

Aus dem Institut für Tierzucht und Tierhaltung mit Tierklinik

(Direktor: Prof. Dr. H. Swalve)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

(Dekan: Prof. Dr. P. Pickel)

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

und

dem Forschungs- und Studienzentrum für Veredelungswirtschaft Weser-Ems

der Georg-August-Universität Göttingen

(Direktor: Prof. Dr. H. van den Weghe)

**Bestimmung des intramuskulären Fettgehaltes (IMF)  
im *M. longissimus* von Schweinen mittels Ultraschallspektralanalyse**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor agriculturarum (Dr. agr.)

von

Daniel Mörlein

Diplom-Oecotrophologe (FH)

Halle an der Saale, 2005

Aus dem Institut für Tierzucht und Tierhaltung mit Tierklinik

(Direktor: Prof. Dr. H. Swalve)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

(Dekan: Prof. Dr. P. Pickel)

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

und

dem Forschungs- und Studienzentrum für Veredelungswirtschaft Weser-Ems

der Georg-August-Universität Göttingen

(Direktor: Prof. Dr. H. van den Weghe)

**Bestimmung des intramuskulären Fettgehaltes (IMF)  
im *M. longissimus* von Schweinen mittels Ultraschallspektralanalyse**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

doctor agriculturarum (Dr. agr.)

vorgelegt von

Diplom-Oecotrophologe (FH) Daniel Mörlein, geb. am 26.04.1975 in Friedrichroda

Gutachter: Prof. Dr. habil. Dr. h.c. Gerhard von Lengerken

Prof. Dr. Michael Wicke

Prof. u. Dir. Dr. Wolfgang Branscheid

verteidigt am 4. April 2005

Halle an der Saale, 2005

**urn:nbn:de:gbv:3-000008337**

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=nbn%3Ade%3Agbv%3A3-000008337>]

# Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

VERZEICHNIS DER TABELLEN

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN UND TABELLEN IM ANHANG

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LITERATUR</b> .....	<b>3</b>
2.1	ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN IMF UND SENSORISCHEN EIGENSCHAFTEN VON SCHWEINEFLEISCH.....	3
2.2	IMF IM <i>M. LONGISSIMUS</i> DES SCHWEINS.....	4
2.2.1	<i>Ergebnisse aktueller Untersuchungen zum IMF-Gehalt</i> .....	4
2.2.2	<i>Möglichkeiten der züchterischen Bearbeitung</i> .....	7
2.2.3	<i>Einflussfaktoren auf die Höhe des IMF</i> .....	8
2.2.3.1	MHS-Genstatus bzw. RN-Genstatus.....	8
2.2.3.2	Leptin.....	8
2.2.3.3	Haltung und Fütterung.....	9
2.2.3.4	Alter und Geschlecht.....	10
2.2.3.5	Lokalisationsabhängige Variation des IMF im <i>M. longissimus</i> .....	10
2.2.3.6	Muskelstruktur.....	11
2.3	VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DES IMF BZW. ZUR ERMITTLUNG DES FETTGEHALTES IM SCHLACHTKÖRPER BZW. IN TEILSTÜCKEN.....	11
2.3.1	<i>Referenzverfahren</i> .....	11
2.3.2	<i>Nahinfrarot-Schnellbestimmung des IMF</i> .....	12
2.3.3	<i>Alternative Verfahren</i> .....	13
2.4	ULTRASCHALL.....	15
2.4.1	<i>Grundlagen und Messprinzipien</i> .....	15
2.4.2	<i>Anwendung von Ultraschall zur Bestimmung des IMF</i> .....	16
2.4.2.1	<i>Möglichkeiten und Grenzen der Bild- bzw. Texturanalyse</i> .....	16

2.4.2.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit als Prädiktor der Gewebezusammensetzung .....	18
2.4.3	<i>Gewebecharakterisierung mittels Ultraschall-Spektralanalyse</i> .....	19
2.4.4	<i>Wechselwirkung von Ultraschall mit biologischem Gewebe – Einflussfaktoren auf akustische Parameter</i> .....	21
2.4.4.1	Ausbreitungsrichtung (Anisotropie von US-Parametern).....	21
2.4.4.2	Muskelstruktur .....	22
2.4.4.3	Frequenz.....	23
2.4.4.4	Temperatur .....	24
2.4.4.5	Gewebezusammensetzung .....	25
2.4.5	<i>Geräte- bzw. Benutzereinflüsse und Korrekturmöglichkeiten</i> .....	26
2.4.5.1	Schallfeldkorrektur .....	27
2.4.5.2	Laufzeitabhängige Verstärkung .....	27
2.4.5.3	ROI-Größe .....	28
2.4.5.4	Cepstrale Glättung .....	28
<b>3</b>	<b>ZIELSETZUNG FÜR DIE EIGENEN UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>VERSUCHSAUFBAU UND METHODIK .....</b>	<b>31</b>
4.1	SCHLACHTKÖRPER UND FLEISCHQUALITÄTSMERKMALE .....	31
4.2	REFERENZANALYTIK UND SENSORISCHE PRÜFUNG.....	31
4.2.1	<i>Rohnährstoffanalyse</i> .....	32
4.2.2	<i>Grillverlust/Scherkraft</i> .....	32
4.2.3	<i>Sensorik</i> .....	32
4.3	AUFBAU DES MESSSYSTEMS ZUR AUFNAHME DER HF-ECHODATEN .....	32
4.4	ULTRASCHALL-DATENAUFNAHME .....	33
4.5	VERARBEITUNG DER HF-SIGNALE ZU AKUSTISCHEN PARAMETERN .....	35
4.5.1.1	Dämpfungsparameter.....	36
4.5.1.2	Rückstreuparameter .....	36
4.5.1.3	Cepstralparameter .....	37
4.6	STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	38
4.6.1	<i>Varianzanalysen</i> .....	38
4.6.2	<i>Korrelationen</i> .....	40
4.6.3	<i>Regressionsanalysen</i> .....	40
4.6.4	<i>Diskriminanzanalysen</i> .....	40

<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....</b>	<b>41</b>
5.1	ROHNÄHRSTOFFGEHALTE UND FLEISCHQUALITÄT DER UNTERSUCHTEN SCHLACHTKÖRPER.....	41
5.2	SCHLACHTKÖRPER- UND FLEISCHBESCHAFFENHEITSPARAMETER SOWIE DEREN BEZIEHUNG ZUM IMF .....	44
5.3	SENSORISCHE EIGENSCHAFTEN UND DEREN BEZIEHUNG ZUM IMF-GEHALT...	46
5.4	EINFLUSS DER UNTERSUCHTEN EFFEKTE AUF DIE ULTRASCHALLPARAMETER. 50	
5.4.1	<i>Einfluss des Messzeitpunktes</i> .....	53
5.4.2	<i>Einfluss der Messrichtung</i> .....	59
5.5	WIEDERHOLBARKEIT DER US-PARAMETERBESTIMMUNG.....	64
5.6	KORRELATIONEN ZWISCHEN AKUSTISCHEN PARAMETERN UND IMF-GEHALT	67
5.7	SCHÄTZUNG DES IMF AUS ULTRASCHALLPARAMETERN IN ABHÄNGIGKEIT VOM MESSZEITPUNKT .....	71
5.7.1	<i>Warme Schlachtkörper</i> .....	71
5.7.2	<i>Kalte Schlachtkörper</i> .....	75
5.7.3	<i>Lachse, gekühlt</i> .....	77
5.8	DISKUSSION UND FEHLERBETRACHTUNG SOWIE ABLEITUNGEN .....	79
5.8.1	<i>Vergleich der Messbedingungen</i> .....	80
5.8.2	<i>Fehler der IMF-Schätzung</i> .....	84
5.8.3	<i>Einfluss der ROI-Größe und –Lage</i> .....	86
5.8.4	<i>Ausblick</i> .....	88
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>93</b>
<b>7</b>	<b>SUMMARY .....</b>	<b>96</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>99</b>
	<b>ANHANG</b>	

## Verzeichnis der Abkürzungen

A(f)	Amplitude des Leistungsspektrums [dB]
ALPHA(f)	frequenzabhängige Dämpfung über die Tiefe [dB/cm]
BCMAX(f)	Maximales Rückstreusignal in SUB-ROI [dB]
BW	Brustwirbel
BW	Dämpfungsbedingte Änderung der Bandbreite über die ROI-Tiefe [MHz]
CA	Fläche unter dem Cepstrum [dBs]
CFDS	Dämpfungsbedingte Mittenfrequenzverschiebung über die ROI-Tiefe [MHz]
CFP	Position des ersten Maximums im Cepstrum [ $n/f_s$ ]
CPMD	Mittlerer Abstand zwischen Peaks im Cepstrum [ $n/f_s$ ]
CPN	Anzahl der Peaks im Cepstrum (ohne Einheit)
DBC(f)	Differenz zwischen größter und kleinster maximaler Rückstreuung in ROI [dB]
DE	Deutsches Edelschwein
DL	Deutsche Landrasse
DSWP	Änderung des Schwerpunkts der Spektren [dB]
Du	Duroc
FM	Fleischmaß (FOM-Gerät)
FOM	Fat-O-Meater (Klassifizierungsgerät)
FTG	FTG-Fasern (engl.: <i>fast twitch glycolytic</i> )
FTO	FTO-Fasern (engl.: <i>fast twitch oxidative</i> )
Ha	Hampshire
IAC	Integral des Dämpfungskoeffizienten [dB/cm·MHz]
IBCREL	Relativer integrierter Rückstreukoeffizient [dB·MHz]
IMF	Intramuskulärer Fettgehalt
IOA	Anstieg des Dämpfungskoeffizienten über die Frequenz [DB·MHz <sup>-1</sup> ·cm <sup>-1</sup> ]
IOBC(f)	Winkelabhängiger Anstieg des Rückstreukoeffizienten [dB/°]
LF <sub>24</sub>	Leitfähigkeitswert 24 h p.m.
LF <sub>45</sub>	Leitfähigkeitswert 45 min p.m.
LSQ/LSM	<i>Least Squares Means</i>
LW	Lendenwirbel
M. longissimus	Musculus longissimus
MFA	Muskelfleischanteil
MHS	Malignes Hyperthermie Syndrom
MR(f)	Mittlere Rückstreuung nach Dämpfungskorrektur [dB]
MW	Arithmetischer Mittelwert

MWCF	Mittlere Mittenfrequenz [MHz]
MWSWP	Mittlerer Schwerpunkt der Spektren [MHz]
n	Anzahl
n.s.	nicht signifikant mit $p < 0,05$
NIT	Nahe-Infrarot-Transmissions-Messung
NN	MHS-homozygot negativ
Nn	MHS-heterozygot
nn	MHS-homozygot positiv
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
p.m.	post mortem
pH <sub>24</sub>	spätpostmortaler pH-Wert 24 h p.m.
pH <sub>45</sub>	frühpostmortaler pH-Wert 45 min p.m.
Pi	Pietrain
r	Korrelationskoeffizient
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
RA(f)	Frequenzabhängiger absoluter Rückstreuparameter [dB]
r <sub>g</sub>	linearer genetischer Korrelationskoeffizient
r <sub>p</sub>	linearer phänotypischer Korrelationskoeffizient
ROI	interessierender Bereich (engl. <i>region of interest</i> )
RR(f)	Frequenzabhängiger relativer Rückstreuparameter bezogen auf ein Referenzphantom (ohne Einheit)
s	Standardabweichung
SE	Standardfehler des Mittelwertes
SF	Schwerfurter Fleischrasse
SKG <sub>warm</sub>	Schlachtkörpergewicht warm
SM	Speckmaß (FOM-Gerät)
SNR	Signal-Rausch-Abstand (engl. <i>signal-to-noise-ratio</i> )
TGC	laufzeitabhängige Empfangsverstärkung

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht über jüngste Untersuchungen zum IMF-Gehalt in deutschen Schweinepopulationen sowie der Schweiz (SUIS AG) .....	6
Tabelle 2:	Schlachtkörpermerkmale der untersuchten Schlachtkörper .....	31
Tabelle 3:	Beschreibung der Messzeitpunkte und -bedingungen .....	34
Tabelle 4:	Übersicht über die zur Verfügung stehenden Ultraschallparameter und ihre Bedeutung .. .....	37
Tabelle 5:	Klassenbesetzung und deskriptive Statistik der IMF-Klassen für die Varianzanalyse ..	40
Tabelle 6:	Klassenbesetzung der Fettgehaltsklassen zur Diskriminanzanalyse (IMF ± Mittelwerte Standardabweichung) .....	40
Tabelle 7:	Rohnährstoffgehalte einschließlich IMF im <i>M. longissimus</i> der untersuchten Schlachtkörper (n = 115) .....	41
Tabelle 8:	Früh- und spätpostmortale Fleischqualitätsparameter der untersuchten Schweineschlachtkörper ( <i>M. longissimus</i> ) und Signifikanzniveau des Schlachttagseffektes (p) .....	42
Tabelle 9:	Phänotypische Korrelationen zwischen Merkmalen der Schlachtleistung und Fleischqualitätsparametern im <i>M. longissimus</i> der untersuchten Schweine (* p < 0,05; zugehörige n in Klammern) .....	44
Tabelle 10:	Korrelationen zwischen Schlachtleistungsparametern, Merkmalen der Fleischqualität und Rohnährstoffen im <i>M. longissimus</i> der untersuchten Schweine .....	45
Tabelle 11:	Sensorische Eigenschaften der untersuchten Kotelettproben (n = 115) .....	46
Tabelle 12:	Phänotypische Produkt-Moment-Korrelationen zwischen Rohnährstoffgehalten im <i>M.</i> <i>longissimus</i> und sensorischen Parametern (n = 115) .....	46
Tabelle 13:	Phänotypische Produkt-Moment-Korrelationen zwischen den erfassten sensorischen Eigenschaften der Koteletts (n = 115) .....	47
Tabelle 14:	Sensorische Eigenschaften und deren Korrelation zum IMF-Gehalt im <i>M. longissimus</i> in Abhängigkeit von der IMF-Gehaltsstufe .....	48
Tabelle 15:	LS-Mittelwerte sensorischer Parameter in Abhängigkeit von der Fettgehaltsklasse ....	48
Tabelle 16:	Signifikanzniveau der untersuchten Effekte auf Parameter der Ultraschallausbreitung im <i>M. longissimus</i> der untersuchten Schweineschlachtkörper .....	51
Tabelle 17:	LS-Mittelwerte und Standardfehler (in Klammern) des Dämpfungskoeffizienten IOA in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt .....	54
Tabelle 18:	Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern (n = 115) an warmen Schlachtkörpern .....	71
Tabelle 19:	Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung mittels Einzelmesswerten der Ultraschallparameter an warmen Schlachtkörpern .....	72
Tabelle 20:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH (> 2,0 % IMF) bzw. TIEF (≤ 2,0 % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parametermittelwerten (n=115) bei warmen Schlachtkörpern .....	74
Tabelle 21:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH (> 2,0 % IMF) bzw. TIEF (≤ 2,0 % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse anhand von Parametereinzelmesswerten bei warmen Schlachtkörpern .....	74
Tabelle 22:	Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern (n = 115) an kalten Schlachtkörpern .....	75
Tabelle 23:	Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung mittels Einzelmesswerten der Ultraschallparameter an kalten Schlachtkörpern .....	75

Tabelle 24:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$ % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$ % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parameternittelwerten an kalten Schlachtkörpern .....	76
Tabelle 25:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$ % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$ % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parametereinzelnwerten an kalten Schlachtkörpern .....	76
Tabelle 26:	Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern (n = 115) an Lachsen .....	77
Tabelle 27:	Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung mittels Einzelmesswerten an Lachsen . .....	77
Tabelle 28:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$ % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$ % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parameternittelwerten an Lachsen .....	78
Tabelle 29:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$ % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$ % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parametereinzelnwerten an Lachsen .....	78
Tabelle 30:	Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) und Schätzfehler (RMSE) verschiedener Regressionsmodelle mit schrittweiser Variablenauswahl zur Schätzung des IMF aus gemittelten Ultraschallparametern je Schlachtkörper (x = Variablen angeboten zur Auswahl) .....	83

## Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1:	Schema zur Probennahme am <i>M. longissimus</i> .....	31
Abbildung 2:	Aufbau des Messsystems zur Aufnahme von HF-Daten und Signalfluss .....	33
Abbildung 3:	Absolute und relative Häufigkeitsverteilung der IMF-Gehalte der untersuchten Schweineschlachtkörper (n = 115) .....	41
Abbildung 4:	Absolute und relative Häufigkeitsverteilung der pH <sub>45</sub> Werte im <i>M. longissimus</i> der untersuchten Schlachtkörper .....	42
Abbildung 5:	Frequenzabhängige Dämpfung ALPHA(f) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Ultraschall-Datenaufnahme; LS-Mittelwerte und Standardfehler .....	54
Abbildung 6:	Frequenzabhängige absolute Rückstreuung in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (LS-Mittelwerte und Standardfehler) .....	56
Abbildung 7:	Mittlere Rückstreuung MR(f) in der ROI in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (LS-Mittelwerte) .....	57
Abbildung 8:	Frequenzabhängige Dämpfung ALPHA(f) in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung (LS-Mittelwerte und Standardfehler). .....	59
Abbildung 9:	Frequenzabhängige Dämpfung des Ultraschalls an warmen Schlachtkörpern in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung (Rohmittelwert und Standardfehler) .....	60
Abbildung 10:	Frequenzabhängige relative Rückstreuung RR(f) in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung (LS-Mittelwerte und Standardfehler) .....	60
Abbildung 11:	Frequenzabhängige relative Rückstreuung RR(f) an warmen Schlachtkörpern in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung (Rohmittelwert und Standardfehler) .....	61
Abbildung 12:	Differenz zwischen maximalem und minimalem Rückstreusignal DBC(f) innerhalb der ROI in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls relativ zur Muskelfaserrichtung im <i>M. longissimus</i> (LS-Mittelwerte und Standardfehler) .....	61
Abbildung 13:	Projektion der akustischen Parameter in den Raum der Faktoren 1 und 2 (Ladungsplot). .....	70

Abbildung 14:	Projektion der akustischen Parameter in den Raum der Faktoren 3 und 4 (Ladungsplot). .....	70
Abbildung 15:	Histogramm der Residuen des Schätzmodells zur Vorhersage des IMF (Modell 2) .....	84
Abbildung 16:	Beobachtete und geschätzte IMF-Gehalte (n=115) aus 6 gemittelten Ultraschalldaten (längs- und quer; Modell 2: ohne richtungsabhängige Parameter); $R^2 = 0,63$ .....	85
Abbildung 17:	Frequenzabhängige Dämpfung in Abhängigkeit von der ROI-Größe (LS-Means und Standardfehler.....	87

## Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen im Anhang

Abbildung A 1:	Ultraschallwandler Wobbler AA5A
Abbildung A 2:	Ultraschallmessung am hängenden Schlachtkörper
Abbildung A 3:	Ultraschallmessung am hängenden Schlachtkörper – Detail -
Abbildung A 4:	B-Bild einer Messung in Längsrichtung bezogen auf die Wirbelsäule
Abbildung A 5:	B-Bild einer Messung in Querrichtung bezogen auf die Wirbelsäule
Tabelle A 1:	LS-Mittelwerte (LSM) und Standardfehler (SE) der US-Parameter in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (unterschiedliche Kleinbuchstaben markieren signifikante Differenzen bei $p < 0,05$ )
Tabelle A 2:	LS-Mittelwerte (LSM) und Standardfehler (SE) der US-Parameter in Abhängigkeit von der Messrichtung (unterschiedliche Kleinbuchstaben markieren signifikante Differenzen bei $p < 0,05$ )
Tabelle A 3:	Wiederholbarkeit der akustischen Parameter (Intraklasskorrelation der wiederholten Messungen je Tier) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Messrichtung
Tabelle A 4:	Korrelationen akustischer Parameter zum IMF-Gehalt im <i>M. longissimus</i> in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (Parametermittelwerte aus je 6 Messungen je Schlachtkörper; $r$ = Korrelationskoeffizient, $p$ = Irrtumswahrscheinlichkeit)
Tabelle A 5:	Korrelationen der Ultraschallparameter zum IMF im <i>M. longissimus</i> (Rohparameter; $n =$ 341-344 je Messzeitpunkt und -richtung)
Tabelle A 6:	Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) und Schätzfehler (RMSE) der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern ( $n = 115$ )
Tabelle A 7:	Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) und Schätzfehler (RMSE) der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Messrichtung unter Verwendung von Einzelmessungen
Tabelle A 8:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von Messzeitpunkt, -richtung und ROI- Größe für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$ % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$ % IMF) mit Ultraschallparametern aus schrittweiser Diskriminanzanalyse (Parametermittelwerte)
Tabelle A 9:	Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von Messzeitpunkt, -richtung und ROI- Größe für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$ % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$ % IMF) mit Ultraschallparametern aus schrittweiser Diskriminanzanalyse (Einzelmesswerte)

## 1 Einleitung

Der intramuskuläre Fettgehalt (IMF) wird als ein wichtiges Qualitätsmerkmal für den Genusswert von Schweinefleisch angesehen. Bedingt durch die Gestaltung der Bezahlungssysteme für die Erzeuger von Schweinefleisch, waren die Zuchtanstrengungen in Deutschland in der Vergangenheit im Wesentlichen auf die Erhöhung des Muskelfleischanteils bei gleichzeitiger Verringerung des Auflagefettes und des Futteraufwandes gerichtet. Aufgrund des bestehenden Merkmalsantagonismus<sup>7</sup> zwischen intramuskulärem Fett und Muskelfleischanteil und fehlender Berücksichtigung des IMF im Zuchtziel führte die Selektion zu verringerten IMF-Gehalten, so dass in marktbestimmenden Populationen kaum noch der aus sensorischer Sicht wünschenswerte Grenzwert von 2 % im *M. longissimus* erreicht wird (LENGERKEN et al., 1989; LENGERKEN et al., 1998; BERG et al., 1999). So wiesen im Warentest 2001/2002 im Mittel über 50 % der geprüften Schlachtschweine IMF-Gehalte unter 1 % und lediglich knapp 3 % der Tiere mehr als 2 % IMF auf (WARENTEST, 2002). Auch in einem von LAUBE et al. (2000) durchgeführten Feldversuch mit verschiedenen Vaterlinien erreichten nur Nachkommen von dänischen Duroc-Ebern 2 % IMF; die deutschen Herkünfte erreichten im Mittel zwischen 1,2 und 1,5 % IMF.

Die Voraussetzungen für eine züchterische Bearbeitung des IMF sind gegeben. Die für eine Berücksichtigung in der Selektion erforderliche Variabilität des IMF innerhalb der Herkünfte sowie die Heritabilität des intramuskulären Fettgehaltes sind ausreichend hoch (LENGERKEN et al., 1988; BRANDT, 1996; LAUBE et al., 2000; GÖTZ et al., 2001). Dabei ist eine züchterische Erhöhung des IMF keineswegs mit einem starken Rückgang des Muskelfleischanteils verbunden (SCHWÖRER et al., 1997; SUIS AG, 2002).

Sowohl die züchterische Bearbeitung des IMF als auch dessen monetäre Bewertung im Rahmen von Qualitätsfleischprogrammen setzen eine schnelle, kostengünstige und reproduzierbare Gehaltsbestimmung voraus. Der zerstörungsfreien korrekten Erfassung am Schlachtkörper während der Klassifizierung kommt dabei eine besondere Bedeutung zu, damit der IMF in die Schlachtkörperbewertung und -bezahlung integriert werden kann. Generell ist international ein eindeutiger Trend zu beobachten, dass Lebensmittel hinsichtlich ihrer Qualität und Zusammensetzung kenntlich gemacht werden (MARTINEZ et al., 2003), so dass die Ausweisung einer definierten Fleischqualität den steigenden Ansprüchen bei der Vermarktung Rechnung gerecht würde.

Zunehmend wird die Eignung von Ultraschallverfahren zur Analyse von Lebensmitteln untersucht. In der Tierzucht gelangen ultrasonografische Methoden seit den 50er/60er Jahren bei der zerstörungsfreien Bestimmung der Gewebezusammensetzung bzw. von Längen- und Flächenmaßen am lebenden Tier bzw. am Schlachtkörper zur Anwendung, z.B. bei der Erfassung verschiedener Speckmaße im Rahmen der Eigenleistungsprüfung (PFEIFFER et al., 1991). Über die Umsetzung der Ultraschallinformationen in Grauwerte zur bildlichen Darstellung von Grenzflächenechos hinaus, ermöglicht die Spektralanalyse von rückgestreuten Ultraschallsignalen die Berechnung akustischer Parameter, von denen man annimmt, dass sie objektive, geräteunabhängige Größen zur Charakterisierung von Gewebe darstellen. Insbesondere für medizinische Fragestellungen wird zunehmend die Gewebecharakterisierung mittels Ultraschall untersucht, z.B. zur Klassifikation bzw. Lokalisation von Karzinomen oder zum Monitoring von Abstoßungsreaktionen nach Transplantationen (GÄRTNER et al., 1998).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Eignung der Spektralanalyse rückgestreuten Ultraschalls zur zerstörungsfreien Schätzung des intramuskulären Fettgehaltes im *M. longissimus* von Schweinen zu untersuchen.

## 2 Literatur

In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein Literaturüberblick zu den Zusammenhängen zwischen IMF und sensorischen bzw. apparativ erfassbaren Fleischeigenschaften gegeben sowie verschiedene Verfahren zur Bestimmung des IMF bzw. des Fettgehaltes im Schlachtkörper oder Teilstücken vorgestellt. Die anschließenden Kapitel sind den Grundlagen der Ultraschalltechnik und den bislang untersuchten Beziehungen von Ultraschall und biologischem Gewebe sowie den Ansätzen zur Gewebecharakterisierung mittels Ultraschall gewidmet.

### 2.1 Zusammenhänge zwischen IMF und sensorischen Eigenschaften von Schweinefleisch

Obwohl die Ergebnisse keineswegs immer eindeutig sind, deuten viele Untersuchungen darauf hin, dass der intramuskuläre Fettgehalt einen bedeutenden Anteil am sensorisch wahrnehmbaren Eindruck von Schweinefleisch hat. Verschiedene Autoren können signifikante Einflüsse des IMF-Gehaltes auf Sensorikparameter wie Geschmack, Saftigkeit, Zartheit und Gesamteindruck feststellen (FERNANDEZ et al., 1999; KIPFMÜLLER et al., 2000; EGGERT et al., 2002). Dabei sind die Beziehungen weder konsistent noch unbedingt linear, sondern legen oftmals einen Schwellenwert nahe, unterhalb dessen die Verzehrsqualität abnimmt oder inakzeptabel wird (FERNANDEZ et al., 1999; HEYLEN, 1999; BLANCHARD et al., 2000; KIPFMÜLLER et al., 2000; MERKS et al., 2000; BREWER et al., 2002). Ein positiver Zusammenhang zwischen dem intramuskulären Fettgehalt und den sensorischen Eigenschaften scheint nur bis 3,5 % IMF zu bestehen (FERNANDEZ et al., 1999). Dabei können derartige Zusammenhänge auch abhängig von der genetischen Konstruktion der Tiere sein, so dass z.B. eine IMF-Erhöhung ungeachtet der genetischen Herkunft nicht notwendigerweise zu besseren sensorischen Eigenschaften führt (REICHEL et al., 2001; VAN LAACK et al., 2001; JOSELL et al., 2003). Die verbraucherseitige Akzeptanz von Schweinefleisch kann durch höhere IMF-Gehalte gesteigert werden, solange das sichtbare Fett nicht den Verbrauchererwartungen aufgrund von Assoziationen mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit durch hohen Fett- und Cholesteringehalt widerspricht. Bei Wahlversuchen mit Verbraucherpanels in Australien bzw. in den USA wurden wenig oder mittelstark marmorierte Fleischstücke im Vergleich zu stärker marmorierten Koteletts bevorzugt (BREWER et al., 1999; CHANNON et al., 2004). In Australien ist dabei jegliches sichtbare Fett im Fleisch-

schnitt mit ungünstigen ernährungsphysiologischen Eigenschaften von Schweinefleisch verknüpft CHANNON et al., 2004). Die Kaufabsicht wird BREWER et al. (1999) und RESURRECCION (2004) zufolge stärker von der Marmorierung als von der Farbe beeinflusst. Bei der verbraucherseitigen visuellen Bewertung spielt jedoch auch die sensorische Erfahrung eine Rolle, denn nach dem Verzehr sind die Akzeptanzwerte z.T. höher als die ursprünglich erfragte potentielle Kaufabsicht bei ausschließlich visueller Bewertung das ausdrückte. Aber auch die Verzehrshäufigkeit von Schweinefleisch, geografische Herkunft, Alter und Geschlecht der Prüfpersonen beeinflussen deren sensorisches Urteil (BRYHNI et al., 2003; RESURRECCION, 2004).

Vor dem Hintergrund dieser Zusammenhänge gilt ein IMF-Gehalt von 2-2,5 % als wünschenswertes Optimum für eine gute Fleischqualität. Diesen Bereich, wobei die Referenzanalytik mit Säurevoraufschluss erfolgen sollte (siehe Kapitel 2.3.1), hat auch der Arbeitsausschuss für Fleischerzeugung der Deutschen Gesellschaft für Züchtungskunde (DGfZ) zum Ziel der Zuchtbestrebungen erklärt und die Einbeziehung des IMF in die Selektionskriterien empfohlen (DGfZ, 2001).

## 2.2 IMF im *M. longissimus* des Schweins

### 2.2.1 Ergebnisse aktueller Untersuchungen zum IMF-Gehalt

Tabelle 1 gibt eine Übersicht über aktuelle Untersuchungen zum IMF-Gehalt in Schweinepopulationen in Deutschland und der Schweiz. Dass bei einem Vergleich der Gehaltswerte die Bestimmungsmethode unbedingt Berücksichtigung finden muss, wird unter Kapitel 2.3.1 näher erläutert. Bei der Prüfung marktbestimmender Herkünfte erweist sich, dass nur wenige Tiere den wünschenswerten IMF-Gehalt in Höhe von 2 % oder mehr im Kotelett (*M. longissimus*) aufweisen. Insbesondere der WARENTEST 2002 machte deutlich, dass die Gehaltswerte der Mehrzahl der geprüften Tiere weit entfernt von dem angestrebten Grenzwert sind. Diverse ausländische Untersuchungen bestätigen die Ergebnisse von LAUBE et al. (2000) und REICHEL et al. (2001), dass lediglich Duroc (Du) oder Kreuzungstiere mit Du-Anteil beträchtlich höhere IMF-Gehalte erreichen (BLANCHARD et al., 1999; VAN LAACK et al., 2001; JACYNO et al., 2002; JOSELL et al., 2003; LATORRE et al., 2003; CHANNON et al., 2004; SIMEK et al., 2004). JACYNO et al. (2002) zufolge war es für die Höhe des IMF-Gehaltes in einer 4-Rassenkreuzung mit Du-Anteil auch bedeutsam, ob der Duroc-Anteil durch die Ebermutter oder den –vater eingebracht wurde. Der IMF-Gehalt von (Pi♂\*Du♀)\*F1 war signifikant geringer als

von (Du♂\*Pi♀)\*F1, ohne, dass Unterschiede im MFA bestanden. LO et al. (1992) untersuchten ebenfalls reziproke Kreuzungsdifferenzen und beobachteten tendenziell niedrigere IMF-Gehalte bei Du♂\*DL♀ im Vergleich mit DL♂\*Du♀ sowie leicht negative Heterosiseffekte, d.h. die Gehaltswerte der Nachkommen waren geringer als von den jeweiligen Reinzuchtlinien.

**Tabelle 1: Übersicht über jüngste Untersuchungen zum IMF-Gehalt in deutschen Schweinepopulationen sowie der Schweiz (SUIS AG)**

Autor	Genetik	IMF [%]	Analytik / Bemerkungen
LAUBE et al., 2000	Pi (nn) <sup>1</sup>	1,34	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NIT; Kalibration nach §35 LMBG mit Hydrolyse</li> <li>▪ Verschiedene Vaterlinien an BHZP-Sauen</li> <li>▪ Feldprüfung</li> <li>▪ Kastraten und Sauen</li> </ul>
	Pi (NN)	1,23	
	Pi*Ha (nn)	1,47	
	Pi*Ha (Nn)	1,37	
	Du (nn)	2,03	
	Ha*Du (nn)	1,75	
GÖTZ et al., 2001	DL	1,43	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NIRS; Kalibration mit HCl; Petrolbenzin</li> <li>▪ Stationsprüfung</li> </ul>
	Pi	1,09	
	DL	1,45	
WARENTEST, 2002	BHZP	1,04	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NIT; Kalibration mit HCl; Petrolether</li> <li>▪ Stationsprüfung</li> <li>▪ Kastraten und Sauen</li> </ul>
	PIC	1,01	
	Hülsenberger	1,08	
	SNW	0,97	
	JSR	0,96	
	Dalland	1,39	
	UPB	0,91	
	Gesamt	1,05	
SUISAG, 2002	ES	2,20	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NIR; Kalibration: Extraktion mit Trichloräthan ohne Hydrolyse</li> <li>▪ Stationsprüfung</li> </ul>
	Du	2,69	
	SL	1,97	
BIEDERMANN et al., 2000	Pi (NN)	1,71	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ keine Angaben zur Analytik</li> </ul>
	Pi (Nn)	1,35	
	Pi (nn)	1,03	
REICHEL et al., 2001	Ha	1,71	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ § 35 LMBG mit HCl-Aufschluss</li> <li>▪ Stationsprüfung</li> <li>▪ verschiedener Vaterlinien an F1-Sauen</li> <li>▪ Kastraten und Sauen</li> </ul>
	Du	2,09	
	Pi (NN)	1,48	
	Pi (nn)	1,33	
	Ha* Pi (nn)	1,58	
	Du*Ha	1,75	
HEYLEN, 1999	SF	3,04	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ NIT (Referenz Extraktion mit Hexan, ohne HCl-Aufschluss)</li> <li>▪ Feldprüfung</li> </ul>
	(Pi*SF)*SF	2,28	
	Pi*SF	2,40	
	(Pi*SF)*(Pi*SF)	2,33	
	Pi*(Pi*SF)	1,04	
	Pi*(DE*DL)	2,04	
	DE	2,10	
MICKLICH et al., 2002	Du	2,47	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Feldprüfung</li> </ul>
	SF	1,71	

1) NN = homozygot MHS positiv, nn = homozygot MHS negativ, Nn = heterozygot

### 2.2.2 Möglichkeiten der züchterischen Bearbeitung

Dass die Möglichkeit der züchterischen Erhöhung des IMF-Gehaltes angesichts des niedrigen gegenwärtigen Niveaus dennoch gegeben ist, belegen Schweizer Züchtergebnisse (SUIS AG, 2002). Mit der Aufnahme des IMF in den Selektionsindex ist eine deutliche Anhebung des Gehaltsniveaus gelungen, ohne nennenswerte Einbußen im Muskelfleischanteil hinnehmen zu müssen. Die IMF-Gehaltswerte mittels NIR-Spektroskopie (Referenzanalytik ohne Säurevoraufschluss) von Edelschweinen und Duroc liegen deutlich über 2 % bzw. knapp 2,7 % und haben damit die rechnerischen Prognosen zur züchterisch möglichen Steigerung des IMF-Gehalts in Schweizer Populationen von HOFER et al. (1996) z.T. erheblich übertroffen. GÖTZ et al. (2001) konnte unlängst ebenfalls nachweisen, dass die bislang häufig beobachteten negativen Beziehungen zwischen IMF-Gehalt und wirtschaftlich relevanten Merkmalen wie z.B. dem Muskelfleischanteil offenbar nicht derart stark ausgeprägt sind, wie häufig angenommen. Aufgrund mittlerer bis hoher Heritabilitätswerte für die Deutsche Landrasse ( $h^2 = 0,38$ ) bzw. Pietrain ( $h^2 = 0,50$ ) und ausreichend hoher Variabilität des IMF in den untersuchten Herkünften gehen die Autoren davon aus, dass eine züchterische Erhöhung des IMF-Gehaltes möglich ist, ohne damit bedeutsame Einbußen im Schlachtkörperwert zu verursachen. Auch in der Untersuchung von LAUBE et al. (2000) zeigte sich eine große Variabilität des intramuskulären Fettgehaltes innerhalb der untersuchten Herkünfte. Die von BRANDT (1996) veröffentlichten Heritabilitätsschätzungen bekräftigen die züchterischen Möglichkeiten ( $h^2 = 0,33 - 0,61$ ).

Wie stark die antagonistischen Beziehungen ausgeprägt sind, ist möglicherweise rassespezifisch und abhängig vom Grad der bisherigen züchterischen Bearbeitung. BIEDERMANN et al. (2000) wiesen für Pietrain einen wesentlich stärkeren Merkmalsantagonismus zwischen IMF und MFA nach ( $r_p = -0,64$ ) als GÖTZ et al. (2001). Über alle geprüften Herkünfte war im WARENTEST, 2002 eine mittlere negative Korrelation zwischen IMF und MFA (AutoFOM) von  $r_p = -0,4$  festzustellen, die Beziehung war bei mittlerweile höheren IMF-Gehalten tendenziell geringer ausgeprägt als 4 Jahre zuvor, wobei allerdings andere Herkünfte getestet wurden. Auch in einer Duroc-Population war die Selektion auf Wachstumseffizienz mit verminderten IMF-Gehalten verbunden (LONERGAN et al., 2001).

### 2.2.3 Einflussfaktoren auf die Höhe des IMF

#### 2.2.3.1 MHS-Genstatus bzw. RN-Genstatus

Mehrere Untersuchungen belegen, dass der MHS-Genstatus (RYR 1 Gen, *ryanodine receptor 1 gene*; FUJII et al., 1991) Auswirkungen auf den IMF-Gehalt besitzt. Übereinstimmend finden jüngst MOELICH et al. (2003) an Large White und sowohl BIEDERMANN et al. (2000) in Pietrain als auch LAUBE et al. (2000) und REICHEL et al. (2001) in Pi\*F1 mit sinkender Präsenz des MHS-Stress-Allels (= Defektallel) steigende IMF-Gehalte. Sollte die in Deutschland in den Mutterrassen weitgehend vollzogene MHS-Sanierung, d.h. die Elimination des Defektallels aus dem Erbgut, auch in den Vatterassen vervollständigt werden, bietet sich auch auf diesem Weg eine Möglichkeit, den IMF-Gehalt zu erhöhen. Das RN-Gen (*rendement napole*; auch Hampshire-Faktor genannt), das speziell in Schweinen mit Hampshire-Anteil vor allem für vermindertes Wasserbindevermögen verantwortlich ist, besitzt laut HAMILTON et al. (2000) offensichtlich keinen direkten Einfluss auf die Höhe des IMF-Gehaltes. MEADUS et al. (2000) finden jedoch höhere IMF-Anteile in Muskeln mit erhöhtem glykolytischem Potential.

#### 2.2.3.2 Leptin

Die Entdeckung des Leptin-Genes an *ob/ob*-Mäusen (*obesity*; engl.: Fettleibigkeit, Fettsucht) durch ZHANG et al. (1994) führte zu einer Vielzahl von Untersuchungen zu dessen Wirkung, in der Mehrzahl an Nagetieren und, wegen der großen Bedeutung von Übergewicht für die Gesundheit, am Menschen (HOUSEKNECHT et al., 1998). NEUENSCHWANDER et al. (1996) bzw. BIDWELL et al. (1997) entdeckten die Struktur des porcinen *ob*-Genes, das für Leptin codiert und auf Chromosom 18 lokalisiert ist.

Diskutiert werden verschiedene Wirkungsmechanismen von Leptin:

- Verminderung der Nahrungsaufnahme (LIN et al., 2000)
- Stimulation der Sekretion des Wachstumshormons GH; auch LH (LIN et al., 2000; BARB et al., 2001);
- regulatorische Einflüsse auf die Insulinsekretion bzw. auf die insulininduzierten Stoffwechselfvorgänge
- Erhöhung des Stoffumsatzes
- Transmitter für Ernährungszustand (auch mit Signalwirkung für das Reproduktionsgeschehen, z.B. Einleitung der Pubertät).

Aufgrund des Vorkommens des transportwirksamen Leptin-Rezeptors in vielen Gewebetypen (z.B. Muskel-, Fettgewebe, Leber, Hirn, Herz, Lunge, Ovarien) liegt eine vielfältige Beteiligung von Leptin an physiologischen Regulationsmechanismen nahe (LIN et al., 2000). Leptinresistenz bzw. ein gestörter Leptintransport gelten als mögliche Mitursachen für Fettleibigkeit bzw. verzögerte Geschlechtsreife (HOUSEKNECHT et al., 1998). Verantwortlich dafür sind Polymorphismen des Leptin-Genes selbst bzw. der Leptinrezeptor-Gene (ROBERT et al., 1998; JIANG et al., 1999). Zu praktischen Anwendungen hinsichtlich der Steuerung von Appetit, Wachstum oder Reproduktion hat das gegenwärtige Wissen über die Wirkungsmechanismen von Leptin jedoch bisher nicht geführt. Direkte Beziehungen zwischen dem IMF-Gehalt und dem Leptin-Gen wurden bislang ebenfalls nicht nachgewiesen. JIANG et al. (1999) vermuten, dass ein Polymorphismus des Leptin-Genes Beziehungen zur Ausprägung der Rückenspeckdicke des Schweins aufweist.

### 2.2.3.3 Haltung und Fütterung

GENTRY et al. (2002) konnten ob eventueller Einflüsse des Haltungssystems auf Wachstumsparameter und Fleischqualität nur geringe Unterschiede in der Marmorierung zwischen Stall-, Freiland-, Spaltenboden- und Strohhaltung beobachten. Auch MICKLICH et al. (2002) konstatierten hinsichtlich des IMF-Gehaltes keine Unterschiede zwischen Stallhaltung auf Stroh bzw. Weidehaltung. Tendenziell waren die Fettgehalte jedoch niedriger bei Weidehaltung, was vermutlich mit dem höheren Energieverbrauch (Bewegung, Klima) derartig gehaltener Tiere zusammenhängt.

Hinsichtlich der Fütterung werden insbesondere Einflüsse der Rationsgestaltung diskutiert. Ergebnisse von GLODEK et al. (2001), WITTE et al. (2000) und BIDNER et al. (2004) (letztere ausschließlich im Bereich der Endmast) zeigten, dass eine verminderte Lysinzulage in der Ration mit einem höheren IMF-Gehalt verbunden ist, wobei zum Teil geringere tägliche Zunahmen, Muskelflächen bzw. Schlachtgewichte zu verzeichnen sind. Eine eiweißreduzierte Diät aus ökologischem Landbau, die ohne den Zusatz von synthetischen Aminosäuren auskommen muss, führte in Versuchen von SUNDRUM et al. (2000) ebenfalls zu verstärkter Einlagerung von IMF im Vergleich zu konventionell gefütterten Schweinen (2,95 % gegenüber 1,25 %). Dies war verbunden mit einer anfänglich geringeren täglichen Zunahme und mit einer 11 bis 15 Tage längeren Mastdauer bis zum Erreichen von 120 kg Mastendgewicht. Energiereiches, aber eiweißreduziertes Mastfutter *ad libitum* führte auch bei BLANCHARD et al. (1999) zu den höchsten IMF-Gehalten und den besten Sensorikergebnissen. Die Limitierung des Proteinansatz-

zes durch eine Lysin-Unterversorgung und der daraus resultierende höhere Energieüberschuss werden als Ursache für die stärkere Fettdeposition angesehen (BIDNER et al., 2004). Die Art des Futterfettes hat dagegen keinen Einfluss auf die Höhe und die Zusammensetzung des IMF (SCHEEDER et al., 2000), während die Fütterung mit fettangereichertem Futter zu verstärkter Fetteinlagerung im Muskel führt (LENGERKEN et al., 1984). BRANDT (1996) verweist auf Untersuchungsergebnisse, wonach unabhängig von der Rasse eine verstärkte IMF-Einlagerung mit zunehmender Fütterungsintensität zu beobachten war.

#### 2.2.3.4 *Alter und Geschlecht*

Mit zunehmender Mastdauer und folglich höherem Mastgewicht steigt auch der intramuskuläre Fettgehalt. WAGNER et al. (1999) und ZGUR (1991) beschreiben ein lineares Wachstum des intramuskulären Fettes im *M. longissimus*. Im Vergleich mit den anderen Fettdepots, inneres Fett bzw. subkutanes Fett, besitzt das IMF nach KOLSTAD (2001) bei Annahme allometrischer Wachstumsverhältnisse den größten Wachstumskoeffizienten, d.h die Einlagerung erfolgt am spätesten.

Geschlechtsspezifische Differenzen der Schlachtkörperzusammensetzung sind lange bekannt und werden u.a. durch die Geschlechtertrennung in der Mast berücksichtigt. Dabei weisen Kastraten im Vergleich mit Sauen den höheren intramuskulären Fettgehalt auf (BIEDERMANN et al., 2000; ZGUR, 1991; UNRUH et al., 1996; JACYNO et al., 2002; LATORRE et al., 2003; CHANNON et al., 2004), während Eber den niedrigsten intramuskulären Fettgehalt ausbilden (LENGERKEN et al., 1989).

#### 2.2.3.5 *Lokalisationsabhängige Variation des IMF im M. longissimus*

Eine lokalisationsbedingte Variation des IMF im Längsverlauf des *M. longissimus* des Schweins wurde mehrfach nachgewiesen. HEYLEN (1999) fand insbesondere an der häufig zur Klassifizierung genutzten Messstelle 2./3.-letzte Rippe (ca. 13./14. BW) die niedrigsten Fettgehalte, am kranialen bzw. kaudalen Ende jedoch bis zu 109 % mehr IMF. Dabei erscheint der Bereich vom 11./12. BW bis 1./2. LW relativ homogen hinsichtlich des Fettgehaltes. Auch in eigenen Untersuchungen war der Fettgehalt im medialen Bereich des *M. longissimus* tendenziell geringer als am kranialen bzw. kaudalen Ende (MÖRLEIN et al., 2002). Übereinstimmend findet auch VAN OECKEL et al. (2003) im mittleren Bereich des *M. longissimus* tendenziell die niedrigsten Fettgehalte. Neben der longitudinalen ist auch eine cross-sectionale Variation des IMF im *M. longissimus* nachweisbar HEYLEN (1999).

### 2.2.3.6 Muskelstruktur

Eine Reihe von Untersuchungen wurde zu Zusammenhängen zwischen der Muskelfaserstruktur, d.h. der Größe und Anzahl der Muskelfasern bzw. den relativen Anteilen der verschiedenen Muskelfasertypen, und dem IMF-Gehalt durchgeführt. HEYLEN (1999) konnte jedoch keine eindeutig gerichteten Beziehungen zwischen dem IMF-Gehalt und den Muskelstrukturmerkmalen feststellen. Allerdings zeigte sich, dass Muskelabschnitte mit > 2,5 % IMF eine signifikant größere Faseranzahl je Flächeneinheit und kleinere Faserdurchmesser aufwiesen. Auch KARLSSON et al. (1999) zufolge ist der IMF-Gehalt negativ mit dem Faserdurchmesser korreliert. Anhand der funktionellen Eigenschaften der Muskelfasern konnten LARZUL et al. (1997) und EGGERT et al. (2002) keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den Fasertypenanteilen und dem intramuskulären Fettgehalt finden, aber einen tendenziell höheren IMF-Gehalt bei einem größeren Anteil roter, d.h. langsam kontrahierender oxidativer (STO-)Fasern feststellen. Die Untersuchung von HEYLEN (1999) an verschiedenen Genotypen zeigte jedoch, dass Tiere mit einem höherem IMF-Gehalt signifikant weniger STO-Fasern und stattdessen mehr, aber kleinere, schnell kontrahierende glykolytische (FTG-) Fasern aufweisen. In stärker oxidativen Muskeln wie *M. trizeps brachii* oder *M. biceps femoris* ist der IMF-Gehalte höher als im *M. longissimus*, was auf die Funktion des intramuskulären Fettgehaltes als Energiedepot für die stärker ausgeprägte Bewegungstätigkeit dieser Muskeln hindeutet (ZGUR, 1991).

## 2.3 Verfahren zur Bestimmung des IMF bzw. zur Ermittlung des Fettgehaltes im Schlachtkörper bzw. in Teilstücken

### 2.3.1 Referenzverfahren

Die Vergleichbarkeit von Untersuchungen zu IMF-Gehaltswerten bzw. zum Zusammenhang zwischen IMF-Gehalt und Verzehrqualität ist oftmals aufgrund der Anwendung jeweils verschiedener Analyseverfahren nicht gegeben. Es wurden in den vergangenen Jahren verschiedene chemische und physikalische Verfahren praktiziert und diskutiert. Verbreitet sind die Extraktion nach Soxhlet mit organischen Lösungsmitteln (z.B. n-Hexan, Methanol/Chloroform und Petrolether) und die Schnellbestimmung durch Nah-Infrarot-Transmissions- (NIT) bzw. Reflexions-Spektroskopie (NIR). Dabei kommt den nasschemischen Verfahren die Rolle der Referenzanalytik zur Kalibrierung der indirekten Bestimmungsverfahren zu. Aus diesem Grund ist der Präzision des Refe-

renzverfahrens große Aufmerksamkeit zu widmen. Die Polarität des Lösungsmittels und ein eventuell vorangehendes Aufschlussverfahren sind entscheidend für die Höhe des extrahierten Fettgehaltes, dessen Zusammensetzung einschließlich des Auftretens von Fremdbestandteilen im Extraktionsrückstand. REICHARDT et al. (1996) schlagen als Referenzmethode für die Bestimmung des IMF-Gehaltes die Extraktion mit Chloroform/Methanol (3:1 v/v) mit einmaliger Nachbehandlung der organischen Phase mit 0,4 M Natriumsulfatlösung vor, um sowohl Neutral- als auch Phospholipide möglichst vollständig zu erfassen und den Anteil stickstoff- und phosphorhaltiger Fremdbestandteile zu minimieren. Die Petroletherextraktion mit vorherigem Säureaufschluss analog §35 Lebensmittel- und Bedarfsgegenständegesetz LMBG (AMTLICHE SAMMLUNG) erfasst im Wesentlichen Neutral- und Depotfette, während die Phospholipide durch den Säureaufschluss weitgehend zerstört werden. Dieses Verfahren gibt also am ehesten Hinweis auf das intramuskuläre Depotfett; von den hydrolysierten Phospholipiden werden jedoch einige freie Fettsäuren mit erfasst. Die Petroletherextraktion ohne Säureaufschluss dagegen unterschätzt den IMF-Gehalt je nach Bezugsbasis um 0,3-0,6 Prozentpunkte (REICHARDT et al., 1998; FREUDENREICH, 1997). Allerdings ist auch dem Arbeitsschutz Rechnung zu tragen, was die Wahl der Lösungsmittel und deren Toxizität betrifft. ARNETH (1997) schlug eine standardisierte Soxhlet-Extraktion mittels n-Hexan vor, die hauptsächlich die Triglyceride erfasst. Dennoch konnte sich angesichts dieser Zusammenhänge in Deutschland bislang keine einheitliche Methode durchsetzen.

### 2.3.2 Nahinfrarot-Schnellbestimmung des IMF

Die indirekte Bestimmung des IMF-Gehaltes durch die spektrometrische Messung des Lichts im Nahinfrarotbereich - entweder in Transmissions- (NIT) oder Reflexionsmessung (NIR) - ist mittlerweile ein etabliertes Verfahren und wird z.B. in der Schweiz in der Leistungsprüfung praktiziert (SCHWÖRER, 2003). Die NIT- bzw. NIR-basierte Analyse homogenisierter Proben liefert eine gute bis sehr gute Übereinstimmung mit der nasschemischen Analyse; die Korrelationsmaße betragen mehrheitlich zwischen  $r = 0,90$  und  $0,99$  (CLARK et al., 1994; FREUDENREICH, 1997; SCHUSTER et al., 1998; ALOMAR et al., 2003; SCHWÖRER, 2003). Dabei vollzieht die NIT-Analytik insbesondere die Methode nach §35 LMBG mit vorheriger Hydrolyse mit hoher Genauigkeit nach (FREUDENREICH, 1997). Stärker davon abweichend erzielten BROENDUM et al. (2000) Korrelationen zum IMF am Schwein von  $r = 0,70$  bei einem Standardfehler von 1,32 %. KÖHLER et al. (1997) machen im Zusammenhang mit der Probenaufarbeitung auf eine zunehmende Absorptionshöhe bei größer werdendem Zerkleinerungsgrad und auf Aus-

wirkungen der Proben­temperatur auf­merksam. ROBBOTTEN et al. (2000) und FREUDENREICH (1997) zeigten, dass es mittels Mehrfachmessung möglich ist, auch an nativen Fleischproben (Rind) den IMF mit recht hoher Genauigkeit zu schätzen. TOGERSEN et al. (2003) berichten über eine erfolgreiche *online*-Bestimmung des Fett­gehaltes von gefrorenen Fleisch­chargen während des Wolfens mit einem geringen Vorher­­sagefehler zwischen 0,48 - 0,95 %. Fortschritte in der NIR-Technik ermöglichen inzwi­­schen auch die Spektroskopie gekoppelt mit berührungsloser IR-Temperaturerfassung, so dass die bekannte Temperaturabhängigkeit kompensiert werden kann. Die zerstö­­rungsfreie Bestimmung am Schlachtkörper oder eine *in vivo* Erfassung des IMF ist mittels der gegenwärtigen NIT- bzw. NIR-Technik jedoch nicht zu realisieren.

### 2.3.3 Alternative Verfahren

CT (Röntgen-Computer-Tomographie) beruht auf der unterschiedlich starken Dämpfung von Röntgenstrahlen durch verschiedene Gewebe. Bei der MRT (Magnet-Resonanz-Tomographie) bzw. MRI (engl.: *magnetic resonance imaging*) wird die Entspannung der Atome des Körpers in ihre Ausgangslage nach der gleichmäßigen Ausrichtung in einem starken Magnetfeld und Ablenkung durch einen Radiowellenpuls erfasst. Mittels CT sind bislang überwiegend grobgewebliche Fettanteile im Schlachtkörper bzw. am lebenden Tier mit Bestimmtheitsmaßen um  $R^2 = 0,90$  geschätzt worden (SZABO et al., 1999). KOLSTAD (2001) ermittelten mit diesem Verfahren auch inter-/intramuskuläre Fettanteile am Schlachtkörper; die Autoren nehmen aus vorangegangenen Arbeiten  $R^2$  zwischen 0,85 und 0,95 für die Vorhersage von Gewebeanteilen an. CT und MRI bzw. MRT können die Ganzkörperzerlegung zur Bestimmung der grobgeweblichen Zusammensetzung ersetzen, wobei die MRT teilweise eine noch höhere Genauigkeit als die CT ermöglicht. SORLAND et al. (2004) berichteten über eine hohe Übereinstimmung von MRT-basierter Fettgehaltsbestimmung mit der Referenzanalytik ( $r = 0,975$ ). Bislang sind diese Techniken aber teuer und nur stationär zu betreiben, so dass sie wohl vorläufig ausschließlich zu Forschungszwecken eingesetzt werden können (SZABO et al., 1999; DOBROWOLSKI et al., 2003). Nachteilig ist zudem der Zeitaufwand für die CT-Untersuchung und die jeweils notwendige Narkotisierung der Tiere bei Lebendmessungen. In Verbindung mit preiswerteren MRT-Geräten ist auch eine praktische Anwendung in der Fleischindustrie denkbar, z.B. erlaubte die Anwendung von aufwendigeren Bildanalysetechniken die korrekte Klassifikation von Schinken anhand ihres IMF-Gehaltes (ANTEQUERA et al., 2003). Ein wesentlicher Vorzug von CT bzw. MRT gegenüber NIR/NIT ist deren Bezug zum Volumen des Untersuchungsgegenstan-

des, was sich z.T. in exakteren Vorhersagewerten für Inhaltsstoffe widerspiegelt (BROENDUM et al., 2000).

Eine weitere Möglichkeit, den Fettgehalt indirekt zu bestimmen, ist die Analyse digitalisierter Bilder von Muskelanschnitten (BASSET et al., 2000). Die Bestimmtheitsmaße sind jedoch gering ( $R^2 = 0,30$ ), Messungen am lebenden Tier nicht möglich bzw. am Schlachtkörper mit einer Wertminderung durch den Anschnitt verbunden.

Die Bestimmung des Fettgehaltes mittels DEXA/DXA (*dual-energy-x-ray*) basiert auf der unterschiedlichen Absorption der Röntgenstrahlen durch Fett bzw. Muskelgewebe (d.h. Wasser und Protein) bei 2 verschiedenen Energieniveaus. Diese werden entweder mittels zwei verschiedenen Röntgenstrahlenquellen mit großer Energiedifferenz oder häufiger mittels nur einer Quelle und einem Filter zur Einstellung eines zweiten Energieniveaus realisiert, wobei die Genauigkeit des ersteren Verfahrens größer ist (HANSEN et al., 2003). DEXA erscheint insbesondere geeignet, den Gesamtfettgehalt im intakten Schlachtkörper bzw. *in vivo* zu bestimmen und somit aufwendige Feinzerlegungen zur Ermittlung der grobgeweblichen Zusammensetzung zu ersetzen (MITCHELL et al., 1998; MARCOUX et al., 2003; SUSTER et al., 2003). Messungen am lebenden Tier erfordern ähnlich wie bei CT oder MRT jedoch eine Narkotisierung. SUSTER et al. (2003) weisen zudem auf die Notwendigkeit hin, gleiche Untersuchungsbedingungen (z.B. Nüchternungszeit bei *in vivo* Messungen) zu schaffen, um konsistente Ergebnisse zwischen verschiedenen Experimenten zu erzielen. Obwohl durch den technischen Fortschritt die zur Untersuchung erforderliche Zeit bereits stark verringert werden konnte ( $\sim 3$  min), ist die Technik zu langsam, um zur *online*-Klassifizierung im Schlachtprozess eingesetzt zu werden. Die Ergebnisse von HANSEN et al. (2003) machen aber deutlich, dass im Rahmen der Fleischverarbeitung eine *online* Fettbestimmung in großen inhomogenen Fleischchargen (10 t/h) am Band mit einer sehr hohen Genauigkeit möglich ist.

TOBEC (*total body electrical conductivity*) ist ähnlich wie DEXA relativ gut zur Vorhersage der Schlachtkörperzusammensetzung geeignet. Bei Messungen an warmen bzw. gekühlten Schlachtkörperhälften werden sehr hohe Bestimmtheitsmaße ( $R^2$  bis 0,96) für die anteilmäßige Schätzung von Fett bzw. fettfreiem Fleisch erreicht (FORTUN-LAMOTHE et al., 2002; HIGBIE et al., 2002). SWAN et al. (2001) dagegen schätzten mit diesem Verfahren den Fettanteil von Schinken ( $R^2 = 0,26$ ) bzw. Kotelettstrang ( $R^2 = 0,66$ ) weniger genau.

Bioelektrische Impedanzmessungen zur Bestimmung des IMF wurden an Rind und Schwein realisiert, sind aber weder nicht-invasiv noch ausreichend genau (MADSEN et al., 1999; ALTMANN et al., 2003).

## 2.4 Ultraschall

Bereits seit den 50er Jahren gelangt Ultraschall in der Tierzucht zur Anwendung (MÜLLER-HAYE, 1965; PFEIFFER et al., 1991). Ziel war und ist insbesondere die schnelle, zerstörungsfreie Bestimmung von zuchtrelevanten Linear- und Flächenmaßen am lebenden Tier oder am Schlachtkörper, z.B. der Rückenspeckdicke oder der Rückenmuskelfläche. Inzwischen wird Ultraschall in Form des Auto-FOM kommerziell zur vollautomatischen *online*-Schätzung des Fleischanteils bzw. von Teilstückgewichten (BROENDUM et al., 1998) von Schlachtschweinen eingesetzt und verdrängt zunehmend die manuelle Klassifizierung (ZMP, 2004). Anhand der Analyse von Grauwertbildern oder der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen wurden auch bereits Untersuchungen zur Schätzung des intramuskulären Fettgehaltes angestellt.

Zunehmend wird verstärkt zu diagnostischen Zwecken in der Medizin, aber auch zur Analyse der Schlachtkörperzusammensetzung, die Anwendung von Ultraschall zur Gewebecharakterisierung untersucht. In den folgenden Abschnitten sollen die Grundlagen der Ultraschallanwendung zusammengefasst sowie die verschiedenen Möglichkeiten der Ultraschall-Gewebecharakterisierung und Wechselwirkungen zwischen Ultraschall und (Muskel-)Gewebe detailliert betrachtet werden.

### 2.4.1 Grundlagen und Messprinzipien

Schallwellen oberhalb des Hörbereiches (20 kHz) bezeichnet man als Ultraschall. Anwendung in der Diagnostik finden Schallwellen im Bereich von 2 MHz bis ca. 100 MHz. Die Schallwellen werden durch den umgekehrten piezoelektrischen Effekt erzeugt. Das Anlegen einer Wechselspannung an ein geeignetes Material (Quarzkristall, Piezo-Keramiken, Piezo-Kunststoffe) bewirkt in diesem eine Dickenschwingung, die sich auf das angrenzende Medium überträgt. Grundlage für die bildgebenden Verfahren ist die Rückstreuung des Ultraschalls an Grenzflächen und Strukturen mit verschiedenen akustischen Eigenschaften. Ein Teil der Wellen wird zum Wandler reflektiert oder zurückgestreut, wo dieser Anteil wiederum durch den piezoelektrischen Effekt in ein elektrisches Signal umgewandelt und zur bildlichen Darstellung verwendet wird.

Im so genannten A-Modus oder A-Bild (engl.: *amplitude*) wird das Signal eindimensional abgebildet, wobei die X-Achse die zeitliche bzw. räumliche Entfernung darstellt und

sich die Auslenkung auf der Y-Achse durch die Amplitude des Echos ergibt. Im B-Mode (engl.: *brightness* = Helligkeit) wird die Amplitudenhöhe in Grauwerte übersetzt. Durch Laufzeit und Wandlerposition sind die Koordinaten des entstehenden zweidimensionalen Schnittbildes gegeben. Die axiale (in Ausbreitungsrichtung) und laterale (quer zur Ausbreitungsrichtung) Auflösung werden durch die Wellenlänge des Sendeschalls sowie Form und Anregung des Schallwandlers (z.B. Pulslänge, Fokussierung, Frequenz) bestimmt.

Das Senden und Empfangen von Ultraschall kann auf verschiedene Weise geschehen. Im Puls-Echo-Betrieb erfolgt sowohl Senden als auch Empfangen der Ultraschallwellen mit einem einzigen Schallkopf. Alternativ können zwei separate Schallwandler an den gegenüberliegenden Seiten des zu durchschallenden Mediums jeweils als Sender bzw. als Empfänger positioniert werden (Puls-Transmissions-Betrieb).

#### **2.4.2 Anwendung von Ultraschall zur Bestimmung des IMF**

Bereits seit einiger Zeit wird - mehrheitlich am Rind - die Tauglichkeit von Ultraschall zur Schätzung des IMF bzw. des Marmorierungsgrades (engl. *marbling score*) als indirekter Indikator für den intramuskulären Fettgehalt untersucht. Dabei werden im Wesentlichen folgende Auswertungsansätze verfolgt:

- die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im A-Mode (WHITTAKER et al., 1992; IZQUIERDO et al., 1996; GHAEDIAN et al., 1998; SUVANICH et al., 1998; CHANAMAI et al., 1999; PEREIRA et al., 2000; BENEDITO et al., 2001),
- die Analyse digitalisierter B-Bilder (BRETHOUR, 1994; HERRING et al., 1998; KIM et al., 1998; HASSEN et al., 1999; HASSEN et al., 2001) und
- die Spektralanalyse von rückgestreuten Ultraschallsignalen zur quantitativen Bestimmung akustischer Parameter, z.B. Dämpfung und Rückstreuung (PARK et al., 1994; ABOU EL KARAM et al., 1997).

##### *2.4.2.1 Möglichkeiten und Grenzen der Bild- bzw. Texturanalyse*

Aufgrund des Klassifizierungsschemas und der Wertschätzung der Marmorierung von Rindfleisch sind insbesondere in den USA zahlreiche Untersuchungen zur indirekten Bestimmung des IMF über den Marmorierungsgrad anhand digitalisierter B-Bilder durchgeführt worden. Mittels der Bildanalyseverfahren wird die charakteristische Grauwertverteilung im B-Bild (engl. *speckle*), hervorgerufen durch die Wechselwirkung von Ultraschallwellen und Gewebe, anhand statistischer Parameter erster und zweiter

Ordnung quantifiziert (IZQUIERDO et al., 1996; KIM et al., 1998; BLECK et al., 2000; HASSEN et al., 2001). Diese so genannte Texturanalyse von B-Bildern des *M. Longissimus* ermöglicht am lebenden Rind mittlere bis hohe multiple Bestimmtheitsmaße für den IMF ( $R^2$  bis 0,75) bei einem durchschnittlichen Restfehler (RMSE) zwischen 0,87 und 1,44 % (KIM et al., 1998; HASSEN et al., 2001). Die Korrelationen einzelner Parameter der Bildanalyse zum Marmorierungsgrad sind von eher niedriger bis mittelstarker Ausprägung ( $r = 0,03 \dots 0,45$ ) und enger bei Bildern von lebenden Tieren als von Messungen an den warmen Schlachtkörpern (WHITTAKER et al., 1992). Diesbezüglich wird diskutiert, dass die p.m. fehlende Blutzirkulation eine reduzierte Rückstreuung bedingt. Da das intramuskuläre Fett im bovinen *M. longissimus* baumartig entlang der Blutgefäße verteilt ist, ließen sich damit die geringeren Zusammenhänge zwischen den Bildparametern und dem IMF erklären.

Die wenigen vorliegenden Untersuchungen am Schwein waren nicht vergleichbar erfolgreich. Bestimmtheitsmaße für die IMF-Schätzung reichten nicht über  $R^2 = 0,4$  (RAGLAND et al., ; VILLE et al., 1997; NEWCOM et al., 2002; YOUSAO et al., 2002). Dabei wurden allerdings teilweise nur Grauwertstatistiken erster Ordnung berechnet. NEWCOM et al. (2002) beobachteten dabei Herkunftseinflüsse auf die Zusammenhänge. Häufig sind auch weitere Parameter wie Speckdicke oder Geschlecht in die Regressionsgleichungen einbezogen worden, was die Vorhersagetauglichkeit der Bildparameter allein weiter schmälert. Dass sowohl die absolute Höhe als auch die Spannweite der Merkmalsausprägung des IMF beim Rind deutlich größer als beim Schwein ist, erklärt die besseren Schätzgenauigkeiten für den IMF beim Rind mittels B-Bild-Analyse am wahrscheinlichsten. Festzuhalten bleibt für die Bewertung der Ergebnisse, dass der Marmorierungsgrad subjektiv festgestellt wird, der chemisch extrahierte IMF-Gehalt also ein deutlich objektiveres Merkmal zur „Kalibrierung“ der Ultraschallverfahren ist.

Ein Spezialfall der Bildanalyse stellt die Elastografie dar. Bei diesem Verfahren werden B-Bilder von einem Gegenstand in verschiedenen Kompressionszuständen aufgenommen und gemeinsam verarbeitet. Im resultierenden Elastogramm entsprechen hellere Pixel schließlich weicheren, elastischeren Strukturen. BERG et al. (1999) versuchten, mit elastografischen Verfahren Aussagen über die Qualität von Schweinefleisch zu erhalten und konnten mittels der Bildparameter den IMF mit einem Restfehler von 1,53 % schätzen (multiples  $R^2 = 0,47$ ). Einzelne Bildparameter korrelierten zu IMF, Scherkraft oder Dripverlust in der Größenordnung  $r \sim 0,3$ .

Die starke Verbreitung der Texturanalyse ist vor allem auf die einfache Verfügbarkeit des Videosignals an B-Bild-Systemen und das breite Angebot an Auswertungsprogrammen zurückzuführen (GÄRTNER, 2001). Die B-Bild-Struktur, d.h. die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte und deren räumliche Anordnung, spiegelt neben den Eigenschaften des Untersuchungsobjektes auch die Abbildungseigenschaften des B-Bild-Gerätes, einschließlich der Algorithmen zur Bilderstellung, wider. Dieser Umstand macht Vergleiche von quantitativen Bildparametern zwischen verschiedenen B-Bild-Geräten nur eingeschränkt möglich. ARNOLD et al. (2001) weist dabei auf die systematische Grauwertschwächung durch die tiefenabhängige Dämpfung und die Signalschwächung bei *in vivo* Messungen durch vorgelagerte Schichten hin.

Geräteinflüsse lassen sich nur minimieren, indem die Einstellungen, z.B. für die laufzeitabhängige Verstärkung, konstant gehalten werden, was eine Einschränkung der Nutzung bedeutet (GÄRTNER, 2001). Den Aussagen von HERRING et al. (1998) zufolge sind jedoch auch Bildanalysen verschiedener Gerätesysteme durch Korrektur des systembedingten *Bias* hinsichtlich ihrer Vorhersagegenauigkeit untereinander vergleichbar. HASSEN et al. (2001) und AMIN et al. (1997) betonen, dass weniger das Ultraschallgerätesystem, als vielmehr die korrekte Erfassung der Bilder und die Analysealgorithmen für die Genauigkeit der Schätzung verantwortlich sind. Die entscheidendere Einschränkung der Bildanalyseverfahren ist jedoch, dass lediglich die Amplitudeninformation der Signale genutzt wird, so dass mit dem Frequenzinhalt der rückgestreuten Ultraschallwellen ein Großteil der möglichen Informationen zur Gewebecharakterisierung und IMF-Schätzung unberücksichtigt bleibt.

#### 2.4.2.2 *Ausbreitungsgeschwindigkeit als Prädiktor der Gewebezusammensetzung*

Voraussetzung für die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Kenntnis der Laufzeit des Ultraschalls und dessen zurückgelegte Strecke. Grundsätzlich sind Longitudinal- und vertikale bzw. horizontale (Scher-)Wellen zu unterscheiden WHITTAKER et al. (1992). Meist wird jedoch nur die longitudinale Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt. Die Temperaturabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit (siehe Kapitel 2.4.4.4) ermöglicht durch Messungen bei zwei verschiedenen Temperaturen, die Zusammensetzung (Fett-, Wasser- bzw. Protein- und Aschegehalt) von hackfleischähnlichen Mischungen aus magerem Fleisch und Fettgewebe mit sehr hoher Genauigkeit zu bestimmen (BENEDITO et al., 2001). Allerdings wiesen die Chargen eine große Spannweite des Fettgehaltes von 3-90 % auf. Ähnliche Ansätze verfolgten u.a. PARK et al. (1990), GHAEDIAN et al. (1998), CHANAMAI et al. (1999) und WHITTAKER et al. (1992).

Bei niedrigen Temperaturen (4 °C) steigt die Schallgeschwindigkeit proportional mit dem Fettgehalt; bei hohen Temperaturen (z.B. 37 °C) sind die Zusammenhänge umgekehrt. Im stark strukturierten Muskelgewebe ist neben den o.g. Aspekten die Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwellen bezogen auf die Muskelfaserrichtung zu berücksichtigen (siehe Kapitel 2.4.4.1). SMITH (1996) fand tendenziell höhere Schallgeschwindigkeiten bei paralleler Ausbreitung.

Die Genauigkeit der Vorhersage der chemischen Zusammensetzung wird bei diesen Verfahren maßgeblich durch die Auflösung des Ultraschallsystems bestimmt, d.h. mit welcher Feinheit die Geschwindigkeit gemessen werden kann. Derartige Messungen erfordern die Temperierung des Messaufbaus und des zu untersuchenden Gewebes. Problematisch ist, dass bei der so genannten kritischen Temperatur die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Fett und Muskel gleich sind (GHAEDIAN et al., 1998; BENEDITO et al., 2001), so dass keine Differenzierung möglich ist. WHITTAKER et al. (1992) konstatieren, dass die Auflösung ihres Ultraschallmessplatzes nicht hoch genug war, um den IMF-Gehalt in bovinen Muskeln zu bestimmen. Über die erforderliche, schwer zu realisierende Auflösung hinaus, ist die Erfassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei Ultraschallmessungen ohne Reflektor, d.h. bei unbekannter Ausbreitungsstrecke, sehr aufwändig (ANDERSON et al., 1998; PEREIRA et al., 2000) und lässt dieses Verfahren als kaum praktikabel zur Bestimmung des relativ niedrigen IMF in Schwein erscheinen, sondern eher als Laborverfahren zu Forschungszwecken. SMITH (1996) verweist zudem darauf, dass in praxisnahen Temperaturbereichen (z.B. bei 37 °C bzw. 4 °C) die Korrelationen der Ausbreitungsgeschwindigkeit zum Fettgehalt schwächer ausgeprägt sind als im Bereich um 20 °C.

### **2.4.3 Gewebecharakterisierung mittels Ultraschall-Spektralanalyse**

Die unterhalb bestimmter Leistungsgrenzen beliebig oft wiederholbare, schadlose Anwendung von Ultraschalluntersuchungen hat die B-Bild-Technik in der klinischen Diagnostik von krankhaften Gewebeveränderungen als unterstützendes, nicht invasives Schnittbildverfahren weit verbreitet. Zusätzlich zur Bildinformation bietet die Frequenzanalyse der Ultraschall-Rückstreusignale erweiterte Möglichkeiten der Gewebecharakterisierung. Unter der Voraussetzung, dass die Signalübertragungseigenschaften des Messsystems bekannt sind und korrigiert werden können, erlaubt die Berechnung physikalischer Parameter die Quantifizierung von Gewebeeigenschaften einschließlich der Möglichkeit, Zustandsveränderungen des Gewebes mit diesen Parametern zu korrelieren (GÄRTNER, 2001). Seit den 70er Jahren werden Ultraschallparameter zur Gewe-

becharakterisierung untersucht. Dabei können im Puls-Echo-Betrieb grundsätzlich die Dämpfung, die Rückstreuamplitude und verschiedene Texturparameter mit Aussagen über die räumliche Verteilung der Signalamplituden bestimmt werden. Die Dämpfung beschreibt die Schwächung der Schallwellen durch einen Übergang der Schallenergie in andere Energieformen, zumeist in Wärme. Streuung umfasst eine Richtungs-, Amplituden-, Phasen- und Geschwindigkeitsänderung des Ultraschalls an Strukturen, die im Vergleich zur Wellenlänge des Ultraschalls klein sind. Werden Schallwellen um  $180^\circ$  abgelenkt, spricht man für diesen Anteil der Gesamtstreuung von Rückstreuung. Die Berechnung der Rückstreuung in makroskopisch homogenem Gewebe beruht auf der Annahme, dass die Echos vorwiegend durch Rückstreuung an kleinen Partikeln entstehen, anstatt durch Reflexion an Grenzflächen der akustischen Impedanz. Kurtosis und Schiefte (engl.: *skewness*) dienen der Beschreibung der Form bzw. der Symmetrie der Signalspitzen (PARK et al., 1994; AMIN et al., 1995). Dabei gibt die Kurtosis Aufschluss über die Form der Signalspitzen (*peaks*) in Abhängigkeit von der Eindringtiefe, und wird daher auch als *peakedness* bezeichnet. Weitere bislang beschriebene Parameter zur Beschreibung des Spektrums sind oberer und unterer Halbennergiepunkt ( $f_{hi}$ ,  $f_{lo}$ ) oder die Zentralfrequenz (siehe auch PARK et al., 1994).

Im Bereich der klinischen Anwendung erweist sich die Gewebecharakterisierung mittels Spektralanalyse zunehmend Erfolg versprechend. Das belegen Untersuchungen u.a. zur Klassifikation von atherosklerotischer Plaque (WATSON et al., 2000; NAIR et al., 2001) und zur Krebsdiagnostik (SCHMITZ, 1995; FELEPPA et al., 2001; GÄRTNER, 2001; TOPP et al., 2001; SCHEIPERS et al., 2003).

Zur Gewebecharakterisierung an Schlachttieren liegen bisher nur wenige Untersuchungen mittels Ultraschallspektralanalyse vor; die Mehrheit der Arbeiten wurde an Rindfleisch durchgeführt. AMIN et al. (1995) berechneten aus A-Mode-Signalen Kurtosis-, Frequenz- und Dämpfungsparameter und konnten damit den IMF im *bovinen M. longissimus* unmittelbar nach der Schlachtung für 75 % der Proben mit einem durchschnittlichen Fehler  $< 1,5$  % IMF vorhersagen ( $R^2 = 0,33$ ). Die Haut wurde dabei vor den Messungen entfernt und die Ultraschallmessungen nach einem Schnitt durch das Fettgewebe direkt am Muskel im Bereich der 11. bis 13. Rippe senkrecht zur Faserrichtung durchgeführt. Die Kurtosis-Parameter wiesen von allen untersuchten Merkmalen die höchsten Korrelationen zum IMF auf. ABOU EL KARAM et al. (2000) beschrieben Einflüsse von Zusammensetzung (Fett-, Wasser-, Bindegewebe) und Textur auf akustische Parameter an Rindfleischproben - unter Laborbedingungen

im temperierten Wasserbad (30 °C) im Puls-Transmissions-Verfahren. Sowohl Dämpfung als auch Rückstreuung zeigten positive Beziehungen zum Fettgehalt ( $r = 0,60$  bzw.  $r = 0,71$ ), wobei die Höhe der Korrelationen möglicherweise durch die geringe Probenzahl ( $n = 5$ ) mit hoher Variabilität bedingt ist. WHITTAKER et al. (1992) und PARK et al. (1994) berechneten bei der Frequenzanalyse (A-Mode; Transmissionsmessung) u.a. die Schiefe und die Anzahl lokaler Maxima als Maß für Diskontinuitäten des Foursierspektrums. Letztere erwies sich als der am höchsten mit dem IMF korrelierende Parameter und widerspiegelt nach Ansicht der Autoren die Inhomogenität des Gewebes. Das beste multiple lineare Regressionsmodell unter Einbeziehung weiterer Parameter konnte die Variation des IMF zu 82 % erklären. Dagegen war die Dämpfung nicht als nützlicher Parameter zur Vorhersage des IMF in Rindfleischscheiben (Messung im A-Mode) geeignet (PARK et al., 1990). In der einzigen vorliegenden Untersuchung zur Spektralanalyse von rückgestreutem Ultraschall an Schweinen konnten VILLE et al. (1997) keine Korrelationen zwischen den aufgezeichneten „rohen“ Spektraldaten eines im A-Mode operierenden PIGLOG 105-Gerätes und den IMF-Gehalten der Biopate aus dem *M. longissimus* feststellen, was die Autoren damit begründen, dass das Gerät mit anderen als den untersuchten Rassen geeicht wurde. Wahrscheinlich ist aber auch eine hohe Fehlerquote bei der Probennahme mittels Biopsie aufgrund von Lokalisationsvariationen des intramuskulären Fettes (HEYLEN, 1999) und der aus der Biopsie resultierenden sehr geringen Einwaage (1 g) zur chemischen Referenzbestimmung des IMF (Anforderungen siehe z.B. ISO 1444:1996). Untersuchungen zur Eignung der Ultraschall-Spektralanalyse am lebenden Tier oder an intakten Schlachtkörpern liegen nicht vor.

#### **2.4.4 Wechselwirkung von Ultraschall mit biologischem Gewebe – Einflussfaktoren auf akustische Parameter**

Im folgenden Abschnitt werden bislang untersuchte Einflussfaktoren auf akustische Parameter dargestellt.

##### *2.4.4.1 Ausbreitungsrichtung (Anisotropie von US-Parametern)*

Als akustische Anisotropie bezeichnet man die Veränderung der akustischen Eigenschaften mit sich verändernder Richtung der Schallausbreitung bezogen auf das untersuchte Medium. Allgemein bedeutet Anisotropie eines Materials, dass der Wert einer bestimmten Materialeigenschaft davon abhängt, in welcher Orientierung sich die Materialprobe zu einem äußeren Bezugssystem befindet (TOPP et al., 2000). Obwohl die wenigen vorliegenden Arbeiten, mangels detaillierter Beschreibung oder abweichender

Methodik (siehe auch Abschnitt 5.8), nur bedingt vergleichbar sind, wird deutlich, dass auch bei der Gewebecharakterisierung von Skelettmuskulatur die Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung Berücksichtigung finden muss. SMITH (1996) wies an bovinem *M. semitendinosus in vitro* detailliert nach, dass der Dämpfungskoeffizient [dB/cm] parallel zur Faserrichtung deutlich am größten ist und mit größer werdendem Einfallswinkel abnimmt ( $0^\circ > 45^\circ > 90^\circ$ ). Ähnliche Ergebnisse publizierten ROBERJOT et al. (1994) und TOPP et al. (2000). Die Ergebnisse von ABOU EL KARAM et al. (1997) können derartige Zusammenhänge nicht eindeutig stützen. Anisotropie der Dämpfung zeigten auch SOSNOVIK et al. (2001) am Beispiel der Herzmuskulatur beim Schaf, obschon hier der abweichende Muskelaufbau beachtet werden muss. Im Gegensatz zur Dämpfung ist der Rückstreukoeffizient senkrecht zur Muskelfaserrichtung am größten (ROBERJOT et al., 1994; ABOU EL KARAM et al., 1997; TOPP et al., 2000). Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit wurden ähnliche richtungsbezogene Zusammenhänge festgestellt.

Obwohl TOPP et al. (2000) zumindest annähernd *in vivo* Bedingungen schufen, indem durch Verwendung einer speziellen Nährlösung der Eintritt des *rigor mortis* verzögert wurde, liegen echte Untersuchungen zur Anisotropie *in vivo* oder an intakten Schlachtkörpern bislang nicht vor, so dass auch hier Untersuchungsbedarf deutlich wird.

#### 2.4.4.2 Muskelstruktur

Entgegen anders lautender Annahmen (siehe BENEDITO et al., 2001) ist der Einfluss der Muskelstruktur auf Ultraschallparameter offensichtlich zu berücksichtigen. SMITH (1996) stellte neben den oben beschriebenen Einflüssen der Ausbreitungsrichtung signifikante Einflüsse des Gewebezustandes dar. Sowohl Dämpfung als auch Ausbreitungsgeschwindigkeit waren größer bei intaktem Gewebe im Vergleich zu homogenisiertem Muskel.

In der Ultraschalltheorie geht man davon aus, dass die Größe der Streuer, d.h. Strukturen in der Größenordnung der Wellenlänge oder darunter, einen Einfluss auf Dämpfung bzw. Streuung ausübt. Bei der Untersuchung von Muskelgewebe sollten daher Sarkomerlänge bzw. Muskelfaserdurchmesser Beachtung finden. TOPP et al. (2000) vermuten anhand der rechnerisch ermittelten Streuergröße, dass die Muskelfasern, eher als die kleineren Myofibrillen oder die größeren Primärbündel, die Streuung in Muskelgewebe verursachen. ROBERJOT et al. (1994) berechneten aus der Rückstreuung die mittlere Streuergröße und deuten die Ergebnisse dahingehend, dass bei senk-

rechter Ausbreitung des Ultraschalls im Vergleich zur parallelen Ausrichtung der Schallwellen bezogen auf die Muskelfaserrichtung größere Streuer wirksam werden. SMITH (1996) wies mittels akustischer Mikroskopie (SLAM, *scanning laser acoustic microscope*) auf deutliche, negative Korrelationen zwischen der Sarkomerlänge boviner Muskeln und der Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. Dämpfung *in vitro* hin. Diese Beobachtungen waren jedoch nicht durch die Ausbreitungsrichtung beeinflusst. Vermutlich sind derartige Zusammenhänge, die bei sehr großen Frequenzen bis 100 MHz untersucht wurden, für die Anwendung am Schlachtkörper mit Arbeitsfrequenzen um 5 MHz und deutlich geringerer Ortsauflösung (siehe unten) nicht relevant.

#### 2.4.4.3 Frequenz

Die Frequenz und die Intensität des eingestrahnten Ultraschalls determinieren dessen Eindringtiefe in Gewebe. Um schädigende Effekte im Gewebe, z.B. durch Erwärmung, zu vermeiden, sollte laut Empfehlung des American Institute of Ultrasound in Medicine die das Gewebe durchdringende Intensität/Energie  $100 \text{ mW/cm}^2$  nicht überschreiten (PARK et al., 1990). Um dennoch eine genügende Eindringtiefe zu realisieren, muss die Frequenz des Wandlers tief genug gewählt werden, denn mit zunehmender Frequenz sinkt die Eindringtiefe des Ultraschalls durch erhöhte Dämpfung. Neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit des beschallten Mediums bestimmt die Sendefrequenz des Wandlers außer der Eindringtiefe auch das örtliche Auflösungsvermögen.

ROBERJOT et al. (1994) fanden bei Untersuchungen zur Anisotropie von Ultraschallparametern eine lineare Frequenzabhängigkeit der Dämpfung im Bereich von 2 bis 30 MHz am Rindermuskel *in vitro*. SMITH (1996) beobachtete ebenfalls eine annähernd linear zunehmende Dämpfung mit steigender Frequenz an bovinen *M. longissimus*. BALDEWECK et al. (1995) bestätigten bei *in vitro* Messungen auch an Schweinehaut den linearen Anstieg der Dämpfung mit zunehmender Frequenz im Bereich von 5 bis ca. 20 MHz. WHITTAKER et al. (1992) stellten fest, dass zwischen der Dämpfung und dem IMF-Gehalt zwar nur geringe bis mittlere Korrelationen bestehen, die Beziehungen jedoch umso enger werden, je höher die Frequenz des verwendeten Wandlers ist. Ähnliche Ergebnisse erzielten PARK et al. (1990). OSSANT et al. (2001) weisen eine Frequenzabhängigkeit des Rückstreukoeffizienten (*backscatter coefficient*) von Lungengewebe nach, wobei dieser mit zunehmender Frequenz (3-11 MHz) größer wurde. ANDERSON et al. (2001) und TOPP et al. (2001) zeigten auch für die Rückstreuung eine Frequenzabhängigkeit, und letztere konnte anhand der unterschiedlich steilen Anstiege

über die Frequenz (*backscatter slope* [dB/MHz]) Krebs- von gesundem Gewebe unterscheiden.

Einerseits ist also bei der Einrichtung des Messsystems auf die Zusammenhänge zwischen Frequenz und Abbildungsleistung zu achten. Andererseits kann die Frequenzabhängigkeit einzelner Ultraschallparameter quantifiziert und zur Gewebecharakterisierung herangezogen werden.

#### 2.4.4.4 Temperatur

SMITH (1996) stellte fest, dass der Anstieg des Dämpfungskoeffizienten, unabhängig von der Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls, bei 4 °C deutlich größer war als bei 20 °C oder 37 °C; d.h. bei niederen Temperaturen steigt die Dämpfung mit der Frequenz stärker an als bei höheren Temperaturen. Die ermittelten Werte wiesen eine gute Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen auf. Auch die absolute Dämpfung ist bei höheren Temperaturen geringer, was die Ergebnisse von ABOU EL KARAM et al. (1997) bestätigen. In der einzigen dazu vorliegenden Quelle ist eine größer werdende Rückstreuintensität mit zunehmender Temperatur zu verzeichnen (ABOU EL KARAM et al., 1997). Die Auswirkung der Temperatur auf die Geschwindigkeit der Schallausbreitung in Gewebe ist offensichtlich von der Gewebezusammensetzung nicht zu trennen. Mit zunehmender Temperatur (4, 20, 37 °C) stieg den Beobachtungen von SMITH (1996) zufolge die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Rindfleisch annähernd linear. ABOU EL KARAM et al. (1997) berichteten ebenfalls über einen leichten Anstieg der Ausbreitungsgeschwindigkeit in bovinen Muskeln mit zunehmender Temperatur im Bereich von 5-30 °C. In Fettgewebe nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur ab – in magerem Fleisch verhält sich dies umgekehrt BENEDITO et al. (2001). Die Autoren vermuten anhand ihrer Messungen an Hackfleischmischungen mit variierenden Fettgehalten, dass in den fettarmen Mischungen eher der hohe Wassergehalt des Fleisches für die Steigerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit verantwortlich ist, denn in Wasser steigt die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur. Mit zunehmendem Fettgehalt wird die Schallgeschwindigkeit durch die Schmelzeigenschaften des Fettes bestimmt und nimmt mit der Temperatur ab. Messungen an fettreichem Cheddar-Käse zeigten ebenfalls einen Abfall der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur (MULET et al., 1999). Analoge Ergebnisse erzielten CHANAMAI et al. (1999) und GHAEDIAN et al. (1998): Die Ultraschall-Ausbreitung verlief in Öl mit zunehmender Temperatur langsamer, in Wasser dagegen schneller. MÜLLER-HAYE (1965) verweist auf Resultate, nach denen übereinstimmend mit aktuellen Ergebnissen

mit zunehmender Temperatur in Muskelgewebe, Schwarte und der 3. Speckschicht die Ausbreitungsgeschwindigkeit steigt, während sie in der 1. und 2. Speckschicht geringer wird.

Bei einer so genannten kritischen Temperatur  $T$  sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Fett- bzw. Muskelgewebe gleich. Bei einer Temperatur größer  $T$  nimmt die Geschwindigkeit mit zunehmendem Fettgehalt ab, unterhalb der kritischen Temperatur nimmt die Geschwindigkeit mit dem Fettgehalt zu. Um feine Unterschiede messbar zu machen, muss die Probestemperatur möglichst weit ober- bzw. unterhalb der kritischen Temperatur liegen, z.B. 37 °C oder 4 °C (CHANAMAI et al., 1999; ABOU EL KARAM et al., 2000). Auf die Grenzen der Fettgehaltsbestimmung anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde bereits in Abschnitt 2.4.2.2 hingewiesen.

#### 2.4.4.5 Gewebezusammensetzung

Bereits MÜLLER-HAYE (1965) verwies auf die Beziehungen zwischen Temperatur und Ausbreitungsgeschwindigkeit (siehe oben), insbesondere auch auf die unterschiedlichen Ausmaße der Veränderungen in Abhängigkeit von der Gewebezusammensetzung. So ist z.B. neben der prinzipiellen Unterscheidung von Muskel- und Fettgewebe auch die Konsistenz des Rückenfettes zu berücksichtigen. Von besonderer Bedeutung ist offensichtlich der Wassergehalt, wie dessen hohe Korrelationen zu Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. Dämpfung in den Untersuchungen von SMITH (1996) zeigen. Tendenziell bewirkte ein steigender Fettgehalt eine Zunahme des Anstiegs des Dämpfungskoeffizienten bei konstanter Temperatur. WHITTAKER et al. (1992) und PARK et al. (1990) zeigten anhand von Messungen im A-Mode an Rindfleisch bei 22-24 °C leicht abnehmende Ausbreitungsgeschwindigkeit bei zunehmendem Fettgehalt ( $r = -0,71$ ).

Bei der Untersuchung von mehrschichtigen Geweben, z.B. *M. longissimus* mit Speckauflage, ist aufgrund der abweichenden Zusammensetzung der unterschiedlichen Schichten mit jeweils verschiedenen Schallgeschwindigkeiten mit einer Veränderung des Schallfeldes durch Defokussierung und Ablenkung zu rechnen. Diese Schallfeldveränderungen sind zu korrigieren, um die akustischen Parameter im Zielgewebe möglichst exakt bestimmen zu können.

Aufgrund der in Kapitel 2.4.4 dargestellten Zusammenhänge sind Einflüsse der Gewebezusammensetzung auf die Ultraschallparameter folglich keinesfalls losgelöst von den Messbedingungen zu bewerten. Die häufig nur singuläre Berücksichtigung der be-

schriebenen Einflussgrößen verdeutlicht den Bedarf nach einer systematischen Untersuchung von Wechselbeziehungen.

#### 2.4.5 Geräte- bzw. Benutzereinflüsse und Korrekturmöglichkeiten

Geräteinflüsse stellen insbesondere

- die Art und Höhe der laufzeitabhängigen, im B-Bild tiefenabhängigen, Verstärkung TGC (engl. *time gain compensation*) des Rückstreusignals und
- die Schallfeldeigenschaften der Kombination von Schallwandler und B-Bild-System dar (GÄRTNER et al., 1998).

Nur, wenn die Geräteeinstellungen für alle Untersuchungen konstant gehalten werden, kann auf eine Korrektur der Geräteeigenschaften verzichtet werden, was allerdings einer mangelnden Ausschöpfung der Optimierung der Datenerfassung und bildlichen Darstellung gleichkommt. HASSEN et al. (2000) stellen dagegen fest, dass für die Genauigkeit der IMF-Schätzung aus B-Bildern weniger die Geräte als die Erfahrung der Untersuchungspersonen und die Güte der Vorhersagemodelle bedeutsam sind. Bestätigend finden HERRING et al. (1998) abweichende Genauigkeiten bei Verwendung desselben Systems durch verschiedene Benutzer. Zertifizierte Untersucher und das strikte Einhalten der Vorschriften zur Bildaufnahme bzw. -verarbeitung sind daher essentiell. Darüber hinaus empfehlen die Autoren, mindestens 3 oder 4 Bilder auszuwerten, um den Vorhersagefehler der IMF-Schätzung aus B-Bildern zu senken. Dies sei wirkungsvoller als die mehrfache Auswertung desselben Bildes oder mehrerer ROI in einem Bild (HASSEN et al., 1999), wobei zu überprüfen ist, ob dieses Vorgehen auch bei der Spektralanalyse von Vorteil ist. Anregungen für eine notwendige Qualitätskontrolle bei B-Bild-Geräten (z.B. Auflösung, *signal-to-noise-ratio*, Kontrastempfindlichkeit), die wegen der komplexen Wandlereigenschaften sehr zeitaufwendig und anfällig für Benutzereinflüsse ist, geben GIBSON et al. (2001) anhand eines Verfahrens zur Automatisierung solcher Prozesse.

Für die Parameterberechnung im Rahmen der Spektralanalyse sind im Sinne einer laborübergreifenden Vergleichbarkeit die Grundannahmen und Modelle zur Schallausbreitung sowie die Korrekturfunktionen der Systemeigenschaften von entscheidender Bedeutung. MADSEN et al. (1999) stellten bei einem Ringversuch mit 10 beteiligten Einrichtungen eine relativ gute Übereinstimmung der Messergebnisse von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Dämpfung an einem standardisierten Phantom fest. Die Ergebnisse der Rückstreuwerte variierten jedoch deutlich, lediglich die Ergebnisse

von 4 Instituten lagen nahe beieinander, so dass bei der Erfassung elementarer Ultraschallparameter zwischen den Laboratorien nur mangelhafte Übereinstimmung besteht. Angesichts solcher Ergebnisse bleibt es fraglich, ob trotz der modellierten Geräteunabhängigkeit die Parameter in ihrer absoluten Höhe vergleichbar sind, wenn sie mit verschiedenen Systemen erfasst werden. Bei kommerziellen Diagnostiksystemen gehört die Bereitstellung der erforderlichen Signale zur HF-Echodatenanalyse (Signal für Bild- bzw. Linienanfang; Steuersignal für TGC) noch nicht zum Standard, so dass Absprachen mit den Geräteanbietern zur Offenlegung der Gerätedokumentation oder Installation geeigneter Schnittstellen notwendig sind (JENDERKA et al., 2000). Unter dieser Voraussetzung können eventuelle systembezogene Korrekturen erstellt werden, um schliesslich Geräteunabhängigkeit, exakte Parameterschätzung und Vergleichbarkeit zu realisieren.

#### 2.4.5.1 Schallfeldkorrektur

Zusätzlich zur Dämpfung bewirkt auch das Schallfeld eine tiefenabhängige Veränderung der Rückstreuesignale, die bei der Gewebecharakterisierung mit berücksichtigt werden muss:

- a) Die Sende- und Empfangsfokussierung in klinisch genutzten B-Bild-Systemen führt zu Schallfeldern, deren Charakteristik nicht mehr einfach über die Bauart des Wandlers (wie bei Einzelelementwandlern) und die Pulsform zu beschreiben ist. Die Fokuszone ist gekennzeichnet durch maximalen Schalldruck und geringste laterale Ausdehnung des Schallstrahles.
- b) Die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums (Dämpfung, Streuung, *phase-cancellation*, nicht lineare Schallausbreitung) können die Ausbildung des Schallfeldes verändern. Eine exakte Messung des Schalldruckes in Gewebe *in vivo* ist derzeit nicht möglich.

GÄRTNER (2001) unterstreicht, dass die Genauigkeit der Schallfeldkorrektur von zentraler Bedeutung für die Gewebecharakterisierung *in vivo* ist, da andernfalls Parameteränderungen durch Fehler einer unvollständigen Korrektur überdeckt werden könnten.

#### 2.4.5.2 Laufzeitabhängige Verstärkung

Die einstellbare laufzeitabhängige Signalverstärkung TGC ermöglicht dem Anwender an modernen B-Bild-Systemen, die tiefenabhängige Dämpfung des Ultraschalls auszugleichen und ein gleichmäßig helles Bild zu sichern. In Kenntnis der Verstärkerdynamik lassen sich Korrekturfunktionen erstellen; dies ist entweder mittels der dem zeit-

lichen Verlauf der TGC analogen Steuerungsspannung oder bei digitalen B-Bild-Systemen direkt über eine Schnittstelle möglich (GÄRTNER, 2001).

#### 2.4.5.3 ROI-Größe

Wenige Informationen sind bislang verfügbar, was den Einfluss der ROI-Größe, d.h. den Umfang der Daten zur Parameterberechnung, auf die Berechnung der Ultraschallparameter betrifft. GÄRTNER (2001) wies geringer werdende Standardabweichungen der Dämpfungswerte mit zunehmender ROI-Größe nach und gibt angesichts dessen eine Mindestgröße von 1 cm in Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls an. Die ROI-Breite (d.h. die Linienanzahl) war von etwas geringerem Einfluss, obwohl ebenfalls abnehmende Standardabweichungen der akustischen Parameter mit zunehmender Breite zu beobachten waren. Auch LEBERTRE et al. (2002) zeigten, dass eine Vergrößerung der ROI mit einer Verringerung der intra-individuellen Variation der US-Parameter um den Faktor 1,2 – 2,3 einhergeht.

#### 2.4.5.4 Cepstrale Glättung

Der Begriff Cepstrum paraphrasiert das Wort Spektrum (engl. *spectrum*) und ist definiert als das inverse Spektrum des logarithmierten Leistungsspektrums. Es wird durch Fouriertransformation des natürlichen Logarithmus des Leistungsspektrums gewonnen. Anhand des Cepstrums lassen sich durch Streuer verursachte Störungen aus dem Leistungsspektrum filtern, so dass durch diese so genannte cepstrale Glättung die Standardabweichung der Dämpfungsmittelwerte deutlich gemindert wird (GÄRTNER 2001). Anwendung fand die cepstrale Glättungsmethode u.a. bei AMIN et al. (1995) vor der eigentlichen Frequenzanalyse.

### 3 Zielsetzung für die eigenen Untersuchungen

Im Hinblick auf die Zielsetzung für die eigenen Untersuchungen lässt die vorliegende Literatur zunächst folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die zahlreichen Untersuchungen zu den Beziehungen zwischen dem IMF und sensorischen Eigenschaften belegen - nicht immer eindeutig - die Bedeutung des IMF für die Verzehrqualität von Schweinefleisch.
- Die zerstörungsfreie Schätzung des intramuskulären Fettgehaltes an Zuchttieren *in vivo* bzw. an Schlachtkörpern stellt gegenwärtig ein ungelöstes Problem dar, ist jedoch im Hinblick auf eine schnelle züchterische Erhöhung des IMF-Gehaltes bzw. die Implementierung dieses Merkmals in Qualitätsfleischprogramme - zur Schlachtkörpersortierung bzw. qualitätsorientierten Erzeugerbezahlung - von großer Notwendigkeit.
- Die Ultraschalltechnik erlaubt prinzipiell die zerstörungsfreie Untersuchung von Gewebe. Die Analyse von B-Bildern ist jedoch angesichts der vorliegenden Ergebnisse zur Schätzung des IMF am Schwein nicht geeignet.
- Die Anwendung der Spektralanalyse von unverarbeiteten Ultraschall-Rückstreuensignalen zur Berechnung Gewebe charakterisierender akustischer Parameter bedeutet eine vollständigere Nutzung der verfügbaren Ultraschall-Informationen und stellt aufgrund der positiven Erfahrungen in der klinischen Diagnostik eine viel versprechende Möglichkeit dar.
- Eine Vielzahl von Einflussgrößen wirkt auf die Ausbreitungseigenschaften von Ultraschall und die resultierenden akustischen Parameter. So führt die ausgeprägte Muskelfaserstruktur im *M. longissimus* zur Anisotropie akustischer Parameter. Ferner existieren Wechselbeziehungen zwischen Temperatur, Gewebeszusammensetzung und Ultraschallparametern.
- Komplexe Untersuchungen im Puls-Echo-Betrieb zur Klärung der genannten Einflussgrößen auf die Schallausbreitung in Muskelgewebe am intakten Schlachtkörper liegen derzeit nicht vor.
- Die Berücksichtigung der vorgelagerten Speckschicht bei der Schallfeld- sowie eine Dämpfungskorrektur sind bedeutsam, um deren Einflüsse auf die Parameterberechnung für den Bereich des interessierenden Muskelgewebes zu minimieren. Dies erscheint angesichts der relativ geringen Spannweite der Merkmalsausprägung des IMF beim Schwein elementar.

Vor diesem Hintergrund lassen sich folgende Ziele für die eigenen Untersuchungen formulieren:

- Zur zerstörungsfreien Schätzung des IMF im *M. longissimus* von Schweine-schlachtkörpern ist die Tauglichkeit der Frequenzanalyse rückgestreuter Ultraschallsignale eines klinischen B-Bild-Gerätes zu überprüfen.
- Unter Berücksichtigung verschiedener Messbedingungen sind die Zusammenhänge zwischen akustischen Parametern und dem intramuskulären Fettgehalt zu beschreiben.
- Einflüsse der Messbedingungen (Temperatur, Zerlegegrad und Ausbreitungsrichtung in Bezug auf die Muskelfaserrichtung) und möglicher Wechselbeziehungen sind zu prüfen, um Ableitungen für die optimalen Voraussetzungen zur Ultraschalldatenaufnahme im Hinblick auf die IMF-Bestimmung treffen zu können.
- Ein entsprechender Messaufbau erfordert die Korrektur von systembedingten Übertragungseigenschaften. Dies umfasst neben dem Schallfeld des Ultraschallwandlers die Empfangsverstärkung, um die Einstellmöglichkeiten zur Bildverbesserung am B-Bild-Gerät zu erhalten. Eine besondere Herausforderung ist mit der Schallfeldkorrektur eines B-Bild-Gerätes verbunden, da im Puls-Echo-Verfahren eine Schallfeldmessung nicht ohne Weiteres möglich ist.
- Anhand der für die Ultraschalldatenaufnahmen zur Verfügung stehenden Schlachtkörper sollen Beziehungen zwischen dem IMF-Gehalt, sensorischen Eigenschaften und Schlachtkörpermerkmalen sowie ausgewählten Fleischqualitätsparametern beschrieben werden.

Die nachfolgend beschriebenen Arbeiten fanden im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten interdisziplinären Projektes statt - unter Beteiligung des Institutes für Tierzucht und Tierhaltung der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg (MLU), des ehemaligen Institutes für Medizinische Physik und Biophysik der MLU sowie des Forschungs- und Studienzentrums für Veredelungswirtschaft Weser-Ems der Georg-August-Universität Göttingen (Projekt DFG Wi 1538/3).

## 4 Versuchsaufbau und Methodik

### 4.1 Schlachtkörper und Fleischqualitätsmerkmale

In 5 Durchgängen wurden in einem kommerziellen Schlacht- und Zerlegebetrieb insgesamt 115 Schlachtkörperhälften untersucht. Der Schlachtzeitraum erstreckte sich von Mitte November 2002 bis Ende Januar 2003. Herkunftseinflüsse waren durch die Auswahl eines Produktionsbetriebes und Lieferung von Tieren derselben genetischen Konstruktion (Duroc\*Hampshire) \* (Deutsches Edelschwein\*Deutsche Landrasse) minimiert. In Tabelle 2 sind wesentliche Parameter zur Beschreibung der untersuchten Schlachtkörper aufgeführt.

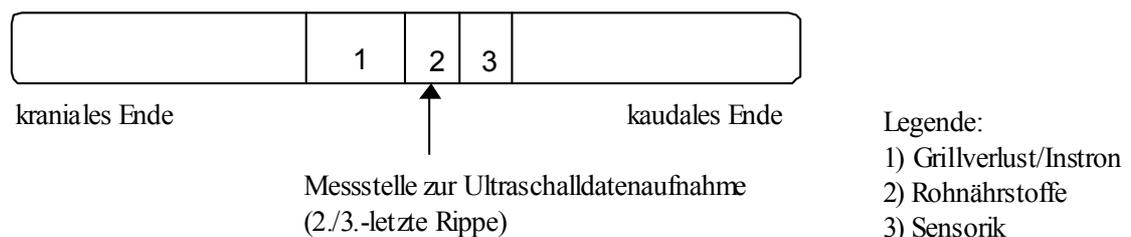
**Tabelle 2: Schlachtkörpermerkmale der untersuchten Schlachtkörper**

Parameter	Mittelwert	SD	Minimum	Maximum
Schlachtgewicht warm [kg]	94,8	7,6	76,8	113,4
Muskelfleischanteil [%]	55,1	3,1	45,3	61,4
Speckmaß [mm]	17,0	3,4	10,2	28,5
Fleischmaß [mm]	57,3	5,2	43,7	69,1

Parallel zu den Ultraschalluntersuchungen wurden jeweils der pH-Wert (mit pH-Star; Fa. Matthäus) und die elektrische Leitfähigkeit (mit LF-Star; Fa. Matthäus) im *M. longissimus* als indirekte Indikatoren der Fleischqualität 45 min post mortem bzw. ca. 20 h post mortem erfasst.

### 4.2 Referenzanalytik und sensorische Prüfung

Die Probennahme für die Laboranalytik bzw. Sensorik erfolgte entsprechend der Abbildung 1. Ca. 24 h post mortem wurde jeweils eine Kotelettscheibe für die entsprechende Analyse entnommen, in HDPE-Folie vakuumverpackt und bis zur Analyse bei  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelagert.



**Abbildung 1: Schema zur Probennahme am *M. longissimus***

### 4.2.1 Rohnährstoffanalyse

Die Referenzbestimmung des intramuskulären Fettgehaltes erfolgte durch Extraktion mit Petroleumbenzin in einer Soxtherm-Apparatur nach vorangegangener Hydrolyse mit HCl gemäß §35 LMBG Methodensammlung. Zur Bestimmung des Rohaschegehaltes wurden 2 g Muskelhomogenat unter Zugabe von 1 ml Magnesiumacetat nach Vortrocknung für 2 Stunden bei 600 °C im Muffelofen verascht. Über die vollautomatische Erfassung (Elementar VarioMax CN, D-63542 Hanau) des Stickstoffgehaltes nach einem oxidativen Aufschluss der Probe errechnet sich der Rohproteingehalt.

### 4.2.2 Grillverlust/Scherkraft

Zur quantitativen Erfassung des Grillverlustes wurde eine Kotelettscheibe vom Fettrand befreit, gewogen und in Alufolie bei 180°C bis zu einer Kerntemperatur von 73 °C gegrillt. Nach Abkühlung erfolgte die Rückwaage. Zur Bestimmung der maximalen Scherkraft wurden nach Grillen und Rückwiegen je nach Probengröße 6-9 zylinderförmige Kerne aus der Probe längs zur Faser ausgestanzt und diese mittels eines Instron-Gerätes (Modell 4301; Instron Deutschland GmbH, D-64293 Darmstadt) quer zur Faser geschert (40 mm Weg bei 200 mm/min Vortrieb). Die jeweiligen Einzelmesswerte je Tier wurden gemittelt.

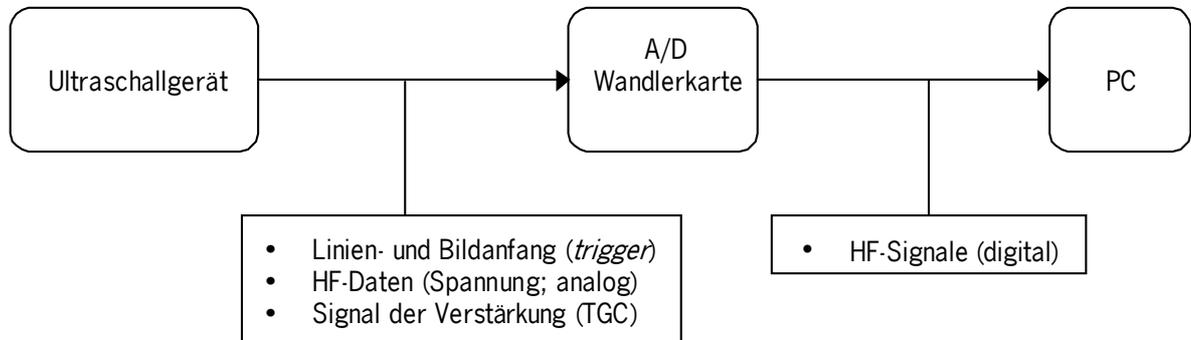
### 4.2.3 Sensorik

5 unterwiesene Laien führten in 10 Durchgängen eine bewertende Prüfung mit diskreter Skala (1 = sehr schlecht, 5 = sehr gut) für die Merkmale Zartheit, Saftigkeit und Aroma in einem Sensoriklabor nach DIN 10962 durch. Dazu wurde eine Kotelettscheibe in Alufolie bis zu einer Kerntemperatur von 73 °C gegrillt, in Würfelform mit 1 cm Kantenlänge geschnitten und den Prüfern warm gereicht. Aus den Einzelbewertungen je Prüfer wurde ein Merkmalsmittelwert für die jeweilige Probe gebildet.

## 4.3 Aufbau des Messsystems zur Aufnahme der HF-Echodaten

Das Messsystem besteht aus einem klinischen Ultraschallgerät Kontron SIGMA 44 HVCD (C.K. Medical GmbH, D-84030 Ergolding) mit einem mechanischen Sektor-Scanner vom Typ Wobbler AA5A mit einer Mittenfrequenz von 3,5 MHz (Abbildung A 1). Die -6dB-Bandbreite des Schallkopfes, d.h. der Frequenzbereich, bei dem mindestens 50 % des maximalen Schalldruckes erreicht werden, reicht von 2,8-3,8 MHz. Die HF-Signale werden über eine Geräte-interne Schnittstelle aus dem Gerät ausgekoppelt, mit einer SPECTRUM PCI2.12 A/D-Wandlerkarte (Spectrum Systementwicklung,

D-22927 Grosshansdorf) digitalisiert und auf einen PC übertragen und gespeichert (siehe Abbildung 2). Ein eigens dazu entwickeltes Programm gestattet die Datenübernahme komfortabel und nahezu in Echtzeit.



**Abbildung 2:** Aufbau des Messsystems zur Aufnahme von HF-Daten und Signalfluss

Jedes aufgenommene B-Bild besteht aus 180 A-Linien. Mit den HF-Signalen werden jeweils Startimpulse (engl. *trigger*) für den Bild- bzw. den Linienanfang übertragen. Die Ultraschallsignale werden mit Ausnahme der Einstellungen der laufzeitabhängigen Empfangsverstärkung TGC unverarbeitet übertragen und nach der Digitalisierung mit 20 MHz zusammen mit den zugehörigen TGC-Signalen auf der Festplatte des PC gespeichert. Damit ist eine maximale auswertbare Frequenz von 10 MHz gewährleistet.

#### 4.4 Ultraschall-Datenaufnahme

Zur Berücksichtigung der Anisotropie von akustischen Parametern erfolgten die Ultraschallmessungen in zwei verschiedenen Richtungen, d.h. sowohl längs als auch quer zur Längsachse der Schlachtkörper. Der Schallkopf wurde ca. 6 cm von der Rückenmittellinie nach ventral positioniert. Die senkrechten Messungen wurden jeweils um ca. 3 cm nach ventral versetzt, so dass sich 3 teilweise überlappende Querschnittsbilder ergeben. Im Anhang sind beispielhaft rekonstruierte B-Bilder der Ultraschalldatenaufnahmen abgebildet (Abbildung A 4 und Abbildung A 5). Die Messungen erfolgten abwechselnd quer bzw. parallel, wobei der Wandler jeweils abgehoben und neu angesetzt wurde. Zur Ankopplung des Schallwandlers wurde Sonogel verwendet. Sämtliche Messungen wurden zur Minimierung von Benutzereinflüssen von derselben Person, einem mit Ultraschall erfahrenen Untersucher, vorgenommen.

Um Einflüsse von Schlachtkörpertemperatur und Zerlegegrad prüfen zu können, wurden die Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt, die wesentliche

Änderungen der Messbedingungen beinhalten. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten des Schlachtbetriebes wurden bis maximal 25 Schlachtkörperhälften je Versuchstag unmittelbar nach der Klassifizierung (ca. 45 min post mortem) zufällig ausgewählt, aus dem laufenden Schlachtbetrieb ausgekoppelt und für die Dauer der Messungen (je Durchgang ca. 1 h) von der Kühlung zurückgehalten. Die Ultraschalldatenaufnahmen erfolgten zunächst an den hängenden Schlachtkörperhälften. Nach Abschluss der Messungen wurden die Karkassen ohne Durchlaufen der Schockkühlung in die Kühlung gegeben. Am Folgetag, ca. 20 h p.m. wurden die Hälften der Grobzerlegung zugeführt und anschließend der Kotelettstrang in einem gekühlten Zerlegeraum, auf einer Arbeitsfläche liegend, erneut mit dem Ultraschallgerät untersucht. Nach Entfernen der Speckauflage bzw. der Knochen wurden schließlich die Messungen am Lachs wiederholt. Die Schlachtkörper hatten zum Zeitpunkt der ersten Ultraschalldatenaufnahme ( $T_{45 \text{ min p.m.}}$ ) eine durchschnittliche Kerntemperatur im *M. longissimus* von  $37,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , wobei die Spannweite von  $27,6$  bis  $44,0 \text{ }^\circ\text{C}$  reichte. Die Temperatur der gekühlten Schlachtkörper ( $T_{20 \text{ h p.m.}}$ ) reichte von  $2,7$  bis  $7,9 \text{ }^\circ\text{C}$  und betrug durchschnittlich  $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . In Tabelle 3 sind die Messbedingungen zusammengefasst.

Die Ultraschalldatenaufnahme erfolgte aus Gründen der Standardisierung und leichter Lokalisierung an der Messstelle, die auch zur Klassifizierung im Rahmen der Schlachtkörperbewertung mittels FOM verwendet wird (2./3. letzte Rippe). Die Einstichstelle der FOM-Sonde ermöglicht eine gute Wiederfindung der Messstelle, wobei der US-Wandler unmittelbar daneben platziert wurde.

**Tabelle 3: Beschreibung der Messzeitpunkte und -bedingungen**

Zeitpunkt	Objekt	Temperatur [ $^\circ\text{C}$ ] MW $\pm$ s	Bezeichnung
45 min post mortem	Schlachthälfte, hängend	$37,2 \pm 2,5$	WARM
20 h post mortem	Kotelettstrang, liegend	$4,5 \pm 1,4$	KALT
20 h post mortem	Lachs, liegend	$4,5 \pm 1,4$	LACHS

## 4.5 Verarbeitung der HF-Signale zu akustischen Parametern

Im Rahmen des interdisziplinären Projektes oblag die Modellierung und Kalkulation der akustischen Parameter den Partnern aus dem ehemaligen Institut für Medizinische Physik und Biophysik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Aus den gespeicherten Echosignalen wurden die nachfolgend beschriebenen Parameter berechnet und zur Verfügung gestellt. Zunächst soll hier, zum Verständnis, verkürzt der Ablauf der Signalverarbeitung dargestellt werden (GÄRTNER et al., 1998; JENDERKA et al., 1999).

1. Aus den aufgezeichneten HF-Daten wird ein B-Bild generiert. Innerhalb des B-Bildes erfolgt die Auswahl eines interessierenden Bereiches, kurz ROI (engl.: *region of interest*). Zuvor werden die Einstellungen der tiefenabhängigen Empfangsverstärkung korrigiert entsprechend der Algorithmen von BRAND, 2004.
2. Innerhalb der ROI wird jede der 50 enthaltenen A-Linien gefenstert, d.h. das Zeitsignal wird 40 mal mit einer zeitversetzten Gauß'schen Tor-Funktion multipliziert. Jedes Tor hat eine Länge von 180 Messwerten (engl. *sample points*), d.h. eine Länge von ca. 6,3 mm. Die benachbarten Tore überlappen um jeweils 91 %. Die ROI-Größe (50 Linien mal 40 Tore) entspricht einer Muskelfläche von ca. 8,3 cm<sup>2</sup>.
3. Durch Fouriertransformation und Quadrierung wird aus dem Zeitsignal das Spektrum berechnet.
4. Die inverse Fouriertransformation des Leistungsspektrums ergibt das Cepstrum, das quasi Zeit-Informationen des Amplitudenspektrums enthält. Durch Nullsetzen der cepstralen Amplituden ab einem Punkt auf der quasi-Zeitachse wird eine Glättung des Spektrums erreicht, d.h. Streuerinterferenzen werden vom eigentlichen Echosignal getrennt.
5. Nach erfolgter cepstraler Glättung werden systemspezifische Eigenschaften, z.B. des Schallfeldes, korrigiert.
6. Die Berechnung der frequenzabhängigen Dämpfung erfolgt nach der *multi-narrow-band*-Methode (MNB) für eine Reihe diskreter Frequenzen durch lineare Regression über die Ausbreitungstiefe. Nach Korrektur der tiefenabhängigen Dämpfung können die Rückstreuparameter berechnet werden.

Bei der Programmierung der Software zur Parameterberechnung war ursprünglich die Berechnung für 13 Frequenzen im Bereich von 2-5 MHz vorgesehen. Vor dem Hintergrund einer möglichst exakten Parameterbestimmung aus den Rückstreudaten erfolgte bei der Datenübernahme jedoch eine Beschränkung auf den Frequenzbereich von 2,5 bis 4 MHz (in 7 Frequenzschritten à 0,25 MHz), der die – 6 dB-Bandbreite des verwendeten Ultraschallwandlers (siehe Abschnitt 4.3) nicht wesentlich überschritt - die experimentellen Arbeiten zu systemspezifischen Korrekturen ergaben für den verwendeten Wandler Wobbler AA5A eine –6 dB-Bandbreite von 2,8 bis 3,8 MHz (BRAND, 2004). So gelangten insgesamt 60 akustische Parameter zur Auswertung. Die Parameter sind prinzipiell in Einzel- bzw. Gruppenparameter für eine Reihe von diskreten Frequenzen einzuteilen. Darüber hinaus können die Parameter in 3 funktionelle Gruppen, d.h. Dämpfungs-, Rückstreu- und Cepstralparameter, unterschieden werden. Tabelle 4 gibt eine Übersicht über die im Rahmen des interdisziplinären Projektes zur Verfügung stehenden Ultraschallparameter.

#### 4.5.1.1 Dämpfungsparameter

**ALPHA(f)** beschreibt die tiefenabhängige Dämpfung für eine diskrete Frequenz (engl. oft: *attenuation coefficient*). **IOA** kennzeichnet den Anstieg des Dämpfungskoeffizienten über einen Frequenzbereich und entspricht dem häufig berechneten *slope of attenuation coefficient*. **IAC** wird durch Ableitung des Integrals über der frequenzabhängigen Dämpfung IOA bestimmt. Neben diesen explizit die Dämpfung beschreibenden Parametern werden Parameter berechnet, die die dämpfungsbedingte Änderung der Spektren charakterisieren. **MWCF** stellt die durchschnittliche Mittenfrequenz dar. **CFDS** quantifiziert die dämpfungsbedingte Änderung der Mittenfrequenz. **BW** beschreibt die dämpfungsbedingte Änderung der –6 dB-Bandbreite der Spektren. **MWSWP** trifft eine Aussage über den Schwerpunkt der Fläche unter der frequenzabhängigen Dämpfungsfunktion (IOA) innerhalb der ROI.

#### 4.5.1.2 Rückstreuparameter

**RA(f)** repräsentiert die absolute Rückstreuung, d.h. die um die Dämpfung korrigierte Amplitude bei der jeweiligen Frequenz. **RR(f)** trifft eine Aussage über die Rückstreuung in Bezug auf ein Referenzphantom. **MR(f)** widerspiegelt die mittlere Rückstreuung. **BCMAX(f)** quantifiziert die maximale Höhe des detektierten Rückstreusignales. **DBC(f)** gibt die Differenz zwischen maximalem und minimalem Rückstreusignal an.

**IBC** wird als Integral über der frequenzabhängigen Rückstreuung berechnet (analog IAC).

#### 4.5.1.3 Cepstralparameter

**CA** entspricht der Fläche, d.h. dem Integral über dem Cepstrum. **CFP** enthält das Maß für den Abstand des ersten *Peaks* (Maximalwert) im Cepstrum, **CPMD** gibt den mittleren Abstand der Peaks voneinander an. **CPN** entspricht der Anzahl Peaks im Cepstrum, deren Amplitude größer ist als die Hälfte des größten Peaks.

**Tabelle 4: Übersicht über die zur Verfügung stehenden Ultraschallparameter und ihre Bedeutung**

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
ALPHA(f)	Frequenzabhängige Dämpfung über die Tiefe	[dB/cm]
RA(f)	Frequenzabhängiger absoluter Rückstreuparameter	[dB]
RR(f)	Frequenzabhängiger relativer Rückstreuparameter bezogen auf ein Referenzphantom	-
A(f)	Amplitude des Leistungsspektrums	[dB]
MR(f)	Mittlere Rückstreuung nach Dämpfungskorrektur	[dB]
DBC(f)	Differenz zwischen größter und kleinster maximaler Rückstreuung in ROI	[dB]
BCMAX(f)	Maximales Rückstreusignal in SUB-ROI	[dB]
IOBC(f)	Winkelabhängiger Anstieg des Rückstreukoeffizienten	[dB/°]
MWCF	Mittlere Mittenfrequenz	[MHz]
IBCREL	Relativer integrierter Rückstreukoeffizient	[dB·MHz]
MWSWP	Mittlerer Schwerpunkt der Spektren	[MHz]
DSWP	Änderung des Schwerpunkts der Spektren	[dB]
BW	Dämpfungsbedingte Änderung der Bandbreite über die ROI-Tiefe	[MHz]
IAC	Integral des Dämpfungskoeffizienten	[dB/cm·MHz]
IOA	Anstieg des Dämpfungskoeffizienten über die Frequenz	[DB·MHz <sup>-1</sup> ·cm <sup>-1</sup> ]
CFDS	Dämpfungsbedingte Mittenfrequenzverschiebung über die ROI-Tiefe	[MHz]
CPN	Anzahl der Peaks im Cepstrum	-
CA	Fläche unter dem Cepstrum	[dBs]
CPMD	Mittlerer Abstand zwischen Peaks im Cepstrum	[n/f <sub>s</sub> ]
CFP	Position des ersten Maximums im Cepstrum	[n/f <sub>s</sub> ]

## 4.6 Statistische Auswertung

### 4.6.1 Varianzanalysen

Über das Gesamtdatenmaterial (je 3 Messungen pro Schlachtkörper, Messzeit und Messrichtung) wurde varianzanalytisch der Effekt der im Versuchsaufbau gewählten Faktoren Gruppe (d.h. Versuchstag), Messzeitpunkt und Messrichtung unter Berücksichtigung eines zufälligen Effekts des Schlachtkörpers mittels PROC MIXED in SAS Version 8e (SAS, 1999) geprüft (Modell 1).

$$y_{ijklm} = \mu + G_i + t_{ij} + MZ_k + MR_l + e_{ijklm} \quad (\text{Modell 1})$$

$y_{ijklm}$	=	Beobachtungswert m des Tiers j innerhalb Gruppe i zum Messzeitpunkt k in der Messrichtung l
$\mu$	=	Mittelwert
$G_i$	=	fixer Effekt der Gruppe i (1 ... 5)
$t_{ij}$	=	zufälliger Effekt von Tier j innerhalb Gruppe i (1 <sub>i</sub> ... n <sub>i</sub> )
$MZ_k$	=	fixer Effekt des Messzeitpunktes k (Schlachtkörper warm; kalt, Lachs)
$MR_l$	=	fixer Effekt der Messrichtung l (längs, quer)
$e_{ijklm}$	=	zufälliger Restfehler der Beobachtung m

Mittelwertdifferenzen wurden mittels der PDIFF-Option auf Signifikanz geprüft.

Die Wiederholbarkeit der Ultraschallparameterbestimmung aus mehrfachen Messungen am selben Schlachtkörper wurde getrennt nach Messzeitpunkten und Messrichtungen als Intraklasskorrelationskoeffizient nach RASCH (1983) berechnet. Dazu wurden getrennt für jede Messrichtung innerhalb des jeweiligen Messzeitpunktes bzw. über alle Messungen innerhalb eines Messzeitpunktes zunächst in STATISTIKA Version 6 (Statsoft) mit der Methode REML Varianzkomponenten für den zufälligen Effekt des Tieres geschätzt (Modell 2).

$$y_{ijk} = \mu + G_i + t_{ij} + e_{ijk} \quad (\text{Modell 2})$$

$y_{ijk}$	=	Beobachtungswert k des Tiers j innerhalb Gruppe i
$\mu$	=	Mittelwert
$G_i$	=	fixer Effekt der Gruppe i (1 ... 5)
$t_{ij}$	=	zufälliger Effekt von Tier j innerhalb Gruppe i (1 <sub>i</sub> ... n <sub>i</sub> )
$e_{ijk}$	=	zufälliger Restfehler der Beobachtung k

Der Intraklasskorrelationskoeffizient  $r$  als Maß für die Enge des Zusammenhangs zwischen den wiederholten Messungen am selben Schlachtkörper ergibt sich als Varianzanteil eines zufälligen Effektes an der Gesamtvarianz nach RASCH (1983) wie folgt:

$$r = \frac{\frac{MQ_{Effekt} - MQ_{Re.st}}{n}}{\left( \frac{MQ_{Effekt} - MQ_{Re.st}}{n} \right) + MQ_{Re.st}}$$

Mit Modell 3 wurden Effekte des Fettgehalts auf die organoleptisch bzw. instrumentell erfassten sensorischen Parameter mittels PROC MIXED (SAS) varianzanalytisch untersucht. LS-Mittelwerte wurden mittels des PDIFF Statements auf signifikante Differenzen geprüft.

$$y_{ij} = \mu + FK_i + e_{ij} \quad (\text{Modell 3})$$

$y_{ij}$	=	Beobachtungswert k des Tiers j
$\mu$	=	Mittelwert
$FK_i$	=	fixer Effekt der Fettgehaltsstufe i (1, 2, 3)
$e_{ij}$	=	zufälliger Restfehler der Beobachtung j

Die Klassenbildung erfolgte anhand des Mittelwertes MW und der Standardabweichung  $s$  des IMF-Gehaltes der untersuchten Schlachtkörper, wobei die Klassengrenzen der mittleren Fettgehaltsstufe definiert sind als  $(MW - \frac{1}{2} s)$  bzw.  $(MW + \frac{1}{2} s)$ . In Tabelle 5 sind die Klassenbesetzung und die mittleren Fettgehalte der einzelnen Fettgehaltsklassen dargestellt.

**Tabelle 5: Klassenbesetzung und deskriptive Statistik der IMF-Klassen für die Varianzanalyse**

IMF-Klasse	HOCH (IMF > 1,78 %)	MITTEL (1,23 % < IMF ≤ 1,78 %)	TIEF (IMF ≤ 1,23 %)
n	34	45	36
IMF %	2,21 ± 0,40	1,43 ± 0,16	0,97 ± 0,14

#### 4.6.2 Korrelationen

Zur Prüfung von Zusammenhängen zwischen Merkmalen der Schlachtleistung und der Fleischqualität wurden phänotypische Korrelationen nach Pearson berechnet. Beziehungen zwischen den Ultraschallparametern und IMF-Referenzwerten wurden anhand phänotypischer Korrelationen nach Pearson bzw. Rangkorrelation nach Spearman quantifiziert.

#### 4.6.3 Regressionsanalysen

Die Vorhersagequalität der Ultraschallparameter zur Schätzung des IMF-Gehaltes wurde mit multipler Regression mittels PROC REG (SAS) einschließlich schrittweiser Variablenauswahl (Option *stepwise selection*) geprüft. Indikatoren für die Güte der Regression sind das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bzw. die Fehlergrößen RMSE (*root mean squared error*) und SEP (*standard error of prediction*). Multivariate Analysen auf Basis der Korrelationen erfolgten mittels PLS-Analysen (partial least squares regression) mittels PROC PLS in SAS und The Unscrambler Version 8.0 (Camo ASA, Oslo, Norwegen).

#### 4.6.4 Diskriminanzanalysen

Zur Beurteilung der korrekten Zuordnung der Schlachtkörper in eine von zwei Fettgehaltsklassen mittels der akustischen Parameter wurden Diskriminanzanalysen mittels PROC STEPDISC und anschließend PROC DISCRIM einschließlich Kreuzvalidierung (*leave-one-out-cross-validation*) in SAS durchgeführt. Die Klassenbildung erfolgte anhand des aus sensorischer Sicht erwünschten Grenzwertes von 2,0 % IMF. Dabei ergibt sich folgende Klassenbesetzung (Tabelle 6):

**Tabelle 6: Klassenbesetzung der Fettgehaltsklassen zur Diskriminanzanalyse (IMF ± Mittelwerte Standardabweichung)**

	HOCH (IMF > 2.0 %)	TIEF (IMF ≤ 2.0 %)
n	19	96
IMF [%]	2,48 ± 0,34	1,32 ± 0,34

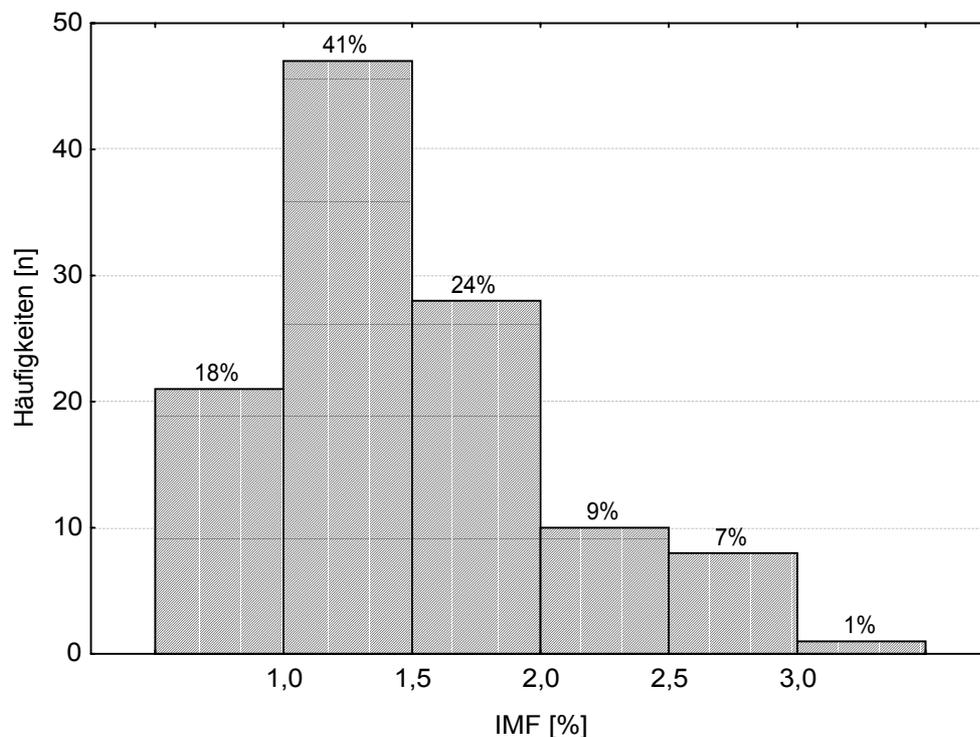
## 5 Ergebnisse und Diskussion

### 5.1 Rohnährstoffgehalte und Fleischqualität der untersuchten Schlachtkörper

In Tabelle 7 ist die makronährstoffliche Zusammensetzung der untersuchten Proben aus dem *M. longissimus* zusammengefasst. Der mittlere IMF-Gehalt im *M. longissimus* der untersuchten Schlachtkörper beträgt 1,51 %, wobei die Spannweite von 0,71 bis 3,18 % reicht. Die Mehrzahl der Proben überschreitet 1,5 % IMF nicht. Nur 17 % der Schlachtkörper erreichen den aus sensorischer Sicht wünschenswerten intramuskulären Fettgehalt von mehr als 2,0 % im *M. longissimus*. Die Häufigkeitsverteilung der IMF-Gehaltswerte entspricht mit ihrer Linksschiefe häufigen Beobachtungen (Abbildung 3).

**Tabelle 7: Rohnährstoffgehalte einschließlich IMF im *M. longissimus* der untersuchten Schlachtkörper (n = 115)**

Komponente	Mittelwert	s	Minimum	Maximum
Fett [%]	1,51	0,55	0,71	3,18
Protein [%]	23,80	0,57	21,73	24,97
Trockenmasse [%]	25,72	0,66	23,80	27,32
Asche [%]	1,22	0,04	1,08	1,37



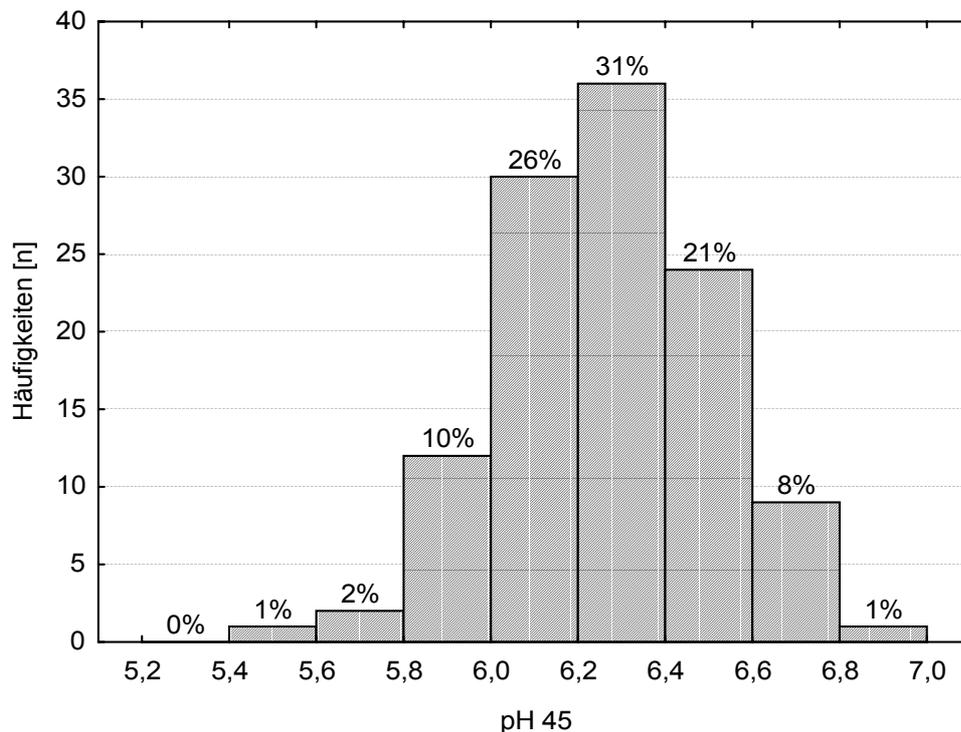
**Abbildung 3: Absolute und relative Häufigkeitsverteilung der IMF-Gehalte der untersuchten Schweineschlachtkörper (n = 115)**

Tabelle 8 zeigt die früh- bzw. spätpostmortale erhobenen Fleischqualitätsindikatoren pH-Wert und Leitfähigkeit (LF) im *M. longissimus* zum jeweiligen Zeitpunkt der Ultraschalldatenaufnahme.

**Tabelle 8:** Früh- und spätpostmortale Fleischqualitätsparameter der untersuchten Schweineschlachtkörper (*M. longissimus*) und Signifikanzniveau des Schlachttageffektes (p)

Merkmal	N	Mittelwert	s	Minimum	Maximum	Signifikanz (p)
pH <sub>45</sub>	115	6,27	0,25	5,48	6,85	n.s.
LF <sub>45</sub>	114	3,41	0,85	2,44	9,82	n.s.
pH <sub>24</sub>	114	5,48	0,09	5,29	5,76	< 0,001
LF <sub>24</sub>	113	4,14	1,72	2,08	11,40	< 0,001

Bei Orientierung an einem üblichen pH-Grenzwert 45 min post mortem (pH<sub>45</sub> < 5,8) weisen 3 % der untersuchten Schlachtkörper Fleischqualitätsmängel im Sinne von PSE aufgrund beschleunigter Glykolyse auf. Bei Verschärfung der PSE-Verdachtsgrenze auf pH<sub>45</sub> < 6,0 (GÖDEKE et al., 1998) steigt der Anteil der potentiellen PSE-Fälle auf 13 % (Abbildung 4).



**Abbildung 4:** Absolute und relative Häufigkeitsverteilung der pH<sub>45</sub> Werte im *M. longissimus* der untersuchten Schlachtkörper

Erfolgt stattdessen die Differenzierung von PSE-Fleisch spätpostmortal unter Verwendung des Leitfähigkeitswertes ( $LF_{24} > 6,0$  mS/cm), so ergibt sich eine ähnliche hohe PSE-Inzidenz von 14 %. Ein jüngstes Monitoring von Schlachtschweinen in Deutschland ergab in Abhängigkeit vom Schlachtbetrieb PSE-Frequenzen bis zu 27 %, während nur knapp die Hälfte der untersuchten Schlachtkörper eine gute Fleischqualität aufwies (ALTMANN et al., 2004). SIMEK et al. (2004) bzw. VELARDE et al. (2000) beobachteten jüngst PSE-Frequenzen zwischen 6,25 und 12 % in Abhängigkeit vom Genotyp bzw. zwischen 3,8 und 18,8 % in Abhängigkeit vom Betäubungsverfahren. Unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien ermittelten LAUBE et al. (2000) an deutschen Herkünften empirisch PSE-Häufigkeiten zwischen 1,4 und 21,8 %. In einer umfangreichen europäischen Vergleichsstudie von WARRISS et al. (1998) erwies sich sogar beinahe ein Drittel aller Schlachttiere als PSE-verdächtig, so dass die potentielle PSE-Frequenz in der vorliegenden Untersuchung in Abhängigkeit vom gewählten Indikator als vergleichsweise gering eingeschätzt werden kann.

## 5.2 Schlachtkörper- und Fleischbeschaffenheitsparameter sowie deren Beziehungen zum IMF

Tabelle 9 zeigt phänotypische Korrelationen zwischen den erfassten Merkmalen der Schlachtkörper- und der Fleischbeschaffenheit. Mit zunehmendem Gewicht ist eine Verfettung der Schlachtkörper verbunden, die sich in einer größeren Rückenspeckdicke ( $r = 0,26$ ;  $p < 0,05$ ) und abnehmendem Muskelfleischanteil ( $r = -0,14$ ; n.s.) äußert. Ein höherer Muskelfleischanteil geht mit signifikant niedrigeren  $\text{pH}_{24}$ -Werten ( $r = 0,20$ ;  $p < 0,05$ ) einher, spiegelt sich jedoch nicht in den übrigen erfassten Fleischqualitätsparametern wider. Zwischen  $\text{pH}_{45}$  und  $\text{LF}_{45}$  bzw.  $\text{LF}_{24}$  bestehen mittelstarke Beziehungen.

**Tabelle 9:** Phänotypische Korrelationen zwischen Merkmalen der Schlachtleistung und Fleischqualitätsparametern im *M. longissimus* der untersuchten Schweine (\*  $p < 0,05$ ; zugehörige n in Klammern)

	MFA	SM	FM	$\text{pH}_{45}$ LD	$\text{LF}_{45}$ LD	$\text{pH}_{24}$ LD	$\text{LF}_{24}$ LD
SKG <sub>warm</sub> (Schlachtgewicht)	-0,14 (113)	0,26 * (112)	0,35 * (112)	-0,05 (113)	0,16 (112)	0,13 (112)	0,16 (111)
MFA (Muskelfleisch %)	1,00	-0,95 * (112)	0,40 * (112)	0,02 (113)	-0,01 (112)	-0,20 * (112)	-0,05 (111)
SM (Speckmaß)		1,00	-0,09 (112)	-0,07 (112)	0,06 (111)	0,21 * (111)	0,08 (110)
FM (Fleischmaß)			1,00	-0,14 (112)	0,15 (111)	-0,04 (111)	0,09 (110)
$\text{pH}_{45}$ LD				1,00	-0,46 * (114)	0,11 (114)	-0,62 * (113)
$\text{LF}_{45}$ LD					1,00	-0,06 (113)	0,57 * (112)
$\text{pH}_{24}$ LD						1,00	-0,10 (113)
$\text{LF}_{24}$ LD							1,00

In Tabelle 10 sind phänotypische Korrelationen zwischen Merkmalen der Schlachtleistung, der Fleischqualität und dem Gehalt an Rohnährstoffen, einschließlich IMF, dargestellt. Tendenziell sinkt der IMF mit zunehmendem Muskelfleischanteil ( $r = -0,17$ ; n.s.). Schlachtgewicht und IMF korrelieren schwach positiv ( $r = 0,14$ ; n.s.). Steigende IMF-Gehalte sind signifikant mit höheren  $\text{pH}_{24}$ -Werten assoziiert ( $r = 0,28$ ;  $p < 0,05$ ). Zwischen Speckdicke und IMF existiert ein schwach positiver Zusammenhang ( $r = 0,18$ ;  $p = 0,052$ ). Mit Ausnahme des  $\text{pH}_{24}$  ( $r = 0,28$ ;  $p < 0,05$ ) sind keine signifikanten Korrelationen zwischen dem intramuskulären Fettgehalt und den Merkmalen der Fleischbeschaffenheit ( $\text{pH}_{45}$ ,  $\text{LF}_{45}$ ,  $\text{LF}_{24}$ ) festzustellen.

**Tabelle 10: Korrelationen zwischen Schlachtleistungsparametern, Merkmalen der Fleischqualität und Rohnährstoffen im *M. longissimus* der untersuchten Schweine**

	IMF [%]	Rohprotein [%]	Trockenmasse [ %]	Rohasche [%]
SKG <sub>warm</sub> (n = 113)	0,14	0,02	0,06	0,04
MFA (n = 113)	-0,17	-0,12	-0,13	0,11
Speckmaß (n = 112)	0,18	0,09	0,12	-0,10
Fleischmaß (n = 112)	-0,02	-0,10	-0,07	0,05
pH <sub>45</sub> (n = 115)	0,05	0,03	-0,03	-0,27 *
LF <sub>45</sub> (n = 114)	-0,09	0,14	0,09	0,18
pH <sub>24</sub> (n = 114)	0,28 *	0,15	0,19 *	-0,15
LF <sub>24</sub> (n = 113)	-0,12	0,12	0,12	0,35 *

(\* p &lt; 0,05)

Die vorliegenden Daten legen nahe, dass der Merkmalsantagonismus zwischen dem IMF-Gehalt und dem Muskelfleischanteil des Schweins offenbar am eigenen Tiermaterial nicht derart ausgeprägt ist, wie dies häufig in der Literatur postuliert wurde. Die gefundenen Ergebnisse stützen die Resultate der SUIS AG (2002), von KIPFMÜLLER et al. (2000) und GÖTZ et al. (2001), nach denen erhöhte IMF-Gehalte nicht zwangsläufig zu einem stark vermindertem Fleischanteil führen müssen. Zwischen IMF und Speckdicke bestehen offenbar kaum Beziehungen (VILLE et al., 1997). Die gefundenen Beziehungen zwischen IMF und spätpostmortaler Fleischbeschaffenheit pH<sub>24</sub> bestätigen hinsichtlich ihrer Richtung und Größenordnung Ergebnisse von HEYLEN (1999), die ebenfalls ausschließlich für pH<sub>24</sub> phänotypische Korrelationen zum IMF in Höhe von  $r = 0,22$  nachwies. Zwischen frühpostmortal gemessenem pH und IMF konnte GÖTZ et al. (2001) nur geringe, positiv gerichtete Korrelationen feststellen. BIEDERMANN et al. (2000) beobachteten an Pietrain in Abhängigkeit vom Auftreten des MHS-Defektallels einen zunehmenden pH<sub>1</sub> - jedoch keine Unterschiede im pH<sub>24</sub> - bei steigendem IMF-Gehalt. Die Selektion auf höheren Muskelfleischanteil führte bei Duroc zu vermindertem IMF und gleichzeitig signifikant niedrigeren pH<sub>45</sub>-, aber gleichen pH<sub>24</sub>-Werten (LONERGAN et al., 2001).

### 5.3 Sensorische Eigenschaften und deren Beziehung zum IMF-Gehalt

In Tabelle 11 sind Mittelwerte und Standardabweichungen der organoleptisch bzw. instrumentell erfassten sensorischen Merkmale der Koteletts dargestellt. Die Mehrzahl der untersuchten Proben wird von den Prüfern mit einer Bewertung unterhalb des Skalenmittels versehen. Im Detail erreicht nur eine Minderheit der Koteletts gute bis sehr gute Beurteilungen (Prüfnote > 3,5) für die Kriterien Aroma (11 %), Saftigkeit (26 %) bzw. Zartheit (21 %).

**Tabelle 11: Sensorische Eigenschaften der untersuchten Kotelettproben (n = 115)**

Merkmal	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Zartheit <sup>1</sup>	3,0	0,8	1,2	5,0
Saftigkeit <sup>1</sup>	3,0	0,7	1,4	5,0
Aroma <sup>1</sup>	2,9	0,6	1,6	4,2
Scherkraft [kg]	4,19	0,96	2,41	6,47
Grillverlust [%]	30,91	4,15	14,90	37,41

<sup>1</sup> (Skala von 1-5; 1 = sehr schlecht; 5 = sehr gut)

Einige Zusammenhänge zwischen der Roh Nährstoffzusammensetzung und den Sensorikparametern lassen sich statistisch sichern. Die Korrelationen sind Tabelle 12 zu entnehmen.

**Tabelle 12: Phänotypische Produkt-Moment-Korrelationen zwischen Roh Nährstoffgehalten im *M. longissimus* und sensorischen Parametern (n = 115)**

	Zartheit	Saftigkeit	Aroma	Scherkraft	Grillverlust
IMF	0,32 ***	0,08	0,21 *	-0,51 ***	-0,19 *
Rohprotein	-0,13	-0,10	-0,08	0,19 *	-0,18
Trockenmasse	0,19 *	0,00	0,20 *	-0,27 *	-0,26 **
Rohasche	-0,00	0,15	0,04	0,15	0,28 **

(\* p < 0,05; \*\* p < 0,01; \*\*\* p < 0,001)

Zartheit und Scherkraft weisen die vergleichsweise engsten Beziehungen zum IMF auf. Mit steigendem IMF-Gehalt verbessern sich die Bewertungen der Zartheit und des Aromas der untersuchten Proben signifikant ( $r = 0,32$ ;  $p < 0,001$ ). Unterstützt wird dieser Zusammenhang von den Scherkraftwerten - hier ist die Korrelation zum IMF im Vergleich zu allen erfassten Sensorikparametern am größten ( $r = -0,51$ ;  $p < 0,001$ ). Der Grillverlust wird mit steigendem intramuskulären Fettgehalt ebenfalls geringer ( $r = -0,19$ ;  $p < 0,05$ ). Dies spiegelt sich jedoch nicht in der Korrelation zwischen Saftigkeit und IMF wider ( $r = 0,08$ ; n.s.). In Tabelle 13 werden darüber hinaus sogar leichte,

positiv gerichtete Beziehungen zwischen Saftigkeit und Grillverlust deutlich ( $r = 0,22$ ;  $p < 0,05$ ). Bezogen auf die chemische Zusammensetzung der Koteletts lassen sich für die Saftigkeit keine signifikanten Korrelationen feststellen. Insgesamt werden die Genusseigenschaften der untersuchten Proben mit steigendem IMF-Gehalt besser beurteilt. Ähnlich gerichtete Zusammenhänge ergeben sich für den Trockenmassegehalt. Darüber hinaus ist ein steigender Proteingehalt mit einem höheren Scherwiderstand verbunden ( $r = 0,19$ ;  $p < 0,05$ ).

Betrachtet man Zusammenhänge zwischen den sensorischen Bewertungskriterien, so wird der Eindruck des Aromas durch zunehmende Saftigkeit und Zartheit gleichermaßen positiv beeinflusst (Tabelle 13).

**Tabelle 13: Phänotypische Produkt-Moment-Korrelationen zwischen den erfassten sensorischen Eigenschaften der Koteletts (n = 115)**

	Zartheit	Saftigkeit	Aroma	Scherkraft	Grillverlust
Zartheit	1,00	0,60 ***	0,56 ***	-0,31 ***	0,21 *
Saftigkeit		1,00	0,49 ***	0,17	0,22 *
Aroma			1,00	-0,13	0,20 *
Scherkraft				1,00	0,41 ***
Grillverlust					1,00

(\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$ )

Wird das Datenmaterial anhand des IMF-Mittelwertes (1,51 %) in zwei Gruppen geteilt, ergeben sich z.T. abweichende Korrelationsmaße (Tabelle 14). So lassen sich lediglich in der Gruppe mit den hohen Fettgehalten signifikante Beziehungen zwischen IMF-Gehalt und Aroma der Koteletts feststellen ( $r = 0,30$ ;  $p < 0,05$ ). Demgegenüber sind die Beziehungen zwischen der Scherkraft und dem IMF-Gehalt in Proben mit einem Fettgehalt  $< 1,5$  % IMF stärker ausgeprägt ( $r = -0,57$ ;  $p < 0,05$ ) als in der hohen Fettgehaltsstufe ( $r = -0,28$ ; n.s.).

**Tabelle 14: Sensorische Eigenschaften und deren Korrelation zum IMF-Gehalt im *M. longissimus* in Abhängigkeit von der IMF-Gehaltsstufe**

	IMF > 1,51 % (N = 47)		IMF ≤ 1,51 % (N = 68)	
	Mittelwert (SD)	Korrelation (p-Niveau)	Mittelwert (SD)	Korrelation (p-Niveau)
Zartheit <sup>1</sup>	3,21 (0,83)	0,23 (0,126)	2,86 (0,79)	0,35 (0,003)
Saftigkeit <sup>1</sup>	3,09 (0,63)	0,09 (0,528)	2,95 (0,76)	-0,10 (0,427)
Aroma <sup>1</sup>	2,97 (0,59)	0,30 (0,040)	2,87 (0,55)	0,17 (0,162)
Scherkraft [kg]	3,77 (0,79)	-0,28 (0,057)	4,49 (0,96)	-0,57 (0,000)
Grillverlust [%]	30,47 (4,33)	-0,28 (0,053)	31,22 (4,02)	-0,10 (0,418)

<sup>1</sup> (Skala von 1-5; 1 = sehr schlecht; 5 = sehr gut)

Die deutlichsten Auswirkungen zeigt die Fettgehaltsstufe auf die Wahrnehmung von Aroma und Zartheit durch die Prüfpersonen bzw. auf die instrumentell erfasste Scherkraft (Tabelle 15). Ein um mindestens 0,5 % höherer IMF-Gehalt führt zu signifikant besseren Zartheits- und Aromabewertungen, die sich in guter Übereinstimmung in durchschnittlich 25 % geringeren Scherkraftwerten widerspiegeln. Die durchschnittlichen Grillverluste erreichen ein nachteilig hohes Niveau, unterliegen jedoch keinem Einfluss der Fettgehaltsstufe. Die organoleptische Empfindung der Saftigkeit der untersuchten Kotelettproben wird am besten in der höchsten Fettgehaltsstufe beurteilt, unterscheidet sich jedoch nicht signifikant von der Wahrnehmung der Saftigkeit in der niedrigsten Fettgehaltsstufe.

**Tabelle 15: LS-Mittelwerte sensorischer Parameter in Abhängigkeit von der Fettgehaltsklasse**

Fettgehaltsstufe	IMF ≤ 1,23 (n=36)	1,23 < IMF ≤ 1,78 (n=45)	IMF > 1,78 (n=34)	p (Anova)
Aroma <sup>1</sup>	2,79 <sup>a</sup>	2,88 <sup>ab</sup>	3,08 <sup>b</sup>	0,0917
Saftigkeit <sup>1</sup>	3,01 <sup>ab</sup>	2,86 <sup>a</sup>	3,19 <sup>b</sup>	0,1196
Zartheit <sup>1</sup>	2,68 <sup>a</sup>	3,00 <sup>ab</sup>	3,34 <sup>b</sup>	0,0033
Grillverlust [%]	30,26	30,57	31,95	0,1822
Scherkraft [kg]	4,97 <sup>a</sup>	3,95 <sup>b</sup>	3,70 <sup>b</sup>	0,0001

<sup>1</sup> (Skala von 1-5; 1 = sehr schlecht; 5 = sehr gut)

<sup>ab</sup> Unterschiedliche Kleinbuchstaben markieren signifikante Differenzen bei  $p < 0,05$

Bei MILLER et al. (2001) bedeutete eine Scherkraft von 4 kg<sup>1</sup> eine 95 %ige Verbraucherzufriedenheit hinsichtlich der Zartheit von Rindfleisch, verglichen mit lediglich 25 % Zufriedenheit bei Scherkraftwerten größer 4,9 kg. Bei Anwendung dieser Größenordnungen kann das untersuchte Schweinefleisch als durchaus zart bezeichnet werden. Der Anteil Hampshire-Genetik in der geprüften Herkunft ist möglicherweise für die Zartheit unabhängig vom Gehalt an intramuskulären Fett mitverantwortlich, was Ergebnisse von JOSELL et al. (2003) vermuten lassen. Über die Häufigkeit des Auftretens des RN-Gens in den verwendeten Kreuzungsprodukten liegen allerdings keine Angaben vor.

Die gefundenen Beziehungen zwischen IMF-Gehalt und sensorischen Merkmalen entsprechen im Wesentlichen früheren Untersuchungen, die eine bessere sensorische Bewertung mit zunehmenden intramuskulären Fettgehalten aufzeigten (FERNANDEZ et al., 1999; HEYLEN, 1999; BLANCHARD et al., 2000; CAMERON et al., 2000; FISCHER et al., 2000; KIPFMÜLLER et al., 2000; MERKS et al., 2000; BREWER et al., 2002; CHANNON et al., 2004). Wenn auch nicht immer eindeutig, so waren doch häufig mit steigenden IMF-Werten in Schweinefleisch geringere Grillverluste, höhere Saftigkeit, Zartheit und ein besserer Gesamteindruck verbunden. Die eigenen Ergebnisse unterstützen ebenfalls die These von der Existenz eines Schwellenwertes für die sensorische Wirksamkeit des IMF. Jüngst zeigten CHANNON et al. (2004), dass Verbraucher trotz des ca. 0,5 % höheren Fettgehalts keine besseren sensorischen Eigenschaften feststellen konnten – vermutlich, weil die Gehaltswerte insgesamt dennoch sehr niedrig lagen (Kastraten 1,32 %, Sauen 1,84 %).

Dass die Ergebnisse sensorischer Prüfungen von Faktoren wie geografische Herkunft, Alter und Geschlecht der Prüfpersonen sowie deren Verzehrgeohnheiten in Bezug auf Fleisch abhängen, zeigten jüngst BRYHNI et al. (2003), MCKENNA et al. (2004) und RESURRECCION (2004). Über die Neigung von Prüfpersonen, zentral zu bewerten und Extrembewertungen zu vermeiden, finden sich Hinweise bei NEUMANN (1994). Die Differenzierung der Proben ist mit weiteren strukturierten Skalen (z.B. 9-fach, 15-fach oder bis zu 23-fach) oder unstrukturierten Skalen durchaus zu steigern (YAO et al., 2003). NAES (1998) stellte eine Software zur statistischen Auswertung und Bewertung von z.B. Wiederholbarkeit oder Sensitivität der Prüfer vor, die in der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht zur Verfügung stand.

---

<sup>1</sup> Die Scherkraft wird häufig in kg angegeben. Der Umrechnungsfaktor in die ebenfalls gebräuchliche Einheit N beträgt 9,81 (entspricht der Konstante g in m/s<sup>2</sup>).

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht angesichts der Ergebnisse von z.B. WHEELER et al. (2004) oder LORENZEN et al. (2003) hinsichtlich der Relevanz von Laborprüfungen für die verbraucherseitige Akzeptanz von Fleisch. Möglicherweise führen züchterische Verbesserungen des Fleisches über eine Steigerung des intramuskulären Fettgehaltes zwar zu signifikant verbesserten sensorischen Eindrücken unter Laborbedingungen mit trainierten Prüfpersonen oder z.B. Warner-Bratzler-Scherkraftmessungen, nicht aber zu eindeutig besseren Bewertungen durch Verbraucher. Ungeachtet der sensorischen Fähigkeiten der Konsumenten beeinflussen bei der *in-home*-Situation zusätzliche Faktoren wie Zubereitung oder Würzung den sensorischen Eindruck.

#### **5.4 Einfluss der untersuchten Effekte auf die Ultraschallparameter**

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen dargestellt. Tabelle 16 gibt zunächst einen Überblick über das Signifikanzniveau der untersuchten Effekte (Gruppe, Messrichtung und Messzeitpunkt) auf die berechneten akustischen Parameter.

Der Schlachtgruppeneffekt umfasst neben dem Effekt der Zusammensetzung der Tiergruppe auch Einflüsse, wie sie häufig bei Untersuchungen zur Fleischqualität beobachtet werden, z.B. Temperatur des Brühbades, unterschiedliche Transport- und Wartezeiten der Tiere bis zur Schlachtung, und Effekte, die mit der Bedienung des Ultraschallsystems einhergehen, z.B. veränderte Geräteeinstellungen, die nicht vollständig durch die Korrekturalgorithmen bei der Parameterberechnung korrigiert werden können.

Die Messrichtung, d.h. die Orientierung des Schallwandlers bei der Datenaufnahme ist eindeutig in der Versuchsanstellung gewählt (quer bzw. parallel zur Längsachse des Schlachtkörpers respektive zur Muskelfaserrichtung) und sollte bisherigen Erkenntnissen zur Anisotropie akustischer Eigenschaften des Muskelgewebes (ROBERJOT et al., 1994; SMITH, 1996; TOPP et al., 1998; TOPP et al., 2000) Rechnung tragen.

Die verschiedenen Messzeitpunkte sind im Wesentlichen durch 2 Faktoren gekennzeichnet: die Schlachtkörpertemperatur (warm/kalt) und den Zerlegegrad bzw. das Vorhandensein der Speckschicht. Die Versuchsanordnung wurde so gewählt, dass sich mit jeder Stufe im Schlachthofprozess (Schlachtkörper warm, Schlachtkörper kalt, Lachs) jeweils nur einer der Faktoren ändert, um die Einflüsse gezielt untersuchen zu können.

**Tabelle 16:** Signifikanzniveau der untersuchten Effekte auf Parameter der Ultraschallausbreitung im *M. longissimus* der untersuchten Schweineschlachtkörper

	Schlachtgruppe	Messrichtung	Messzeitpunkt
ALPHA <sub>2,5</sub> <sup>1)</sup>	**2)	***	***
ALPHA <sub>2,75</sub>	*	***	***
ALPHA <sub>3,0</sub>	n.s.	**	***
ALPHA <sub>3,25</sub>	**	***	***
ALPHA <sub>3,5</sub>	*	***	***
ALPHA <sub>3,75</sub>	*	***	***
ALPHA <sub>4,0</sub>	n.s.	**	***
RA <sub>3,0</sub>	**	**	***
RA <sub>3,5</sub>	***	**	***
RA <sub>4,0</sub>	***	**	***
RR <sub>3,0</sub>	**	**	***
RR <sub>3,5</sub>	***	**	***
RR <sub>4,0</sub>	***	**	***
A <sub>2,5</sub>	***	***	***
A <sub>2,75</sub>	***	***	***
A <sub>3,0</sub>	***	***	***
A <sub>3,25</sub>	***	***	***
A <sub>3,5</sub>	***	***	***
A <sub>3,75</sub>	***	***	***
A <sub>4,0</sub>	***	***	***
MR <sub>2,5</sub>	***	***	***
MR <sub>2,75</sub>	***	***	***
MR <sub>3,0</sub>	***	***	***
MR <sub>3,25</sub>	***	***	***
MR <sub>3,5</sub>	***	***	***
MR <sub>3,75</sub>	***	***	***
MR <sub>4,0</sub>	***	***	***

<sup>1)</sup> Zahlenindex: Frequenz in MHz; <sup>2)</sup> Signifikanzniveaus: \* p < 0,05, \*\* p < 0,01, \*\*\* p < 0,001

Tabelle 9 (Fortsetzung)

	Schlachtgruppe	Messrichtung	Messzeitpunkt
DBC <sub>2,5</sub>	*	***	***
DBC <sub>2,75</sub>	***	***	***
DBC <sub>3,0</sub>	***	***	***
DBC <sub>3,25</sub>	***	***	***
DBC <sub>3,5</sub>	*	***	***
DBC <sub>3,75</sub>	n.S.	***	***
DBC <sub>4,0</sub>	n.S.	***	***
BCMAX <sub>2,5</sub>	***	***	***
BCMAX <sub>2,75</sub>	***	***	***
BCMAX <sub>3,0</sub>	***	***	***
BCMAX <sub>3,25</sub>	***	***	***
BCMAX <sub>3,5</sub>	***	***	***
BCMAX <sub>3,75</sub>	***	***	***
BCMAX <sub>4,0</sub>	***	***	***
IOBC <sub>2,5</sub>	***	n.S.	***
IOBC <sub>2,75</sub>	***	n.S.	***
IOBC <sub>3,0</sub>	**	*	***
IOBC <sub>3,25</sub>	**	**	***
IOBC <sub>3,5</sub>	***	n.S.	***
IOBC <sub>3,75</sub>	**	**	***
IOBC <sub>4,0</sub>	**	n.S.	***
MWCF	***	***	***
CFDS	***	***	***
IAC	n.S.	**	***
IOA	***	***	***
IBCREL	***	**	***
MWSWP	n.S.	***	***
DSWP	n.S.	**	***
BW	n.S.	*	***
CPN	*	***	***
CA	***	*	***
CFP	***	n.S.	***
CPMD	***	n.S.	***

Der Messzeitpunkt erweist sich als höchst signifikanter Einflussfaktor auf sämtliche erhobenen Ultraschallparameter. Aber auch die Messrichtung und die Schlachtgruppe zeigen hoch signifikante Effekte auf nahezu alle akustischen Parameter. Aufgrund der Vielfältigkeit der Einflussmöglichkeiten und deren unmöglicher Berücksichtigung im Rahmen der gewählten Versuchsanstellung bleibt der Schlachtgruppeneffekt in der weiteren Auswertung von untergeordnetem Interesse.

In den folgenden Abschnitten werden insbesondere diejenigen Parameter unter Beachtung der Effekte näher betrachtet, die am häufigsten Gegenstand früherer Untersuchungen zur Bestimmung des IMF bzw. zur diagnostischen Gewebecharakterisierung waren: frequenzabhängiger Dämpfungskoeffizient  $\text{ALPHA}(f)$ , Anstieg des Dämpfungskoeffizienten über Tiefe und Frequenz IOA, relativer frequenzabhängiger Rückstreuparameter  $\text{RR}(f)$  bzw. Integral des Rückstreukoeffizienten IBCREL (PARK et al., 1990; WHITTAKER et al., 1992; PARK et al., 1994; ROBERJOT et al., 1994; AMIN et al., 1995; BALDEWECK et al., 1995; SMITH, 1996; JENDERKA et al., 1999; MADSEN et al., 1999; ABOU EL KARAM et al., 2000; JENDERKA et al., 2000; TOPP et al., 2000; WATSON et al., 2000; WEAR et al., 2000; ANDERSON et al., 2001; GÄRTNER, 2001; OSSANT et al., 2001; RAJU et al., 2001).

#### 5.4.1 Einfluss des Messzeitpunktes

In Tabelle A 1 sind die Ergebnisse der Varianzanalyse in Form der LS-Mittelwerte und deren Standardfehler für die akustischen Parameter in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt aufgeführt. Alle berechneten Ultraschallmerkmale sind durch signifikante Differenzen ( $p < 0,05$ ) zwischen den gewählten Messzeitpunkten gekennzeichnet.

Die höchste frequenzabhängige Dämpfung  $\text{ALPHA}(f)$  erfährt der Ultraschall an den warmen Schlachtkörpern, gefolgt von den Lachsen und den kalten Schlachtkörpern (Abbildung 5). Bei ausschließlicher Betrachtung des Frequenzbereichs bis 3 MHz ist der Verlauf der Frequenzabhängigkeit zwischen den Messzeitpunkten ähnlich, d.h. die Anstiege verlaufen parallel und nahezu linear. Bei darüber hinaus steigender Frequenz sinkt die Dämpfung des Ultraschalls an kalten Schlachtkörpern, während sie an den warmen Schlachtkörpern bzw. Lachsen weiter steigt. Auch der Frequenzbereich von 3,25 bis 4,0 MHz ist durch einen nahezu linearen Anstieg der Dämpfung mit zunehmender Frequenz gekennzeichnet.

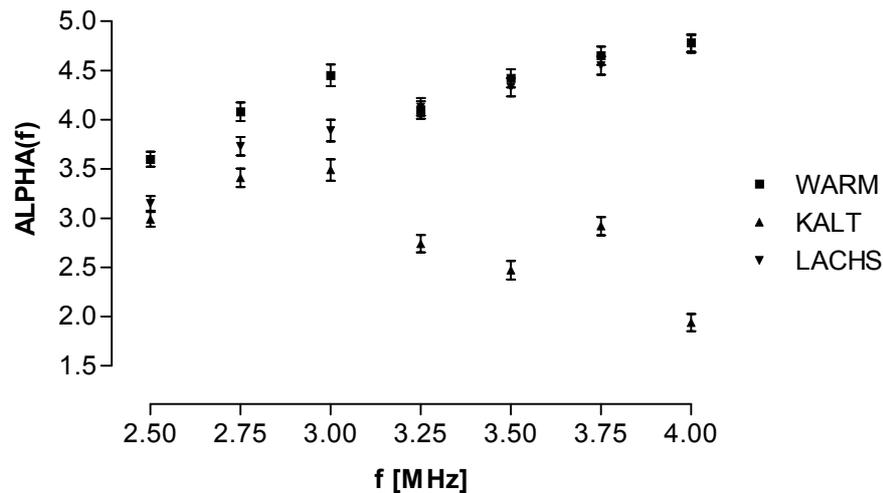


Abbildung 5: Frequenzabhängige Dämpfung ALPHA(f) in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Ultraschall-Datenaufnahme; LS-Mittelwerte und Standardfehler

Der Dämpfungskoeffizient IOA ergibt sich als Anstieg der frequenzabhängigen Dämpfung über den untersuchten Frequenzbereich von 2,5 bis 4,0 MHz mittels linearer Anpassung. Die gewählten Messbedingungen resultieren in signifikanten Differenzen, wobei die Zunahme der Dämpfung über Ausbreitungstiefe und Frequenz des Ultraschalls am stärksten bei den Lachsen ausgeprägt ist (Tabelle 17).

Tabelle 17: LS-Mittelwerte und Standardfehler (in Klammern) des Dämpfungskoeffizienten IOA in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt

	WARM	KALT	LACHS
IOA [dB*MHz <sup>-1</sup> *cm <sup>-1</sup> ]	0,48 (0,020) <sup>a</sup>	-0,45 (0,020) <sup>b</sup>	0,68 (0,020) <sup>c</sup>

Index markiert signifikante Unterschiede (p < 0,05)

Noch deutlicher werden die Dämpfungsunterschiede anhand von ALPHA(f) bzw. IOA zwischen den Messzeitpunkten bei ausschließlicher Betrachtung von Daten, die quer zur Muskelfaserrichtung erhoben wurden (ohne Abbildung).

Die absolute Höhe des Dämpfungskoeffizienten bei diskreten Frequenzen ALPHA(f) befindet sich in relativ guter Übereinstimmung zu Ergebnissen von SMITH (1996), die an Rindfleisch *in vitro* eine Dämpfung bei 3 MHz Sendefrequenz von ca. 2,82 bzw. 3,84 dB/cm bei Ausrichtung des Ultraschalls quer bzw. längs zur Faser ermittelte – allerdings ohne Angabe der Temperatur. Im Gegensatz zu den eigenen Ergebnissen wurde eine Linearität des Anstieg des Dämpfungskoeffizienten mit der Frequenz aufgrund früherer Ergebnisse von ROBERJOT et al. (1994), BALDEWECK et al. (1995)

und SMITH (1996) erwartet. Die Ergebnisse hinsichtlich der Anstiegshöhe des Dämpfungskoeffizienten IOA bestätigen Untersuchungen von SMITH (1996), in denen die Dämpfung in Muskelgewebe mit der Frequenz und der Ausbreitungstiefe bei niederen Temperaturen stärker als bei höheren Temperaturen ansteigt. Im Gegensatz zu den vorliegenden Ergebnissen war in den Untersuchungen von SMITH (1996) bzw. ABOU EL KARAM et al. (1997) die absolute Dämpfung bei höheren Temperaturen jedoch geringer.

Beim Vergleich der Befunde hinsichtlich der Höhe absoluter Parameter ist darauf hinzuweisen, dass die vorliegenden Ergebnisse auf Impuls-Echo-Messungen basieren. In den zitierten Untersuchungen erfolgten die Ultraschallmessungen jedoch in Transmission unter Laborbedingungen. Dies umfasst die Verwendung anders konstruierter (Einzelelement-) Schallwandler, wobei u.a. systemspezifische Übertragungseigenschaften einfacher korrigiert werden können, sowie die Messungen an Muskelproben im temperierten Wasserbad und Mikropositioniersysteme zur exakten Ausrichtung der Wandler in Bezug auf die Muskelstruktur (ROBERJOT et al., 1994; SMITH, 1996).

Eine Ursache für den an den kalten Schlachtkörpern beobachteten Abfall der Dämpfung ist wahrscheinlich darin begründet, dass das Sendeultraschallsignal insbesondere bei den höheren Frequenzen durch die Speckauflage und die niedrige Schlachtkörpertemperatur bereits so stark geschwächt ist, dass die eingeschallte Leistung im Zielgewebe des *M. longissimus* nicht mehr ausreichend starke Rückstreuung bewirkt, um die akustischen Parameter sicher berechnen zu können. Ein Indiz für den unzureichenden Signal-Rausch-Abstand SNR (engl.: *signal-to-noise ratio*) der Ultraschallechos während dieser Messungen war bereits bei der Datenaufnahme am Bildschirm des B-Bild-Gerätes in Form schwacher Echos und fehlender Textur (*speckle*) im Bild zu erkennen. Rechnerisch besteht die Möglichkeit, einen solchen Index zu erstellen. Die für das verwendete Ultraschallgerät entwickelte Software sah dies jedoch nicht vor, so dass die Unterschiede der Signal-Rausch-Abstände zwischen den Messzeitpunkten hier nicht quantifiziert werden können.

Eine weitere Ursache für die unerwarteten Werte ist möglicherweise darin zu sehen, dass die Algorithmen zur Korrektur der systemspezifischen Übertragungseigenschaften nicht ausreichend an die verschiedenen Messbedingungen angepasst sind. Bei Transmissionsmodus-Experimenten sind die Systemeigenschaften einfacher zu ermitteln und zu korrigieren, da sich Sende- und Empfangseigenschaften bauartbedingt getrennt erfassen lassen. Dies ist bei einem Puls-Echo-System, wie dem hier eingesetzten, nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich (GÄRTNER, 2001). Zumindest das Sende-

schallfeld des verwendeten Ultraschallwandlers Wobbler AA5A wurde jedoch mithilfe eines zweiten Wandlers vermessen und fand Berücksichtigung in den Korrekturfunktionen (BRAND, 2004). Die Schallfeldkorrektur- und Dämpfungskorrekturfunktionen wurden im Rahmen dieses Kooperationsprojektes im Labor bei Raumtemperatur (ca. 21 °C) erstellt und entsprechen möglicherweise weder den Bedingungen am warmen (ca. 37 °C) noch am gekühlten Schlachtkörper (ca. 4 °C) in idealer Weise. Zur optimalen Anpassung an die Temperaturbedingungen wäre ein temperierbarer Schallfeldmessplatz erforderlich, der nicht zur Verfügung stand. Darüber hinaus beruht die Korrekturfunktion zur Egalisierung der speckdickenbedingten Dämpfung auf Referenzmessungen an nur einer Speckschicht. Die Zusammensetzung des Rückenspecks in Bezug auf den Fett- bzw. Wassergehalt ist jedoch variabel (SCHWÖRER et al., 1997), und die Ausbreitungseigenschaften von Ultraschall sind verschieden in Fett bzw. Wasser (PARK et al., 1990; WHITTAKER et al., 1992; ANDERSON et al., 2001; BENEDITO et al., 2001) und selbst innerhalb der verschiedenen Hautschichten des Schweins (BALDEWECK et al., 1995). Darüber hinaus gilt es, eine Interaktion von Gewebezusammensetzung und Temperatur zu berücksichtigen (SMITH, 1996; BENEDITO et al., 2001). Für eine optimierte Korrekturfunktion, die der biologischen Variabilität der Speckzusammensetzung einschließlich der Temperatureinflüsse Rechnung trägt, wären also weitaus umfangreichere Labormessungen und zusätzliche apparative Ausstattung erforderlich.

Die größte absolute Rückstreuung  $RA(f)$  tritt an den warmen Schlachtkörpern auf. Sie ist deutlich niedriger ( $p < 0,05$ ) an den kalten Schlachtkörpern und nochmals geringer ( $p < 0,05$ ) an den Lachsen (Abbildung 6).

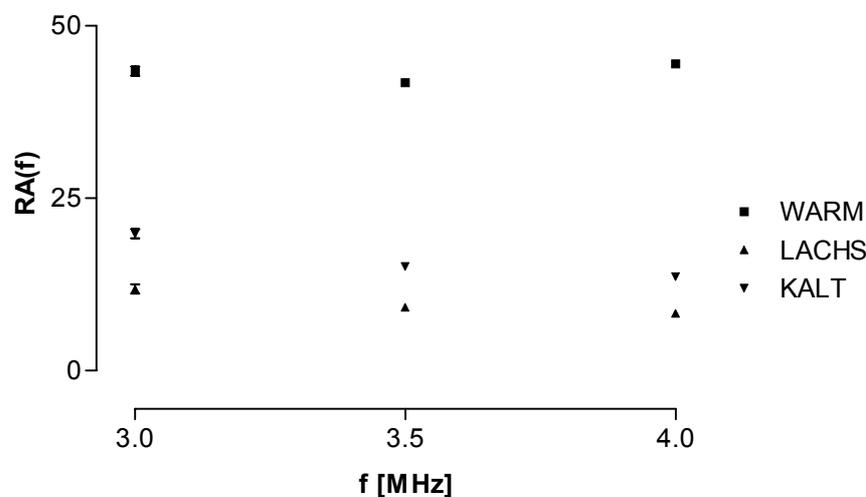


Abbildung 6: Frequenzabhängige absolute Rückstreuung in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (LS-Mittelwerte und Standardfehler)

In Tabelle A 1 sind die Rückstreukoeffizienten relativ zur Rückstreuung in einem Referenzphantom  $RR(f)$  angegeben. Dabei entsprechen numerisch kleinere Werte einer höheren absoluten Rückstreuung des Ultraschalls in dem untersuchten Gewebe des *M. longissimus*. Eine Frequenzabhängigkeit der Rückstreuung ist im Gegensatz zu ANDERSON et al. (2001) und TOPP et al. (2001) nicht zu erkennen, jedoch ist tendenziell eine leichte Verminderung der Rückstreuung mit zunehmender Frequenz bei den gekühlten Schlachtkörpern bzw. Lachsen zu beobachten.

Signifikante Differenzen zwischen den Messzeitpunkten sind auch für die mittleren Rückstreuwerte  $MR(f)$  festzustellen. Dabei fällt der Unterschied zwischen den warmen und kalten Schlachtkörpern deutlich höher aus als zwischen den Messungen an kalten Schlachtkörpern bzw. Lachsen (Abbildung 7). Sehr ähnlich verhält sich auch die maximale Rückstreuung  $BCMAX(f)$  in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (Tabelle A 1).

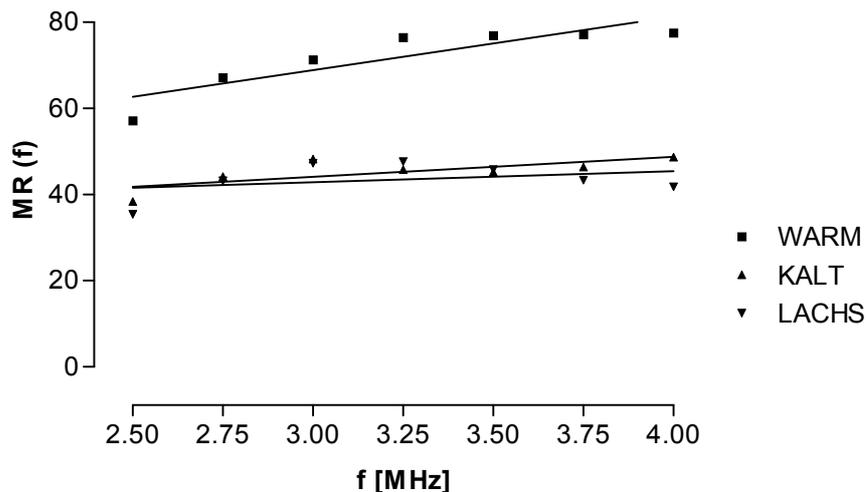


Abbildung 7: Mittlere Rückstreuung  $MR(f)$  in der ROI in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (LS-Mittelwerte)

Der Anstieg der mittleren Rückstreuung über den untersuchten Frequenzbereich erreicht stark von der Literatur abweichende Werte. Allerdings erfolgte die Berechnung der akustischen Parameter in der vorliegenden Untersuchung, bedingt durch die Bauart und die daraus resultierenden akustischen Eigenschaften des Schallwandlers, für einen vergleichsweise schmales Frequenzband (2,5 bis 4,0 MHz), während in anderen Studien durch die Einbeziehung größerer Frequenzbereiche von z.B. 2-7 (SMITH, 1996), 4-10 MHz (TOPP et al., 2001) und 18 MHz Bandbreite (BALDEWECK et al., 1995) die Parameterschätzung auf einer breiteren Basis stand. Die Mehrzahl der veröffentlichten Untersuchungen erfolgte dabei im Gegensatz zur vorliegenden *in vitro* bzw. in

---

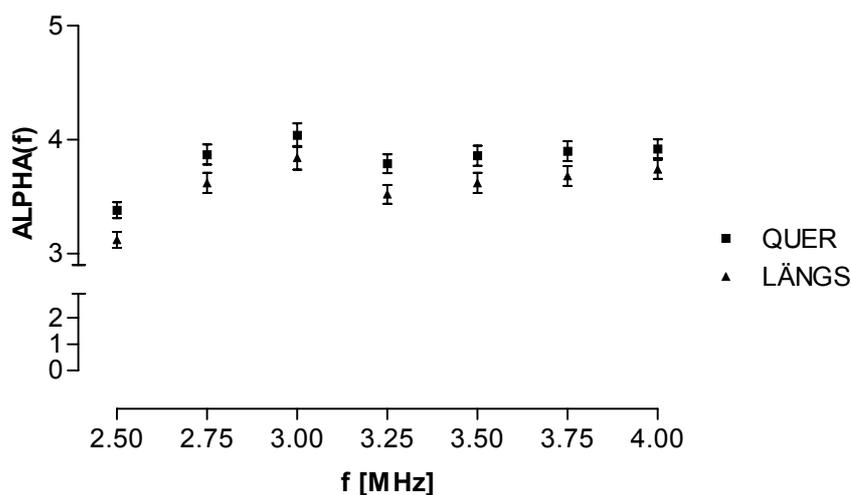
tersuchungen erfolgte dabei im Gegensatz zur vorliegenden *in vitro* bzw. in Transmission. Die Daten von TOPP et al. (2001) beruhen zwar ebenfalls auf Puls-Echo-Messungen *in vivo*, aber an narkotisierten Tieren mit physiologischer Blutzirkulation. Eine Beeinflussung der akustischen Eigenschaften von Gewebe durch Entblutung, die im vorliegenden Fall den Datenaufnahmen voraus ging, diskutierten ANDERSON et al. (2001). Demnach ist die Rückstreuung in entblutetem Gewebe geringer als in durchblutetem Zustand.

Ein weiterer Unterschied zwischen den Messzeitpunkten besteht darin, dass die Messungen an den warmen Schlachtkörpern hängend erfolgten, die kalten Schlachtkörper jedoch liegend untersucht wurden. Möglicherweise ergeben sich durch die Zugbelastungen an der Muskulatur der hängenden Schlachtkörper zusätzliche Veränderungen der Ausbreitungseigenschaften des Ultraschalls, die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung aber nicht näher betrachtet werden konnten.

### 5.4.2 Einfluss der Messrichtung

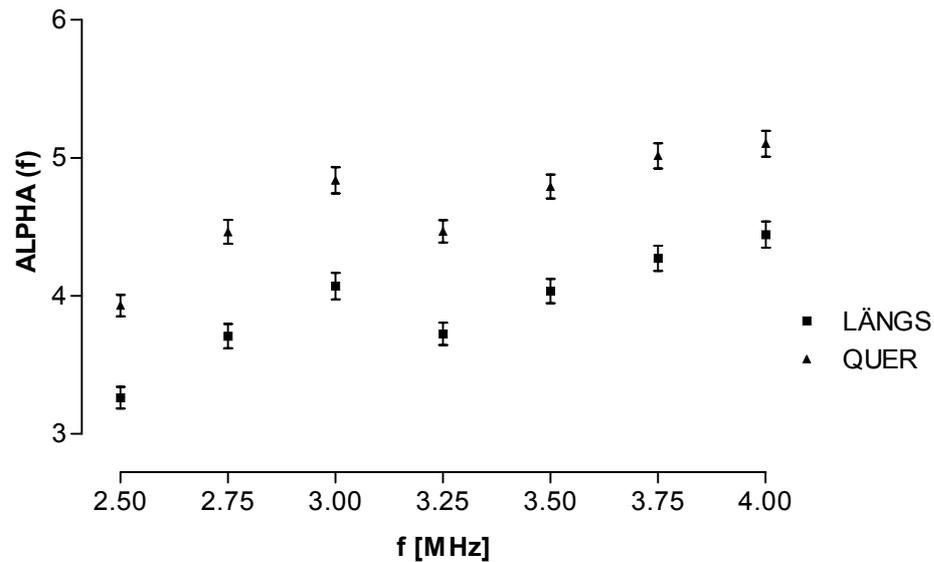
Eine weitere Zielsetzung der Untersuchung war es, den Einfluss der Ausbreitungsrichtung des Ultraschalls relativ zur Muskelfaserrichtung des *M. longissimus* auf die akustischen Parameter bei Messungen im Puls-Echo-Verfahren zu bestimmen. In Tabelle A 2 sind die entsprechenden LS-Mittelwerte dargestellt. Die Messrichtung erweist sich für nahezu alle Parameter als hochsignifikanter Effekt.

Am Beispiel des frequenzabhängigen Dämpfungskoeffizienten  $\text{ALPHA}(f)$  werden richtungsbedingte Differenzen deutlich, wobei in Querrichtung die höheren absoluten Koeffizienten auftreten (Abbildung 8). Der Anstieg des Dämpfungskoeffizienten IOA über den untersuchten Frequenzbereich ist hingegen in Längsrichtung höher.



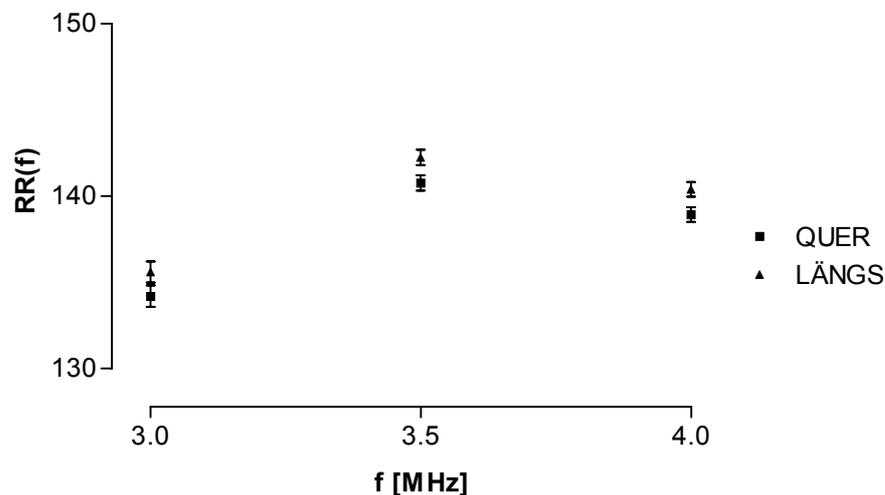
**Abbildung 8:** Frequenzabhängige Dämpfung  $\text{ALPHA}(f)$  in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung (LS-Mittelwerte und Standardfehler)

Noch stärkere Anisotropieeffekte ergeben sich bei ausschließlicher Betrachtung von Daten, die an warmen Schlachtkörpern erfasst wurden. In Querrichtung werden im Mittel ca. 0,7 dB höhere Dämpfungswerte erreicht (Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Frequenzabhängige Dämpfung des Ultraschalls an warmen Schlachtkörpern in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung (Rohmittelwert und Standardfehler)

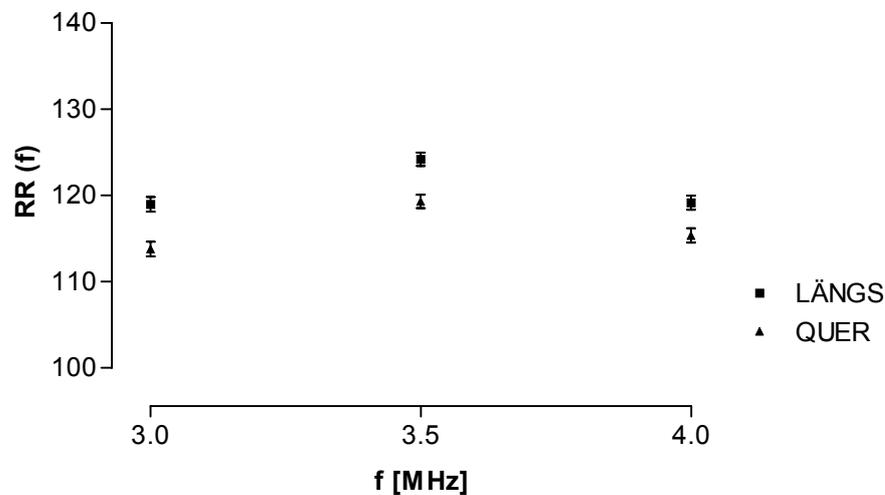
Analog zur Anisotropie des frequenzabhängigen Dämpfungskoeffizienten verhält sich auch die relative frequenzabhängige Rückstreuung  $\text{RR}(f)$  richtungsabhängig. Dabei werden die höheren Werte bei Messungen parallel zur Muskelfaserrichtung erreicht (Abbildung 10).



**Abbildung 10:** Frequenzabhängige relative Rückstreuung  $\text{RR}(f)$  in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserrichtung (LS-Mittelwerte und Standardfehler)

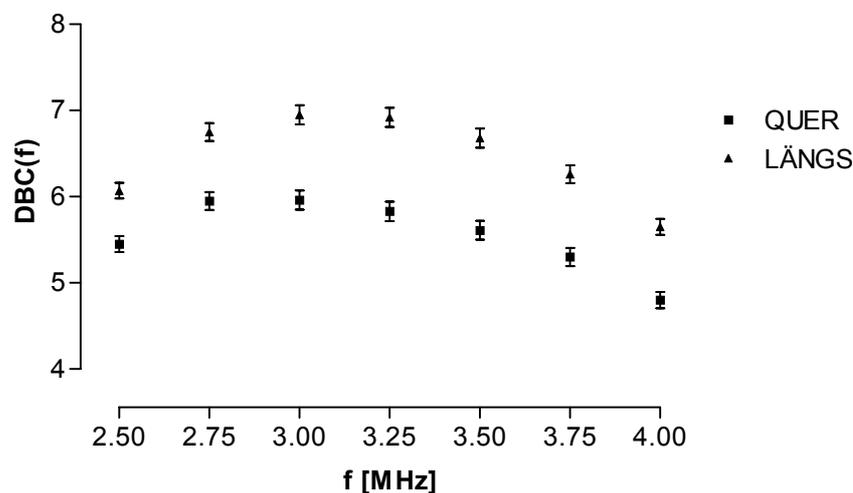
An warmen Schlachtkörpern lassen sich parallel zu  $\text{ALPHA}(f)$  ebenfalls deutlich größere Unterschiede zwischen den gewählten Messrichtungen beobachten, als dies über das

Gesamtmaterial bzw. an kalten Schlachtkörpern oder Lachsen separat möglich ist (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Frequenzabhängige relative Rückstreuung  $RR(f)$  an warmen Schlachtkörpern in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls bezogen auf die Muskelfaserichtung (Rohmittelwert und Standardfehler)

Auch die Differenz zwischen maximaler und minimaler detektierter Rückstreuung  $DBC(f)$  für einzelne Ausschnitte innerhalb einer ROI ist bei den Längsmessungen signifikant größer (Abbildung 12).



**Abbildung 12:** Differenz zwischen maximalem und minimalem Rückstreusignal  $DBC(f)$  innerhalb der ROI in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Ultraschalls relativ zur Muskelfaserichtung im *M. longissimus* (LS-Mittelwerte und Standardfehler)

Generell wird deutlich, dass die Einfallsrichtung des Ultraschalls in Bezug zur Muskelfaserichtung für die Spektralparameter von Relevanz ist, wenngleich das Ausmaß der

Anisotropie in Abhängigkeit von den sonstigen Messbedingungen unterschiedliche Dimensionen annimmt und von Literaturangaben abweicht oder diesen widerspricht. So wies SMITH (1996) am bovinen *M. semitendinosus in vitro* detailliert nach, dass der Dämpfungskoeffizient [dB/cm] -anders als in der vorliegenden Arbeit- parallel zur Faserrichtung deutlich am größten ist; die Differenz betrug ca. 1,25 dB. Nach ROBERJOT et al. (1994), ABOU EL KARAM et al. (1997) und TOPP et al. (2000) ist im Gegensatz zu den vorliegenden Ergebnissen der Rückstreuoeffizient senkrecht zur Muskelfaserrichtung am größten. Auffällig sind deutlich größere Standardabweichungen der Dämpfungsparameter bei Messungen im Winkel von 90° zur Muskelfaser verglichen mit 45° in den Untersuchungen von TOPP et al. (2000). Außerdem überlagern sich dort die Einflüsse der Messrichtung mit der Variabilität des Tiermaterials.

Analog zum Einfluss des Messzeitpunktes auf die akustischen Parameter muss angesichts der zur Literatur widersprüchlichen Ergebnisse hinsichtlich der Anisotropie der hier verwendete Messaufbau berücksichtigt werden. Erstmals wurden hier umfassende Untersuchungen an einer Vielzahl intakter Schweineschlachtkörper mit einem klinischen B-Bild-Gerät im Impuls-Echo-Verfahren vorgenommen. In der Vergangenheit wurden stattdessen *in vitro* -Versuche an seziiertem Muskel von z.B. Ratte (TOPP et al., 2000) oder Rind (ROBERJOT et al., 1994) in Transmission durchgeführt, wobei sehr aufwändige, präzise Mikropositioniersysteme für die Ultraschallwandler zum Einsatz kamen. Mit dem verwendeten mechanischen Sektorscanner ist bei Ausrichtung parallel zur Längsachse des Schlachtkörpers dennoch kein diskreter Einfallswinkel des Ultraschalls gegeben. Der Einsatz eines *array*-Wandlers mit zeitversetzt angeregten Elementen würde eher eine gleichmäßige Einfallsrichtung des Ultraschalls in Bezug auf die Muskelfaserstruktur gewährleisten, so dass unter solchen Bedingungen sicherere Aussagen über die Anisotropie der akustischen Parameter getroffen werden könnten. Vergleichbare Untersuchungen aus der Literatur beruhen in der Regel auf Messungen im Transmissionsmodus und in einem Frequenzbereich des Ultraschalls, der deutlich oberhalb von 3,5 MHz liegt. In Verbindung mit Mikropositionierung ist mit solchen Messaufbauten eine größere Präzision der Parameterschätzung zu erwarten. Eine umfangreiche *online*-Datenerhebung in einem Schlachtunternehmen ist damit jedoch ausgeschlossen, so dass der in der vorliegenden Untersuchung gewählte Messaufbau einen Kompromiss zwischen maximaler Präzision und Praxistauglichkeit darstellen muss.

MADSEN et al. (1999) berichtete über die Vergleichbarkeit der Bestimmung verschiedener Ultraschallparameter (Ausbreitungsgeschwindigkeit, Dämpfungskoeffi-

zient, Rückstreuoeffizient) an einem Referenzphantom in 10 Laboren. Dabei ließen sich, im Vergleich zum Rückstreuoeffizienten, Dämpfungskoeffizient und Ausbreitungsgeschwindigkeit am ehesten reproduzieren. Eindeutige Nachteile bestimmter Laborsysteme/Messaufbauten wurden nicht nachgewiesen; auch im Impuls-Echo-Verfahren war eine exakte Parameterbestimmung machbar. Einschränkend soll dabei erwähnt werden, dass ausschließlich homogenes, Gewebe simulierendes Phantommaterial untersucht wurde.

Der allgemeine Erwartungswert für die Dämpfung in Weichgewebe in Höhe von  $0,5 \text{ dB}/(\text{cm} \cdot \text{MHz})$  (GÄRTNER, 2001) kann in den eigenen Untersuchungen zumindest für die Messungen an den warmen Schlachtkörpern bestätigt werden. Den einzig vorliegenden Anhaltspunkt zum Vergleich von akustischen Parametern in porcinem Gewebe liefern TOWA et al. (2002) und MILLER et al. (2002) anhand von Messungen an Inter-costalgewebe mit variablen Gewebeanteilen in Abhängigkeit vom Alter der untersuchten Schweine (ca. 55-66 % Muskel, 19-37 % Fettgewebe und 15-21 % Haut). Der durchschnittliche Anstieg des Dämpfungskoeffizienten über den untersuchten Frequenzbereich von 3,1-8,6 MHz betrug zwischen 1,16 und  $1,29 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{MHz}^{-1}$ , also mehr als doppelt so starke Anstiege im Vergleich zu den vorliegenden Ergebnissen. Dabei ist der ca. 10-fach höhere Fettgehalt dieses Gewebes gegenüber dem *M. longissimus* zu beachten. Tendenziell bewirkt ein steigender Fettgehalt eine Zunahme des Anstiegs des Dämpfungskoeffizienten bei konstanter Temperatur (SMITH, 1996). Darüber hinaus besteht im vorliegenden Fall möglicherweise eine Überkompensation der Dämpfung bei der Parameterschätzung. Verfahren zur exakteren Schätzung akustischer Parameter auf der Basis des Signal-Rausch-Abstandes und daraus folgender Gewichtung einzelner Frequenzanteile stellen OELZE et al. (2002a,b) vor.

Die Messungen am Lachs resultieren in nur minimalen Differenzen zwischen den unterschiedlichen Einfallrichtungen des Ultraschalls (ohne Abbildungen). Hier überlagert möglicherweise der Einfluss der Temperatur oder der fehlenden Speckschicht die Einflüsse der Ausbreitungsrichtung bzw. ist die Anpassung der Korrekturfunktionen für die Messbedingungen nur unzureichend, so dass die Unterschiede nicht erfasst werden können. Die fehlende vorgelagerte Speckschicht führt u.a. dazu, dass der Fokusbereich des eingesetzten Wandlers und der Bereich der ROI-Position im *M. longissimus* stärker voneinander abweichen als bei Messungen am Schlachtkörper mit Rückenspeckauflage, und die Genauigkeit der Parameterschätzung deshalb abnimmt. Die Be-

deutung der Fokusregion für die Präzision der Ultraschallparameter wird detailliert erläutert in BRAND (2004).

Der Parameter  $DBC(f)$  wurde als Messgröße zur Verdeutlichung von Anisotropieeffekten innerhalb der ROI eingeführt. Jedoch sind die absoluten Unterschiede zwischen den Messrichtungen geringer, als der gewählte Messaufbau und die Literaturwerte erwarten ließen. So wären bei Messungen parallel zur Muskelfaserrichtung erheblich größere Differenzen der maximalen Rückstreuwerte als Folge der weniger diskret ausgerichteten Ultraschallwellen plausibel gewesen. Derartiges konnte im Versuch jedoch nicht bestätigt werden. Ursächlich ist eventuell, dass die Extraktion der maximalen Rückstreuung aus sehr kleinen Segmenten der ROI (nur jeweils 3 Linien; siehe auch 5.5) für eine sichere Parameterbestimmung nicht ausreicht. Indizien dafür finden sich auch im folgenden Abschnitt (5.5) in Form geringerer Wiederholbarkeiten für diesen Parameter.

## 5.5 Wiederholbarkeit der US-Parameterbestimmung

In Tabelle A 3 sind die Intraklasskorrelationskoeffizienten als Maß für die Wiederholbarkeit der mehrfachen Messungen je Schlachtkörper in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt bzw. der Messrichtung in Bezug auf die Muskelfaserrichtung dargestellt.

Im Vergleich zwischen den verschiedenen, für diskrete Frequenzen berechneten Parametertypen ist die jeweils höchste bzw. geringste Wiederholbarkeit der Amplituden des Leistungsspektrums  $A(f)$  bzw. des richtungsabhängigen Anstiegs des Rückstreuoeffizienten  $IOBC(f)$  auffällig. Die Koeffizienten erreichen maximal Werte von  $r = 0,97$  für  $A(f)$  bzw. überschreiten  $r = 0,15$  nicht ( $IOBC(f)$ ). Mittlere bis hohe Intraklasskorrelationen werden ebenfalls, mit Ausnahme der Messungen am Lachs, für den Dämpfungskoeffizienten  $ALPHA(f)$  erreicht ( $r = 0,44$  bis  $0,76$ ). Die mit Abstand geringste Wiederholbarkeit ist für die Parameter  $IOBC(f)$  und, außer bei Messungen an kalten Schlachtkörpern mit Speckauflage, für  $DBC(f)$  möglich. Diese Parameter beinhalten neben der Frequenzabhängigkeit auch eine Richtungsabhängigkeit der Rückstreuung innerhalb der jeweils ausgewerteten ROI.

Sehr ähnliche Intraklasskorrelationen zeichnen jeweils die Rückstreuparameter  $BCMAX(f)$  und  $MR(f)$  bzw.  $RA(f)$  und  $RR(f)$  aus. Unter den Einzelparametern sind für die mittlere Mittenfrequenz  $MWCF$ , den Cepstralparameter  $CPN$  sowie für den integrierten Dämpfungskoeffizienten  $IAC$  die höchsten Wiederholbarkeiten zu verzeichnen.

Die im Vergleich zwischen den Einzelparametern niedrigste Intraklasskorrelation kennzeichnet den Anstieg des Dämpfungskoeffizienten über Tiefe und Frequenz IOA an warmen Schlachtkörpern.

Beim Vergleich der Messzeitpunkte lässt sich hinsichtlich der Wiederholbarkeit eine deutliche Überlegenheit der Datenaufnahmen an kalten Schlachtkörpern ableiten. Die Intraklasskorrelationen der wiederholten Messungen am Lachs fallen mit wenigen Ausnahmen, z.B. BC<sub>MAX</sub>(f) und MR(f), vergleichsweise am geringsten aus. Am deutlichsten wird dies sichtbar bei den Rückstreuparametern ALPHA(f), RA(f), RR(f) und A(f). Die Cepstralparameter erreichen Wiederholbarkeiten in vergleichbarer Größenordnung zwischen den Messzeitpunkten. Insbesondere die Messungen an den kalten Schlachtkörpern sind durch eine starke Frequenzabhängigkeit der Wiederholbarkeit gekennzeichnet. Dabei steigen die Koeffizienten mit der untersuchten Frequenz – z.B. von  $r = 0,73$  (A<sub>2,5</sub>) bis  $r = 0,97$  (A<sub>4,0</sub>). Die Parameter aus Messungen an warmen Schlachtkörpern bzw. am Lachs führen nicht zu einer derartig stark ausgeprägten Frequenzabhängigkeit der Wiederholbarkeitskoeffizienten.

Hinsichtlich der Messrichtung ist bei Messungen an kalten Schlachtkörpern quer zur Muskelfaserrichtung eine deutlich höhere Wiederholbarkeit von DBC(f) im Vergleich zu den anderen Messzeitpunkten und Messrichtungen auffällig, während an warmen Schlachtkörpern bzw. bei Messungen am Lachs die Wiederholbarkeit längs zur Faserrichtung tendenziell höher ist.

Die Wiederholbarkeit der Bestimmung akustischer Parameter aus mehrfachen Messungen am Schlachtkörper im Puls-Echo-Betrieb ist mit einigen Ausnahmen gering und durch Einflüsse des Messzeitpunktes, der Messrichtung und des Versuchstages geprägt. Diese Einflüsse sind jedoch nicht eindeutig zu bestimmen. Ein klarer Einfluss der Messrichtung auf die Wiederholbarkeit ist den vorliegenden Daten ebenso wenig zu entnehmen wie ein eindeutiger Effekt des Messzeitpunktes. Über beide Messrichtungen ist die Wiederholbarkeit in der Regel jedoch geringer als die Wiederholbarkeit in Quer- bzw. Längsrichtung einzeln betrachtet. Tendenziell werden die Koeffizienten mit steigender Frequenz größer. Werden die Versuchstage je Messzeitpunkt getrennt ausgewertet, so ergeben sich nochmals beträchtliche Unterschiede der Intraklasskorrelationen (ohne Abbildungen oder Tabellen). Zu vermuten bleibt, dass die Einflüsse des Versuchstages durch abweichende Geräteeinstellungen (z.B. tiefenabhängige Verstärkung) verursacht werden, die mittels der empirisch erstellten Korrekturfunktionen (BRAND,

2004) im Rahmen der Parameterberechnung offenbar nicht ausreichend kompensiert werden können.

Der vergleichsweise hohen Wiederholbarkeit der Parameterbestimmung an kalten Schlachtkörpern steht relativierend gegenüber, dass den B-Bildern während der Datenaufnahme zu entnehmen war, dass die Echos aufgrund der temperaturbedingt stärkeren Dämpfung der Speckschicht sehr schwach waren und daher von einem geringen Signal-Rausch-Abstand auszugehen ist. Offenbar erlaubt das Messsystem dennoch eine reproduzierbare Detektion auch dieser sehr schwachen Echosignale, während die zugehörigen B-Bilder aufgrund mangelhafter sichtbarer Informationen zur klassischen Bildbeurteilung kaum geeignet sind.

Die geringe Wiederholbarkeit der richtungsabhängig bestimmten Rückstreuung ist sehr wahrscheinlich auf die Art der Parameterextraktion zurückzuführen. Im Gegensatz zur Berechnung der mittleren Rückstreuung  $MR(f)$  über die gesamte ROI, wurden für die Berechnung der maximalen Rückstreuung  $BCMAX(f)$  und die daraus resultierenden  $IOBC(f)$  bzw.  $DBC(f)$  die ROI in Segmente à 3 A-Linien Breite geteilt, um innerhalb dieser jeweils die Rückstreuung zu berechnen und den maximalen Wert zu bestimmen. Ziel dessen war es, die Richtungsabhängigkeit der akustischen Parameter nachzuweisen. Die geringe Linienzahl als Datengrundlage ist als eine Hauptursache für die unzureichende Wiederholbarkeit dieser Parameter anzusehen, da Gewebeinhomogenität im Vergleich zur gesamten ROI weniger gut ausgeglichen werden kann. GÄRTNER (2001) machte deutlich, dass die Mindestbreite der ROI zur sicheren Parameterschätzung 1 cm betragen sollte.

Quellen mit expliziter Darstellung von Wiederholbarkeiten der Schätzung akustischer Parameter liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht vor. Lediglich HASSEN et al. (1999) beschrieben vor einem ähnlichen Hintergrund der Versuchsanstellung, dass die Schätzfehler der IMF-Bestimmung aus Ultraschallbildern mittels Bildanalyseverfahren um 50 % sanken, wenn 4 B-Bilder je Tier verwendet werden anstelle nur eines Bildes. Im Gegensatz dazu trug eine mehrfache Datenauswahl innerhalb eines Bildes weniger zur Senkung des Schätzfehlers bei. Die maximale Intraklasskorrelation für die wiederholten IMF-Schätzungen aus B-Bildern am Rind betrug  $r = 0,66$ . Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass auch Messwiederholungen eine fehlerhafte Bedienung bzw. Einstellung des Ultraschallgerätes nicht kompensieren können und fordern daher die Festlegung von Qualitätsrichtlinien für derartige Untersuchungen. Im Vergleich zu den hier erzielten Wiederholbarkeiten sind für die Bestimmung von Linear- bzw. Flächenmaßen am Schlachtkörper oder am lebenden Tier mittels Ultraschall durchaus

chenmaßen am Schlachtkörper oder am lebenden Tier mittels Ultraschall durchaus Intraklasskorrelationen in Höhe von  $r = 0,82$  bis  $r = 0,98$  möglich (KALT et al., 1994; RÖSLER et al., 1996).

## 5.6 Korrelationen zwischen akustischen Parametern und IMF-Gehalt

Die Korrelationsanalysen ergeben, dass die Beziehungen einzelner Ultraschallparameter zum IMF-Gehalt nur schwach bis mittelstark ausgeprägt und abhängig von den in der Versuchsanstellung gewählten Messbedingungen (Zeitpunkt bzw. Messrichtung) sind. Bei Verrechnung von gemittelten US-Parametern ohne Berücksichtigung der Messrichtung, d.h. bis zu 6 Messungen je Schlachtkörper, sind an kalten Schlachtkörpern die höchsten Korrelationen zum IMF-Gehalt bis maximal  $r = 0,36$  (CFDS) bzw.  $r = -0,39$  (CPN) festzustellen (Tabelle A 4). Bei Verrechnung von Einzeldaten je Schlachtkörper sind die Koeffizienten in der Regel niedriger, aber aufgrund der größeren Stichprobenumfänge eher signifikant als bei der oben beschriebenen Verrechnung der gemittelten Parameter (Tabelle A 5).

Zwischen den Messzeitpunkten bestehen z.T. deutliche Unterschiede hinsichtlich der Korrelationshöhe, -richtung und dem zugehörigen Signifikanzniveau der verschiedenen Parameter zum intramuskulären Fettgehalt im *M. longissimus*. An warmen Schlachtkörpern sind A(f), MR(f) und BCMAX(f) signifikant zum IMF korreliert. Ausschließlich an kalten Schlachtkörpern sind ALPHA(f) und RA(f) bzw. RR(f) sowie DBC(f) signifikante Korrelationen zum IMF nachzuweisen. Anhand gemittelter Messungen am Lachs sind keine signifikanten Korrelationen zwischen Ultraschallparametern und dem intramuskulären Fettgehalt feststellbar. Bei getrennten Analysen für jeweils einzelne Messparameter in Längs- bzw. Querrichtung sind auch am Lachs Korrelationskoeffizienten bis maximal  $r = 0,19$  signifikant.

Bei näherer Betrachtung der Messrichtung weisen beinahe alle akustischen Parameter aus Datenaufnahmen quer zur Muskelfaserrichtung die tendenziell engeren Zusammenhänge zum IMF-Gehalt auf. Ursächlich dafür ist möglicherweise, dass nur bei den Quermessungen die Ultraschallwellen tatsächlich im gleichen Winkel zu allen Muskelfasern eintreffen. Bei den Längsmessungen ergeben sich aus der Konstruktion des Schallkopfes jedoch eine Bandbreite verschiedener Einfallswinkel und damit aufgrund der Anisotropie eine größere Variation der akustischen Parameter innerhalb der ROI (siehe auch 5.4.2).

Die Korrelationskoeffizienten sind bei Verrechnung von Ultraschalldaten aus Quer- und Längsmessungen mit sehr wenigen Ausnahmen höher als jeweils bei Quer- oder Längsdaten allein. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Streuung zwischen den Messungen durch Mittlung ausgeglichen und dadurch eine Annäherung an die wahre Parameterhöhe erzielt wird, obwohl signifikante Unterschiede der Ultraschallmerkmale zwischen den Messrichtungen bestehen.

Anhand nahezu identischer Korrelationskoeffizienten wird deutlich, dass im Hinblick auf die Bestimmung des IMF-Gehaltes die Aussagekraft bestimmter Parameter ähnlich ist, z.B.: RA(f) und RR(f) bzw. BCMAX(f) und MR(f). Diese Redundanz macht die Parameter weniger gut für statistische Verfahren wie Multiple Regression geeignet. Weitere Untersuchungen könnten die Frage klären, ob die Anzahl der akustischen Parameter ohne gravierenden Informationsverlust verringert werden kann.

SMITH (1996) fand z.T. hohe Korrelationen zwischen dem Anstieg des Dämpfungskoeffizienten und dem Fettgehalt in Rindfleisch um  $r = 0,8$  bis  $0,9$  bei Messungen längs bzw. quer zur Faserrichtung bei  $37\text{ °C}$ , aber auch lediglich  $r = 0,2$  nach Messungen bei  $20\text{ °C}$  quer zur Faser. Nur geringe Abweichungen der Korrelationshöhe ergaben sich bei SMITH beim Vergleich der Messrichtungen (parallel bzw. quer). Wesentlich größeren Einfluss auf die Zusammenhänge zwischen Dämpfung und Fettgehalt hatte offenbar die Art des untersuchten Muskels, wobei die engsten Beziehungen am *M. longissimus* zu beobachten waren. PARK et al. (1994) fanden bei Spektralanalysen im A-Mode nur wenige signifikante Korrelationen zum IMF in Rindfleisch bis maximal  $r = 0,89$ , die zudem stark variierten - in Abhängigkeit von der Frequenz des Sendeschalls. Bei ABOU EL KARAM et al. (1997) reichten die Korrelationen zwischen akustischen Parametern und Inhaltsstoffen nie über  $r = 0,50$  hinaus.

Anhand dieser Quellen sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den Ultraschallparametern und dem intramuskulären Fettgehalt in der vorliegenden Arbeit als eher gering einzustufen. Dabei sollte jedoch Berücksichtigung finden, dass das Basisniveau und die Merkmalsvariation des IMF im *M. longissimus* des Rindes höher sind als beim Schwein, und die jeweils verwendeten Messeinrichtungen in wesentlichen Punkten voneinander abweichen.

Zwischen den akustischen Parametern bestehen sehr viele Autokorrelationen. Auf die vollständige Darstellung von Korrelationstabellen wird aufgrund der Größe der Matrix hier verzichtet. Eine alternative Möglichkeit zur Darstellung der Zusammenhänge zwischen sehr vielen Merkmalen sind Faktoranalysen auf Basis der Korrelationen

---

zwischen den Parametern. Sie eignen sich sehr gut, um Zusammenhänge zwischen den Ultraschallparametern grafisch schnell sichtbar zu machen. Beispielfür für gemittelte US-Parameter, von Messungen an warmen Schlachtkörpern quer zur Muskelfaserrichtung, sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 die jeweiligen Ladungen der Ultraschallparameter im Faktorraum der ersten vier Faktoren dargestellt. Anhand der Faktoren 1 bis 4 sind 81 % der Variation der Ultraschallparameter erklärbar. Liegen die Parameter in verschiedenen Quadranten eines Faktors, so sind sie negativ miteinander korreliert (z.B. in Abbildung 13 die Parameter A(f) und DELTASWP und CPN). Bilden die Merkmale eine Punktwolke, sind sie hoch positiv miteinander korreliert. Dies wird besonders deutlich für die frequenzabhängigen Parameter, z.B. A(f), BCMAX(f) oder ALPHA(f).



## 5.7 Schätzung des IMF aus Ultraschallparametern in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der Regressions- bzw. Diskriminanzanalysen für den jeweiligen Messzeitpunkt aufgeführt. Die Darstellung erfolgt jeweils getrennt für Einzelmesswerte der Ultraschallparameter bzw. für gemittelte Merkmalswerte je Schlachtkörper und Messrichtung (d.h. 3 Messungen je Schlachtkörper) bzw. aus bis zu 6 Messwiederholungen je Schlachtkörper ohne Berücksichtigung der Messrichtung.

### 5.7.1 Warme Schlachtkörper

An warmen Schlachtkörpern ist die beste Vorhersage des IMF-Gehaltes unter Verwendung gemittelter Ultraschallparameter aus jeweils bis zu 6 Messungen in Quer- bzw. Längsrichtung zur Muskelfaserrichtung möglich (Tabelle 18). In diesem Fall wird ein Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,60$  bei einem Schätzfehler von  $RMSE = 0,36$  % IMF erzielt. Die Schätzfehler unter Verwendung von Parametermittelwerten aus je 3 wiederholten Messungen in Quer- bzw. Längsrichtung allein betragen 0,42 bzw. 0,49 % IMF bei Bestimmtheitsmaßen von  $R^2 = 0,46$  (quer) bzw.  $R^2 = 0,24$  (längs).

**Tabelle 18:** Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern (n = 115) an warmen Schlachtkörpern

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
$R^2$	0,46	0,24	0,60
RMSE	0,42	0,49	0,36
Parameter im Modell	ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,25</sub> BCMAX <sub>2,75</sub> BCMAX <sub>3,75</sub> IBCREL IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,5</sub> MR <sub>4,0</sub> RA <sub>4,0</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>4,0</sub> ALPHA <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>2,75</sub> CFDS IAC IBCREL IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>4,0</sub>

Werden statt gemittelter Parameter Einzelmesswerte verrechnet, ist die Güte der Regressionsmodelle deutlich geringer (Tabelle 19). Das höchste Bestimmtheitsmaß wird dann mittels Ultraschalldaten aus Messrichtung QUER erzielt ( $R^2 = 0,36$ ), gefolgt vom Modell mit allen Einzelmesswerten ungeachtet der Messrichtung ( $R^2 = 0,34$ ) und den Messungen längs zur Faser ( $R^2 = 0,27$ ).

**Tabelle 19: Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung mittels Einzelmesswerten der Ultraschallparameter an warmen Schlachtkörpern**

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
n	344	341	685
$R^2$	0,36	0,27	0,34
RMSE	0,45	0,48	0,45
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,5</sub> A <sub>4,0</sub> ALPHA <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>3,5</sub> BW CFDS DBC <sub>2,5</sub> IAC IBCREL IOA IOBC <sub>3,75</sub> IOBC <sub>4,0</sub> MR <sub>3,25</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>4,0</sub> CA CFDS CPMD DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,25</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>4,0</sub> CA CFDS CPMD DBC <sub>4,0</sub> IAC IBCREL IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,75</sub> RA <sub>3,0</sub> RA <sub>4,0</sub>

Tabelle 20 und Tabelle 21 zeigen die Ergebnisse der schrittweisen Diskriminanzanalysen zur Zuordnung der Schlachtkörper in eine Fettgehaltsklasse anhand der Ultraschallparameter. Das beste Resultat wird bei Verwendung von gemittelten Parametern je Schlachtkörper, quer zur Muskelfaserrichtung erhoben, erreicht. Anhand dieser Daten können die Schlachtkörper zu 77 % korrekt der ihrem IMF-Gehalt entsprechenden Fettgehaltsklasse bei einem Klassengrenzwert von 2,0 % IMF zugeordnet werden. Die Fehlerquote der korrekten Einordnung in die IMF-Klassen HOCH bzw. TIEF beträgt jeweils etwas mehr als 20 %. Parametermittelwerte aus Längs- und Quermessungen führen dagegen zu einem tendenziell höheren Anteil fehlerhaft klassifizierter Schlachtkörper. Bei Verrechnung von Parametereinzelnwerten erreichen die Diskriminanzfunktionen eine geringere Trenngenauigkeit im Vergleich zu den gemittelten Parametern, obwohl die Anzahl der Ultraschallparameter in den Diskriminanzfunktionen größer ist (Tabelle 21).

**Tabelle 20:** Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$  % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$  % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parametermittelwerten (n=115) bei warmen Schlachtkörpern

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
% korrekt gesamt	77	73	70
% falsch HOCH	21	53	32
% falsch TIEF	23	22	30
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,0</sub> BCMAX <sub>2,5</sub> BCMAX <sub>3,5</sub> BW IOBC <sub>3,5</sub>	A <sub>2,5</sub> CFDS DBC <sub>4</sub> DSWP IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>4,0</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub>

**Tabelle 21:** Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$  % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$  % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse anhand von Parametereinzelnwerten bei warmen Schlachtkörpern

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
n (HOCH, TIEF)	(56, 288)	(56, 285)	(112, 573)
% korrekt gesamt	70	77	65
% falsch HOCH	27	46	20
% falsch TIEF	31	18	38
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>2,75</sub> BCMAX <sub>3,25</sub> BW IBCREL IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,5</sub> MWSWP	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,0</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>3,75</sub> BCMAX <sub>2,5</sub> BCMAX <sub>3,25</sub> CA CFDS CPMD DSWP IOA IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,75</sub> MR <sub>3,25</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>3,75</sub> CPN DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,0</sub> IOBC <sub>3,75</sub>

### 5.7.2 Kalte Schlachtkörper

Die Bestimmtheitsmaße der Multiplen Regression mittels Ultraschallparameter an kalten Schlachtkörpern sind insgesamt sehr ähnlich und erreichen maximal Werte von  $R^2 = 0,26$  unter Verrechnung von gemittelten Parametern (Tabelle 22) bzw.  $R^2 = 0,23$  bei Verwendung von Einzeldaten (Tabelle 23). Die Schätzfehler liegen mit  $RMSE \sim 0,50$  % IMF jeweils in der Größenordnung von 30 % des Merkmalsmittelwertes ( $\mu = 1,51$  % IMF).

**Tabelle 22:** Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern (n = 115) an kalten Schlachtkörpern

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
$R^2$	0,26	0,26	0,25
RMSE	0,48	0,48	0,49
Parameter im Modell	CPN DBC <sub>2,5</sub> IOA RA <sub>4,0</sub>	A <sub>3,5</sub> A <sub>4,0</sub> IOA IOBC <sub>3,25</sub> RA <sub>4,0</sub>	CPN IOA RA <sub>4,0</sub> RR <sub>3,0</sub>

**Tabelle 23:** Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung mittels Einzelmesswerten der Ultraschallparameter an kalten Schlachtkörpern

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
n	343	343	686
$R^2$	0,23	0,20	0,20
RMSE	0,48	0,50	0,49
Parameter im Modell	CPN DBC <sub>2,5</sub> DBC <sub>3,75</sub> DBC <sub>4,0</sub> IOA RA <sub>4,0</sub>	CPN DBC <sub>4,0</sub> IOA IOBC <sub>2,5</sub> RA <sub>4,0</sub> RR <sub>3,0</sub>	ALPHA <sub>3,25</sub> CPN IOA IOBC <sub>2,75</sub> IOBC <sub>3,75</sub> RA <sub>4,0</sub> RR <sub>3,0</sub>

Werden die Ultraschallparameter der Messungen an kalten Schlachtkörpern der Diskriminanzanalyse unterworfen, so erweisen sich Parametermittelwerte aus Längs- und

Quermessungen als am besten geeignet, um Schlachtkörper korrekt einer von zwei IMF-Klassen bei einem Grenzwert von 2,0 % IMF zuzuordnen. Dabei ist zu beobachten, dass die Fehlerquoten für die Zuordnung in die hohe Fettgehaltsstufe jeweils niedriger sind als die Fehlerquoten für die Gruppierung in die niedrige Fettgehaltsklasse (Tabelle 24 und Tabelle 25).

**Tabelle 24:** Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$  % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$  % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parametermittelwerten an kalten Schlachtkörpern

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
% korrekt gesamt	65	72	76
% falsch HOCH	26	16	21
% falsch TIEF	36	30	25
Parameter im Modell	CPN IOA IOBC <sub>3,25</sub> IOBC <sub>4,0</sub> RR <sub>4,0</sub>	CPN IOA RA <sub>4,0</sub>	CPN IOA IOBC <sub>4,0</sub> RA <sub>4,0</sub>

**Tabelle 25:** Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$  % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$  % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parameter einzelwerten an kalten Schlachtkörpern

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
n (HOCH, TIEF)	(57, 286)	(57, 286)	(114, 572)
% korrekt gesamt	65	69	59
% falsch HOCH	19	19	15
% falsch TIEF	38	34	46
Parameter im Modell	CPN IOA IOBC <sub>3,25</sub> IOBC <sub>3,75</sub> IOBC <sub>4,0</sub> RR <sub>4,0</sub>	CA CPMD CPN IOA RA <sub>4,0</sub>	CA CFP CPMD CPN IOA IOBC <sub>2,75</sub> IOBC <sub>3,0</sub> IOBC <sub>4,0</sub> RR <sub>4,0</sub>

### 5.7.3 Lachse, gekühlt

Aus Tabelle 26 und Tabelle 27 sind die Ergebnisse der IMF-Schätzung mittels Multipler Regression zu entnehmen. Sowohl bei Verrechnung von Einzelmessungen als auch bei Verwendung von Parametermittelwerten aus mehrfach wiederholten Messungen am Lachs sind die Bestimmtheitsmaße der IMF-Schätzung mit  $R^2 = 0,35$  (gemittelte Parameter) bzw.  $R^2 = 0,21$  (Einzelmessungen) am größten bei Ultraschalldaten, die in Querichtung zum Muskelfaserverlauf aufgenommen wurden. In Längsrichtung ergeben sich lediglich Bestimmtheitsmaße in Höhe von  $R^2 = 0,03$ .

**Tabelle 26: Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern (n = 115) an Lachsen**

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
R <sup>2</sup>	0,35	0,03	0,10
RMSE	0,46	0,55	0,53
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,75</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> CFDS DBC <sub>2,75</sub> DBC <sub>3,5</sub> IOBC <sub>4,0</sub>	IBCREL	ALPHA <sub>3,5</sub> CPMD DBC <sub>2,5</sub> DBC <sub>3,0</sub>

**Tabelle 27: Bestimmtheitsmaße und Schätzfehler der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von der Messrichtung mittels Einzelmesswerten an Lachsen**

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
n	342	342	684
R <sup>2</sup>	0,21	0,03	0,15
RMSE	0,50	0,54	0,51
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,75</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BCMAX <sub>3,0</sub> CFDS DBC <sub>2,75</sub> IOBC <sub>2,75</sub> MR <sub>3,5</sub>	CFP DBC <sub>3,25</sub> IBCREL	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>3,5</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BCMAX <sub>3,0</sub> BCMAX <sub>3,5</sub> CFDS MR <sub>2,5</sub>

Die Diskriminanzanalysen spiegeln die Regressionsergebnisse nur teilweise wider. Während mittels Parametereinzelnwerten aus Messungen quer zur Faser Fehlerraten bei der Zuordnung in die jeweilige IMF-Klasse von knapp 30 % auftreten (Tabelle 29), steigt die Falschklassifikation bei Verwendung von Mittelwerten aus mehrfach wiederholten Messungen für die Fettklasse HOCH auf mehr als 60 %. Anhand von Mittelwerten aus jeweils 3 Längsmessungen je Schlachtkörper ist keine korrekte Zuordnung möglich (Tabelle 28).

**Tabelle 28:** Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$  % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$  % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parametermittelwerten an Lachsen

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
% korrekt gesamt	58	-	63
% falsch HOCH	63	-	32
% falsch TIEF	25	-	39
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BW CFDS IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,5</sub> MWCF	- *keine Variablen ins Modell aufgenommen	ALPHA <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,25</sub>

**Tabelle 29:** Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von der Messrichtung für die Fettklassen HOCH ( $> 2,0$  % IMF) bzw. TIEF ( $\leq 2,0$  % IMF) mit schrittweiser Diskriminanzanalyse und Parametereinzelnwerten an Lachsen

Messrichtung	QUER (Q)	LÄNGS (L)	Q+L
N (HOCH, TIEF)	(57, 285)	(57, 285)	(114, 570)
% korrekt gesamt	72	58	59
% falsch HOCH	30	49	39
% falsch TIEF	28	40	41
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,75</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BW DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub>	ALPHA <sub>3,25</sub> ALPHA <sub>3,75</sub> MR <sub>2,5</sub>	A <sub>2,75</sub> A <sub>3,75</sub> A <sub>4,0</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,25</sub> BCMAX <sub>3,0</sub> BCMAX <sub>3,75</sub> MR <sub>3,25</sub>

## 5.8 Diskussion und Fehlerbetrachtung sowie Ableitungen

Erstmals werden hier umfassende spektralanalytische Untersuchungen an einer Vielzahl intakter Schweineschlachtkörper mit einem klinischen B-Bild-Gerät im Impuls-Echo-Verfahren mit dem Ziel der IMF-Schätzung vorgestellt.

Ein Vergleich der absoluten Parameterwerte mit Literaturwerten gestaltet sich aus verschiedenen Gründen schwierig:

- Es liegen wenige Publikationen zur Spektralanalyse an Fleisch im Puls-Echo-Betrieb vor. Relativ gute Übereinstimmung besteht zwischen den Dämpfungskoeffizienten  $ALPHA(f)$  in dB/cm bei 3 MHz und Ergebnissen von SMITH (1996) (siehe Abschnitt 5.4.1). Vergleichbar umfangreiche und systematische Datenerhebungen am Schwein sind nicht publiziert. Die hier vorgestellte Arbeit zur Gewebecharakterisierung mittels Ultraschall am Schwein liefert eine umfangreiche Datengrundlage für zukünftige Arbeiten.
- Eine Reihe der hier vorgestellten Parameter, z.B. Cepstralparameter, IOBC(f), DBC(f), wurde bislang in der Literatur nicht beschrieben, so dass Vergleichsmöglichkeiten völlig entfallen.
- In anderen Publikationen sind eventuell verwendete Verfahren zur Korrektur von systemspezifischen Übertragungseigenschaften bzw. deren Wirksamkeit nicht beschrieben. Solche Daten sind *per se* an das jeweils verwendete Messsystem gebunden, d.h. nicht ungeprüft als systemunabhängig zu betrachten. Daher sind Vergleiche über die absolute Höhe von Gewebeparametern nur eingeschränkt zulässig.
- Systematische Unterschiede zwischen Messungen im Puls-Echo- bzw. Puls-Transmissions-Betrieb und deren Auswirkungen auf die Präzision akustischer Parameter werden in Abschnitt 5.4.1 und 5.4.2 diskutiert. Daneben wurde erläutert, dass auch der Frequenzbereich oder eventuell verwendete Mikropositioniersysteme Einfluss auf die Ultraschalldaten haben.

Darüber hinaus ist fraglich, ob die unterstellte Systemunabhängigkeit der zur Verfügung stehenden akustischen Parameter in der vorliegenden Untersuchung vollständig Geltung besitzt. Einschränkungen der Systemunabhängigkeit dürfen aufgrund folgender Zusammenhänge angenommen werden:

- Gewebe simulierende Phantome, wie sie zur empirischen Erarbeitung von Algorithmen zur Korrektur der systemspezifischen Übertragungseigenschaften, z.B.

der Ausbildung des Schallfeldes des Wandlers, verwendet wurden (siehe BRAND, 2004), können nur eine Näherung für die Gesamtheit der akustischen Eigenschaften von biologischem Gewebe sein (GÄRTNER, 2001).

- Die empirische Erfassung von Dämpfungseigenschaften der Speckschicht zur Erstellung von Korrekturalgorithmen berücksichtigt nicht in idealer Weise die Variation von deren Zusammensetzung sowie die jeweiligen Temperaturbedingungen bei den Messungen am schlachtwarmen bzw. gekühlten Gewebe (siehe auch Abschnitt 5.4.1). Wäre die Korrektur der speckbedingten Dämpfung des Ultraschalls bzw. der Schallfeldveränderungen vollständig, müssten die Ultraschallparameter der Lachse denen der kalten Schlachtkörper gleichen. Dies ist nicht der Fall; die Leistungsspektren  $A(f)$  der Lachse ähneln jedoch tendenziell eher denen der kalten als der warmen Schlachtkörper - ähnliches trifft für die Rückstreuparameter  $MR(f)$ ,  $BCMAX(f)$  und  $IBCREL$  zu.

Es bleibt an dieser Stelle festzuhalten, dass die experimentell erstellten Funktionen zur Dämpfungs- und Schallfeldkorrektur die an sie gestellten Anforderungen noch nicht vollständig zu erfüllen vermögen, so dass weiterer Entwicklungsaufwand sinnvoll erscheint, um das aufgezeigte Potential der Gewebecharakterisierung umfassend nutzbar zu machen. Die systematische Erfassung einer Vielzahl akustischer Parameter unter Berücksichtigung verschiedenster Messbedingungen bietet einen umfassenden Anhaltspunkt für zukünftige Untersuchungen auf diesem Gebiet.

### 5.8.1 Vergleich der Messbedingungen

Die Vergleichbarkeit der Messzeitpunkte bzw. Messrichtungen hinsichtlich der IMF-Schätzung wird durch den Umstand erschwert, dass die Schätzfunktionen aufgrund der Vielzahl bestehender Autokorrelationen zwischen den akustischen Parametern mittels schrittweiser Variablenselektion zur Anwendung kamen. Dies führt dazu, dass sich die Regressions- und Diskriminanzfunktionen im Hinblick auf die Art und die Anzahl der Parameter im Modell erheblich unterscheiden. Die frequenzabhängigen Parameter  $A(f)$ ,  $ALPHA(f)$ ,  $MR(f)$  und  $BCMAX(f)$  sowie  $IOBC(f)$  sind offenbar von größter Bedeutung für die Schätzung des IMF. Einen Einfluss des Messzeitpunktes oder der Messrichtung auf die Variablenselektion ist jedoch nicht eindeutig abzuleiten, wie die jeweils abweichende Variablenauswahl deutlich macht (Tabelle A 6). Kollinearitätsanalysen im Rahmen der Regressionsanalysen mit SAS (ohne Abbildungen) zeigen auf, dass die in

den Regressionsmodellen verbleibenden Ultraschallparameter z.T. nicht als unabhängig voneinander anzusehen sind, sondern dass einzelne Parameter als Linearkombination der jeweils anderen Parameter im Modell erklärbar sind (z.B. A(f) und IBCREL bzw. ALPHA(f), CFDS und IAC oder BCMAX(f) und MR(f)). Als am ehesten unabhängig von den übrigen Parametern sind die eine Richtungsabhängigkeit innerhalb der ROI enthaltenden IOBC(f) einzustufen. Diese Ergebnisse bestätigen die bereits oben beschriebenen Autokorrelationen der akustischen Parameter (siehe 5.6).

Beim Vergleich zwischen den Messrichtungen werden sowohl an warmen bzw. kalten Schlachtkörpern als auch an den Lachsen die höchsten Bestimmtheitsmaße für die IMF-Schätzung erreicht, wenn die akustischen Parameter aus Messungen quer zur Muskelfaserrichtung erhoben wurden. Dabei ist es nicht von Bedeutung, ob Einzelparameter oder Durchschnittswerte je Schlachtkörper Eingang in die Regressionsanalysen finden. Anhand der Diskriminanzanalysen kann jedoch kein eindeutiger Vorteil einer Messrichtung abgeleitet werden.

Beim Vergleich der Messzeitpunkte gestatten Ultraschallmessungen an warmen Schlachtkörpern unabhängig von der Messrichtung die genaueren Vorhersagen des intramuskulären Fettgehaltes. Auch die korrekte Zuordnung der Schlachtkörper in die entsprechende Fettgehaltsklasse mittels Diskriminanzanalyse gelingt am besten mit Ultraschalldaten von warmen Schlachtkörpern. Bei SMITH (1996) war die Schätzbarkeit des Fettgehaltes in Rindfleisch mittels Ultraschall bei Messungen um 37 °C im Vergleich zu 20 °C bzw. 4 °C ähnlich wie in der vorliegenden Untersuchung am exaktesten. Man beachte beim Vergleich jedoch einerseits die größere Merkmalsvariation des Fettgehaltes im bovinen Muskel (ca. 2-11 %) und andererseits den abweichenden Messaufbau, dessen Beitrag zur Messgenauigkeit bereits erläutert wurde.

Im Rahmen der statistischen Auswertung wurde geprüft, ob die Verrechnung von gemittelten Ultraschallparametern im Vergleich zu den Einzelmesswerten je Schlachtkörper die Genauigkeit der Schätzfunktionen beeinflusst. An warmen Schlachtkörpern ermöglicht die Verwendung von Parametermittelwerten über beide Messrichtungen, d.h. insgesamt 6 Messwerte je Tier, eine deutliche Steigerung des Bestimmtheitsmaßes auf  $R^2 = 0,60$  bei einem mittleren Schätzfehler von 0,36 % IMF im Vergleich zu den Messrichtungen einzeln. An den kalten Schlachtkörpern ist stattdessen eine marginale Verringerung des Bestimmtheitsmaßes festzustellen, und bei Daten von den Lachsen führt dieselbe Vorgehensweise zu einer immensen Verschlechterung der Vorhersagefähigkeit des Modells ( $R^2 = 0,10$ ). Letzteres beruht wahrscheinlich auf den

extrem niedrigen Bestimmtheitsmaßen an den Lachsen längs zur Muskelfaserrichtung ( $R^2 = 0,03$ ). Bei getrennter Auswertung der jeweiligen Messrichtungen resultiert die Verrechnung von gemittelten Ultraschalldaten mit wenigen Ausnahmen in einer verbesserten Schätzbarkeit des IMF im Vergleich zur Regression mit Einzeldaten. Anhand der Diskriminanzanalysen ergibt sich aus der Mittlung der akustischen Parameter über die Messrichtungen kein eindeutiger Vorteil mit Blick auf die korrekte Klassifikation – tendenziell ist der Anteil korrekt klassifizierter kalter Schlachtkörper nach Mittelwertbildung der Spektralparameter größer.

Eine mögliche Ursache für die größeren IMF-Schätzfehler aus Ultraschalldaten der Lachse ist, dass an diesen Daten keine Anwendung der speckdickenabhängigen Dämpfungskorrektur/Schallfeldkorrektur erfolgt im Gegensatz zu den Messungen an den intakten Schlachtkörpern mit Speckauflage. Engere Zusammenhänge zwischen Ultraschallparametern und IMF ergeben sich dort eventuell durch die schwache Korrelation zwischen Speckdicke und IMF ( $r = 0,18$ ; n.s.). Korrelationsanalysen ergeben zumindest ein ähnliches Muster der Korrelation zwischen Speckdicke und den Ultraschallparametern im Vergleich zu Korrelationen zwischen IMF und Ultraschallparametern. Nur sehr lose Beziehungen sind zwischen der Speckdicke und US-Parametern am Lachs zu beobachten - dort kommt die Dämpfungskorrektur der vorgelagerten Schicht nicht zur Anwendung. Dennoch sind bei Verrechnung von gemittelten Ultraschallparametern am Lachs höhere Bestimmtheitsmaße der IMF-Schätzung als bei kalten Schlachtkörpern möglich (siehe Abschnitt 5.7).

Um die Ultraschallmerkmale hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Schätzung des IMF genauer charakterisieren zu können, wurden neben der oben beschriebenen Variablenselektion aus allen berechneten Ultraschallparametern (Regressionsmodell 1; 60 Parameter) auch Regressionsanalysen mit Teilmengen von Parametern durchgeführt (z.B. Modell 2: ohne richtungsabhängige Merkmale); die Ergebnisse zeigt Tabelle 30. Eindeutige Ableitungen hinsichtlich herausragender Bedeutung einzelner Parameter für die Regressionsmodelle sind anhand der vorliegenden Daten nicht möglich. Deutlich wird lediglich, dass die Einzelparameter im Vergleich zu den für diskrete Frequenzen berechneten Merkmale ein geringeres Potential für die IMF-Schätzung aufweisen. Den größten Informationsgehalt zur Gewebecharakterisierung enthalten offenbar die frequenzabhängig berechneten Parameter. Die Einzelparameter, einschließlich der Cepstralparameter, allein vermögen keine befriedigende Vorhersage des IMF-Gehaltes. Im Einzelfall stieg das Bestimmtheitsmaß geringfügig, wenn die richtungsabhängigen

Parameter IOBC(f), DBC(f) und BCMAX(f) von der Variablenauswahl ausgeschlossen blieben (Modell 2).

**Tabelle 30: Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) und Schätzfehler (RMSE) verschiedener Regressionsmodelle mit schrittweiser Variablenauswahl zur Schätzung des IMF aus gemittelten Ultraschallparametern je Schlachtkörper (x = Variablen angeboten zur Auswahl)**

Parameter	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5	Modell 6
ALPHA(f)	x	x	x	x	x	-
RA(f)	x	x	x	x	x	-
RR(f)	x	x	x	x	x	-
A(f)	x	x	x	x	x	-
MR(f)	x	x	x	x	x	-
DBC(f)	x	-	-	-	x	-
BCMAX(f)	x	-	-	-	x	-
IOBC(f)	x	-	-	-	x	-
MWCF	x	x	x	-	-	x
IBCREL	x	x	x	-	-	x
MWSWP	x	x	x	-	-	x
DSWP	x	x	x	-	-	x
BW	x	x	x	-	-	x
IAC	x	x	x	-	-	x
IOA	x	x	x	-	-	x
CFDS	x	x	x	-	-	x
CPN	x	x	-	-	-	x
CA	x	x	-	-	-	x
CPMD	x	x	-	-	-	x
CFP	x	x	-	-	-	x
warme Schlachtkörper		$R^2$ (RMSE)				
QUER (Q)	0,46 (0,42)	0,40 (0,44)	0,40 (0,44)	0,34 (0,46)	0,42 (0,44)	0,03 (0,54)
LÄNGS (L)	0,24 (0,49)	0,14 (0,51)	0,14 (0,51)	0,14 (0,51)	0,24 (0,49)	0,03 (0,54)
Q+L	0,60 (0,36)	0,63 (0,36)	0,59 (0,37)	0,36 (0,45)	0,41 (0,44)	0,05 (0,54)
kalte Schlachtkörper		$R^2$ (RMSE)				
QUER (Q)	0,25 (0,49)	0,23 (0,49)	0,13 (0,51)	0,20 (0,50)	0,24 (0,49)	0,23 (0,49)
LÄNGS (L)	0,26 (0,48)	0,20 (0,50)	0,24 (0,49)	0,22 (0,50)	0,11 (0,52)	0,22 (0,50)
Q+L	0,25 (0,49)	0,24 (0,49)	0,21 (0,50)	0,20 (0,50)	0,16 (0,51)	0,22 (0,49)
Lachse		$R^2$ (RMSE)				
QUER (Q)	0,35 (0,46)	0,15 (0,52)	0,15 (0,52)	0,15 (0,52)	0,36 (0,46)	0,04 (0,54)
LÄNGS (L)	0,03 (0,55)	0,03 (0,55)	0,03 (0,55)	-	-	0,03 (0,55)
Q+L	0,10 (0,53)	0,06 (0,54)	0,06 (0,54)	0,06 (0,54)	0,06 (0,54)	0,03 (0,55)

### 5.8.2 Fehler der IMF-Schätzung

Im Hinblick auf eine kommerzielle Anwendung im Rahmen der Schlachtkörperklassifizierung wird das hier vorgestellte Verfahren anhand der Schätzfehler eingeordnet. Die Zielgröße zur Zulassung als Klassifizierungsgerät ist ein durchschnittlicher Schätzfehler von maximal 0,25 % IMF (Kommission EG Nr. 2967/85, 1994). Das beste Regressionsmodell ermöglicht mittels Parametermittelwerten aus Längs- und Quermessungen an warmen Schlachtkörpern (Modell 2, siehe Tabelle 30), den intramuskulären Fettgehalt von beinahe 80 % der untersuchten Schlachtkörper mit einer Abweichung vom chemisch bestimmten Referenzwert von weniger als 0,4 % IMF zu schätzen (Abbildung 15). Dabei wird der IMF-Gehalt anfänglich über-, bei Gehalten ab 1,6 % IMF jedoch unterschätzt (Abbildung 16).

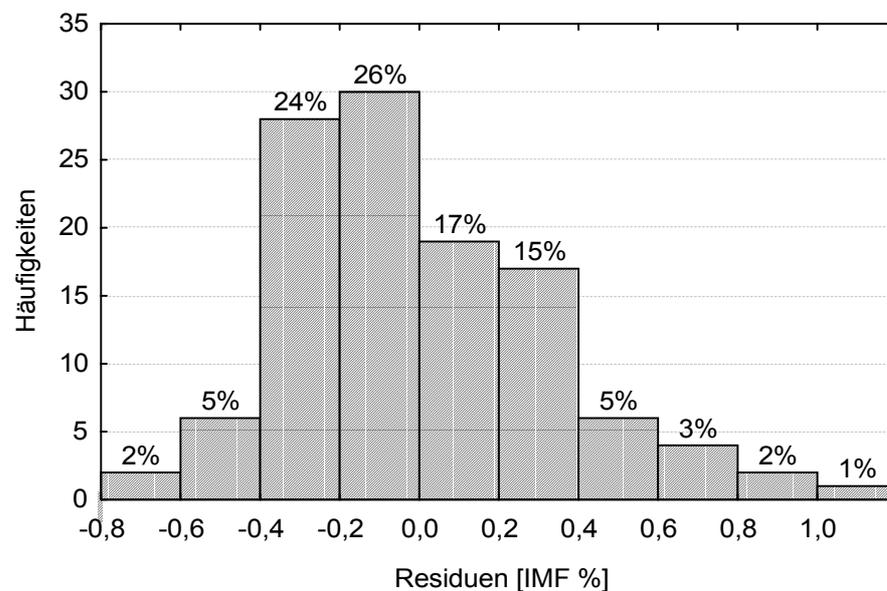
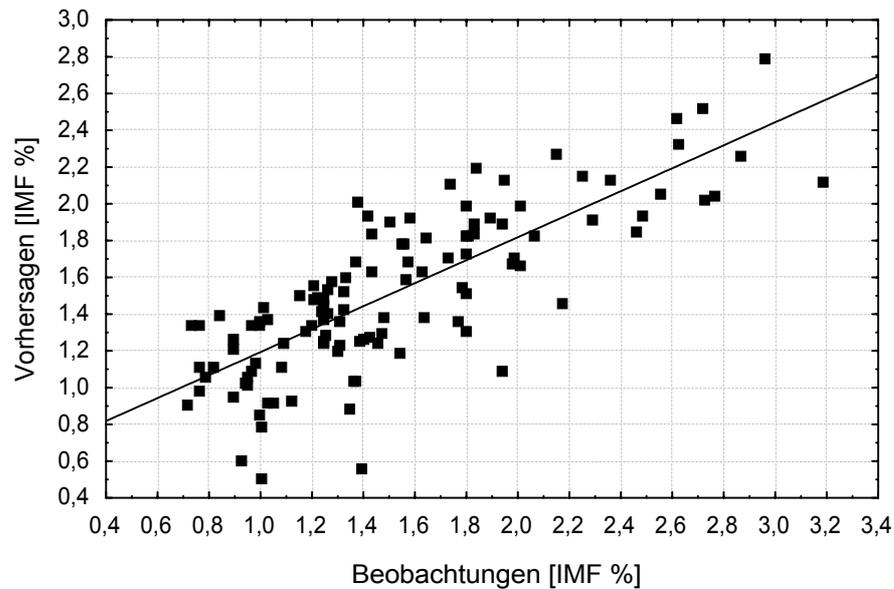


Abbildung 15: Histogramm der Residuen des Schätzmodells zur Vorhersage des IMF (Modell 2)



**Abbildung 16:** Beobachtete und geschätzte IMF-Gehalte (n=115) aus 6 gemittelten Ultraschalldaten (längs- und quer; Modell 2: ohne richtungsabhängige Parameter);  $R^2 = 0,63$

Damit ist die Präzision des Messsystems und der bislang entwickelten Software zur Parameterschätzung aus rückgestreutem Ultraschall für einen kommerziellen Einsatz noch nicht ausreichend. Ableitungen für die technische Weiterentwicklung des Systems werden in Abschnitt 5.8.1 getroffen.

Bislang liegt keine Untersuchung zur Schätzung von Fettgehalten in Schweinefleisch mittels Spektralanalyse von rückgestreutem Ultraschall vor. Dagegen untersuchten PARK et al. (1994) an bovinen Muskeln, allerdings im A-Mode, die Eignung von Ultraschall zur IMF-Bestimmung und erzielten Bestimmtheitsmaße bis maximal  $R^2 = 0,82$ , die mit einem mittleren Schätzfehler von 1,60 % IMF verbunden waren. SMITH (1996) bestätigte ähnlich hohe Zusammenhänge zwischen Dämpfungskoeffizienten und IMF beim Rind ( $r = 0,90$ ).

Mit Ausnahme der Messungen an den Lachsen werden die Bestimmtheitsmaße deutlich größer, wenn nur Schlachtkörper mit einem IMF-Gehalt  $\geq 2,0$  % in den Regressionsanalysen berücksichtigt werden. Unter diesen Voraussetzungen können mittels multipler Regression nach schrittweiser Variablenselektion zwischen 82 und 99 % der Variation des IMF erklärt werden (ohne Abbildungen). Eine deutliche Ausnahme machen jedoch Ultraschallparameter von warmen Schlachtkörpern quer zur Muskelfaserichtung ( $R^2 = 0,16$ ). Diese Ergebnisse legen einen Schwellenwert für die Detektion des IMF mittels Ultraschall nahe, bedürfen jedoch unbedingt einer Evaluierung mit einer größeren Anzahl an Schlachtkörpern, da die Eingrenzung auf die hohen Fettgehalte den Datenumfang erheblich reduziert ( $n_{\text{IMF} > 2,0 \%} = 19$  Schlachtkörper). Unterstützt wird die These durch die Tatsache, dass mit bildanalytischen Methoden anhand von B-Scans am

Schwein maximal Bestimmtheitsmaße in Höhe von  $R^2 = 0,32$  erreicht werden bei mittleren Schätzfehlern zwischen 0,82 und 1,02 % IMF (NEWCOM et al., 2002). Für Rindfleisch dagegen reichen die Bestimmtheitsmaße bis zu  $R^2 = 0,82$  (PARK et al., 1994). Demgegenüber berichtete SMITH (1996) über den Vergleich der akustischen Eigenschaften drei verschiedener boviner Muskeln (*M. longissimus*, *Psoas major*, *Lobster extensor*), dass trotz des höchsten intramuskulären Fettgehaltes im *Psoas major* die Korrelation zwischen Dämpfungskoeffizient und Fettgehalt am geringsten waren. Für den *M. longissimus* konnten die vergleichsweise engsten Zusammenhänge bis  $r = 0,90$  gesichert werden. Auch PARK et al. (1994) zufolge eigneten sich die Spektralparameter am ehesten zur Vorhersage des Fettgehaltes in bovinen Muskelproben mit niedrigen Fettgehalten bis 4 % IMF, so dass diese Fragestellung nur in neuerlichen Untersuchungen geklärt werden kann.

Im Vergleich zur bislang untersuchten bildanalytischen Auswertung ist die Spektralanalyse der rückgestreuten Ultraschallsignale Erfolg versprechender für die Schätzung des IMF am Schwein. Das Bestimmtheitsmaß erreicht in der eigenen Untersuchung maximal  $R^2 = 0,63$  im Vergleich zu Ergebnissen von KALT et al. (1994) und NEWCOM et al. (2002), die maximal  $R^2 = 0,35$  erzielten.

### 5.8.3 Einfluss der ROI-Größe und –Lage

Wie wichtig die korrekte Positionierung der ROI im B-Bild zur Datenauswahl vor der Berechnung der Ultraschallparameter ist, zeigt sich für den verwendeten Wandler WOBLER AA5A bei Messungen an Gewebe simulierenden Phantomen im Labor. Insbesondere im Bereich des Fokus, d.h. dem Bereich in Ausbreitungsrichtung mit dem maximalen Schalldruck, bzw. im vorderen, wandlernahen Bereich des Fokus können die Dämpfungsparameter mit der geringsten Abweichung von in Transmission gemessenen, als Referenz geltenden Werten bestimmt werden (BRAND, 2004, auch GÄRTNER, 2001). Dieser optimale Bereich entspricht einer Tiefe von ca. 4,2 bis 6 cm von der Wandleroberfläche. Für die Parameterbestimmung am Schlachtkörper lässt sich daraus ableiten, dass die ROI zur Parameterberechnung in diesem Bereich gewählt werden sollte, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen. In der vorliegenden Untersuchung sind die Bedingungen theoretisch am ehesten bei den Messungen am warmen bzw. kalten Schlachtkörper mit Speckauflage erfüllt. Bei Annahme von durchschnittlichen Speck- und Fleischmaßen von 17 bzw. 57 mm (siehe Tabelle 2) und der im Versuch praktizierten Positionierung der ROI in der Mitte der Kotelettfläche entspricht der ausgewählte

Bereich in etwa der Fokuszone des verwendeten Wandlers. Bei den Messungen am ausgelösten Kotelettstrang ohne Speckauflage (Lachs) ist davon auszugehen, dass die ROI eher in einem Bereich vor dem Fokus liegt und somit größere Abweichungen bei der Parameterbestimmung zu erwarten sind. Die Messergebnisse spiegeln diese Vermutung z.T. wider. Die Variationskoeffizienten der Mittelwerte der berechneten Dämpfungsparameter sind am Lachs tendenziell höher (ohne Abbildung). Auch anhand der Intraklasskorrelationen zwischen den Messwiederholungen am selben Tier zeigen sich engere Zusammenhänge an den warmen bzw. kalten Schlachtkörpern im Vergleich zu den Lachsen.

Neben der Lage der ROI ist offenbar auch die Dimension des Datenausschnittes von Bedeutung. Um dies zu prüfen, wurden jeweils zwei gleich lange (40 Tore), aber unterschiedlich breite ROI (50 bzw. 70 Linien) zur Parameterberechnung im B-Bild gewählt. Eine Varianzanalyse offenbart für nahezu alle Parameter einen teilweise hoch signifikanten Einfluss der ROI-Größe auf deren absolute Höhe, wobei die absoluten Differenzen bei Mittelwertvergleichen sehr gering sind. Beispielhaft sind in der Abbildung 17 Dämpfungskoeffizienten  $\text{ALPHA}(f)$  in Abhängigkeit von der ROI-Dimension dargestellt. Bei diesem Parameter sind die relativen Differenzen zwischen den ROI-Größen im Vergleich zu allen anderen untersuchten Ultraschallmerkmalen am größten.

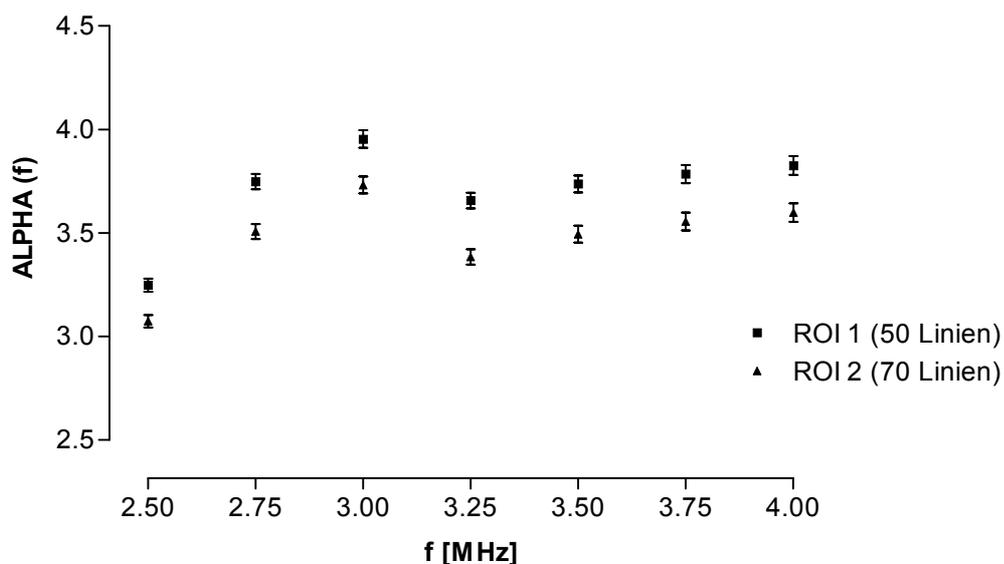


Abbildung 17: Frequenzabhängige Dämpfung in Abhängigkeit von der ROI-Größe (LS-Means und Standardfehler)

Ungeachtet des Problems der Fokuszone, kann eine Vergrößerung der ROI prinzipiell die Genauigkeit des Mittelwertes der Parameter innerhalb der ROI erhöhen, wenn das Gewebe homogen ist. Bei inhomogenem Gewebe kann die Messunsicherheit jedoch auch größer werden. GÄRTNER (2001) zufolge ist die Dämpfungsbestimmung *in vivo* für ROI mit einer Länge von weniger als 1 cm in Ausbreitungsrichtung nicht zulässig. Die im vorliegenden Fall eingesetzten ROI hatten eine Länge von ca. 2,3 cm (siehe Abschnitt 4.5), so dass diesbezüglich von einer korrekten Bestimmung der akustischen Parameter ausgegangen werden kann. Die Breite, also die Anzahl der A-Linien innerhalb der ROI ist nach GÄRTNER (2001) von nachrangiger Bedeutung, sofern eine Mindestbreite von 1 cm realisiert wird. Hier besteht offenbar ein Widerspruch zu den vorliegenden Ergebnissen, deren Ursache im Rahmen der Arbeit nicht geklärt werden kann, wobei die Resultate von GÄRTNER (2001) auf Messungen an Phantomen beruhen, die biologisches Gewebe nicht vollständig abbilden können.

Abschließend soll für den Bereich der Fehlerbetrachtung resümiert werden, dass das verwendete Messsystem einen Kompromiss zwischen Präzision und Praxistauglichkeit darstellen muss. Wie mehrfach ausgeführt (Abschnitte 5.4.1, 5.4.2, 5.5 und 5.8.1), ist mit anderen Messaufbauten, Mikropositioniersystemen und Messungen in Transmission eine höhere Präzision der akustischen Parameter zu erwarten. Die angestrebte *online*-Erfassung am Schlachtkörper ließe sich damit jedoch nicht realisieren. Im folgenden Abschnitt werden einige Ableitungen zur Weiterentwicklung des bestehenden Systems getroffen.

#### **5.8.4 Ausblick**

##### Geräteentwicklung

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen erfolgten mit einem aus mehreren Komponenten bestehenden Messsystem, dessen Kernstücke ein für den klinischen Einsatz konzipiertes diagnostisches Ultraschallgerät und ein PC-System einschließlich Peripheriegeräten (Monitor, Maus, Tastatur) waren. Der Umfang des experimentellen Messaufbaus erforderte bei den Datenaufnahmen im Schlachthof erheblichen personellen und logistischen Aufwand sowie exakte Absprachen, um den Betriebsablauf nicht zu stören. Nach dem heutigen Stand der Technik kann die Masse und das Volumen des Messsystems erheblich reduziert und in einem einzigen Gerät realisiert werden. Die Miniaturisierung ermöglicht *hand-held*-Ultraschallgeräte und

*plug-in*-Versionen zum Anschluss an Laptop-Computer (siehe z.B. [www.terason.com](http://www.terason.com), [www.sonosite.com](http://www.sonosite.com)).

Der eigentliche Anspruch bei der zukünftigen Konzeption eines Gerätes zur Bestimmung des IMF für den industriellen Einsatz liegt aber bei der Auswahl der optimalen Schallfeldparameter. Wie bereits ausgeführt, ist die genaue Kenntnis des Schallfeldes und die damit verbundene Korrekturmöglichkeit entscheidend für die Bestimmung verwertbarer akustischer Parameter, aus denen nachfolgend der IMF abgeleitet werden kann. Die Schallfelder kommerzieller Diagnostiksysteme sind sehr komplex, zeitlich variabel (dynamische Empfangsfokussierung) und auf bestmögliches räumliches Auflösungsvermögen ausgerichtet. Das ist zwar einer optimalen Bildqualität zuträglich, erschwert aber die Korrektur der Schallfeldeinflüsse bzw. gestattet diese nur in einem eingeschränkten Tiefenbereich in unmittelbarer Umgebung des Fokus. Unberührt hiervon bleibt der Bedarf an Informationen über das Schallfeld. Diese Informationen können durch aufwendige *in vivo* Messungen geschätzt oder aus den exakten Ansteuerbedingungen des Schallkopfes berechnet werden – dies jeweils für alle anzuwendenden Geräteeinstellungen. Sowohl für die Messungen als auch für die Schätzung der akustischen Parameter sind detaillierte Informationen über das Gerätesystem vom Hersteller einzuholen, was sich aufgrund von Betriebsgeheimnissen als teilweise schwierig bis unmöglich gestaltet und auch in der vorliegenden Untersuchung die Optimierung der Korrekturfunktionen eingeschränkt hat. So war aufgrund fehlender Informationen über die Phasenbeziehungen zwischen den einzelnen Wandler-elementen sowohl im Sendes- als auch im Empfangsfall eine Berechnung des Schallfeldes des verwendeten Wandlers mittels numerischer Simulation nicht möglich (WICKE et al., 2003). Zur Bestimmung von akustischen Gewebeparametern müssen demnach Geräte zum Einsatz kommen, die schwach fokussierte und leicht beschreibbare Schallfelder verwenden. Im Gegensatz zur Bildgebung besteht bei der Parameterschätzung keine Notwendigkeit einer hohen örtlichen Auflösung. Solche Schallfelder lassen sich einmal durch den Einsatz von Einzel-elementwandlern (ähnlich dem Auto-FOM-System, SFK Technology GmbH, 59368 Werne) oder durch geeignete Ansteuerung eines Array-Wandlers realisieren. Die zweite Variante hat den Vorteil, dass die Ableitung von Schnittbildern weiterhin möglich ist, z.B. durch alternierende Scans mit jeweils für die Parameterableitung und Bildgebung optimierten Schallfeldern (WICKE et al., 2003). Im Kapitel 5.4.2 zur Anisotropie wurde außerdem deutlich, dass mit dem verwendeten mechanischen Sektorscanner eine diskrete Ausrichtung des Ultraschalls relativ zur Faserrichtung nicht möglich ist. Der Einsatz

eines Arraywandlers mit entsprechender Ansteuerung ermöglicht diesbezüglich eine exaktere Vorgehensweise.

Um Parameter wie den Anstieg des Dämpfungskoeffizienten IOA sicher berechnen zu können, ist eine ausreichend große Bandbreite des Schallwandlers erforderlich. Im vorliegenden Fall reichte die  $-6$  dB-Bandbreite von 2,8 bis 3,8 MHz bei einer Mittenfrequenz von 3,5 MHz. Dieser Wandler wurde im Vergleich zu einem ebenfalls verfügbaren Wandler mit einer höheren Mittenfrequenz aufgrund seiner besseren Eindringtiefe ausgewählt, um den gesamten Querschnitt des *M. longissimus* abbilden zu können. Die Präzision der geschätzten Ultraschallparameter ist bei größeren Frequenzen potentiell besser (SMITH, 1996). Jedoch können auch mit einem 7,5 MHz Wandler qualitativ gute Ergebnisse bei der Datenaufnahme selbst an gekühlten Rinderschlachtkörpern mit Fettauflage bei realisierten 15-20 cm Eindringtiefe erzielt werden - mit einem leistungsstarken nichtkommerziellem Gerät, das eigens für diese Anwendung konzipiert wurde (HEIN et al., 1992). Bei dem im vorliegenden Fall verwendeten Diagnostikgerät ist die Sendeleistung wegen möglicher schädlicher Nebenwirkungen im Gewebe wie Kavitation, Erwärmung etc. begrenzt. Bleibt die Anwendung auf Schlachtkörper oder Teilstücke beschränkt, besteht also auch in der Erhöhung der Sendeleistung und der resultierenden Vergrößerung des Signal-Rausch-Abstandes eine Möglichkeit, die Parameterschätzung zu präzisieren.

Über die oben genannten spezifischen Anforderungen an die Ultraschalltechnik hinaus müssen praxistaugliche Geräte derart gestaltet sein, dass sie den hygienischen Anforderungen in Schlacht- und Zerlegebetrieben gerecht werden können.

### Software

BRAND (2004) hat anhand von experimentellen Arbeiten den Einfluss der Fokuszone auf die Schätzung der akustischen Parameter am Beispiel der Dämpfung in einem Referenzphantom nachgewiesen. Für zukünftige Anwendungen ist es daher vorteilhaft, wenn die Fokuszone des verwendeten Wandlers bei der Datenaufnahme im B-Bild markiert würde, damit bei der ROI-Auswahl zur Datentransformation für die nachfolgende Parameterberechnung der optimale Bereich ausgewählt werden kann.

Im Sinne der Qualitätssicherung sollte als zusätzliches Merkmal die Berechnung des Signal-Rausch-Abstandes SNR in die Software zur Parameterschätzung integriert werden, um die Unzulänglichkeit mangelhafter Rückstreusignale quantifizieren zu können und Mindestanforderungen an den Signal-Rausch-Abstand aus Sicht der weiteren

Präzisierung der Spektralanalyse abzuleiten. Im Hinblick auf eine weitere Verbesserung des Verfahrens sind auch die Ergebnisse von OELZE et al. (2002a,b) möglicherweise von Nutzen. Die Autoren berichten über eine exaktere Schätzung akustischer Parameter auf der Basis des Signal-Rausch-Abstandes einzelner Frequenzanteile. Dabei gehen Frequenzbereiche mit geringerem SNR schwächer gewichtet in die Analysen ein im Vergleich zu Frequenzbereichen mit größerem SNR. Im Falle niedriger SNR der rückgestreuten Ultraschallsignale trägt auch eine Unterkompensation der Dämpfung bei den höheren Frequenzen im jeweils untersuchten Frequenzbereich zur Erhöhung der Präzision akustischer Parameter bei.

Bei der für die vorliegende Arbeit entwickelten Software geht die Speckdicke aus der Schlachtkörperklassifizierung mittels Fat-O-Meater (FOM) im Rahmen der Dämpfungskorrektur in die Parameterberechnung ein. Denkbar ist, die Speckdicke zukünftig auch direkt aus den Ultraschalldaten über Kantenerkennungsalgorithmen oder in Anlehnung an die Schätzung von kommerziell erhältlichen A-Mode-Geräte, z.B. PIGLOG (SFK Technology GmbH 59368 Werne), zu extrahieren, um so die Abhängigkeit von einem zusätzlichen Messverfahren (FOM) zu vermeiden.

### Datenauswertung

Leistungsfähigere Rechentechnik ermöglicht die Bewältigung größerer Datenmengen in vergleichbarer Zeit. Denkbar ist die Anwendung größerer Bereiche zur Datentransformation und Parameterschätzung innerhalb des B-Bildes oder die Auswahl mehrerer ROI innerhalb desselben Bildes sowie die sofortige Verrechnung der Daten mehrerer Scans zu einem Mittelwert. Ziel bleibt die Echtzeitanwendung. Die bislang entwickelte Software besitzt diesbezüglich Optimierungspotential, um Datenaufnahme und Parameterschätzung *online* möglich zu machen. Hinsichtlich der statistischen Auswertung ist neben der Anwendung multivariater Schätzverfahren wie PLS (engl.: *partial least squares regression*) der Einsatz künstlicher neuronaler Netze zu prüfen, um das Potential der akustischen Parameter zur Gewebecharakterisierung bestmöglich auszuschöpfen (BRETHOUR, 1994; SCHMITZ, 1995). PLS-Verfahren sind insbesondere geeignet, Beziehungen zwischen zwei großen Parameterblöcken herzustellen und finden z.B. Anwendung der spektroskopischen oder sensorischen Untersuchung von Lebensmitteln (MARTENS et al., 1991; REALINI et al., 2004; RODBOTTEN et al., 2004).

### Anwendung

Denkbar ist des Weiteren, die Daten der Auto-FOM-Klassifizierungsgeräte (SFK Technology GmbH 59368 Werne), die zunehmend Bedeutung bei der Schlachtkörperbewertung finden (ZMP, 2004), auf eine Verwertbarkeit im Sinne der IMF-Schätzung zu prüfen. Fraglich ist dabei die Zugänglichkeit zu den primären Ultraschallsignalen – bislang werden verschiedene Linearmaße für die Schätzung der grobgeweblichen Zusammensetzung des Schlachtkörpers und von Teilstückgewichten genutzt. Alternativ könnte das Array um weitere spezielle Schallköpfe zur IMF-Bestimmung erweitert werden. Ziel dieser Überlegung ist die *online*-Bestimmung des intramuskulären Fettgehaltes am Schlachtband ohne zusätzlichen apparativen und personellen Aufwand.

Weiterhin erscheint eine Anwendung am Rind aufgrund höherer Fettgehalte und einer größeren Merkmalsvariation des IMF Erfolg versprechend. Bisherige bildanalytische Verfahren mittels Ultraschall waren bei Rind ebenfalls exakter als am Schwein.

## 6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde im Rahmen eines von der DFG geförderten Gemeinschaftsprojektes (Wi 1538/3) zwischen Tierzüchtern und Biophysikern der Universitäten Halle und Göttingen die Eignung der Spektralanalyse rückgestreuten Ultraschalls zur zerstörungsfreien Schätzung des intramuskulären Fettgehaltes (IMF) im *M. longissimus* des Schweins untersucht. Hintergrund der Arbeit ist die Bedeutung des IMF für die sensorischen Eigenschaften von Schweinefleisch und der bislang bestehende Mangel einer praktikablen, nicht-invasiven Bestimmungsmethode am intakten Schlachtkörper. Die Ultraschall-Datenaufnahmen erfolgten mit einem kommerziellen diagnostischen B-Bild-Gerät und einem mechanischen Sektorschallkopf mit einer Mittenfrequenz von 3,5 MHz an 115 Schlachthälften desselben Genotyps aus einem kommerziellen Tierhaltungsbetrieb. Die umfangreichen Messungen wurden systematisch an warmen bzw. gekühlten Hälften und am Lachs realisiert, wobei der Schallkopf entweder parallel oder quer zur Längsachse des Schweins ausgerichtet wurde. Insgesamt kamen mehr als 2000 Datensätze zur Auswertung. In aus den aufgezeichneten Ultraschalldaten rekonstruierten B-Bildern wurden Bereiche ausgewählt, für die nach schneller Fouriertransformation der Signale die akustischen Parameter berechnet wurden. Die Parameterberechnung einschließlich der Erstellung der erforderlichen Korrekturfunktionen zur Gewährleistung möglichst großer Geräteunabhängigkeit war dabei Bestandteil einer eigenständigen Dissertation. Gegenstand der vorliegenden Arbeit war im Wesentlichen die statistische Auswertung der bereitgestellten Ultraschallparameter im Hinblick auf die Einflussfaktoren (Messbedingungen) und die Schätzung des IMF. Darüber hinaus wurden an den Schweinehälften Zusammenhänge zwischen dem intramuskulären Fettgehalt, organoleptisch bzw. instrumentell erfassbaren sensorischen Eigenschaften des *M. longissimus*, Merkmalen der Schlachtkörperbeschaffenheit und Indikatoren der Fleischqualität geprüft.

Die Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die IMF-Gehalte der untersuchten Schlachtkörper spiegeln das derzeitige marktübliche Niveau wider. Nur ein geringer Teil der Schlachtschweine erreicht den aus sensorischer Sicht wünschenswerten IMF-Gehalt  $> 2,0\%$  im *M. longissimus*.

- Ein höherer intramuskulärer Fettgehalt führt zu verbesserten sensorischen Eigenschaften des Fleisches. Die Ergebnisse deuten aber auf einen Schwellenwert zur Wirksamkeit des IMF hin.
- Die Zusammenhänge zwischen Schlachtkörpereigenschaften und IMF sind nur gering ausgeprägt und unterstützen die Möglichkeit der züchterischen Erhöhung des IMF ohne stärkere Einbußen im Muskelfleischanteil.
- Die phänotypischen Korrelationen der akustischen Parameter zum IMF sind gering und erreichen maximal Werte von  $r \sim 0,40$ .
- Die Wiederholbarkeit der Schätzung akustischer Parameter am intakten Schlachtkörper im Puls-Echo-Betrieb ist mäßig im Vergleich zur Wiederholbarkeit der Bestimmung von Linear- und Flächenmaßen mittels Ultraschall.
- Die Schätzung des IMF mittels akustischer Parameter gelingt bestenfalls mit einem mittleren Schätzfehler von 0,36 % IMF bei Verwendung von Parametermittelwerten mehrfach wiederholter Messungen längs und quer zur Muskelfaserichtung an warmen Schlachtkörpern. Dabei kann die Variation des Fettgehaltes anhand der akustischen Parameter zu ca. 60 % erklärt werden.

Die Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Spektralanalyse von rückgestreutem Ultraschall ist Erfolg versprechend zur zerstörungsfreien Bestimmung des intramuskulären Fettgehaltes am Schwein. Die Ergebnisse sind deutlich besser als bei Ultraschallverfahren, die auf der Analyse der B-Bilder basieren.
- Das verwendete Messsystem einschließlich der entwickelten Software zur Berechnung der akustischen Parameter führt gegenwärtig zu Schätzfehlern, die den Anforderungen an eine kommerzielle Anwendung im Rahmen der Schlachtkörperklassifizierung noch nicht entsprechen.
- Höhere Bestimmtheitsmaße bzw. geringere Schätzfehler für die IMF-Bestimmung bei Schlachtkörpern mit einem Fettgehalt über 2% legen eine Detektionsschwelle für das entwickelte Verfahren nahe, erfordern jedoch eine Überprüfung an einer größeren Stichprobe.
- Der Einfluss der Ultraschallausbreitungsrichtung relativ zur Muskelfaserichtung auf die Ausprägung akustischer Parameter konnte nicht in Übereinstimmung zur Literatur geklärt werden. Wahrscheinlichste Ursache ist die Konstruk-

---

tion des Schallwandlers und dessen Freihandpositionierung am Schlachtkörper. Einflüsse der Schlachtkörpertemperatur können ebenfalls nicht eindeutig benannt werden.

- Die erstellten Funktionen zur Schallfeldkorrektur bzw. zur Korrektur der laufzeitabhängigen Empfangsverstärkung sind noch nicht optimal und wahrscheinlich für den deutlichen Einfluss des Messtages auf die akustischen Parameter verantwortlich.
- Es wurden Ableitungen zur Weiterentwicklung eines geeigneten Messsystems zur Aufnahme von Ultraschalldaten getroffen, um das aufgezeigte Potential der Spektralanalyse zur Gewebecharakterisierung im Allgemeinen und der Bestimmung des IMF im Speziellen besser auszuschöpfen.

## 7 Summary

The present study is part of a interdisciplinary project involving biophysics and animal breeding scientists of the universities in Halle and Göttingen. The project was funded by the German Research Foundation (DFG, project Wi 1538/3). The study aimed to investigate the use of spectral analysis of backscattered ultrasound signals from a diagnostic B-mode device to non destructively estimate the intramuscular fat content (IMF) in the longissimus muscle in pigs. It is against the backdrop that the intramuscular fat content is considered one of the most crucial quality aspects for the enjoyment of pork. Both the breeding treatment of the IMF and its monetary evaluation as part of quality meat programmes, however, demand a fast, economic and reproducible non-destructive ascertainment of the content. Such methods are not available, yet.

Ultrasound data acquisition was performed on 115 commercially produced carcass sides from the same genetic origin at the 2nd/3rd last rib parallel and perpendicular to the muscle fiber direction of the longissimus muscle. The measurements were carried out on both carcasses still warm from slaughtering and on chilled, complete sides / on the pure pork filet (i.e. without back fat). The data acquisition system consists of a clinical ultrasonic B-mode diagnostics device equipped with a 3.5 MHz transducer. From the backscattered signals within a region of interest of the B-image 60 acoustic parameters, e.g. attenuation and backscattering of the ultrasound in the tissue were calculated by means of developed software. Extensive measurements on tissue-simulating phantoms in the ultrasound laboratory were performed to ensure that specific transmission properties of the used ultrasonic B-mode device can be corrected before the parameter calculation. Establishing the correction algorithms and parameter calculation were part of another dissertation. The present dissertation was focused on the statistical analysis of the acoustic parameters. Besides, relationships between IMF content, eating quality, and carcass traits were investigated at the carcasses used for ultrasound measurements.

The results can be summarised as follows:

- The study shows that only 17% of the carcasses have the - from a sensory point of view, desired - fat content of over 2% in the cutlet.
- In the carcasses investigated, higher intramuscular fat content is associated with improved sensory evaluation of the cutlet. However, the results indicate a threshold level for the sensory effects of IMF.

- Relationships between carcass traits and intramuscular fat content are low. These findings support the feasibility to raise the IMF content within breeding programs.
- Phenotypic correlations between IMF content and acoustic parameters are low to medium, and reach up to  $r = 0.40$ .
- Compared to the ultrasonical estimation of linear and muscle area measures, respectively, the repeatability of the estimation of most acoustic parameters from backscattered ultrasound is rather low to medium.
- As for the estimation of intramuscular fat content by means of spectral analysis of backscattered ultrasound signals, an average prediction error of 0.36 % IMF arises at best using averaged parameters from measurements parallel and perpendicular to the muscle fiber direction at warm carcasses. Thus, about 60 % of the variation of IMF can be explained by the acoustic parameters.

From the results the following can be concluded:

- The spectral analysis of backscattered ultrasound signals appears to be promising to non destructively estimate the intramuscular fat content of the longissimus muscle in pigs. The results exceed those based on B-mode image analysis techniques.
- Currently, the data acquisition system and the software for estimation of the acoustic parameters cause prediction errors for the IMF content not being sufficient for commercial use within carcass grading, yet.
- Results obtained from carcasses with intramuscular fat content above 2 %, i. e. higher coefficients of determination and lower prediction errors, respectively suggest a detection threshold for estimation of IMF in pigs with the current measurement system.
- Effects of muscle fiber direction cannot be cleared without ambiguity and in accordance with literature, respectively. Most probably that is due to the transducer design and freehand- instead of of micropositioning of the transducer during data acquisition. Distinctive effects of muscle temperature on acoustic parameters cannot be found.

- The algorithms to correct system specific effects, e. g. sound field and time gain compensation settings, are not sufficient, yet. Significant effects of day of measurement are probably due to this deficiency.
- To generally extend the potential use of ultrasound spectral analysis for tissue characterisation and to improve the IMF estimation in pigs, conclusions are drawn with respect to the further technical development the data acquisition system.

## Literaturverzeichnis

- ABOU EL KARAM, S., B. BUQUET, P. BERGE und J. CULIOLI (1997). Ultrasonic characterization of bovine muscles. in *Proceedings of the 43rd ICoMST. 27 July to 1 August 1997. Auckland, New Zealand*: 310-311.
- ABOU EL KARAM, S., K. SUCHORSKI, B. BUQUET, P. BERGE, J. CULIOLI, P. DELACHARTRE und O. BASSET (2000). Effects of muscle texture on ultrasonic measurements. *Food Chemistry* 69(4): 447-455.
- ALOMAR, D., C. GALLO, M. CASTANEDA und R. FUCHSLOCHER (2003). Chemical and discriminant analysis of bovine meat by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS). *Meat Science* 63(4): 441-450.
- ALTMANN, M., U. KIRCHHEIM, L. SCHÖBERLEIN, M. WÄHNER, M. WICKE und K. FISCHER (2004). PSE-Status bei marktkonformen Schweinen - Ergebnisse eines Monitorings in verschiedenen Schlachtbetrieben Deutschlands. *Vortrag zur 39. Kulmbacher Woche 2004 an der BFEL Standort Kulmbach, 4./5. Mai 2004*.
- ALTMANN, M. und U. PLIQUETT (2003). Ermittlung des intramuskulären Fettes (IMF) beim Schwein mittels Impedanzmessung. *Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft* 8(2): 97-108.
- AMIN, V., A. PATEL, R. ROBERTS, G. ROUSE und D. WILSON (1995). Application of A-mode Ultrasound for Carcass Quality Grading: A Progress Report, Iowa State University, Department of Animal Science. 27-31.
- AMIN, V., D. WILSON und G. ROUSE (1997). USOFT: an ultrasound image analysis software for beef quality research. *Beef Research Report.*: 41-47.
- ANDERSON, M. E., M. S. C. SOO und G. E. TRAHEY (2001). In vivo breast tissue backscatter measurements with 7.5-and 10-MHz transducers. *Ultrasound in Medicine and Biology* 27(1): 75-81.
- ANDERSON, M. E. und G. E. TRAHEY (1998). The direct estimation of sound speed using pulse-echo ultrasound. *Journal of the Acoustical Society of America* 104(5): 3099-3106.
- ANTEQUERA, T., E. MURIEL, P. G. RODRIGUEZ, E. CERNADAS und J. RUIZ (2003). Magnetic resonance imaging as a predictive tool for sensory characteristics and intramuscular fat content of dry-cured loin. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 83(4): 268-274.
- ARNETH, W. (1997). Chemisch-analytische Methoden als Referenz zur Kalibrierung von Nah-Infrarot-Geräten. Ein kritischer Überblick. *Vortrag zum Symposium "Schnellanalytik mit NIR/NIT" der Bundesanstalt für Fleischforschung, 21./22. 10. 1997, Kulmbach*.

- ARNOLD, A., P. TAYLOR, R. POSTON, K. MODARESI und S. PADAYACHEE (2001). An objective method for grading ultrasound images of carotid artery plaques. *Ultrasound in Medicine and Biology* 27(8): 1041-1047.
- BALDEWECK, T., P. LAUGIER und G. BERGER (1995). An in vitro study on porcine skin: Attenuation profile estimation using auto-regressive modeling. in *1995 IEEE ultrasonics symposium*: 1141-1144.
- BARB, C. R., G. J. HAUSMAN und K. L. HOUSEKNECHT (2001). Biology of leptin in the pig. *Domestic Animal Endocrinology* 21(4): 297-317.
- BASSET, O., B. BUQUET, S. ABOUELKARAM, P. DELACHARTRE und J. CULIOLI (2000). Application of texture image analysis for the classification of bovine meat. *Food Chemistry* 69(4): 437-445.
- BENEDITO, J., J. A. CARCEL, C. ROSSELLO und A. MULET (2001). Composition assessment of raw meat mixtures using ultrasonics. *Meat Science* 57(4): 365-370.
- BERG, E. P., F. KALLEL, F. HUSSAIN, R. K. MILLER, J. OPHIR und N. KEHTARNAVAZ (1999). The use of elastography to measure quality characteristics of pork semimembranosus muscle. *Meat Science* 53(1): 31-35.
- BIDNER, B. S., M. ELLIS, D. P. WITTE, S. N. CARR und F. K. MCKEITH (2004). Influence of dietary lysine level, pre-slaughter fasting, and rendement napole genotype on fresh pork quality. *Meat Science* 68(1): 53-60.
- BIDWELL, C. A., G. R. JI, G. R. FRANK, S. G. CORNELIUS, G. M. WILLIS und M. E. SPURLOCK (1997). Cloning and expression of the porcine obese gene. *Animal Biotechnology* 8: 191-206.
- BIEDERMANN, G., C. JATSCH, W. PESCHKE, J. P. LINDNER und W. WITTMANN (2000). Fattening and carcass performance and meat- and fat quality of Pietrain pigs of different MHS-genotype and sex. I. Fattening and carcass performance and meat quality. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 43(2): 151-164.
- BLANCHARD, P. J., M. ELLIS, C. C. WARKUP, B. HARDY, J. P. CHADWICK und G. A. DEANS (1999). The influence of rate of lean and fat tissue development on pork eating quality. *Animal Science* 68: 477-485.
- BLANCHARD, P. J., C. C. WARKUP, M. ELLIS, M. B. WILLIS und P. AVERY (1999). The influence of the proportion of Duroc genes on growth, carcass and pork eating quality characteristics. *Animal Science* 68: 495-501.
- BLANCHARD, P. J., M. B. WILLIS, C. C. WARKUP und M. ELLIS (2000). The influence of carcass backfat and intramuscular fat level on pork eating quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80(1): 145-151.
- BLECK, J. S., M. GEBEL und M. P. MANNS (2000). Quantitative sonography - Significance and possibilities. *Internist* 41(1): 10-16.
- BRAND, S. (2004). Ultraschallspektroskopie an fokussierenden Systemen unter Berücksichtigung vorgelagerter absorbierender Schichten. *Dissertation*. FB Elektrotechnik, Otto-von-Guericke-University, Magdeburg, Germany.

- BRANDT, H. (1996). Möglichkeiten der Zucht auf intramuskulären Fettgehalt unter deutschen Marktverhältnissen. Beitrag zum IMF-Kolloquium vom 22./23. Oktober 1996 in Jena/Wilhelmsthal.
- BRETHOUR, J. R. (1994). Estimating marbling score in live cattle from ultrasound images using pattern recognition and neural network procedures. *Journal of Animal Science* 72(6): 1425-32.
- BREWER, M. S., J. JENSEN, A. A. SOSNICKI, B. FIELDS, E. WILSON und F. K. MCKEITH (2002). The effect of pig genetics on palatability, color and physical characteristics of fresh pork loin chops. *Meat Science* 61(3): 249-256.
- BREWER, M. S. und F. K. MCKEITH (1999). Consumer-rated quality characteristics as related to purchase intent of fresh pork. *Journal of Food Science* 64(1): 171-174.
- BROENDUM, J., M. EGEBO, C. AGERSKOV und H. BUSK (1998). On-line pork carcass grading with the Autofom ultrasound system. *Journal of Animal Science* 76(7): 1859-68.
- BROENDUM, J., L. MUNCK, P. HENCKEL, A. KARLSSON, E. TORNBERG und S. B. ENGELSEN (2000). Prediction of water-holding capacity and composition of porcine meat by comparative spectroscopy. *Meat Science* 55(2): 177-185.
- BRYHNI, E. A., D. V. BYRNE, M. RODBOTTEN, S. MOLLER, C. CLAUDI-MAGNUSSEN, A. KARLSSON, H. AGERHEM, M. JOHANSSON und M. MARTENS (2003). Consumer and sensory investigations in relation to physical/chemical aspects of cooked pork in Scandinavia. *Meat Science* 65(2): 737-748.
- CAMERON, N. D., M. ENSER, G. R. NUTE, F. M. WHITTINGTON, J. C. PENMAN, A. C. FISKEN, A. M. PERRY und J. D. WOOD (2000). Genotype with nutrition interaction on fatty acid composition of intramuscular fat and the relationship with flavour of pig meat. *Meat Science* 55(2): 187-195.
- CHANAMAI, R. und D. J. MCCLEMENTS (1999). Ultrasonic determination of chicken composition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 47(11): 4686-4692.
- CHANNON, H. A., M. G. KERR und P. J. WALKER (2004). Effect of Duroc content, sex and ageing period on meat and eating quality attributes of pork loin. *Meat Science* 66(4): 881-888.
- CLARK, D. H. und R. E. SHORT (1994). Comparison of AOAC and light spectroscopy analyses of uncooked, ground beef. *Journal of Animal Science* 72(4): 925-31.
- DGFZ (2001). Arbeitsausschuss für Fleischerzeugung. Stellungnahme zum Thema: Intramuskulärer Fettgehalt beim Schwein. *Züchtungskunde* 73: 245.
- DOBROWOLSKI, A., W. BRANSCHIED und R. ROMVARI (2003). Röntgen-Computertomographie als mögliche Referenz für die Schlachtkörperwertbestimmung beim Schwein. *Mitteilungsblatt der Bundesforschungsanstalt für Fleischforschung Kulmbach*.

- EGGERT, J. M., F. F. S. DEPREUX, A. P. SCHINCKEL, A. L. GRANT und D. E. GERRARD (2002). Myosin heavy chain isoforms account for variation in pork quality. *Meat Science* 61(2): 117-126.
- FELEPPA, E. J., R. D. ENNIS, P. B. SCHIFF, C. S. WUU, A. KALISZ, J. KETTERLING, S. URBAN, T. LIU, W. R. FAIR, C. R. PORTER und J. R. GILLESPIE (2001). Spectrum-analysis and neural networks for imaging to detect and treat prostate cancer. *Ultrasonic Imaging* 23(3): 135-46.
- FERNANDEZ, X., G. MONIN, A. TALMANT, J. MOUROT und B. LEBRET (1999). Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat - 1. Composition of the lipid fraction and sensory characteristics of m. longissimus lumborum. *Meat Science* 53(1): 59-65.
- FERNANDEZ, X., G. MONIN, A. TALMANT, J. MOUROT und B. LEBRET (1999). Influence of intramuscular fat content on the quality of pig meat - 2. Consumer acceptability of m. longissimus lumborum. *Meat Science* 53(1): 67-72.
- FISCHER, K., M. REICHEL, J. P. LINDNER, M. WICKE und W. BRANSCHIED (2000). Eating quality of pork in well-chosen crossbreds. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 43(5): 477-485.
- FORTUN-LAMOTHE, L., B. LAMBOLEY-GAUZERE und C. BANNELIER (2002). Prediction of body composition in rabbit females using total body electrical conductivity (TOBEC). *Livestock Production Science* 78(2): 133-142.
- FREUDENREICH, P. (1997). Kritische Sichtung der Methoden zur Bestimmung des IMF-Gehaltes bei Schweinefleisch. Beitrag zum IMF-Kolloquium vom 22./23. Oktober 1996 in Jena/Wilhelmsthal: 18-25.
- FREUDENREICH, P. (1997). Near-infrared spectroscopy (NIRS) to online determination of the intramuscular fat content at slaughtering and cutting. in *Jahresbericht der Bundesanstalt für Fleischforschung (BAFF)* (Hrsg.). Kulmbach.
- FUJII, J., K. OTSU, F. ZORZATO, S. DE LEON, V. K. KHANNA, J. E. WEILER, P. J. O'BRIEN und D. H. MACLENNAN (1991). Identification of a mutation in porcine ryanodine receptor associated with malignant hyperthermia. *Science* 253(5018): 448-51.
- GÄRTNER, T. (2001). Ultraschallspektroskopie mit fokussierenden Systemen zur quantitativen Bestimmung von akustischen Parametern. *Dissertation*. Medizinische Fakultät, Martin-Luther-Universität, Halle.
- GÄRTNER, T., M. ZACHARIAS, K. V. JENDERKA, H. HEYNEMANN und U. COBET (1998). Equipment independent ultrasound tissue characterization of human testis and prostate. *Radiologie* 38(5): 424-433.
- GENTRY, J. G., J. J. MCGLONE, J. R. BLANTON, JR. und M. F. MILLER (2002). Alternative housing systems for pigs: influences on growth, composition, and pork quality. *Journal of Animal Science* 80(7): 1781-90.

- GHAEDIAN, R., J. N. COUPLAND, E. A. DECKER und D. J. MCCLEMENTS (1998). Ultrasonic determination of fish composition. *Journal of Food Engineering* 35(3): 323-337.
- GIBSON, N. M., N. J. DUDLEY und K. GRIFFITH (2001). A computerised quality control testing system for B-mode ultrasound. *Ultrasound Med Biol* 27(12): 1697-711.
- GLODEK, P., H. BÖHME, W. CHAINETER und B. MÖLLERS (2001). Influence of feed quality on fattening and carcass performance of multiple crosses between intensive breeds and endangered local breeds. *Züchtungskunde* 73(4): 266-276.
- GÖDEKE, K., P. GLODEK, J. N. MEYER und H. BRANDT (1998). Effect of the MHS stress gene upon meat production and meat quality in progeny of Pietrain- and (Pietrain\*Hampshire)-crossbred boars. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 41(5): 433-446.
- GÖTZ, K.-U., W. PESCHKE und M. SCHUSTER (2001). Genusswert: Neue Merkmale für die Zucht? Vortrag zum 5. Schweineworkshop am 20./21. Februar 2001 in Uelzen. *DGFZ Schriftenreihe* 5: 75-84.
- HAMILTON, D. N., M. ELLIS, K. D. MILLER, F. K. MCKEITH und D. F. PARRETT (2000). The effect of the Halothane and Rendement Napole genes on carcass and meat quality characteristics of pigs. *Journal of Animal Science* 78(11): 2862-2867.
- HANSEN, P. W., I. THOLL, C. CHRISTENSEN, H. C. JEHG, J. BORG, O. NIELSEN, B. OSTERGAARD, J. NYGAARD und O. ANDERSEN (2003). Batch accuracy of on-line fat determination. *Meat Science* 64(2): 141-147.
- HASSEN, A., D. WILSON, V. AMIN, G. ROUSE und C. L. HAYS (2000). Predicting percentage of intramuscular fat using two types of real-time ultrasound equipment. Quelle: [www.extension.iastate.edu/Pages/ansci/beefreports/asl1732.pdf](http://www.extension.iastate.edu/Pages/ansci/beefreports/asl1732.pdf) (zuletzt geprüft 16.10. 2001)
- HASSEN, A., D. E. WILSON, V. R. AMIN und G. H. ROUSE (1999). Repeatability of ultrasound-predicted percentage of intramuscular fat in feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 77(6): 1335-1340.
- HASSEN, A., D. E. WILSON, V. R. AMIN, G. H. ROUSE und C. L. HAYS (2001). Predicting percentage of intramuscular fat using two types of real-time ultrasound equipment. *Journal of Animal Science* 79(1): 11-18.
- HEIN, I. A., J. A. NOVAKOFSKI und W. D. O'BRIEN (1992). Ultrasound data acquisition system design for collecting high quality data from beef carcasses in the slaughterhouse environment. in *Ultrasonics Symposium*. IEEE: 1039-1044.
- HERRING, W. O., L. A. KRIESE, J. K. BERTRAND und J. CROUCH (1998). Comparison of four real-time ultrasound systems that predict intramuscular fat in beef cattle. *Journal of Animal Science* 76(2): 364-370.
- HEYLEN, K. (1999). Variation von anatomisch-physiologischen Merkmalen sowie Merkmalen der Fleischqualität im M. longissimus thoracis et lumborum des Schweines unter besonderer Berücksichtigung des intramuskulären Fettgehaltes.

*Dissertation.* Institut für Tierzucht und Tierhaltung mit Tierklinik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle.

- HIGBIE, A. D., T. D. BIDNER, J. O. MATTHEWS, L. L. SOUTHERN, T. G. PAGE, M. A. PERSICA, M. B. SANDERS und C. J. MONLEZUN (2002). Prediction of swine carcass composition by total body electrical conductivity (TOBEC). *Journal of Animal Science* 80(1): 113-122.
- HOFER, A. und D. SCHWÖRER (1996). Wie wird der intramuskuläre Fettgehalt honoriert und züchterisch verbessert? Vortrag zum 4. Schweineworkshop am 14./15. Februar 1996 in Uelzen. *DGFZ Schriftenreihe 4*: 207-216.
- HOUSEKNECHT, K. L., C. A. BAILE, R. L. MATTERI und M. E. SPURLOCK (1998). The biology of leptin: a review. *Journal of Animal Science* 76(5): 1405-20.
- IZQUIERDO, M. M., V. AMIN, D. E. WILSON und G. ROUSE (1996). Models to predict intramuscular fat percentage in live beef animals using real-time ultrasound and image parameters: report on data from 1991-1994, Iowa State University, Anim. Sci.
- JACYNO, E., A. PIETRUSZKA, A. KOLODZIEJ und R. CZARNECKI (2002). Content of lipid components in m. longissimus dorsi of progeny of the boars descending from reciprocal crossing of the Pietrain and Duroc breeds. *Archiv für Tierzucht-Archives of Animal Breeding* 45(3): 237-245.
- JENDERKA, K. V., T. GÄRTNER, U. COBET, H. HEYNEMANN und M. WICKE (2000). Ableitung von Parameterbildern aus den HF-Echodaten von Ultraschalldiagnostiksystemen. *Biomedizinische Technik* 45(Ergänzungsband 1): 31-32.
- JENDERKA, K. V., T. GÄRTNER, U. COBET, M. ZACHARIAS und H. HEYNEMANN (2000). Tissue characterisation by imaging the local frequency dependent relative backscatter coefficient. in *Medical Imaging 2000: Ultrasonic Imaging and Signal Processing. Proceedings of SPIE*. 3982: 270-277.
- JENDERKA, K. V., T. GÄRTNER, M. ZACHARIAS, H. HEYNEMANN und U. COBET (1999). System independent tissue typing of human testis and prostate. *1999 IEEE Ultrasonics Symposium, Lake Tahoe, Nevada USA*.
- JIANG, Z. H. und J. P. GIBSON (1999). Genetic polymorphisms in the leptin gene and their association with fatness in four pig breeds. *Mammalian Genome* 10(2): 191-193.
- JOSELL, A., G. VON SETH und E. TORNBERG (2003). Sensory quality and the incidence of PSE of pork in relation to crossbreed and RN phenotype. *Meat Science* 65(1): 651-660.
- KALT, A., A. KAUFMANN, P. AFFENTRANGER, A. HOFER, N. KÜNZI und D. SCHWÖRER (1994). Beurteilung der Fleischqualität am lebenden Schwein. *Agrarforschung*: 183-196.
- KARLSSON, A. H., R. E. KLONT und X. FERNANDEZ (1999). Skeletal muscle fibres as factors for pork quality. *Livestock Production Science* 60(2-3): 255-269.

- KIM, N., V. AMIN, D. WILSON, G. ROUSE und S. UDPA (1998). Ultrasound image texture analysis for characterizing intramuscular fat content of live beef cattle. *Ultrasonic Imaging* 20(3): 191-205.
- KIPFMÜLLER, H., K. BODIS, W. PESCHKE und H. M. EICHINGER (2000). Qualität von Schweinefleisch. Beeinflussung durch das intramuskuläre Fett. *Ernährungsumschau* 47(11): 416-422.
- KÖHLER, P. und E. KALLWEIT (1997). Messtechnik und Einsatzmöglichkeiten der Nah-Infrarot-Spektroskopie zur Bestimmung des IMF-Gehaltes beim Schwein. Beitrag zum IMF-Kolloquium vom 22./23. Oktober 1996 in Jena/Wilhelmsthal: 34-38.
- KOLSTAD, K. (2001). Fat deposition and distribution measured by computer tomography in three genetic groups of pigs. *Livestock Production Science* 67(3): 281-292.
- LARZUL, C., L. LEFAUCHEUR, P. ECOLAN, J. GOGUE, A. TALMANT, P. SELIER, P. LE ROY und G. MONIN (1997). Phenotypic and genetic parameters for longissimus muscle fiber characteristics in relation to growth, carcass, and meat quality traits in large white pigs. *Journal of Animal Science* 75(12): 3126-37.
- LATORRE, M. A., R. LAZARO, M. I. GRACIA, M. NIETO und G. G. MATEOS (2003). Effect of sex and terminal sire genotype on performance, carcass characteristics, and meat quality of pigs slaughtered at 117 kg body weight. *Meat Science* 65(4): 1369-1377.
- LAUBE, S., M. HENNING, H. BRANDT, E. KALLWEIT und P. GLODEK (2000). Meat Quality in Pig Crosses with special quality characteristics as compared to present Standard and Brand Pork Supply. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 43(5): 463-476.
- LEBERTRE, M., F. OSSANT, L. VAILLANT, S. DIRIDOLLOU und F. PATAT (2002). Spatial variation of acoustic parameters in human skin: An in vitro study between 22 and 45 MHz. *Ultrasound in Medicine and Biology* 28(5): 599-615.
- LENGERKEN, G. V., M. BERGMANN und H. PFEIFFER (1989). Bedeutung, Variabilität und Einflussfaktoren auf den intramuskulären Fettgehalt von Schweinefleisch. *Tierzucht* 43: 385-387.
- LENGERKEN, G. V., H. PFEIFFER und T. PAULKE (1988). Untersuchungen zum intramuskulären Fettgehalt des Kotelettfleisches bei verschiedenen Schweinerassen. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 31: 129-136.
- LENGERKEN, G. V., C. SCHRÖDER, T. HANGWITZ, K. BERGER und O. SIEGEL (1984). Einflüsse einer Ergänzung der Futtermittelration durch tierische Fette auf die Schlachtkörperqualität sowie die Fett- und Fleischbeschaffenheit beim Schwein. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 27: 371-379.
- LENGERKEN, G. V., M. WICKE und K. FISCHER (1998). Schlachttierwert des Schweines. in *Fleisch und Fleischwaren*. W. BRANSCHIED, K. O. HONIKEL, G. V. LENGERKEN und K. TRÖGER (Hrsg.). Frankfurt am Main, Deutscher Fachverlag.

- LIN, J., C. R. BARB, R. L. MATTERI, R. R. KRAELING, X. CHEN, R. J. MEINERSMANN und G. B. RAMPACEK (2000). Long form leptin receptor mRNA expression in the brain, pituitary, and other tissues in the pig. *Domestic Animal Endocrinology* 19(1): 53-61.
- LO, L. L., D. G. MCLAREN, F. K. MCKEITH, R. L. FERNANDO und 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(8): 2373-86.
- LONERGAN, S. M., E. HUFF-LONERGAN, L. J. ROWE, D. L. KUHLLERS und S. B. JUNGST (2001). Selection for lean growth efficiency in Duroc pigs influences pork quality. *Journal of Animal Science* 79(8): 2075-85.
- LORENZEN, C. L., R. K. MILLER, J. F. TAYLOR, T. R. NEELY, J. D. TATUM, J. W. WISE, M. J. BUYCK, J. O. REAGAN und J. W. SAVELL (2003). Beef customer satisfaction: Trained sensory panel ratings and Warner-Bratzler shear force values. *Journal of Animal Science* 81(1): 143-149.
- MADSEN, E. L., F. DONG, G. R. FRANK, B. S. GARRA, K. A. WEAR, T. WILSON, J. A. ZAGZEBSKI, H. L. MILLER, K. K. SHUNG, S. H. WANG, E. J. FELEPPA, T. LIU, W. D. O'BRIEN, JR., K. A. TOPP, N. T. SANGHVI, A. V. ZAITSEV, T. J. HALL, J. B. FOWLKES, O. D. KRIPFGANS und J. G. MILLER (1999). Interlaboratory comparison of ultrasonic backscatter, attenuation, and speed measurements. *Journal of Ultrasound in Medicine* 18(9): 615-31.
- MADSEN, N. T., C. BORGGAARD, A. J. RASMUSSEN und L. BAGER (1999). On-line measurement of intramuscular fat/marbling in beef carcasses using electric impedance. *Vortrag zum 45th ICoMST in Yokohama, Japan 1.-6. August 1999*.
- MARCOUX, M., J. F. BERNIER und C. POMAR (2003). Estimation of Canadian and European lean yields and composition of pig carcasses by dual-energy X-ray absorptiometry. *Meat Science* 63(3): 359-365.
- MARTENS, H. und T. NAES (1991). *Multivariate Calibration*, John Wiley & Sons Ltd.
- MARTINEZ, I., M. AURSAND, U. ERIKSON, T. E. SINGSTAD, E. VELIYULIN und C. VAN DER ZWAAG (2003). Destructive and non-destructive analytical techniques for authentication and composition analyses of foodstuffs. *Trends in Food Science & Technology* 14(12): 489-498.
- MCKENNA, D. R., C. L. LORENZEN, K. D. POLLOK, W. W. MORGAN, W. L. MIES, J. J. HARRIS, R. MURPHY, M. MCADAMS, D. S. HALE und J. W. SAVELL (2004). Interrelationships of breed type, USDA quality grade, cooking method and degree of doneness on consumer evaluations of beef in Dallas and San Antonio, Texas, USA. *Meat Science* 66(2): 399-406.
- MEADUS, W. J. und R. MACINNIS (2000). Testing for the RN- gene in retail pork chops. *Meat Science* 54(3): 231-237.
- MERKS, J., P. WALSTRA und E. KANIS (2000). Effect of IMF-level on consumers' perception. *51st Annual Meeting of the European Association for Animal Production, The Hague*.

- MICKLICH, D., H. D. MATTHES, M. HARTUNG und H. MOHRING (2002). Fattening, slaughter performance and meat quality of different pig breeds in indoor or outdoor housing. *Archiv für Tierzucht-Archives of Animal Breeding* 45(3): 247-253.
- MILLER, M. F., M. A. CARR, C. B. RAMSEY, K. L. CROCKETT und L. C. HOOVER (2001). Consumer thresholds for establishing the value of beef tenderness. *Journal of Animal Science* 79(12): 3062-3068.
- MILLER, R. J., L. A. FRIZZELL, J. F. ZACHARY und W. D. O'BRIEN JR. (2002). Attenuation Coefficient and Propagation Speed Estimates of Intercostal Tissue as a Function of Pig Age. *IEEE Transactions on UFFC* 49(10): 1421-1429.
- MITCHELL, A. D., A. M. SCHOLZ, V. G. PURSEL und C. M. EVOCK-CLOVER (1998). Composition analysis of pork carcasses by dual-energy X-ray absorptiometry. *Journal of Animal Science* 76(8): 2104-2114.
- MOELICH, E. I., L. C. HOFFMAN und P. J. CONRADIE (2003). Sensory and functional meat quality characteristics of pork derived from three halothane genotypes. *Meat Science* 63(3): 333-338.
- MÖRLEIN, D., F. ROSNER, S. BRAND, K. V. JENDERKA und M. WICKE (2002). Investigation on spectral analysis of ultrasound echo signals for non-destructive estimation of the intramuscular fat content of the longissimus muscle of pigs in vivo and post mortem. *Posterbeitrag zum 48. ICoMST in Rome, 25.-30. August 2002*.
- MULET, A., J. BENEDITO, J. BON und C. ROSSELLO (1999). Ultrasonic velocity in cheddar cheese as affected by temperature. *Journal of Food Science* 64(6): 1038-1041.
- MÜLLER-HAYE, B. (1965). Die Anwendung von Ultraschallmessungen zur Abschätzung der grobgeweblichen Zusammensetzung von Schlachthälften beim Schwein. *Dissertation*. Institut für Tierzucht und Haustiergenetik, Georg-August-Universität, Göttingen.
- NAES, T. (1998). Detecting individual differences among assessors and differences among replicates in sensory profiling. *Food Quality and Preference* 9(3): 107-110.
- NAIR, A., B. D. KUBAN, N. OBUCHOWSKI und D. G. VINCE (2001). Assessing spectral algorithms to predict atherosclerotic plaque composition with normalized and raw intravascular ultrasound data. *Ultrasound in Medicine and Biology* 27(10): 1319-1331.
- NEUENSCHWANDER, S., G. RETTENBERGER, E. MEIJERINK, H. JORG und G. STRANZINGER (1996). Partial characterization of porcine obesity gene (OBS) and its localization to chromosome 18 by somatic cell hybrids. *Animal Genetics* 27(4): 275-8.
- NEUMANN, R. (1994). Sensorische Lebensmitteluntersuchung. Eine Einführung. Leipzig, Fachbuchverlag.

- NEWCOM, D. W., T. J. BAAS und J. F. LAMPE (2002). Prediction of intramuscular fat percentage in live swine using real-time ultrasound. *Journal of Animal Science* 80(12): 3046-3052.
- OELZE, M. L. und W. D. O'BRIEN JR. (2002a). Frequency-dependent attenuation-compensation functions for ultrasonic signals backscattered from random media. *The Journal of the Acoustical Society of America* 111(5): 2308-2319.
- OELZE, M. L. und W. D. O'BRIEN JR. (2002b). Method of improved scatterer size estimation and application to parametric imaging using ultrasound. *The Journal of the Acoustical Society of America* 112(6): 3053-3063.
- OSSANT, F., M. LEBERTRE, L. POURCELOT und F. PATAT (2001). Ultrasonic characterization of maturation of fetal lung microstructure: An animal study. *Ultrasound in Medicine and Biology* 27(2): 157-169.
- PARK, B. und A. D. WHITTAKER (1990). Determination of beef marbling score using ultrasound A-scan. *International Summer Meeting sponsored by the American Society of Agricultural Engineers, Columbus, Ohio, ASAE*.
- PARK, B., A. D. WHITTAKER, R. K. MILLER und D. E. BRAY (1994). Measuring intramuscular fat in beef with ultrasonic frequency analysis. *Journal of Animal Science* 72(1): 117-25.
- PEREIRA, F. R., W. C. PEREIRA und J. C. MACHADO (2000). Ultrasonic wave speed measurement using the time-delay profile of rf- backscattered signals. *Ultrasonics* 38(1-8): 708-10.
- PFEIFFER, H., C. SCHRÖDER und D. V. CHINH (1991). Ultraschall-Eigenleistungsprüfung behält ihre Bedeutung. *Tierzucht* 45: 66-67.
- RAGLAND, K. D., L. L. CHRISTIAN, T. J. BAAS und V. R. AMIN (1997). Efficacy of using real-time ultrasound to predict intramuscular fat in the longissimus muscle of live swine. Quelle: <http://www.extension.iastate.edu/Pages/ansci/swinereports/asl-1526.pdf> (zuletzt geprüft 1.10. 2001)
- RAJU, B. I. und M. A. SRINIVASAN (2001). High-frequency ultrasonic attenuation and backscatter coefficients of in vivo normal human dermis and subcutaneous fat. *Ultrasound in Medicine and Biology* 27(11): 1543-1556.
- RASCH, D. (1983). Einführung in die Biostatistik. Berlin, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- REALINI, C. E., S. K. DUCKETT und W. R. WINDHAM (2004). Effect of vitamin C addition to ground beef from grass-fed or grain-fed sources on color and lipid stability, and prediction of fatty acid composition by near-infrared reflectance analysis. *Meat Science* 68(1): 35-43.
- REICHARDT, W. und S. MÜLLER (1996). Ergebnisse von vergleichenden Untersuchungen zur Extraktion von intramuskulärem Schweinefett. *Fleischwirtschaft* 76(8): 836-839.

- REICHARDT, W., S. MULLER, M. SCHUSTER und W. PESCHKE (1998). Results of a comparative study about methods for analysis of intramuscular fat content in pig longissimus dorsi muscle by extraction. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 41(1-2): 167-178.
- REICHEL, M., K. FISCHER, J. P. LINDNER, M. WICKE, W. BRANSCHIED und G. V. LENGERKEN (2001). Einfluss der genetischen Konstruktion auf die sensorischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften von Schweinefleisch. *Vortragstagung der deutschen Gesellschaft für Züchtungskunde e.V. (DGfZ) und der Gesellschaft für Tierzuchtwissenschaft (Gft)* 12./13. 09. 2001 in Weihenstephan.
- REICHEL, M., M. WICKE, K. FISCHER, J. P. LINDNER, W. BRANSCHIED und G. V. LENGERKEN (2001). Untersuchungen zur sensorischen Qualität von Schweinefleisch in Abhängigkeit von der Vatterrasse. *Poster zur Hochschultagung der Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg*.
- RESURRECCION, A. V. A. (2004). Sensory aspects of consumer choices for meat and meat products. *Meat Science* 66(1): 11-20.
- ROBERJOT, V., P. LAUGIER und G. BERGER (1994). Anisotropy in bovine skeletal muscle in vitro: frequency dependent attenuation and backscatter coefficient over a wide range of frequencies. *1994 Ultrasonics Symposium*, IEEE.
- ROBERT, C., M. F. PALIN, N. COULOMBE, C. ROBERGE, F. G. SILVERSIDES, B. F. BENKEL, R. M. MCKAY und G. PELLETIER (1998). Backfat thickness in pigs is positively associated with leptin mRNA levels. *Canadian Journal of Animal Science* 78(4): 473-482.
- RODBOTTEN, M., E. KUBBEROD, P. LEA und O. UELAND (2004). A sensory map of the meat universe. Sensory profile of meat from 15 species. *Meat Science* 68(1): 137-144.
- RODBOTTEN, R., B. N. NILSEN und K. I. HILDRUM (2000). Prediction of beef quality attributes from early post mortem near infrared reflectance spectra. *Food Chemistry* 69(4): 427-436.
- RÖSLER, H. J., G. V. LENGERKEN, M. WICKE, M. R. L. SCHEEDER und B. BEISCH (1996). Investigations on the accuracy and the application of ultrasonic measurements for predicting carcass composition on live cattle. *Archiv für Tierzucht - Archives of Animal Breeding* 39(4): 401-413.
- SAS (1999). SAS/STAT User Guide, Version 8. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc.
- SCHEEDER, M. R. L., K. R. GLASER, B. EICHENBERGER und C. WENK (2000). Influence of different fats in pig feed on fatty acid composition of phospholipids and physical meat quality characteristics. *European Journal of Lipid Science and Technology* 102(6): 391-401.
- SCHEIPERS, U., H. ERMERT, H. J. SOMMERFELD, M. GARCIA-SCHURMANN, T. SENGE und S. PHILIPPOU (2003). Ultrasonic multifeature tissue characterization for prostate diagnostics. *Ultrasound in Medicine and Biology* 29(8): 1137-1149.

- SCHMITZ, G. (1995). Ein Verfahren zur Ultraschall-Gewebscharakterisierung der Prostata. *Dissertation*. Fakultät für Elektrotechnik, Ruhr-Universität, Bochum.
- SCHUSTER, M., P. ZEINER, P. OPPERMAN und W. PESCHKE (1998). Bestimmung des intramuskulären Fettgehaltes in Schweinefleisch mittels Nah-Infrarot-Reflexions (NIR) Spektroskopie in einem Gerätenetzwerk. *Vortragstagung der deutschen Gesellschaft für Züchtungskunde e.V. (DGfZ) und der Gesellschaft für Tierzuchtwissenschaft (Gft) 23./24. September 1998, Berlin (A 20)*.
- SCHWÖRER, D. (2003). IMF Gehaltsbestimmung an der MLP Sempach (Ch). pers. Kommunikation
- SCHWÖRER, D., A. HOFER, D. LORENZ und A. REBSAMEN (1997). Selektion auf intramuskuläres Fett in der Schweizerischen Schweinezucht. Beitrag zum IMF-Kolloquium vom 22./23. Oktober 1996 in Jena/Wilhelmsthal.:113-116.
- SCHWÖRER, D. und A. REBSAMEN (1997). Züchterische Aspekte hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung von Schweinefleisch und Fettgewebe. *Workshop "Schweinefleischbeschaffenheit nach der Halothansanierung" am 17./18. 12. 1990 in Nordhausen/Thüringen*.
- SIMEK, J., M. GROlichOVA, I. STEINHAUSEROVA und L. STEINHAUSER (2004). Carcass and meat quality of selected final hybrids of pigs in the Czech Republic. *Meat Science 66(2): 383-386*.
- SMITH, N. B. (1996). Effect of myofibril length and tissue constituents on acoustic propagation properties of muscle. *Ph.D. thesis*. Biophysics, University of Illinois.
- SORLAND, G. H., P. M. LARSEN, F. LUNDBY, A. P. RUDI und T. GUIHENEUF (2004). Determination of total fat and moisture content in meat using low field NMR. *Meat Science 66(3): 543-550*.
- SOSNOVIK, D. E., S. L. BALDWIN, M. R. HOLLAND und J. G. MILLER (2001). Transmural variation of myocardial attenuation and its potential effect on contrast-mediated estimates of regional myocardial perfusion. *Journal of the American Society of Echocardiography 14(8): 782-788*.
- SUISAG (2002). Resultate Stationsprüfung MLP. Quelle:  
[http://www.suisag.ch/suisag/uploads/Ref\\_DSc2.pdf](http://www.suisag.ch/suisag/uploads/Ref_DSc2.pdf) (zuletzt geprüft 15.1. 2003)
- SUNDRUM, A., L. BUTFERING, M. HENNING und K. H. HOPPENBROCK (2000). Effects of on-farm diets for organic pig production on performance and carcass quality. *Journal of Animal Science 78(5): 1199-1205*.
- SUSTER, D., B. J. LEURY, E. OSTROWSKA, K. L. BUTLER, D. J. KERTON, J. D. WARK und 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*.
- SUVANICH, V., R. GHAEDIAN, R. CHANAMAI, E. A. DECKER und D. J. MCCLEMENTS (1998). Prediction of proximate fish composition from ultrasonic properties:

- Catfish, cod, flounder, mackerel and salmon. *Journal of Food Science* 63(6): 966-968.
- SWAN, J. E., F. C. PARRISH, B. R. WIEGAND, S. T. LARSEN, T. J. BAAS und E. P. BERG (2001). Total body electrical conductivity (TOBEC) measurement of compositional differences in hams, loins, and bellies from conjugated linoleic acid (CLA)-fed stress-genotype pigs. *Journal of Animal Science* 79(6): 1475-1482.
- SZABO, C., L. BABINSZKY, M. W. A. VERSTEGEN, O. VANGEN, A. J. M. JANSMAN und 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.
- TOGERSEN, G., J. F. ARNESEN, B. N. NILSEN und K. I. HILDRUM (2003). On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy. *Meat Science* 63(4): 515-523.
- TOPP, K. A. und W. D. O'BRIEN (1998). Anisotropy of ultrasonic parameters in fresh rat skeletal muscle. *IEEE Ultrasonics Symposium*: 1369-1372.
- TOPP, K. A. und W. D. O'BRIEN (2000). Anisotropy of ultrasonic propagation and scattering properties in fresh rat skeletal muscle in vitro. *Journal of the Acoustical Society of America* 107(2): 1027-1033.
- TOPP, K. A., J. F. ZACHARY und W. D. O'BRIEN (2001). Quantifying B-Mode images of in vivo rat mammary tumors by the frequency dependence of backscatter. *Journal of Ultrasound in Medicine* 20(6): 605-612.
- TOWA, R. T., R. J. MILLER, L. A. FRIZZELL, J. F. ZACHARY und W. D. O'BRIEN JR. (2002). Attenuation Coefficient and Propagation Speed Estimates of Rat and Pig Intercostal Tissue as a Function of Temperature. *IEEE Transactions on UFFC* 49(10): 1411-1420.
- UNRUH, J. A., K. G. FRIESEN, S. R. STUEWE, B. L. DUNN, J. L. NELSEN, R. D. GOODBAND und M. D. TOKACH (1996). The Influence of Genotype, Sex, and Dietary Lysine on Pork Subprimal Cut Yields and Carcass Quality of Pigs Fed to Either 104 or 127 Kilograms. *Journal of Animal Science* 74: 1274-1283.
- VAN LAACK, R., S. G. STEVENS und K. J. STALDER (2001). The influence of ultimate pH and intramuscular fat content on pork tenderness and tenderization. *Journal of Animal Science* 79(2): 392-397.
- VAN OECKEL, M. J. und N. WARNANTS (2003). Variation of the sensory quality within the m. longissimus thoracis et lumborum of PSE and normal pork. *Meat Science* 63(3): 293-299.
- VELARDE, A., M. GISPERT, L. FAUCITANO, X. MANTECA und A. DIESTRE (2000). The effect of stunning method on the incidence of PSE meat and haemorrhages in pork carcasses. *Meat Science* 55(3): 309-314.
- VILLE, H., G. ROMBOUTS, P. VAN HECKE, S. PERREMANS, G. MAES, G. SPINCEMAILLE und R. GEERS (1997). An evaluation of ultrasound and nuclear magnetic reso-

- nance spectroscopy to measure in vivo intramuscular fat content of longissimus muscle of pigs. *Journal of Animal Science* 75(11): 2942-9.
- WAGNER, J. R., A. P. SCHINCKEL, W. CHEN, J. C. FORREST und B. L. COE (1999). Analysis of body composition changes of swine during growth and development. *Journal of Animal Science* 77(6): 1442-1466.
- WARENTEST (2002). Warentest für Mastferkel 2002 Prüfungsbericht. Münster, Landwirtschaftliches Wochenblatt Westfalen-Lippe.
- WARRISS, P. D., S. N. BROWN, P. B. GADE, C. SANTOS, L. N. COSTA, E. LAMBOOIJ und R. GEERS (1998). An analysis of data relating to pig carcass quality and indices of stress collected in the European Union. *Meat Science* 49(2): 137-144.
- WATSON, R. J., C. C. MCLEAN, M. P. MOORE, T. SPENCER, D. M. SALTER, T. ANDERSON, K. A. A. FOX und W. N. MCDICKEN (2000). Classification of arterial plaque by spectral analysis of in vitro radio frequency intravascular ultrasound data. *Ultrasound in Medicine and Biology* 26(1): 73-80.
- WEAR, K. A., A. P. STUBER und J. C. REYNOLDS (2000). Relationships of ultrasonic backscatter with ultrasonic attenuation, sound speed and bone mineral density in human calcaneus. *Ultrasound in Medicine and Biology* 26(8): 1311-1316.
- WHEELER, T. L., S. D. SHACKELFORD und M. KOOHMARAIE (2004). The accuracy and repeatability of untrained laboratory consumer panelists in detecting differences in beef longissimus tenderness. *Journal of Animal Science* 82(2): 557-562.
- WHITTAKER, A. D., B. PARK, B. R. THANE, R. K. MILLER und J. W. SAVELL (1992). Principles of ultrasound and measurement of intramuscular fat. *Journal of Animal Science* 70(3): 942-52.
- WICKE, M., K. V. JENDERKA, F. ROSNER, S. BRAND und D. MÖRLEIN (2003). Abschlussbericht zum DFG-Projekt WI 1538/3 (nicht veröffentlicht).
- WITTE, D. P., M. ELLIS, F. K. MCKEITH und E. R. WILSON (2000). Effect of dietary lysine level and environmental temperature during the finishing phase on the intramuscular fat content of pork. *Journal of Animal Science* 78(5): 1272-1276.
- YAO, E., J. LIM, K. TAMAKI, R. ISHII, K. O. KIM und M. O'MAHONY (2003). Structured and unstructured 9-point hedonic scales: A cross cultural study with American, Japanese and Korean consumers. *Journal of Sensory Studies* 18(2): 115-139.
- YOUSSAO, A. K. I., V. VERLEYEN, C. MICHAUX, A. CLINQUART und P. L. LEROY (2002). Evaluation by real-time ultrasound of intramuscular fat in Pietrain pig. *Annales De Medecine Veterinaire* 146(4): 249-255.
- ZGUR, S. (1991). Histologische und biochemische Veränderungen im Muskelgewebe wachsender Schweine. *Dissertation*. Landwirtschaftliche Fakultät, Georg-August-Universität, Göttingen.
- ZHANG, Y., R. PROENCA, M. MAFFEI, M. BARONE, L. LEOPOLD und J. M. FRIEDMAN (1994). Positional cloning of the mouse obese gene and its human homologue. *Nature* 372(6505): 425-32.

ZMP (2004). ZMP Newsletter (Transparenz schaffen). Quelle:

<http://www.zmp.de/news/News.asp?DatumsZahl=20040709&DataId=21259&rPos=0> (zuletzt geprüft 9.7. 2004)

Amtliche Sammlung von Untersuchungsverfahren nach § 35 LMBG: L 06.00 6 Bestimmung des Gesamtfettgehaltes in Fleisch und Fleischerzeugnissen.

ISO 1444:1996 (E) Meat and meat products - determination of free fat content, International Standard Organisation.

Kommission EG Nr. 2967/85 in der Fassung vom 20.12.1994.

## **ANHANG**



**Abbildung A 1: Ultraschallwandler Wobbler AA5A**



Abbildung A 2: Ultraschallmessung am hängenden Schlachtkörper



Abbildung A 3: Ultraschallmessung am hängenden Schlachtkörper – Detail -

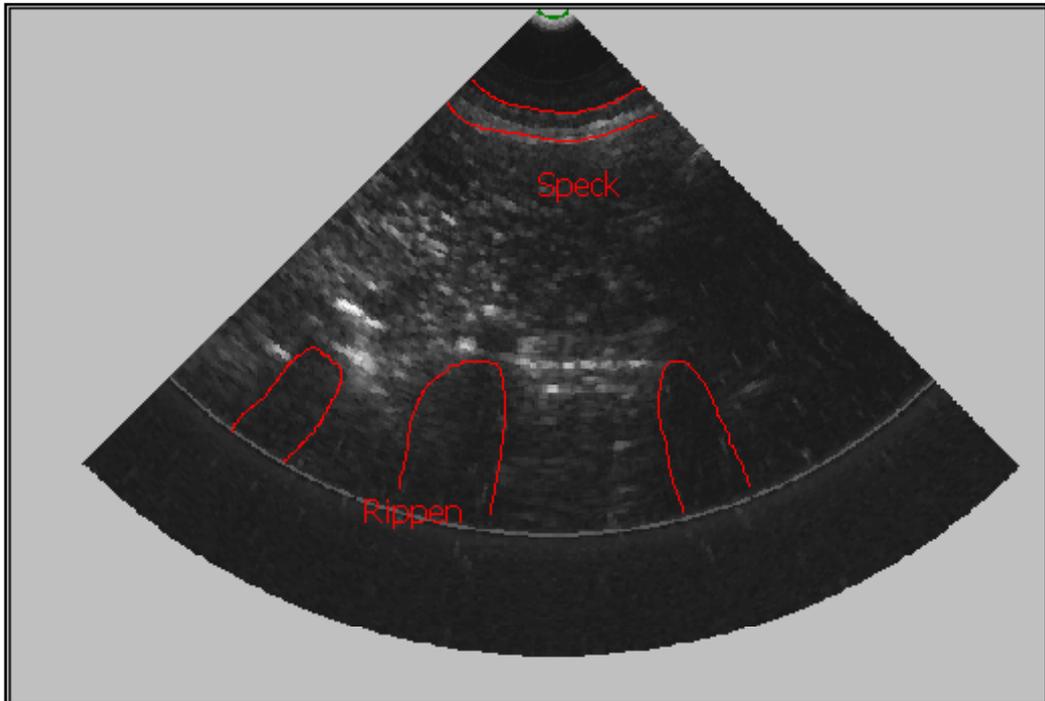


Abbildung A 4: B-Bild einer Messung in Längsrichtung bezogen auf die Wirbelsäule

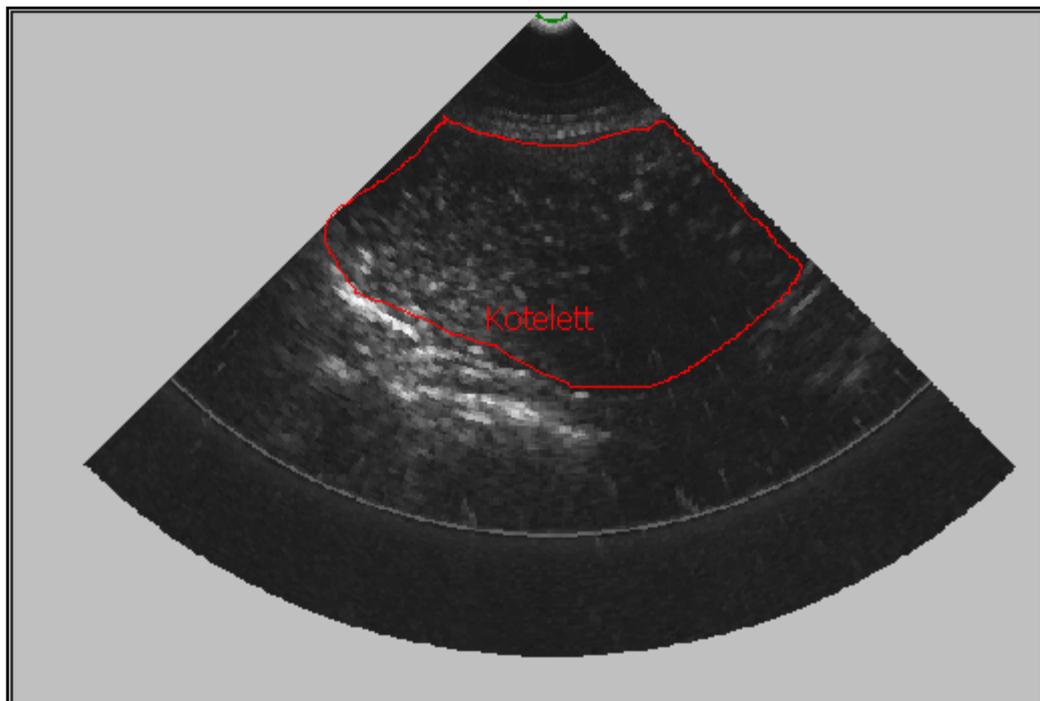


Abbildung A 5: B-Bild einer Messung in Querrichtung bezogen auf die Wirbelsäule

**Tabelle A 1: LS-Mittelwerte (LSM) und Standardfehler (SE) der US-Parameter in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (unterschiedliche Kleinbuchstaben markieren signifikante Differenzen bei  $p < 0,05$ )**

	PMWARM			PMKALT			PMLACHS		
	LSM	SE		LSM	SE		LSM	SE	
ALPHA <sub>2,5</sub>	3,60	0,075	a	2,99	0,075	b	3,15	0,075	c
ALPHA <sub>2,75</sub>	4,08	0,094	a	3,41	0,094	b	3,73	0,094	c
ALPHA <sub>3,0</sub>	4,45	0,110	a	3,49	0,110	b	3,89	0,110	c
ALPHA <sub>3,25</sub>	4,10	0,089	a	2,74	0,089	b	4,13	0,089	a
ALPHA <sub>3,5</sub>	4,42	0,093	a	2,47	0,093	b	4,33	0,093	a
ALPHA <sub>3,75</sub>	4,65	0,093	a	2,92	0,093	b	4,55	0,093	a
ALPHA <sub>4,0</sub>	4,78	0,088	a	1,94	0,088	b	4,77	0,089	a
RA <sub>3,0</sub>	43,42	0,67	a	19,85	0,67	b	11,83	0,67	c
RA <sub>3,5</sub>	41,77	0,49	a	15,11	0,49	b	9,17	0,49	c
RA <sub>4,0</sub>	44,52	0,48	a	13,63	0,48	b	8,33	0,48	c
RR <sub>3,0</sub>	116,51	0,67	a	140,08	0,67	b	148,11	0,67	c
RR <sub>3,5</sub>	121,76	0,49	a	148,42	0,49	b	154,36	0,49	c
RR <sub>4,0</sub>	117,30	0,48	a	148,19	0,48	b	153,49	0,48	c
A <sub>2,5</sub>	46,59	0,228	a	29,26	0,228	b	24,82	0,228	c
A <sub>2,75</sub>	53,97	0,264	a	33,58	0,264	b	30,76	0,265	c
A <sub>3,0</sub>	58,30	0,288	a	36,20	0,288	b	34,11	0,289	c
A <sub>3,25</sub>	57,22	0,303	a	34,63	0,303	b	30,82	0,303	c
A <sub>3,5</sub>	56,66	0,327	a	34,80	0,327	b	28,52	0,328	c
A <sub>3,75</sub>	56,27	0,362	a	36,89	0,362	b	26,28	0,362	c
A <sub>4,0</sub>	55,96	0,401	a	40,39	0,401	b	24,72	0,401	c
MR <sub>2,5</sub>	57,14	0,356	a	38,38	0,356	b	35,41	0,357	c
MR <sub>2,75</sub>	67,18	0,425	a	44,20	0,425	b	43,21	0,425	b
MR <sub>3,0</sub>	71,33	0,461	a	48,29	0,461	b	47,27	0,462	b
MR <sub>3,25</sub>	76,46	0,446	a	45,78	0,446	b	47,69	0,447	c
MR <sub>3,5</sub>	76,89	0,449	a	45,21	0,449	b	45,83	0,450	b
MR <sub>3,75</sub>	77,14	0,463	a	46,42	0,463	b	43,39	0,464	c
MR <sub>4,0</sub>	77,53	0,485	a	48,72	0,485	b	41,81	0,486	c

**Tabelle A 1: (Fortsetzung)**

	PMWARM			PMKALT			PMLACHS		
	LSM	SE		LSM	SE		LSM	SE	
DBC <sub>2,5</sub>	6,81	0,107	a	4,80	0,107	b	5,68	0,107	c
DBC <sub>2,75</sub>	7,16	0,118	a	5,44	0,118	b	6,46	0,119	c
DBC <sub>3,0</sub>	7,20	0,126	a	5,53	0,126	b	6,66	0,126	c
DBC <sub>3,25</sub>	7,31	0,127	a	5,21	0,127	b	6,60	0,127	c
DBC <sub>3,5</sub>	7,46	0,125	a	4,42	0,125	b	6,56	0,125	c
DBC <sub>3,75</sub>	7,50	0,119	a	3,51	0,119	b	6,32	0,119	c
DBC <sub>4,0</sub>	7,29	0,109	a	2,79	0,109	b	5,59	0,109	c
BCMAX <sub>2,5</sub>	60,64	0,363	a	40,91	0,363	b	38,41	0,363	c
BCMAX <sub>2,75</sub>	70,78	0,432	a	47,08	0,432	b	46,55	0,433	b
BCMAX <sub>3,0</sub>	75,00	0,463	a	51,24	0,463	b	50,68	0,464	b
BCMAX <sub>3,25</sub>	80,17	0,454	a	48,58	0,454	b	51,04	0,455	c
BCMAX <sub>3,5</sub>	80,69	0,450	a	47,58	0,450	b	49,18	0,451	c
BCMAX <sub>3,75</sub>	81,01	0,460	a	48,30	0,460	b	46,64	0,461	c
BCMAX <sub>4,0</sub>	81,33	0,483	a	50,19	0,483	b	44,73	0,484	c
IOBC <sub>2,5</sub>	0,55	0,027	a	0,38	0,027	b	0,45	0,027	b
IOBC <sub>2,75</sub>	0,53	0,018	a	0,40	0,018	b	0,49	0,018	a
IOBC <sub>3,0</sub>	0,54	0,023	a	0,39	0,023	b	0,53	0,023	a
IOBC <sub>3,25</sub>	0,55	0,020	a	0,37	0,020	b	0,53	0,020	a
IOBC <sub>3,5</sub>	0,53	0,020	a	0,31	0,020	b	0,52	0,020	a
IOBC <sub>3,75</sub>	0,54	0,018	a	0,27	0,018	b	0,46	0,018	c
IOBC <sub>4,0</sub>	0,49	0,016	a	0,23	0,016	b	0,41	0,106	c
MW CF	3,86	0,026	a	4,93	0,026	b	3,02	0,026	c
IBCREL	1471,79	4,95	a	1749,92	4,95	b	1768,79	4,96	c
MWSWP	2,96	0,013	a	2,89	0,013	b	3,48	0,013	c
DSWP	-0,20	0,012	a	0,03	0,012	b	0,02	0,012	b
BW	-0,18	0,035	a	0,42	0,035	b	-0,05	0,035	c
CPN	12,92	0,092	a	14,04	0,092	b	15,21	0,092	c
CA	8111,15	9,798	a	8061,97	9,799	b	8073,89	9,815	b
CFP	16,35	0,021	a	16,08	0,021	b	16,13	0,020	c
CPMD	9,34	0,011	a	9,28	0,011	b	9,39	0,011	c
CFDS	-0,08	0,003	a	-0,03	0,003	b	-0,02	0,003	c
IAC	54,70	1,027	a	31,34	1,027	b	49,11	1,028	c
IOA	0,48	0,020	a	-0,45	0,020	b	0,68	0,020	c

**Tabelle A 2: LS-Mittelwerte (LSM) und Standardfehler (SE) der US-Parameter in Abhängigkeit von der Messrichtung (unterschiedliche Kleinbuchstaben markieren signifikante Differenzen bei  $p < 0,05$ )**

Parameter	Messrichtung quer (Q)			Messrichtung längs (L)		
	LSM	SE		LSM	SE	
ALPHA <sub>2,5</sub>	3,38	0,070	a	3,12	0,070	b
ALPHA <sub>2,75</sub>	3,87	0,088	a	3,62	0,088	b
ALPHA <sub>3,0</sub>	4,04	0,104	a	3,84	0,104	b
ALPHA <sub>3,25</sub>	3,79	0,083	a	3,52	0,083	b
ALPHA <sub>3,5</sub>	3,86	0,088	a	3,62	0,088	b
ALPHA <sub>3,75</sub>	3,90	0,087	a	3,68	0,087	b
ALPHA <sub>4,0</sub>	3,92	0,083		3,74	0,083	
RA <sub>3,0</sub>	25,73	0,617		24,33	0,618	
RA <sub>3,5</sub>	22,76	0,439		21,28	0,440	
RA <sub>4,0</sub>	22,89	0,425		21,43	0,426	
RR <sub>3,0</sub>	134,20	0,617	a	135,60	0,618	b
RR <sub>3,5</sub>	140,77	0,439	a	142,25	0,440	b
RR <sub>4,0</sub>	138,93	0,425	a	140,39	0,426	b
A <sub>2,5</sub>	33,02	0,214	a	34,09	0,214	b
A <sub>2,75</sub>	38,84	0,246	a	40,04	0,247	b
A <sub>3,0</sub>	42,26	0,269	a	43,48	0,269	b
A <sub>3,25</sub>	40,28	0,284	a	41,49	0,285	b
A <sub>3,5</sub>	39,39	0,310	a	40,59	0,310	b
A <sub>3,75</sub>	39,24	0,346	a	40,39	0,346	b
A <sub>4,0</sub>	39,83	0,386	a	40,88	0,386	b
MR <sub>2,5</sub>	42,50	0,319	a	44,78	0,319	b
MR <sub>2,75</sub>	50,14	0,383	a	52,87	0,384	b
MR <sub>3,0</sub>	54,48	0,417	a	56,77	0,417	b
MR <sub>3,25</sub>	55,37	0,407	a	57,92	0,407	b
MR <sub>3,5</sub>	54,83	0,409	a	57,13	0,410	b
MR <sub>3,75</sub>	54,68	0,424	a	56,62	0,425	b
MR <sub>4,0</sub>	55,21	0,448	a	56,83	0,448	b

**Tabelle A 2: (Fortsetzung)**

Parameter	Messrichtung quer (Q)			Messrichtung längs (L)		
	LSM	SE		LSM	SE	
DBC <sub>2,5</sub>	5,45	0,092	a	6,07	0,092	b
DBC <sub>2,75</sub>	5,95	0,104	a	6,75	0,104	b
DBC <sub>3,0</sub>	5,96	0,111	a	6,95	0,111	b
DBC <sub>3,25</sub>	5,83	0,112	a	6,92	0,112	b
DBC <sub>3,5</sub>	5,61	0,110	a	6,68	0,110	b
DBC <sub>3,75</sub>	5,30	0,104	a	6,26	0,104	b
DBC <sub>4,0</sub>	4,80	0,094	a	5,65	0,094	b
BCMAX <sub>2,5</sub>	45,35	0,324	a	47,95	0,325	b
BCMAX <sub>2,75</sub>	53,24	0,390	a	56,37	0,391	b
BCMAX <sub>3,0</sub>	57,59	0,418	a	60,36	0,418	b
BCMAX <sub>3,25</sub>	58,40	0,414	a	61,47	0,414	b
BCMAX <sub>3,5</sub>	57,73	0,409	a	60,57	0,409	b
BCMAX <sub>3,75</sub>	57,44	0,420	a	59,86	0,420	b
BCMAX <sub>4,0</sub>	57,72	0,445	a	59,77	0,445	b
IOBC <sub>2,5</sub>	0,45	0,022		0,47	0,022	
IOBC <sub>2,75</sub>	0,48	0,015		0,46	0,015	
IOBC <sub>3,0</sub>	0,51	0,020	a	0,46	0,020	b
IOBC <sub>3,25</sub>	0,51	0,018	a	0,46	0,018	b
IOBC <sub>3,5</sub>	0,47	0,017		0,44	0,017	
IOBC <sub>3,75</sub>	0,45	0,015	a	0,40	0,015	b
IOBC <sub>4,0</sub>	0,38	0,014		0,37	0,014	
MW CF	3,99	0,024	a	3,89	0,024	b
IBCREL	1657,75	4,461	a	1669,25	4,464	b
MWSWP	3,08	0,011	a	3,13	0,011	b
DSWP	-0,03	0,011	a	-0,06	0,011	b
BW	0,10	0,030	a	0,03	0,030	b
CPN	14,27	0,084	a	13,85	0,084	b
CA	8090,50	9,241	a	8074,18	9,245	b
CFP	16,18	0,020		16,19	0,020	
CPMD	9,34	0,010		9,33	0,010	
CFDS	-0,05	0,003	a	-0,03	0,003	b
IAC	45,96	0,973	a	44,13	0,974	b
IOA	0,19	0,018	a	0,28	0,018	b

**Tabelle A 3: Wiederholbarkeit der akustischen Parameter (Intraklasskorrelation der wiederholten Messungen je Tier) in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Messrichtung**

Zeitpunkt Richtung	WARM			KALT			LACHS		
	alle	quer	längs	alle	quer	längs	alle	quer	längs
ALPHA <sub>2,5</sub>	,50	,67	,60	,49	,64	,67	,31	,42	,41
ALPHA <sub>2,75</sub>	,52	,67	,64	,55	,66	,69	,31	,43	,40
ALPHA <sub>3,0</sub>	,55	,67	,66	,60	,67	,71	,31	,41	,39
ALPHA <sub>3,25</sub>	,44	,60	,59	,63	,72	,75	,29	,50	,43
ALPHA <sub>3,5</sub>	,46	,62	,61	,68	,70	,76	,29	,49	,41
ALPHA <sub>3,75</sub>	,47	,62	,61	,67	,64	,72	,28	,49	,39
ALPHA <sub>4,0</sub>	,47	,59	,61	,61	,57	,63	,27	,45	,34
RA <sub>3,0</sub>	,45	,57	,56	,43	,47	,56	,15	,25	,13
RA <sub>3,5</sub>	,38	,51	,53	,45	,40	,54	,12	,25	,19
RA <sub>4,0</sub>	,36	,45	,49	,38	,35	,42	,15	,24	,19
RR <sub>3,0</sub>	,45	,57	,56	,43	,47	,56	,15	,25	,13
RR <sub>3,5</sub>	,38	,51	,53	,45	,40	,54	,12	,25	,19
RR <sub>4,0</sub>	,36	,45	,49	,38	,35	,42	,15	,24	,19
A <sub>2,5</sub>	,60	,70	,69	,73	,77	,82	,42	,46	,59
A <sub>2,75</sub>	,59	,70	,68	,72	,77	,83	,45	,50	,63
A <sub>3,0</sub>	,58	,71	,68	,72	,79	,84	,46	,51	,64
A <sub>3,25</sub>	,61	,74	,71	,75	,83	,87	,46	,51	,65
A <sub>3,5</sub>	,60	,73	,70	,81	,88	,90	,46	,51	,64
A <sub>3,75</sub>	,61	,73	,70	,90	,94	,94	,46	,51	,64
A <sub>4,0</sub>	,62	,74	,71	,96	,97	,97	,45	,49	,61
MR <sub>2,5</sub>	,29	,36	,30	,45	,36	,60	,29	,37	,36
MR <sub>2,75</sub>	,32	,38	,33	,49	,41	,65	,30	,38	,37
MR <sub>3,0</sub>	,29	,41	,28	,51	,48	,62	,30	,37	,38
MR <sub>3,25</sub>	,37	,42	,41	,59	,53	,75	,33	,43	,43
MR <sub>3,5</sub>	,37	,42	,40	,61	,61	,72	,35	,42	,44
MR <sub>3,75</sub>	,37	,43	,39	,70	,75	,75	,36	,39	,45
MR <sub>4,0</sub>	,37	,45	,40	,79	,82	,81	,37	,37	,44

**Tabelle A 3: (Fortsetzung)**

Zeitpunkt Richtung	WARM			KALT			LACHS		
	alle	quer	längs	alle	quer	längs	alle	quer	längs
DBC <sub>2,5</sub>	,10	,17	,13	,15	,48	,14	,15	,09	,37
DBC <sub>2,75</sub>	,12	,15	,18	,22	,54	,20	,12	,05	,28
DBC <sub>3,0</sub>	,13	,16	,15	,25	,58	,20	,10	,08	,23
DBC <sub>3,25</sub>	,13	,17	,19	,25	,63	,19	,11	,15	,21
DBC <sub>3,5</sub>	,15	,20	,22	,22	,67	,16	,13	,18	,25
DBC <sub>3,75</sub>	,17	,29	,28	,17	,65	,12	,13	,12	,27
DBC <sub>4,0</sub>	,17	,28	,32	,08	,57	,06	,15	,16	,31
BCMAX <sub>2,5</sub>	,28	,37	,28	,41	,37	,50	,25	,36	,33
BCMAX <sub>2,75</sub>	,30	,38	,31	,48	,43	,58	,27	,37	,35
BCMAX <sub>3,0</sub>	,28	,41	,27	,47	,48	,54	,27	-	,36
BCMAX <sub>3,25</sub>	,36	,43	,39	,56	,55	,66	,29	,40	,39
BCMAX <sub>3,5</sub>	,36	,44	,38	,56	,61	,62	,31	,39	,40
BCMAX <sub>3,75</sub>	,36	,44	,39	,63	,74	,62	,33	,38	,41
BCMAX <sub>4,0</sub>	,36	,45	,40	,72	,82	,68	,35	,36	,41
IOBC <sub>2,5</sub>	,03	,03	,20	,00	,00	,00	,02	,00	,04
IOBC <sub>2,75</sub>	,05	,08	,09	,07	,10	,04	,07	,08	,12
IOBC <sub>3,0</sub>	,02	,11	,04	,03	,19	,00	,00	,00	,12
IOBC <sub>3,25</sub>	,06	,09	,03	,10	,15	,00	,04	,09	,14
IOBC <sub>3,5</sub>	,04	,07	,00	,10	,12	,14	,04	,04	,06
IOBC <sub>3,75</sub>	,04	,09	,04	,01	,12	,00	,04	,03	,13
IOBC <sub>4,0</sub>	,06	,85	,05	,03	,07	,05	,02	,03	,12
MWCF	,68	,85	,78	,73	,80	,89	,19	,00	,50
IBCREL	,40	,51	,53	,45	,42	,54	,21	,42	,17
MWSWP	,31	,44	,50	,95	,95	,96	,28	,33	,35
DSWP	,39	,42	,48	,41	,43	,46	,13	,28	,06
BW	,27	,29	,37	,19	,22	,15	,04	,05	,15
CPN	,30	,63	,53	,73	,84	,84	,27	,29	,35
CA	,34	,39	,37	,36	,33	,46	,30	,28	,44
CFP	,22	,25	,28	,26	,26	,25	,21	,24	,30
CPMD	,26	,33	,23	,39	,39	,44	,24	,23	,32
CFDS	,29	,47	,47	,53	,69	,72	,25	,47	,33
IAC	,55	,67	,66	,64	,64	,69	,30	,42	,36
IOA	,18	,21	,19	,34	,53	,58	,25	,34	,34

**Tabelle A 4: Korrelationen akustischer Parameter zum IMF-Gehalt im *M. longissimus* in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt (Parametermittelwerte aus je 6 Messungen je Schlachtkörper; r = Korrelationskoeffizient, p = Irrtumswahrscheinlichkeit)**

Messzeitpunkt	WARM ( N = 115)		KALT (N = 115)		LACHS (N = 114)	
	r	p	r	p	r	p
ALPHA <sub>2,5</sub>	-0,14	0,141	-0,26	0,005	0,13	0,162
ALPHA <sub>2,75</sub>	-0,13	0,171	-0,28	0,003	0,13	0,183
ALPHA <sub>3,0</sub>	-0,10	0,285	-0,28	0,003	0,14	0,129
ALPHA <sub>3,25</sub>	-0,03	0,714	-0,27	0,003	0,18	0,060
ALPHA <sub>3,5</sub>	-0,04	0,644	-0,27	0,003	0,19	0,056
ALPHA <sub>3,75</sub>	-0,06	0,519	-0,26	0,005	0,17	0,071
ALPHA <sub>4,0</sub>	-0,07	0,472	-0,23	0,013	0,17	0,071
RA <sub>3,0</sub>	0,01	0,891	-0,32	0,001	0,04	0,663
RA <sub>3,5</sub>	0,12	0,205	-0,17	0,076	0,03	0,717
RA <sub>4,0</sub>	0,08	0,378	-0,21	0,021	-0,01	0,889
RR <sub>3,0</sub>	-0,01	0,891	0,32	0,001	-0,04	0,663
RR <sub>3,5</sub>	-0,12	0,205	0,17	0,076	-0,03	0,717
RR <sub>4,0</sub>	-0,08	0,378	0,21	0,021	0,01	0,889
A <sub>2,5</sub>	0,27	0,003	-0,16	0,083	0,02	0,838
A <sub>2,75</sub>	0,23	0,013	-0,21	0,023	-0,01	0,900
A <sub>3,0</sub>	0,22	0,021	-0,20	0,031	-0,03	0,731
A <sub>3,25</sub>	0,23	0,016	-0,14	0,134	-0,05	0,579
A <sub>3,5</sub>	0,22	0,017	-0,05	0,562	-0,07	0,438
A <sub>3,75</sub>	0,21	0,023	0,04	0,667	-0,09	0,362
A <sub>4,0</sub>	0,20	0,028	0,11	0,229	-0,09	0,355
MR <sub>2,5</sub>	0,16	0,093	-0,10	0,282	0,13	0,168
MR <sub>2,75</sub>	0,14	0,150	-0,16	0,093	0,09	0,333
MR <sub>3,0</sub>	0,10	0,288	-0,05	0,628	0,08	0,425
MR <sub>3,25</sub>	0,24	0,010	-0,15	0,108	0,10	0,307
MR <sub>3,5</sub>	0,25	0,007	-0,04	0,656	0,09	0,361
MR <sub>3,75</sub>	0,25	0,006	0,08	0,423	0,08	0,427
MR <sub>4,0</sub>	0,25	0,007	0,16	0,093	0,08	0,403

**Tabelle A 4: (Fortsetzung)**

Messzeitpunkt	WARM		KALT		LACHS	
	r	p	r	p	r	p
DBC <sub>2,5</sub>	0,01	0,896	-0,11	0,244	-0,03	0,746
DBC <sub>2,75</sub>	-0,04	0,704	-0,11	0,244	-0,07	0,431
DBC <sub>3,0</sub>	-0,06	0,519	-0,13	0,156	-0,10	0,285
DBC <sub>3,25</sub>	-0,05	0,592	-0,18	0,059	-0,08	0,397
DBC <sub>3,5</sub>	-0,05	0,581	-0,22	0,017	-0,05	0,610
DBC <sub>3,75</sub>	-0,04	0,665	-0,24	0,011	-0,06	0,554
DBC <sub>4,0</sub>	-0,05	0,609	-0,17	0,066	-0,13	0,163
BCMAX <sub>2,5</sub>	0,16	0,084	-0,11	0,246	0,13	0,177
BCMAX <sub>2,75</sub>	0,14	0,149	-0,16	0,082	0,08	0,369
BCMAX <sub>3,0</sub>	0,09	0,320	-0,06	0,534	0,07	0,471
BCMAX <sub>3,25</sub>	0,24	0,011	-0,16	0,080	0,09	0,333
BCMAX <sub>3,5</sub>	0,25	0,007	-0,07	0,470	0,08	0,380
BCMAX <sub>3,75</sub>	0,26	0,006	0,05	0,582	0,07	0,450
BCMAX <sub>4,0</sub>	0,25	0,007	0,14	0,127	0,07	0,468
IOBC <sub>2,5</sub>	0,09	0,362	-0,04	0,648	-0,01	0,912
IOBC <sub>2,75</sub>	-0,02	0,821	-0,05	0,589	-0,04	0,636
IOBC <sub>3,0</sub>	-0,19	0,041	-0,16	0,086	-0,09	0,341
IOBC <sub>3,25</sub>	-0,07	0,438	-0,21	0,022	-0,01	0,890
IOBC <sub>3,5</sub>	-0,21	0,028	-0,27	0,003	-0,02	0,839
IOBC <sub>3,75</sub>	-0,28	0,002	-0,32	0,001	-0,01	0,883
IOBC <sub>4,0</sub>	-0,21	0,026	-0,12	0,195	-0,10	0,279
MW CF	0,05	0,592	0,14	0,131	-0,05	0,569
IBCREL	-0,09	0,316	0,23	0,013	0,12	0,190
MWSWP	0,18	0,052	-0,20	0,037	0,05	0,587
DSWP	-0,14	0,128	-0,20	0,029	-0,06	0,509
BW	-0,16	0,090	0,07	0,478	-0,10	0,284
CPN	-0,14	0,145	-0,39	<0,0001	-0,09	0,330
CA	0,11	0,233	-0,09	0,329	-0,07	0,488
CFP	0,10	0,312	-0,14	0,123	-0,11	0,251
CPMD	-0,09	0,343	-0,28	0,003	-0,12	0,188
CFDS	-0,02	0,867	0,36	<0,0001	-0,06	0,498
IAC	-0,07	0,435	-0,25	0,008	0,17	0,075
IOA	0,18	0,052	-0,01	0,949	0,08	0,422

**Tabelle A 5: Korrelationen der Ultraschallparameter zum IMF im *M. longissimus* (Rohparameter; n = 341-344 je Messzeitpunkt und -richtung)**

Messrichtung	Schlachtkörper warm		Schlachtkörper kalt		Lachs	
	quer	längs	quer	längs	quer	längs
ALPHA <sub>2,5</sub>	-0,14 **	-0,08	-0,22 ***	-0,19	0,12 *	0,06
ALPHA <sub>2,75</sub>	-0,14 *	-0,07	-0,25 ***	-0,21	0,11 *	0,06
ALPHA <sub>3,0</sub>	-0,11 *	-0,05	-0,26 ***	-0,21	0,13 *	0,06
ALPHA <sub>3,25</sub>	-0,06	0,01	-0,27 ***	-0,20	0,18 **	0,06
ALPHA <sub>3,5</sub>	-0,07	0,00	-0,27 ***	-0,21	0,19 **	0,05
ALPHA <sub>3,75</sub>	-0,08	-0,01	-0,25 ***	-0,21	0,18 **	0,05
ALPHA <sub>4,0</sub>	-0,09	-0,01	-0,22 ***	-0,18	0,16 **	0,06
RA <sub>3,0</sub>	-0,02	0,04	-0,22 ***	-0,24	0,04	0,01
RA <sub>3,5</sub>	0,05	0,13 *	-0,09	-0,14	0,08	-0,04
RA <sub>4,0</sub>	0,02	0,11	-0,13 *	-0,17	0,06	-0,07
RR <sub>3,0</sub>	0,02	-0,04	0,22 ***	0,24	-0,04	-0,01
RR <sub>3,5</sub>	-0,05	-0,13 *	0,09	0,14	-0,08	0,04
RR <sub>4,0</sub>	-0,02	-0,11	0,13 *	0,17	-0,06	0,07
A <sub>2,5</sub>	0,25 ***	0,22 ***	-0,16 **	-0,13	0,00	0,03
A <sub>2,75</sub>	0,21 ***	0,19 ***	-0,21 ***	-0,17	-0,04	0,02
A <sub>3,0</sub>	0,20 ***	0,17 **	-0,19 ***	-0,17	-0,06	0,00
A <sub>3,25</sub>	0,21 ***	0,18 **	-0,12 *	-0,13	-0,07	-0,01
A <sub>3,5</sub>	0,21 ***	0,18 **	-0,03	-0,06	-0,09	-0,03
A <sub>3,75</sub>	0,20 ***	0,17 **	0,06	0,03	-0,10	-0,04
A <sub>4,0</sub>	0,20 ***	0,16 **	0,13 *	0,11	-0,09	-0,04
MR <sub>2,5</sub>	0,20 ***	0,03	-0,05	-0,09	0,13 *	0,09
MR <sub>2,75</sub>	0,16 **	0,03	-0,10	-0,14	0,09	0,06
MR <sub>3,0</sub>	0,15 **	-0,02	-0,02	-0,04	0,08	0,05
MR <sub>3,25</sub>	0,21 ***	0,14 **	-0,11 *	-0,13	0,09	0,07
MR <sub>3,5</sub>	0,21 ***	0,15 **	0,00	-0,06	0,08	0,06
MR <sub>3,75</sub>	0,21 ***	0,15 **	0,10	0,05	0,07	0,06
MR <sub>4,0</sub>	0,20 ***	0,16 **	0,17 **	0,14	0,07	0,06

Signifikanzniveaus: \* p < 0,05, \*\* p < 0,01, \*\*\* p < 0,001

**Tabelle A 5: (Fortsetzung)**

Messrichtung	Schlachtkörper warm		Schlachtkörper kalt		Lachs	
	quer	längs	quer	längs	quer	längs
DBC <sub>2,5</sub>	0,05	-0,02	-0,07	-0,06	-0,01	-0,02
DBC <sub>2,75</sub>	0,03	-0,07	-0,10	-0,06	-0,08	-0,02
DBC <sub>3,0</sub>	0,03	-0,09	-0,14	-0,07	-0,09	-0,03
DBC <sub>3,25</sub>	0,06	-0,11	-0,17	-0,09	-0,05	-0,04
DBC <sub>3,5</sub>	0,07	-0,11 *	-0,23	-0,10	-0,02	-0,03
DBC <sub>3,75</sub>	0,09	-0,12 *	-0,26	-0,10	-0,03	-0,03
DBC <sub>4,0</sub>	0,11	-0,15 **	-0,16	-0,08	-0,10	-0,06
BCMAX <sub>2,5</sub>	0,20 ***	0,03	-0,06	-0,10	0,13 *	0,08
BCMAX <sub>2,75</sub>	0,17 **	0,02	-0,11 *	-0,14 *	0,08	0,06
BCMAX <sub>3,0</sub>	0,16 **	-0,03	-0,03	-0,05	0,07	0,04
BCMAX <sub>3,25</sub>	0,22 ***	0,13 *	-0,13 *	-0,13 *	0,08	0,07
BCMAX <sub>3,5</sub>	0,23 ***	0,13 *	-0,03	-0,07	0,08	0,06
BCMAX <sub>3,75</sub>	0,23 ***	0,14 *	0,08	0,03	0,06	0,06
BCMAX <sub>4,0</sub>	0,22 ***	0,14 **	0,16 **	0,11 *	0,06	0,06
IOBC <sub>2,5</sub>	-0,04	0,12	-0,07	-0,01	-0,05	0,04
IOBC <sub>2,75</sub>	-0,08	0,07	-0,05	-0,01	-0,06	0,02
IOBC <sub>3,0</sub>	-0,11 *	-0,05	-0,15 **	-0,04	-0,01	-0,08
IOBC <sub>3,25</sub>	-0,04	-0,02	-0,14 *	-0,06	0,04	-0,07
IOBC <sub>3,5</sub>	-0,14 *	-0,04	-0,13 *	-0,15 **	0,00	-0,02
IOBC <sub>3,75</sub>	-0,16 **	-0,08	-0,17 **	-0,09	-0,03	0,02
IOBC <sub>4,0</sub>	-0,12 *	-0,07	-0,06	-0,05	-0,08	-0,01
MW CF	0,04	0,05	0,09	0,15 **	0,01	-0,05
IBCREL	-0,03	-0,12 *	0,15 **	0,19 ***	0,03	0,12 *
MWSWP	0,09	0,15 **	-0,20 ***	-0,20 ***	0,05	0,03
DSWP	-0,15 **	-0,06	-0,19 **	-0,11 *	-0,03	-0,05
BW	-0,14 *	-0,07	0,11 *	-0,03	-0,12 *	0,03
CPN	-0,14 *	-0,08	-0,40 ***	-0,30 ***	-0,09	-0,04
CA	0,06	0,13 *	-0,09	-0,04	0,00	-0,10
CFP	0,03	0,12 *	-0,11 *	-0,09	-0,03	-0,12 *
CPMD	-0,08	-0,06	-0,22 ***	-0,20 ***	-0,09	-0,10
CFDS	0,03	-0,05	0,33 ***	0,25 ***	-0,09	-0,01
IAC	-0,10	-0,02	-0,24 ***	-0,18 **	0,14 *	0,08
IOA	0,09	0,13 *	-0,02	0,02	0,12 *	-0,03

Signifikanzniveaus: \* p < 0,05, \*\* p < 0,01, \*\*\* p < 0,001

**Tabelle A 6: Bestimmtheitsmaße (R<sup>2</sup>) und Schätzfehler (RMSE) der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Messrichtung unter Verwendung von gemittelten Ultraschallparametern (n = 115)**

Messrichtung	Schlachtkörper warm			Schlachtkörper kalt			Lachs		
	Q	L	ALLDIR	Q	L	Q+L	Q	L	ALLDIR
R <sup>2</sup>	0,46	0,24	0,60	0,26	0,26	0,25	0,35	0,03	0,10
adj. R <sup>2</sup>	0,41	0,20	0,56	0,23	0,23	0,22	0,30	0,02	0,07
RMSE	0,42	0,49	0,36	0,48	0,48	0,49	0,46	0,55	0,53
Parameter im Modell nach schrittweiser Selektion	ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,25</sub> BCMAX <sub>2,75</sub> BCMAX <sub>3,75</sub> IBCrel IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,5</sub> MR <sub>4,0</sub> RA <sub>4,0</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>4,0</sub> ALPHA <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>2,75</sub> CFDS IAC IBCrel IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>4,0</sub>	CPN DBC <sub>2,5</sub> IOA RA <sub>4,0</sub>	A <sub>3,5</sub> A <sub>4,0</sub> IOA IOBC <sub>3,25</sub> RA <sub>4,0</sub>	CPN IOA RA <sub>4,0</sub> RR <sub>3,0</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,75</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> CFDS DBC <sub>2,75</sub> DBC <sub>3,5</sub> IOBC <sub>4,0</sub>	IBCrel	ALPHA <sub>3,5</sub> CPMD DBC <sub>2,5</sub> DBC <sub>3,0</sub>

**Tabelle A 7: Bestimmtheitsmaße (R<sup>2</sup>) und Schätzfehler (RMSE) der Multiplen Regression nach schrittweiser Selektion in Abhängigkeit von Messzeitpunkt und Messrichtung unter Verwendung von Einzelmessungen**

Messrichtung	Schlachtkörper warm			Schlachtkörper kalt			Lachs		
	quer (Q)	längs (L)	Q+L	quer (Q)	längs (L)	Q+L	quer (Q)	längs (L)	Q+L
n	344	341	685	343	343	686	342	342	684
R <sup>2</sup>	0,36	0,27	0,34	0,23	0,20	0,20	0,21	0,03	0,15
adj. R <sup>2</sup>	0,33	0,25	0,33	0,22	0,19	0,19	0,19	0,02	0,14
RMSE	0,45	0,48	0,45	0,48	0,50	0,49	0,50	0,54	0,51
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,5</sub> A <sub>4,0</sub> ALPHA <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>3,5</sub> BW CFDS DBC <sub>2,5</sub> IAC IBCREL IOA IOBC <sub>3,75</sub> IOBC <sub>4,0</sub> MR <sub>3,25</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>4,0</sub> CA CFDS CPMD DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,25</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>4,0</sub> A <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>4,0</sub> CA CFDS CPMD DBC <sub>4,0</sub> IAC IBCREL IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,75</sub> RA <sub>3,0</sub> RA <sub>4,0</sub>	CPN DBC <sub>2,5</sub> DBC <sub>3,75</sub> DBC <sub>4,0</sub> IOA IOA RA <sub>4,0</sub> RA <sub>4,0</sub>	CPN DBC <sub>4,0</sub> IOA IOBC <sub>2,5</sub> RA <sub>4,0</sub> RR <sub>3,0</sub>	ALPHA <sub>3,25</sub> CPN IOA IOBC <sub>2,75</sub> IOBC <sub>3,75</sub> RA <sub>4,0</sub> RR <sub>3,0</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,75</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BCMAX <sub>3,0</sub> CFDS DBC <sub>2,75</sub> IOBC <sub>2,75</sub> MR <sub>3,5</sub>	CFP DBC <sub>3,25</sub> IBCREL	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>3,5</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BCMAX <sub>3,0</sub> BCMAX <sub>3,5</sub> CFDS MR <sub>2,5</sub>

**Tabelle A 8: Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von Messzeitpunkt, -richtung und ROI-Größe für die Fettklassen HOCH (> 2,0 % IMF) bzw. TIEF (≤ 2,0 % IMF) mit Ultraschallparametern aus schrittweiser Diskriminanzanalyse (Parametermittelwerte)**

Messrichtung	Schlachtkörper warm			Schlachtkörper kalt			Lachs		
	Quer (Q)	Längs (L)	L+Q	Quer (Q)	Längs (L)	L+Q	Quer (Q)	Längs (L)	L+Q
% korrekt gesamt	77	73	70	65	72	76	58	-	63
% falsch HOCH	21	53	32	26	16	21	63	-	32
% falsch TIEF	23	22	30	36	30	25	25	-	39
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,0</sub> BCMAX <sub>2,5</sub> BCMAX <sub>3,5</sub> BW IOBC <sub>3,5</sub>	A <sub>2,5</sub> CFDS DBC <sub>4</sub> DELTASWP IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>4,0</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub>	Cpn IOA IOBC <sub>3,25</sub> IOBC <sub>4</sub> RR <sub>4</sub>	Cpn IOA RA <sub>4</sub>	CPN IOA IOBC <sub>4</sub> RA <sub>4</sub>	A <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BW CFDS IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,5</sub> MWCF	- *keine Variablen ins Modell aufgenommen	ALPHA <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,25</sub>

**Tabelle A 9: Klassifikationsergebnisse in Abhängigkeit von Messzeitpunkt, -richtung und ROI-Größe für die Fettklassen HOCH (> 2,0 % IMF) bzw. TIEF (≤ 2,0 % IMF) mit Ultraschallparametern aus schrittweiser Diskriminanzanalyse (Einzelmesswerte)**

Messrichtung	Schlachtkörper warm			Schlachtkörper kalt			Lachs		
	Quer (Q)	Längs (L)	L+Q	Quer (Q)	Längs (L)	L+Q	Quer (Q)	Längs (L)	L+Q
n (HOCH, TIEF)	(56,288)	(56,285)	(112,573)	(57,286)	(57,286)	(114,572)	(57,285)	(57,285)	(114,570)
% korrekt gesamt	70	77	65	65	69	59	72	58	59
% falsch HOCH	27	46	20	19	19	15	30	49	39
% falsch TIEF	31	18	38	38	34	46	28	40	41
Parameter im Modell	A <sub>2,5</sub> ALPHA <sub>4,0</sub> BCMAX <sub>2,75</sub> BCMAX <sub>3,25</sub> BW IBCREL IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,5</sub> MWSWP	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,0</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>3,75</sub> BCMAX <sub>2,5</sub> BCMAX <sub>3,25</sub> CA CFDS CPMD DELTASWP IOA IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,75</sub> MR <sub>2,75</sub> MR <sub>3,25</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>2,75</sub> A <sub>3,25</sub> A <sub>3,75</sub> CPN DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub> IOBC <sub>3,0</sub> IOBC <sub>3,75</sub>	CPN IOA IOBC <sub>3,25</sub> IOBC <sub>3,75</sub> IOBC <sub>4,0</sub> RR <sub>4,0</sub>	CA CPMD CPN IOA RA <sub>4,0</sub>	CA CFP CPMD CPN IOA IOBC <sub>2,75</sub> IOBC <sub>3,0</sub> IOBC <sub>4,0</sub> RR <sub>4,0</sub>	A <sub>2,5</sub> A <sub>3,75</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,5</sub> BW DBC <sub>4,0</sub> IOBC <sub>2,5</sub>	ALPHA <sub>3,25</sub> ALPHA <sub>3,75</sub> MR <sub>2,5</sub>	A <sub>2,75</sub> A <sub>3,75</sub> A <sub>4,0</sub> ALPHA <sub>2,75</sub> ALPHA <sub>3,25</sub> BCMAX <sub>3,0</sub> BCMAX <sub>3,75</sub> MR <sub>3,25</sub>

## Erklärung

Ich habe die vorliegende Dissertation selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt.

Halle an der Saale, 7. September 2004

Daniel Mörlein

## Werdegang

geboren am 26. April 1975 in Friedrichroda  
ledig, 1 Sohn

### Schulbildung

1981-1982 *Polytechnische Oberschule „Heinrich-Heine“* in Halle

1982-1985 *Botschaftsschule der DDR* in Bombay (Indien) bzw.  
Jakarta (Indonesien)

1985-1991 *Polytechnische Oberschule „Friedrich Engels“* in Halle

1991-1993 *Gymnasium im Bildungszentrum* in Halle

### Zivildienst

09/1993 – 11/1994 *Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg*  
HNO-Universitätsklinik

### Studium

10/1994 – 05/2000 *Hochschule Anhalt (FH) in Bernburg*  
Abschluss: Diplom-Oecotrophologe (FH)

Diplomarbeit: „Optimierung der Produktqualität bei der  
Herstellung von tiefgefrorenem Gyros unter besonderer  
Berücksichtigung der Ranzidität“

02/1996 – 06/1996 *Rijkshogeschool Ijselland, Deventer (Niederlande):*  
„International Semester On Consumer Affairs“

04/1998 – 03/1999 *Demeter-Erzeugergemeinschaft Berlin-Brandenburg*  
*GmbH, Eggersdorf*  
(Qualitätssicherung)

04/1999 – 11/1999 *Jäger & Meyer Badenfrost GmbH, Karlsruhe*  
(Qualitätssicherung, Produktentwicklung TK-Produkte)

### wissenschaftliche Tätigkeit

06/2000 – 09/2002 *Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg*  
Institut für Tierzucht und Tierhaltung

11/2002 – 05/2004 *Georg-August-Universität Göttingen*  
Forschungs- und Studienzentrum für Veredelungswirt-  
schaft Weser-Ems

DFG-Forschungsprojekt:

„Untersuchung zur Bestimmung des intramuskulären  
Fettgehaltes im *M. longissimus* von Schweinen mittels  
Ultraschall aus den HF-Rückstreudaten eines B-Bild-  
Gerätes“

## **Danke!**

An dieser Stelle möchte ich mich für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir vielfältig gewährte Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und –auswertung bedanken.

Speziell gelten mein Dank Prof. Dr. Dr. h.c. Gerhard von Lengerken für seine Bereitschaft zur Betreuung des Dissertationsvorhabens, Prof. Dr. Michael Wicke für die dauernde und umfassende Betreuung während der Versuchsdurchführung und der schließlichen Erstellung der Dissertation, Dr. Klaus-Vitold Jenderka für die vielfältige Unterstützung insbesondere in Fragen des Ultraschalls, der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung des Projektes, Almut Bauer und Mario Reichel für das gute Zusammenleben und –arbeiten im Büro, meinem Mitstreiter im DFG-Projekt Dr. Sebastian Brand für seine essentiellen Arbeiten, ohne die diese Dissertation nicht möglich wäre, den Mitarbeitern des Institutes für Tierzucht und Tierhaltung in Halle, insbesondere den Herren Rex, Dr. Rosner und Dr. Schmidt für ihre tatkräftige Unterstützung bei den praktischen Versuchen, der Institutsleitung für die Möglichkeit, die Arbeit in Halle fortzuführen, der Geschäftsleitung und den Mitarbeitern des Schlacht- und Zerlegebetriebes Tönnies in Weissenfels für die Unterstützung während der Datenaufnahmen sowie den Mitarbeitern am FOSVWE in Vechta für die Durchführung von chemischen Analysen und sensorischen Untersuchungen.

Ich danke meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben und so den Grundstein für dieses Vorhaben legten. Großer Dank gebührt meinen Freunden für die gemeinsame Zeit, Halt, Diskussionen, Freude, Rat und Liebe!