detektors gemessen. Die Abschwächung der Photonenstrahlung ist proportional zum linearen Abschwächungskoeffizienten (μ) der Substanz und der Weglänge (L). Folgende Formel beschreibt dies mathematisch (Pietrobelli *et al.*, 1996):

$$-d(I/I_0) = \mu \times dL$$

Aufgrund der Tatsache, dass der lineare Abschwächungskoeffizient dichteabhängig ist und menschliche Gewebe oft eine heterogene Dichte aufweisen, wird anstelle des linearen Abschwächungskoeffizienten der Massenabschwächungskoeffizient (μ_m) verwendet ($\mu_m = \mu/\text{Dichte}$).

Bei einer gegebenen Photonenenergie ist der Massenabschwächungskoeffizient eines Elements konstant. Jedes Element und jede Substanz besitzt einen spezifischen linearen Röntgenschwächungskoeffizienten (R-Wert) (Laskey & Phil, 1996; Pietrobelli *et al.*, 1996). Der R-Wert beschreibt die Abschwächung des niedrigen Energieniveaus als Verhältnis zur Abschwächung des höheren Energieniveaus. Pietrobelli *et al.* (1996) ordneten ausgewählten

chemischen Elementen bzw. Verbindungen einen R-Wert zu. Tabelle 1 zeigt die R-Werte einiger Elemente und Verbindungen für die oben genannten Energieniveaus von 40 bzw. 70 keV.

Tab. 1: Theoretische R-Werte ausgewählter chemischer Elemente und Verbindungen; modifiziert nach Pietrobelli *et al.* (1996)

Chemisches Element bzw. chemische Verbindung	Theoretischer R-Wert
Wasserstoff (H)	1,0891
Kohlenstoff (C)	1,2199
Stickstoff (N)	1,3043
Sauerstoff (O)	1,4167
Natrium (Na)	1,9045
Phosphor (P)	2,7418
Chlor (Cl)	3,1510
Calcium (Ca)	3,5422
Fettsäuren	1,2058 – 1,2289
Triglyceride	1,2139 – 1,2333
Proteine	1,2906
Wasser	1,3572
Knochenminerale	2,8617

Elemente mit einer hohen Ordnungszahl haben größere R-Werte als Elemente mit niedrigen Ordnungszahlen. Mit Hilfe der R-Werte können unbekannte Komponenten identifiziert werden. Die grundlegende Modell-Annahme der DXA liegt darin, dass der Körper aus drei Komponenten (Fett, Knochen und Magerweichteile) besteht, die durch ihre unterschiedlichen Abschwächungskoeffizienten differenzierbar sind (Pietrobelli *et al.*, 1996; Scholz, 2002).

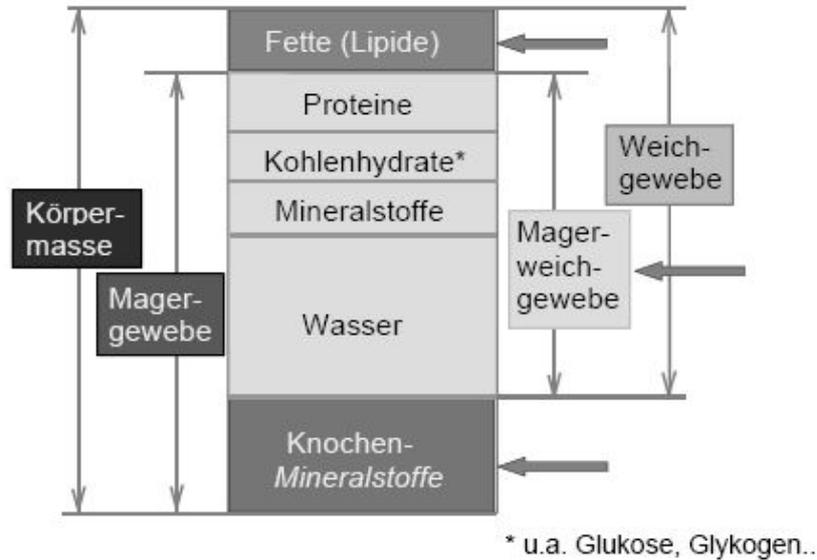


Abb. 9: Drei-Komponenten-Modell der Körperzusammensetzung; Quelle: Scholz et al. (2002)

Durch die Nutzung von zwei Energieniveaus können zunächst nur Massenanteile einer Zwei-Komponenten-Mischung bestimmt werden. Damit DXA drei Komponenten bestimmen kann, werden die ermittelten Pixel zunächst in zwei Gruppen unterteilt: (1) in Pixel, die nur Weichgewebe (Fett und Magergewebe) enthalten und (2) in Pixel, die Knochen und Weichgewebe enthalten (Laskey & Phil, 1996). Um diese Komponenten zu unterscheiden müssen Grenzwerte festgelegt werden. Voraussetzung für die Entscheidung, dass es sich bei dem untersuchten Gewebe um Knochen handelt, ist die Annahme, dass Knochen immer aus mehreren Bildpunkten besteht und nur in größeren Gruppen vorkommt. Anhand der unterschiedlichen R-Werte kann das ermittelte Weichgewebe in Fett (R-Wert $\sim 1,2$) und Magergewebe (R-Wert $\sim 1,369$) differenziert werden (Scholz, 2002). Für jeden Probanden werden so folgende Daten erhoben:

- Knochenmineraldichte [g/cm^2]
- Knochenmineralgehalt [g]
- Fettgewebe [g; %]
- Magergewebe [g; %]

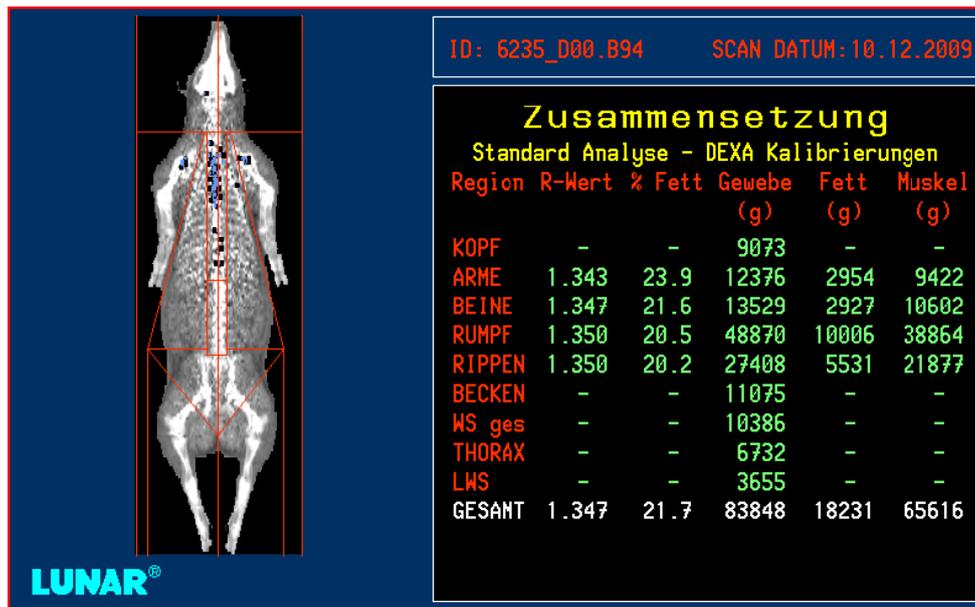


Abb. 10: Ergebnis eines Ganzkörperscans von einem Schwein mittels DPX IQ der Firma GE Lunar

Die Strahlenbelastung bei einer DXA-Untersuchung ist sehr gering. Sie variiert je nach Hersteller und Scanmodus, ist jedoch für alle Pencil-Beam-Scanner geringer als die tägliche Strahlenbelastung (Laskey & Phil, 1996). Beim GE Lunar DPX-IQ beträgt die Belastung in 1 m Abstand von der Röntgenquelle $< 1 \mu\text{Gy/h}$ (Lunar, 1998). Für einen Patienten, der 20 Minuten untersucht wird, bedeutet dies eine Belastung von $0,3 \mu\text{Gy}$. Neuere Geräte wie der GE Lunar *iDXA* mit fächerförmiger Röntgenstrahlung erzeugen eine höhere Belastung. Hier liegt die Belastung für eine Ganzkörperuntersuchung bei $3 \mu\text{Gy}$. Lunar gibt für diese Untersuchung eine Dauer von mindestens 4 Minuten an, die jedoch je nach Körpermasse länger sein kann. Diese neuere Geräte-Generation benötigt rund $1/3$ weniger Zeit, um eine Ganzkörperuntersuchung durchzuführen, benutzt dafür jedoch eine höhere Strahlungsintensität. Die Streustrahlung beträgt in 1 m Abstand von der Röntgenquelle $< 1 \text{mR/h}$ (GE Lunar, 2010).

2.5.2. Einsatz von DXA beim Menschen

Die Methode der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie stammt ursprünglich aus der Humanmedizin. Dort dient sie vor allem der Knochendichtemessung, unter anderem bei der Osteoporosediagnostik, beim altersbedingten Knochenschwund und bei der Therapieüberwachung dieser Erkrankungen (Grier *et al.*, 1996; Laskey & Phil, 1996). Auch heute noch gilt DXA als Goldstandard in der Osteoporosediagnostik beim Menschen. In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen zu DXA, auch einige, bei denen das Schwein als

Modelltier für den Menschen untersucht wurde (Brunton *et al.*, 1993; Svendsen *et al.*, 1993; Pintauro *et al.*, 1996; Rigo *et al.*, 1998).

2.5.3. Einsatz von DXA in der Tierzucht

Über Untersuchungen zur Einsatzmöglichkeit von DXA in der Tierzucht finden sich zahlreiche Studien. Unter anderem wurde DXA bereits an folgenden Tierarten angewandt:

- Kleintiere (z.B.: Lochmüller *et al.*, 1999; Senn *et al.*, 2007; German *et al.*, 2009)
- Geflügel (z.B.: Mitchell *et al.*, 1997a; Swennen *et al.*, 2004; Schöllhorn, 2007)
- Wiederkäuer (z.B.: Mitchell *et al.*, 1997b; Keene *et al.*, 2004; Mercier *et al.*, 2006)
- Affen (z.B.: Black *et al.*, 2001; Dal Mas *et al.*, 2002; Colman *et al.*, 2005)
- Schweine (z.B.: Mitchell *et al.*, 1996; Mitchell *et al.*, 2000; Scholz *et al.*, 2007)

2.5.3.1. Studien zum Einsatz von DXA beim Schwein

In der Literatur finden sich zahlreiche Berichte über DXA-Untersuchungen an Schweinen. Im Rahmen der vorliegenden Dissertation werden vornehmlich Arbeiten über die Einsatzmöglichkeit von DXA zur Bestimmung der Körperzusammensetzung am lebenden Schwein berücksichtigt:

In einer Arbeit von Mitchell *et al.* (1996) wurde die Eignung der DXA zur Ermittlung der Körperzusammensetzung beim Schwein untersucht. Für die Studie wurden 48 weibliche Schweine (Gewicht: 10,2 kg bis 60,5 kg) getötet und mittels DXA untersucht. Die chemische Analyse und die Zerlegung dienten als Referenz. Nach Meinung der Autoren ist das beste Kriterium, um die Anwendbarkeit der DXA zu ermitteln, die exakte Erfassung des Fettgewebes. Es zeigte sich, dass DXA den Fettgehalt (%) bei fetten Schweinen über- und bei mageren Schweinen unterschätzte. Die Ergebnisse für Magerweichgewebe gemessen mit DXA korrelierten hoch ($r = 0,97$) mit denen für Gesamtprotein gemessen durch chemische Analyse (CA). Sowohl die chemische Analyse als auch die DXA-Messungen zeigten wachstums- bzw. fütterungsbedingte Veränderungen der Körperzusammensetzung an. Regionale Messungen zeigten gute Übereinstimmungen zwischen dem Magerweichgewebe (DXA) und dem Proteingehalt (CA). Die Ergebnisse zeigten, dass die Zerlegung und die

regionalen DXA-Auswertungen aufeinander abgestimmt werden müssen. Für die Autoren erscheint DXA geeignet, um regionale Veränderungen in Geweben zu bestimmen. Für die Messung von Fett (%) und Fettgewebemasse im Körper erscheint DXA verglichen mit der chemischen Analyse eine akkurate Methode zu sein. Mitchell *et al.* (1996) empfehlen DXA als eine nicht *invasive* Methode, um wiederholende Messungen an lebenden Tieren durchzuführen.

Als Modelltier für den Menschen wurden 231 Schweine in einer Studie von Mitchell *et al.* (1998a) in einem weiten Gewichtsbereich (5 kg bis 97 kg) mittels DXA untersucht. Die Tiere wurden anschließend euthanasiert und chemisch analysiert. Zwischen dem Gewicht aus der Waage und dem mittels DXA ermittelten Gewicht gab es keine signifikanten Unterschiede ($R^2 > 0,99$). Die Autoren betonen jedoch, dass dies nicht bedeutet, dass DXA grundsätzlich alle Weichgewebe richtig differenziert. Zwischen DXA und chemischer Analyse ergab sich für Fett (%) eine Beziehung von $R^2 = 0,91$. Durch die Untersuchungen in den verschiedenen Gewichtsstufen konnten die Autoren feststellen, dass mit steigendem Körpergewicht auch der Fettgehalt ansteigt, wohingegen Wasser- und Proteingehalt abnehmen. Mitchell *et al.* (1998a) empfehlen weitere Untersuchungen, um eine bessere Genauigkeit der DXA in Bezug auf die Bestimmung der Körperzusammensetzung zu erzielen.

In einer weiteren Studie von Mitchell *et al.* (1998b) wurde untersucht, ob DXA ebenso exakt wie die chemische Analyse die Körperzusammensetzung von kleinen Schweinen in einem engeren Gewichtsbereich von 5 kg bis 27 kg erfassen kann. Dazu wurden 97 Ferkel mittels DXA untersucht, geschlachtet und mittels chemischer Analyse analysiert. Mitchell *et al.* (1998b) stellten fest, dass der Fettgehalt im Vergleich zur chemischen Analyse unterschätzt wurde und dieser Unterschied größer wurde, je weniger Fett das Tier besaß (wie bereits in einer früheren Studie deutlich wurde: Mitchell *et al.*, 1996). Die Hydratationszunahme bei Schweinen im Wachstum kann zu einer Unterschätzung des Wassergehaltes führen und somit in einem, nach DXA, geringeren Magerweichgewebeanteil resultieren. Aufgrund der hohen Korrelationen zwischen DXA und chemischer Analyse sehen die Autoren DXA als eine geeignete Methode, um den Körperfettanteil in kleinen Schweinen zu bestimmen, auch wenn eine neue Kalibrierung notwendig erscheint.

Lukaski *et al.* (1999) prüften die Variabilität und die Exaktheit der DXA-Ergebnisse für die Bestimmung der Körperzusammensetzung bei lebenden Schweinen in verschiedenen Scan-Positionen. Als Referenzmethode diente die chemische Analyse. Die Untersuchung erfolgte in Bauch- und Seitenlage (jede Position dreimal). Anschließend wurde die Körpertiefe der Tiere in der jeweiligen Position gemessen, die Tiere danach gewogen und euthanasiert. Eine repräsentative Probe der zerkleinerten Tierkörper wurde chemisch analysiert. Die Autoren konnten keine Unterschiede zwischen Kastraten und Sauen feststellen. Die Gewichte aus der Waage stimmten in beiden Positionen mit den von DXA ermittelten Gewichten überein. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Scan-Positionen festgestellt werden, wengleich das Ergebnis in Seitenlage genauer war. Im Vergleich mit der chemischen Analyse unterschätzte DXA die Fettmasse. Als Ursache dafür sehen Lukaski *et al.* (1999) die ungenügende Erfassung von Fett im Gehirn oder im Knochenmark. In diesem Versuch konnten innerhalb einer Körpertiefe von 16 cm bis 28 cm keine Unterschiede festgestellt werden. Für die Autoren stellt die DXA somit eine geeignete Methode dar, um die Weichgewebezusammensetzung im Körper festzustellen, solange die Körpertiefe 28 cm nicht übersteigt.

Neuere Gerätegenerationen wie der *i*DXA von GE Lunar sind auch für Körpertiefen >28 cm und ein Maximalgewicht von 182 kg konzipiert, so dass die Gewebedicke die Messgenauigkeit nicht beeinflussen sollte (GE Lunar, 2010).

In einer Studie von Mitchell *et al.* (2000) wurden zwei Gruppen von Schweinen mittels DXA untersucht: (1) bestehend aus 17 Tieren (\emptyset Körpergewicht 89,6 kg; maximale Körpertiefe 30 cm) und (2) bestehend aus 54 Tieren (\emptyset Körpergewicht 123,4 kg; maximale Körpertiefe 35 cm). Nach der DXA-Untersuchung wurden die Tiere geschlachtet und die rechte Schlachtkörperhälfte erneut mittels DXA untersucht. Die linke Schlachtkörperhälfte wurde chemisch analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass DXA mit steigendem Körpergewicht einen höheren Fettanteil (%) ermittelt als die chemische Analyse. Ebenso kommt es bei höherem Körpergewicht auch zu Unterschätzungen im Knochenmineralgehalt, vor allem im Bereich der Schulter, der Hals- und der Brustwirbelsäule. Die Autoren beziehen dies auf die dortige Knochen- und Körperdicke/dichte, wodurch die Röntgenstrahlung stark abgeschwächt wird und einzelne Bildpunkte nicht mehr erfasst werden. Vor allem in Gruppe (2) konnten einzelne Bereiche aufgrund der Körpertiefe nicht erfasst werden.

Mitchell *et al.* (2002) untersuchten in einer weiteren Studie, ob regional definierte Scanbereiche eine Alternative zum Ganzkörperscan darstellen können, um die *in vivo* Körperzusammensetzung festzustellen. Hierfür wurden 212 Schweine (56 kg bis 138 kg KGW) mittels DXA untersucht, geschlachtet und deren rechte Schlachtkörperhälfte chemisch analysiert. Die Scans wurden auf den Muskel- und Fettanteil (%) am Ganzkörper und an 14 regional definierten Querschnitten ausgewertet. Die Beziehung zwischen dem DXA-Fettgehalt (%) (einzelner Schnitte und dem Gesamtkörperfettgehalt) und der chemischen Analyse lag bei $R^2 = 0,71$ und $0,85$. Die größte Übereinstimmung zwischen den DXA-Querschnitten und der DXA-Ganzkörperanalyse für Fett wurde in der Schulterregion gefunden. Der Regressionskoeffizient für die Vorhersage der Körperzusammensetzung, basierend auf einem einzigen Querschnitt, war nur geringfügig kleiner als der resultierende aus einem Ganzkörperscan. Die Autoren beschrieben individuelle Fettverteilungsmuster, so dass sie empfehlen, Regressionsgleichungen rassespezifisch zu erstellen, um aus einem Querschnitt die Gesamtzusammensetzung möglichst exakt bestimmen zu können. Mitchell *et al.* (2002) bewiesen, dass die *in vivo* Körperzusammensetzung anhand eines einzelnen Scanbereiches mit hoher Genauigkeit geschätzt werden kann, ohne dass ein zeitlich länger dauernder Ganzkörperscan durchgeführt werden muss.

Suster *et al.* (2003) evaluierten die Eignung von DXA die Körperzusammensetzung lebender Schweine, deren Schlachtkörper und Schlachtkörperhälften zu bestimmen. Zusätzlich verglichen sie die Genauigkeit von DXA mit der der Ultraschall-Rückenspeckmessung. Für diese Studie wurden 151 lebende Schweine (10 kg bis 120 kg KGW) untersucht, geschlachtet und der Rückenspeck mittels Ultraschall bestimmt. Der Schlachtkörper wurde zunächst *in toto* und danach die rechte Schlachtkörperhälfte gescannt, und daraufhin chemisch analysiert. Die Studie zeigte, dass DXA den Fettgehalt in größeren Schweinen unterschätzte und in kleineren überschätzte. Suster *et al.* (2003) vermuteten die Ursache dafür in der Gewebehdratation, die mit steigendem Alter sinkt und somit den Fettanteil beeinflusst. Für die Autoren wird die Körperzusammensetzung mittels DXA exakt bestimmt. DXA stellt nach Suster *et al.* (2003) für die tierzüchterische Selektion und die Schlachtkörperklassifizierung eine vielversprechende Methode dar.

Marcoux *et al.* (2005) untersuchten, ob DXA in der Lage ist die Körperzusammensetzung bei Tieren aus drei verschiedenen genetischen Linien und unterschiedlichen

Magerweichgewebe- und Fettgewebeanteilen zu ermitteln. Dafür wurden 95 Schlachtkörperhälften (\emptyset 20,7 kg \pm 4,2 kg) untersucht. Die linke Schlachtkörperhälfte wurde in Teilstücke (Schulter, Schinken, Lende und Bauch) zerlegt und mittels DXA untersucht. Jedes Teilstück wurde gewogen und die Speckdicke an verschiedenen Stellen mit einem Maßstab ermittelt. Die Zerlegung der Teilstücke diente als Referenz. Die Zusammensetzung der Teilstücke variierte zwischen den Genotypen erheblich. Das Magerweichgewebegewicht (DXA) wurde in Bezug auf die Zerlegung überschätzt, wohingegen die Fett- und Knochenmineralmassen (DXA) unterschätzt wurden. Ursächlich dafür sehen Marcoux *et al.* (2005) die DXA-Kalibrierung, die auf menschliche Körperzusammensetzung eingestellt ist. Unterschiede zwischen den DXA-Messungen und den Ergebnissen der Zerlegung können ebenso auf den Metzger zurückzuführen sein, der nicht jedes Teilstück gleich zerlegen kann und Probleme mit den unterschiedlichen Fett- und Muskelausprägungen der Tiere hat. Die Autoren stellten fest, dass Rasse, Geschlecht und Schlachtgewicht keinen Einfluss auf die Genauigkeit der DXA-Messungen haben und, dass die hohen Bestimmtheitsmaße ($R^2 > 0,95$) zeigen, dass DXA unabhängig von Variationen in der Schlachtkörperzusammensetzung eine geeignete Methode ist, die Körperzusammensetzung zu ermitteln.

Um festzustellen, ob die Schlachtkörperzusammensetzung mittels DXA am lebenden Tier bestimmt werden kann, untersuchten Scholz *et al.* (2007) 140 Schweine zuerst lebend und nach der Schlachtung deren rechte Schlachtkörperhälfte. Um zudem festzustellen, ob Unterschiede zwischen DXA-Geräten vorliegen wurden die Tiere an unterschiedlichen Standorten mit unterschiedlichen Geräten untersucht: (1) in Beltsville, USA: 78 Schweine (GE Lunar DPX-L) und (2) in Oberschleißheim: 62 Schweine (GE Lunar DPX-IQ). Die Tiere hatten ein Gewicht von 60 kg bis 105 kg. Geschlechtsspezifische Unterschiede zwischen *in vivo* und Schlachtkörperzusammensetzung konnten nicht festgestellt werden, auch der Genotyp hatte keinen Einfluss. Unterschiede zwischen den beiden Geräten traten für Fett und Knochenmineralgehalt auf. Auch erzielten verschiedene Scan-Modi unterschiedliche Ergebnisse. Die aufgetretenen Unterschiede können nach den Autoren an (a) den unterschiedlich aufgezogenen Schweinen, (b) den unterschiedlichen Software-Einstellungen und (c) der unterschiedlichen Herrichtung der Schlachtkörper liegen. Die dennoch guten Korrelationen zwischen *in vivo* und Schlachtkörpermessungen für Magerweichgewebe und Fett (%) ($r > 0,72$) beweisen, dass DXA geeignet ist am lebenden Tier die

Schlachtkörperzusammensetzung vorherzusagen und umgekehrt. Dennoch empfehlen Scholz *et al.* (2007) bei einem Datenvergleich zu beachten, welches Gerät, welcher Scan-Modus, welche Softwareversion und welche Analysemethode verwendet wurde. Um einheitliche Vergleiche zu erstellen, müssen die Tiere den gleichen Genotyp besitzen, dieselbe Diät gefüttert bekommen und im gleichen Altersstadium untersucht werden.

Mitchell & Scholz (2009) verglichen die Ergebnisse der Körperanalyse von Schweinen gemessen mittels DXA, bioelektrischer Impedanz und Ultraschall. Es wurden 156 Schweine (zunächst mit 60 kg und anschließend mit 100-110 kg) untersucht, geschlachtet und eine Schlachtkörperhälfte mittels chemischer Analyse analysiert. Signifikante Korrelationen wurden sowohl bei 60 kg als auch bei 110 kg zwischen den DXA-Fettwerten (% , kg) und den Rückenfettwerten aus Ultraschallmessung am Schlachtkörper festgestellt. Die Beziehungen zwischen DXA-Fettmasse und Ultraschallmesswerten für Rückenspeck waren bei 110 kg ($R^2 = 0,82$) höher als bei 60 kg ($R^2 = 0,66$). Zwischen DXA und BIA ergaben sich ebenfalls bei 110 kg hohe Bestimmtheitsmaße ($R^2 = 0,70$ bis $0,87$) für das Magerweichgewebe (% , kg).

2.6. Leistungsprüfung und Zuchtwertschätzung beim Schwein

„Die Leistungsprüfung ist ein Verfahren zur Ermittlung der Leistungen von Tieren einschließlich der Qualität ihrer Erzeugnisse im Rahmen der Feststellung des Zuchtwertes“ (TierZG, 2006). In Deutschland wird die Durchführung der Leistungsprüfungen den anerkannten Zuchtorganisationen auferlegt, die die erlassenen Verordnungen im Rahmen ihres Zuchtprogramms durchzuführen haben (§7(1) TierZG, 2006). Durch die Leistungsprüfung sollen Leistungsfähigkeit, Wettbewerbsfähigkeit und der Qualitätsstandard der erzeugten Tiere verbessert werden (TierZG, 2006). Maßgeblich für die Durchführung der Leistungsprüfung beim Schwein sind folgende Verordnungen und Richtlinien:

- Verordnung über Leistungsprüfungen und Zuchtwertfeststellung bei Schweinen
- Richtlinie für die Stationsprüfung auf Mastleistung, Schlachtkörperwert und Fleischbeschaffenheit beim Schwein
- Richtlinie für die Durchführung der Eber-Eigenleistungsprüfung auf Fleischleistung in Prüfstationen (Stationsprüfung)
- Richtlinie für die Durchführung der Eber-Eigenleistungsprüfung auf Fleischleistung im Feld (Feldprüfung).

Speziell in Bayern wird die Durchführung der Leistungsprüfungen für alle relevanten Tierarten durch die Richtlinien zum Vollzug tierzuchtrechtlicher Vorschriften (TierzR, 9.9.2008) geregelt.

2.6.1. Organisation der Schweineproduktion

Die Schweinezucht wird national sowie international durch verschiedene Stellen kontrolliert. Je nach Bundesland teilen sich verschiedene Organisationen und Vereinigungen die Aufgaben bei der Umsetzung der Zuchtziele. An dieser Stelle sollen einige der international, national und speziell in Bayern tätigen Organisationen genannt werden (Littmann *et al.*, 2006):

- Europäische Vereinigung für Tierproduktion (EAAP = European Federation of Animal Science)
- Zentralverband der Deutschen Schweineproduktion (ZDS) e.V.
- Ringgemeinschaft Bayern e.V. (RG)
- Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern e.V. (LKV)
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
- Erzeugergemeinschaft und Züchtervereinigung für Zucht- und Hybridzuchtschweine in Bayern w.V. (EGZH)
- Fleischprüfing Bayern e.V.
- Tiergesundheitsdienst Bayern e.V. (TGD)
- seit 2008 zusätzlich: Deutsche Herdbuchzucht Schwein (DHS) – gemeinsame Plattform von Schweinezüchtervereinigungen aus Baden-Württemberg (SZV), Bayern (EGZH), Hessen (VSH), Mecklenburg-Vorpommern (HSZV), Mitteldeutschland (MSZV), dem Rheinland (LRS), Rheinland-Pfalz (VSR) und Schleswig-Holstein (SHZ)

2.6.2. Leistungsprüfung beim Schwein

Durch den Wunsch die Leistungsfähigkeit der vorhandenen Schweinerassen in Deutschland zu verbessern, wurde ab 1926 die Leistungsprüfung in Deutschland eingeführt und damit auch die Leistungszucht. Um Zuchtziele einheitlich verfolgen zu können wurden Zuchtmerkmale definiert (Blendl, 1982; Horst & Gregor, 1997).

2.6.2.1. Grundlagen der Leistungsprüfung

Bei der Art der Leistungsprüfung wird unterschieden

- zwischen örtlichen Bedingungen :
Stations- oder Feldprüfung
- und zwischen Informationsquellen:
Vorfahren-, Eigenleistungs-, Geschwister- oder Nachkommenprüfung (Horst & Gregor, 1997)

Generell werden im Rahmen der Leistungsprüfung drei Leistungsgruppen unterschieden:

- Zuchtleistung
- Mastleistung
- Fleischleistung (Blendl, 1982)

a) Unterscheidung anhand der örtlichen Bedingungen der Leistungsprüfung

Die Durchführung der Leistungsprüfung kann als Feld- oder als Stationsprüfung erfolgen. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Prüfungsart sind in Tabelle 2 gegenübergestellt:

Tab. 2: Vor- und Nachteile von Feld- und Stationsprüfung; modifiziert nach Littmann *et al.* (2006)

	Vorteile	Nachteile
Feldprüfungen	<ul style="list-style-type: none"> - geschlossene Ketten mit wenigen Betrieben - große Tierzahlen - kostengünstig - praxisorientiert - Rein-Raus-Verfahren - geringerer Hygiene- und Prophylaxeaufwand - Gruppenhaltung 	<ul style="list-style-type: none"> - größere Fehlerquote - mehrere Produktionsverfahren - verschiedene Schlachtstätten - viele Einflussfaktoren - keine Wiegungen - keine Verzehrserfassung - keine bzw. nur wenige Fleischbeschaffenheitskriterien - nur Klassifizierungsdaten - hoher Datenschwund
Stationsprüfungen	<ul style="list-style-type: none"> - standardisierte Prüf- und Schlachtbedingungen - hohe Vergleichbarkeit - individuelle Futterverzehrsmengenerfassung - mehrmalige Tierwiegungen - viele Schlachtkörper- und Fleischbeschaffenheitskriterien - sensorische Merkmale - viele Detailergebnisse - kein Datenschwund - hohe Aussagekraft 	<ul style="list-style-type: none"> - viele Lieferbetriebe - kontinuierliche Beschickung - hohes Hygienerisiko - großer Prophylaxeaufwand - begrenzte Prüfkapazitäten - hoher Kostenaufwand

b) Unterscheidung anhand der Informationsquellen der Leistungsprüfung

Anhand der Informationsquellen werden folgende Arten der Leistungsprüfung unterschieden:

- Vorfahrenprüfung
- Eigenleistungsprüfung
- Geschwisterprüfung
- Nachkommenprüfung

Die Eigenleistungsprüfung hat dabei den höchsten Stellenwert, weil bei dieser Art der Prüfung alle Merkmale am Tier selbst vor Zuchtbeginn ermittelt und bewertet werden. Allerdings können bislang Schlachtleistungskriterien nicht an dem zur Zucht selektierten Tier selbst erhoben werden. Hierzu muss auf die Nachkommen- oder Geschwisterprüfung ausgewichen werden (Horst & Gregor, 1997).

2.6.2.2. Durchführung der Leistungsprüfung

In diesem Abschnitt wird die Durchführung der Leistungsprüfung in Bayern, am Beispiel der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) beschrieben. Die Beschreibung der Durchführung der Leistungsprüfung folgt dabei der Unterteilung nach Leistungsgruppen.

a. Zuchtleistungsprüfung

Die Zuchtleistungsprüfung umfasst die Aufzeichnung folgender Daten:

- Anzahl geborener und aufzogener Ferkel/Sau
- Zwischenwurfabstand
- Nutzungsdauer

Eingeführt wurde sie erstmals 1926 in der Deutschen Herdbuchzucht und wurde zehn Jahre später als einheitlich, bindende Richtlinie festgesetzt (Blendl, 1982).

Die Zuchtleistungsprüfung in Herdbuchbetrieben wird in Bayern durch das LKV vorgenommen. Alle Sauen und alle Zuchtbetriebe müssen geprüft werden. Die Kennzeichnung der Sauen und der Ferkel (in den ersten 3 Lebenswochen) ist vorgeschrieben.

Darüber hinaus müssen Zuchttiere tätowiert werden. Im Zuchtbuch festgehalten werden müssen, für drei Jahre, folgende Daten: (1) die Anzahl lebend geborener Ferkel, (2) das Wurfdatum, (3) die Anzahl an Anomalien und (4) die Zitzenzahl. Diese Daten müssen bis spätestens am 28. Lebenstag der Ferkel der Züchtervereinigung gemeldet werden.

In LKV-Ringbetrieben erfolgt die Prüfung durch Ringassistenten. Der gesamte Sauenbestand muss geprüft und alle Ferkel mittels Ohrmarke gekennzeichnet werden. Vorgeschrieben ist für diese Betriebe eine jährliche Ermittlung der Zucht- und Aufzuchtleistungen (Littmann *et al.*, 2006).

b. Mastleistungs- und Fleischleistungsprüfung

Die Mastleistung wird erfasst über

- die durchschnittlichen täglichen Zunahmen mit Futtermittelverwertung,
- die Mastdauer und
- über die Verluste während der Mast.

Die Schlachtleistung wird beschrieben durch

- den Anteil fleischreicher Teilstücke,
- das Fett-Fleisch-Verhältnis,
- die Fleischqualität und
- die Schlachtverluste am Schlachtkörper.

Durchgeführt werden diese Prüfungen als Feld- oder Stationsprüfung für Jungeber und Jungsaunen, sowie für deren Halb-, Vollgeschwister oder Nachkommen (Blendl, 1982).

a) Eigenleistungsprüfung im Feld (Ultraschall-Test)

Die Eigenleistungsprüfung im Feld wird bei Jungsaunen und Jungebern durch Ringassistenten durchgeführt und dient als Entscheidungshilfe zur Selektion.

Die Eigenleistungsprüfung von Jungsaunen erfolgt zwischen dem 160. und 210. Lebenstag. Ermittelt werden Mastleistung, Fleischleistung und Exterieurnote. Die Mastleistung wird über die täglichen Zunahmen im Gewichtsbereich von 85 kg bis 95 kg Lebendmasse erfasst. Die Ermittlung der Fleischleistung erfolgt anhand der Speckdickenmessung nach den

„Richtlinien für die Durchführung der Eber-Eigenleistungsprüfung im Feld (Feldprüfung)“ der ZDS (siehe Tab. 3, Abb. 11 und Abb. 12). Verwendet wird dabei entweder ein PIGLOG 105-Gerät der Firma SFK Technology bzw. dazu vergleichbare Geräte. Die resultierenden Werte werden anschließend gewichts- und alterskorrigiert. Die Exterieurnote wird allein durch den Ringassistenten vergeben.

Tab. 3: Ultraschall-Messpunkte bei der Eigenleistungsprüfung; modifiziert nach Littmann *et al.* (2006)

Ultraschall-Messungen:	
Speckmaß B	dünnste Speckauflage über dem Rückenmuskel, in der Mitte zwischen Schulter und Schinken
Speckmaß B und Muskeldicke	in Verlängerung des Speckmaß B an der selben Messstelle
Speckdicke 7 cm seitlich der Rückenmittellinie	in der Mitte zwischen Schulter und Schinken bei DL und DE 15 cm bei Pi und LB 10 cm vor bzw. hinter dem Maß der Körpermitte



Abb. 11: Eigenleistungsprüfung bei einer Jungsau am Lehr- und Versuchsgut der LMU



Abb. 12: PIGLOG 105-Gerät der Firma SFK Technology

Die Eigenleistungsprüfung beim Jungeber erfolgt mit einem Lebendgewicht von 130 kg bis 150 kg nach den „Richtlinien zur Durchführung der Eigenleistungsprüfung im Feld (Feldprüfung)“ der ZDS. Hierbei werden folgende Daten erhoben: Gewicht, Alter, tägliche Zunahme, Speckdicke, Muskeldicke und Bemuskelung. Zur Ermittlung der Speck- und Muskeldicke wird an drei Stellen 7 cm von der Rückenmittellinie das Speckmaß mittels Echolot-Verfahren ermittelt (siehe Tab. 3). Aus diesen Daten wird der Körzuchtwert errechnet (Littmann *et al.*, 2006).

Aufgrund der Ergebnisse der Eigenleistungsprüfung werden Zuchtsauen und Eber in Wertklassen von I bis III eingeteilt. Um in einem Zuchtprogramm eingesetzt zu werden, müssen die Tiere mindestens den Anforderungen der Wertklasse I entsprechen. Für die Einteilung in die Wertklassen gelten die überarbeiteten Erzeugungs- und Qualitätsregeln der Erzeugergemeinschaft und Züchtervereinigung für Zucht- und Hybridschweine in Bayern w.V. (Dahinten, 2011).

b) Stationsprüfung

Die Durchführung der Stationsprüfung ist geregelt in der „Richtlinie für die Stationsprüfung auf Mastleistung, Schlachtkörperwert und Fleischbeschaffenheit beim Schwein vom 04.09.2007“, beschlossen durch den Ausschuss für Leistungsprüfungen und Zuchtwertfeststellung beim Schwein (ALZ) der ZDS. Ein Beschickungsplan regelt die Beschickung der Leistungsprüfanstalt. Die Stationsprüfung ist eine Geschwister- oder Nachkommenprüfung. Eine Prüfgruppe besteht aus zwei (oder mehr) gleichgeschlechtlichen und möglichst gleichmäßig entwickelten Tieren eines Wurfes mit einem Höchstgewicht von 28 kg. Die Fütterung erfolgt als Abruffütterung *ad libitum*. Das Futter ist hinsichtlich seinem Nährwert und seinen Inhaltsstoffen genau definiert. Das Prüfende ist erreicht, wenn ein Tier ein „Schlachtkörpergewicht warm“ von 85 kg erreicht hat, das entspricht in etwa einem Lebendgewicht von 105 kg. Durch die Daten der Fütterung und der Gewichtszunahmen wird die Mastleistung ermittelt. Am Schlachtkörper werden die Merkmale der Schlachtkörperzusammensetzung und der Fleischbeschaffenheit erhoben. Folgende Daten sollten möglichst in den ersten 12h nach der Schlachtung ermittelt werden (Littmann *et al.*, 2006):

- Schlachtkörpergewicht warm und kalt
- Schlachtkörperlänge [cm]
- Rückenspeckdicke an Widerrist, Rückenmitte und Lende [cm]
- Rückenmuskelfläche am Kotelettanschnitt [cm²]
- Fettfläche am Kotelettanschnitt [cm²]
- Fett : Fleisch-Verhältnis
- Speckdicke über der Rückenmuskelfläche (Speckmaß B) [cm]
- Seitenspeckdicke [cm]
- Fleischanteil im Bauch [%]
- pH₁-Kotelett (35-45 Min. *post mortem*)
- LF₂₄-Kotelett (24h *post mortem*)
- Fleischhelligkeit
- pH₂₄-Schinken (24h *post mortem*)
- pH₂₄-Kotelett (24h *post mortem*)

c) Stichprobentest in Kreuzungszuchtprogrammen

Durch die Entwicklung der Kreuzungszuchtprogramme ist es notwendig geworden, dass auch Kreuzungsprodukte einer Leistungsprüfung unterzogen werden (Blendl, 1982). Geregelt ist die Prüfung in der „Verordnung über die Leistungsprüfungen und die Zuchtwertfeststellung bei Schweinen“ (Littmann *et al.*, 2006). Es werden Stichproben der Mütter von Endprodukten ausgewählt und in der Gruppe geprüft. Endprodukte werden einer Fleischleistungsprüfung, Tiere die zur Endproduktherstellung eingesetzt werden, werden einer Zuchtleistungsprüfung unterzogen (Blendl, 1982). Durchgeführt wird der Test vom Ausschuss für Leistungsprüfungen und Zuchtwertfeststellungen beim Schwein (ALZ) der ZDS. Teilnehmen können alle anerkannten Zuchtorganisationen (Littmann *et al.*, 2006).

2.6.2.3. Leistungsanforderungen

An verkaufsfähige Zuchttiere werden zusätzliche Leistungsanforderungen gestellt:

Alle Sauen im Alter von 160-210 Tagen müssen von einem neutralen Tester geprüft werden.

Die Elterntiere müssen ebenfalls geprüft sein. Die Anforderungen, die an deckfähige und trächtige Sauen gestellt werden, sind in Tabelle 4 zusammengefasst (Littmann *et al.*, 2006).

Tab. 4: Leistungsanforderungen an deckfähige und trächtige Sauen; modifiziert nach Littmann *et al.* (2006)

	deckfähige und trächtige Sauen
Alter in Tagen (am Tag der Bewertung)	160-210
Lebendtageszunahmen (g)	bei DL: mind. 450 bei Kreuzungstieren: 480
Zitzenzahl	mind. 6/7 funktionsfähige Zitzen
Exterieur-Punkte	mind. Wertklasse II

Die Leistungsanforderungen an verkaufsfähige Eber sind ebenfalls rassespezifisch. Tabelle 5 stellt die verschiedenen Anforderungen der Eber aus Vater- und Mutterrassen dar. Zusätzlich zu diesen Anforderungen muss jeder Eber mittels Ultraschalltest von einem neutralen Tester untersucht werden (Littmann *et al.*, 2006).

Tab. 5: Leistungsanforderungen an Eber; modifiziert nach Littmann *et al.* (2006)

	Vaterrassen	Mutterrassen
Alter in Tagen (am Tag der Bewertung)	180-300	180-300
Lebendtageszunahmen (g)	mind. 500	mind. 550
Kör-Zuchtwert	mind. 80 (Wertklasse III)	mind. 80 (Wertklasse III)
Zitzenzahl	-/-	7/7

Jeder geprüfte Eber wird anhand seiner Prüfergebnisse in Wertklassen eingeteilt. In anderen Bundesländern (Zuchtorganisationen) gibt es andere, teilweise schärfere Anforderungen an die Zuchttiere.

2.6.2.4. Prüfung auf Stressempfindlichkeit

Durch Einkreuzung verschiedener fleischreicher Rassen, vor allem bei Piétrain, kam es vermehrt zum Auftreten von Fleischqualitätsmängeln und Tierverlusten bei Stress (Strack, 2005). Die Ursache liegt in einer Punktmutation am Ryanodin-Rezeptor-1-Gen (RyR1). Es handelt sich dabei um einen am Ryanodinrezeptor gekoppelten Calcium-Ionen-Freisetzungskanal, der bei Stress oder unter Halothannarkose (bei Defektallelträgern) zu einer übermäßigen Calcium-Freisetzung in der Muskelzelle führt. Die Tiere zeigen Muskelstarre und Hyperthermie, was zum Tod führen kann. Diese Krankheitsform ist auch beim Menschen bekannt und wird zusammengefasst als Malignes Hyperthermie Syndrom (MHS) (Szentkuti, 2005). Das Fleisch dieser Tiere ist blass, weich und wässrig. Man spricht von sogenanntem PSE-Fleisch (englisch: pale, soft, exudative). Mittels Kreuzungsversuchen wurde postuliert, dass ein autosomal rezessives Gen für die Reaktion unter Halothannarkose verantwortlich sei. Nach der Lokalisierung des Gens (1991) auf dem Chromosom 6 erfolgte die Entwicklung des MHS-Gentests (Förster *et al.*, 1992). Mit diesem kann am lebenden Tier der Genotyp identifiziert werden, wodurch eine Sanierung des Zuchtbestandes möglich war und auch heute noch ist (Horst & Gregor, 1997). Aufgrund von *in vivo* Muskelstoffwechseluntersuchungen mittels ^{31}P - und ^{13}C -Magnet-Resonanz-Spektroskopie ergeben sich die folgenden Genotypeigenschaften (Scholz *et al.*, 1995; Scholz 2002; Scholz *et al.*, 2003):

- nn = homozygote Defektallelträger (stressanfällig)
- Nn = heterozygote Defektallelträger (variable Stressreaktion)
- NN = homozygot „normal“ (stresstabil)

Scholz *et al.* (2003) erkannten mittels ^{13}C -Magnetresonanz-Spektroskopie, dass es auch bei heterozygoten Defektallelträgern (Nn) nach „Stressauslösung“ mittels Halothan zu einem massiven Abfall des Glykogenlevels und zu einem gleichzeitigen Anstieg der Körpertemperatur kommt. Die erkannte Reaktion liegt damit im Mittel zwischen den homozygoten „normalen“ (NN) und den homozygoten Defektallelträgern (nn).

2.6.3. Zuchtwertschätzung beim Schwein

Der Zuchtwert eines Tieres entspricht der „erwarteten mittleren Leistung seiner Nachkommen“ und zeigt somit die genetische Abweichung des Tieres bezogen auf die restliche Population (Horst & Gregor, 1997). Der Zuchtwert wird als Gesamtzuchtwert angegeben. Er definiert das Zuchtziel und wird aus einzelnen, nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten gewichteten Zuchtwerten zusammengesetzt. Die wirtschaftliche Wichtung dient dem Ziel, den größten wirtschaftlichen Zuchterfolg für die Population zu erreichen. Die Wichtung der Merkmale folgt dabei dem wirtschaftlichen Ziel dieser Rasse, so dass es zu Unterschieden in der Gewichtung zwischen Mutter- und Vatterassen kommt (Kräußlich, 1997). Die Zuchtwertschätzung beim Schwein wurde 1996 auf das BLUP-Tiermodell umgestellt. BLUP ist die englische Abkürzung für *Best Linear Unbiased Prediction* (zu Deutsch: Beste Lineare Unverzerrte Schätzung). Beim BLUP-Tiermodell werden alle Verwandten-Informationen mit in die Berechnung des Gesamtzuchtwertes einbezogen und Umwelteffekte ausgeschaltet, wodurch eine bestmögliche Genauigkeit erreicht wird (Kräußlich, 1997).

Die Entdeckung einzelner genomischer Marker (1991, „Ryanodinrezeptor-Gen“) legte den Grundstein für die Entwicklung der genomischen Selektion. Diese soll die Möglichkeit bieten exakte Zuchtwerte von sehr jungen Tieren zu bestimmen und dadurch die Selektion zu einem wesentlich früheren Zeitpunkt zu ermöglichen. Denkbar wären „Selektionen“ am Neugeborenen bzw. im Uterus. Es könnten dadurch Nachkommen anhand ihrer genetischen Zusammensetzung differenziert werden, ohne warten zu müssen, von diesen Tieren Ergebnisse einer durchgeführten Eigenleistungs- oder Nachkommensprüfung zu erhalten. In Österreich wird beim Schwein seit 2007 eine markergestützte BLUP-Zuchtwertschätzung durchgeführt, bei der das „Ryanodinrezeptor-Gen“ mit in die Zuchtwertschätzung einfließt (Buske & Gengler, 2009). Für die Rinderzucht bedeutet der Einsatz genomischer Selektion eine starke Verkürzung des Generationsintervalls auf der männlichen Seite, was zudem zu einer Verbesserung der zeitaufwendigen und kostenintensiven Nachkommenprüfung führt (Bennewitz, 2011). Durch die genaue Zuchtwertschätzung anhand einer Vielzahl genetischer Marker (sogenannter SNP's – single nucleotide polymorphisms) ist es möglich den Zuchtwert an sehr jungen Tieren exakt zu erfassen und damit das Generationsintervall deutlich zu verkürzen. Um in traditionellen Zuchtprogrammen sichere Zuchtwerte zu erhalten, müssen

viele Nachkommen erzeugt und geprüft werden, so dass das resultierende Generationsintervall sehr lang ist (Steibel, 2010). Bis zum Einsatz genomischer Marker in der Schweinezucht wird noch einige Zeit vergehen, da die Kosten einer Genotypisierung im Vergleich zum Wert des Tieres sehr hoch sind. Dennoch laufen derzeit Pilotprojekte zur Einführung der „Genomische Selektion“ beim Schwein, in Deutschland unter anderem in Baden-Württemberg. Das Ziel dieser Untersuchungen liegt in der genomischen Vorselektion von Ebern. Die ersten vorgestellten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die genomische Selektion auch für die Schweinezucht vielversprechende Ergebnisse liefern kann (Bennewitz, 2011).

Das Hauptziel einer jeden Zuchtwertschätzung liegt in der exakten Erfassung des Wertes des Tieres für die Zucht, mit dem Ziel die genomische Zusammensetzung des Viehbestandes zu verändern. Entscheidend für die Sicherheit der Zuchtwertschätzung ist der Zeitpunkt der Selektionsentscheidung, womit der Selektionserfolg immer eng mit dem Generationsintervall⁴ verknüpft ist (Schaeffer, 2010). Das Generationsintervall ist definiert als: *das mittlere Alter der Zuchttiere bei der Geburt der Nachkommen, die die Zuchttiere ersetzen können* (Brem, 1990). Das Generationsintervall beträgt für Eber 1-2 Jahre und für Sauen 2-3 Jahre, das heißt, dass ein Zuchttier im Durchschnitt 548 Tage alt ist, wenn die Nachkommen geboren werden, die es in der Zucht ersetzen.

Ziel ist es, den Zuchtwert so früh wie möglich zu bestimmen, um dadurch das Generationsintervall zu verkürzen und schneller den erwünschten Zuchtfortschritt zu erreichen (Schaeffer, 2010). Für die heutzutage angewandten Methoden der Leistungsprüfung gilt jedoch: Je früher der Zuchtwert ermittelt wird, desto unsicherer wird er, da er dann nur auf Informationen beruht, die von den jungen Eltern stammen. Je älter ein Tier wird, desto mehr Informationen über seine Geschwister und Nachkommen gehen in das Modell mit ein und die Schätzung wird sicherer (Kräußlich, 1997). Theoretisch ist es sogar möglich, dass ein Tier bei der Geburt der Nachkommen, die es ersetzen, 325 Tage alt ist. Jedoch ist der Zuchtwert der Elterntiere zu diesem Zeitpunkt nicht gesichert, da die

⁴ Theoretische Formel des Generationsintervalls (Schaeffer, 2010):

$$L = r \times i \times o / R$$

R = Selektionserfolg; r = Genauigkeit der Zuchtwertschätzung; i = Selektionsintensität; o = Standardabweichung der allgemeinen Zuchtwerte; L = Generationsintervall

Informationen nur aus einem Wurf stammen, so dass im Durchschnitt ein Generationsintervall von 412 Tagen erreicht wird, um damit die Informationen von wenigstens zwei Würfen mit einzubeziehen.

Würde die Zuchtwertschätzung auf einer Eigenleistungsprüfung basieren, könnte das Generationsintervall reduziert werden, da die Zuchtwertschätzgenauigkeit höher ist als aus relativ wenigen Nachkommenschaftsleistungen. Bislang ist eine Eigenleistungsprüfung nicht für Schlachtkörpermerkmale möglich, da das entsprechende Tier dafür geschlachtet werden muss. Die Eigenleistungsprüfung bietet den Vorteil, dass die Leistungen des entsprechenden Zuchttieres selbst für die Zuchtwertschätzung verwendet werden und dadurch die Schätzung genauere Informationen beinhaltet, als eine Schätzung basierend auf wenigen Werten einer Nachkommen- oder Geschwisterprüfung bzw. auf Basis der Elternzuchtwerte. Das heißt, wenn es möglich ist den Zuchtwert bereits anhand der Eigenleistung relativ genau vorherzusagen, kann dieser auch am jungen Zuchttier mit gleicher Genauigkeit bestimmt werden, wie nach einer Zuchtwertschätzung anhand mehrerer Nachkommenschaftsleistungen (ohne dass die Eigenleistung bekannt ist). Für Merkmale mit einer hohen Heritabilität (h^2) ist die Vorhersagegenauigkeit aus der Eigenleistung bereits alleine sehr hoch. Diese Genauigkeit kann jedoch gesteigert werden, wenn zusätzlich eine Nachkommenschafts- und Geschwisterprüfung durchgeführt wird und die Eltern- und Großelterninformationen berücksichtigt werden (siehe Abb. 13).

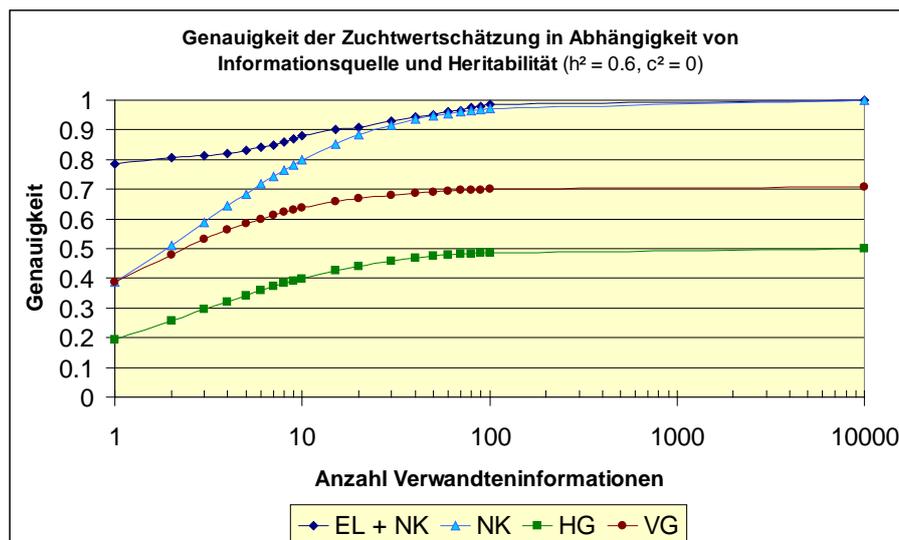


Abb. 13: Darstellung der Genauigkeit der Zuchtwertschätzung in Abhängigkeit von der jeweiligen Informationsquelle und der Heritabilität (EL = Eigenleistung; NK = Nachkommen; HG = Halbgeschwister; VG = Vollgeschwister; h^2 = Heritabilität; c^2 = Koeffizient für gemeinsame Umwelt); Berechnung bzw. Darstellung der Genauigkeiten erfolgte nach den Tabellenwerten aus Flock *et al.* (1971) und den Formeln aus Schönmuth *et al.* (1985)

2.6.4. Literatur über die Leistungsprüfung beim Schwein

In der Literatur finden sich viele Autoren, die sich mit der gegenwärtigen Durchführung der Leistungsprüfung, ihrer Zukunft und ihren eventuell nötigen Neuerungen befassen. An dieser Stelle folgt eine Beschreibung einer Auswahl von Literaturquellen:

Moeller und Christian (1998) untersuchten die Genauigkeit der Echtzeit-Ultraschalluntersuchung des Rückenspecks und des Musculus longissimus beim Schwein und verglichen die *in vivo* Ergebnisse mit denen am Schlachtkörper. Dafür wurden 1127 Tiere viermal mittels Ultraschall untersucht, nach der letzten Untersuchung geschlachtet und der Schlachtkörper erneut mittels Ultraschall untersucht. Sie ermittelten die Speckauflage und die Dicke des Musculus longissimus auf Höhe der 10. Rippe. Am Schlachtkörper wurden dieselben Stellen untersucht. Beim Vergleich der Lebend- und der Schlachtkörpermessung zeigte sich, dass für das Merkmal Speckauflage, die Ultraschallmessung *in vivo* die Messung am Schlachtkörper unterschätzte. Geschlechtsunterschiede bei der Messung am Kotelettmuskel wurden ebenso deutlich. Die Ultraschallmessung *in vivo* überschätzte den Kotelettmuskel bei Kastraten und unterschätzte diesen bei Jungsaunen jeweils im Vergleich zur Schlachtkörpermessung. Auch Rasseunterschiede wurden deutlich. Für weitere Forschungen empfehlen die Autoren die Messtechnik und die Bildbearbeitung zu verbessern, um die Genauigkeit der Messungen bei sehr dicker Speckauflage und großer Muskelfläche zu erhöhen.

Rosner *et al.* (2000) führten vergleichenden Untersuchungen zur Einstufung von Jungsaunen mittels Ultraschall gestützten Systemen (PIGLOG und B-Mode-System) durch. Ziel war es, den Muskelfleischanteil *in vivo* zu bestimmen. Es wurden Kastraten (DL, DE und Leicoma) und Jungsaunen (DE x DL), insgesamt 100 Tiere, ab dem 145. Lebenstag alle 10 Tage mittels PIGLOG und B-Mode-Gerät untersucht. Nach der letzten Messung wurden die Tiere geschlachtet. Erwartungsgemäß nahmen mit steigendem Alter die Speck- und Muskeldicken zu, die Muskelfleischanteile jedoch ab. Mit zunehmendem Alter gelang die Einstufung der Tiere hinsichtlich ihres Muskelfleischanteils besser, jedoch waren die Beziehungen zwischen den Ultraschallmessergebnissen und dem Muskelfleischanteil aus der Schlachtkörperklassifizierung eher gering ($R^2 = 0,29-0,63$). Die Schätzgenauigkeiten des PIGLOG ($R^2 = 0,29$ bis $0,41$) lagen immer unter denen des B-Mode-Gerätes ($R^2 = 0,28$ bis $0,63$), ebenso war der

Schätzfehler beim PIGLOG durchgehend höher ($S_{yx} = 2,59$ bis $3,05$) als beim B-Mode-Gerät ($S_{yx} = 2,04$ bis $2,24$). Die Ergebnisse für die Rasse Leicoma waren durchweg unbefriedigend. Ursachen dafür könnten, nach Meinung der Autoren, in der geringen Tierzahl und der stärkeren Verfettung der Tiere liegen. Aus dieser Arbeit wird deutlich, dass die Schätzgenauigkeit für den Muskelfleischanteil von der Wahl des Messzeitpunkts abhängig ist, daher empfehlen die Autoren eine Untersuchung möglichst um den 180. Lebenstag. Zudem sollten die Untersucher trainiert sein, da die Messgenauigkeit auch durch die bessere Handhabung des Gerätes im Laufe der Versuchszeit anstieg. Das B-Mode-System erzielte höhere Schätzgenauigkeiten als das PIGLOG, was nach Rosner *et al.* (2000) an der Möglichkeit bildlicher Darstellung liegen könnte, wodurch Bewegungen besser korrigiert werden können. Die Autoren machen deutlich, dass gerade die Rückenspeckdicke beim Schwein aufgrund ihrer guten Erfassungsmöglichkeit als Selektionskriterium herangezogen werden sollte.

Dempfle (2004) beschreibt die Weiterentwicklung züchterischer Methoden und Verfahren. Für ihn stellen die zentralen Elemente der Züchtung die Leistungsprüfung, die Zuchtwertschätzung, die Selektion und die entsprechende Anpaarungsplanung dar. Durch die Entwicklung neuer Methoden und technischer Hilfsgeräte konnte die Zuchtwertschätzung laufend verbessert werden, jedoch sind durch die Zuchtprogramme und den Versuch die Zuchtziele immer schneller zu erreichen einige einheimische Rassen mittlerweile vom Aussterben bedroht, da sie nicht den heutigen Marktanforderungen entsprechen und daher nicht mehr in Zuchtprogramme integriert werden. Dempfle (2004) mahnt, dass der Verlust dieser Rassen zu einem Verlust der genetischen Variabilität führt. Für die Zukunft sieht der Autor die Chance molekulargenetische Methoden mit denen der klassischen Tierzucht zu koppeln, um optimale Tierzucht betreiben zu können.

In einer Studie von Müller und Polten (2004) wurden geräte- und personenbedingte Unterschiede bei der Speckdickenerfassung mittels Ultraschall erfasst. Dafür wurde die Studie in zwei Abschnitte unterteilt: Abschnitt (1), indem 62 Tiere mittels Ultraschall untersucht, geschlachtet und erneut untersucht wurden. Dabei wurden vier verschiedene Ultraschallgeräte verwendet, mit denen die Speckdicke an den, in der entsprechenden Richtlinie festgelegten Punkten, bestimmt wurde. Im Abschnitt (2) wurde nach einer Messpunktmarkierung die Seitenspeckdicke mit allen Geräten an 26 Tieren von

verschiedenen Personen gemessen. Müller & Polten (2004) fanden in allen Messpunkten in Abhängigkeit vom Gerät Unterschiede. Zudem fiel auf, dass die Unterschiede zwischen den Ultraschall- und den Schlachtkörpermessungen mit steigender Verfettung der Tiere zunahmen. Die Korrelationen zwischen den Speckdicken und dem Speckmaß lagen immer bei $r > 0,9$. Der zweite Versuchsabschnitt lies personenbezogene Unterschiede in den Ergebnissen deutlich werden. Wurde die Messstelle um 5 cm verschoben, so hatte das deutliche Auswirkungen auf die gemessene Speckdicke. Durch die Messpunktverschiebung kommt es zu falschen Speckdickenmessungen, die nicht mit anderen Werten vergleichbar sind. Problematisch erscheint den Autoren auch die Wahl der ersten Messstelle, dessen Punkt definiert ist als „die Mitte des Schweins“. Dies kann bei großen Schweinen zu einer Verschiebung des Messpunktes in den Widerristbereich führen, in dessen Bereich die Speckdicke ohnehin dicker ist. Für die Autoren bedeutet das, dass die Definitionen in der Richtlinie noch einmal überarbeitet werden sollten.

Thaller & Götz (2005) geben einen Ausblick auf die zukünftigen Anforderungen an die Leistungsprüfung bei landwirtschaftlichen Nutztieren. „Leistungsprüfungen sind die Voraussetzung für Zuchterfolge“, da durch die Zuchtwertschätzung eine Bestimmung der genetischen Veranlagung von Zuchttieren möglich ist. Nur mit exakten Zuchtwertschätzungen können die richtigen Selektionsentscheidungen getroffen werden. Notwendig dafür ist, dass die Leistung der Tiere selbst oder die ihrer Nachkommen oder Geschwister exakt ermittelt wird. Somit sehen die Autoren große Bedeutung darin, dass die Datensysteme der Betriebe mit denen der Zuchtorganisationen vernetzt werden. Staatliche Förderungen werden, nach Einschätzung der Autoren, immer geringer und so liegt es nahe, dass in Zukunft damit zu rechnen ist, dass die Kosten der Leistungsprüfungen hin zu den Landwirten und Zuchtorganisationen verlagert werden. Damit Landwirte diese Kosten übernehmen, muss die Prüfung dem Landwirt eine für ihn nützliche Gegenleistung bringen. Zusammenfassend sehen die Autoren die Leistungsprüfung als Voraussetzung zur züchterischen Bearbeitung wirtschaftlicher Merkmale in der Nutztierzucht. Nun ist es wichtig, dass kostengünstige und genaue Verfahren zur Merkmalerfassung erarbeitet werden und die Vernetzung der bestehenden Datensysteme erfolgt.

3. Versuchstiere und Methoden

Im folgenden Abschnitt sollen der Ablauf der Untersuchungen und die Genetik der im Versuch verwendeten Zuchttiere, sowie die vorgenommene Auswertung der MR-Bilder näher beschrieben werden.

3.1. Versuchstiere

Bei den im Rahmen dieser Dissertation untersuchten Tieren handelte es sich um 117 Zuchttiere aus dem Bestand des Lehr- und Versuchsgutes Oberschleißheim (LVG) der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Der Tierversuch ist unter folgendem Aktenzeichen bei der Regierung von Oberbayern registriert: 55.2-1-54-2531.2-60-07.

3.1.1. Genetik der Versuchstiere

Die Tiere stammten sowohl aus reinrassigen Linien als auch aus Kreuzungen. Insgesamt waren unter den 117 Tieren 95 weibliche und 22 männliche Tiere.

Unter den reinrassigen Linien waren vertreten:

- Deutsches Edelschwein (DE)
- Deutsche Landrasse (DL)
- Piétrain (Pi)
- Schwäbisch-Hällisches Schwein (SH)
- Duroc (Du)
- Large Black (LB)

Die Kreuzungstiere stammten aus Verpaarungen der oben aufgeführten reinrassigen Linien sowie durch zusätzliche Einkreuzung der Rassen Hampshire (Ha), Cerdo Iberico (IB) und Wildschwein (Wi). Die folgende Tabelle zeigt die genetische Verteilung der Versuchstiere:

Tab. 6: Tieranzahl und Aufteilung der verschiedenen Rassen; bei den Kreuzungstieren entspricht die erstgenannte Rasse dem Vatertier (zweite Abkürzung entsprechend für das Muttertier)

	gesamt	weiblich	männlich
Deutsches Edelschwein (DE)	7	7	-
Deutsche Landrasse (DL)	19	19	-
Piétrain (Pi)	4	3	1
Schwäbisch-Hällisches Schwein (SH)	3	3	-
Duroc	3	3	-
Large Black (LB)	18	12	6
DE-DL	14	14	-
DL-DE	7	7	-
Pi-IB	8	4	4
LB-PiHaPiDu	4	4	-
Du-SH	8	7	1
Pi-WiDuLB	9	6	3
Pi-LBWiDu	8	3	5
Ha-SH	3	3	-
Pi-LB	2	-	2
GESAMT	117	95	22

Die Besonderheiten der einzelnen Rassen und ihre Verwendung in der konventionellen Schweinezucht wurden bereits im Abschnitt Kenntnisstand (Kapitel 2.2.) beschrieben, so dass an dieser Stelle darauf verwiesen wird.

3.1.2. Haltung und Fütterung der Versuchstiere

Die Aufzucht der Tiere erfolgte im Flat-Deck mit anschließender Umstallung in einen Außenklimastall. Die Versuchstiere wurden während der gesamten Versuchszeit in Gruppen von je 10-12 Tieren gehalten. Die Fütterung der Tiere erfolgte *ad libitum* über Futterautomaten. Die verwendete Futtermischung wird in Tabelle 7 wiedergegeben.

Tab. 7: Futtermittelzusammensetzung, die den Tieren während der Versuchszeit gefüttert wurde (ADDCON FORMI ist ein Säureadsorbat, Salvana Premium Z ist eine Mineralfuttermischung)

	Zusammensetzung	Mischungsmenge (kg)	Anteil (kg)	Anteil (%)
Futtermittel 2009	<i>Gerste</i>	600	292	48,67
	<i>Weizen</i>	600	36	6,00
	<i>Hafer</i>	600	222	37,00
	<i>Sojabohnen</i>	600	29	4,83
	<i>Salvana Premium Z</i>	600	18	3,00
	<i>ADDCON FORMI</i>	600	3	0,50
Futtermittel ab Januar 2010	<i>Gerste</i>	600	180	30,00
	<i>Weizen</i>	600	87	14,50
	<i>Hafer</i>	600	219	36,50
	<i>Mais</i>	600	60	10,00
	<i>Sojaextraktionsschrot</i>	600	27	4,50
	<i>Salvana Premium Z</i>	600	18	3,00
	<i>ADDCON FORMI</i>	600	3	0,50
	<i>Sojaöl</i>	600	6	1,00

3.2. Methoden

Jedes Versuchstier wurde zweimal untersucht. Eine Untersuchung bestand jeweils aus einer MRT- und einer DXA-Untersuchung. Die Untersuchungen sollten jeweils bei einem Durchschnittsgewicht von 80 kg und 100 kg stattfinden. Da die Tiere immer gruppenweise untersucht wurden, konnte tierindividuell das Zielgewicht nicht immer eingehalten werden. Die durchschnittlichen Gewichte der Tiere und ihr durchschnittliches Alter zu den jeweiligen Untersuchungsterminen sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tab. 8: Durchschnittliches Gewicht und Alter der Tiere an den jeweiligen Untersuchungstagen

	1. Untersuchung	2. Untersuchung
Durchschnittliches Gewicht der Tiere am Untersuchungstag in kg	84,5 ± 11,4	102,2 ± 13,3
Durchschnittliches Alter der Tiere am Untersuchungstag in Tagen	184 ± 9,7	212,8 ± 10,8

Das bedeutet, dass zwischen den zwei Untersuchungstagen durchschnittlich rund 29 Tage lagen und die Versuchstiere in dieser Zeit durchschnittlich 17,7 kg zunahmen.

3.2.1. Vorbereitung der Tiere für die Untersuchungen

Da die Tiere sowohl für die MRT- als auch für die DXA-Untersuchung möglichst bewegungsfrei längere Zeit in einer Position liegen mussten, wurden die Tiere zuvor sediert. Um die Sedation der Tiere möglichst schonend zu gestalten und Zwischenfälle zu vermeiden wurden die Tiere 18 Stunden vor dem Untersuchungstag das letzte Mal gefüttert. Die einzige in Deutschland für Schweine zugelassene Arzneimittelkombination zu Sedationszwecken besteht aus einer Kombination von Ketamin (40 mg/kg Körpergewicht) und Azaperon (2 mg/kg Körpergewicht)⁵. Um die Medikamente dem Gewicht entsprechend dosieren zu können, wurde jedes Tier vor der Injektion gewogen. Die Injektion der Arzneimittel erfolgte intramuskulär unmittelbar im Ohrgrund, während sich das Tier in der Waage befand. War das Tier ausreichend sediert, wurde jedem Schwein eine Braunüle in die Vena auricularis gelegt, um im Bedarfsfall Narkosemittel intravenös nachgeben zu können. Die Braunüle

⁵ verwendet wurden Ursotamin[®] (Wirkstoff Ketamin; Fa. Serumwerk Bernburg) und Stresnil[®] (Wirkstoff Azaperon; Fa. Janssen Neuss)

wurde mit Klebeband fixiert (siehe Abb. 14). Die Wirkungsdauer der Sedation hielt ungefähr 50 Minuten an, danach begannen die Schweine mit ersten Aufstehversuchen.



Abb. 14: „Legen“ einer Braunüle (Venenverweilkatheter) in die Vena auricularis bei einem Deutschen Edelschwein

3.2.2. Untersuchung mittels Magnetresonanztomographie

Die Arbeits- und Funktionsweise eines Magnetresonanztomographen wurde bereits im Abschnitt Kenntnisstand (Kapitel 2.4.) beschrieben. Beim Magnetresonanztomographen des Lehr- und Versuchsgutes handelt es sich um den Siemens Magnetom Open (offenes System), mit einer Feldstärke von 0,2 Tesla (Niederfeldmagnet).

3.2.2.1. Lagerung der Versuchstiere für die MRT

Um eine exakte Bildauswertung zu gewährleisten und um die Sequenz wiederholbar an anatomischen Fixpunkten zu definieren, ist eine gerade Lagerung des Tieres nötig. Die Lagerung in Bauchlage ermöglicht eine Messung beider Körperseiten, ohne dass es zu lagerungsbedingten Druckartefakten auf einer Körperseite kommt, wie es in der Seitenlage der Fall ist. Die Schweine wurden daher in Bauchlage auf der Patientenliege positioniert. Die Vordergliedmaßen waren nach vorne (Extension) und die Hintergliedmaßen nach hinten (Extension) gestreckt (siehe Abb. 15).



Abb. 15: Lagerung eines Deutschen Edelschweins für die Magnetresonanztomographie

3.2.2.2. Verwendete Messprotokolle für die MRT

Für alle Untersuchungen wurde die große Körperspule (large body coil) verwendet und eine T1-gewichtete Spinechosequenz ausgewählt. Die Messprotokolle für die verwendeten Sequenzen und den verwendeten Localizer (Übersichtsbild) sind in Tabelle 9 wiedergegeben.

Tab. 9: Messprotokolle des Localizers und der verwendeten Sequenzen für die MRT

	Localizer (Übersichtsbild)	Sequenz Lendenregion	Sequenz Oberschenkel- und Glutealregion
Pixelgröße	3,13 x 1,56	1,80 x 1,80	1,80 x 1,80
Untersuchungszeit	19 sec	3 min 17 sec	3 min 17 sec
Signal/Rausch Verhältnis	1,00	1,00	1,00
Repetitionszeit (TR)	40 ms	380 ms	380 ms
Echozeit (TE)	10 ms	15 ms	15 ms
Flipwinkel	40°	90°	90°
Anzahl Scheiben	3	10	10
Scheibendicke	15 mm	15 mm	15 mm
Schichtdurchschnitt	verschieden	29,5 mm	24,8 mm
Ausrichtung	verschieden	transversal	coronar
Erregungsanordnung	aufsteigend	ineinander	ineinander
Distanzfaktor		0,25	0,25
Matrix	128 x 156	256 x 256	256 x 256
Field of view (FOV)	400 mm	461 mm	461 mm
Anzahl der Erfassungen	1	2	2
Anzahl der Messungen	1	1	1

3.2.2.3. Gewählte Untersuchungsregionen für die MRT

Bei allen Schweinen wurden zwei Körperregionen untersucht (siehe Abb. 16):

- a. Lendenregion („Kotelettregion“)
- b. Oberschenkel- und Glutealregion („Schinkenregion“)

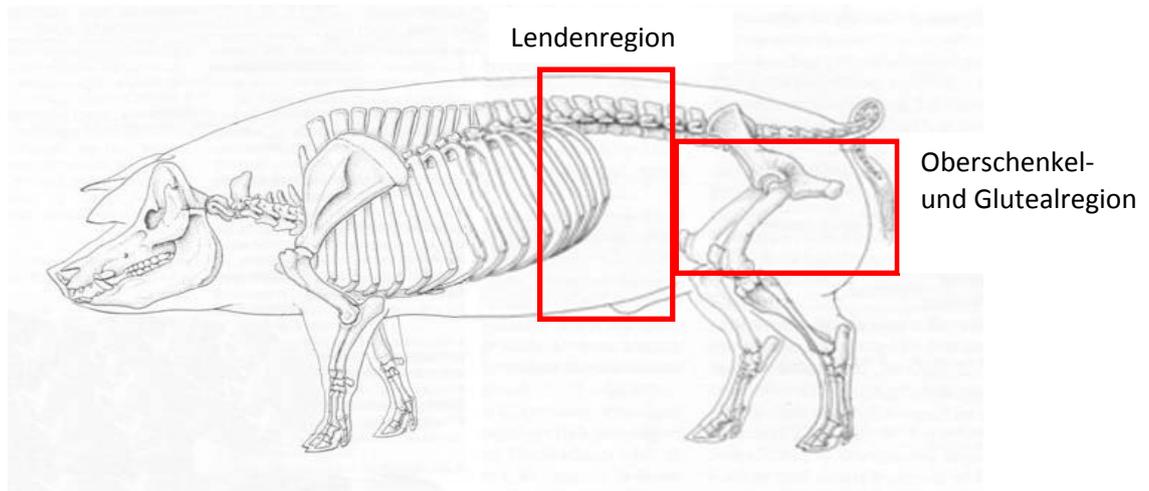


Abb. 16: Schematische Darstellung der Regionen, die mittels MRT untersucht wurden; Schweineskelett aus König & Liebich (2001)

a) Untersuchung der Lendenregion

Für die Untersuchung der Lendenregion wurde die große Körperspule so positioniert, dass der Ursprung der letzten Rippe im vorderen Drittel der Spule lag (siehe Abb. 17, grüner Pfeil). Dafür wurde die letzte Rippe erfühlt und bis zu ihrem Ursprung verfolgt.

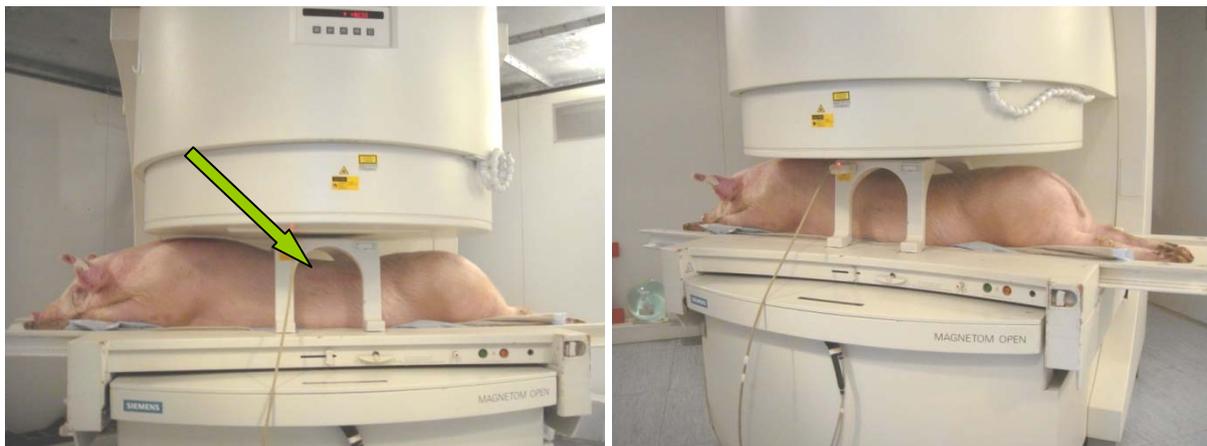


Abb. 17: Positionierung der großen Körperspule zur Untersuchung der Lendenregion (der grüne Pfeil deutet auf den Ursprung der letzten Rippe)

War das Schwein entsprechend unter der Spule positioniert, wurde der Localizer gestartet. Ein Beispiel für ein Übersichtsbild der Lendenregion stellt Abbildung 18 dar:

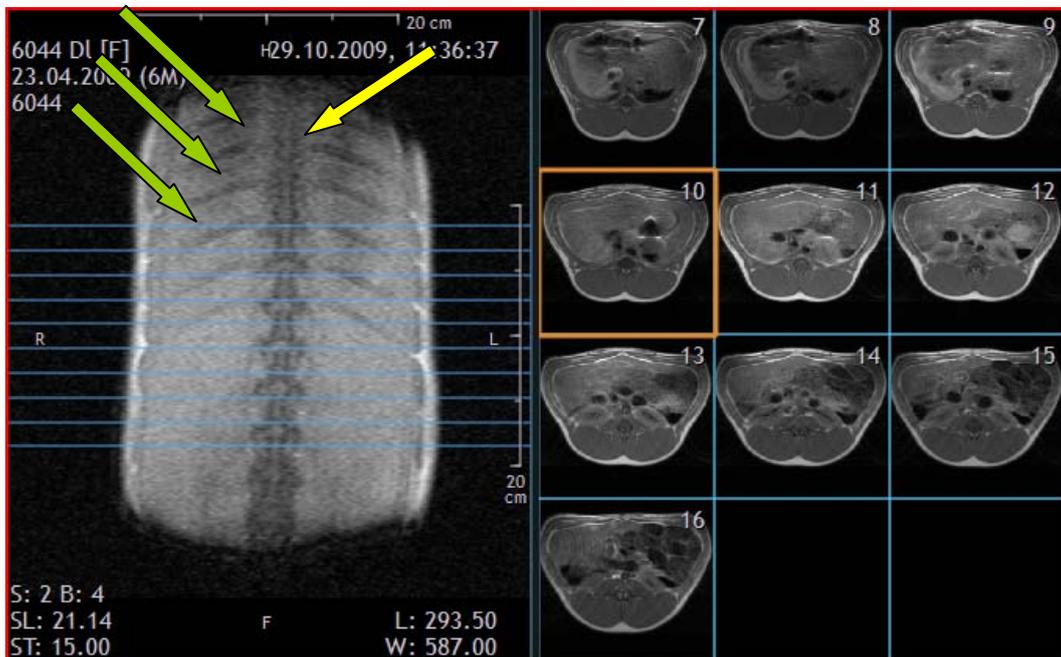


Abb. 18: Localizer (Übersichtsbild) der Lendenregion (die grünen Pfeile deuten auf die Rippen, der gelbe Pfeil zeigt auf die Wirbelsäule; jede der waagerechten blauen Linien repräsentiert einen Querschnitt, der auf der rechten Bildhälfte dargestellt wird)

Auf der linken Bildhälfte ist der Rücken eines Schweins erkennbar. Am oberen Bildrand würde sich der Kopf des Schweines anschließen, im unteren Bildteil das Becken. Das Schwein liegt auf dem Bauch und der Betrachter blickt von oben auf den Rücken. Erkennbar sind die Wirbelsäule (siehe Abb. 18, gelber Pfeil) und die abgehenden Rippen (siehe Abb. 18, grüne Pfeile). Jede der eingezeichneten blauen Linien stellt einen Schnitt dar, der auf der rechten Bildhälfte dargestellt wird.

Anhand des Localizers wurde die Aufnahme-Sequenz positioniert. Für diese Dissertation wurde die Aufnahme-Sequenz so positioniert, dass der vierte Schnitt auf dem Wirbelkörper liegt, an dem die letzte Rippe abgeht (siehe Abb. 18). Eine Sequenz dauerte 3:17 Minuten. Für die Lendenregion wurde eine axiale Schnittrichtung verwendet, was bedeutet, dass die Schnittrichtung senkrecht zur Patientenliege lag. So stellt jeder Schnitt einen Querschnitt durch den Körper des Patienten dar (siehe Abb. 19).

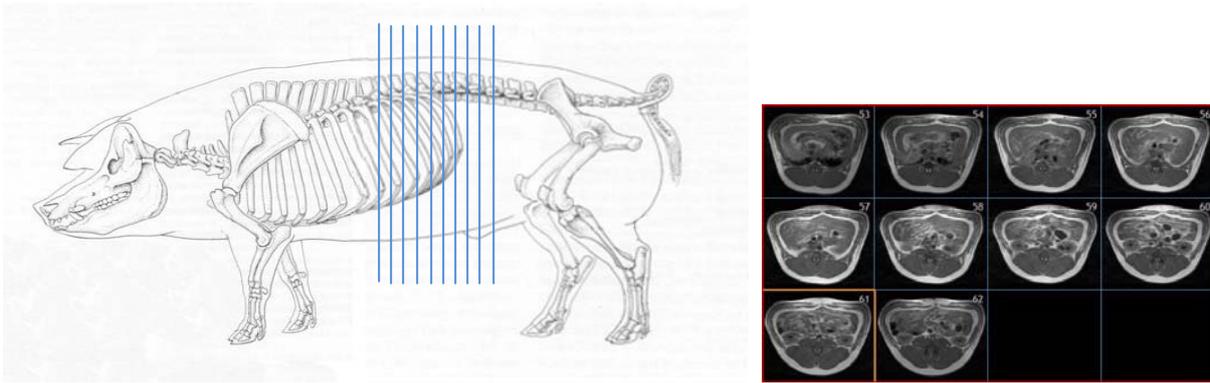


Abb. 19: Axiale Schnittbildfolge der Lendenregion; der linke Bildteil zeigt schematisch eine Sequenz mit 10 axialen Schnittbildern der Lendenregion (jede blaue Linie repräsentiert einen Querschnitt); korrespondierend dazu ist auf der rechten Bildseite eine Schnittbildfolge der Lendenregion einer Large Black Sau mit 80 kg Körpergewicht dargestellt

b) Untersuchung der Oberschenkel- und Glutealregion

Nach der Untersuchung der Lendenregion wurde die Spule für die Gluteal- und Oberschenkelregion positioniert. Die Spule wurde so angesetzt, dass der hintere Rand der Oberschenkel- und Glutealregion gerade noch am inneren Rand der Spule liegt (siehe Abb. 20, grüner Pfeil).



Abb. 20: Positionierung der großen Körperspule zur Untersuchung der Oberschenkel- und Glutealregion (der grüne Pfeil deutet auf den hinteren Rand der Oberschenkel- und Glutealregion)

Anschließend wurde der Localizer gestartet (siehe Abb. 21). Der Localizer der Oberschenkel- und Glutealregion zeigt nun nicht mehr das Schwein von oben, sondern bedingt durch die für die Sequenz gewünschte coronare Schnittrichtung (parallel zur Patientenliege) das Schwein von der Seite. Der obere Bildrand zeigt immer noch in Kopfrichtung und der untere Bildrand zeigt das Becken. Der Rücken des Schweins befindet sich nun am rechten Bildrand (siehe Abb. 21, gelber Pfeil).

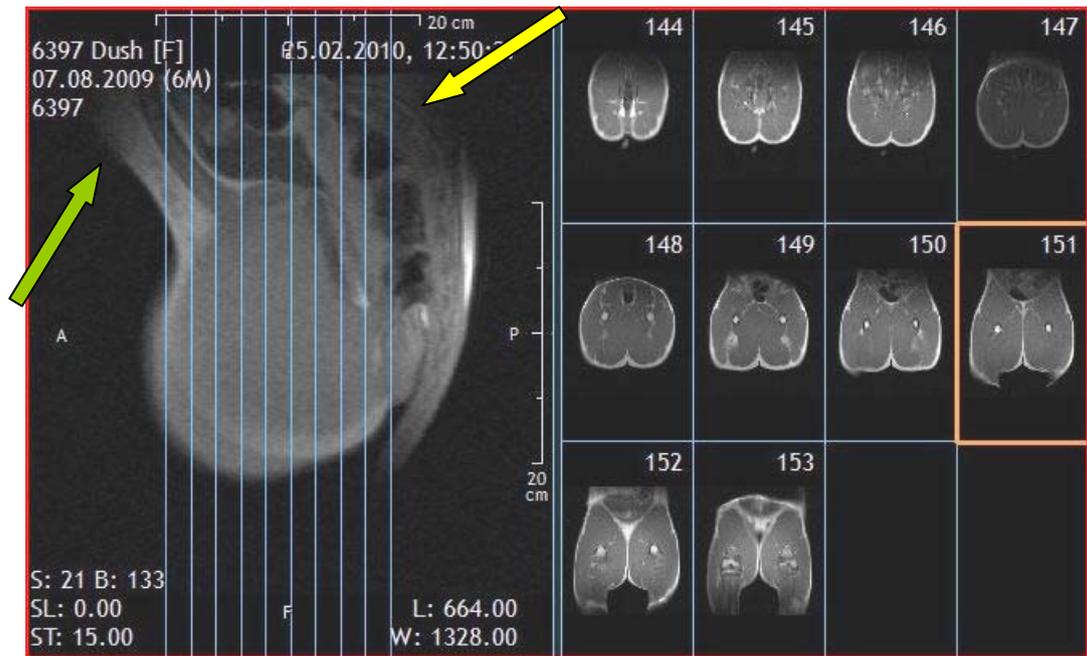


Abb. 21: Localizer (Übersichtsbild) einer coronar geschnittenen Oberschenkel- und Glutealregion (der gelbe Pfeil zeigt auf die Lendenwirbelsäule; der grüne Pfeil zeigt auf den Bauch); das Schwein liegt für den Betrachter auf der rechten Körperseite

Die Sequenz wurde so positioniert, dass die Oberschenkel- und Glutealregion komplett in dem zu untersuchenden Feld lag (siehe Abb. 21). Die Schnittrichtung der Sequenz war coronar (parallel zur Patientenliege) (siehe Abb. 22). Sie dauerte ebenfalls 3:17 Minuten.

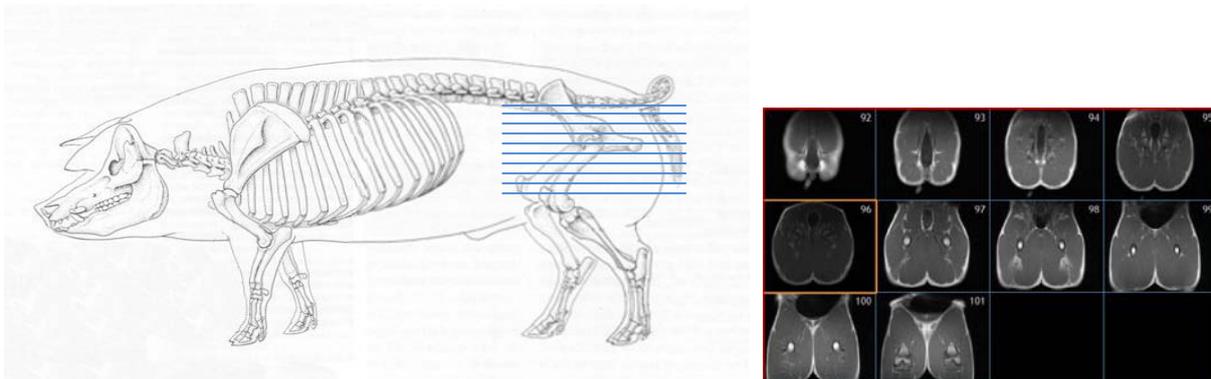


Abb. 22: Coronare Schnittbildfolge der Oberschenkel- und Glutealregion; der linke Bildteil zeigt schematisch eine Sequenz mit 10 coronaren Schnittbildern der Oberschenkel- und Glutealregion (jede blaue Linie repräsentiert ein Schnittbild); korrespondierend dazu ist auf der rechten Bildseite eine Schnittbildfolge der Oberschenkel- und Glutealregion einer Deutschen Landrasse Sau mit 80 kg Körpergewicht dargestellt

3.2.3. Untersuchung mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie

Nach der Magnetresonanztomographie erfolgte die Untersuchung mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie. Die Funktionsweise der DXA wurde bereits im Abschnitt

Kenntnisstand (Kapitel 2.5.) erläutert. Mittels DXA wurde von jedem Schwein ein Ganzkörperscan angefertigt.

Bei dem am Lehr- und Versuchsgut genutzten DXA-Scanner handelt es sich um den GE Lunar DPX-IQ. Dieses Gerät ist zur Ganzkörper- und Teilstückanalyse geeignet. Während der Versuchsreihe wurde der DXA-Scanner vor jedem Untersuchungstag einer Qualitätskontrolle unterzogen, wobei die Funktionsfähigkeit und die einwandfreie Messfähigkeit mittels eines Phantoms geprüft wurde.

3.2.3.1. Lagerung der Versuchstiere für die DXA-Analyse

Die Software des GE Lunar DPX-IQ geht davon aus, dass ein Mensch in Rückenlage auf dem Untersuchungstisch liegt - die Arme neben dem Körper liegend und die Beine gestreckt. Da Schweine nur schlecht auf dem Rücken zu lagern sind, wurden die Schweine in Bauchlage positioniert. Die Vordergliedmaßen wurden nach hinten gebeugt und neben den Körper gelegt, die Hintergliedmaßen nach hinten ausgestreckt (siehe Abb. 23). Um eine bessere Abgrenzung der Vordergliedmaßen vom Brustkorb zu erreichen, wurden kleine Styroporkeile zwischen die Vordergliedmaßen und den Brustkorb gelegt. Die Hintergliedmaßen wurden mit einem Band näher zusammen gelagert, um den Untersuchungszeitraum zu verkürzen.



Abb. 23: Positionierung der Schweine für die Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie auf dem DXA-Tisch des GE Lunar DPX IQ am Lehr- und Versuchsgut der LMU

3.2.3.2. Verwendetes Messprotokoll für die DXA

Jedes Schwein wurde mit dem Modus „Ganzkörper Adult Normal“ gescannt. Ein Ganzkörperscan dauerte je nach Größe des Schweins zwischen 20 und 25 Minuten.

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse eines DXA-Scans vom ersten Untersuchungstag (1) und von demselben Eber am zweiten Untersuchungstag (2).

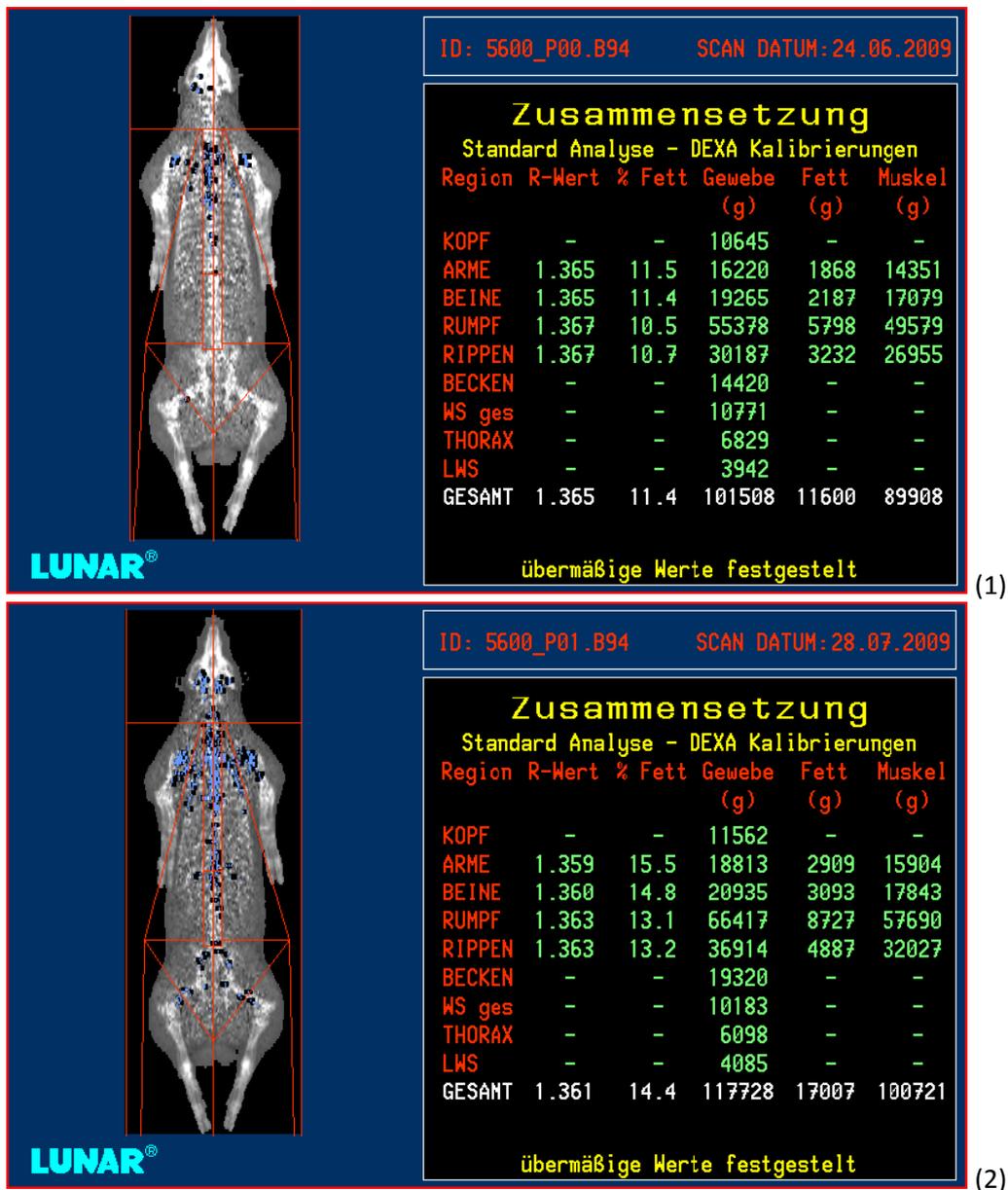


Abb. 24: Ergebnis eines DXA-Ganzkörperscans mittels GE Lunar DPX IQ von einem Pietrain-Eber; (1) zeigt das Ergebnis der Untersuchung des DXA-Scans am ersten Untersuchungstag; (2) zeigt das Ergebnis der Untersuchung des DXA-Scans am zweiten Untersuchungstag (R-Wert = Röntgenschwächungskoeffizient, Muskel = Magerweichtgewebe)

3.3. Auswertung

Im folgenden Abschnitt wird die Auswertung der gewonnenen Bilder beschrieben. Dieser Abschnitt ist in drei Teilabschnitte gegliedert: (1) in einen Teil über die Auswertung der MR-Bilder, (2) einen Teil über die Auswertung der DXA-Ergebnisse und (3) einen Teil über die statistische Analyse der Ergebnisse.

3.3.1. Auswertung der MR-Bilder

Zur Auswertung der MR-Bilder wurde die Able 3D Doctor Software verwendet. Der „3D Doctor“ ist ein 3D-Bildbearbeitungsprogramm, mit dem es möglich ist, Flächen und Volumen von Objekten zu bestimmen.

Um die Auswertung der Bilder nachvollziehbar und wiederholbar zu gestalten, muss zunächst ein Referenzbild festgelegt werden, von dem aus jede Auswertung beginnt. Dieses sollte möglichst an anatomischen Fixpunkten definiert werden, um eine eindeutige Zuordnung zu gewährleisten.

a) Auswertung der Lendenregion

Als Referenzbild für die Lendenregion wurde der Schnitt gewählt, an dem die letzte Rippe gerade noch sichtbar ist (siehe Abb. 25). Für eine bessere Orientierung folgt eine kurze Beschreibung: Das Bild ist so zu verstehen, dass im Bild oben der Bauch des Schweines (siehe Abb. 25, roter Pfeil) und im Bild unten der Rücken mit dem Anschnitt des Musculus longissimus dorsi (Kotelettstrang) und seiner Fettauflage zu sehen ist. Das Bild steht also quasi „auf dem Kopf“.

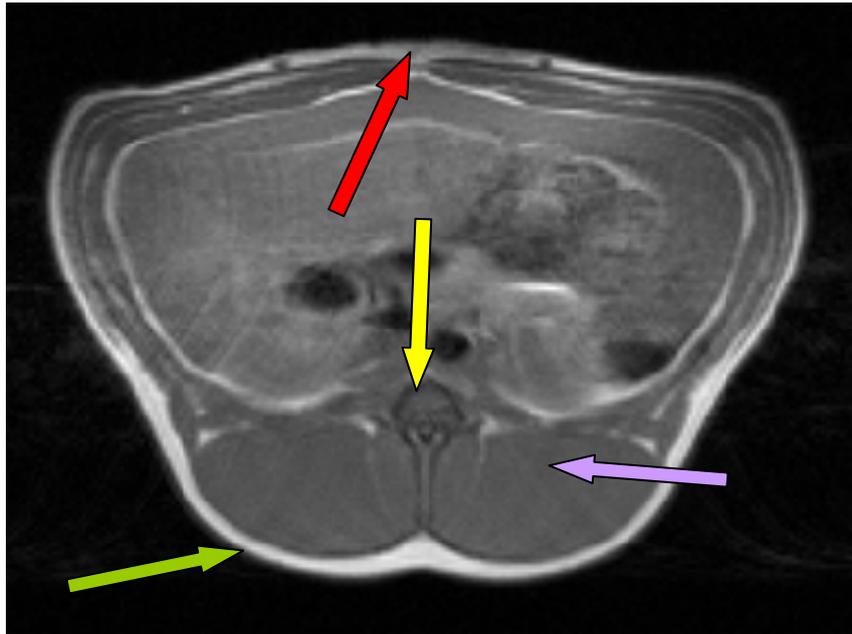


Abb. 25: Referenzbild der Lendenregion (der gelbe Pfeil zeigt auf den Wirbelkörper mit seinem Processus spinosus und dem Ursprung der letzten Rippe; der violette Pfeil deutet auf den Anschnitt des Musculus longissimus dorsi; der grüne Pfeil zeigt auf die Fettauflage; der rote Pfeil deutet auf den Bauch des Schweins)

Die Grenzen des Musculus longissimus dorsi und seiner darüberliegenden Speckauflage sind deutlich erkennbar. Für die Auswertung der Muskel- und Fettvolumina wurden die Begrenzungen der Muskel- sowie der Speckauflageflächen mit dem 3D-Doctor nachgezeichnet (siehe Abb. 26). Dabei muss beachtet werden, dass die im Bild obere Grenze des Musculus longissimus dorsi die Unterseite des Wirbelkörpers darstellt, die nicht in die Muskelfläche eingeschlossen wurde. Lediglich der Processus spinosus (Dornfortsatz) des Wirbelkörpers (siehe Abb. 26, gelber Pfeil) verbleibt in der Muskelfläche und wurde somit zur Muskulatur gezählt. Demnach enthält der Muskelwert der Kotelettfläche immer den Processus spinosus. Für das Rückenspeckvolumen wurde nur exakt der Teil begrenzt, der der Breite des darüber liegenden Muskels entspricht (siehe Abb. 26, grüner Pfeil). Die folgende Abbildung zeigt das ausgewertete Referenzbild der Lendenregion.

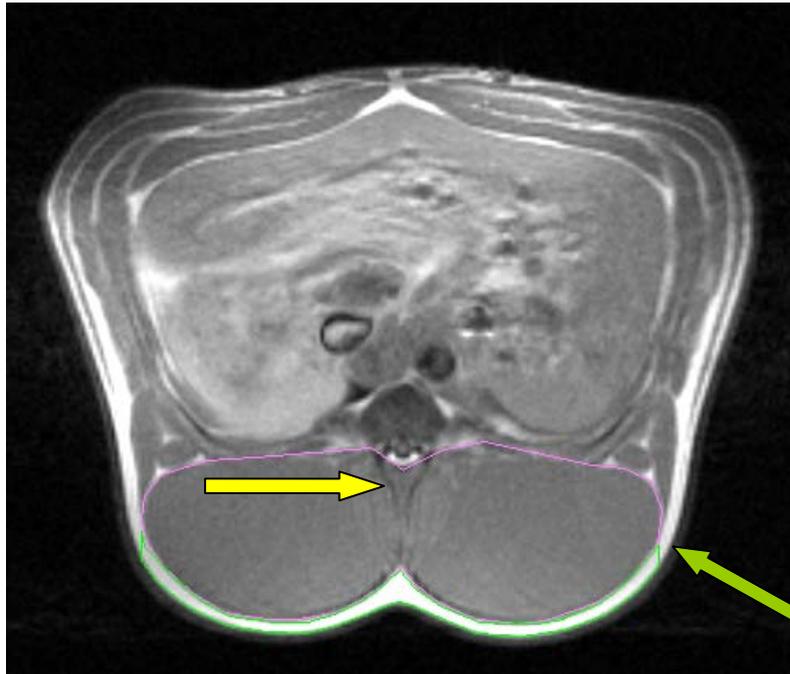


Abb. 26: Ausgewertetes Referenzbild der Lendenregion (die violette Linie stellt die Umrandung des Musculus longissimus dorsi einschließlich dem Processus spinosus des Wirbelkörpers (siehe gelber Pfeil) dar; die grüne Linie umrandet die Fläche des Rückenspecks; die Rückenspeckfläche endet da, wo auch die Muskelfläche an ihrer weitesten Stelle beendet ist, siehe grüner Pfeil)

Die auf dieses Bild nach caudal (Richtung Schwanz) folgenden vier Scheiben wurden ebenso ausgewertet. Demnach besteht eine ausgewertete Lendensequenz aus fünf Schnittbildern, beginnend am Referenzbild. Abbildung 27 (1) zeigt eine ausgewertete Lendensequenz.

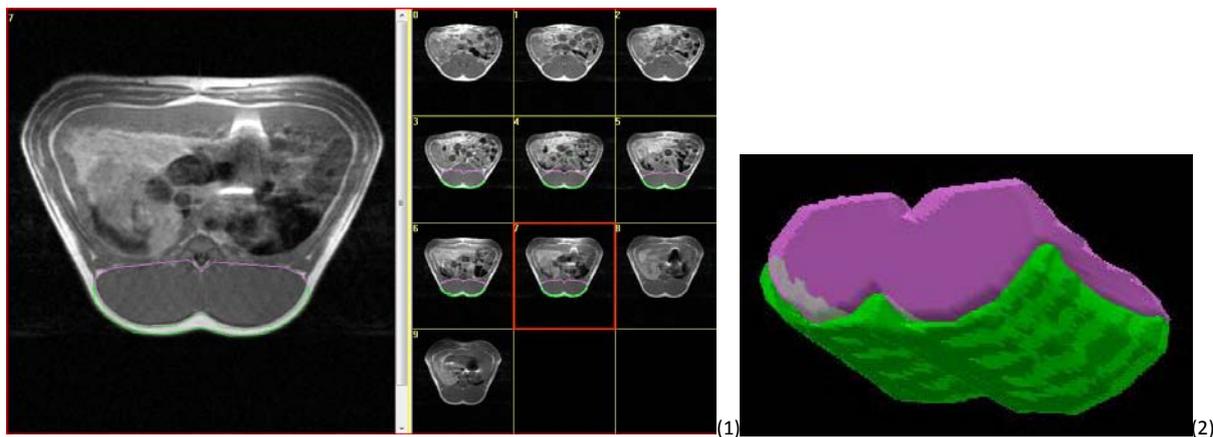


Abb. 27: (1) mittels 3D Doctor ausgewertete Lendensequenz; (2) 3D-Rekonstruktion der fünf ausgewerteten Schnittbilder der Lendenregion

Die 3D Doctor Software kann anhand der Bilddaten, die im DICOM-Format vorliegen, die Schichtdicke der Scheiben erfassen und daraufhin entsprechend das Volumen berechnen. Abbildung 27 (2) zeigt eine 3D-Rekonstruktion von fünf ausgewerteten Scheiben der

Lendenregion. Der violette Bereich entspricht dem Musculus longissimus dorsi und der grüne Bereich dem der Rückenspeckauflage inklusive der Haut.

b) Auswertung der Oberschenkel- und Glutealregion

Für die Auswertung dieser Region wurde ebenfalls ein Referenzbild festgelegt, was in jeder Sequenz zu finden war und aufgrund seiner anatomischen Fixpunkte eindeutig definiert werden konnte. Dadurch wurde sichergestellt, dass immer an der gleichen Stelle mit der Auswertung begonnen wurde. In dieser Sequenz eignete sich der Anschnitt des Beckens, in dem das Acetabulum und der darin liegende Caput femoris (Femurkopf) zu erkennen sind. Abbildung 28 zeigt das verwendete Referenzbild, die Pfeile deuten auf die anatomischen Fixpunkte.

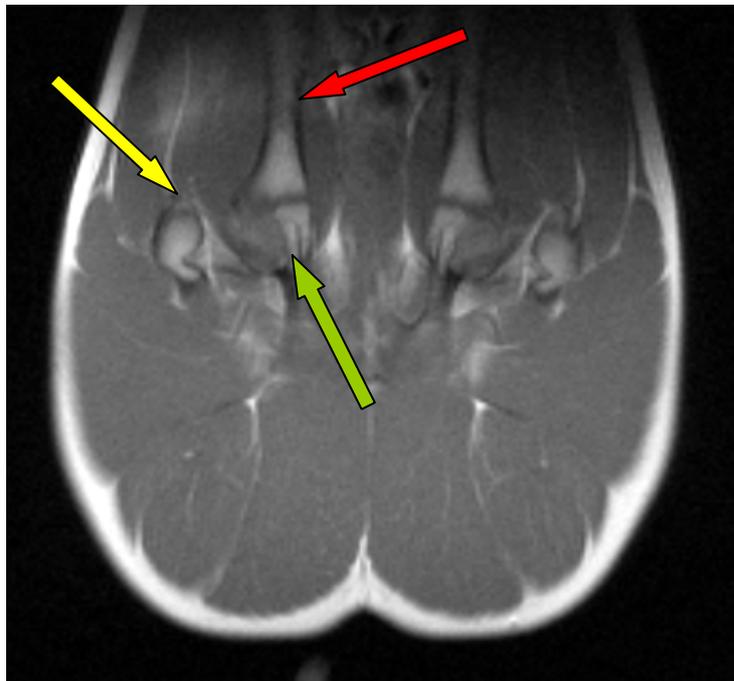


Abb. 28: Referenzbild der Oberschenkel- und Glutealregion (der gelbe Pfeil deutet auf den Femurkopf, der grüne Pfeil zeigt das Acetabulum und der rote Pfeil deutet auf den Beckenknochen)

Die Oberschenkel- und Glutealregion wurde halbautomatisch ausgewertet. Dadurch sollten auch die intermuskulären Fettanteile wiederholbar ausgewertet werden. Um die Bilder halbautomatisch auswerten zu können, musste zunächst eine sogenannte „Region of interest“ (ROI) definiert werden, die die auszuwertende Region umgrenzt (siehe Abb. 29, blauer Kasten). Das ausgewählte Referenzbild eignete sich aufgrund seiner anatomischen Fixpunkte (Becken, Acetabulum, Femurkopf) besonders für die genaue Definition der Lage der ROI. Das obere Ende der ROI wurde so positioniert, dass sie waagrecht unterhalb des

Acetabulums (siehe Abb. 29, grüne Pfeile) und den angeschnittenen Femurköpfen (siehe Abb. 29, gelbe Pfeile) entlang von einer auf die andere Seite verläuft.

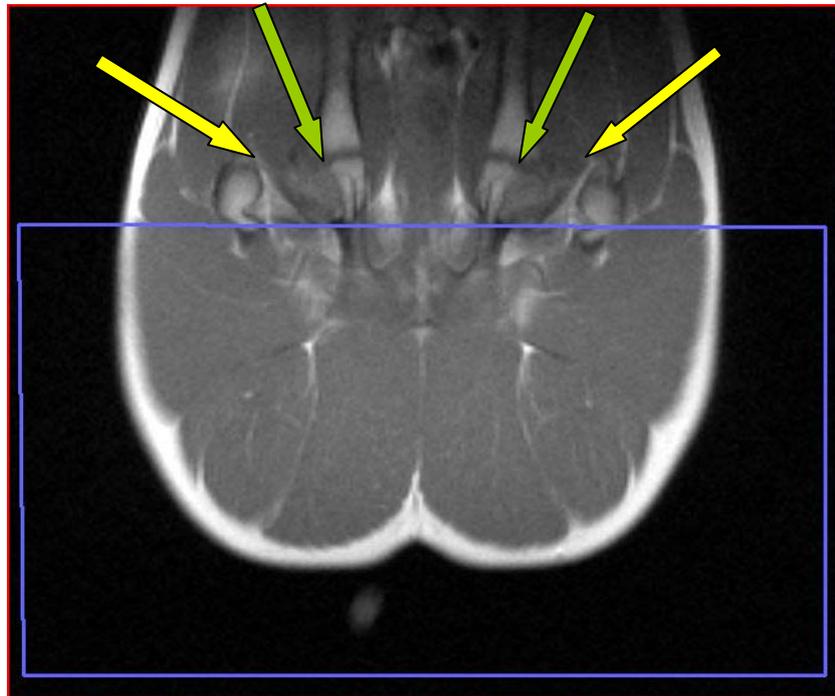


Abb. 29: Definition der „Region of interest“ (ROI; blauer Kasten) (die grünen Pfeile zeigen auf das Acetabulum (Beckenpfanne), die gelben Pfeile deuten auf die Femurköpfe (Oberschenkelköpfe))

Mit Hilfe der 3D-Doctor Software konnte die ROI halbautomatisch ausgewertet werden (siehe Abb. 30). Anhand der verschiedenen Graustufen im Bild lässt sich das Gewebe in Fett (Abb. 30, pink umrandet) und Muskulatur (Abb. 30, grün umrandet) unterteilen. Die Auswertung des Bildes beschränkte sich dabei auf die ROI, weitere Bildanteile wurden nicht berücksichtigt.

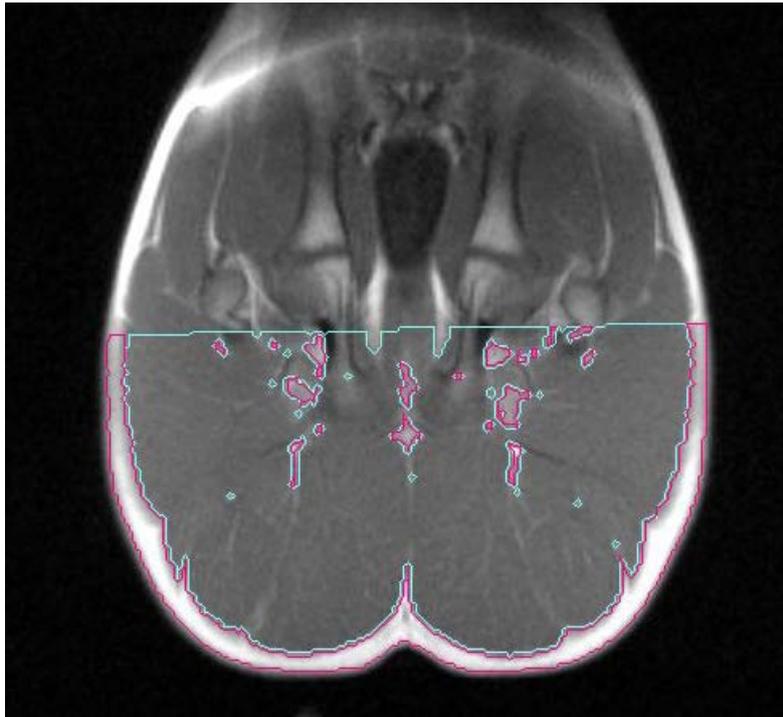


Abb. 30: Mittels 3D Doctor Software ausgewertetes Referenzbild der Oberschenkel- und Glutealregion (die pink umrandeten Bereiche stellen die Fettanteile, die grün umrandeten Bereiche die Muskelanteile der Oberschenkel- und Glutealregion dar)

Die ROI blieb für alle Bilder der Sequenz auf der definierten Ebene stehen und war so auch für die, auf das Referenzbild folgenden Bilder stets an der gleichen Stelle fixiert. Die, auf das Referenzbild in ventrale Richtung (Richtung Unterschenkel) folgenden drei Bilder wurden, wie zuvor beschrieben ausgewertet, so dass eine Sequenz aus vier ausgewerteten Bildern besteht (siehe Abb. 31).

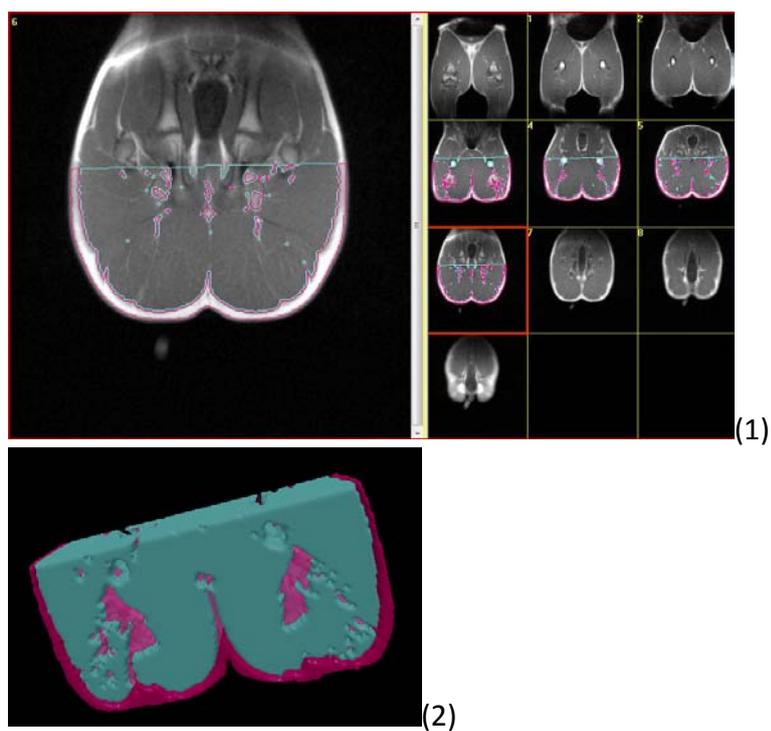


Abb. 31: (1) ausgewertete Oberschenkel- und Glutealregion mit vier aufeinanderfolgenden Schnittbildern, beginnend am Referenzbild; (2) 3D-Rekonstruktion der vier ausgewerteten Schnittbilder der Oberschenkel- und Glutealregion

3.3.2. Auswertung der DXA-Ergebnisse

Mittels DXA können folgende Werte ermittelt bzw. errechnet werden:

- Weichgewebe [g]
- Fett [g]
- Magerweichgewebe („Muskel“) [g]
- Knochenfläche [cm²]
- Knochenmineralgehalt (BMC) [g]
- Knochenmineraldichte (BMD) [g/cm²]

Die Berechnung der Ganzkörperergebnisse erfolgt semi-automatisch nach jedem Scan und fordert vom Nutzer keinen weiteren Aufwand.

3.3.3. Statistische Analyse der Ergebnisse (statistische Modelle)

Für die Berechnung der Einflussfaktoren auf die in Kapitel 4.4. dargestellten Ergebnisse wurde eine Mischmodell-Analyse mittels REML (restricted maximum likelihood) unter Verwendung der Statistik-Software SAS 9.2 (SAS, 2002-2008) angewendet. Die Signifikanzgrenze für Differenzen zwischen den kleinsten mittleren Quadraten wurde mit $p < 0,05$ definiert.

Mischmodell

$$y_{ijkl} = \mu + R_i + G_j + \beta A_{ijkl} + \beta W_{ijkl} + u_k + e_{ijkl}$$

y_{ijkl} = Beobachtungswert

μ = Erwartungswert für y

R_i = Rasse- und Kreuzungsgruppe ($i = 1, 2, \dots, 15$)

G_j = Geschlecht ($j = 1, 2$)

βA_{ijkl} = Alter in Tagen (Kovariable)

βW_{ijkl} = Gewicht in kg (Kovariable)

u_k = zufälliger Effekt Untersuchungsdatum ($k = 1, 2, \dots, 35$)

e_{ijkl} = Restfehler

In diesem Modell sind Rasse und Geschlecht als fixe Effekte verwendet worden. Als Kovariablen dienten Alter und Gewicht. Das Untersuchungsdatum wurde als Zufallseffekt berücksichtigt.

Das Modell wurde wie oben beschrieben für folgende Beobachtungswerte verwendet:

- Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg
- Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 100 kg
- Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht bei 80 kg
- Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht bei 100 kg
- Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion bei 80 kg
- Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion bei 100 kg
- Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion bei 80 kg
- Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion bei 100 kg
- Gesamtkörperfettanteil (%) bei 80 kg
- Gesamtkörperfettanteil (%) bei 100 kg
- Magerweichgewebeanteil (%) bei 80 kg
- Magerweichgewebeanteil (%) bei 100 kg
- Knochenmineraldichte (g/cm^2) bei 80 kg
- Knochenmineraldichte (g/cm^2) bei 100 kg

Die statistische Auswertung der Beziehungen zwischen den Messungen bei 80 kg und 100 kg bzw. zwischen MRT- und DXA-Referenzdaten erfolgte mit Hilfe der linearen einfachen bzw. multiplen Regressionsanalyse (Proc Reg) der Statistik-Software SAS 9.2 (SAS, 2002-2008). Als Maß für die Güte der Anpassung zwischen abhängigen und unabhängigen Variablen durch die Regressionsgleichung diente das Bestimmtheitsmaß (R^2) in Kombination mit dem Standardschätzfehler (RMSE = Root Mean Square Error). Für Variablen, die eine signifikante Gewichtsabhängigkeit innerhalb der Zielgewichte aufwiesen, erfolgte eine zusätzliche Korrektur auf 80 bzw. 100 kg Lebendmasse mithilfe einer linearen Regressionsgleichung.

4. Ergebnisse

4.1. Ergebnisse der MR-Bildauswertung

Die MR-Bilder wurden, wie im Abschnitt Versuchstiere und Methode (Kapitel 3.3.) beschrieben, auf ihre Fett- und Muskelvolumina ausgewertet, sowohl für die 80 kg als auch für die 100 kg Daten. Die Ergebnisse sollen hier vergleichend dargestellt werden.

In den Grafiken repräsentieren die (blauen) Dreiecke die Sauen und die (roten) Rechtecke die Eber. Grüne Dreiecke repräsentieren Sauen der Deutschen Landrasse (DL).

4.1.1. Ergebnisse der Auswertung der Lendenregion

Die Auswertung der Lendenregion erbrachte Daten für das Volumen des Musculus longissimus dorsi und für dessen Speckauflage.

4.1.1.1. Volumen des Musculus longissimus dorsi

Die erste Abbildung (Abb. 32) zeigt die Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg Körpergewicht. Das Volumen des Muskels ergibt sich aus der Auswertung von fünf Schnittbildern. Die Beziehung zwischen den Messwerten des Volumens des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg ist hoch ($R^2 = 0,86$; $RMSE = 82021 \text{ mm}^3$).

Auffallend sind in der Abbildung fünf DL-Sauen, die sich oberhalb der Geraden befinden.

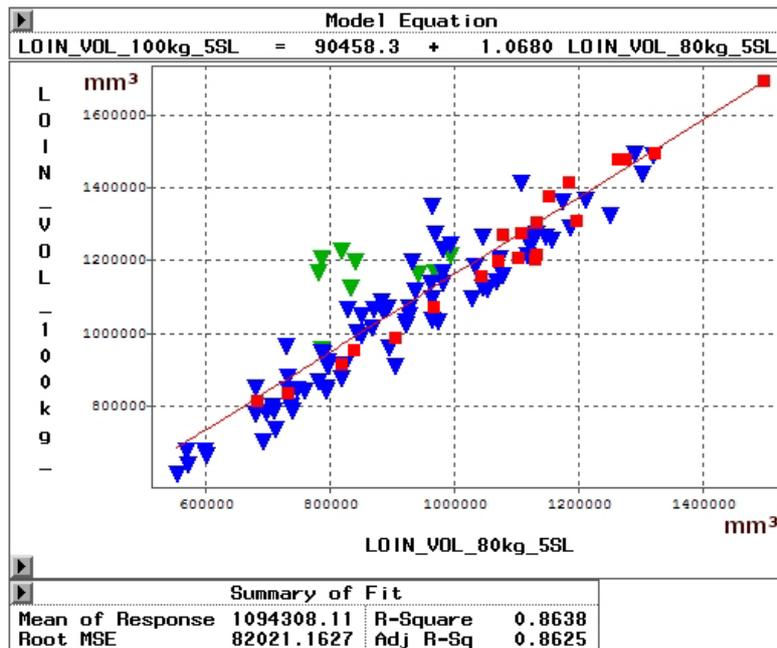


Abb. 32: Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] bei 80 kg (LOIN_VOL_80kg_5SL) und bei 100 kg (LOIN_VOL_100kg_) Körpergewicht

Die folgende Abbildung (Abb. 33) zeigt ebenfalls die Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg, jedoch wurden die Volumina auf Körpergewichte von exakt 80 kg bzw. 100 kg korrigiert. Der Regressionskoeffizient liegt bei $R^2 = 0,83$ (RMSE = 69301 mm^3). Auffallend sind fünf Deutsche Landrasse Sauen (grüne Dreiecke) die sich - wie bei der oberen Grafik (Abb. 32) - leicht oberhalb der Regressionsgeraden befinden.

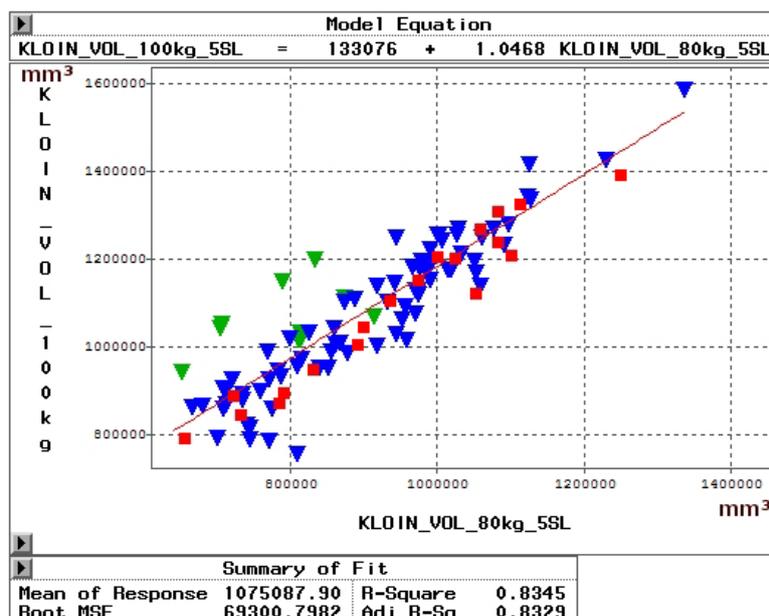


Abb. 33: Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] bei 80 kg (KLOIN_VOL_80kg_5SL) und bei 100 kg (KLOIN_VOL_100kg); *korrigiert* auf das exakte Gewicht von 80 kg und 100 kg

a) Volumen des Musculus longissimus dorsi: DL-Sauen

Aufgrund der Auffälligkeit der fünf DL-Sauen zeigt Abbildung 34 die Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg allein für die Deutsche Landrasse Sauen dieser Arbeit ($n = 19$). Werden die fünf abweichenden Sauen aus der Analyse herausgenommen (siehe Abb. 34, gekennzeichnet mit einem X), ergibt sich ein Regressionskoeffizient von $R^2 = 0,82$ (RMSE = 45844 mm^3).

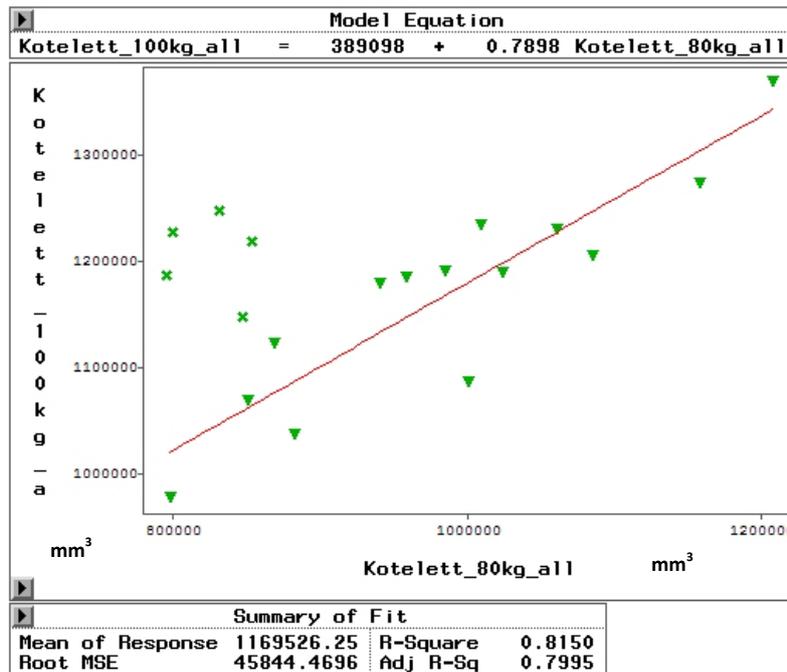


Abb. 34: Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] der DL-Sauen bei 80 kg (Kotelett_80kg_all) und bei 100 kg (Kotelett_100kg_a)

b) Volumen des Musculus longissimus dorsi: Eber

Die nächste Grafik (Abb. 35) vergleicht nach Gewichtskorrektur das Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg alleine für die Eber ($n = 21$). Die Beziehung ist sehr hoch ($R^2 = 0,97$; RMSE = 35340 mm^3).

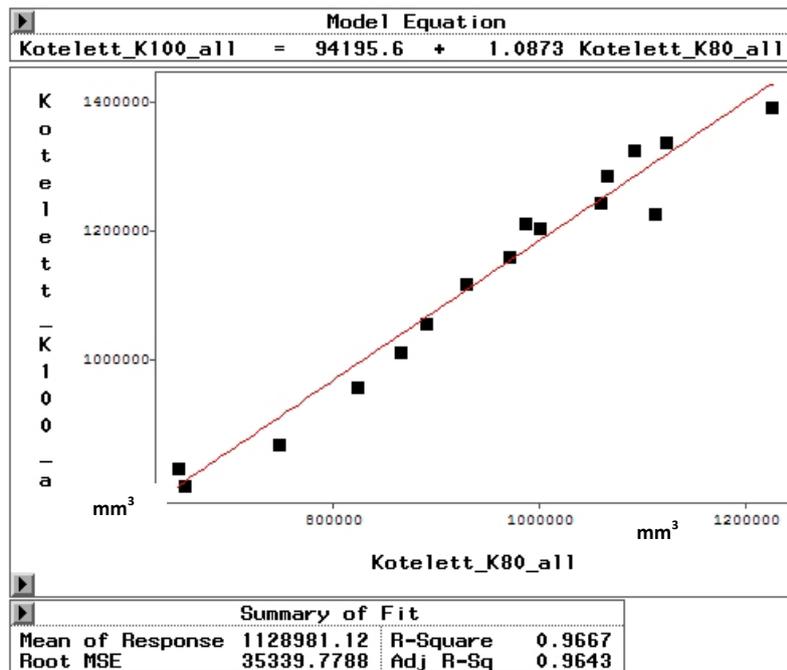


Abb. 35: Beziehung zwischen dem Volumen des Musculus longissimus dorsi [mm^3] der Eber bei 80 kg (Kotelett_K80_all) und bei 100 kg (Kotelett_K100_a) – nach Gewichtskorrektur

4.1.1.2. Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht

Der folgende Graph (Abb. 36) stellt die Beziehung zwischen dem Volumen, der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht bei 80 kg und bei 100 kg für alle Versuchstiere dar. Der Regressionskoeffizient ($R^2 = 0,91$; $\text{RMSE} = 41781 \text{ mm}^3$) ist höher als bei den Volumina des Musculus longissimus dorsi. In dieser Grafik auffallend sind fünf Deutsche Landrasse Sauen, deren Wertepaare oberhalb der Regressionsgeraden liegen.

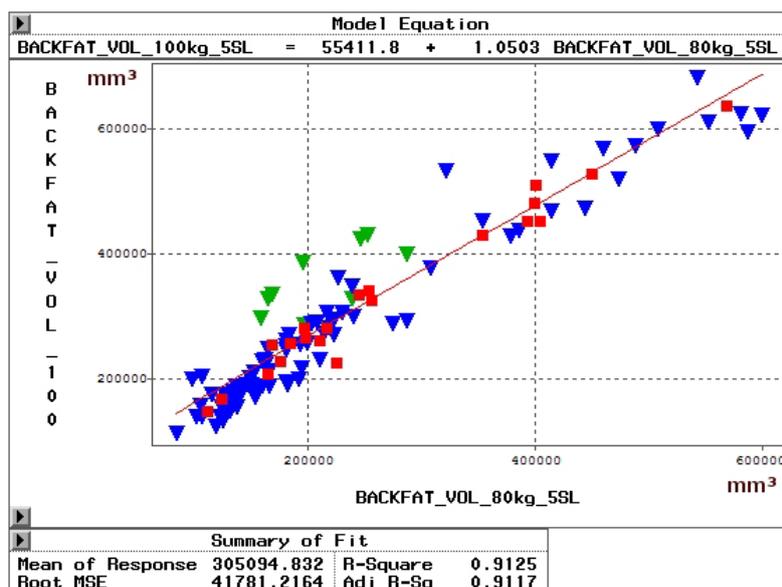


Abb. 36: Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage [mm^3] bei 80 kg (BACKFAT_VOL_80kg_5SL) und bei 100 kg (BACKFAT_VOL_100)

a) Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht: DL-Sauen

Da in Abbildung 36 ebenfalls wieder fünf deutsche Landrasse Sauen auffällig sind, wird in Abbildung 37 die Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage bei 80 kg und bei 100 kg alleine für die Deutschen Landrasse Sauen (n = 19) dargestellt. Die Beziehung ist hoch ($R^2 = 0,80$; $RMSE = 38478 \text{ mm}^3$), nachdem auch hier ebenfalls die fünf „ursprünglich auffälligen“ Tiere aus der Berechnung herausgenommen wurden. Die Werte liegen, trotz geringfügig niedriger Beziehung näher an der Regressionsgeraden als beim Muskelvolumen (Abb. 34) – mit Ausnahme von einem Wertepaar, welches ebenfalls weiter oberhalb der Regressionsgeraden liegt!

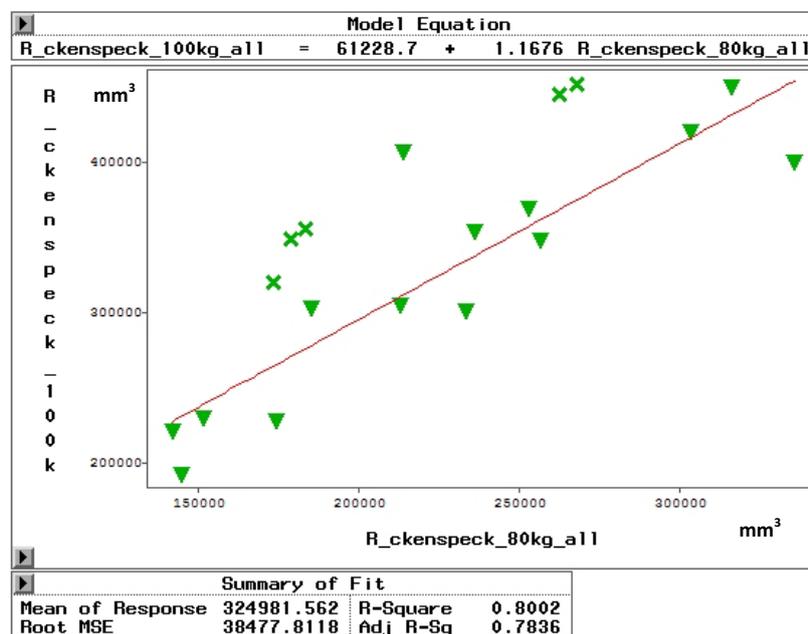


Abb. 37: Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage [mm^3] der DL-Sauen bei 80 kg ($R_ckenspeck_80kg_all$) und bei 100 kg ($R_ckenspeck_100k$); die fünf auffälligen, aus der Berechnung herausgenommenen DL-Sauen sind mit X gekennzeichnet

b) Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht: Eber

Die folgende Grafik (Abb. 38) zeigt die Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage bei 80 kg und bei 100 kg, wobei nur die Eber berücksichtigt wurden. Die Beziehung ist ebenfalls, wie bei dem Volumen des Musculus longissimus dorsi, sehr hoch ($R^2 = 0,97$; $RMSE = 23757 \text{ mm}^3$).

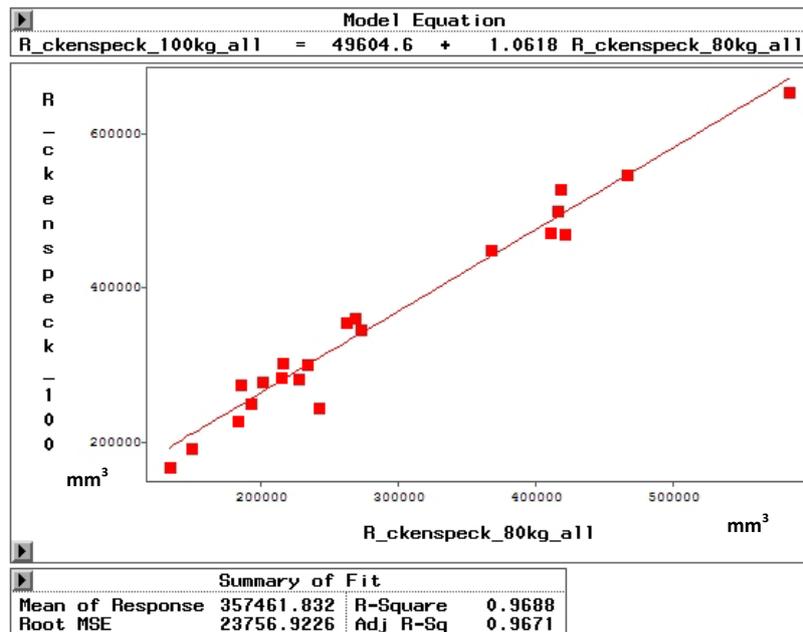


Abb. 38: Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage [mm^3] der Eber bei 80 kg ($R_ckenspeck_80kg_all$) und bei 100 kg ($R_ckenspeck_100$)

c) Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage und dem Körpergewicht bei 80 kg

Die Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage bei 80 kg und dem, am Untersuchungstag ermittelten Körpergewicht ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Beziehung ist sehr gering ($R^2 = 0,06$; $RMSE = 117132 \text{ mm}^3$).

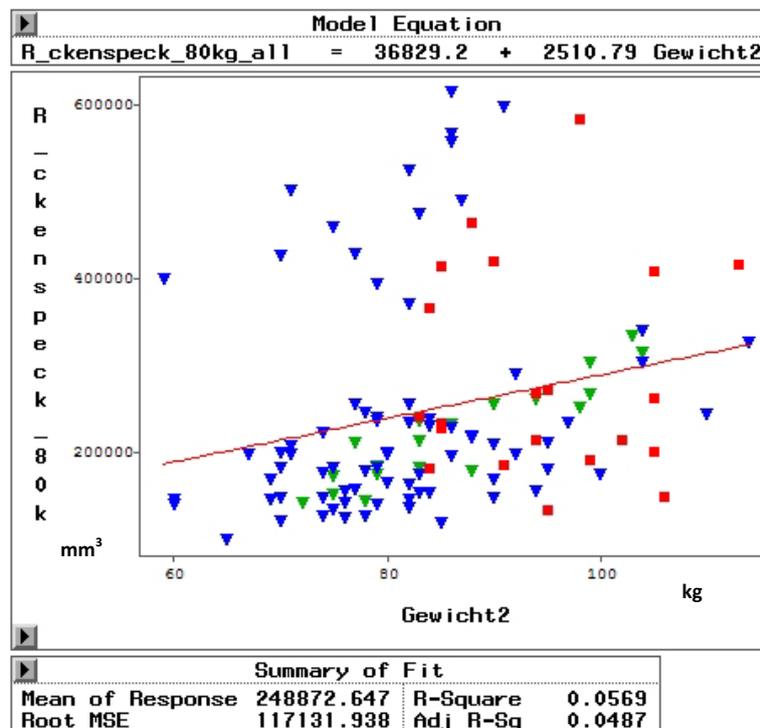


Abb. 39: Beziehung zwischen dem Volumen der Speckauflage ($R_ckenspeck_80k$) [mm^3] und dem Körpergewicht [kg] der Versuchstiere (Gewicht2) am ersten Untersuchungstag (Zielgröße 80 kg), bezogen auf alle Versuchstiere

4.1.2. Ergebnisse der Auswertung der Oberschenkel- und Glutealregion

Die Auswertung der Oberschenkel- und Glutealregion erbrachte Daten über das Muskel- und Fettvolumen in der untersuchten Region.

4.1.2.1. Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion

Die erste Grafik (Abb. 40) zeigt die Beziehung zwischen dem Muskelvolumen in der Oberschenkel- und Glutealregion bei 80 kg und bei 100 kg, bezogen auf alle Versuchstiere. Der Regressionskoeffizient liegt bei $R^2 = 0,79$ (RMSE = 292079 mm^3). Die Deutschen Landrasse Sauen befinden sich hierbei im Mittelfeld der Geraden, näher an der Regressionsgeraden liegend, als bei den Graphen der Lendenregion.

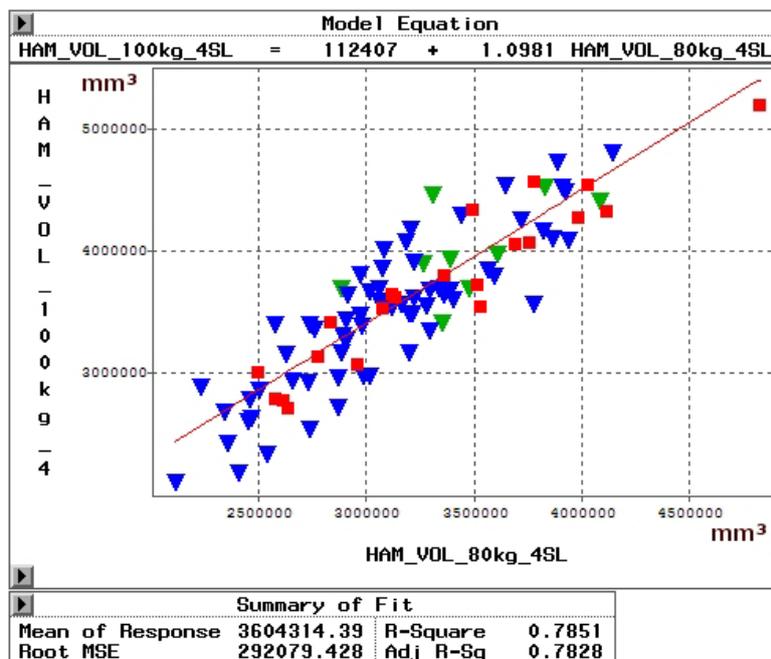


Abb. 40: Beziehung zwischen dem Muskelvolumen [mm^3] in der Oberschenkel- und Glutealregion bei 80 kg (HAM_VOL_80kg_4SL) und bei 100 kg (HAM_Vol_100kg_4)

4.1.2.2. Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion

Die folgende Grafik (Abb. 41) stellt die Beziehung zwischen dem ermittelten Fettvolumen in der Oberschenkel- und Glutealregion bei 80 kg und bei 100 kg dar. Die Beziehung ($R^2 = 0,44$; RMSE = 137143 mm^3) ist geringer als für das Muskelvolumen (siehe Abb. 40).

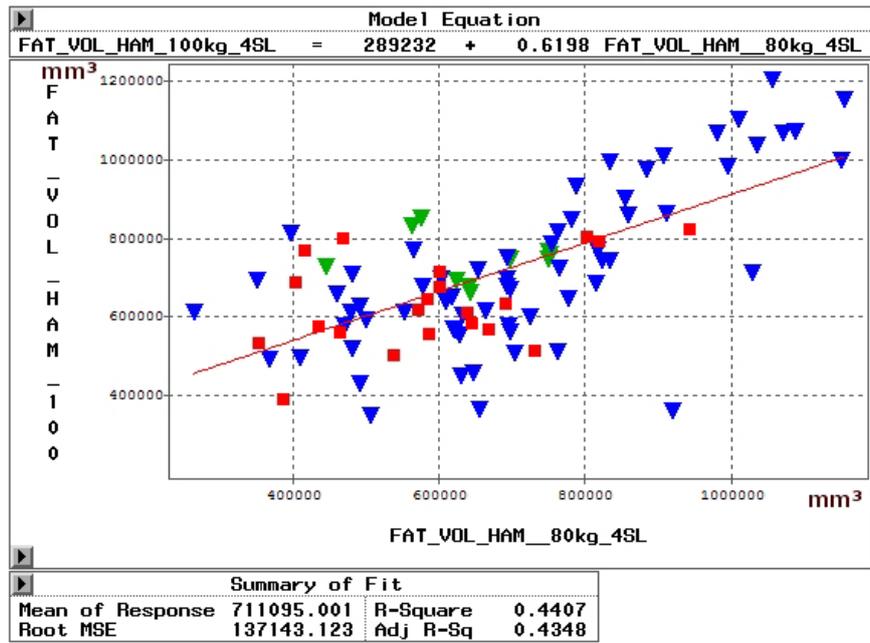


Abb. 41: Beziehung zwischen dem Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion [mm³] bei 80 kg (FAT_VOL_HAM_80kg_4SL) und bei 100 kg (FAT_VOL_HAM_100)

4.2. Ergebnisse der DXA-Untersuchung

Wie im Abschnitt Versuchstiere und Methoden (Kapitel 3.3.) beschrieben, erfolgt die Analyse des DXA-Ganzkörperscans ohne weitere Manipulation durch den Anwender. Der angeschlossene Rechner ermittelt die Werte der einzelnen Gewebeanteile anhand der gemessenen Röntgenschwächung automatisch nach jedem Scan mit Hilfe der GE Lunar-Analysesoftware (4.7e). Für diese Dissertation wurden die DXA-Werte für den Gesamtkörperfettanteil (%) und den Magerweichgewebeanteil (%) verwendet.

4.2.1. Gesamtkörperfettanteil (%)

Die erste Grafik (Abb. 42) setzt den Gesamtkörperfettanteil (%) bei 80 kg mit dem bei 100 kg ins Verhältnis. Das Bestimmtheitsmaß beträgt $R^2 = 0,87$ (RMSE = 2,80 %). Auffallend sind auch in dieser Grafik die Deutsche Landrasse Sauen, die auf einer gedachten Geraden parallel zur Regressionsgeraden liegen.

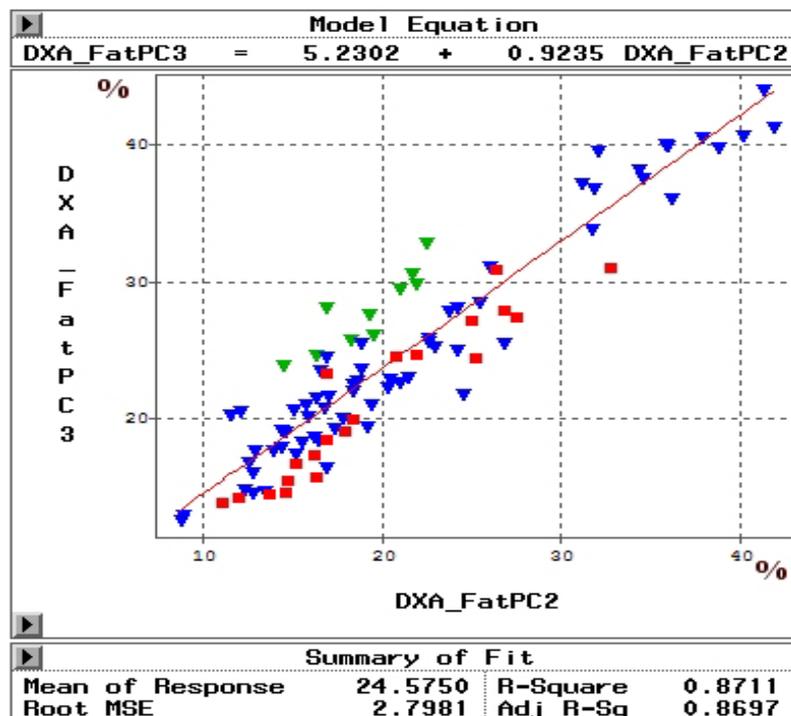


Abb. 42: Beziehung zwischen dem Fettanteil [%] bei 80 kg (DXA_FatPC2) und bei 100 kg (DXA_FatPC3)

a) Beziehung zwischen dem DXA-Ganzkörperfettgehalt (%) und dem Körpergewicht (kg)

Die folgende Grafik (Abb. 43) zeigt die Beziehung zwischen dem ermittelten DXA-Gesamtkörperfettgehalt (%) und dem Körpergewicht am Untersuchungstag des ersten Scans (Zielgröße 80 kg). Die Beziehung liegt bei $R^2 = 0,01$ (RMSE = 6,88 %).

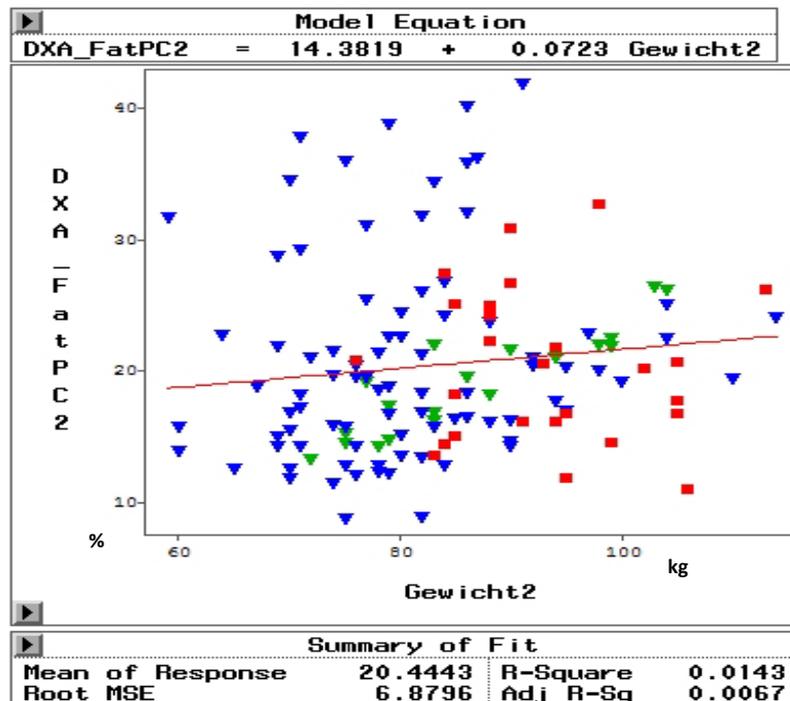


Abb. 43: Beziehung zwischen dem Fettanteil [%] bei 80 kg (DXA_FatPC2) und dem Körpergewicht [kg] (Gewicht2) der Versuchstiere am ersten Untersuchungstag (80 kg Körpergewicht im Durchschnitt)

4.2.2. Magerweichgewebeanteil (%)

Die folgende Grafik (Abb. 44) zeigt die Beziehung zwischen dem Magerweichgewebeanteil (%) nach Korrektur auf ein einheitliches Gewicht bei 80 kg und bei 100 kg. Der Regressionskoeffizient ist ebenfalls hoch ($R^2 = 0,87$; RMSE = 2,77 %). Die Deutschen Landrasse Sauen befinden sich in dieser Grafik bis auf wenige Ausnahmen unterhalb der Regressionsgeraden und beschreiben annähernd eine parallele Gerade.

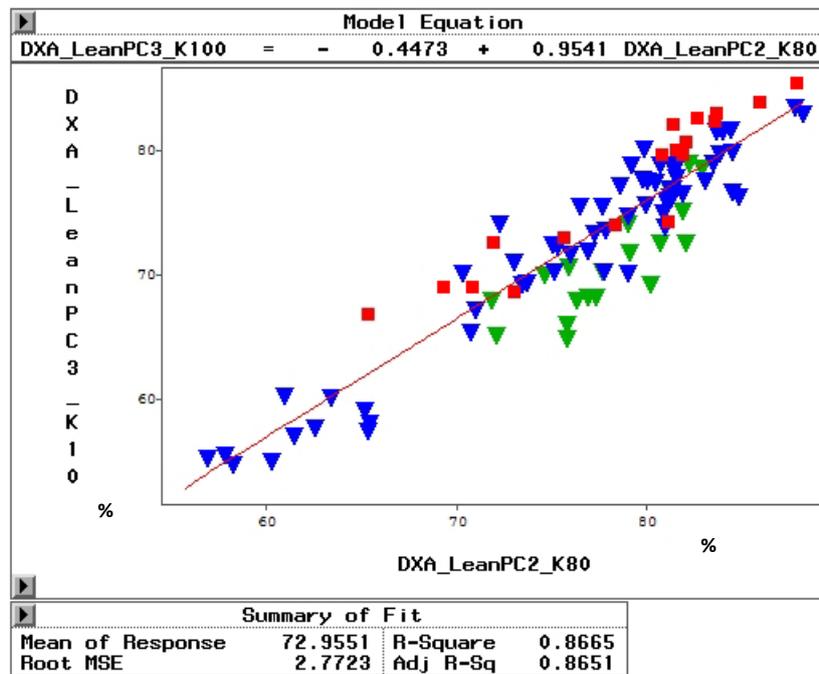


Abb. 44: Beziehung zwischen dem Magerweichgewebeanteil [%] bei 80 kg (DXA_LeanPC2_K80) und bei 100 kg (DXA_LeanPC3_K10)

4.3. Beziehung zwischen den Ergebnissen der MRT und denen der DXA

In diesem Abschnitt werden die aus der MR-Bildauswertung gewonnenen Ergebnisse mit denen der DXA verglichen. Die folgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse der multiplen Regressionsanalyse. Hierbei werden mehrere (unabhängige) Merkmale bzw. Variablen in Beziehung zu einer abhängigen Variable (Referenzvariable) gesetzt. Als Referenz dienen jeweils die DXA-Ergebnisse. Diese Grafiken sind dreidimensionale Abbildungen und so zu verstehen, dass größere Objekte näher zum Betrachter hin und kleinere Objekte weiter vom Betrachter entfernt liegen.

Die erste Grafik (Abb. 45) beschreibt die Genauigkeit mit der, mit Hilfe des Volumens des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und dem Volumen der entsprechenden Speckauflage bei 80 kg (jeweils erster Untersuchungstermin) der DXA-Gesamtkörperfettanteil (%) des Schweines bei einem Gewicht von 100 kg (zweiter Untersuchungstermin) geschätzt werden kann. Der Regressionskoeffizient ist hoch ($R^2 = 0,82$; $RMSE = 3,31\%$).

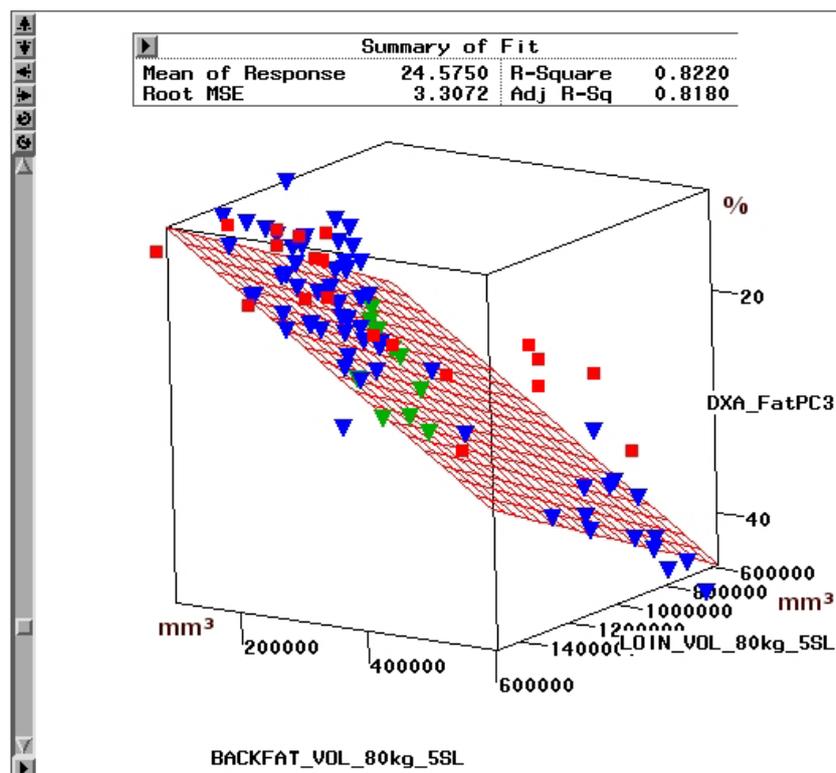


Abb. 45: Multiple Regression, die die Genauigkeit zeigt, mit der mit Hilfe des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm³] bei 80 kg (LOIN_VOL_80kg_5SL) und des Volumens der Speckauflage [mm³] bei 80 kg (BACKFAT_VOL_80kg_5SL) der DXA-Gesamtkörperfettanteil [%] bei 100 kg (DXA_FatPC3) geschätzt werden kann

Der folgende Graph (Abb. 46) zeigt die Genauigkeit mit der der DXA-Gesamtkörperfettgehalt (%) bei 100 kg vorhergesagt wird, wenn das Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 100 kg und die Speckauflage bei 100 kg als Merkmale in der Schätzgleichung eingesetzt werden. Die entsprechende Beziehung liegt leicht über der vorherigen ($R^2 = 0,84$; RMSE = 3,10 %).

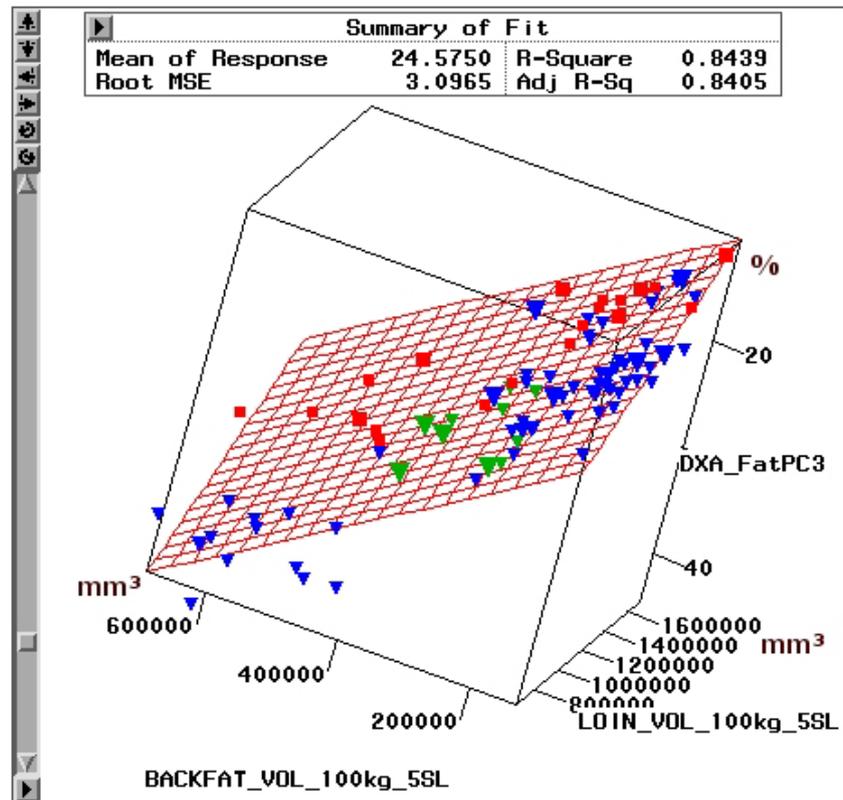


Abb. 46: Multiple Regression, die die Genauigkeit zeigt, mit der mit Hilfe des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm^3] bei 100 kg (LOIN_VOL_100kg_5SL) und des Volumens der Speckauflage [mm^3] bei 100 kg (BACKFAT_VOL_100kg_5SL) der DXA-Gesamtkörperfettanteil [%] (DXA_FATPC3) bei 100 kg geschätzt werden kann

4.4. Ergebnisse der Mischmodellanalyse

4.4.1. Volumen des Musculus longissimus dorsi (MRT)

In Abbildung 47 sind die kleinsten mittleren Quadrate-Mittelwerte (LS-Means) des Volumens des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg, jeweils für jede der 15 Rassen- bzw. Kreuzungskombinationen aufgetragen. Zusätzlich ist für jedes Volumen der Standardschätzfehler (SEE) angegeben.

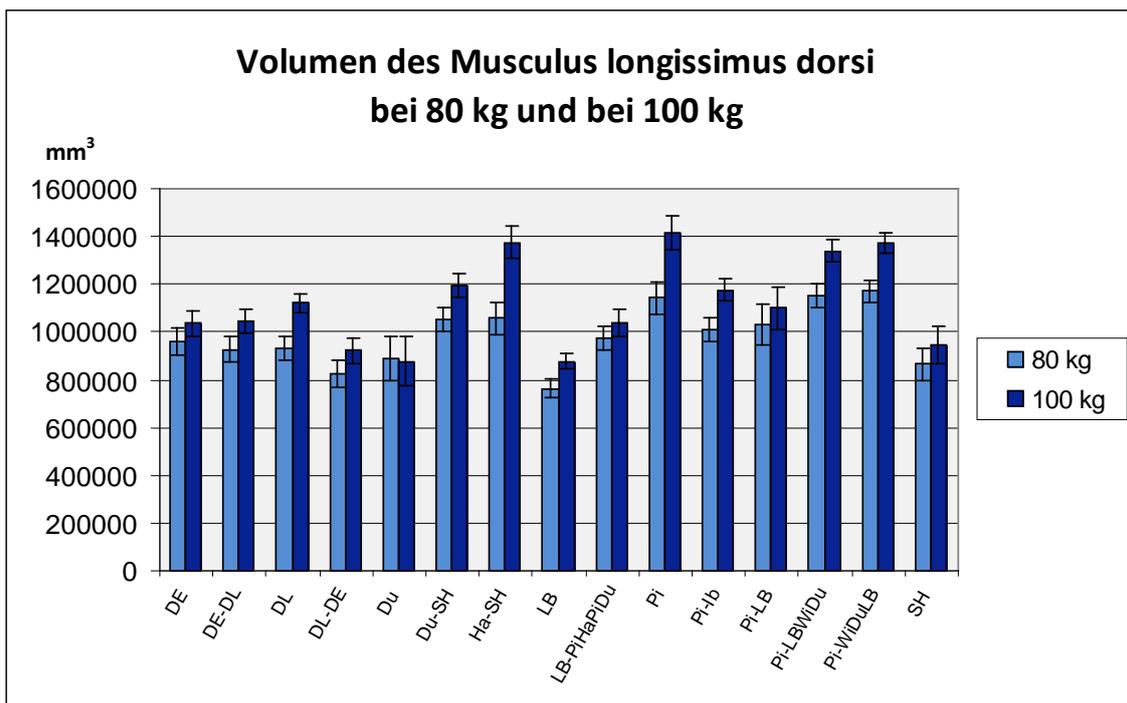


Abb. 47: Darstellung des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)

Deutlich wird, dass es rassespezifische Unterschiede gibt: Zum einen (1) in der Zunahme des Muskelvolumens zwischen 80 kg und 100 kg und zum anderen (2) in der Größe des Muskelvolumens an sich. Um diese Unterschiede deutlicher hervorzuheben wurde in Abbildung 48 eine andere Skalierung gewählt und zunächst nur die Volumina des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg dargestellt:

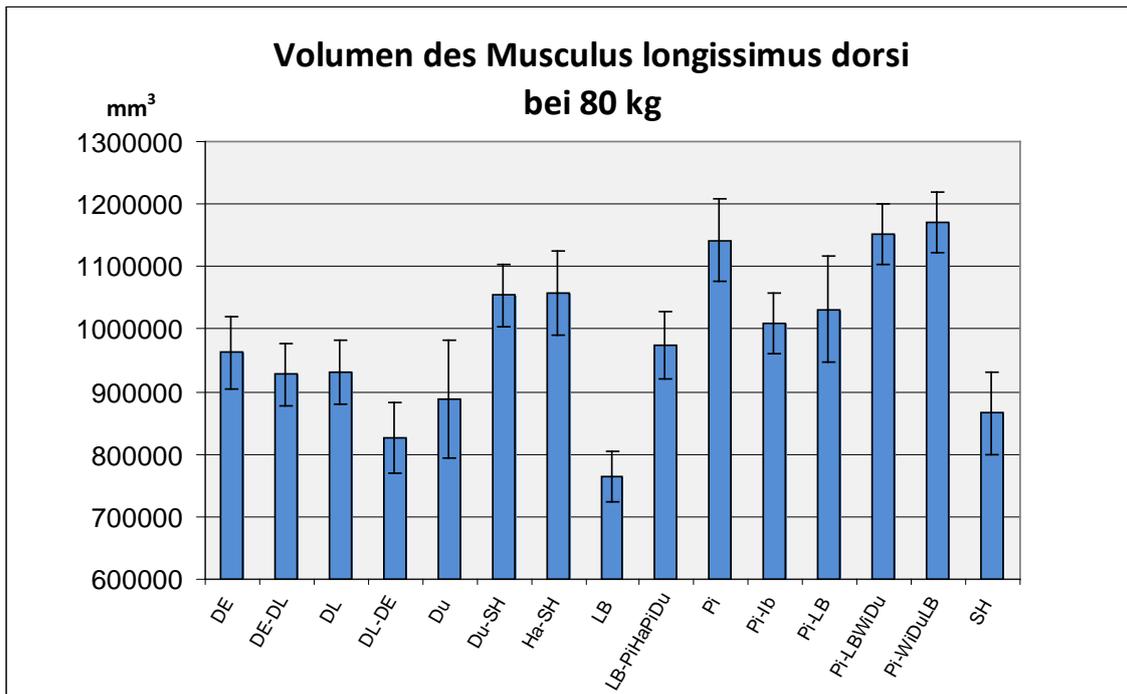


Abb. 48: Darstellung des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm³] der verschiedenen Rassen und Kreuzungen für die Messung bei 80 kg (LS-Means, SEE)

Bei der Betrachtung des Volumens des Musculus longissimus dorsi allein bei 80 kg (siehe Abb. 48) fällt auf, dass Rassen wie Large Black (LB) oder die Kreuzung zwischen Deutscher Landrasse und Deutschem Edelschwein (DL-DE) ein signifikant geringeres Muskelvolumen aufweisen. Das größte Muskelvolumen zeigen Schweine der Kreuzung zwischen Piétrain x Wildschwein-Duroc-Large Black (Pi-WiDuLB) und Piétrain x Large Black-Wildschwein-Duroc (Pi-LBWiDu), gefolgt von Schweinen der Rasse Piétrain (Pi). Zudem wird deutlich, dass der höchste Standardschätzfehler bei Schweinen der Rasse Duroc (Du) zu finden ist. Wird dagegen das Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 100 kg dargestellt fallen einige Veränderungen auf (siehe Abb. 49):

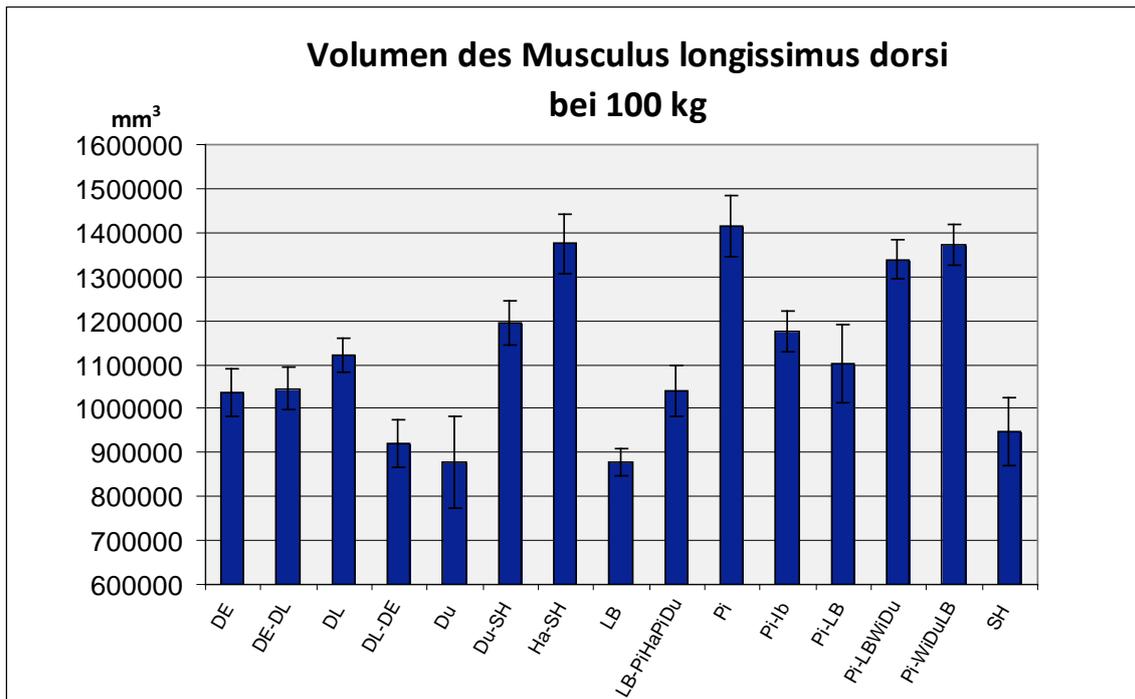


Abb. 49: Darstellung des Volumens des Musculus longissimus dorsi [mm³] der verschiedenen Rassen und Kreuzungen für die Messung bei 100 kg (LS-Means, SEE)

Signifikante Unterschiede in der Größe des Muskelvolumens sind bei Schweinen der Kreuzungen Pi-LBWiDu, Pi-WiDuLB und Hampshire-Schwäbisch Hällisches Schwein (HA-SH), sowie bei reinrassigen Piétrain gegenüber den anderen Rassen vorhanden. Das geringste Muskelvolumen weisen die Rassen Large Black und Duroc auf.

Abbildung 50 zeigt die Volumenzunahme des Musculus longissimus dorsi zwischen 80 kg und 100 kg Körpergewicht:

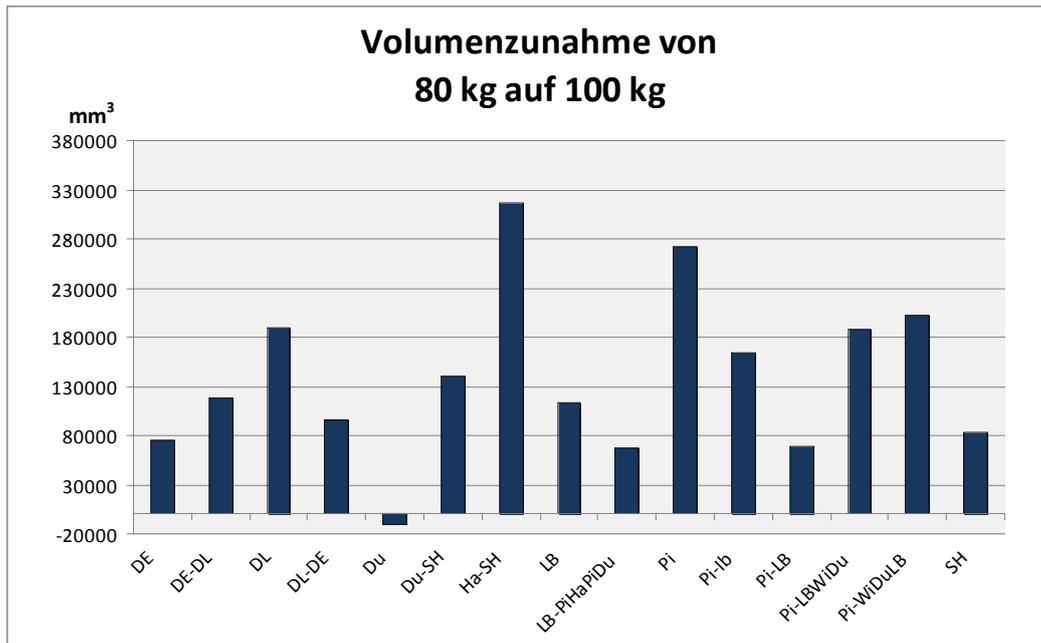


Abb. 50: Darstellung der Volumenzunahme des Musculus longissimus dorsi (mm³) von 80 kg auf 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (Differenz der LS-Means)

Deutlich erkennbar ist, dass das Muskelwachstum rassespezifisch ist. Besonders deutlich wird dies, wenn die Kreuzungen Duroc-Schwäbisch Hällisches Schwein (Du-SH) und Ha-SH betrachtet werden (siehe Abb. 47): Mit 80 kg zeigen diese Rassen noch keine signifikanten Unterschiede in ihrem Muskelvolumen, wohingegen die Unterschiede bei 100 kg signifikant sind.

Das größte Muskelwachstum zwischen 80 kg und 100 kg weisen Schweine der Kreuzung Ha-SH und der Rasse Piétrain auf. Ein geringes Muskelwachstum zwischen 80 kg und 100 kg zeigen Schweine der Kreuzung Large Black x Piétrain-Hampshire-Piétrain-Duroc (LB-PiHaPiDu) und Piétrain-Large Black (Pi-LB).

4.4.2. Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht (MRT)

Bei der Darstellung der Rückenfetttolumina (Abb. 51) werden ebenfalls rassespezifische Besonderheiten deutlich. So gibt es erwartungsgemäß Rassen, wie zum Beispiel Large Black, die eine signifikant größere Rückenfettauflage besitzen als andere Rassen und dies unabhängig von der Messung bei 80 kg oder 100 kg. Demgegenüber stehen Kreuzungen wie Du-SH oder reinrassige Piétrain, die eine signifikant geringere Rückenfettauflage besitzen.

Außerdem zeigen sich unterschiedliche Fettzunahmen: Kreuzungen wie Du-SH weisen eine geringe Fettvolumenzunahme zwischen 80 kg und 100 kg auf, wohingegen Rassen wie die Deutsche Landrasse oder Kreuzungen wie LB-PiHaPiDu oder Pi-Ib eine deutlich größere Zunahme aufweisen.

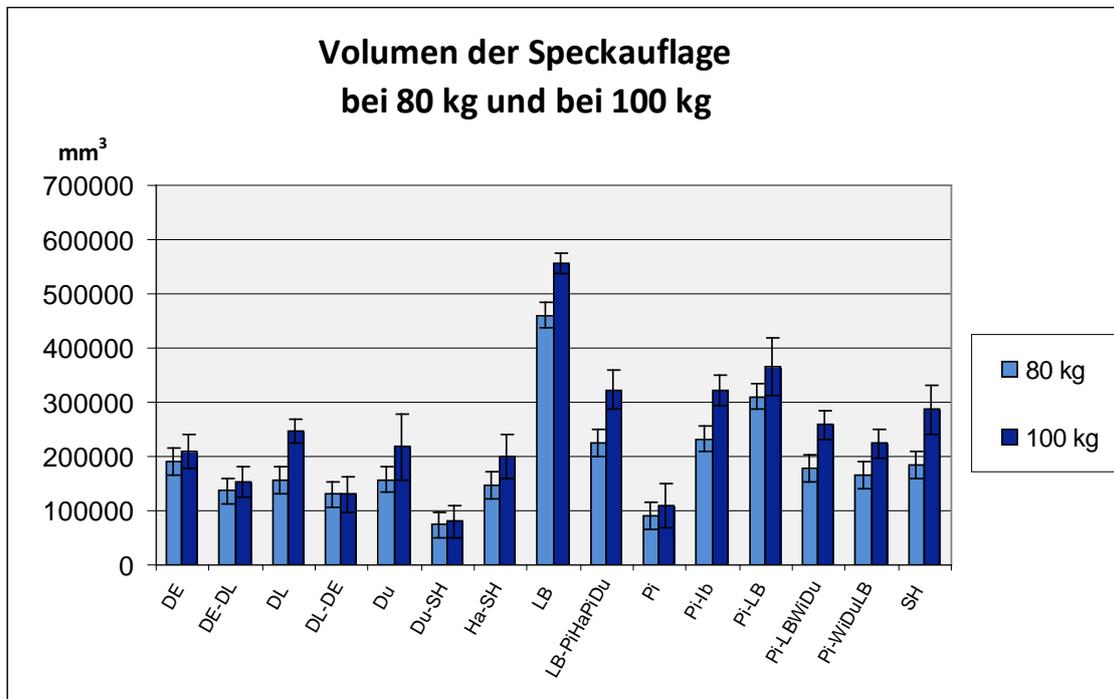


Abb. 51: Darstellung des Volumens der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Fettschicht [mm³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)

4.4.3. Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)

Abbildung 52 stellt die Muskelvolumina der Oberschenkel- und Glutealregion für alle beteiligten Rassen und Kreuzungen vergleichend bei 80 kg und bei 100 kg dar.

Die Unterschiede zwischen den Muskelvolumina der Oberschenkel- und Glutealregion bei 80 kg und bei 100 kg fallen deutlicher aus als bei den Volumina des Musculus longissimus dorsi. Auffallend sind vor allem Schweine der Rasse Duroc, Kreuzungen wie DE-DL oder Ha-SH, die eine größere Muskelvolumenzunahme zwischen 80 kg und 100 kg aufweisen als die anderen untersuchten Rassen bzw. Kreuzungen, wie zum Beispiel Large Black, Deutsches Edelschwein oder LB-PiHaPiDu. Auch die Muskelgröße variiert, so zeigen reinrassige Piétrain ein signifikant größeres Muskelvolumen sowohl bei 80 kg als auch bei 100 kg. Die Rasse Large Black weist dagegen erneut das geringste Muskelvolumen in der Oberschenkel- und Glutealregion auf.

Bei den DL-DE Schweine wurden bei 80 kg keine Untersuchung der Oberschenkel- und Glutealregion vorgenommen, so dass keine Werte vorliegen.

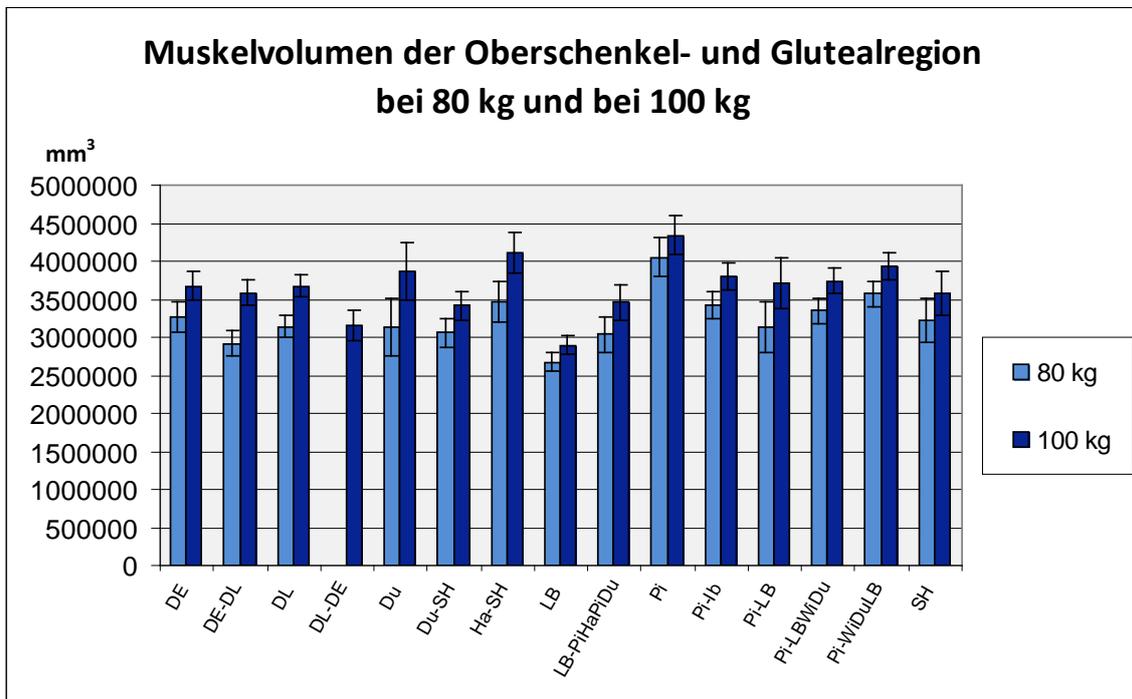


Abb. 52: Darstellung des Muskelvolumens der Oberschenkel- und Glutealregion [mm³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)

4.4.4. Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)

Bei der Darstellung des Fettvolumens in der Oberschenkel- und Glutealregion (Abb. 53) werden erneut rassespezifische Unterschiede deutlich: (1) bezogen auf die Volumina und (2) bezogen auf die unterschiedlichen Volumenzunahmen zwischen 80 kg und 100 kg.

Deutliche Zunahmen sind bei Schweinen der Kreuzungen Pi-LBWiDu oder Pi-WiDuLB erkennbar, wohingegen Rassen/Kreuzungen wie das Deutsche Edelschwein oder DE-DL an Fettvolumen in der analysierten Oberschenkel- und Glutealregion zwischen 80 kg und 100 kg verlieren. Large Black weist wiederum das größte Fettvolumen auf, nimmt jedoch zwischen 80 kg und 100 kg nicht deutlich an Fettvolumen in der analysierten Region zu.

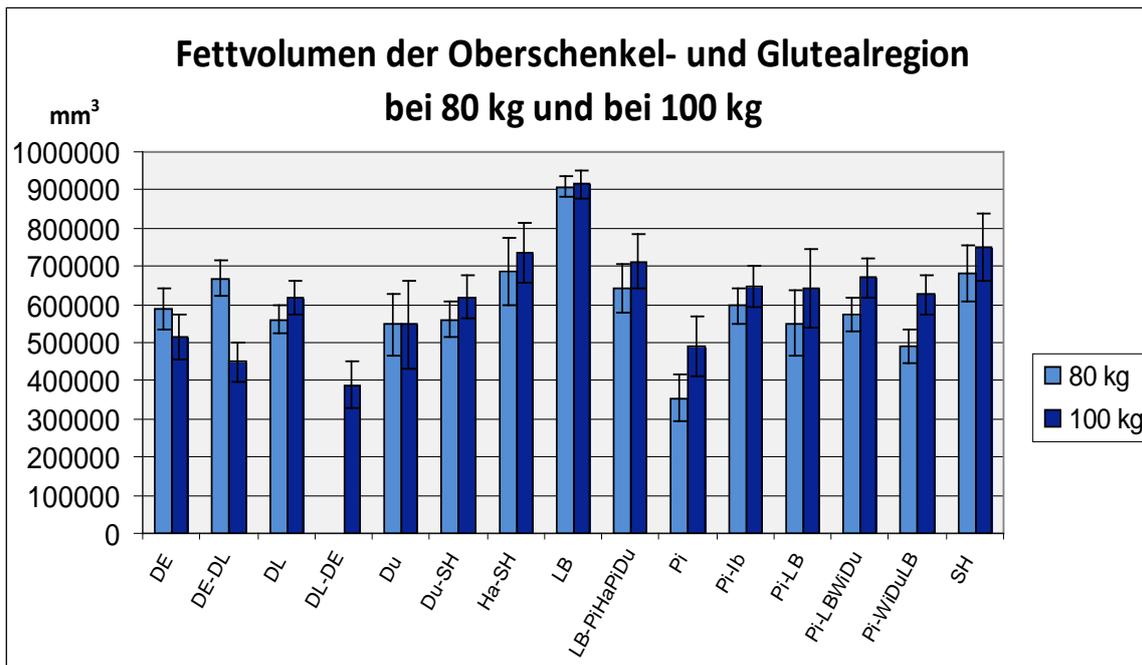


Abb. 53: Darstellung des Fettvolumens der Oberschenkel- und Glutealregion [mm³] bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)

4.4.5. Gesamtkörperfettgehalt bezogen auf das Körpergewicht (DXA)

Bei der Betrachtung der Unterschiede im Gesamtkörperfettanteil bei 80 kg und bei 100 kg (Abb. 54) wird deutlich, dass den signifikant höchsten Körperfettgehalt, unabhängig vom Gewicht, Schweine der Rasse Large Black aufweisen. Alle beteiligten Rassen oder Kreuzungen nehmen von 80 kg bis 100 kg prozentual an Fett zu. Es zeigen sich jedoch Unterschiede im Ausmaß der Zunahme. Schweine der Deutschen Landrasse oder Schweine der Kreuzung Pi-Ib zeigen eine stärkere Fettzunahme als Schweine der Rassen Deutsches Edelschwein oder der Kreuzung Du-SH.

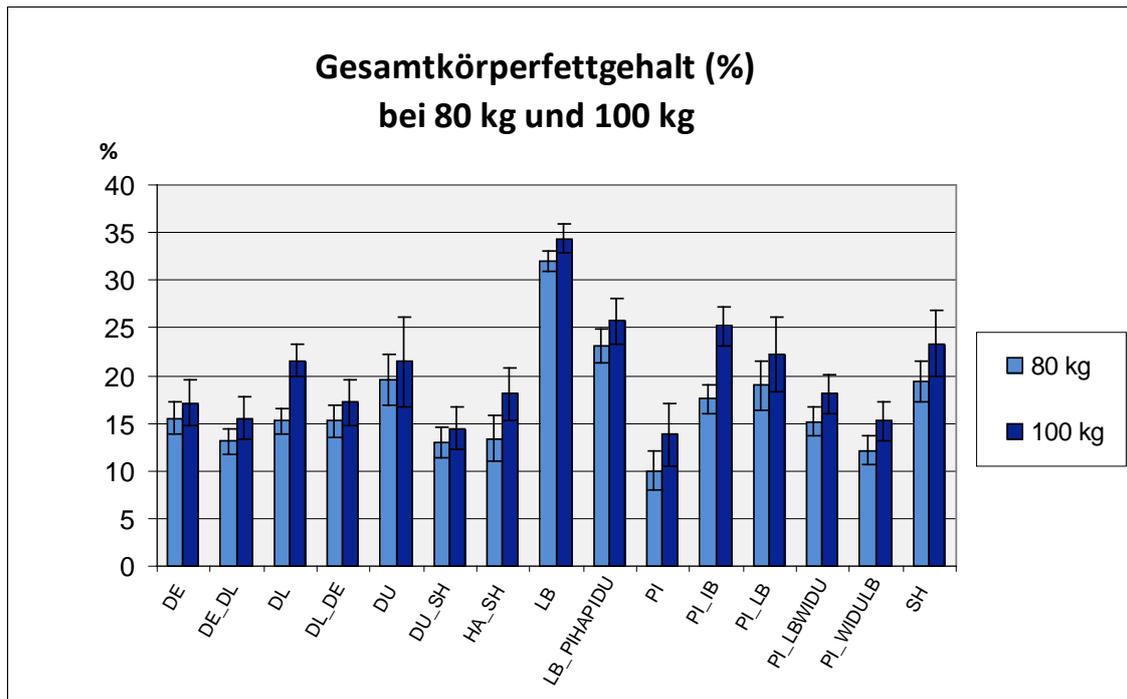


Abb. 54: Darstellung des DXA-Gesamtkörperfettgehaltes [%] der Schweine bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen

4.4.6. Magerweichgewebeanteil bezogen auf das Körpergewicht (DXA)

Bei allen Rassen bzw. Kreuzungen, die in diesem Versuch verwendet wurden, nahm der prozentuale Magerweichgewebeanteil (%) zwischen 80 kg und 100 kg erwartungsgemäß ab (Abb. 55). Den signifikant geringsten Magerweichgewebeanteil (%) bezogen auf das Körpergewicht zeigen Schweine der Rasse Large Black.

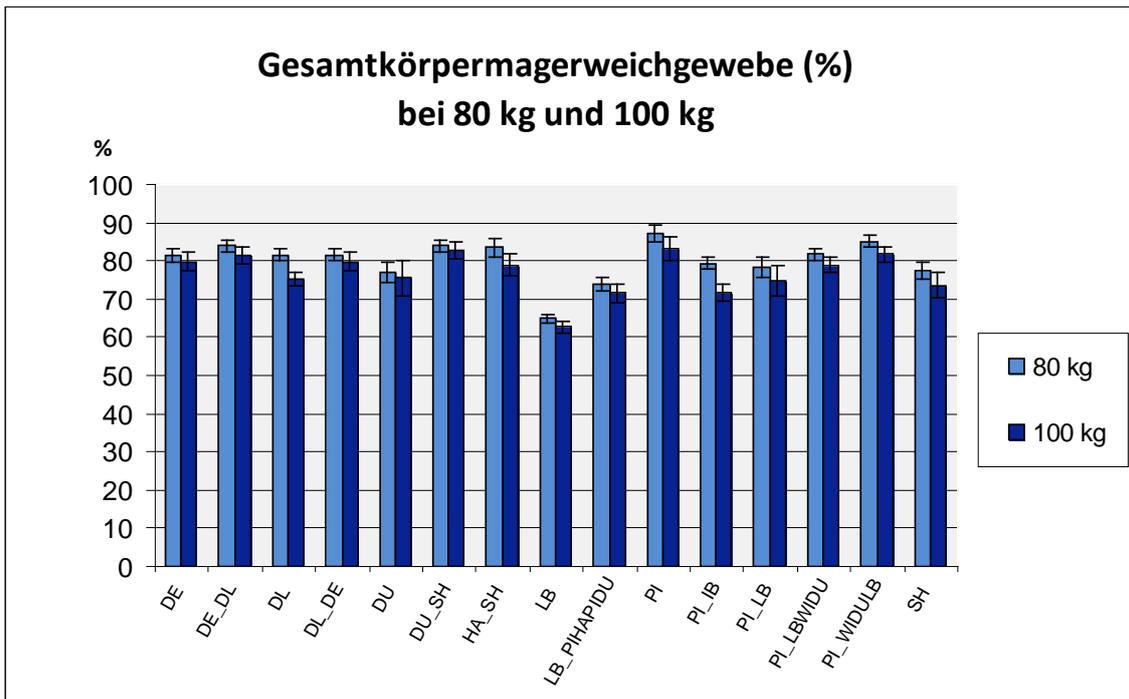


Abb. 55: Darstellung des Gesamtkörpermagerweichgewebes [%] der Schweine bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen

Deutliche prozentuale Abnahmen zwischen 80 kg und 100 kg werden bei Schweinen der Deutschen Landrasse und der Kreuzung Pi-Ib sichtbar. Um die Abnahmen des Magerweichanteils eindeutig darzustellen wurde in Abbildung 56 die prozentuale Abnahme des Magerweichgewebeanteils, d.h. die Differenz von 80 kg auf 100 kg, aufgetragen.

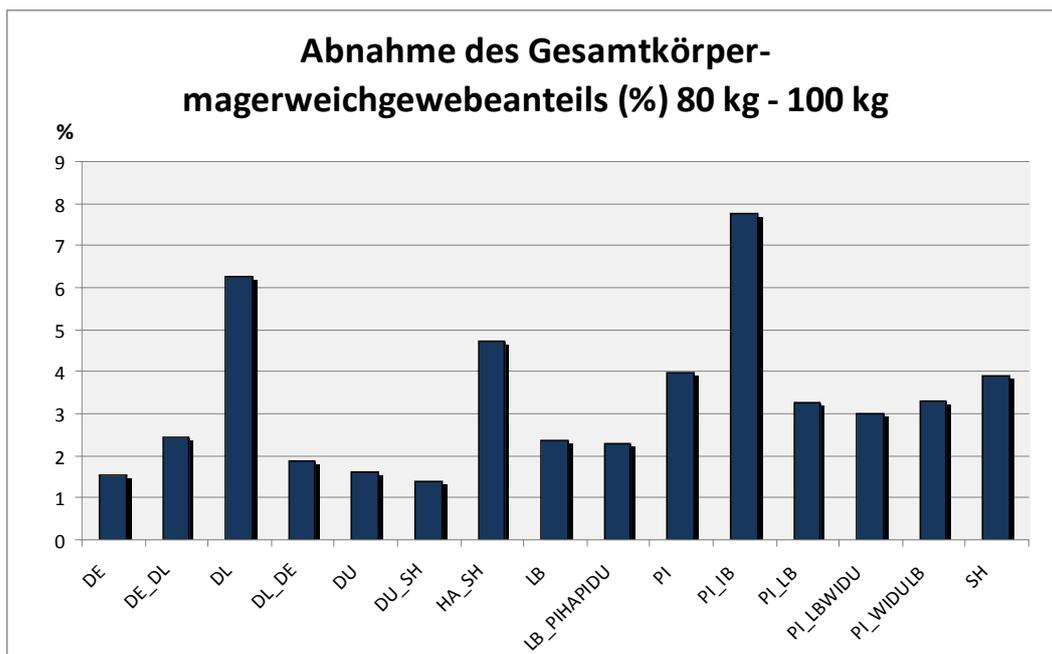


Abb. 56: Darstellung der prozentualen Abnahme des Gesamtkörpermagerweichgewebes [%] der Schweine zwischen 80 kg und 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (Differenz der LS-Means)

Deutlich erkennbar in Abbildung 56 ist, dass bei der Kreuzung Pi-lb der prozentuale Magerweichgewebeanteil am stärksten abnimmt, gefolgt von Schweinen der Deutschen Landrasse. Bei Schweinen der Rassen Deutsches Edelschwein, Duroc und bei Kreuzungen wie Du-SH geht der prozentuale Anteil am Magerweichgewebe am wenigsten zurück.

4.4.7. Knochenmineraldichte (g/cm^2) bei 80 kg und bei 100 kg

Die Knochenmineraldichte liegt bei allen im Versuch verwendeten Rassen- bzw. Kreuzungsgruppen zwischen 1,0 und 1,3 g/cm^2 (Abb. 57) und steigt bei allen Tieren zwischen 80 kg und 100 kg an. Die Kreuzung Pi-lb weist unabhängig vom Gewicht tendenziell die höchste Knochenmineraldichte auf.

Unterschiede zeigen sich in der Zunahme der Knochenmineraldichte zwischen 80 kg und 100 kg: So steigt die Knochenmineraldichte z.B. bei Rassen wie Piétrain oder der Kreuzung Du-SH stärker an als zum Beispiel bei reinrassigen Duroc.

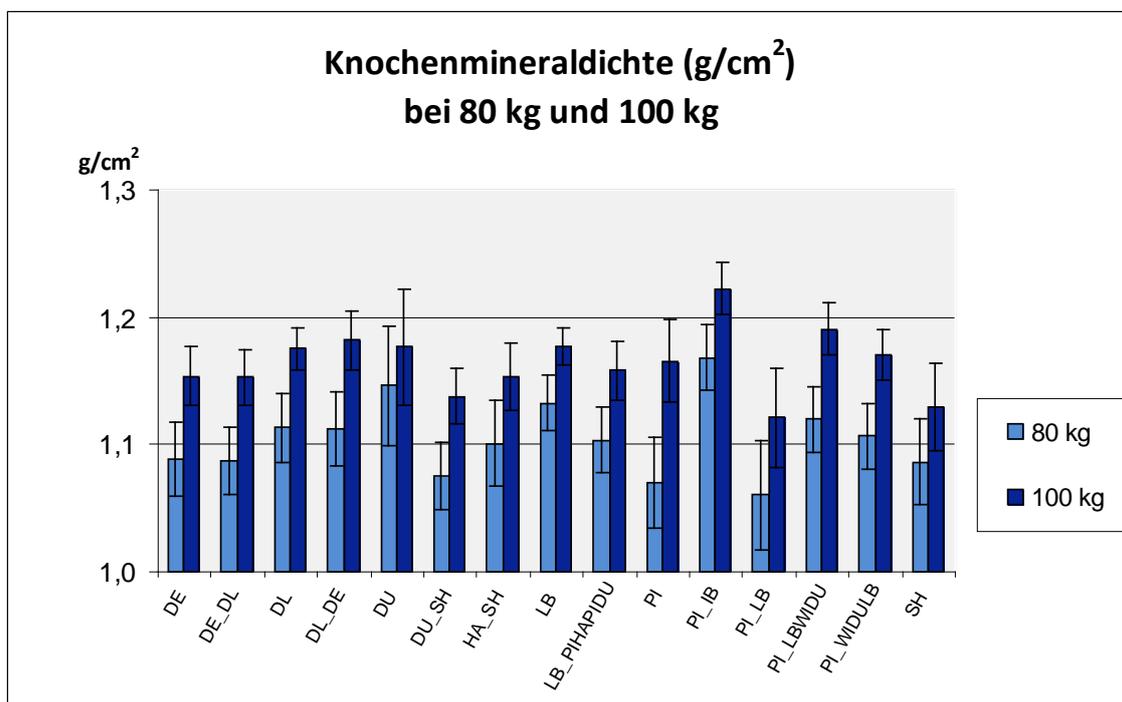


Abb. 57: Darstellung der Knochenmineraldichte (g/cm^2) der Schweine bei 80 kg und bei 100 kg, vergleichend für die verschiedenen Rassen und Kreuzungen (LS-Means, SEE)

5. Diskussion

Die exakte Erfassung der Körperzusammensetzung ist sowohl für die Schlachtkörperklassifizierung als auch für die Leistungsprüfung ein entscheidendes Kriterium. Ziel muss es sein, die Körperzusammensetzung trotz unterschiedlicher Haltungsbedingungen und unterschiedlicher Genetik exakt bestimmen zu können. Der Vorteil nicht *invasiver* Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung liegt dabei eindeutig in der Wiederholbarkeit der Messungen. Bei *invasiven* Methoden müssen die Tiere für die Untersuchung getötet werden, weshalb diese Methoden nur einmal an jedem Tier anwendbar sind und daher keine Wachstumsstudien bzw. Vergleiche über die Zeit hinweg an ein und demselben Tier erlauben. Ein Einsatz *invasiver* Methoden in der Leistungsprüfung bzw. der Zuchttierselektion ist ausgeschlossen, falls das Tier noch in der Zucht eingesetzt werden soll. Medizinisch genutzte bildgebende Verfahren sind hingegen für diesen Zweck geeignet und erzielen gute Ergebnisse, wie zahlreiche Literaturquellen belegen (Baulain, 1997; Baulain & Henning, 2001; Mitchell *et al.*, 2001; Mitchell & Scholz, 2009; Scholz & Baulain, 2009).

Die Magnetresonanztomographie stellt eines dieser medizinisch genutzten bildgebenden Verfahren dar. Durch die Nutzung der Kernspinresonanz arbeitet sie ohne ionisierende Strahlung, was gerade bei Zucht- und Jungtieren zu begrüßen ist. Durch die Möglichkeit, wiederholt Untersuchungen durchzuführen, können Wachstumsstudien durchgeführt werden. So können rasse- und tierartspezifische Wachstumskurven erstellt und wichtige Beiträge für die Zucht bzw. die Entwicklung der Tiere geliefert werden. Mit Hochfeldmagnetsystemen können zudem spektroskopische Untersuchungen durchgeführt werden, die Aufschluss über Stoffwechselforgänge geben.

Die entstehenden MR-Bilder können anschließend bearbeitet und einzelne Muskeln oder ganze Teilstücke ausgewertet werden. Zudem bietet die MRT die Möglichkeit, den Probanden virtuell in Teilstücke zu zerlegen und diese einzeln auszuwerten (Baulain, 1997; Szabo *et al.*, 1999; Baulain & Henning, 2001; Mohrmann *et al.*, 2006).

In dieser Arbeit wurden zwei Körperregionen mittels MRT untersucht und diese auf ihren Muskel- und Fettanteil ausgewertet, in den anschließenden Abschnitten sollen die Ergebnisse der Untersuchung im Hinblick auf ihre Aussagekraft und ihren Nutzen für die Tierzucht diskutiert werden.

5.1. MR-Bildauswertung

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass Unterschiede in der Aussagekraft der untersuchten Körperregionen vorliegen. Zwischen den zwei Untersuchungsregionen (Lendenregion und Oberschenkel- und Glutealregion) bestehen deutliche Unterschiede in der Genauigkeit der Vorhersage der Muskel- bzw. Fettvolumina. Die Aussagekraft der Bilder variiert je nach untersuchter Region und je nach untersuchtem Gewebe, wobei jedoch die Lendenregion in dieser Dissertation grundsätzlich aussagekräftigere Ergebnisse liefert als die Oberschenkel- und Glutealregion.

Gründe für die unterschiedliche Aussagekraft können, wie schon von Szabo *et al.* (1999) beschrieben, zum einen durch die Höhe der Korrelation zwischen (1) dem Bild und dem Körperteil und zum anderen durch die Höhe der Korrelation zwischen (2) dem Körperteil und der Körperzusammensetzung begründet sein. Dies bedeutet, dass ursächlich für die unterschiedlichen Beziehungen der Regionen bzw. der Gewebe sein kann, dass (1) das erzeugte Bild die Körperregion/das Gewebe nicht exakt darstellt bzw. die Auswertung nicht die tatsächliche Zusammensetzung wiedergibt oder, dass (2) die untersuchte Körperregion nicht repräsentativ für die Körperzusammensetzung ist.

Bei allen Ergebnissen der vorliegenden Dissertation muss immer berücksichtigt werden, dass durch die Verwendung von verschiedenen Genotypen und Geschlechtern eine große Variation an Muskel- und Fettausprägungen besteht. Die relativ große Spannweite von insgesamt 15 verschiedenen „Genotypen“, wovon bei knapp der Hälfte der Genotypen beide Geschlechter vorkamen, wurde gewählt, um dadurch ein möglichst breites Spektrum an Variationen abzudecken und somit zu gewährleisten, dass die resultierenden Ergebnisse an einer breiten Tiergruppe anwendbar sind.

5.1.1. Die Lendenregion

5.1.1.1. Volumen des Musculus longissimus dorsi

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Volumen des Musculus longissimus dorsi durch die Messung des Volumens bei 80 kg Körpergewicht mit einer Sicherheit von 86 % ($R^2 = 0,86$; $RMSE = 82021 \text{ mm}^3$) für ein Körpergewicht von 100 kg vorhersagen lässt (siehe Abb. 32, Kapitel 4.1.1.1.). Auch die Korrektur der Gewichte auf exakt 80 kg und exakt 100 kg

Körpergewicht (siehe Abb. 33 Kapitel 4.1.1.1.) verringert die Vorhersagegenauigkeit nur geringfügig ($R^2 = 0,83$; $RMSE = 69301 \text{ mm}^3$). Damit konnte gezeigt werden, dass eine Vorhersage des Muskelvolumens bei 100 kg anhand des Muskelvolumens bei 80 kg - trotz Verwendung unterschiedlichen Geschlechts und Genetik - mit hoher Sicherheit möglich ist.

Die höchste Beziehung ($R^2 = 0,97$; $RMSE = 35340 \text{ mm}^3$) zwischen den Werten der Volumina des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg wird erreicht, wenn ausschließlich die Werte der Eber berücksichtigt werden (siehe Abb. 35, Kapitel 4.1.1.1.). Dies zeigt, dass die Erfassung des Rückenmuskelvolumens bei Ebern ein ausgezeichneter Parameter ist, um eine Vorhersage der Muskelgröße zu einem späteren Zeitpunkt zu treffen. Dabei ist jedoch die relativ geringe Tierzahl ($n = 22$) zu berücksichtigen. Es handelte sich um 15 Kreuzungseber, sechs Large Black-Eber und einen Piétrain-Eber (siehe Tab. 6, Kapitel 3.1.1.). Somit lag auch für die Eber eine relativ breite Variation an Genotypen vor, was die Unabhängigkeit der hohen Regressionskoeffizienten von den verwendeten Rassen unterstreicht.

Berücksichtigt werden muss, dass im Rahmen dieser Arbeit die Muskel- und Fettvolumina der Lendenregion durch manuelle Grenzziehung (Umrandung der Gewebe) erfasst wurden. Einige Autoren (Mitchell *et al.*, 2001; Collewet *et al.*, 2005; Monziols *et al.*, 2006) sehen diese Art der Auswertung als problematisch an, da es zu subjektiven Grenzziehungen kommen kann. Dies wurde jedoch ausgeschlossen, da die Grenzfläche des Musculus longissimus dorsi zum darüber liegenden Fettgewebe aufgrund der Signalintensitäten der Gewebe (grau und weiß) deutlich voneinander abgrenzbar ist. Lediglich die Abgrenzung des Processus spinosus (Dornfortsatz des Wirbelkörpers) gestaltete sich schwierig. Die den Processus spinosus umgebenden Muskelstränge (Musculi interfidii und Musculi spinalis) konnten aufgrund ihrer, dem Musculus longissimus dorsi ähnlichen Signalintensität, nicht exakt differenziert werden. Der dorsale Rand des Wirbelkörpers konnte jedoch sicher erfasst werden, so dass die Umgrenzung der Muskelfläche immer oberhalb der Wirbelquerfortsätze (Processus transversi) verlief und den Processus spinosus mitsamt seiner Muskelstränge in die Muskelfläche einschloss (siehe Abb. 26, Kapitel 3.3.1.). Auch eine automatische Bildauswertung hätte (nach subjektiver Einschätzung) zu keiner besseren Abgrenzung der Gewebe geführt. Ursächlich für das Unvermögen, die den Processus spinosus umgebenden Muskelstränge exakt darzustellen, könnte die gewählte Schichtdicke von 15 mm sein. Durch diese Schichtdicke sind feine Fettgewebs- bzw. Faszienstränge zwischen dem Musculus

longissimus dorsi und den dem Processus spinosus umgebenden Muskelstränge nicht darstellbar. Bei einer dünneren Schichtdicke ist zu erwarten, dass die Abgrenzung der Musculi interfidii und der Musculi spinalis vom Muskelgewebe des Musculus longissimus dorsi möglich ist.

5.1.1.2. Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht

Die Auswertung des Volumens der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht (siehe Abb. 36, Kapitel 4.1.1.2.) zeigt in Bezug auf die gesamte Untersuchungsgruppe eine höhere Beziehung ($R^2 = 0,91$; $RMSE = 41781 \text{ mm}^3$) als die Untersuchung des Muskelvolumens der Lendenregion, für die Messungen bei 80 kg bzw. 100 kg Lebendmasse. Das wiederum zeigt, dass anhand der einfach auszuwertenden Speckschicht für eine große Gruppe an Genotypen und Geschlechtern das Volumen dieser Schicht bei einem Körpergewicht von 100 kg exakter vorhergesagt werden kann, als dies bei Verwendung des Muskelvolumens möglich ist. Mohrman *et al.* (2006) beschrieben bereits, dass die Variation zwischen Tieren vor allem im Fettgewebe liegt, wodurch das Fettgewebe eine bessere Aussagekraft aufweist als das Magergewebe. Auch in dieser Arbeit wird deutlich, dass eine hohe Variation im Fettgewebe die Schätzgenauigkeit steigert, da dadurch eine weite Bandbreite an möglichen Volumina abgedeckt ist.

Die Ergebnisse der Auswertung der Eber zeigt, dass die Erfassung des Rückenspeckvolumens beim Eber ebenso geeignet ist wie die Erfassung des Volumens des Musculus longissimus dorsi (siehe Abb. 38, Kapitel 4.1.1.2.). Somit sind beide Parameter überaus geeignet, um deren Volumina (Rückenspeck und Musculus longissimus dorsi) bei 100 kg mittels MRT schon bei einer Messung bei 80 kg Körpergewicht vorherzusagen. Bei der heutzutage wachsenden Diskussion um eine mögliche Ebermast sollte die Eignung der MRT zur Bestimmung der Schlachtkörpermerkmale an einer größeren Eberanzahl untersucht werden.

5.1.2. Die Oberschenkel- und Glutealregion

5.1.2.1. Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion

Die Exaktheit der Vorhersage des Muskelvolumens bei 100 kg anhand der Messung bei 80 kg ($R^2 = 0,78$; $RMSE = 292079 \text{ mm}^3$) bleibt hinter denen der Lendenregion zurück (siehe Abb.

40, Kapitel 4.1.2.1.). Das bedeutet entweder, dass (1) diese Region nicht so aussagekräftig ist wie die Lendenregion oder (2) dass die Bildauswertung bzw. das Bild nicht exakt die Muskel-, Fett- und Knochenverhältnisse im Körper widerspiegelt.

Ein möglicher Grund für die geringere Aussagekraft der Oberschenkel- und Glutealregion, könnte in den von Mohrmann *et al.* (2006) erkannten regionenspezifischen Wachstumsraten (gemessen mittels MRT) liegen. Die höchste Gewebewachstumsrate in Relation zum Gesamtgewicht fanden Mohrmann *et al.* (2006) in der Lenden-Bauchregion. Geringere Wachstumsraten ergaben sich in der Schulterregion und dem Schinken. Somit könnte die geringere Wachstumsrate im Schinkenbereich als ursächlich für die geringeren Beziehungen zwischen den Messungen bei 80 kg und 100 kg angesehen werden.

5.1.2.2. Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion

Beim Vergleich zwischen dem Fettgewebsvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (siehe Abb. 41, Kapitel 4.1.2.2.) bei 80 kg und bei 100 kg Körpergewicht werden Beziehungen von $R^2 = 0,44$ (RMSE = 137143 mm³) erreicht. Dies kann zum einen bedeuten, dass (1) diese Region von den in dieser Dissertation untersuchten Regionen, diejenige ist, die am wenigsten aussagekräftig ist oder (2), dass die Ursache in einer nicht optimalen Bildauswertung bzw. Bildqualität liegt bzw. (3), dass in dieser Region die stärksten Veränderungen in der Gewebeproportionen zwischen 80 kg und 100 kg auftreten.

Für alle Untersuchungen (sowohl die der Lendenregion als auch die der Oberschenkel- und Glutealregion) wurde eine Schichtdicke von 15 mm gewählt, womit in kurzer Zeit ein relativ großer Bereich untersucht werden kann (18,75 cm⁶). Nachteilig daran ist jedoch, dass diese relativ große Schichtdicke dazu führt, dass unterschiedliche Gewebe, die in verschiedenen Tiefen des Schnittes liegen, nicht einzeln dargestellt werden können. Die Gewebeinformationen der verschiedenen Tiefen werden für die bildliche Darstellung gemittelt und ergeben so einen Durchschnittsgrauwert. Dieser Effekt ist (wie in Kapitel 2.4.5. bereits beschrieben) als Partial-Volumen-Effekt bekannt. Das bedeutet, dass gerade in Regionen wie der Oberschenkel- und Glutealregion die sehr feinen Fettgewebsstränge aufgrund einer dicken Schichtdicke nicht mehr tomographisch aufgelöst werden können. Bei

⁶ 15 mm Schichtdicke mit einem Distanzfaktor von 0,25 = 18,75 mm pro Scheibe

der Auswertung der Oberschenkel- und Glutealregion kommt hinzu, dass eine halbautomatische Bildauswertung verwendet wurde. Das bedeutet, dass anhand der Graustufen Gewebe definiert und Grenzen automatisch gezogen wurden. Diese Grenzen wurden anschließend manuell nachbearbeitet, d.h. Knochengewebe, welches aufgrund seiner Signalintensität dem Fettgewebe zugeordnet wurde, wurde entfernt. Die gewählte Auswertungsart ist gerade in Bezug auf eine eventuell zu dicke Schichtdicke ein weiteres Argument dafür, dass die geringeren Beziehungen auf die möglicherweise für diese Region nicht ausreichende Bildqualität hinweisen. Jedoch können weitere Gründe an den unzureichenden Beziehungen in der Oberschenkel- und Glutealregion beteiligt sein, denn die MRT stellt trotz ihres guten Kontrastes zwischen Weichgewebe eine Methode dar, die – wie jede Methode - Fehlerquellen in sich birgt. Bei Beachtung bzw. Kenntnis der möglichen Fehlerquellen ist sie jedoch eine ausgezeichnete Methode, um die Körperzusammensetzung von Schweinen zu bestimmen.

Die in dieser Untersuchung erbrachten Ergebnisse zeigen, dass für eine exakte Bildauswertung mehrere Faktoren entscheidend sind: (1) die Bildqualität bezogen auf die Schichtdicke und (2) die Bilddarstellung. Eine ganze Reihe von Artefakten kann die MR-Bilderstellung stören. Zu den häufigsten Artefakten zählen Bewegungsartefakte, gerade wenn mit Tieren gearbeitet wird. Um diese auszuschließen, müssen die Tiere vor der Untersuchung sediert bzw. narkotisiert werden. Kleine Unruhen können die erzeugten Bilder unbrauchbar machen. Ein gutes Sedations- bzw. Narkosemanagement ist entscheidend für die Auswertbarkeit und damit die Brauchbarkeit der Bilder. In der hier vorliegenden Dissertation hat sich die gewählte Sedationsart mit einer intramuskulären Azaperon- und Ketamingabe beim Schwein als geeignet für den Untersuchungsrahmen herausgestellt (siehe Kapitel 3.2.1.). Neuere Geräte sind in der Lage Messungen Atmungs- oder EKG-gesteuert durchzuführen, was jedoch aufgrund der Unterbrechungen eine Messzeitverlängerung bedeutet. Wenn mit lebenden Tieren gearbeitet wird sollte jedoch stets versucht werden, die Narkose so kurz wie möglich zu halten, wofür oft ein Kompromiss zwischen Bildqualität und Messzeit eingegangen werden muss, wie auch Baulain (1997) anmerkt. Für die Bildqualität ist die Wahl der Schichtdicke entscheidend. Die Ergebnisse dieser Arbeit können daraufhin deuten, dass für die Messung der Oberschenkel- und Glutealregion, in der feine Fettgewebsstränge vorkommen, eine Schichtdicke von 15 mm nicht geeignet ist. Eine

automatische Bildauswertung führt zusätzlich zu einer Verzerrung der Ergebnisse, da aufgrund des Partial-Volumen-Effektes ein Mittelwert der Gewebe gebildet wurde, und die einzelnen Gewebe bei einer automatischen Bildauswertung so eventuell falsch zugeordnet werden. Um jedoch andere Ursachen für die in der Oberschenkel- und Glutealregion erzielten schlechteren Korrelationen ausschließen zu können, sollte diese Region erneut mit einer möglichst dünnen Schichtdicke untersucht werden, um Artefakte wie den Partial-Volumen-Effekt auszuschließen. Eine möglichst dünne Schichtdicke wird von zahlreichen Autoren als Möglichkeit gesehen, die Aussagekraft der Bilder zu erhöhen (Mitchell *et al.*, 2001; Monziols *et al.*, 2005). Letztlich spielt auch die Auswertungsart eine ebenso entscheidende Rolle für die Exaktheit der MR-Bilder wie die Wahl der Schichtdicke. Eine manuelle Auswertung, wie sie in dieser Arbeit für die Lendenregion gewählt wurde, sollte möglichst durch eine automatische ersetzt werden, um zu gewährleisten, dass sich keine personenbedingten Fehler einschleichen. Zudem ist eine manuelle Auswertung zeitintensiv und sollte daher durch schnellere Methoden ersetzt werden. Aber auch vollautomatische Auswertungen haben ihre Schwachstellen, da manche Gewebe (z.B. Knochen und Fettgewebe) die gleiche Signalintensität aufweisen und dadurch fälschlicherweise als ein Gewebe erkannt werden (Monziols *et al.*, 2006). Somit muss auch die vollautomatische Auswertung stets geprüft werden.

Zusammenfassend lässt sich beim Vergleich der ausgewerteten MRT-Daten feststellen, dass die höchste Aussagekraft zur Vorhersage der Volumina bei 100 kg Lebendmasse in der Lendenregion liegt, und dass über das Körpergewicht keine Aussage über die Größe des Rückenspeckvolumens getroffen werden kann, wie in Abbildung 39 (Kapitel 4.1.1.2.) ersichtlich ist ($R^2 = 0,06$; $RMSE = 117132 \text{ mm}^3$).

5.2. DXA

In der vorliegenden Dissertation diene DXA als Referenzmethode, um die Körperzusammensetzung am lebenden Schwein zu bestimmen. Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass DXA eine exakte Methode zur Bestimmung der Körperzusammensetzung sowohl beim Mensch als auch beim Nutztier ist (Grier *et al.*, 1996; Mitchell *et al.*, 1996; Mitchell *et al.*, 1998 a; Mitchell *et al.*, 1998 b; Mitchell *et al.*, 1998 c; Mitchell *et al.*, 2001; Mitchell *et al.*, 2002; Mitchell *et al.*, 2003; Marcoux *et al.*, 2005; Scholz *et al.*, 2007).

Beim Vergleich des Gesamtkörperfettanteils (%) bei 80 kg mit dem bei 100 kg (siehe Abb. 42, Kapitel 4.2.1.) wird ein Regressionskoeffizient von $R^2 = 0,87$ (RMSE = 2,80 %) erreicht. Wird der Magerweichgewebeanteil (%) bei 80 kg und bei 100 kg miteinander verglichen (siehe Abb. 44, Kapitel 4.2.2.), so ergibt sich erwartungsgemäß ebenfalls ein Wert von $R^2 = 0,87$ (RMSE = 2,77 %). Es zeigt sich keine Verbesserung durch die Wahl des Fettgewebes als Parameter für die Vorhersage der Körperzusammensetzung bei 100 kg Lebendmasse. Beide Parameter sind annähernd gleich in ihrer Genauigkeit, da stets ein Ganzkörperscan durchgeführt und die Gesamtkörperzusammensetzung ermittelt wurde, ohne gezielt einzelne Regionen zu untersuchen. Zudem wird aufgrund des 3-Komponenten-Modells der Anteil der Fettmasse stets durch den Anteil an Magerweichgewebe mitbestimmt. Der Knochenmineralanteil spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle. Durch Abbildung 43 (Kapitel 4.2.1.) wird deutlich, dass das Körpergewicht allein keine Aussagekraft für den Gesamtkörperfettgehalt (%) besitzt und somit nicht als Kriterium zur Bestimmung der Körperzusammensetzung herangezogen werden kann ($R^2 = 0,01$; RMSE = 6,88 %).

Berücksichtigt werden muss bei den DXA-Ergebnissen, dass bei Tieren, die über 120 kg Körpergewicht und eine Körpertiefe von über 28 cm besitzen, einzelne Pixel nicht in Fett-, Muskel- oder Knochengewebe differenziert werden können, wie schon Lukaski *et al.* (1999) publizierten. Die Autoren (Lukaski *et al.*, 1999) stellten dar, dass DXA ab einer Körperdicke von 28 cm nicht mehr in der Lage ist, die Röntgenschwächung zu ermitteln und so einzelne Körperpartien (einzelne Pixel) nicht analysiert werden können. Einige Tiere dieser Arbeit besaßen ebenfalls eine Körperdicke von über 28 cm, so dass die Größe der Beziehung zwischen den DXA-Ergebnissen partiell durch Unzulänglichkeiten bei der Analyse besonders „dicker“ Körperpartien eingeschränkt wurde. Neuere Gerätegenerationen wie das GE Lunar iDXA sind auch für „dickere“ Probanden konzipiert (GE Lunar, 2010).

Die Ergebnisse zeigen, wie bereits in der Literatur zu finden (z.B.: Mitchell *et al.*, 1996; Suster *et al.*, 2003), dass DXA als quantitatives Analyseverfahren geeignet ist, Veränderungen in der Körperzusammensetzung zu detektieren und die Körperzusammensetzung von 100 kg schweren Schweinen bei 80 kg relativ genau vorherzusagen und somit als Referenzmethode eingesetzt werden kann. DXA stellt jedoch kein zugelassenes bildgebendes Verfahren dar, mit dem einzelne Muskelstränge erfasst werden können und kann damit nicht genutzt werden um Fett- oder Muskelvolumina zu bestimmen.

5.3. Vorhersage der DXA-Ergebnisse mittels der MRT-Ergebnisse

Die multiplen Regressionsgleichungen (siehe Abb. 45 und 46, Kapitel 4.3.) zeigen, dass die DXA-Körperzusammensetzung beim Schwein anhand mehrerer MRT-Schnittbilder (Fett- und Muskelvolumen) mit hoher Genauigkeit bestimmt werden kann.

In Abbildung 45 (siehe Kapitel 4.3.) wird die Genauigkeit der Vorhersage des DXA-Fettgehaltes (%) bei 100 kg durch das MRT-Volumen des Musculus longissimus dorsi und das MRT-Volumen der Speckauflage bei 80 kg Körpergewicht dargestellt. Der Regressionskoeffizient ist hoch ($R^2 = 0,82$; RMSE = 3,31 %). Das heißt, dass mit hoher Sicherheit anhand der Auswertung der Lendenregion (Muskel- und Fettvolumen) bei 80 kg Körpergewicht der DXA-Gesamtfettgehalt (%) des Schweines bei einem Gewicht von 100 kg Körpergewicht vorhergesagt werden kann.

In Abbildung 46 (siehe Kapitel 4.3.) wird ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,84$ (RMSE = 3,10 %) für die Vorhersage des DXA-Fettgehaltes (%) bei 100 kg Körpergewicht durch die MRT-Muskel- und Fettvolumenwerten bei 100 kg erreicht. Die Schätzgenauigkeit liegt nur geringfügig über der aus Abbildung 45. Das bedeutet, dass es möglich ist, anhand der Auswertung von fünf MRT-Schnittbildern der Lendenregion unter Bestimmung des Muskel- und Fettgewebevolumens den DXA-Fettgehalt (%) bei 100 kg Körpergewicht relativ genau vorherzusagen.

Andere Autoren bestätigen diese Ergebnisse und unterstreichen ihre Aussagekraft. Scholz (2002) vergleicht in seiner Arbeit DXA-Daten mit denen der MRT und der Zerlegung, um die Genauigkeit der Methoden gegen den heute noch gültigen Goldstandard die Zerlegung zu erfassen. Die Genauigkeit der MRT wurde anhand von Stufenschlachtungen geprüft. Scholz (2002) fand hohe Beziehungen zwischen den MRT-Volumenmaßen mit den Teilstückgewichten der Schlachtkörperzerlegung ($R^2 = 0,961$; Beziehung zwischen dem Rückengewicht und dem MRT-Volumen des Koteletts). Höher noch war das Bestimmtheitsmaß wenn die Kotelettfläche am Schlachtkörper mit dem MRT-Kotelettvolumen in Beziehung gesetzt wurden ($R^2 = 0,982$). Im Vergleich zur Zerlegung bietet die MRT nach Scholz (2002) geringradig bessere Ergebnisse als die DXA. Beide Methoden jedoch ermöglichen hohe Bestimmtheitsmaße mit geringem Standardschätzfehler.

Diese vielversprechenden Ergebnisse sollten dazu anregen, weitere Untersuchungen folgen zu lassen, in denen die Aussagekraft der Regionen bei jüngeren Tieren, d.h. mit geringerem Körpergewicht, ermittelt wird, um dadurch die Zuchttierselektion noch effektiver gestalten zu können.

5.4. „Auffällige“ Ergebnisse - Deutsche Landrasse Sauen

Auffallend sind vor allem in Grafiken, die die MRT-Ergebnisse bei 80 kg und bei 100 kg gegenüberstellen, fünf Deutsche Landrasse Sauen (siehe z.B. Abb. 32 und Abb. 33, Kapitel 4.1.1.1. sowie Abb. 36, Kapitel 4.1.1.2.). Insgesamt wurden 19 Deutsche Landrasse Sauen (DL-Sauen) in den Versuch einbezogen. Von diesen Tieren ist jedoch nur ein Wurf auffällig und in diesem Wurf wiederum nur fünf bzw. sechs Tiere.

In den Graphen, die zum einen die Volumina des Musculus longissimus dorsi (Abb. 32 und Abb. 33, Kapitel 4.1.1.1.) und zum anderen die Volumina der Speckauflage (Abb. 36, Kapitel 4.1.1.2.) vergleichend darstellen, liegen fünf Sauen der „Ausreißergruppe“ oberhalb der Regressionsgeraden. Werden alle DL-Sauen dieser Dissertation miteinander in Beziehung gesetzt, wird nach Eliminierung der fünf „Ausreißer“ eine hohe Beziehung erreicht (siehe Abb. 34, Kapitel 4.1.1.1.). Bei der vergleichenden Betrachtung der Volumina des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg erreicht der Regressionskoeffizient, wenn die fünf auffälligen Sauen herausgenommen werden, einen Wert von $R^2 = 0,82$ (RMSE = 45844 mm³). Ein ähnliches Ergebnis liefert Abbildung 37 (Kapitel 4.1.1.2.), in der die Rückenspeckvolumina bei 80 kg und bei 100 kg dargestellt werden ($R^2 = 0,80$; RMSE = 38478 mm³). Somit sind die DL-Sauen nicht grundsätzlich „anders“ als die anderen Versuchstiere.

Was jedoch die fünf „Ausreißer“ anbelangt, ist bisher nicht genau bekannt, warum sie bis 80 kg im Muskel-/Fettvolumen „hinter“ ihren Geschwistern liegen und zwischen 80 kg und 100 kg ihre Geschwistertiere „einholen“. Ein denkbarer Ansatz liegt in der unterschiedlichen Haltung vor und nach der ersten Untersuchung, d.h. bis 80 kg Körpergewicht und danach. Bemerkte wurde, dass der betroffene DL-Wurf bis zum ersten Untersuchungstag zusammen mit einem Wurf „pigmentierter“ Schweine gehalten wurde und im Gegensatz zu den „pigmentierten“ Schweinen einige der DL-Sauen am ersten Untersuchungstag eine geringere Lebendmasse aufwiesen. In der Zeit bis zu ihrem zweiten Untersuchungstag wurde der Wurf DL-Sauen von den „pigmentierten“ Schweinen getrennt. In dieser Zeit nahmen die „auffälligen“ Sauen deutlich an Lebendmasse zu und erreichten bis zum zweiten Untersuchungstermin das erwünschte Durchschnittsgewicht. Folglich kann kompensatorisches Wachstum aufgrund unterschiedlicher Vorbedingungen in der Haltung bzw. Fütterung (Futteraufnahme) die Vorhersagegenauigkeit der Körperzusammensetzung

negativ beeinflussen. Dafür spricht auch, dass der andere Wurf DL-Sauen, der während der gesamten Zeit separat gehalten wurde, nicht auffällt. Folglich ist darauf zu achten, dass die Tiere möglichst masseabhängig unter einheitlichen Umwelt- und Haltungsbedingungen untersucht werden.

5.5. Effekt von Rasse- bzw. Kreuzungsgruppen

Da in den Versuchen Schweine einer breiten genetischen Basis, d.h. einer großen Anzahl verschiedener Rassen- bzw. Kreuzungsgruppen verwendet wurde, um möglichst allgemeingültige Aussagen für die Leistungsprüfung mittels MRT bzw. DXA zu erhalten, wurde der „Genotyp“-Effekt mit Hilfe einer Mischmodellanalyse näher analysiert.

5.5.1. Volumen des Musculus longissimus dorsi (MRT)

Beim Vergleich der Volumina des Musculus longissimus dorsi (siehe Abb. 47, Kapitel 4.4.1.) werden signifikante Rassen- bzw. Kreuzungsgruppenunterschiede deutlich, zum einen (1) bezogen auf die Zunahme des Muskelvolumens und zum anderen (2) bezogen auf die Gesamtgröße des Muskelvolumens. Werden nur die Volumina des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg Körpergewicht betrachtet (siehe Abb. 48, Kapitel 4.4.1.), so wird deutlich, dass Schweine der Rasse Large Black und Kreuzungen zwischen DL-DE ein signifikant geringeres Muskelvolumen aufweisen. Andere Kreuzungen (Pi-WiDuLB und Pi-LBWiDu), sowie reine Piétrain weisen das signifikant größte Muskelvolumen auf, sicherlich begründet durch die ausgesprochene, genetisch fixierte Fleischfülle der Piétrain. Werden jedoch die Muskelvolumina bei 100 kg Körpergewicht gegenüber gestellt (siehe Abb. 49, Kapitel 4.4.1.), so wird deutlich, dass zusätzlich Kreuzungen wie Ha-SH stark an Muskelvolumen zunehmen. Beide Rassen (Hampshire und Schwäbisch-Hällisches Schwein) zeichnen sich durch ihre Spätreife aus, was sich deutlich in einem stärkeren Muskelwachstum zwischen 80 kg und 100 kg Körpergewicht zeigt (siehe Abb. 50, Kapitel 4.4.1.). Auch Schweine der Rasse Piétrain zeigen zwischen 80 kg und 100 kg eine deutliche Volumenzunahme des Musculus longissimus dorsi. Bei 100 kg Körpergewicht besitzen Schweine der Rasse Large Black immer noch das geringste Muskelvolumen, was sich in der Darstellung der Volumenzunahme zwischen 80 kg und 100 kg (siehe Abb. 50, Kapitel 4.4.1.) abzeichnet. Der Vergleich der Muskelvolumina lässt leicht erkennen, warum einige Rassen den Anforderungen der heutigen auf höchsten Fleischanteil ausgelegten Fleischwirtschaft nicht mehr genügen. Ein zu geringes Muskelvolumen gepaart mit geringem Muskelwachstum, wie zum Beispiel bei Large Black, ist ein Ausschlusskriterium für die konventionelle Schweinezucht.

5.5.2. Volumen der dem Musculus longissimus dorsi aufliegenden Speckschicht (MRT)

Das Rückenspeckvolumen bei 80 kg und bei 100 kg zeigt erwartungsgemäß nahezu invers zum Volumen des Musculus longissimus dorsi die Rassen- und Kreuzungsgruppenunterschiede (siehe Abb. 51, Kapitel 4.4.2.). Auffallend sind Schweine der Rasse Large Black, die signifikant höhere Rückenspeckauflagen - sowohl bei 80 kg als auch bei 100 kg - besitzen. Zudem zeigen Kreuzungsgruppen, in denen Large Black mit hohen genetischen Anteilen vertreten ist (Pi-LB oder LB-PiHaPiDu), ebenfalls ein signifikant größeres Rückenspeckvolumen als Zuchtgruppen die heutzutage in der konventionellen Schweinezucht Einsatz finden (z.B. Pi oder DL-DE bzw. DE-DL). Die Kreuzung zwischen Piétrain und Cerdo Iberico (Pi-Ib) weist ein annähernd so großes Rückenfettvolumen auf, wie Kreuzungen mit hohem Large Black-Anteil (Pi-LB oder LB-PiHaPiDu), wohingegen reine Piétrain eine sehr dünne Rückenfettauflage haben.

Auffallend ist, dass die Kreuzungen DE-DL und DL-DE ein annähernd gleiches Rückenfettvolumen aufweisen, wohingegen sie Unterschiede im Volumen des Musculus longissimus dorsi aufweisen. Die reinen Deutschen Edelschweine bzw. Deutschen Landrasse-Schweine zeigen beim Vergleich der Rückenspeckvolumina Wachstumsunterschiede. So setzen Schweine der Deutschen Landrasse in dieser Studie mehr Rückenspeck als das Deutsche Edelschwein an. Beim Vergleich der Volumina des Musculus longissimus dorsi fällt jedoch auf, dass die Deutsche Landrasse ein geringgradig größeres Muskelvolumen erreicht als das Deutsche Edelschwein. Signifikant ($p < 0.05$) sind dabei die Unterschiede zwischen DE und DL-DE, sowie zwischen DE-DL und DL-DE. Eber bzw. Sauen mit einem niedrigen oder hohen Natural-Zuchtwert für den Muskelfleischanteil sind höchstwahrscheinlich die Ursache für die unterschiedlichen Merkmalsausprägungen in den reziproken Kreuzungen aus DL und DE, die bei einer größeren Tierzahl nicht zu erwarten sind.

Bei Untersuchungen von Baulain *et al.* (2010) an 202 Schweine-Schlachtkörpern mittels MRT wurden Unterschiede zwischen den vier verwendeten Genotypen (Piétrain, DE-DL, Piétrain-Westhybrid und db.65xdb.classic) deutlich. Es wurden fünf Teilstücke am Schlachtkörper untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass die Genauigkeiten je nach Rasse und Untersuchungsregion variierten ($R^2 = 0,97$ bis $0,96$; RMSE = $0,43$ bis $0,62$ kg). So muss davon ausgegangen werden, dass bezogen auf die verschiedenen Rassen Unterschiede in der Aussagekraft bestimmter Körperregionen vorliegen.

5.5.3. Muskelvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)

Beim Vergleich der Oberschenkel- und Glutealregion (siehe Abb. 52, Kapitel 4.4.3.) werden rassespezifische Muskelzunahmen und Muskelvolumina offensichtlich. Die Unterschiede sind jedoch geringer als bei den Volumina des Musculus longissimus dorsi. Auch in der Oberschenkel- und Glutealregion werden die geringsten Muskelvolumina bei der Rasse Large Black erzielt. Das größte Muskelvolumen erreichen - wie schon beim Volumen des Musculus longissimus dorsi (siehe Abb. 47, Kapitel 4.4.3.) - Schweine der Rasse Piétrain und die Kreuzung zwischen Hampshire und Schwäbisch-Hällischem Schwein (Ha-SH). Eine sehr starke Muskelvolumenzunahme zeigen Schweine der Rassen bzw. der Kreuzungen Duroc, DE-DL und Ha-SH.

5.5.4. Fettvolumen der Oberschenkel- und Glutealregion (MRT)

Für das Fettvolumen in der Oberschenkel- und Glutealregion sind ebenfalls rassespezifische Unterschiede zu erkennen (siehe Abb. 53, Kapitel 4.4.4.). Erneut zeigt die Rasse Large Black das größte Fettvolumen unabhängig vom Körpergewicht, wobei hier keine Zunahme zwischen 80 kg und 100 kg festgestellt werden kann. Auffallend ist, dass Schweine der Kreuzungen Pi-LBWidU oder Pi-WiDuLB zwischen 80 kg und 100 kg an Fettvolumen zunehmen, Rassen wie das Deutsche Edelschwein oder die Kreuzung DE-DL im selben Zeitraum jedoch scheinbar an Fettvolumen abnehmen.

Aufgrund der vorgestellten Ergebnisse sollte die Oberschenkel- und Glutealregion erneut untersucht werden, um auszuschließen, dass durch die Pixelmittelung Fett- und Muskelgewebe eventuell falsch wiedergegeben wurden. Alternativ sollte der komplette Oberschenkel- und Glutealbereich erneut untersucht werden, um auszuschließen, dass dieser Bereich möglicherweise nicht repräsentativ ist.

Baulain et al. (2010) erkannten bei der Untersuchung von 202 Schweineschlachtkörpern mittels MRT, dass der Schinkenbereich am Schlachtkörper den höchsten Bewertungsfehler aufwies und das Rasseunabhängig bezogen auf die vier verwendeten Rassen bzw. Kreuzungen (Piétrain, DE-DL, Piétrain-Westhybrid und db.65xdb.classic).

5.5.5. Gesamtkörperfettgehalt bezogen auf das Körpergewicht (DXA)

Bei der Betrachtung des prozentualen Fettgewebes bezogen auf die Körpermasse (siehe Abb. 54, Kapitel 4.4.5.) wird erwartungsgemäß deutlich, dass einige Rassen- bzw. Kreuzungsgruppen einen erhöhten Körperfettanteil besitzen, wohingegen andere sehr mager sind. Wird diese Grafik unter Beachtung der Ergebnisse der Auswertung des Rückenspeckvolumens betrachtet, so wird erkennbar, dass Rassen die einen erhöhten prozentualen Körperfettgehalt aufweisen (z.B. Large Black, Pi-Ib) auch ein großes Rückenfettvolumen (siehe Abb. 51, Kapitel 4.4.2.) besitzen. Somit lässt sich anhand der Messung der Rückenspeckauflage eine Aussage über den Gesamtkörperfettgehalt treffen. Alle Schweine zeigen eine relativ deutliche Zunahme des Gesamtfettgehaltes zwischen 80 kg und 100 kg, wobei Schweine der Deutschen Landrasse und Schweine der Kreuzung Pi-Ib die größte relative Zunahme aufweisen.

5.5.6. Magerweichgewebeanteil bezogen auf das Körpergewicht (DXA)

Bei allen Schweinerassen bzw. Kreuzungen kommt es im Gewichtsbereich zwischen 80 kg und 100 kg zu einer Abnahme des Magerweichgewebeanteils bezogen auf das Körpergewicht (siehe Abb. 55, Kapitel 4.4.6.). Wobei auch bei dieser Betrachtung im Vergleich mit den anderen Rassen erneut die Rasse Large Black mit einem geringen Magerweichgewebeanteil auffällt. Eine deutliche Abnahme des prozentualen Magerweichgewebeanteils zwischen 80 kg und 100 kg wird bei Schweinen der Deutschen Landrasse und der Kreuzung Pi-Ib erkennbar, im Vergleich mit den anderen Rassen und Kreuzungen (siehe Abb. 56, Kapitel 4.4.6.). Diese Schweine weisen im gleichen Zeitraum erwartungsgemäß eine erhöhte Zunahme an Fettgewebe auf (siehe Abb. 54, Kapitel 4.4.5.). Beruhend auf den Modellannahmen von DXA bestätigte Soffner (2003), dass sich der Fettgehalt mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,99$ stets entgegengesetzt zum Magerweichgewebeanteil verhält (RMSE = 0,002).

5.5.7. Knochenmineraldichte (g/cm^2) bezogen auf das Körpergewicht (DXA)

Bei der Betrachtung der Knochenmineraldichte (Abb. 57, Kapitel 4.4.7.) fällt auf, dass die Knochenmineraldichte bei allen Rassen zwischen 80 kg und 100 kg zunimmt. Die Kreuzung

Pi-Ib weist unabhängig vom Körpergewicht die größte Knochenmineraldichte auf. Ursache dafür könnte sein, dass die ursprünglichen Cerdo Iberico noch extensiv gehalten werden und eventuell deshalb eine höhere Knochenmineraldichte aufweisen. Ähnliche Ergebnisse lieferte Böttinger (2006), die den Einfluss verschiedener Produktionssysteme auf das Wachstum mittels DXA untersuchte. Böttinger (2006) erkannte, dass Schweine, die im Außenklimastall auf Stroh (mit Spaltenbodenanteil im Fütterungs- und Tränkebereich) gehalten wurden, eine höhere Knochenmineraldichte und einen höheren Knochenmineralgehalt aufwiesen als Schweine aus einem herkömmlichen Maststall mit Vollspaltenboden und vergleichsweise weniger Bewegungsfreiheit. Lösel *et al.* (2010) stellten bei DXA-Untersuchungen an 77 Schweinen verschiedener Kreuzungen rassespezifische Unterschiede sowohl in der Knochenmineraldichte als auch im Knochenmineralgehalt fest. Die Knochenmineraldichte war, wie in der vorliegenden Arbeit bei Kreuzungen mit Cerdo Iberico am höchsten, wobei bei Lösel *et al.* (2010) die Kreuzung Duroc x Cerdo Iberico die größte Knochenmineraldichte aufwies. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Kreuzung nicht verwendet jedoch wird bei Betrachtung der Ergebnisse (Abb. 57, Kapitel 4.4.7.) erkennbar, dass die Rasse Duroc bei 80 kg Körpergewicht die zweitgrößte Knochenmineraldichte nach der Kreuzung Pi-Ib aufweist, was die Ergebnisse von Lösel *et al.* (2010) unterstreicht.

Durch die varianzanalytische Auswertung der MRT- und DXA-Ergebnisse wird deutlich, dass es erwartungsgemäß rassespezifische Besonderheiten gibt, die sich in unterschiedlichem Muskel- bzw. Fettwachstum oder in unterschiedlichen Muskel- bzw. Fettausmaßen deutlich machen. Auffällig ist, dass Rassen die häufiger extensiv genutzt werden, wie Large Black, Schwäbisch-Hällisches Schwein und zum Teil auch Duroc ein größeres Fettvolumen gepaart mit einem geringeren Muskelvolumen aufweisen. Über rassespezifische Muskel- und Fettausprägungen beim Schwein wird in einigen Literaturquellen berichtet (z.B. Kuhlers *et al.*, 1980; Lo *et al.*, 1992; Scholz, 2002). Die von Kuhlers *et al.* (1980) an Schlachtkörpern erfassten rassespezifischen Unterschiede lassen sich durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nicht bestätigen. Nach Kuhlers *et al.* (1980) besitzen Tiere der Landrasse mehr Rückenfett ($P < .05$), kleinere Rückenmuskelflächen ($P < .01$) und weniger Magergewebe ($P < .01$) als Kreuzungen zwischen Landrasse-Sauen mit Duroc- oder Yorkshire-Ebern. Die unterschiedlichen Ergebnisse in Bezug auf die vorliegende Arbeit könnten in der Tatsache

begründet liegen, dass Kuhlens Ergebnisse aus dem Jahr 1980 und zudem aus Amerika stammen. In Kreuzungsversuchen von Lo *et al.* (1992) zwischen Landrasse-Schweinen und Schweinen der Rasse Duroc wurden ebenfalls Unterschiede in den Muskel- und Fettausmaßen aufgedeckt. Lo *et al.* (1992) erkannten anhand von Ultraschallmessungen, dass Schweine mit einem Duroc-Vatertier kürzere Schlachtkörper (um 2,1cm), weniger Rückenfett (um 7,3 mm), größere Longissimus-Flächen (um 4,4%) und mehr intramuskuläres Fettgewebe im Lendenmuskel (um 1,9%) aufwiesen als Schweine mit einem Landrasse-Vatertier. Für Fleischqualitätsparameter konnten Lo *et al.* (1992) keine Unterschiede feststellen.

Die Ergebnisse deuten an, dass durch Berücksichtigung und Kenntnis rassespezifischer Besonderheiten eine exaktere Vorhersage der Körperzusammensetzung getroffen werden kann. Dafür sollten gezielte Wachstumsanalysen an konventionellen Schweinerassen durchgeführt werden. In der Literatur finden sich Beispiele, in denen festgestellt wurde, dass rassespezifische Unterschiede vorliegen (McKay, 1994; Scholz, 2002; Marcoux *et al.*, 2005; Giles *et al.*, 2009). McKay (1994) erstellte individuelle Wachstumskurven von drei verschiedenen Schweinerassen (Edelschwein, Hampshire und Landrasse) anhand von Gewichtsmessungen. Es wurden Unterschiede zwischen den drei Rassen und zwischen den Geschlechtern (Eber und Sau) deutlich, so dass McKay (1994) eine Anpassung der linearen Regressionsgleichungen an die jeweilige Rasse und zum Teil an das jeweilige Geschlecht empfiehlt. Geschlechtsunterschiede wurden ebenso von Giles *et al.* (2009) mittels Computertomographie erfasst. Kastraten besaßen deutlich mehr Fettgewebe als Sauen, wobei Sauen wiederum fetter als Eber waren. Für den Magerweichtgewebeanteil waren die Unterschiede genau entgegengesetzt zu denen für Fettgewebe, die Eber waren am magersten. Marcoux *et al.* (2005) untersuchten drei Schweinelinien (Large White, Synthetic Genex und eine Meishan-abgeleitete Sauenlinie) mittels DXA und anschließender Zerlegung. Sie erkannten, dass trotz variierender Körperzusammensetzung der Schweinelinien keine Anpassung der Regressionsgleichungen erforderlich ist. Die Unterschiede in der Körperzusammensetzung zwischen den einzelnen Rassen wurden von DXA erfasst. Deutliche Unterschiede traten jedoch nur bezogen auf die *intercepts* auf, so dass die Autoren die manuelle Zerlegung der Schlachtkörper durch die Metzger als eine mögliche Fehlerquelle ansehen. Scholz (2002) vergleicht in seiner Arbeit DXA- mit MRT- und Zerlege-Daten und stellt Unterschiede in der Muskel- bzw. Fettausprägung zwischen RyR1-Genotypen, Rassen

und Geschlechtern dar. So zeigen homozygote Defektallelträger (nn) ein geringeres Fett-Muskel-Verhältnis, bei größerem Muskelvolumen. Den größten Fettanteil fand Scholz (2002) bei Kreuzungen zwischen Duroc und Minzhu. Geringe Unterschiede wurden auch zwischen den Geschlechtern deutlich (Sau, Eber, Kastrat). Sauen wiesen das größte Muskelvolumen und Eber das geringste Fett-Muskel-Verhältnis auf.

Die Kenntnis rassespezifischer Wachstumskurven ist gerade in der Tierzucht bedeutend, denn wenn sich Tiere verschiedener Rassen unterschiedlich schnell entwickeln, bedeutet das, dass die Leistungsprüfung für jede Rasse bzw. für verschiedene Kreuzungsgruppen zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen sollte, um bei jedem Tier das optimale Ergebnis zu erzielen. Für die Vorhersage der Körperzusammensetzung aus der Messung mittels MRT müssten, wenn sich rassespezifische Wachstumskurven bestätigen, Korrekturfaktoren für die verschiedenen Rassen eingeführt werden, um für jede Rasse die Körperzusammensetzung exakt schätzen zu können. Ohne Korrekturfaktoren müsste stets eine Ganzkörperuntersuchung durchgeführt werden.

Kenntnisse über die *in vivo* Körperzusammensetzung unterschiedlicher Rassen bringen Vorteile in der Schweinezucht. Die Ergebnisse können hilfreich sein, um Schweine zu züchten, die bestimmte Bedingungen erfüllen sollen. Zum Beispiel können diese Ergebnisse genutzt werden, wenn es darum geht, Schweine zu züchten, die für die Außenhaltung geeignet sind und dennoch den konventionellen Rassen in Bezug auf Fleischfülle und -qualität in nichts nachstehen. Hoffschulte und Scholz (2006) stellten fest, dass die Ergebnisse einer *in vivo* Körperzusammensetzung genutzt werden können, um Aussagen über die potentielle Fruchtbarkeit von Sauen zu treffen. Hoffschulte und Scholz (2006) erkannten, dass insbesondere ein zu niedriger aber auch ein zu hoher Fettgehalt die Fruchtbarkeit von Jungsauen tendenziell reduziert.

5.6. Ausblick

Die Untersuchungen dieser Dissertation zeigen, dass es möglich ist, die DXA-Körperzusammensetzung von Schweinen unterschiedlichster Genetik und Geschlechts mittels MRT anhand einzelner Schnittbilder vorherzusagen.

Bei der Auswertung der MRT-Ergebnisse wurde deutlich, dass bei einer gewählten Schichtdicke von 15 mm die Lendenregion beim Schwein die aussagekräftigste Region darstellt, und dass es mittels multipler Regression möglich ist, die DXA-Körperzusammensetzung bei 100 kg Körpergewicht durch die MRT-Auswertung der Lendenregion bei 80 kg Körpergewicht vorherzusagen. Gleichzeitig bestanden enge Beziehungen zwischen den MRT-Ergebnissen der Lendenregion für die Untersuchungstermine bei 80 bzw. 100 kg Lebendmasse. Dies zeigt, dass die Leistungsprüfung für die Zuchttierselektion mittels MRT zu einem früheren Zeitpunkt möglich ist.

Die MRT stellt eine Methode dar, mit der die Körperzusammensetzung sowie einzelne Teilstücke, wie in dieser Arbeit die Lendenregion und die Oberschenkel- und Glutealregion, nicht *invasiv in vivo* untersucht werden können. Jedoch muss aufgrund der großen Tierzahlen und aufgrund der Tatsache, dass ein MRT weder transportabel, noch einfach zu bedienen ist, die konventionelle Ultraschallmethode in der Leistungsprüfung erhalten bleiben, um aus einem großen Tierbestand die Tiere herauszusuchen, an denen eine Eigenleistungsprüfung mittels MRT durchgeführt werden soll. Zahlreiche Autoren bestätigen dies, wie zum Beispiel Baulain (1997) oder Szabo *et al.* (1999). Jedoch muss berücksichtigt werden, dass Untersuchungen über den Einsatz und die Exaktheit der Ultraschallmessung geräte- und personenbedingte Fehlmessungen mittels Ultraschall aufgezeigt haben (McLaren *et al.*, 1991; Rosner *et al.*, 2000; Müller & Polten, 2004). Somit stellt der Ultraschall eine kostengünstige und leicht anwendbare Methode dar, um Tendenzen in großen Tierzahlen aufzuzeigen. Es sollte jedoch stets berücksichtigt werden, dass eine exakte anatomische Positionierung des Schallkopfes nicht gegeben und auch der Aufsetzwinkel des Schallkopfes eventuell von Tier zu Tier verschieden ist.

Die MRT bietet dagegen eine geeignete Methode, um die Körperzusammensetzung am lebenden Tier zu bestimmen und durch die exakte Erfassung von Körperpartien eine

Eigenleistungsprüfung an jedem potentiellen Zuchttier durchzuführen. Es muss nicht mehr darauf „gewartet“ werden, dass die Nachkommen dieser potentiellen Zuchttiere einer konventionellen Mast- bzw. Schlachtleistungsprüfung unterzogen werden und somit für die Zucht verloren sind, da sie am Ende der Prüfung geschlachtet werden müssen. Tiere die aufgrund schlechter Körperzusammensetzung nicht für die Zucht geeignet sind, könnten früher, also mit durchschnittlich 80 kg Körpergewicht ausscheiden und müssten nicht bis 100 kg Körpergewicht aufgezogen und getestet werden. Wachstumsanalysen belegen, dass es gerade im Zeitraum zwischen 80 kg und 100 kg Körpergewicht zum höchsten Fettansatz am Schwein kommt (Giles *et al.*, 2009). Auch bei den für diese Arbeit untersuchten Tieren kam es zwischen 80 kg und 100 kg zu einer hohen prozentualen Körperfettzunahme bei gleichzeitig prozentualer Magerweichgewebsabnahme (siehe Abb. 54 Kapitel 4.4.5., Abb. 55 und Abb. 56 Kapitel 4.4.6.). Für den Züchter bedeutet das frühere Ausscheiden eine Kostenersparnis (Futter-, Stallplatz-, und Personalkosten) und dadurch eine Fokussierung auf seine „wertvollen“ Tiere. Es stellt sich jedoch die Frage, ob die „ausselektierten“ Tiere sofort geschlachtet werden können, da das angestrebte Mastendgewicht von 110 kg bzw. 120 kg Lebendmasse noch nicht erreicht ist.

Besonders im Hinblick auf die zu erwartende Ebermast hat die frühere Selektionsmöglichkeit große Vorteile, da zur Vermeidung hoher Androstenongehalte ein früherer Schlachttermin vorteilhaft ist (Müller, 2010). Coker *et al.* (2009) erkannten, dass mit steigendem Schlachtgewicht auch der Androstenongehalt tendenziell ansteigt. Die Autoren (Coker *et al.*, 2009) sehen jedoch für Fleisch von jungen Ebern (90 kg bis 114 kg) gute Einsatzmöglichkeiten. Aldal *et al.* (2005) berichtet über hohe Androstenon- und Skatolwerte, die ab dem 110. Lebenstag bzw. ab einem Gewicht von 75 kg möglich sind. Zamaratskaia *et al.* (2005) erfasste den Androstenongehalt bei Ebern in drei Gewichtsgruppen (90 kg, 100 kg und 115 kg). Mit steigendem Gewicht stieg auch der Gehalt an Androstenon, jedoch sehen die Autoren keine Lösung der Androstenonproblematik durch Wahl eines geringeren Schlachtgewichtes. Weitere Studien sollten folgen, um das Gewicht zu erfassen, ab dem der Androstenonspiegel ansteigt.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit würde sich eine Ultraschallspeckdickenmessung am 180. Lebenstag sowohl bei Jungsaunen als auch bei Jungebern anbieten, um eine Vorauswahl an Zuchttieren zu bilden (Paulke, 2010). Auch Rosner *et al.* (2000) empfehlen eine Ultraschallmessung um den 180. Lebenstag, da in ihrer Arbeit deutlich wurde, dass die

Schätzgenauigkeit für den Muskelfleischanteil von der Wahl des Messzeitpunktes abhängt. Die „besseren“ vorselektierten Zuchttiere sollten nach der Ultraschallmessung mittels MRT untersucht werden, um eine exakte Rangierung vornehmen zu können. Scholz und Baulain (2009) bzw. Scholz und Mitchell (2010) zeigen die Vorteile der MRT im Vergleich zu Ultraschall in Bezug auf die Genauigkeit der Schätzung der Körperzusammensetzung beim Schwein auf. Durch die Schnittbildtechnik der MRT können Schlachtleistungsdaten am Tier *in vivo* erhoben werden, was bedeutet, dass wertvolle Zuchttiere nicht geschlachtet werden bzw. zunächst deren Nachkommen produziert, aufgezogen und geprüft werden müssen, bis deren Zuchtwert relativ gesichert feststeht. Anhand der MRT-Schnittbilder könnten problemlos folgende Schlachtleistungsdaten zusätzlich ohne Zerlegung erhoben werden:

- Schlachtkörperlänge [cm]
- Rückenspeckdicke an Widerrist, Rückenmitte und Lende [cm]
- Rückenmuskelfläche am Kotelettanschnitt [cm²]
- Fettfläche am Kotelettanschnitt [cm²]
- Fett : Fleisch-Verhältnis
- Speckdicke über Rückenmuskelfläche (Speckmaß B) [cm]
- Seitenspeckdicke [cm]
- Fleischanteil im Bauch [%]

Somit können die Daten des Schlachtkörperwertes bereits am lebenden, noch zur Zucht nutzbaren Tier erhoben und in der Folge genutzt werden, ohne eine nachfolgende Nachkommen- bzw. Geschwisterprüfung durchführen zu müssen, was eine erhebliche Kostenersparnis bedeutet. Lediglich die Daten der Fleischbeschaffenheit können zurzeit noch nicht am lebenden Tier erhoben werden. Sollte für die MRT eine Methode gefunden werden den intramuskulären Fettanteil zu erfassen, so könnten gleichzeitig mit den Schlachtkörperdaten ebenfalls Daten der Fleischbeschaffenheit ermittelt werden, wobei die Fleischreifung nicht *in vivo* ermittelt werden kann. Die Mastleistungsdaten können aufgrund der Angaben über Futterverbrauch und tägliche Zunahmen entsprechend berechnet werden. Das heißt, dass sich mit der MRT-Untersuchung eine Möglichkeit bietet, an vorselektierten

Zuchttieren eine Mast- und (reduzierte) Schlachtleistungsprüfung als Eigenleistungsprüfung durchzuführen.

Um den Gewinn bzw. den Nutzen einer MRT-Untersuchung in der Schweinezucht zu verdeutlichen, folgt in Tabelle 10 eine Aufstellung der Kosten für eine MRT-Untersuchung. Die Kosten beziehen sich auf die Verwendung eines Niederfeldmagnet-Systems, das aufgrund der Wasserkühlung und der Möglichkeit, den Magneten nur während der benötigten Zeit in Betrieb zu nehmen, deutlich günstiger ist als ein Hochfeldmagnet-System. Hochfeldmagnetsysteme erreichen durch die höhere Magnetfeldstärke kürzere Aufnahmezeiten, verursachen jedoch aufgrund der Verwendung kryogener Gase zur Kühlung deutlich höhere Betriebskosten.

Tab. 10: Kosten einer MRT-Untersuchung beim Schwein bei Verwendung eines offenen Niederfeldmagnetsystems

1. Kosten für Material und Narkosemittel

Posten	Stückpreis [€]	Kosten [€]/Tier
2 Kanülen / Tier	0,0375	0,08
2 Heidelberger Verlängerungen	0,037	0,07
2 Spritzen		
- 1x 50/60 ml	0,62	0,62
- 1x 5 ml	0,037	0,04
1 Braunüle / Tier	0,0365	0,04
15 cm Klebeband		0,01
		<u>Kosten: 0,86</u>
Ketamin 100 mg/ml	für 80 kg KM = 32ml bei 40mg/kg	9,6
Azaperon 40 mg/ml	für 80 kg KM = 4 ml bei 2mg/kg	0,71
		<u>Kosten: 10,31</u>
		<u>Gesamtkosten: 11,17</u>
<i>bei reduzierter Narkosedauer:</i>		
<i>Ketamin 100 mg/ml</i>	<i>für 80 kg KM = 16ml bei 40mg/kg</i>	<i>4,8</i>
<i>Azaperon 40 mg/ml</i>	<i>für 80 kg KM = 4 ml bei 2mg/kg</i>	<i>0,71</i>
		<u>Kosten: 5,51</u>
		<u>Gesamtkosten bei reduzierter</u>
		<u>Narkose: 6,37</u>

2. Kosten für die MRT-Anlage

Posten	Preis [€]	Kosten [€]/Tier
MRT-Anlage		
gebrauchtes offenes MRT	80.000	
Edelstahlkabine	30.000	
Wasserkühlung	15.000	
	<u>gesamt: 125.000</u>	
	Abschreibung ⁸ : 12.500 €/Jahr	bei 2400 Tieren/Jahr: 5,50
Stromkosten	50 €/Tag	bei 20 Tieren/Tag: 2,50
Wartung der MRT-Anlage	5.600 €/Jahr	2,33
Personalkosten ⁷	3Arbeitstage a 2Personen: 2400 €	bei 60 Tieren/Woche: 40
		<u>Kosten der MRT-Anlage: 50,33</u>

Gesamtkosten 56,70 bis 61,49 € pro untersuchtem Schwein

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass eine MRT-Untersuchung, die einer (reduzierten) Schlacht- und Mast-Eigenleistungsprüfung entspricht, unter den beschriebenen Voraussetzungen und Annahmen pro Schwein circa 57 bzw. 62 € kosten würde⁹. Demgegenüber liegen die Kosten für eine Versuchsschlachtung mit anschließender Vollzerlegung bei 154 € pro Schlachthälfte (Quelle: Unterlagen LVG vom Versuchsschlachthaus Grub), das heißt mehr als doppelt so teuer wie eine MRT-Untersuchung, bei der das Zuchttier anschließend weiter zur Zucht verwendet werden kann und nicht „verloren“ ist.

Vorteile der MRT-Untersuchung für die Leistungsprüfanstalt

Die Nutzung der MRT in der Leistungsprüfung beim Schwein bedeutet zum einen circa 65 € Kosten pro Schwein und zum anderen eine exaktere Prüfung, in der die Schlachtleistungsdaten mit erfasst werden und das Tier dennoch am Leben bleibt und somit weiterhin züchterisch nutzbar ist. Das wiederum bedeutet, dass die Zahl der nachfolgenden Nachkommen- bzw. Geschwisterprüfungen deutlich reduziert werden kann, bzw. nur noch vereinzelt durchgeführt werden müsste.

⁷ Personalkosten beziehen sich auf zwei Personen und beinhalten die entsprechende Bildauswertung

⁸ Abschreibung berechnet für eine Laufzeit von 10 Jahren

⁹ die *reduzierte Narkosedauer* würde ausreichen, um das Zuchttier mittels MRT zu untersuchen; die anderen Narkosekosten beziehen sich auf eine Dauer von rund 50 Minuten, das entspricht einer MRT- und anschließenden DXA-Untersuchung wie es für die vorliegende Arbeit nötig war

Im Vergleich zur Mast- und Schlachtleistungsprüfung auf Station, die im Durchschnitt erst am 203. Lebenstag¹⁰ beendet wird (LSZ Boxberg, 2010), kann mittels MRT-Untersuchung am 184. Lebenstag eine Ersparnis von durchschnittlich 19 Prüftagen auf Station erzielt werden. Das wiederum spart Stationskosten. Wenn davon ausgegangen wird, dass 1 kg Futter 0,25 € kostet und mit einer täglichen Futterraufnahme von 3 kg pro Tier gerechnet wird, bedeutet eine Verkürzung der Stationsprüfungszeit um durchschnittlich 19 Tage eine Kostenersparnis von 14,25 € pro Tier (Futterkosten) im Rahmen der Leistungsprüfung. Allerdings müssten die Tiere eventuell weiter gemästet werden, da diese das Schlachtgewicht von ca. 115 kg noch nicht erreicht hätten.

Zusätzlich bedeutet eine Verkürzung der Stationsprüfung um 19 Tage eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Prüfstation, da statt durchschnittlich 3,06 Durchgängen pro Jahr (LSZ Boxberg, 2010) 3,65 Durchgänge pro Jahr möglich wären.

Außerdem wären geringere Tierzahlen notwendig, da aufgrund der hohen Zuchtwertschätzgenauigkeit eine Eigenleistungsprüfung erhebliche Vorteile gegenüber der Nachkommen- und Geschwisterprüfung besitzt. Das trifft speziell für die untersuchten Schlachtleistungsmerkmale zu, die eine hohe Heritabilität ($h^2 = 0,4 - 0,6$) aufweisen. Zur Verifizierung dieser hohen Heritabilitäten müssten jedoch Schätzwerte für die MRT-Daten berechnet werden. Generell ist davon auszugehen, dass die Heritabilitäts-Schätzwerte für die mittels MRT erhobenen Schlachtleistungsdaten nicht niedriger ausfallen als für die Ergebnisse nach Zerlegung der Schlachtkörper.

Auswirkung der Nutzung der MRT für die Leistungsprüfung auf das Generationsintervall

Durch die Nutzung einer MRT-Eigenleistungsprüfung am lebenden Zuchttier, die die Daten der Schlachtleistung der konventionellen Nachkommenprüfung ersetzen würde, könnte die Selektionsintensität gesteigert und damit das Generationsintervall gesenkt werden. Um dies zu verdeutlichen stellen Abbildung 58 und 59 den momentan geläufigen zeitlichen Ablauf einer Leistungsprüfung und Zuchtwernerfassung von potentiellen Zuchttieren dar:

¹⁰ die Daten beziehen sich auf die Mittelwerte aus der Nachkommenprüfung von Piétrain-Besamungsebern im Feld (LSZ Boxberg, 2010); für die Berechnung wurden im Vergleich zu den in dieser Arbeit erzielten Daten Daten aus einer Prüfung im Feld gewählt, da die Versuchsbedingungen keine Stationsbedingungen sind und somit davon auszugehen ist, dass die Mastleistung bei Tieren auf Station höher ist als die im Feld

1. Ablauf der Leistungsprüfung und Zuchtwerterfassung bei einer potentiellen Zuchtsau:

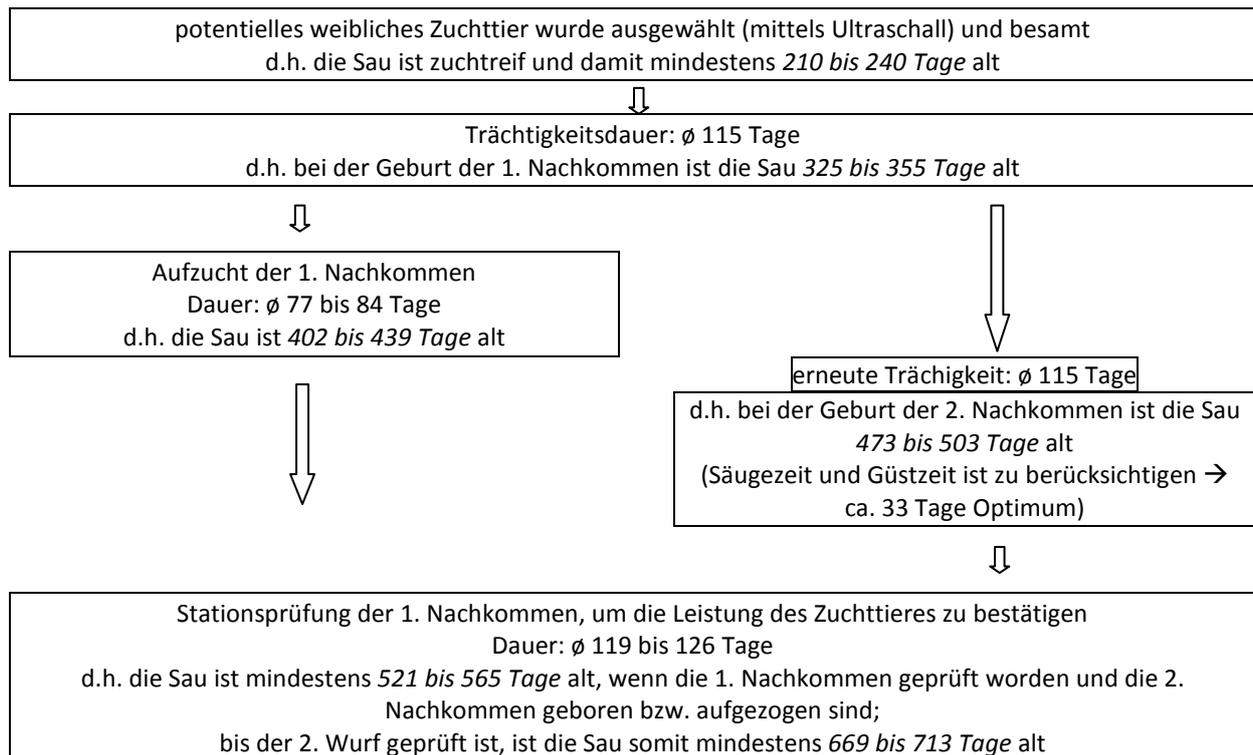


Abb. 58: Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Leistungsprüfung und Zuchtwerterfassung bei einer potentiellen Zuchtsau

Aus der Abbildung 58 geht hervor, dass nach einer Ultraschallspeckdickenmessung zunächst die Erzeugung von Nachkommen folgt und deren Leistung in einer Nachkommenschaftsprüfung auf Station bzw. im Feld erfasst wird. Bis die Ergebnisse der Nachkommenschaftsprüfung vorliegen, hat das weibliche Zuchttier bereits ein Lebensalter von mindestens 521 Lebenstagen erreicht und meist einen zweiten Wurf erzeugt, dessen Leistung ebenfalls in die Zuchtwerterfassung mit einfließt. Bis jedoch die Ergebnisse der Nachkommenprüfung des zweiten Wurfes vorliegen ist das weibliche Zuchttier bereits mindestens 669 Tage alt und mehrere eventuell züchterisch wertvolle Nachkommen sind möglicherweise für die Nachkommenprüfung getötet worden.

Würde die MRT als Methode der Eigenleistungsprüfung am potentiellen weiblichen Zuchttier eingesetzt, so würde aufgrund der anzunehmenden hohen Heritabilität schon mit einem Alter von 184 Lebenstagen der Sau feststehen, ob der Wurf dieser Sau aufgrund ihrer Eigenleistungsprüfung geeignet erscheint, diese Sau in der Zucht zu ersetzen. Das wiederum bedeutet, dass das Generationsintervall für die Sau deutlich reduziert werden könnte. Da mit einer hohen Heritabilität der MRT-Eigenleistungsergebnisse zu rechnen ist, die mindestens ebenso hoch ist wie die aus Zerlegung (z.B. $h^2=0,6$), würde mit einer Eigenleistungsprüfung

eine Zuchtwertschätzgenauigkeit von 77% ($=\sqrt{h^2}$) erreicht. Um diese auf annähernd 90% zu erhöhen, müsste theoretisch nur ein weiterer Wurf der Sau (10 Nachkommen) geprüft werden (siehe Abb. 13, Kap. 2.6.3.). So kann davon ausgegangen werden, dass das Generationsintervall der Sau durch den Einsatz der MRT um 141 bzw. 337 Tage¹¹ gekürzt werden könnte. Wird davon ausgegangen, dass im Durchschnitt zwei Würfe der Sau in die Berechnungen mit einfließen, so würde sich durch die Nutzung der MRT das Generationsintervall um 475 Tagen¹² verkürzen lassen ohne starke Einbußen in der Genauigkeit der Zuchtwertschätzung für den Merkmalskomplex Schlachtleistung eingehen zu müssen.

2. Ablauf der Leistungsprüfung und Zuchtwernerfassung bei einem potentiellen Zuchteber:

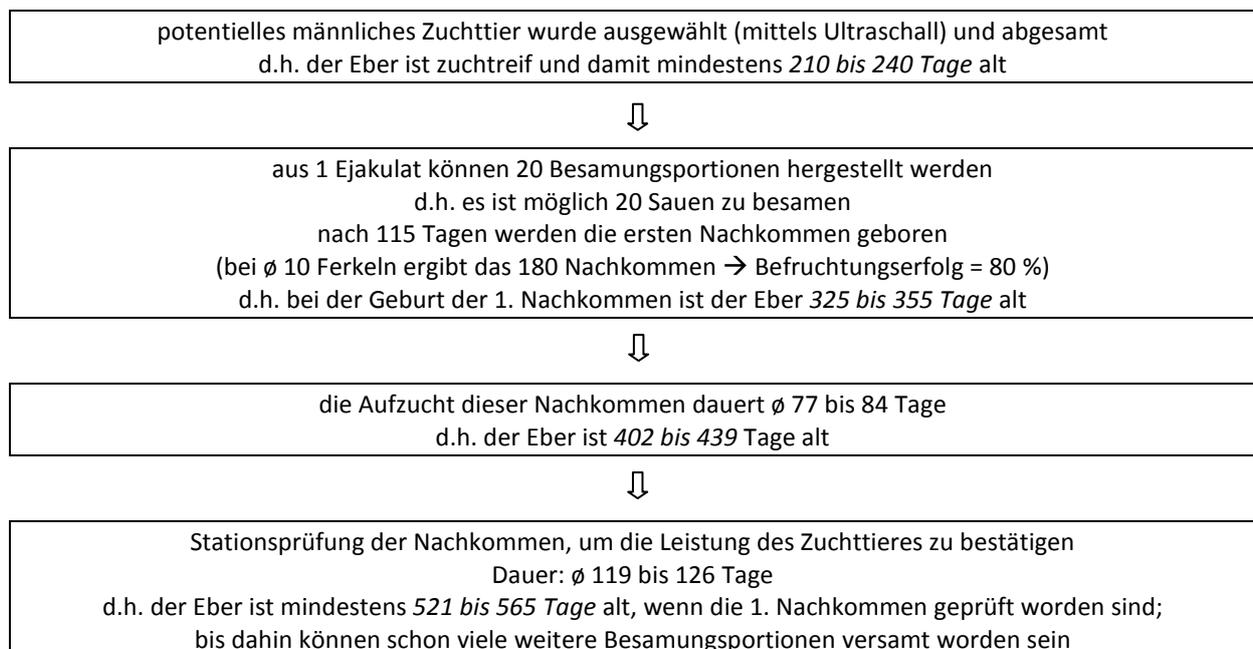


Abb. 59: Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Leistungsprüfung und Zuchtwernerfassung bei einem potentiellen Zuchteber

¹¹ Alter der Sau bei Geburt des 1. Wurfes: 325 Lebenstage; bei Verwendung der MRT kann am 184. Lebenstag der Sau aufgrund der Schlachtleistungsprüfungsergebnisse dieser Sau erkannt werden, ob ihre Nachkommen sie in der Zucht ersetzen können

⇒ daher: $325 - 184 = 141$

bzw. wenn die Ergebnisse der Schlachtleistungsprüfung ihrer Nachkommen abgewartet werden, ist die Sau bereits mindestens 521 d alt

⇒ daher: $521 - 184 = 337$

¹² Alter der Sau, wenn der 2. Wurf Nachkommen geprüft ist: 669 Lebenstage

⇒ daher: $669 - 184 = 475$

Für einen Eber bedeutet der konventionelle Ablauf, dass nach einem Besamungsdurchgang mindestens 180 Nachkommen erzeugt werden können, die anschließend aufgezogen und einige davon geprüft werden. Im Gegensatz zur Zuchtsau bedeutet das, dass für den Eber mit einem Alter von mindestens 521 Tagen deutlich mehr Zuchtwertinformationen vorliegen, bedingt durch die große Zahl an Nachkommen.

Auch für den potentiellen Zuchteber lässt sich das Generationsintervall verkürzen. Wird der Eber am 184. Lebenstag mittels einer MRT-Eigenleistungsprüfung geprüft, so kann auch auf der Eberseite das Generationsintervall um 141 bzw. 337 Tagen¹³ verkürzt werden.

Mittels einer MRT-Untersuchung kann so bereits am 184. Lebenstag des Zuchttieres sein Zuchtwert anhand einer kombinierten Mast- und Schlachtleistungsprüfung erfasst werden und dadurch auch sein Potential für die Zucht ermittelt werden. Es muss nicht darauf „gewartet“ werden, dass Nachkommen erzeugt und diese geprüft werden. Das Generationsintervall kann somit deutlich verkürzt werden.

Die reinrassigen Nachkommen und Geschwister des Zuchttieres könnten ebenfalls züchterisch im Rahmen nachfolgender Eigenleistungsprüfungen getestet werden und müssten nicht zur Ermittlung der Schlachtleistung „geopfert“ werden, während für Kreuzungstiere – und damit für den „Kreuzungszuchtwert“ das konventionelle Schema weiterhin ausreichend wäre. Da in einigen Zuchtverbänden bzw. Zuchtunternehmen bereits eine Eber-eigenleistungsprüfung in Eberaufzuchtstationen durchgeführt wird, könnte es speziell für diese Zuchtprogramme interessant sein, die Eigenleistungsprüfung der Eber mit exakten Messwerten aus der MRT-Schlachtleistungsprüfung zu ergänzen bzw. die konventionellen Messwerte aus der Ultraschallprüfung zu ersetzen.

Die konventionelle Nachkommen- bzw. Geschwisterprüfung aus nachfolgenden Würfen könnte durch die Eigenleistungsprüfung mittels MRT komplett ersetzt werden, da alle Merkmale - bis auf die Parameter der Fleischqualität - mittels MRT erfasst werden können. Für die Fleischqualitätsparameter wäre es denkbar, dass durch die Entwicklung neuerer Geräte eine nicht *invasive* Methode bereitgestellt wird, mit der zumindest der

¹³ Alter des Ebers bei Geburt des 1. Wurfes: 325 Lebenstage; bei Verwendung der MRT kann am 184. Lebenstag des Ebers aufgrund seiner Schlachtleistungsprüfergebnisse erkannt werden, ob die Nachkommen diesen in der Zucht ersetzen können

⇒ daher: $325 - 184 = 141$

bzw. wenn die Ergebnisse der Schlachtleistungsprüfung der Nachkommen abgewartet werden, ist der Eber bereits mindestens 521 d alt

⇒ daher: $521 - 184 = 337$

intramuskuläre Fettgehalt *in vivo* bestimmt werden kann. Denkbar wäre, aufgrund der für die MRT notwendigen Narkose, die Entnahme von Muskelbiopsien in Narkose um an diesen die Fleischqualitätsparameter z.B. mittels NIRS zu ermitteln. Da die Fleischqualität nach dem aktuellen EUROP-Klassifizierungssystem nicht honoriert wird und die Ursachen von Fleischqualitätsmängeln (MHS, RN) bekannt und züchterisch weitestgehend eliminiert wurden, bleibt abzuwarten, inwieweit die Fleischqualität ein für die Marktanforderungen entscheidendes Kriterium darstellt und demnach inwieweit sie am Schlachtkörper regelmäßig im Rahmen einer Nachkommenschaftsprüfung erfasst werden muss. Qualitätsstichproben in größeren Abständen im Rahmen von Warentests könnten durchaus ausreichend sein.

Schlussfolgerung

Zusammenfassend ist die MRT als eine *nicht invasive* Methode geeignet, die Schlachtkörperzusammensetzung am lebenden Schwein vorherzusagen. Aufgrund der in der vorliegenden Arbeit erkannten signifikanten Rassen- und Kreuzungsgruppenunterschiede sollten weitere Untersuchungen folgen, um möglicherweise rassespezifische Prüfzeitpunkte definieren zu können. Hierbei sollte nach Möglichkeit eine geringe Schichtdicke gewählt werden, um Partial-Volumen-Effekte auszuschließen. Auch ohne die Berücksichtigung von rassespezifischen Korrekturfaktoren zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit, dass die MRT eine geeignete Methode ist, um an vorselektierten Zuchttieren eine Eigenleistungsprüfung (für die Schlachtleistung) *in vivo* durchzuführen, und dass diese erhebliche Kosten für die Leistungsprüfanstalten einsparen würde. Zudem ist durch eine kombinierte Mast- und Schlacht-Eigenleistungsprüfung mittels MRT eine Verkürzung des Generationsintervalls möglich.

6. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Dissertation war es zu untersuchen, ob es möglich ist, die Körperzusammensetzung von Zuchttieren bei 100 kg Körpergewicht zu einem früheren Termin bzw. bei einem niedrigeren Körpergewicht genau vorherzusagen. Dazu wurden die Tiere bei 80 kg und bei 100 kg mittels Magnetresonanztomographie (MRT) und Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) analysiert. Insgesamt gingen 117 Zuchttiere, darunter 22 intakte Eber und 95 Sauen in die Untersuchung ein. Jedes Tier wurde zweimal mittels MRT und DXA untersucht. Am ersten Untersuchungstermin wogen die Tiere durchschnittlich 84,5 kg, bei der zweiten Untersuchung im Durchschnitt 102 kg. In dieser Arbeit wurden verschiedene reinrassige Linien und deren Kreuzungen verwendet. Die Rassenverteilung war dabei wie folgt: Deutsche Landrasse (n = 19), Deutsches Edelschwein (n = 7), Large Black (n = 18), Schwäbisch Hällisches Landschwein (n = 3), Piétrain (n = 4), Duroc (n = 3) und ihre verschiedenen Kreuzungen (n = 63). Für die Untersuchungen wurden die Tiere mittels Azaperon (2mg/kg) und Ketamin (40mg/kg) sediert. Anschließend wurden die Tiere mittels MRT untersucht. Verwendet wurde ein Siemens Magnetom Open, mit einer Feldstärke von 0,2 Tesla. Die Lenden- sowie die Oberschenkel- und Glutealregion wurden bei jedem Schwein als Untersuchungsregionen herangezogen. Hierzu wurde eine T1-gewichtete Spinechosequenz verwendet. Die Schichtdicke betrug 15 mm und der Distanzfaktor 3,75 mm (=0,25). Für die Lendenregion wurde eine axiale Schnittrichtung verwendet, für die Oberschenkel- und Glutealregion eine coronare. Ausgewertet wurden die MR-Bilder mit Hilfe der Able 3D-Doctor 3.0 Software (Lexington, MA, USA). In der Lendenregion wurden fünf Schnittbilder in caudale Richtung, beginnend an der letzten Rippe, auf das Volumen des Musculus longissimus dorsi und dessen Speckauflage ausgewertet. Für die Oberschenkel- und Glutealregion wurde ein halbautomatisches Auswertungsverfahren gewählt, mit dem vier Schnittbilder in ventrale Richtung ausgewertet wurden, beginnend auf Höhe des *Acetabulum*s. Für Referenzmessungen mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) wurde ein GE Lunar DPX IQ-Scanner als quantitatives Analyseverfahren eingesetzt. Jedes Schwein wurde nach der MRT-Untersuchung mittels DXA (Modus "Ganzkörper Adult Normal") untersucht.

Die Daten wurden mittels „Proc Reg“ der Statistik-Software SAS 9.2 ausgewertet. Das Volumen des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg zeigt eine hohe Beziehung zum Volumen

des Musculus longissimus dorsi bei 100 kg ($R^2 = 0,86$; $RMSE = 82021 \text{ mm}^3$). Bei der Gegenüberstellung der Volumina des Musculus longissimus dorsi bei 80 kg und bei 100 kg allein für die Eber ergibt sich das höchste Bestimmtheitsmaß mit $R^2 = 0,97$ ($RMSE = 35340 \text{ mm}^3$). Ein ebenso hohes Bestimmtheitsmaß erreicht die Beziehung zwischen dem Volumen der Fettauflage (über dem Musculus longissimus dorsi) bei 80 kg und bei 100 kg allein für die Eber ($R^2 = 0,97$, $RMSE = 23757 \text{ mm}^3$). Für die Speckauflage aller Tiere bei 80 kg und bei 100 kg resultiert ein Regressionskoeffizient von $R^2 = 0,91$ ($RMSE = 41781 \text{ mm}^3$). Für die Oberschenkel- und Glutealregion ergeben sich geringere Beziehungen. So kann für die Muskelvolumina bei 80 kg und bei 100 kg ein Regressionskoeffizient von $R^2 = 0,79$ ($RMSE = 292079 \text{ mm}^3$) erreicht werden. Für die entsprechenden Fettvolumina der Oberschenkel- und Glutealregion liegt das Bestimmtheitsmaß bei $R^2 = 0,44$ ($RMSE = 137143 \text{ mm}^3$). Im Rahmen einer multiplen Regressionsanalyse kann ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,82$ ($RMSE = 3,31 \%$) erreicht werden, indem das Volumen des Musculus longissimus dorsi und das Volumen der Speckauflage jeweils bei 80 kg als Variablen eingesetzt werden, um das DXA-Gesamtkörperfett (%) bei 100 kg als Referenzwert zu bestimmen.

Zudem wurde eine statistische Auswertung verschiedener Einflussfaktoren anhand einer Mischmodell-Analyse mittels REML (restricted maximum likelihood) durchgeführt ($p < 0,05$). Die Ergebnisse zeigen, dass signifikante Rassen- bzw. Kreuzungsgruppenunterschiede bezogen auf die MRT-Muskel- und Fettvolumina in den untersuchten Regionen, sowie für die DXA-Ergebnisse vorliegen. Eher extensiv genutzte Rassen bzw. Kreuzungsgruppen weisen ein signifikant höheres MRT-Fettvolumen bei erwartungsgemäß signifikant geringem MRT-Muskelvolumen auf. Dabei weisen sie korrespondierend die geringsten DXA-Magerweichgewebewerte und die höchsten DXA-Gesamtkörperfettgehalte auf. Auffällig ist zudem, dass die weniger bemuskelten Rassen bzw. Kreuzungsgruppen über eine höhere Knochenmineraldichte verfügen.

Diese Ergebnisse zeigen, dass - obwohl rassespezifische Unterschiede existieren - eine Vorhersage der Körperzusammensetzung (z.B.: DXA-Fettgehalt %) bei 100 kg durch die Untersuchung mittels MRT bei 80 kg möglich ist. Die MRT bietet die Möglichkeit Schlachtkörpermerkmale an potentiellen Zuchttieren *in vivo* zu erfassen, ohne auf Nachkommenschaftsergebnisse aus der Prüfschlachtung angewiesen zu sein. Somit kann die Schlachtleistung an jedem potentiellen Zuchttier selbst als Eigenleistungsprüfung erhoben werden, was die Kosten der Leistungsprüfanstalten und die für die Versuchsschlachtungen

deutlich reduziert. Zudem kann aufgrund der anzunehmend hohen Heritabilitäten das Generationsintervall sowohl für den potentiellen Zuchteber als auch für die potentielle Zuchtsau deutlich reduziert werden, ohne an Genauigkeit zu verlieren.

7. Summary

Analysis about the possible reduction of the point of time of slaughter performance testing in breeding pigs by using magnetic resonance imaging and dual energy X-ray absorptiometry

Untersuchungen zu einer möglichen Vorverlegung der Schlachtleistungsprüfung beim Schwein mit Hilfe der Magnetresonanz-Tomographie und der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie

Maren Schmidt

The study aimed at predicting the body composition of breeding pigs at 100 kg by using magnetic resonance image data at 80 kg. Therefore, 117 breeding pigs, 22 male and 95 female, were scanned by magnetic resonance imaging (MRI) and by dual energy X-ray absorptiometry (DXA). The first scan was done at an average live weight of 84.5 kg and the second scan at an average live weight of 102 kg. Each pig was scanned twice by MRI and DXA. Different genetic lines were used for this study: German Land Race (n = 19), German Large White (n = 7), Large Black (n = 18), Schwäbisch Hällisches Landschwein (German Saddleback variety, n = 3), Piétrain (n = 4), Duroc (n = 3) and their different crossbreds (n = 63). The animals were sedated by an intramuscular injection of Azaperone (2mg/kg) and Ketamine (40mg/kg). Thereafter, the pigs were scanned by a Siemens Magnetom Open (field strength 0.2 Tesla) within their loin and ham region, each. A T1-weighted sequence was used with a slice thickness of 15 mm and a distance factor of 0.25. The direction of image acquisition was axial for the loin and coronary for the ham region. The MR-Images were evaluated by using the Able 3D Doctor 3.0 Software (Lexington, MA, USA) distinguishing between muscle and fat tissue. Starting at the last rib, 5 slices of the loin region were evaluated into caudal direction. The ham region was evaluated semi-automatically with four slices (into ventral direction) starting at the *Acetabulum*. As reference, every pig was analyzed with a GE Lunar DPX IQ DXA scanner using the software mode “whole body adult normal”, after the MRI-Scan.

The resulting data were evaluated by “PROC REG” regression analysis using SAS 9.2. The loin volume at 80 kg showed a high relationship with the loin volume at 100 kg with an R^2 of 0.86 (RMSE = 82021 mm³). The relationship between the loin volume at 80 kg and 100 kg evaluated alone for boars showed the highest regression coefficient ($R^2 = 0.97$; RMSE =

35340 mm³). The regression coefficient for the corresponding back fat volumes at 80 kg and 100 kg alone for boars reached a similar level ($R^2 = 0.97$; RMSE = 23757 mm³). The same relationship but including all animals was even slightly higher than for the loin volume of all animals ($R^2 = 0.91$; RMSE = 41781 mm³). The ham muscle volume of four evaluated slices at 80 kg and 100 kg yielded an R^2 of 0.79 (RMSE = 292079 mm³). On the contrary, the regression of the ham fat volume of these four slices at 80 kg and 100 kg resulted in an R^2 of only 0.44 (RMSE = 137143 mm³). Finally, a multiple regression analysis with MRI loin and back fat volumes at 80 kg as predicting variables and the DXA Fat (%) at 100 kg as reference yielded an R^2 of 0.82 (RMSE = 3.31 %).

A variance analysis was performed with a mixed model procedure using REML (restricted maximum likelihood) with $p < 0.05$ for significant differences. The results showed significant differences among the different genetic types for both, the MRI fat and muscle volumes and for the DXA results. Genetics which were used in extensive systems showed the highest fat volume combined with the smallest muscle volume. In agreement with these results such pigs showed also the highest fat content and the lowest lean content measured by DXA. Additionally, the breeding or crossbreeding groups with high MRI fat volumes or high DXA fat percentage tended to have the highest bone mineral density.

The results showed that, although there are significant differences among genetic groups, an accurate prediction of the body composition (e.g. DXA Fat %) at 100 kg is attainable by measuring muscle and fat volumes in the loin and ham region at 80 kg by MRI. MRI could be an adequate method for evaluating the carcass composition of breeding pigs *in vivo*, without waiting for the results of the performance testing of the progeny. With using MRI it is possible to evaluate the carcass traits of breeding pigs, which stay alive and can still be used in breeding. The cost efficiency is reduced, both for the performance testing and for the slaughter. Because of the high heritabilities the generation interval could be reduced, for both boars and sows without losing accuracy.

8. Literaturverzeichnis

Able Software Corp. (1997-2007)

„3D-Doctor.“ Able Software Corp. Lexington, MA, USA. ASC-3DDR-BN#070320.

Aldal, I., Ø. Andresen, A.K. Egeli, J.-E. Haugen, A. Grødum, O. Fjetland, J.L.H. Eikaas (2005)

„Levels of androstenone and skatole and the occurrence of boar taint in fat from young boars.“ Livestock Production Science. 95. 121-129.

Averdunk, G. (1982)

„Das heutige Zuchtmaterial.“ Aus: „Marktgerechte Schweineproduktion.“ Bogner, H. Paul Parey Verlag. ISBN 3-490-30515-9.

Baulain, U., W. Griep, M. Henning, E. Hüster, E. Kallweit (1990)

„Schätzung der gewerblichen Körperzusammensetzung mittels Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT).“ Landbauforschung Völkenrode 40(3): 218-227.

Baulain, U., A. Scholz, M. Henning, E. Hüster, E. Kallweit (1993)

„Composition Of Live Pigs Of Different Weight Assessed By Magnetic Resonance Imaging (MRI).“ 44th Annual Meeting of the European Association for Animal Production. Aarhus, Denmark. 16.-19. August 1993. P 5.23.

Baulain, U., M. Henning, E. Kallweit (1996)

„Bestimmung der Körperzusammensetzung von Landrasse-Schweinen unterschiedlichen Alters mittels MRI.“ Archiv für Tierzucht, Dummerstorf 39(4): 431-440.

Baulain, U. (1997)

„Magnetic resonance imaging for the in vivo determination of body composition in animal science.“ Computers and Electronics in Agriculture 17(2): 189-203.

Baulain, U., M. Henning, E. Tholen, W. Wittman, W. Peschke (1998)

„Objektive Erfassung des Fleischanteils im Schweinebauch.“ Züchtungskunde 70(3): 205-212.

Baulain, U., M. Henning (2001)

„Untersuchungen zur Schlachtkörper- und Fleischqualität mit Hilfe von MR-Tomographie und MR-Spektroskopie.“ Archiv für Tierzucht, Dummerstorf 44(2): 181-192.

Baulain, U., M. Friedrichs, R. Höreth, M. Henning, E. Tholen (2010)

„Use Of MRI To Assess Carcass And Primal Cut Composition In Different Pig Breeds.“ 9th World Congress on Genetic applied to Livestock Production. www.kongressband.de/wcgalp2010/assets/html/0357.htm.

Bell, R.C., A.J. Lanou, E.A. Frongillo Jr., D.A. Levitsky, T. Colin Campbell (1994)

“Accuracy and reliability of total body electrical conductivity (TOBEC) for determining body composition of rats in experimental studies.” Physiology & Behavior 56(4): 767-773.

Bennewitz, J. (2011)

“Erste Ergebnisse des Projektes: Genomische Selektion beim Schwein.” LSZ Boxberg. Februar 2011.

http://www.landwirtschaft-mlr.badenwuerttemberg.de/servlet/PB/show/129740611/LSZ_Genomische%20Selektion.pdf (Stand 07.03.2011).

Black, A., E.M. Tilmont, A.M. Handy, W.W. Scott, S.A. Shapses, D.K. Ingram, G.S. Roth, M.A. Lane (2001)

“A Nonhuman Primate Model of Age-Related Bone Loss: A Longitudinal Study in Male and Premenopausal Female Rhesus Monkeys.” Bone 28(3): 295-302.

Blake, G.M., K.M. Knapp, I. Fogelman (2005)

“Dual X-ray Absorptiometry Clinical Evaluation of a New Cone-Beam System.” Calcif. Tissue Int. 76:113–120.

Blendl, H.M. (1982)

“Leistungsprüfungen”. Aus: „Marktgerechte Schweineproduktion.“ Bogner, H., Paul Parey Verlag. ISBN 3-490-30515-9.

Boettcher, H. (2006a)

„58 Jahre organisierte Sattelschweinezucht in Thüringen (1949 – 2006)“. 11. Geschichtsheft der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Jena. Schriftenreihe „Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen.“ Heft 14/2006. <http://www.mszy.de/sp/archiv/boe-58%20Sattelschweine.pdf>

Boettcher, H. (2006b)

„40 Jahre Cornwallzucht in Thüringen (1925 – 1965)“. 11. Geschichtsheft der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft Jena. Schriftenreihe „Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen.“ Heft 14/2006. www.mszy.de/sp/archiv/boe-Cornwallzucht.pdf

Boettinger, M. (2006)

„Untersuchung des Einflusses verschiedener Produktionssysteme auf das Wachstum beim Schwein unter Verwendung der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie zur Messung von Fett, Magerweichgewebe und Knochenmineralansatz.“ Dissertation. Institut für Tierzucht der tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Boudousq, V., P.O. Kotzki, J.M. Dinten, C. Barrau, C. Robert-Coutant, E. Thomas, D. Mariano Goulart (2003)

“Total dose incurred by patients and staff from BMD measurement using a new 2D digital bone densitometer.” Osteoporos. Int. 14:263–269.

Brem, G. (1990)

„Selektion.“ Aus: „Tierzucht und Allgemeine Landwirtschaftslehre für Tiermediziner.“
Kräußlich, H., G. Brem. Ferdinand Enke Verlag. ISBN 3-432-26621-9.

Brunton, J.A., H.S. Bayley, A.S. Atkinson (1993)

„Body composition analysis by dual energy X-ray absorptiometry compared to chemical analysis of fat, lean and bone mass in small piglets.“ Basic Life Science 60: 157-160.

Buske, B., N. Gengler (2009)

„Genomische Selektion: ein Meilenstein auch in der Schweinezucht?“ Schweinezucht aktuell. Zeitschrift des Mitteldeutschen Schweinezuchtverbandes e.V. und der Mitteldeutschen Zuchtschweine-Erzeugergemeinschaft w.V. (ISSN 1868-0682) 35:28-29.

Cameron, J.R., J. Sorenson (1963)

„Measurement of bone mineral in vivo: an improved method.“ Science 142:230-2.

Coker M.D., R.L. West, J.H. Brendemuhl, D.D. Johnson, A.M. Stelzleni (2009)

„Effects of live weight and processing on the sensory traits, androstenedione concentration and 5-alpha-androst-16-en-3-one (androstenone) concentration in boar meat.“ Meat Science 82: 399-404.

Collewet, G., P. Bogner, P. Allen, H. Busk, A. Dobrowolski, E. Olsen, A. Davenel (2005)

„Determination of the lean meat percentage of pig carcasses using magnetic resonance imaging.“ Meat Science 70(4): 966-976.

Colman, R.J., S.H. McKiernan, J.M. Aiken, R. Weindruch (2005)

„Muscle mass loss in Rhesus monkeys: Age of onset.“ Experimental Gerontology 40: 573-581.

Crone-Münzebrock, A. (1907)

„Die Entwicklung Der Schweinezucht In Deutschland Unter Besonderer Berücksichtigung der Wirtschaftlichen Fragen...“ Doktorarbeit der Universität Jena. Nachdruck. La Vergne, TN USA, 27.August 2010. 9-781141-406999.

Dal Mas, I., A. Biscardi, U. Ripamonti (2002)

„Comparison of Two Hologic DXA Systems (QDR 1000 and QDR 4500/A) for In Vivo Bone Mass Measurement in the Baboon (Papio ursinus).“ Journal of Clinical Densitometry 5(3): 313-318.

Dempfle, L. (2004)

„Perspektiven der Tierzüchtungswissenschaft.“ Züchtungskunde 76(4): 231-234.

Dittrich, K. (1997)

„Schweinerassen.“ Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (aid) e.V. Dittrich, K. ISBN 3-89661-056-2.

EGZH (2010)

www.egzh.de

Neuerung: Dahinten, G. (2011)

„Erzeugungs- und Qualitätsregeln 2011“.

http://www.lfl.bayern.de/itz/schwein/11321/linkurl_0_20_0_4.pdf

(letztmalig besucht am 07.03.2011).

Falkenberg, H., H. Hammer (2006a)

„Zur Geschichte und Kultur der Schweinezucht und –haltung. 1. Mitteilung: Zur Domestikation und Verbreitung der Hausschweine in der Welt.“ Züchtungskunde 78(1): 55-68.

Falkenberg, H., H. Hammer (2006b)

„Zur Geschichte und Kultur der Schweinezucht und Haltung. 2. Mitt.: Schweinezucht und –haltung in Europa im Mittelalter.“ Züchtungskunde 78(4): 291-308.

Falkenberg, H., H. Hammer (2007)

„Zur Geschichte und Kultur der Schweinezucht und -haltung. 3. Mitt.: Schweinezucht und –haltung in Deutschland von 1650 bis 1900.“ Züchtungskunde 79(2): 92-110.

Ferrell, C.L., S.G. Cornelius (1984)

„Estimation of body composition of pigs.“ Journal of Animal Science 58(4): 903-912.

Flock, D., H. Haußmann, D. Fewson (1971)

„Tabellen für die Zuchtwertschätzung bei landwirtschaftlichen Nutztieren.“ D. Flock, H. Haußmann, D. Fewson. Schriftenreihe des Max-Planck-Instituts für Tierzucht und Tierernährung 54.

Font i Furnols, M., M.F. Teran, M. Gispert (2009)

„Estimation of lean meat content in pig carcasses using X-ray Computed Tomography and PLS regression.“ Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 98(1): 31-37.

Fowler, P.A., M.F. Fuller, C.A. Glasbey, G.G. Cameron, M.A. Foster (1992)

„Validation of the in vivo measurement of adipose tissue by magnetic resonance imaging of lean und obese pigs.“ Am. J Clin Nutr 56: 7-13.

Förster, M., B. Brenig, G. Brem, W. Wittmann, B. Littmann, W. Peschke (1992)

„Der MHS-Gentest für die sichere Streßresistenzzüchtung beim Schwein.“ Schweinezucht und Schweinemast 40: 4-6.

German, A.J., S.L. Holden, T. Bissot, P.J. Morris, V. Biourge (2009)

„Use of starting condition score to estimate changes in body weight and composition during weight loss in obese dogs.“ Research in Veterinary Science 87(2): 249-254.

Giles, L.R., G.J. Eamens, P.F. Arthur, I.M. Barchia, K.J. James, R.D. Taylor (2009)

„Differential growth and development of pig as assessed by X-ray computed tomography.“ Journal of Animal Science 87: 1648-1658.

Grier, S.J., A.S. Turner, M.R. Alvis (1996)

„The use of dual-energy x-ray absorptiometry in animals.“ Invest Radiol 31(1): 50-62.

Hendrix, A. (2003)

„Magnets, Spins and Resonances.“ Siemens AG Medical Solutions. Order NO.: A91100-M2200-M705-1-7600.

Henning, M.D. (1992)

„Magnetic resonance imaging for the assessment of body composition in pigs.“ Pig News and Information 13(4): 163N-166N.

Herre, W. (1958)

„Abstammung und Domestikation der Haustiere.“ Aus: „Handbuch der Tierzucht.“ Band I: Biologische Grundlagen der tierischen Leistungen. Bane, A., J. Hammond, I. Johansson. Parey Verlag.

Herre, W., M. Röhrs (1990)

„Haustiere - zoologisch gesehen.“ Herre, W., M. Röhrs. Fischer Verlag. ISBN 3-437-20446-7.

Hoffschulte, H., A.M. Scholz (2006)

„Beziehung zwischen mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie bestimmter Körperzusammensetzung und Fruchtbarkeit von Jungsauen.“ Archiv für Tierzucht, Dummerstorf 49(6): 561-574.

Horst, P., Gregor, G. (1997)

„Spezielle Tierzucht: Schweine.“ Aus: „Tierzucht und Allgemeine Landwirtschaftslehre für Tiermediziner.“ Kräußlich, H., G. Brem. Ferdinand Enke Verlag. ISBN 3-432-26621-9.

Houghton P.L., Turlington, L.M. (1992)

„Application of ultrasound for feeding and finishing animals: a review.“ Journal of Animal Science 70(3): 930-941.

Irie, M. (1999)

„Evaluation of porcine fat with fiber-optic spectroscopy.“ Journal of Animal Science 77(10): 2680-2684.

Keene, B.E., K.F. Knowlton, M.L. McGilliard, L.A. Lawrence, S.M. Nickols-Richardson, J.H. Wilson, A.M. Rutledge, L.R. McDowell, M.E. Van Amburgh (2004)

„Measures of Bone Mineral Content in Mature Dairy Cows.“ Journal of Dairy Science 87(11): 3816-3825.

König, H.E., H.-G. Liebich (2001)

„Anatomie der Haussäugetiere.“ Band I Bewegungsapparat. König, H.E., H.-G. Liebich. Schattauer GmbH. ISBN 3-7945-2153-6.

Kövér, G., R. Romvári, P. Horn, E. Berényi, J.F. Jensen, P. Sørensen (1998)

„In vivo assessment of breast muscle, abdominal fat and total fat volume in meat-type chickens by magnetic resonance imaging.“ Acta Vet Hung 46(2): 135-44.

Kräußlich, H. (1997)

„Zuchtwertschätzung.“ Aus: „Tierzucht und Allgemeine Landwirtschaftslehre für Tiermediziner.“ Kräußlich, H., G. Brem. Ferdinand Enke Verlag. ISBN 3-432-26621-9.

Krautforst, W. (1975)

„Abstammung des Schweines und Entwicklung der Schweinerassen.“ Aus: „Internationales Handbuch der Tierproduktion. Schweine.“ H.-J. Schwark, Z. Zebrowski, V.N. Ovsjannikov. Dt. Landwirtschaftsverlag.

Kuhlers, D.L., S.B. Jungst, R.L. Edwards (1980)

„Performance of Landrace, Yorkshire and Duroc Sired Pigs from Landrace Sows.“ Journal of Animal Science 50(4): 604-609.

Laskey, M.A., D. Phil (1996)

„Dual-energy X-ray absorptiometry and body composition.“ Nutrition 12(1): 45-51.

Leymaster, K.A. (1986)

„Tomography to estimate changes in body tissues.“ Journal of Animal Science 62(Supplement_2): 89-95.

Littmann, E., K.-U. Götz, J. Dodenhoff (2006)

„Schweinezucht und Schweineproduktion.“ Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft 7. ISSN 1611-4159.

Lo, L.L., D.G. McLaren, F.K. McKeith, R.L. Fernando, J. Novakofski (1992)

„Genetic Analyses of Growth, Real-Time Ultrasound, Carcass, and Pork Quality Traits in Duroc and Landrace Pigs: I. Breed Effects.“ Journal of Animal Science 70: 2373-2386.

Lochmüller, E.-M., A. Weusten, E. Wolf, E. Cindik, I. Renner-Müller, T. Eikmeier, F. Eckstein (1999)

„Geschlechtsspezifische Analyse der Knochenmasse normaler und Wachstums-transgener Mäuse mittels Zweienergie-Röntgen-Absorptiometrie (DXA).“ Annals of Anatomy – Anatomischer Anzeiger 181(2): 191-198.

Loesel, D., P. Kremer, E. Albrecht, A.M. Scholz (2010)

„Comparison of a GE Lunar DPX-IQ and a Norland XR-26 dual energy X-ray absorptiometry scanner for body composition measurements in pigs – in vivo.“ Archiv für Tierzucht, (Dummerstorf) 53 (2): 162-175.

Lopez-Bote, C.J. (1998)

„Sustained utilization of the Iberian pig breed.“ Meat Science 48(Supplement 1): 17-27.

LSZ Boxberg (2010)

“Informationen zur Leistungsprüfung 2010.” Bildungs- und Wissenszentrum Boxberg.

Lukaski, H.C., M.J. Marchello, C.B. Hall, D.M. Schafer, W.A. Siders (1999)

“Soft tissue composition of pigs measured with dual x-ray absorptiometry: comparison with chemical analyses and effects of carcass thickness.” Nutrition 15(9): 697-703.

Lunar (1998)

“Bedienungshandbuch Lunar[®] DPX-IQ[™].” Madison, Wisconsin, USA.

Neuerung: GE Lunar (2010)

„enCORE-basiertes Knochen-Densitometer-Röntgensystem-Benutzerhandbuch.“ GE Healthcare. Madison, Wisconsin, USA.

Marchello, M.J., W.D. Slinger (1992)

“Use of bioelectrical impedance to predict leanness of Boston butts.” Journal of Animal Science 70(11): 3443-3450.

Marchello, M.J., P.T. Berg, P.M. Swantek, J.E. Tilton (1999)

“Predicting live and carcass lean using bioelectrical impedance technology in pigs.” Livestock Production Science 58(2): 151-157.

Marcoux, M., L. Faucitano, C. Pomar (2005)

“The accuracy of predicting carcass composition of three different pig genetic lines by dual-energy X-ray absorptiometry.” Meat Science 70(4): 655-663.

Matthie, J.R., P.O. Withers (1996)

“Bioimpedance, the Cole model equation and the prediction of intra and extracellular water: science or marketing.” Clinical Nutrition 15(3): 147-148.

McKay, R.M. (1994)

“Prewaning growth of Yorkshire, Hampshire, and Landrace pigs.” Journal of Animal Science 72:56-61.

McLaren, D.G., J. Novakofski, D.F. Parrett, L.L. Lo, S.D. Singh, K.R. Neumann, F.K. McKeith (1991)

“A study of operator effects on ultrasonic measures of fat depth and longissimus muscle area in cattle, sheep and pigs.” Journal of Animal Science 69(1): 54-66.

Mercier, J., C. Pomar, M. Marcoux, F. Goulet, M. Thériault, F.W. Castonguay (2006)

“The use of dual-energy X-ray absorptiometry to estimate the dissected composition of lamb carcasses.” Meat Science 73(2): 249-257.

Meschede, D. (2002)

„Photonen, Atome und Quantenphysik.“ Aus: „Gerthsen Physik.“ D. Meschede. Springer Verlag. ISBN 3-540-42024-X.

Meyn, K. (2005)

“Entwicklung, Stand und Perspektiven der Rinder- und Schweineproduktion.” Züchtungskunde 77(6): 478-489.

Mitchell, A.D., P.C. Wang, R.W. Rosebrough, T.H. Elsasser, W.F. Schmidt (1991)

“Assessment of body composition of poultry by nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy.” Poultry Science 70(12): 2494-500.

Mitchell, A.D., J.M. Conway, W.J. Potts (1996)

“Body Composition analysis of pigs by dual-energy x-ray absorptiometry.” Journal of Animal Science 74(11): 2663-2671.

Mitchell, A.D., R.W. Rosebrough, J.M. Conway (1997a)

“Body composition analysis of chickens by dual energy x-ray absorptiometry.” Poultry Science 76(12): 1746-1752.

Mitchell, A.D., M.B. Solomon, T.S. Rumsey (1997b)

“Composition analysis of beef rib sections by dual-energy X-ray absorptiometry.” Meat Science 47(1-2): 115-124.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz, J.M. Conway (1998a)

“Body composition analysis of pigs from 5 to 97 kg by dual energy X-ray absorptiometry.” Appl Radiat Isot 49(5-6): 521-523.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz, J.M. Conway (1998b)

“Body composition analysis of small pigs by dual-energy x-ray absorptiometry.” Journal of Animal Science 76(9): 2392-2398.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz, V.G. Pursel, C.M. Evock-Clover (1998c)

“Composition analysis of pork carcasses by dual-energy x-ray absorptiometry.” Journal of Animal Science 76(8): 2104-2114.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz, V.G. Pursel (2000)

“Dual-energy X-ray absorptiometry measurements of the body composition of pigs of 90- to 130-kilograms body weight.” Ann N Y Acad Sci 904: 85-93.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz (2001)

“Techniques for Measuring Body Composition of Swine.” Swine Nutrition 2nd edition, edited by A.J. Lewis, L.L. Southern. ISBN 0-8493-0696-5.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz, P.C. Wang, H. Song (2001)

“Body Composition analysis of the pig by magnetic resonance imaging.” Journal of Animal Science 79(7): 1800-1813.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz, V. Pursel (2002)

“Prediction of the in vivo Body Composition of Pigs Based on Cross-Sectional Region Analysis of Dual Energy X-ray Absorptiometry (DXA) Scans.” Archiv für Tierzucht, Dummerstorf 45(6): 535-545.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz, M.B. Solomon (2005)

“Estimation of body composition of pigs by a near-infrared interactance probe technique.” Archiv für Tierzucht 52(6): 580-591.

Mitchell, A.D., A.M. Scholz (2009)

“Relationships among dual-energy X-ray absorptiometry, bioelectrical impedance and ultrasound measurements of body composition of swine.” Archiv für Tierzucht 52(1): 28-39.

Mitra, S., J.E. Wolff, R. Garrett (1998)

„Calibration of a prototype in vivo total body composition analyser using 14 MeV neutron activation and the associated particle technique.“ Applied Radiation and Isotopes 49(5-6): 537-539.

Moeller, S.J., L.L. Christian (1998)

“Evaluation of the accuracy of real-time ultrasonic measurements of backfat and loin muscle area in swine using multiple statistical analysis procedures.” Journal of Animal Science 76(10): 2503-2514.

Mohrmann, M., R. Roehe, A. Susenbeth, U. Baulain, P.W. Knap, H. Looft, G.S. Plastow, E. Kalm (2006)

„Association between body composition of growing pigs determined by magnetic resonance imaging, deuterium dilution technique, and chemical analysis.“ Meat Science 72(3): 518-531.

Monziols, M., G. Collewet, F. Mariette, M. Kouba, A. Davenel (2005)

“Muscle and fat quantification in MRI gradient echo images using a partial volume detection method. Application to the characterization of pig belly tissue.” Magnet Resonance Imaging 23(6): 745-755.

Monziols, M., G. Collewet, M. Bonneau, F. Mariette, A. Davenel, M. Kouba (2006)

“Quantification of muscle, subcutaneous fat and intermuscular fat in pig carcasses and cuts by magnetic resonance imaging.” Meat Science 72(1): 146-154.

Mueller, S., S. Polten (2004)

“Vergleichsuntersuchungen zur Ultraschall-Speckdickenmessung beim Schwein im Rahmen der Eigenleistungsprüfung.“ Archiv für Tierzucht, Dummerstorf 47(3): 249-263.

Müller, S. (2010)

“Ebermast – was erwartet den Schweineproduzenten?“ Schweinezucht aktuell. Zeitschrift des Mitteldeutschen Schweinezuchtverbandes e.V. und der Mitteldeutschen Zuchtschweine-Erzeugergemeinschaft w.V. (ISSN 1868-0682) 37: 42-44.

Paulke, Th. (2010)

“Bringen bildgebende Ultraschallmessgeräte einen Informationsgewinn für die Eigenleistungsprüfung?“ Schweinezucht aktuell. Zeitschrift des Mitteldeutschen

Schweinezuchtverbandes e.V. und der Mitteldeutschen Zuchtschweine-
Erzeugergemeinschaft w.V. (ISSN 1868-0682) 37: 27-28.

Picouet, P.A., F. Teran, M. Gispert, M. Font i Furnols (2010)

“Lean content prediction in pig carcasses, loin and ham by computed tomography (CT) using a density model.” Meat Science 86: 616-622.

Pietrobelli, A., C. Formica, Z. Wang, S.B. Heymsfield (1996)

“Dual-energy X-ray absorptiometry body composition model: review of physical concepts.” Am J Physiol 271(6 Pt 1): E941-951.

Pintauro, S.J., T.R. Nagy, C.M. Duthie, M.I. Goran (1996)

“Cross-calibration of fat and lean measurements by dual energy X-ray absorptiometry to pig carcass analysis in the pediatric body weight range.” Am J Clin Nutr 63(3): 293-298.

Pollock, A. (2009)

„Swine breed facts: Duroc pig.“ <http://www.helium.com/items/1356375-swine-breed-profile-duroc-pig>.

Resano, H., F.J.A. Perez-Cueto, M.D. de Barcellos, N. Veflen-Olsen, K.G. Grunert, W. Verbeke (2010)

“Consumer satisfaction with pork meat and derived products in five European countries.” Appetite ISSN 0195-6663.

Richtlinie für die Durchführung der Eber-Eigenleistungsprüfung auf Fleischleistung im Feld (Feldprüfung) (24.11.2005)

www.zds-bonn.de/standardisierung.html

Richtlinie für die Durchführung der Eber-Eigenleistungsprüfung auf Fleischleistung in Prüfstationen (Stationsprüfung) (24.11.2005)

www.zds-bonn.de/standardisierung.html

Richtlinie für die Stationsprüfung auf Mastleistung, Schlachtkörperwert und Fleischbeschaffenheit beim Schwein (04.09.2007)

www.zds-bonn.de/standardisierung.html

Richtlinien zum Vollzug tierzuchtrechtlicher Vorschriften (TierzR) Bekanntmachung des Bayerischen Staatsministeriums für Landwirtschaft und Forsten

9. September 2008 Az.: L 5/R 5-7401-1678 (Allgemeines Ministerialblatt Nr. 13, 30.10.2008 S. 690) Datenbank BAYERN-RECHT – 7824-L –

Rigo, J., K. Nyamugabo, J.C. Picaud, P. Gerard, C. Pieltain, M. De Curtis (1998)

“Reference values of body composition obtained by dual energy X-ray absorptiometry in preterm and term neonates.” J Pediatr Gastroenterol Nutr 27(2): 184-190.

Rosner, F., S. Polten, M. Wicke (2000)

„Vergleichsuntersuchungen zur Verwendbarkeit des PIGLOG-Ultraschall-Gerätes für die Vorausbestimmung des Muskelfleischanteiles bei Sauen im Rahmen der Eigenleistungsprüfung.“ Archiv für Tierzucht, Dummerstorf 43(5): 499-506.

SAS 9.2 Software (2002-2008)

Institute Inc., Cary, North Carolina, USA

Schaeffer, L.R. (2010)

“Selection: Traditional Methods.” Encyclopedia of Animal Science. Taylor & Francis. Second Edition. 1: 1. 961-963.

Schild, H.H. (1990)

„MRI made easy.“ Schering Aktiengesellschaft. ISBN 3-921817-41-2.

Schmidt, J., J.Kliesch, V. Goerttler (1941)

„Lehrbuch der Schweinezucht.“ Schmidt, J., J. Kliesch, V. Goerttler. Parey Verlag.

Schmitten, F. (1989)

„Schweinezucht.“ Aus: „Handbuch Schweineproduktion.“ Schmitten, F., G. Brugstaller, K. Hammer, P. Matzke, B. Mittrach, W. Schmid. DLG-Verlags-GmbH. ISBN 3-7690-0461-2.

Schöllhorn, B. (2007)

„Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) für die Messung der Ganzkörperzusammensetzung bei zwei Putengenotypen.“ Dissertation. Institut für Tierzucht der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Schönmuth, G., D. Flade, G. Seeland (1985)

„Züchterische und ökologische Grundlagen.“ Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.

Scholz, A., U. Baulain, E. Kallweit (1992)

„In vivo estimation of porcine body composition by Magnetic-Resonance-Imaging“. 43rd Annual Meeting of the European Association for Animal Production. Madrid 14.-17. September 1992.

Scholz, A.M., A.D. Mitchell, P.C. Wang, H. Song and Z. Yan (1995)

“Muscle metabolism and body composition of pigs with different ryanodine receptor genotypes studied by means of ³¹P nuclear magnetic resonance spectroscopy and ¹H magnetic resonance imaging.“ Archiv für Tierzucht, Dummerstorf (38): 539-552.

Scholz, A.M. (2002)

„In-vivo-Methoden zur Analyse von Muskelstoffwechsel und Körperzusammensetzung beim Schwein unter besonderer Berücksichtigung genetischer Einflüsse.“ Habilitationschrift. Institut für Tierzucht der Ludwig-Maximilians-Universität München. <http://epub.ub.uni-muenchen.de/418/>.

Scholz, A., P. Soffner, E. Littmann, W. Peschke und M. Förster (2002)

„Genauigkeit der Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA) zur Ermittlung der Schlachtkörperzusammensetzung von Schweinehälften (kalt, 30 – 39 kg) anhand der EU-Referenzerlegung.“ Züchtungskunde 74 (5):376-391.

Scholz, A.M., A.D. Mitchell, H. Song, P.C. Wang (2003)

“¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy – a non-invasive *in vivo* method to measure muscle glycogen metabolism in pigs of different genotypes.” Archiv für Tierzucht, Dummerstorf 46 (2): 199-211.

Scholz, A.M., A.D. Mitchell, M. Förster, V.G. Pursel (2007)

“Two-side evaluation of the relationship between *in vivo* and carcass dual energy X-ray absorptiometry (DXA) in pigs.” Livestock Science 110(1-2): 1-11.

Scholz, A.M., U. Baulain (2009)

“Methoden zur Bestimmung der Körperzusammensetzung am lebenden Nutztier.” Züchtungskunde 81(2): 86-96.

Scholz, A.M., A.D. Mitchell (2010)

“Body Composition: Indirect Measurement.” Encyclopedia of Animal Science. Second Edition. 1: 1. 152 — 156.

Senn, S.M., S. Kantor, B.J. Leury, S. Andrikopoulos, T.J. O’Brien, M.J. Morris, J. Proietto, J.D. Wark (2007)

„*In vivo* quantification of fat content in mice using the Hologic QDR 4500/A densitometer.“ Obesity Research & Clinical Practice 1(1): 69-77.

Soffner, P. (2003)

“Untersuchungen zur Körperzusammensetzung und Knochenmineraldichte am wachsenden Schwein mittels Dualenergie-Röntgenabsorptiometrie (DXA).“ Dissertation. Institut für Tierzucht der tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Steibel, J.P. (2010)

„Genomic Selection of Phenotype.“ Encyclopedia of Animal Science. Taylor & Francis. Second Edition. 1: 1. 519-521.

Stöcker, T., N.J. Shah (2007)

„Grundlagen der MR-Bildgebung.“ Aus: „Funktionelle MRT in Psychatrie und Neurologie.“ Schneider F., G.R. Fink. Springer Medizin Verlag. ISBN-10 3-540-20474-1.

Stouffer, J.R. (2004)

“History of Ultrasound in Animal Science.” J Ultrasound Med 23(5): 577-584.

Strack, K.E. (2005)

“Schweineproduktion.“ Aus: Tierproduktion. Weiß, J., W. Pabst, K.E. Strack, S. Granz. Parey Verlag. ISBN 3-8304-4140-1.

Streitz, E., U. Baulain, E. Kallweit (1995)

„Untersuchungen zur Körperzusammensetzung wachsender Lämmer mit Hilfe der Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT).“ Züchtungskunde 67: 392-403.

Suster, D., B.J. Leury, E. Ostrowska, K.L. Butler, D.J. Kerton, J.D. Wark, F.R. Dunshea (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(3): 231-242.

Svendsen, O.L., J. Haarbo, P.S. Hansen, M. Møller, S.M. Pehrson (1993)

„Accuracy of measurements of body composition by dual-energy x-ray absorptiometry in vivo.“ Am J Clin Nutr 57(5): 605-608.

Swantek, P.M., J.D. Crenshaw, M.J. Marchello, H.C. Lukaski (1992)

“Bioelectrical impedance: a nondestructive method to determine fat-free mass of live market swine and pork carcasses.” Journal of Animal Science 70(1): 169-177.

Swennen, Q., G.P. Janssens, R. Geers, E. Decuypere, J. Buyse (2004)

„Validation of dual-energy x-ray absorptiometry for determining in vivo body composition of chickens.“ Poultry Science 83(8): 1348-1357.

Szabo, C., L. Babinsky, M.W.A. Verstegen, O. Vangen, A.J.M. Jansman, E. Kanis (1999)

“The application of digital imaging techniques in the in vivo estimation of the body composition of pigs: a review.” Livestock Production Science 60(1): 1-11.

Szentkuti, L. (2005)

“Skelettmuskulatur.” Aus: Physiologie der Haustiere. Engelhardt, W. von, G. Brewes. Enke Verlag. ISBN 3-8304-1039-5.

Terry, C.A., J.W. Savell, H.A. Recio, H.R. Cross (1989)

“Using Ultrasound Technology To Predict Pork Carcass Composition.” Journal of Animal Science 67(5): 1279-1284.

Thaller, E., K.-U. Götz (2005)

„Notwendigkeit von und Anforderungen an Leistungsprüfungen bei landwirtschaftlichen Nutztieren.“ Züchtungskunde 77(6): 472-477.

Tierzuchtgesetz (2006)

(TierZG, 2006)

"Tierzuchtgesetz vom 21. Dezember 2006 (BGBl. I S. 3294), das durch Artikel 16 des Gesetzes vom 9. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1934) geändert worden ist".

VDF (2010)

“Jahresbericht 2009/2010.” Verband der Fleischwirtschaft e.V. www.v-d-f.de.

**Verordnung über Leistungsprüfungen und Zuchtwertfeststellung bei Schweinen (1991)
(SchwZLpV, 1991)**

"Verordnung über die Leistungsprüfungen und die Zuchtwertfeststellung bei Schweinen vom 16. Mai 1991." BGBI. I S. 1130. zuletzt geändert durch die Verordnung vom 17. August 1994 (BGBI. I S. 2133).

Weishaupt, D., V.D. Köchli, B. Marincek (2009)

„Kapitel 13: Artefakte im MR-Bild.“ Aus: „Wie funktioniert MRI?“ Weishaupt, D., V.D. Köchli, B. Marincek. Springer Medizin Verlag Heidelberg. ISBN 978-3-540-89572-5.

Williamson, C.S., R.K. Foster, S.A. Stanner and J. Buttriss (2005)

„Red meat in the diet.“ Nutrition Bulletin 30 pp. 323–355.

Wilson, D.E. (1992).

„Application of ultrasound for genetic improvement.“ Journal of Animal Science 70(3): 973-983.

Zamaratskaia, G., J. Babol, H.K. Andersson, K. Andersson, K. Lundström (2005)

Effect of live weight and dietary supplement of raw potato starch on the levels of skatole, androstenone, testosterone and oestrone sulphate in entire male pigs.“ Livestock Production Science 93(3): 235-243.

ZMP (2008)

„ZMP-Marktbilanz. Vieh und Fleisch 2008.“ Weiß, D., M.M. Beck, R. Bergmann, H. Engelhardt, M. Klotz, M. Kohlmüller, G. Kretschmann, U. Liebe-Beyer, P. Michels, S. Noleppa. ISBN 1864-7693.

9. Danksagung

Mein erster Dank gilt Prof. Dr. Dr. Martin Förster, der mir die Anfertigung dieser Dissertation an der LMU erst ermöglichte.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn PD Dr. Armin Scholz für die Überlassung dieses interessanten Themas, für die tatkräftige Unterstützung während der „Scantage“, die statistische Auswertung und das stets offene Ohr bei jeglichen Fragen. Vor allem aber möchte ich mich für die Ermöglichung der weiteren Mitarbeit am LVG durch das Kooperationsprojekt mit der Uni Bonn bedanken. Vielen Dank!

Dank gilt auch Frau Dr. Prisca Kremer mit der die langen „Scan-Tage“ leicht von der Hand gingen und die jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ein großer Dank gilt den vielen Helfern, ohne die so manches Schwein nicht auf dem MRT/DXA „gelandet“ wäre: dazu zählen allen voran Herr Gert Kaiser, Dominik Stieler, Maximilian Schachtner und Mario Wießler. Vielen Dank, dass ihr die „Schweinchen“ aus der Waage geholt habt!

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Kollegin Frau Esther Gruber, für die es stets kein Problem war einen Hund mehr mit auf den Mittagsspaziergang zu nehmen, wenn der „Scan-Tag“ bei mir lang wurde.

Zu tiefst bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, Elke und Jürgen Schmidt, die mir das Veterinärstudium ermöglichten und mich stets unterstützen. Ihr seid immer für mich da. Danke!!! Der nächste Dank gebührt meinem Bruder Mark Schmidt der mir bei allen kleineren oder größeren Computerproblemen stets weiterhilft. Ein weiterer Dank gilt dem „Rest“ meiner Familie für die stetige Unterstützung jeglicher Art. Eine bessere Familie kann ich mir nicht wünschen!

Mein letzter Dank gilt meinem Lebenspartner Hendrik Bernau, der mir immer zur Seite steht und auf den ich mich in jeder Lebenslage verlassen kann. Danke für Deine Geduld, die Unterstützung und die Kraft die Du mir gibst. Danke!!!