

**Erarbeitung einer Methode zur Gewinnung von
Prüfkörperchen zur biomechanischen Testung von
Klauenhorn bei Mastbullen der Rasse Deutsches
Fleckvieh**

von Sara-Lisa Lennermann

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

**Erarbeitung einer Methode zur Gewinnung von
Prüfkörperchen zur biomechanischen Testung von
Klauenhorn bei Mastbullen der Rasse Deutsches
Fleckvieh**

von Sara-Lisa Lennermann
aus Karlsruhe

München 2016

Aus dem Veterinärwissenschaftlichen Department der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Lehrstuhl für Anatomie, Histologie und Embryologie

Arbeit angefertigt unter der Leitung von Prof. Dr. Johann Maierl

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

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Joachim Braun

Berichterstatter: Prof. Dr. Johann Maierl

Korreferent/en: Prof. Dr. Armin M. Scholz

Tag der Promotion: 16. Juli 2016

Meinen Kindern

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	I
2	Einleitung	1
3	Literaturübersicht	2
3.1	Anatomie der Rinderklaue	3
3.1.1	Segmente der Klaue	4
3.1.2	Klauenmechanismus und weitere dämpfende Mechanismen	8
3.1.3	Hornbildung	9
3.1.4	Qualität des Klauenhorns.....	13
3.1.5	Physiologische Belastungsverhältnisse an den Klauen	15
3.2	Klauenerkrankungen.....	25
3.2.1	Untersuchung	25
3.2.2	Erkrankungen der Haut.....	29
3.2.3	Erkrankungen der Klauenlederhaut	31
3.3	Funktionelle Klauenpflege.....	37
3.3.1	Geschichte und Grundlagen	37
3.3.2	Durchführung an den Beckengliedmaßen.....	41
3.3.3	Durchführung an den Schultergliedmaßen	46
3.4	Biomechanik	48
3.4.1	Dehnung	48
3.4.2	Spannung	49
3.4.3	Zugversuch	50
3.4.4	Elastizität	51
3.5	Grundlagen der Fütterung in der Bullenmast	52
3.6	Fütterung und Klauengesundheit.....	54
3.7	Verdauung und Resorption von Proteinen	55
3.7.1	Proteine und Nicht-Protein-N-haltige Verbindungen	55
3.7.2	Proteinverdauung	57
3.7.3	Ruminale Stickstoffbilanz.....	58
3.7.4	Resorption von Aminosäuren.....	59
3.7.5	Resorption von Di- und Tripeptiden	60
3.7.6	Verdauung und Resorption von Nucleoproteinen und Nucleinsäuren	60
4	Material und Methoden	61

4.1.1	Untersuchungsgut.....	64
4.2	Methoden.....	66
4.2.1	Sägen der Gliedmaßen.....	66
4.2.2	Konservierung.....	67
4.2.3	Markieren.....	67
4.2.4	Zurechtsägen.....	68
4.2.5	Entfernen des Weichteilgewebes.....	68
4.2.6	Anfertigen planparalleler Proben.....	68
4.2.7	Anfertigen der Prüfkörper.....	69
4.2.8	Zugversuche.....	71
4.2.9	Statistik.....	72
5	Ergebnisse.....	73
5.1	Methodenentwicklung.....	73
5.1.1	Konservierung des Probenmaterials.....	73
5.1.2	Gewinnen der Hornproben.....	73
5.1.3	Entfernen des Weichteilgewebes.....	75
5.1.4	Anfertigen planparalleler Proben.....	76
5.1.5	Fräsen der Prüfkörper.....	78
5.1.6	Zugversuche.....	79
5.2	Ergebnisse der Zugversuche.....	83
5.2.1	Umrechnung der Werte.....	83
5.2.2	Grafische Darstellung.....	83
5.2.3	Statistische Auswertung.....	102
5.2.4	Fazit.....	106
6	Diskussion.....	107
6.1	Methodik.....	107
6.1.1	Auswahl der Entnahmestelle.....	107
6.1.2	Ausrichtung der Hornröhrchen innerhalb der Prüfkörperchen.....	107
6.1.3	Wahl der Methoden.....	108
6.2	Bewertung der Ergebnisse.....	110
7	Zusammenfassung.....	117
8	Summary.....	119
9	Anhang.....	121

10	Abbildungsverzeichnis	132
11	Tabellenverzeichnis	134
12	Literaturverzeichnis	136
13	Danksagung.....	142

Alle anatomischen Termini wurden gemäß der 5. Auflage der Nomina Anatomica Veterinaria verwendet (NAV, 2012).

1 Abkürzungsverzeichnis

A	Querschnittsfläche
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
Δl	Maß für die Größe der Verformung
DLG	Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft
dN	Dezinewton
dors	dorsal
ε	Dehnung, dimensionslos
<i>E</i>	Elastizitätsmodul
F	Kraft
et al.	et alia
ges	gesamt
GfE	Gesellschaft für Ernährungsphysiologie
H ⁺	Wasserstoff
hi	hinten
K ⁺	Kalium
Kp	Kilopond
<i>l</i>	Länge
lat	lateral
Lig.	Ligamentum
ME	umsetzbare Energie
med	medial
MJ	Mega Joule
mm	Millimeter
MPa	Megapascal
Na ⁺	Natrium
<i>N</i>	Normalkraft
N	Newton
N ₂	Stickstoff *
NH ₃	Ammoniak

Abkürzungsverzeichnis

NH ₄ ⁺	Ammonium
NPN	Nicht-Protein-Stickstoff-Verbindungen
nXP	nutzbares Rohprotein
σ	Spannung
Pa	Pascal
prox	proximal
RNB	ruminale Stickstoffbilanz
RP	Rohprotein
TM	Trockenmasse
UDP	unabgebautes Futterprotein
vo	vorne
XP	Rohprotein

* Um einer Verwechslung mit der Einheit Newton (N) zu vermeiden, wird in dieser Arbeit Stickstoff an manchen Stellen mit seiner Summenformel N₂ angegeben.

2 Einleitung

Erkrankungen der Klauen stellen eines der bedeutendsten Probleme in der heutigen Rinderhaltung dar. Nach Mastitiden und Reproduktionsstörungen stehen sie an dritter Stelle der wirtschaftlichen Verluste in der Milchviehhaltung (KOFLER et al., 2013; WEILER, 2014). Eine gute Qualität des Klauenhorns ist also einerseits von ökonomischem Interesse für die Halter, andererseits ist sie auch unter tierschutzrechtlichen Gesichtspunkten erstrebenswert.

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Methode zu entwickeln, aus Rinderklauen Prüfkörperchen von standardisierter Form und Größe zu gewinnen und anschließend deren biomechanischen Eigenschaften mithilfe von Zugversuchen zu untersuchen.

Als sekundärer Ansatz wurde die Frage verfolgt, ob sich ein unterschiedlicher prozentualer Gehalt an Rohprotein in der Mastration von Mastbullen in messbarer Weise auf die Qualität und die biomechanischen Eigenschaften des Klauenhorns auswirkt.

3 Literaturübersicht

In den allermeisten Fällen liegen die Ursachen für Lahmheiten bei Rindern im Bereich der Klauen. Gliedmaßenabschnitte weiter proximal sind eher selten Auslöser, wenn ein Rind lahm geht (NUSS und STEINER, 2003b).

Erkrankungen der Klauen sind in der Rinderhaltung eine der Hauptursachen für frühzeitige Abgänge von Tieren. Im Jahr 2009 wurden 12,3% der Abgänge von Milchkühen durch Klauen- und Gliedmaßenerkrankungen bedingt (HEINZ et al., 2014). Von den Kühen in der Europäischen Union leiden zwischen 5 und 55% an Erkrankungen der Klauen, wobei nur etwa 10-25% von ihnen durch ihren Halter erkannt werden (MÜLLING, 2014). Wie Weiler beschreibt, wurden Tiere aus ökologischer Haltung in seiner Studie signifikant seltener aufgrund von Klauen- oder Gliedmaßenbeschwerden geschlachtet als Tiere aus konventionellen Haltungsformen (WEILER, 2014).

2015 gab es an der Tierärztlichen Hochschule Hannover eine Studie zur Erkrankungshäufigkeit von Milchviehherden, bei der 15,3% der Tiere zum Zeitpunkt der ersten Milchleistungsprüfung eine Lahmheit aufwiesen (GUNDLING N et al., 2015). Diese haben somit eine nicht zu unterschätzende wirtschaftliche Relevanz. Neben den direkten Verlusten durch das Ausscheiden von Tieren und Behandlungskosten kommt der Klauengesundheit auch indirekt eine große wirtschaftliche Bedeutung zu: Eine mittelgradig lahme Kuh gibt Studien zufolge etwa 17% weniger Milch als gewöhnlich. Umgerechnet bedeutet dies etwa einen halben Liter Milch pro Tier und Tag oder mehrere Tausend Euro Verlust im Jahr (FIEDLER und MÜLLER, 2008). Bei einer Studie 2014 in Bayern verursachte eine klauenkranke Fleckvieh-Kuh einen Verlust von bis zu 2000 kg Milch innerhalb der 305-Tage-Laktation (HANEMANN, 2014). Dies entspräche bei einem aktuellen Milchpreis von ca. 40 Cent/Liter einem Verlust von ca. 800 Euro in einer 305-Tage-Laktation. Der durch ein einzelnes Klauengeschwür verursachte Verlust wird auf ca. 300-500 Euro geschätzt (MÜLLING, 2014).

Auch die Fruchtbarkeit leidet nachweislich unter einer Lahmheit: Rast- und Gützeit erhöhen sich ab einer Lahmheitsnote 2 von 5 signifikant, es werden immer mehr Besamungen nötig, um eine Trächtigkeit zu erreichen (FIEDLER). Das wirtschaftliche Interesse an klauengesunden Rindern ist folglich enorm. Im Vergleich zu anderen

Erkrankungen lässt sich bei den Klauenerkrankungen sogar ein vermehrtes Auftreten in den letzten Jahren beobachten, was sie zunehmend auch in den Fokus der Wissenschaft rücken lässt (ALSLEBEN et al., 2003).

Zudem kann eine nicht behandelte Erkrankung der Klaue infolge hämatogener Erregerausbreitung zu Beeinträchtigungen anderer Organsysteme wie z.B. Niere, Lunge oder Herz führen oder sogar Ursache einer systemischen Erkrankung sein (NUSS und STEINER, 2003b).

3.1 Anatomie der Rinderklaue

Als Paarzeher (Artiodactyla) besitzt das Rind an jeder Gliedmaße je zwei Hauptklauen. Die Vorder- bzw. Hintermittelfußknochen (Ossa metacarpalia bzw. metatarsalia) III und IV sind dabei fast gänzlich verschmolzen und bilden das sogenannte Röhrbein. Distal existieren getrennte Gelenkköpfe, die mit dem 1. Zehengelenk jeweils ein eigenes Gelenk bilden. Zusätzlich sind je zwei Afterklauen ausgebildet, die nicht an der Fußung beteiligt sind. Es schließen sich distal die Phalanx proximalis, auch Fesselbein genannt, die als Kronbein bekannte Phalanx media und schließlich die Phalanx distalis oder auch das Klauenbein an (LIEBICH et al., 2015).

Die eigentliche Klaue, Ungula, ist der modifizierte Hautüberzug des Gliedmaßenendes. Im alltäglichen Sprachgebrauch werden auch die davon eingeschlossenen Strukturen (Kronbein, Klauengelenk, Klauenbein, Strahlbein Sehnen, Schleimbeutel) in dem Begriff „Klaue“ vereint (MÜLLING, 2015).

Die Tatsache, dass die lebenden Anteile der Klauenhaut zwischen den knöchernen Strukturen des Klauenbeins und dem verhornten Klauenschuh eingeschlossen sind und sich mechanischen Belastungen nicht entziehen können, führt dazu, dass unphysiologisch erhöhte Druckbelastungen unmittelbar Quetschungen und andere, oft irreversible Schädigungen des Gewebes zu Folge haben, was mit enormen Schmerzen für die betroffenen Tiere verbunden ist (MAIERL und MÜLLING, 2003).

3.1.1 Segmente der Klaue

3.1.1.1 Klauenhaut

Wie am restlichen Körper weist die allgemeine Körperdecke auch an den Gliedmaßenspitzen drei Schichten auf (Subcutis, Dermis, Epidermis):

Die Epidermis der Klaue setzt sich aus zwei Anteilen zusammen. Durch eine Basalmembran von ihr getrennt, der Lederhaut aufsitzend, sind dies lebende Zellen, die verschiedene Produkte synthetisieren. Ihnen schließen sich nach außen die abgestorbenen Epidermiszellen an, die als Hornzellen den Hornschuh ausbilden (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Die Dermis der Klaue umfasst ebenfalls zwei Schichten. Das außen liegende Stratum papillare dient der Verankerung mit der angrenzenden Epidermis, welche es zusätzlich mit Nährstoffen versorgt. Die Verzahnung mit der Unterhaut wird durch das aus kollagenen Fasern aufgebaute Stratum reticulare geleistet. Die Oberfläche der Dermis ist, je nach Segment, zu Papillen oder Lamellen geformt. Entsprechend der Ausbildung der Lederhautoberfläche wird die ihr anliegende Epidermis und somit das Horn ausgestaltet. Das gut ausgebildete Gefäßnetz und die zahlreichen sensiblen Nervenendigungen, die die gesamte Lederhaut durchziehen, haben zur Folge, dass Verletzungen im Bereich der Lederhaut oft mit starken Blutungen und großen Schmerzen einhergehen (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Die Subcutis ist nicht in allen Segmenten der Klaue ausgebildet. Wo sie vorhanden ist, im Saum-, Kron- und Ballensegment, dient sie primär der Stoßbrechung und ist in entsprechender Weise modifiziert.

Die Tatsache, dass die drei Schichten der Körperdecke an der Klaue in unterschiedlicher Form auftreten, macht eine Einteilung der Klaue in verschiedene Segmente möglich, die Mülling wie folgt beschreibt (MÜLLING, 2015):

3.1.1.2 Saumsegment (Limbus)

Den Übergang zwischen behaarter Haut und Klaue bildet das ca. 1 cm breite Saumsegment (Limbus). Im Zwischenklauenspalt teilen sich die beiden Klauen ein gemeinsames Saumsegment, weshalb dieser haarlos ist. (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Durch seine topographische Lage fungiert das Saumsegment als Stoßbrecher während des Fußungsvorgangs, der Belastungen im Bereich dieses Überganges minimiert (MAIERL, 2004). In diesem Bereich, dorsal und abaxial, ist die Unterhaut in Form eines vorgewölbten Polsters ausgebildet (Pulvinus limbi). Die Lederhaut des Limbus weist auf ihrer Oberfläche Papillen von wenigen Millimetern Länge auf, die nach distal ausgerichtet sind, die Epidermis hingegen ist röhrenförmig aufgebaut. Das Saumhorn ist weiches, hinfälliges Horn, das nach distal rasch abschilfert und deswegen nur im proximalen Bereich der Klaue zu finden ist (MÜLLING, 2015). Zellen und Interzellularkitt weisen einen hohen Gehalt an Lipiden auf, was die elastische Konsistenz der zunehmend bröckeligen Horns im Saum bedingt (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Eine weitere Funktion des Saumsegments ist, neben der Vermeidung von Stoßbelastung, die Regulation des Feuchtigkeitshaushaltes im proximalen Bereich des Kronhorns. Durch das Saumhorn geschützt, trocknet das Kronhorn proximal weniger schnell aus, was sich positiv auf die Durchblutung der Lederhautzotten im Kronsegment auswirkt (MAIERL, 2004).

3.1.1.3 Kronsegment (Corona)

Das Kronsegment ist ca. 2,5 cm breit und reicht etwa bis zur Hälfte des Klauenrückens (MAIERL und MÜLLING, 2003). Die Unterhaut des distal an das Saumsegment angrenzenden Kronsegments (Corona) bildet ebenfalls ein Polster, welches sich deutlich hervorwölbt. Dermis und Epidermis coronae greifen als Papillen und Röhren ineinander. Man unterscheidet inneres, mittleres und äußeres Kronhorn, wobei sich die stärksten Hornröhren im Bereich des mittleren Kronhorns nachweisen lassen. Das Horn des Kronsegments stellt das härteste Horn der Rinderklaue dar und ist besonders robust. Bis zu 8 mm Kronhorn können in einem Monat neu gebildet werden (MÜLLING, 2015). Auf Höhe des Übergangs zwischen Kron- und Wandsegment schilfert außen an der Hornkapsel das Saumhorn ab. Da das Kronhorn nun distal nicht mehr vom schützenden Saumhorn bedeckt ist, trocknet das Kronhorn zunehmend aus, was es härter werden lässt (MAIERL, 2004).

3.1.1.4 Wandsegment (Paries)

Geschützt vom stabilen Kronhorn und von außen unsichtbar, schließt sich das Wandsegment (Paries) an. Es wird am Tragrand der Klaue als Weiße Linie sichtbar und verbindet sowohl Klauenplatte und Klauenbein als auch Kron-, Sohlen- und Ballenhorn miteinander (MÜLLING, 2015). Da in diesem Segment keine Unterhaut existiert, verbinden sich Kronbein und Wandlederhaut kompakt miteinander. Das Klauenbein wird durch das Wandsegment am Kronhorn aufgehängt. Diese Befestigung setzt sich abaxial bis zum Ballen fort. Axial hingegen übernimmt das Lig. interdigitale distale die Funktion eines Halteapparates (MAIERL, 2004). Die Lederhautoberfläche ist von lamellärer Beschaffenheit, wobei die Blättchen der Lederhaut (Lamellae dermales) am freien Rand von Papillen besetzt sind. Es wird zwischen zarten Kappenpapillen an den Firsten und längeren Terminalpapillen an der distalen Kante der Lederhautblättchen unterschieden. Sie sind Voraussetzung für die rasche Proliferationsfähigkeit, die das Kappenhorn auszeichnet (MÜLLING, 2015). Axial und palmar / plantar weist die Klaue eine natürliche Hohlkehlung auf. Grundlegend hierfür ist, dass die Lederhautlamellen im Zwischenklauenspalt an der Klauenspitze lang sind, palmar / plantar jedoch proximal schräg ansteigen und spitz auslaufen (MAIERL und MÜLLING, 2003). Die Modifikation der Lederhaut zu Blättchen bedingt eine besonders feste Verbindung mit der Epidermis (MAIERL, 2004). Die Epidermis des Wandsegments bildet im Bereich der Papillen das röhrenförmige Kappen- bzw. Terminalhorn, mit den Blättchen der Lederhaut ist sie in Gestalt von Epidermisblättchen solide verzahnt. Die Höhe dieser Blättchen definiert die Breite der Linea alba, welche, bedingt durch ihre Beschaffenheit aus sich abwechselnden Hornanteilen unterschiedlicher Qualität und Haltbarkeit, eine Eintrittspforte für Infektionen der Klaue darstellt (MÜLLING, 2015). Das Wandhorn nimmt von proximal nach distal kontinuierlich an Dicke zu. Die neu gebildeten Zellen gehen mit allen Zellen in ihrer Umgebung stabile Verbindungen ein (MAIERL und MÜLLING, 2003). Bedingt durch den sogenannten Klauenmechanismus, ist die mechanische Belastung im abaxialen Abschnitt der Linea alba besonders groß. Während der Stützbeinphase wird die Klauenplatte palmar/plantar gewölbt, die Klaue im Ganzen quer gedehnt (MAIERL, 2004).

3.1.1.5 Sohlensegment (Solea)

Auch das sichelförmige Sohlensegment (Solea) besitzt keine Unterhaut. Es bildet zusammen mit dem Ballensegment die Fußungsfläche der Rinderklauen. Die Lederhaut der Sohle bildet Papillen aus, die Oberhaut dementsprechend Röhrrchen. Letztere sind schräg nach distal gerichtet und aufgrund ihrer Größe bereits makroskopisch sichtbar (MÜLLING, 2015).

Das Wachstum des Sohlenhorns ist etwas langsamer als im Wandbereich. Monatlich können ca. 3-4 mm Horn neu gebildet werden (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

3.1.1.6 Ballensegment (Torus)

Angrenzend an Sohlensegment und behaarte Haut verkörpert das Ballensegment (Torus unguulae) den Hauptanteil der Klauengrundfläche. Es wird in einen proximal gelegenen weichen Ballen (Basis) und einen härteren distalen Abschnitt (Apex) untergliedert. Der proximale Abschnitt ist nur zum Teil an der Fußung beteiligt. Ein stark ausgebildetes Ballenpolster, bestehend aus der Tela subcutanea tori, fungiert im restlichen Ballensegment als Stoßdämpfer (MÜLLING, 2015). Es ist eine gewisse Anzahl an kleineren und drei größere Fettgewebsskissen ausgebildet, die aufgrund des Kollagenfasengerüsts in ihrem Innern Stöße optimal abfedern können. Bei Milchkühen lässt sich beobachten, dass das elastische Unterhautgewebe des Ballens mit jeder Laktation einen bindegewebigen Umbau erfährt., was die stoßbrechenden Eigenschaften negativ beeinflusst (MAIERL und MÜLLING, 2003). Bedingt durch die besondere Zusammensetzung der ungesättigten Fettsäuren innerhalb der Polster weist dieses Fettgewebe eine rinderuntypische, gallertartige Konsistenz auf (MAIERL, 2004). Lederhautleisten im Ballensegment bringen Zöttchen hervor, von der Epidermis wird Röhrrchenhorn gebildet. An der Pars proximalis ist dieses weich und nachgiebig und proliferiert mit enormer Geschwindigkeit. Die Pars distalis weist Horn von merklich härterer Konsistenz auf. Der Übergang zwischen beiden Ballenabschnitten und damit der unterschiedlichen Hornqualität liegt etwa auf einer gedachten Linie, die die beiden palmaren Enden axial und abaxial verbindet (MÜLLING, 2015).

3.1.2 Klauenmechanismus und weitere dämpfende Mechanismen

Den Klauen kommt maßgeblich die Aufgabe zu, die Kräfte des Körpers bei der Fortbewegung abzufedern (MAIERL, 2004). Bei physiologisch geformten Klauen werden die bei der Fortbewegung entstehenden Kräfte durch Strukturen wie das Ballenpolster und die flächige Verbindung der Lederhaut mit der Wand durch Sehnen und Bänder (Klauenbeinträger) gleichmäßig verteilt und gedämpft (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Dies geschieht auch dadurch, dass die beiden Klauen während der Stützbeinphase besonders im Bereich der Klauenspitze auseinander weichen können. Die dabei eintretende Verformung des Klauenhornschuhs und das gleichzeitige Absinken des Klauenbeins im palmaren bzw. plantaren Bereich wird unter dem Begriff Klauenmechanismus zusammengefasst. (MAIERL, 2004). Am Klauenbeinträger beteiligte Strukturen sind neben dem Stratum reticulare der Dermis und den Lederhautblättchen die lebenden Schichten und das Stratum corneum der Epidermis, wobei die von der Dermis gebildeten Kollagenfasern dem System die entscheidende Stabilität verleihen (MÜLLING und HAGEN, 2012). Beim Aufsetzen der Klaue während der Fußung wird der Aufhängeapparat des Klauenbeins auf Zug belastet. Der sich auf die Klauenplatte übertragende Zug führt zu einer Verformung der Platte nach innen und unten. Der abaxiale Bereich der Platte wird noch weiter abaxial gebogen, da der weiche Ballen an dieser Stelle dem erhöhten Druck nachgibt und ihn gleichmäßig auf das umliegende Gewebe verteilt. Ähnlich, wenn auch weniger ausgeprägt, funktioniert auch die Stoßbrechung im Bereich des Kronpolsters (MAIERL und MÜLLING, 2003). Das Klauenbein wird durch den Klauenbeinträger an der Innenwand des Hornschuhs fest aufgehängt. Bei der Fortbewegung werden die von der Gliedmaße ausgeübten Druckkräfte innerhalb der Klauenkapsel in Zugkräfte transformiert, welche am Tragrand wiederum als Druckbelastungen auftreten (MÜLLING, 2014). Es wirken also sowohl Zug- als auch Druckbelastung in der Hornkapsel und auf die Dermis im Bereich des Ballens und des Wandsegments. Dies bedeutet für die betroffenen Strukturen eine starke Beanspruchung bereits unter physiologischen Gegebenheiten. Pathologische Veränderungen der Klaue führen demzufolge rasch zu prekären Zuständen (MAIERL und MÜLLING, 2003). Die Aufhängung des Klauenbeins im Hornschuh ist vor allem dorsal im Wandsegment lokalisiert. Bei jedem Schritt senkt sich die Phalanx distalis im Ballenbereich um mehrere Millimeter ab. Je lockerer dieser Halteapparat wird, desto tiefer kann das

Klauenbein absinken, wobei der Druck auf das darunter liegende Gewebe zunimmt. Die Konsequenz einer andauernden Kompression ist eine Unterversorgung des Gewebes mit Nährstoffen und Sauerstoff infolge eines beeinträchtigten Gefäßsystems (BYSTRON und MÜLLING, 2012; MÜLLING und HAGEN, 2012)

Wenn als Folge übermäßigen Hornwachstums oder mangelnder Abnutzung die Länge der Klauenspitze zunimmt und die Sohle im Spitzenbereich dicker wird, verschiebt sich die Belastungs-Achse zunehmend nach palmar bzw. plantar. Die Hauptlast des Körpergewichtes muss folglich immer mehr von den kaudalen Sohlenanteilen getragen werden. Dies erhöht den Druck, der auf die darunter liegende Lederhaut ausgeübt wird, bis hin zu Quetschungen und Hämorrhagien. In Extremfällen sind Sohlengeschwüre die Folge (s. 3.2.3.2) (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

Auch der umgekehrte Fall, wenn der Zehenbereich zu kurz wird, kann schwerwiegende Folgen haben. In diesem Fall wird die Sohle häufig zu dünn, die Belastungsachse wird apikal verlagert und die Last des Körpergewichtes auf den Bereich der Klauenspitze nimmt zu, was das Risiko für Klauenspitzeneschwüre drastisch erhöht (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

3.1.3 Hornbildung

Das Horn, das die Gliedmaßenspitze umgibt, wird von der Epidermis gebildet. Diese besteht von innen nach außen aus den fünf Schichten Stratum basale, Stratum spinosum, Stratum granulosum, Stratum lucidum und Stratum corneum. (BRAGULLA et al., 2015). Die verhornten Zellen des Stratum corneum bilden das eigentliche Horn, das nicht wächst, sondern durch neu gebildete, lebende Zellen distal geschoben wird. (BUDRAS et al., 2015).

Entscheidend für die äußerliche Gestalt des Klauenschuhs und die Dicke des Horns ist die sogenannte Hornbildungsrate. Sie beschreibt das Verhältnis, in dem neu gebildete, lebende Epidermiszellen zu abgestorbenen Hornzellen stehen. Die Hornbildungsrate variiert in den verschiedenen Klauensegmenten physiologisch und ist ansonsten abhängig von äußeren Einflüssen wie mechanischer Belastung und dem Nährstoffangebot, das den lebenden Zellen zur Verfügung steht (MAIERL und MÜLLING, 2003). Von außen einwirkender Druck kann die Hornbildungsrate steigern, da er von den lebenden Schichten der Epidermis bis in die Basalschicht

weitergeleitet wird, wo er zu einer vermehrten Zellteilung führt. Unterschiedliche Druckverhältnisse unter den Klauen haben also ein ungleichmäßiges Hornwachstum zur Folge (MÜLLING und HAGEN, 2012).

Da in der Epidermis kein eigenes Gefäßnetz ausgebildet ist, sind die Zellen auf Ernährung durch Diffusion aus der angrenzenden Lederhaut angewiesen. Eine, wie auch immer geartete Perfusionsstörung der entsprechenden Gefäße kann nach relativ kurzer Zeit zu Störungen der Verhornung infolge von Mangelernährung führen (MAIERL und MÜLLING, 2003; MÜLLING und HAGEN, 2012).

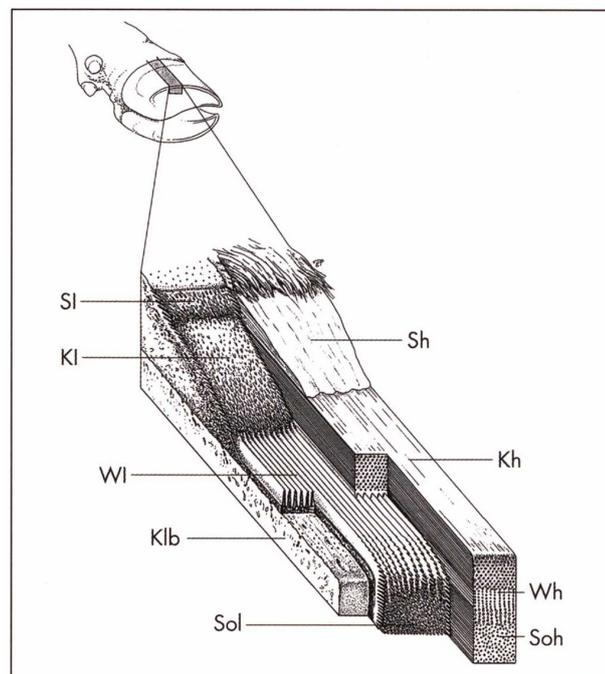


Abbildung 1 Schema der Hornbildung (abaxiale Ansicht der Klauenhaut, Epidermis teilweise entfernt) (FIEDLER A et al., 2004)

SI=Saumlederhaut; KI=Kronlederhaut; WI=Wandlederhaut; Sh=Saumhorn; Kh=Kronhorn; Wh=Wandhorn (Weiße Linie); Soh=Sohlenhorn; Klb= Klauenbein

Als Folge von Fehl- oder Überbelastung der Klauen kann es ebenfalls zur Produktion von minderwertigem Horn kommen. Die belastungsinduzierte Überproduktion von qualitativ schlechterem Klauenhorn führt zu Verformungen des Hornschuhs, was wiederum weitere Fehlbelastungen bedingt (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Die vorherrschenden Zellen der Epidermis sind die Keratinozyten. Sie werden in den basalen Schichten neu gebildet, verhornen auf ihrer Wanderung an die Oberfläche zunehmend und sterben schließlich durch Apoptose ab. (BRAGULLA et al., 2015). Verbunden werden die Hornzellen durch MCM (membrane coating material), auch

bekannt als Interzellularkitt. Qualität und Quantität dieser Kittsubstanz sind entscheidend für die Widerstandsfähigkeit des Horns (BUDRAS et al., 2015).

Grundsätzlich werden an der Klaue zwei Formen der Verhornung unterschieden: die harte und die weiche Verhornung. Das durch den harten Verhornungstyp gebildete Horn, das man besonders an mechanisch stark beanspruchten Stellen wie dem Kron- und Sohlensegment findet, ist besonders stabil und strapazierfähig. Das Wasserbindungsvermögen ist gering, die Hornzellen bilden einen festen Zellverbund, dessen Zwischenzellräume schmal sind. Der weiche Verhornungstyp herrscht dort vor, wo stoßdämpfende Eigenschaften gefragt sind. Das dabei entstehende Horn ist von gummiartiger Konsistenz, was in seinem hohen Gehalt an Wasser und Fett begründet liegt (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Am Zehenendorgan herrscht die harte Verhornung vor, an welcher das Stratum granulosum nicht beteiligt ist (BRAGULLA et al., 2015).

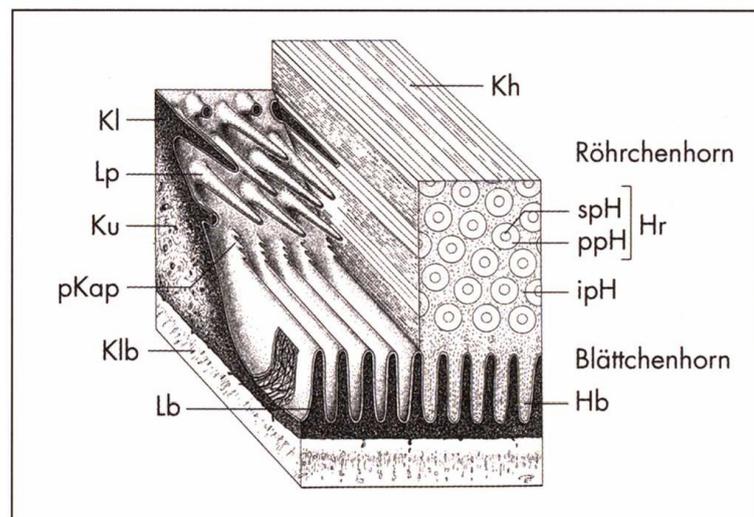


Abbildung 2 Übergang zwischen Kron- und Wandsegment zur Darstellung der Hornbildung (FIEDLER A et al., 2004)

Kl=Kronlederhaut; Klb=Klauenbein; Kh=Kronhorn; Ku=Kronunterhautpolster;
Lb=Lederhautblättchen; Lp=Lederhautpapille; pKap=proximale Kappenpapillen;
ppH=peripapilläres Horn; spH=suprapapilläres Horn; ipH=interpapilläres Horn;
Hr=Hornröhren; Hb=Hornblättchen

Leder- und Oberhaut greifen am ganzen Zehenendorgan wie Matrize und Patrize ineinander. Die Oberflächenmodifikation der Dermis ist entscheidend dafür, in welcher Form aus der daran anschließenden Epidermis das Horn gebildet wird. Lederhautpapillen bedingen, dass die Epidermis sich zu Röhren ausbildet, eine zu

Blättchen angeordnete Lederhaut hat zur Folge, dass auch die Epidermis blättchenförmig wächst. Die toten Hornzellen bilden dementsprechend entweder Röhren- oder Blättchenhorn aus (BUDRAS et al., 2015).

3.1.3.1 Röhrenhorn

Hornröhren weisen eine Rinde und ein Mark auf. Die Hohlräume zwischen den Hornröhren sind ausgefüllt von Zwischenröhrenhorn, welches interpapillär gebildet wird (BUDRAS et al., 2015).

Das Röhrenmark wird von der Epidermis über der Spitze der Lederhautpapille (suprapapillär) gebildet und ist aufgrund seiner ungünstigeren Ernährungslage weniger dauerhaft als die von der an den Seitenflächen der Lederhautpapillen liegenden Epidermis (peripapillär) gebildete Röhrenrinde. Diese entwickelt sich durch die topografische Nähe zu den ernährenden Blutgefäßen unter ausgezeichneten Bedingungen, was dazu führt, dass die Zellen der Röhrenrinde besonders langlebig und strapazierfähig sind.

Da das weniger beständige Mark der Hornröhren mit der Zeit zerfällt, entsteht im Inneren der Röhren ein Lumen, die Röhren werden hohl. Das Röhrengefüge bleibt über Strecken von mehreren Zentimetern erhalten. (BUDRAS et al., 2015).

Der Durchmesser der Lederhautpapillen ist ausschlaggebend dafür, in welchem Verhältnis Rinde und Mark der Hornröhren zueinander stehen. Über langen, schlanken Papillen werden Hornzylinder mit verhältnismäßig wenig Mark gebildet. Dies ist beispielsweise im Kronsegment der Fall. Im Wandsegment, in dem sich viele Terminalpapillen mit großem Durchmesser befinden, werden hingegen Hornzylinder mit einem großen Anteil an Mark gebildet (MAIERL und MÜLLING, 2003). In Studien erwies sich der Hornröhrenmarkdurchmesser an den Beckengliedmaßen als signifikant größer als der an den Schultergliedmaßen (LEOPOLD und PRIETZ, 1979).

Besonders widerstandsfähig sind die Hornröhren gegenüber Druckbelastung. Die Richtung, aus welcher diese kommt, ist entscheidend für den Röhrenquerschnitt. Eine longitudinale Belastung führt zu einem runden Querschnitt, ein ovaler Querschnitt resultiert aus einer schrägen Belastung der Hornröhren (BUDRAS et al., 2015).

3.1.4 Qualität des Klauenhorns

Da an den verschiedenen Segmenten der Klauen gänzlich unterschiedliche Anforderungen an das Horn gestellt werden, unterscheidet sich auch die Qualität des Horns in den jeweiligen Abschnitten deutlich. Entscheidend für die Hornqualität sind mehrere grundlegende Faktoren. Neben dem Gefüge der Hornzellen, also dem Verhältnis von Rinde und Mark bei Hornzylindern, der räumlichen Ausrichtung des Horns und der An- bzw. Abwesenheit von Zwischenröhrchenhorn, sind dies zum einen die Zusammensetzung und Verteilung der interzellulären Substanzen, zum anderen das Kompositum der Zellen selbst. Innerhalb der intrazellulären Bestandteile kommt den Keratinproteinen besondere Bedeutung zu (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Diese strukturellen Faktoren wiederum stehen unter dem Einfluss einer Vielzahl von inneren und äußeren Faktoren. Die inneren Faktoren umfassen genetische Aspekte, die jeweils vorherrschende Stoffwechsellage, in der sich ein Tier befindet sowie das vorhandene Nährstoffangebot. Diese primären Faktoren sind entscheidend dafür, inwieweit äußere Faktoren wie mechanische, chemische oder physikalische Aggressoren und Umwelteinflüsse wie z.B. die Beschaffenheit des Stallbodens Einfluss auf die Kondition des Klauenhorns nehmen können. Als besonders einflussreich kann der Faktor Stallbodenmilieu angesehen werden, da unter dem fortwährenden Einfluss aggressiver Gülle der Zusammenhalt unter den Hornzellen zunehmend verloren gehen kann (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Inwieweit die Qualität des Klauenhorns vererbbar ist, ist noch weitgehend unbekannt. Dies hängt zum einen damit zusammen, dass das Klauenhorn in seiner Qualität von so vielen Faktoren beeinflusst wird, zum anderen liegt zu wenig Untersuchungsmaterial vor, das konkrete Rückschlüsse zu ließe (TOUSSAINT RAVEN, 2003a). Charakteristika wie Größe und Form der Klauen, Gliedmaßenstellung und die Höhe des Ballens werden sicherlich zu einem gewissen Anteil vererbt und haben indirekten Einfluss auf die Klauengesundheit. Auch scheinen einzelne Rassen, wie beispielsweise das Jersey-Rind, für klauenbedingte Erkrankungen weniger anfällig zu sein als andere (TOUSSAINT RAVEN, 2003a). Dem Auftreten verschiedener Klauenerkrankungen oder Missbildungen, wie zum Beispiel der Hyperplasia interdigitalis oder von Korkenzieherklauen, wird ebenfalls eine gewisse Heritabilität zugesprochen (TOUSSAINT RAVEN, 2003a). Für die

Qualität des Horns selbst aber gibt es weder messbare Merkmale, wie etwa die chemische Zusammensetzung, Härte oder Zugfestigkeit des Horns, die eine Erblichkeit bestätigen oder ausschließen und sich zur Selektion auf Klauengesundheit eignen würden, noch eine Datenbank darüber (TOUSSAINT RAVEN, 2003a).

Aufgrund der engen Beziehung zwischen der Lederhaut und den innersten Schichten der Epidermis beeinflussen sich beide gegenseitig stark. Eine Störung der Lederhaut wirkt sich immer auf die in der Epidermis gebildete Hornformation aus. Entweder wird zu viel oder zu wenig Horn produziert. In beiden Fällen entsteht in der Folge Horn von minderer Qualität, da die Balance zwischen Bedarf und Angebot gestört ist (TOUSSAINT RAVEN, 2003b). Auch ein Absinken des Klauenbeins kann das Resultat einer Störung im Bereich der Grenze zwischen Dermis und Epidermis sein (BYSTRON und MÜLLING, 2012). Eine vollkommene Trennung der beiden Zellschichten, wie sie beim „Ausschuhen“ eines rehekranken Pferdes auftritt, wurde bei Rindern nur vereinzelt beschrieben. Vielmehr scheint sich der Klauenbeinträger unter diesen Umständen zu lockern. Hormone und Matrix-Metalloproteasen stehen in der Diskussion, diese Vorgänge zu begünstigen (BYSTRON und MÜLLING, 2012).

Ein entscheidendes Qualitätsmerkmal für das Horn der Gliedmaßenspitze ist der Wassergehalt. Er beeinflusst maßgeblich die Bruchfestigkeit des Horns und variiert je nach Klauensegment analog zu den jeweiligen Anforderungen zwischen sehr gering im Kronhorn bis hin zu relativ hoch im Bereich des proximalen Ballens (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Dass der Einfluss des Wassergehaltes auf die Materialbeschaffenheit von Klauenhorn nicht unbedingt der entscheidende Faktor sein muss, sondern vielmehr der Zustand der Tubuli, der Interzellularkitt und auch intrazelluläre Komponenten eine große Rolle spielen, zeigte eine 2008 veröffentlichte Arbeit, in der der Einfluss des Feuchtigkeitsgehaltes auf die mechanischen Eigenschaften von Klauenhorn an Flach- und Rollklauen untersucht wurde (APPRICH et al., 2008).

Am Veterinär-Anatomischen Institut der Universität Zürich wurde 1993 eine Dissertation angefertigt, die zum Thema hatte, für Rind und Schwein Normalwerte für die Zugfestigkeit des Klauenhorns zu ermitteln (BOHLI, 1993). Das

Untersuchungsgut bei den Rindern waren insgesamt 21 Tiere der Rassen Braunvieh und Simmentaler Fleckvieh, die zwischen 3 und 11 (im Durchschnitt 6,4) Jahre alt waren und zumeist in Anbindehaltung gehalten wurden. Es wurden an insgesamt 4 Stellen jeder Klaue Proben entnommen, wobei eine davon an der abaxialen Seitenwand der Klaue mit der in der vorliegenden Arbeit gewählten Lokalisation zu vergleichen ist. Allerdings wählte Bohli eine Stelle weiter distal an der Seitenwand (BOHLI, 1993). Die Proben waren 10 mm lang, 5 mm breit und 2 mm dick. In der Mitte wurde jeweils eine präformierte Rissstelle mit 2 mm² Querschnitt ein gefräst. Ein Vergleich der von Bohli ermittelten Werte mit den in dieser Arbeit erzielten Zugfestigkeiten erfolgt in der Diskussion.

3.1.5 Physiologische Belastungsverhältnisse an den Klauen

Da der Schwerpunkt eines stehenden Rindes aufgrund des Gewichtes von Hals und Kopf ein wenig in Richtung Schultergliedmaße verschoben ist, wird das Körpergewicht im Stand nicht gleichmäßig auf alle vier Gliedmaßen verteilt. (MAIERL und MÜLLING, 2003). Bei einem Rind von 460 kg Körpergewicht lasten ca. 260 kg auf den Vordergliedmaßen, ca. 200 kg auf den Hintergliedmaßen. Dies bedeutet an den Schultergliedmaßen eine Last von etwa 65 kg pro Klaue, die von wenigen Zentimetern Horn getragen werden (TOUSSAINT RAVEN, 2003f). Durch züchterische Fortschritte sind diese von Toussaint Raven bereits 1985 erstmals beschriebenen Zahlen heute nicht mehr aktuell. Laut der „Bayern-Genetik GmbH“, die 2010 aus dem Zusammenschluss der Niederbayerischen Besamungsgenossenschaft Landshut mit der Prüf- und Besamungsstation München-Grub sowie der Besamungsstation Roiner entstand, liegt das Gewicht einer ausgewachsenen Fleckvieh-Kuh bei 650-850 kg, das eines Bullen der gleichen Rasse bei 1100-1300 kg (BAYERN-GENETIK-GMBH, 2016). Legt man die Rechnung von Toussaint Raven zugrunde, werden davon 56% durch die Schultergliedmaßen getragen. Bei einer Kuh mit einem Körpergewicht von 750 kg entspricht dies einer Last von 105 kg pro Klaue an den Vordergliedmaßen, 82,5 kg an den Hintergliedmaßen. Diese Tendenz konnte von Nuss et al. bestätigt werden. In ihren Untersuchungen tendierte der Körperschwerpunkt stets zur vorderen Körperhälfte (NUSS et al., 2015). Auch in der Bewegung gibt es Unterschiede zwischen Vorder- und Hintergliedmaßen. So werden die Schultergliedmaße verstärkt

beim Abstoßen belastet, die Beckengliedmaßen hingegen bei der Fußung. Der Gesamtimpuls zur Fortbewegung liegt Nuss et al. zufolge zu mehr als 50% bei den Schultergliedmaßen. Diese haben, zumindest bei Kühen, auch einen verhältnismäßig größeren Anteil an der Stützbeinphase. Außerdem wurden für die Vorderbeine höhere Bodenreaktionskräfte (N/kg) gemessen als für die Hinterbeine (NUSS et al., 2015).

Während des Gehens wird dieser Schwerpunkt nicht nur geradlinig, sondern abwechselnd auf beide Körperseiten verlagert. Die Hauptlast kommt dabei jeweils der diagonal zur schubgebenden Hintergliedmaße liegenden Schultergliedmaße zu (FIEDLER et al., 2003). Auch sind die Aufgaben, die den einzelnen Extremitäten zukommen, vorne und hinten ein wenig verschieden: Die stärker bemuskelten Gliedmaßen der hinteren Körperhälfte dienen als Impulsgeber für die Vorwärtsbewegung. Die distal zunehmende sehnige Durchsetzung der Muskeln bedingt eine Stabilität der Gelenke im distalen Bereich der Beckengliedmaße (MAIERL und MÜLLING, 2003). Die Aufgabe der Schultergliedmaße besteht darin, den von hinten kommenden Bewegungsimpuls abzufedern. Zu diesem Zweck besteht eine rein bindegewebig-muskulöse Verbindung der Gliedmaße mit dem Rumpf. Auch die Muskeln der Vorderextremitäten werden distal zunehmend sehnig durchsetzt (MAIERL und MÜLLING, 2003).

Auch unter den Klauen einer Gliedmaße sind die Belastungsverhältnisse unterschiedlich: Die Außenklauen der Hintergliedmaßen sind einer deutlich höheren Belastung ausgesetzt als die Innenklauen. Dies spiegelt sich nicht nur in den unterschiedlichen Größenverhältnissen wider. Die Außenklauen sind in der Regel größer und breiter als ihre jeweilige Partnerklaue, weisen jedoch ein geringeres Nettowachstum auf (HAUFE et al., 2014). Auch die Tatsache, dass die lateralen Klauen weitaus häufiger von Klauenerkrankungen aller Art betroffen sind, unterstreicht diese Vermutung (LISCHER, 2000a). Am häufigsten von allen Klauen sind die Außenklauen der hinteren Gliedmaßen von Lahmheiten betroffen (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001; TOUSSAINT RAVEN, 2003f). Dieser Sachverhalt lässt darauf schließen, dass es neben Fütterungs- und Managementfehlern noch weitere Ursachen für das Auftreten von Klauenbeschwerden geben muss. Eine Erklärung könnte die Relation von Gewichtsverteilung und übermäßigem Klauenwachstum sein (SHEARER und VAN

AMSTEL, 2001). Schon in ihrem anatomischen Aufbau unterscheiden sich die laterale und mediale hintere Klaue. Medial sind der hintere Ballen und auch die axiale Wand weniger stark entwickelt als an der lateralen Klaue. Dies führt dazu, dass die Sohle medial konkaver und schräg axial geneigt ist. Im Gegensatz dazu ist die Sohle der lateralen Klaue flacher, was ihr eine stabilere Fläche für die Belastung durch das Körpergewicht verleiht (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Die Folge ist, dass an der medialen Klaue mehr Gewicht auf die abaxiale Wand verlagert wird. Auf weichem Untergrund fällt dieser Umstand nicht sehr ins Gewicht. Auf hartem Untergrund gehaltene Rinder müssen jedoch einen unverhältnismäßig größeren Anteil ihres Körpergewichtes auf den lateralen Klauen der Hintergliedmaße tragen (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Betrachtet man ein stehendes Rind von hinten, scheint sich das Körpergewicht gleichmäßig auf alle 4 hinteren Klauen zu verteilen. Beim Gehen hingegen ändern sich die Belastungsverhältnisse. Die hinteren lateralen Klauen müssen fortwährend das sich ständig ändernde Gewicht ausgleichen, während die Belastung an den medialen Klauen nur gering variiert. Der Grund dafür ist, dass das Hüftgelenk nur sehr wenig Bewegung seitwärts zulässt. Das Körpergewicht wird also vollständig auf die Klauen der Seite verlagert, in die das Tier sich lehnt (TOUSSAINT RAVEN, 2003f). Bei trächtigen oder laktierenden Kühen kommt noch hinzu, dass sie aufgrund des Größenwachstumes von Euter und Frucht zunehmend ihre Körperhaltung ändern und sich eine bodenweite Gliedmaßenstellung aneignen. Hieraus resultiert eine neuerliche verstärkte Verlagerung des Körpergewichtes auf die hinteren Außenklauen (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

Die vermehrte Belastung der Außenklauen wird sogar am Knochen sichtbar: Das Klauenbein der Außenklaue älterer Rinder weist mit zunehmendem Alter vermehrt Aufrauungen des Knochens auf, welche in ähnlicher Weise bei der dazugehörigen Innenklaue nicht zu finden sind (LISCHER, 2000a).

Eine weitere Ursache für die stärkere Belastung der hinteren Außenklauen könnte Nacambo et al. zufolge in den unterschiedlichen Größenverhältnissen der lateralen und medialen Kondylen des Metatarsalknochen liegen (NACAMBO et al., 2007). Das Ergebnis ihrer post-mortem durchgeführten Untersuchungen war, dass bei 83 von 84 untersuchten Fällen der laterale Kondylus des Metatarsalknochens länger war als der mediale. An der Schultergliedmaße zeigte sich dieses Phänomen etwas weniger

deutlich. Hier war bei 44 der 84 Knochen der laterale Kondylus länger, bei 23 der mediale und in 17 Fällen konnte kein Unterschied zwischen den Messungen festgestellt werden. Die Differenz zwischen den beiden Längen nahm mit steigendem Alter der Tiere zu (NACAMBO et al., 2007). Dass sich diese Längendifferenz des Metatarsalknochens bis hinunter zu den Zehenknochen auswirkt, beschrieben Muggli et al. (MUGGLI et al., 2011; MUGGLI et al., 2015). Sie untersuchten im Unterschied zu vorangegangenen Studien neben geschlachteten auch lebende Tiere in natürlicher Körperhaltung mittels eines portablen Röntgengerätes. Sowohl auf hartem als auch auf weichem Untergrund erwiesen sich die lateralen Zehenknochen bei den stehenden Tieren als signifikant länger als die Zehenknochen der medialen Partnerklaue. Die Differenz beginnt an den Kondylen des Metatarsus und setzt sich über die erste und zweite Phalanx fort. Dabei waren die Unterschiede zwischen lateral und medial beim Vergleich der einzelnen Knochen ebenso signifikant wie der Vergleich über die ganze Länge der Zehe. Durch eine medial vergrößerte Phalanx drei wird der Längenunterschied zwar ein wenig ausgeglichen, kann jedoch nicht ganz aufgehoben werden (MUGGLI et al., 2015). In einer post-mortem-Studie kamen die Autoren zu dem Ergebnis, dass der laterale Kondylus am Metacarpus in 65% der Fälle und der laterale Kondylus des Metatarsus sogar in 91% der Fälle weiter distal reichte als der mediale. Auf die Phalanx 1 traf dies in 98,5% bzw. 95% der untersuchten Fälle zu, auf Phalanx 2 in 98,5% bzw. 74% der Fälle (MUGGLI et al., 2011). Die Phalanx 3 hingegen war in über 65% der Fälle vorne und hinten auf der medialen Seite länger (MUGGLI et al., 2011).

Die Hornproduktion in der weiter nach distal reichenden Außenklaue ist durch diese Druckbelastung permanent angeregt, was die divergierenden Größenverhältnisse zwischen lateraler und medialer Klaue erklärt (MÜLLING und HAGEN, 2012).

An den Klauen der Vordergliedmaße sind die Verhältnisse viel einheitlicher als an den Klauen der Beckengliedmaße. Die beiden Klauen einer Gliedmaße gleichen sich in Form und Größe, und auch die Tragflächen sind ausgeglichen. Dazu kommt, dass die Aufhängung der Vordergliedmaße am Torso durch die Sehnen und Bänder des Schultergelenkes wesentlich flexibler ist als die starre knöcherne Verbindung des Hüftgelenkes, welches Hinterbeine und Rumpf verbindet (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001; TOUSSAINT RAVEN, 2003f). Die biomechanischen Kräfte, die durch sich ändernde Gewichtsverteilungen auftreten, wirken sich in der Folge auf die

Klauen der Vorderbeine weniger stark aus. Somit treten auch durch Klauenerkrankungen bedingte Lahmheiten an den Vordergliedmaßen seltener auf (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

Insgesamt ist die Haltung der Klauen essentiell. Sie sind am besten in der Lage, das Körpergewicht effektiv zu tragen, wenn sie senkrecht unter dem Körper stehen (TOUSSAINT RAVEN, 2003f).

In einer 2 Jahre währenden Studie an weiblichen Rindern der Rasse Deutsches Fleckvieh konnten Alsleben et al. 2003 nachweisen, dass bei Kühen im Alter von 2 Monaten sowohl an der Vorder- als auch an der Hintergliedmaße die mediale Klaue den weitaus größeren Teil des Körpergewichtes zu tragen hat (s.

Tabelle 1) (ALSLEBEN et al., 2003). Mit zunehmendem Alter verändern sich die Verhältnisse dahingehend, dass die Belastung auf die vordere mediale Klaue weiter zunimmt. Bei der Messung im Alter von 24 Monaten zeigte sich, dass sich an den Vordergliedmaßen das Gewicht nun annähernd gleichmäßig auf laterale und mediale Klaue verteilt und an den Hintergliedmaßen das Verhältnis sogar umgedreht wird und nun die laterale Klaue den größeren Anteil des Körpergewichtes zu tragen hat (ALSLEBEN et al., 2003).

Eine ähnliche Entwicklung konnte auch beim Verhältnis der Fußungsflächen und der Verteilung des mittleren Drucks beobachtet werden.

Sowohl das absolute Gewicht als auch der mittlere Druck unter der Fußungsfläche sind Alsleben zufolge konstant an der Vordergliedmaße höher als an der Hintergliedmaße (ALSLEBEN et al., 2003). Beide Parameter nehmen besonders im ersten Lebensjahr deutlich zu.

Tabelle 1: Ergebnisse der Messungen von Alsleben (ALSLEBEN et al., 2003)

Alter: 2 Monate				
Merkmal	Mediale Klaue vorne	Laterale Klaue vorne	Mediale Klaue hinten	Laterale Klaue hinten
Durchschnittliches Gewicht auf der Klaue (N)	151,5	70,2	112,9	44,9
Mittlerer Druck ges. (N/cm²)	18,8		16,3	
Fläche (cm²)	7,0	4,0	6,1	3,6

Alter: 12 Monate				
Merkmal	Mediale Klaue vorne	Laterale Klaue vorne	Mediale Klaue hinten	Laterale Klaue hinten
Durchschnittliches Gewicht auf der Klaue (N)	581,4	260,4	384,5	287,3
Mittlerer Druck ges. (N/cm²)	31,0		26,2	
Fläche (cm²)	14,8	11,7	13,1	13,8

Alter: 24 Monate				
Merkmal	Mediale Klaue vorne	Laterale Klaue vorne	Mediale Klaue hinten	Laterale Klaue hinten
Durchschnittliches Gewicht auf der Klaue (N)	700,2	649,9	490,0	589,3
Mittlerer Druck ges. (N/cm²)	37,3		31,6	
Fläche (cm²)	16,9	19,5	15,4	19,1

Im August 2006 publizierten Neveux et al. die Ergebnisse ihrer an insgesamt 40 weiblichen Holstein-Rindern durchgeführten Experimente zur unterschiedlichen Belastung der Gliedmaßen (NEVEUX et al., 2006). Die Tiere, die allesamt klauengesund waren, wurden dabei im ersten Experiment so platziert, dass jeweils drei Gliedmaßen auf einem für die Kühe angenehmen Untergrund aus Gummi zu stehen kamen, eine Gliedmaße jedoch auf einem weniger angenehmen Untergrund, in den kleine Steine eingelassen waren. Unter jeder Gliedmaße befand sich eine Plattform, die den jeweiligen Gewichtsanteil maß. Standen die Tiere mit einem der Hinterbeine auf dem unbequemen Untergrund, wurde diese Gliedmaße entlastet und die kontralaterale Hintergliedmaße verstärkt belastet. Auf die vorderen Extremitäten wurde in diesem Fall interessanterweise kein zusätzliches Gewicht verlagert. Wenn eines der Vorderbeine auf dem unangenehmen Untergrund zu stehen kam, wurde der Hauptteil des Gewichtes auf das jeweils andere Vorderbein verlagert. Allerdings wurde in diesem Falle auch ein gewisser Anteil des Körpergewichts auf die Hintergliedmaße der ipsilateralen Seite verlagert (NEVEUX et al., 2006). Ähnlich waren auch die Ergebnisse aus Experiment 2, in dem jeweils beide Vorder- oder Hinterbeine auf dem weniger angenehmen Untergrund standen. Waren beide Vordergliedmaßen betroffen, wurde das Gewicht anteilig auf die hinteren Klauen verlagert. Umgekehrt war dies jedoch nicht der Fall. Das Gewicht von den auf unbequemem Boden stehenden Hinterbeinen wurde nicht auf die vorderen Klauen

verlagert. Die Tiere sind womöglich nicht in der Lage, das Körpergewicht von der hinteren Körperhälfte wesentlich nach vorne zu verlagern. Hierin könnte eine weitere Ursache für die höhere Prävalenz von Klauenerkrankungen an den hinteren Klauen liegen (NEVEUX et al., 2006).

2005 zeigte Widauer in ihrer Dissertation an Klauen von weiblichen Tieren der Rassen Deutsches Fleck- und Deutsches Braunvieh, dass die Zugfestigkeit des Klauenhorns in allen Bereichen der Rinderklaue im Laufe des Lebens bzw. mit jeder Kalbung nachlässt. Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 2 dargestellt (WIDAUER, 2006).

Tabelle 2: Ergebnisse der Messungen von Widauer (WIDAUER, 2006)

Gruppe I (Färsen, mind.1,5 Jahre, nullipar)							
	Laterale Klaue vorne	Mediale Klaue vorne	Laterale Klaue hinten	Mediale Klaue hinten			
Messpunkt mit dem höchsten gemessenen Wert	S III, Lochnummer 4	S III, Lochnummer 1	S III, Lochnummer 3	S I, Lochnummer 1			
Messpunkt mit dem niedrigsten gemessenen Wert	S I Lochnummer 4	S II, Lochnummer 4, S II, Lochnummer 7	S I, Lochnummer 3	S I, Lochnummer 7			
Niedrigster Wert (N/mm²)	1,52	1,53	1,81	1,41			
Höchster Wert (N/mm²)	5,37	5,28	5,03	4,43			
Gruppe II (1 Kalbung)							
	Laterale Klaue vorne	Mediale Klaue vorne	Laterale Klaue hinten	Mediale Klaue hinten			
Messpunkt mit dem höchsten gemessenen Wert	S II, Lochnummer 4	S III, Lochnummer 3	S II, Lochnummer 3	S III, Lochnummer 1			

Wert				
Messpunkt mit dem niedrigsten gemessenen Wert	S II, Lochnummer 6	S II, Lochnummer 7	S I, Lochnummer 5	S I, Lochnummer 1
Niedrigster Wert (N/mm²)	1,38	1,38	1,82	0,7
Höchster Wert (N/mm²)	4,19	3,2	4,41	5,2

Gruppe III (2-4 Kalbungen)				
	Laterale Klaue vorne	Mediale Klaue vorne	Laterale Klaue hinten	Mediale Klaue hinten
Messpunkt mit dem höchsten gemessenen Wert	S II, Lochnummer 4	S III, Lochnummer 3	S III, Lochnummer 3	S III, Lochnummer 3
Messpunkt mit dem niedrigsten gemessenen Wert	S II, Lochnummer 5	S I, Lochnummer 3	S I, Lochnummer 5	S I, Lochnummer 7
Niedrigster Wert (N/mm²)	1,55	1,52	1,58	1,72
Höchster Wert (N/mm²)	3,81	3,46	4,16	4,06

Gruppe IV (mind. 5 Kalbungen)				
	Laterale Klaue vorne	Mediale Klaue vorne	Laterale Klaue hinten	Mediale Klaue hinten
Messpunkt mit dem höchsten gemessenen Wert	S II, Lochnummer 4	S III, Lochnummer 3	S III, Lochnummer 3	S III, Lochnummer 3

Messpunkt mit dem niedrigsten gemessenen Wert	S I, Lochnummer 2	S I, Lochnummer 2	S I, Lochnummer 5	S I, Lochnummer 2
Niedrigster Wert (N/mm²)	1,53	1,17	1,71	1,34
Höchster Wert (N/mm²)	4,08	2,83	3,69	3,55

Um die Untersuchungen durchführen zu können, wurden die Klauen durch Transversalschnitte in 3 parallele Scheiben geschnitten (S I-S III). Auf jeder Scheibe wurden zwischen 4 und 7 Punkte definiert, an denen die Zugversuche vorgenommen wurden. An der Vorderextremität wurden insgesamt 35 Punkte beprobt, 17 lateral, 18 medial. Die 29 Probenpunkte an den Vorderextremitäten verteilten sich 14 auf lateral, 15 auf medial. Die Punkte wurden durchnummeriert und so eine genaue Zuordnung eines jeden Messergebnisses zu einer exakt definierten Lokalisation ermöglicht. Um eine zuverlässige Reproduzierbarkeit der Beprobungsstellen zu gewährleisten, wurden für jeden Transversalschnitt Metallscheiben als Schablonen angefertigt (s. Abbildung 3). Jedes Horntrapez wurde anschließend einem Zugversuch in der Materialprüfmaschine unterzogen, und die Ergebnisse wurden notiert.

Die Untersuchung zeigte, dass bei der Gruppe der jüngsten Tiere, die noch nie gekalbt hatten, die Zugfestigkeit der lateralen Klaue an Vorder- und Hinterextremität höher war als an der medialen. Insgesamt wurden an den Klauen der Schultergliedmaße höhere Werte erzielt als an denen der Beckengliedmaße (WIDAUER, 2006).

Das Endergebnis von Widauers Untersuchungen war, dass die Zugfestigkeit im abaxialen Teil des Wandsegments durchschnittlich am höchsten ist. Dies lässt auf eine hohe Belastung dieses Abschnitts der Klaue auch unter physiologischen Bedingungen schließen. Mit zunehmendem Alter und mit der Anzahl der Trächtigkeiten nimmt die maximale Zugfestigkeit in diesem Bereich immer mehr ab. Scheinbar wird die Aufhängung des Klauenbeins im Hornschuh durch Alter und Trächtigkeit zunehmend geschwächt (WIDAUER, 2006).



Abbildung 3 Sägescheiben S I bis S III mit ausgestanzten und isolierten Horntrapezen (WIDAUER, 2006)

Maierl et al. führten 2002 Versuche mit dem Ziel durch, in einem Zugversuch zu ermitteln, an welcher Stelle des Aufhängeapparats des Klauenbeins die maximale Belastbarkeit herrscht und welche Stelle im Gewebe im Zugversuch zuerst nachgibt (MAIERL et al., 2002). Sie untersuchten zu diesem Zweck Klauen schlachtreifer, klauengesunder Mastbullen der Rasse Deutsches Fleckvieh. An je einer Vorder- und einer Hintergliedmaße wurden aus medialer und lateraler Klaue jeweils an drei Stellen (dorsal, abaxial, axial) des Hornschuhs keilförmige Hornproben entnommen und in der Materialprüfmaschine bis zum Zerreißen des Gewebes auf Zug belastet. Der Lederhautanteil des jeweiligen Hornkeils wurde vor dem Test gemessen, so dass sich die maximale Belastbarkeit des Aufhängeapparats des Klauenbeins in N/mm^2 errechnen ließ (MAIERL et al., 2002).

Die signifikant höchste Zugfestigkeit wurde an der abaxialen Testposition erreicht (MAIERL et al., 2002), Sie lag um etwa 50% über den Werten, die an den beiden anderen Testpositionen erreicht wurden. Die Ergebnisse des Vergleiches lateraler zu medialer Klaue oder Vorder- zu Hintergliedmaße ergaben keine signifikanten Unterschiede. Ca. 57% der Proben rissen im Stratum papillare der Lederhaut (MAIERL et al., 2002).

3.2 Klauenerkrankungen

Mülling bezeichnet die Klaue als „Schnittstelle zwischen der Kuh und der Umwelt“ (MÜLLING, 2014). Als solche ist die Klaue einigen Belastungen ausgesetzt, was sich auch darin äußert, dass Klauenerkrankungen weltweit eine Herausforderung für die Rinderhaltung darstellen (MÜLLING, 2014).

Man muss Erkrankungen der Klauen als Herdenproblem betrachten. Präventive Maßnahmen betreffen daher im Allgemeinen das Gesamtmanagement. Die Voraussetzung, um Managementfehler abzustellen und die Klauengesundheit nachhaltig zu verbessern, ist eine fundierte Risikoanalyse (HAGEN und MÜLLING, 2012).

Erkrankungen der Klauen sind nicht nur wirtschaftlich von Bedeutung. Sie haben auch eine tierschutzrechtliche Relevanz. Bei einer Studie an 70 Milchkühen, von denen die Hälfte gesund, die andere Hälfte an diversen Klauendefekten erkrankt waren, wurde der Einfluss von Klauenerkrankungen auf messbare Stressparameter wie Cortisol und Laktat im Blutserum untersucht. Das Ergebnis: die kranken Tiere wiesen signifikant höhere Laktat- und Cortisol-Werte auf als die Tiere der gesunden Kontrollgruppe. Besonders stark stiegen die Werte bei septischen Erkrankungen an (EL-GHOUL und HOFMANN, 2002). Daraus lässt sich schließen, dass Klauenerkrankungen bei den betroffenen Tieren Stress auslösen. Hauptursache hierfür wird wohl der Schmerz sein.

3.2.1 Untersuchung

Eine ausführliche Anamnese ist bei der Diagnose von Klauenerkrankungen sehr hilfreich und kann oft schon einen Hinweis auf Art und Umfang des Problems geben. So rühren plötzliche Lahmheiten bei auf der Weide gehaltenen Rindern oft von gedeckten Frakturen her, im Laufstall treten häufiger Dermatitisen oder Pododermatitisen auf (NUSS und STEINER, 2003b). Alter und Reproduktionsstatus können unter Umständen eine gewisse Priorisierung der in Frage kommenden Erkrankungen ermöglichen. Sohlengeschwüre sind beispielsweise häufig bei älteren Tieren ursächlich, wohingegen Kälber eher an septischen Arthritiden leiden (NUSS und STEINER, 2003b). Auch die Rangordnung eines Tieres hat einen gewissen Einfluss auf seinen Gesundheitsstatus. Die Klauen rangniederer Tiere beispielweise

werden durch die oft längeren Stehzeiten stärker beeinflusst als bei ranghöheren Herdenmitgliedern (HAGEN und MÜLLING, 2012).

Aufgrund der Umstellungen, die sich sowohl in Bezug auf Stoffwechsel und Fütterung als auch das Management betreffend in zeitlicher Nähe zur Abkalbung ergeben, stellt diese Zeit eine besonders kritische Phase für die Klauengesundheit dar (HAGEN und MÜLLING, 2012).

Um Erkrankungen durch Mangelernährung oder verdorbenes Futter auszuschließen, sollte auch die Futtermittellieferung hinterfragt werden. Ebenfalls von Interesse ist, welche anderen Erkrankungen es im Betrieb gibt und wann die letzte Klauenpflege stattgefunden hat (NUSS und STEINER, 2003b). Die Milchleistung erkrankter Kühe ist oft erst bei schwerwiegenden Erkrankungen vermindert und ist deshalb als Anamneseparameter nur eingeschränkt nutzbar (NUSS und STEINER, 2003b).

Tabelle 3 Checkliste zur Risikoanalyse im Haltungssystem (HAGEN und MÜLLING, 2012)

Technische Parameter	Kriterien	Relevanz für Klauenerkrankungen
Stalltyp	Boxenlaufstall, Tretmiststall, Anbindehaltung, 2-Flächen-System	Bewegung, Hornabrieb, Sozialverhalten, Hygiene
Lauffläche	Spalten (Breite, Weite), plan befestigt, Tiefstreu, Kombinationen	Hornabrieb, Verletzungsgefahr, biomechanische Belastung
Liegefläche	Boxen, freie Flächen	Liege- und Stehverhalten, Kuhkomfort
Liegeboxen	Anzahl, Typ (Hoch- oder Tiefboxen), Abmessungen, Design, Begrenzung	Liege- und Stehverhalten, Kuhkomfort, Verletzungsrisiko
Bodenbelag und Einstreukomfort	Beton, Stroh, Einstreu, Gummimatte, Komfortmatratze	Liege- und Stehverhalten, Kuhkomfort, Verletzungsrisiko
Hygiene	Sauber, mittel, verschmutzt	Infektionsdruck, Therapieerfolg
Fressplätze	Anzahl, Abmessungen, Design, Fressgitter, Kraftfutterstation	Futteraufnahme, soziale Interaktion, Rankkämpfe
Futter	Fütterungssystem, Qualität, Rationsgestaltung, Fütterungsintervalle	Futteraufnahme, Stoffwechsel, Versorgung mit Nährstoffen, Vitaminen, Spurenelementen
Tränke	Anzahl, Position im Stall, Abmessungen, Typ, Hygiene	Wasserversorgung soziale Interaktion, Rankkämpfe
Lüftung	Trauf-First, Zwangslüftung, Offenstall, Windschutznetze	Kuhkomfort, Luftfeuchte, Infektionsverbreitung
Licht	Kunstlicht, Fenster-Bodenflächen-Verhältnis	Vitamin-D-Versorgung, Kuhkomfort
Gruppenstärke	Überbelegung, gut	soziale Interaktion, Verletzungsrisiko

Bei jedem erkrankten Tier muss eine Allgemeinuntersuchung durchgeführt werden. Der Ernährungszustand, die Körperhaltung sowie das allgemeine Verhalten des Tieres werden dabei ebenso berücksichtigt wie Herz- und Atemfrequenz und die innere Körpertemperatur. Treten dabei Abweichungen auf, deutet dies in der Regel auf eine schwerere Erkrankung hin, die bereits auf weitere Organsysteme übergegangen oder sogar schon systemisch ist. Denkbar wären etwa Bakteriämien oder Septikämien infolge hämatogener Ausbreitung von Erregern aus den Klauen. Bei massiven inflammatorischen Prozessen kann der γ -Globulingehalt im Serum erhöht sein. Hinweise darauf gibt bei adulten Rindern der Glutaltest (NUSS und STEINER, 2003b).

Einen hohen Informationsgehalt für Aussagen über Schwere und Lokalisation der Erkrankung hat das Beobachten des Patienten im Stall, insbesondere beim Aufstehen. Dabei sollte man auf Verletzungen der äußeren Haut ebenso achten wie auf Schon- und Entlastungshaltungen. Häufig sind Ulzerationen über hervorstehenden Knochen Anzeichen einer länger andauernden unnatürlichen Körperhaltung im Liegen (NUSS und STEINER, 2003b). Anschließend sollte das lahrende Rind in Bewegung beurteilt werden. Es ist vorteilhaft, die festgestellte Lahmheit in verschiedene Grade einzuteilen. In die Beurteilung werden die Parameter Bewegungsmuster, Rückenlinie, Geschwindigkeit, Fußungsart, Gliedmaßenführung und Kopfhaltung einbezogen. Oftmals sind Erkrankungen nicht auf eine Gliedmaße beschränkt. Dies macht die Diagnose und auch die Behandlung oft schwieriger und erfordert umso mehr Sorgfalt des Untersuchers (NUSS und STEINER, 2003b).

Nachdem das gesamte Tier untersucht und im Idealfall die betroffene Gliedmaße identifiziert wurde, wird diese nun näher untersucht. Auch wenn Klauenerkrankungen die häufigste Ursache für Lahmheiten sind, darf man die restliche Gliedmaße nicht außer Acht lassen und sollte sie sowohl adspektorisch als auch palpatorisch untersuchen (NUSS und STEINER, 2003b).

Im Kipp- oder Klauenstand werden alle Gliedmaße sicher fixiert und zunächst mithilfe einer Klauenuntersuchungszange untersucht. Die Aufmerksamkeit gilt hierbei der Erkennung von Schmerzreaktionen, besonders an zuvor als gesund eingestuften Klauen. Im Anschluss wird an allen Klauen zunächst eine, den erhobenen Befunden angepasste funktionelle Klauenpflege durchgeführt (s. Kapitel 3.3). Dieser schließt

sich eine gründliche Reinigung und Rasur der gesamten als ursächlich für die Lahmheit identifizierten Gliedmaße an (NUSS und STEINER, 2003b).

Es folgt die adspektorische Untersuchung der entsprechenden Gliedmaße vom Schultergelenk bis zur Klaue. Die vorangegangene Rasur ermöglicht es dem Untersucher, auch kleinste Verletzungen oder Verfärbungen der Epidermis zu erkennen sowie Schwellungen oder vermehrte Wärme wahrzunehmen. Das weitere Vorgehen richtet sich nach dem jeweils vorliegenden Krankheitsbild. Verdächtige oder eindeutig als krankhaft identifizierte Stellen müssen in der Regel freigelegt werden, um Ursache und Ausmaß beurteilen zu können (NUSS und STEINER, 2003b). Bei unklarem adspektorischen Ergebnis, aber auch zur Identifikation weiterer als der augenscheinlich sichtbaren Probleme sollte jede erkrankte Klaue auch palpatorisch untersucht werden. Bringt die Untersuchung mit der Klauenzange kein oder kein reproduzierbares Ergebnis, können Dreh-, Beuge- oder Streckproben Aufschluss geben (NUSS und STEINER, 2003b). Wenn der Verdacht auf eine Fistel besteht, kann eine Sondierung angezeigt sein. Dabei ist allerdings sorgfältig darauf zu achten, dass keine Keimverschleppung in die Tiefe des Defekts erfolgt. Zudem muss durch behutsames Vorgehen die Vergrößerung des Defekts unbedingt vermieden werden. Tiefe, Ausrichtung und Schwere einer fistelartigen Verletzung können auf diese Weise gut untersucht und dementsprechend Aussagen über die Prognose der Erkrankung gemacht werden (NUSS und STEINER, 2003b).

In Einzelfällen kann die Punktion eines Gelenkes sinnvoll sein.

Nach Abschluss dieser allgemeinen Untersuchungstechniken steht dem heutigen Untersucher eine Vielzahl weiterführender Untersuchungen zur Verfügung. Zur Beurteilung von Veränderungen der knöchernen Anteile der Klauen ist die Röntgendiagnostik das Mittel der Wahl. Mit ihrer Hilfe lassen sich zum Beispiel Frakturen oder osteolytische Prozesse eindeutig diagnostizieren. Sonografische Untersuchungen erleichtern die Diagnosefindung bei Veränderungen im Bereich der Weichteile, etwa der Sehnen. Auch der Charakter einer Umfangsvermehrung lässt sich sonografisch recht eindeutig ermitteln (NUSS und STEINER, 2003b).

Bei unklaren Befunden kann unter Umständen mithilfe einer Leitungsanästhesie die betroffene Region lokalisiert werden. Eine weitere Möglichkeit ist, nach Hochstellen

der gesunden Partnerklaue die Lahmheit erneut zu beurteilen (NUSS und STEINER, 2003b).

Uneindeutige Entzündungen können unter Umständen durch hyperämisierende Verbände zu Tage gefördert und somit beurteilbar gemacht werden (NUSS und STEINER, 2003b).

3.2.2 Erkrankungen der Haut

Verletzungen der äußeren Haut, die mit einem feuchten, keimbelasteten Stallklima konfrontiert werden, führen häufig zu entzündlichen Veränderungen der Klauenhaut. Prädisponierend wirken neben einem anaeroben, feuchten Milieu auch eine hohe Besatzdichte und mangelhafte hygienische Zustände (NUSS und STEINER, 2003a). Da von den Erkrankungen der Haut dem Dermatitis-digitalis-Komplex wirtschaftlich die größte Bedeutung zukommt, wird er hier näher beschrieben.

Dermatitis digitalis und interdigitalis (Dermatitis-digitalis-Komplex)

Obwohl es sich bei der Dermatitis digitalis und der Dermatitis interdigitalis um zwei unterschiedliche Erkrankungen handelt, die entsprechend in ihrer Behandlung variieren, ähneln sie sich in ihrer Entstehung und der Diagnose soweit, dass man sie gemeinsam abhandeln kann (NUSS und STEINER, 2003a).

Die Dermatitis digitalis ist proximal des Kronsaums lokalisiert. Betroffen ist die Ballenhaut. Die Entzündung ist in der Regel auf ein durch eine weißliche Randzone begrenztes Areal beschränkt, nässend und mit Schmerzen verbunden. Häufig gehen Haare und auch Teile der oberen Hautschicht verloren. Es können alle vier Gliedmaße zeitgleich betroffen sein, das Auftreten an den Hintergliedmaßen überwiegt. Im Umkreis der Entzündung wachsen die Haare typischerweise länger als üblich, was bei frühen Krankheitsstadien hinweisend sein kann. Die Krankheit geht mit einer Ödematisierung des Gewebes einher. Sowohl eine Beschränkung auf die äußersten Hautschichten als auch ein Übergreifen auf tiefere Schichten mit zum Teil schwerwiegenden Folgen ist möglich (NUSS und STEINER, 2003a).

Bei der Dermatitis interdigitalis ist die Haut im Zwischenklauenspalt betroffen. Die Krankheit stellt sich im Grunde identisch dar. Zuweilen treten beide Krankheitsbilder parallel auf. Die Gefahr, dass sich die Krankheit in tiefere Regionen der Klaue

ausbreitet, ist bei einer Entzündung der Zwischenklauenhaut aufgrund der Topografie größer (NUSS und STEINER, 2003a).

Beide Erkrankungen sind typisch für die Haltung in Laufställen. Feuchte und stark verschmutzte Stallböden wirken prädisponierend, die Hauptursache ist jedoch eine Mazeration der Haut infolge andauernder Beeinträchtigung durch physikalische, chemische und mechanische Noxen. Die Rolle von Spirochäten als Haupterreger gilt als gesichert, begleitet werden diese in der Regel von z.B. Fusobakterien oder *Campylobacter* Subspezies. Auch Kommensale der Haut wie Staphylokokken, Streptokokken und koliforme Keime tragen ihren Teil zur Entstehung bei (NUSS und STEINER, 2003a).

Jüngere Rinder sind vergleichsweise häufiger betroffen als ältere. Die Anzahl der Tiere, die nach erfolgreicher Behandlung an einem Rezidiv erkranken, ist ziemlich hoch (NUSS und STEINER, 2003a).

Makroskopisch kann die Krankheit in verschiedene Stadien unterteilt werden, bei denen die Schädigung des Epithels und der Keratinozyten zunehmend voranschreitet. Proliferation und schließlich Hyperkeratose sind die Folgen. Die Dermatitis verrucosa oder Papillomatose werden als chronische Formen und somit Endstadium des Krankheitskomplexes betrachtet (NUSS und STEINER, 2003a).

Der Lahmheitsgrad reicht in Abhängigkeit von Schwere und Stadium der Erkrankung von leicht klammem Gang bis hin zu hochgradiger Lahmheit. Auf unebenem Untergrund tritt diese deutlicher zu Tage (NUSS und STEINER, 2003a).

Die Diagnose Dermatitis digitalis / interdigitalis liegt nahe, wenn mehrere Tiere eines Bestandes erkranken und die Veränderungen an den Klauen sich optisch entsprechend darstellen. Häufig wird in der Anamnese von kürzlich neu eingestellten Tieren berichtet. Differentialdiagnostisch müssen Dermatitisen anderer Genese sowie bakteriologische und virale Erkrankungen wie etwa die Maul- und Klauenseuche ausgeschlossen werden (NUSS und STEINER, 2003a).

Den besten Therapieerfolg erzielt man mit einer lokalen chemotherapeutischen Behandlung sowie mit antibiotischen Sprays. Die systemische Antibiotika-Gabe ist zwar zielführend, rechnet sich aber unter ökonomischen Gesichtspunkten in der Regel nicht. Essentiell für den Erfolg der Behandlung und auch zur Vorbeugung des Krankheits-Komplexes ist die Optimierung der Haltungsbedingungen (NUSS und STEINER, 2003a).

3.2.3 Erkrankungen der Klauenlederhaut

Bei einer retrospektiven Untersuchung in Österreich wurden 2012 die Daten der Klauenpflege von 281 Mutterkühen ausgewertet. Mit über 67% wurde die chronische Klauenrehe als häufigste Klauenläsion diagnostiziert (KEPLINGER et al., 2013).

Aufgrund ihres häufigen Auftretens und der durch sie verursachten Schäden hat die Klauenrehe unter den Klauenerkrankungen eine Spitzenposition inne (NUSS und STEINER, 2003a). Im Folgenden wird sie daher näher erläutert.

3.2.3.1 Pododermatitis aseptica diffusa (Klauenrehe)

Eine Klauenrehe kann durch übermäßige Belastung entstehen, viel häufiger liegt ihr jedoch eine systemische Erkrankung zugrunde. Infolge einer solchen Erkrankung werden vermehrt Substanzen freigesetzt, die aufgrund ihrer toxischen und vasokonstriktorischen Eigenschaften zur Minderdurchblutung der Kapillargebiete führen. Dies hat im Bereich der Klauenlederhaut besonders drastische Auswirkungen. Die Mikrozirkulation wird gestört, das Gefäßendothel geht zugrunde. Dies wiederum führt dazu, dass korpuskuläre Blutbestandteile ungehindert aus den Blutgefäßen austreten. Ödeme, Entzündungen und ein erhöhter Gefäßwiderstand sind die Folgen. Im Kapillarbett kann nun kein Austausch von sauerstoffreichem Blut mehr stattfinden, die Ischämie und ihre negativen Begleiterscheinungen werden immer weiter verstärkt und die hornproduzierenden Zellen werden schlussendlich nekrotisch (NUSS und STEINER, 2003a).

Auch eine gestörte Blutdruckregulation in der Klauenlederhaut als Resultat von verändertem pH, Überlastung oder Ähnlichem mit daraus folgender Vasodilatation wird als Ursache für den gestörten Sauerstoffaustausch in den Kapillargebieten der Klauen diskutiert (NUSS und STEINER, 2003a).

Auch wenn die endgültige Klärung des Pathomechanismus noch aussteht, die Folgen der gestörten Mikrozirkulation sind bekannt: Der Aufhängeapparat des Klauenbeins wird gelockert, es kommt zu vermehrter Produktion minderwertigen und sehr lockeren Horns. Ist die Erkrankung so weit fortgeschritten, dass das Klauenbein sich komplett löst und absinkt, ist der Zustand irreversibel. In diesem Fall spricht man von einer chronischen Klauenrehe, der am häufigsten auftretenden Form der Rehe. Durch die pathologisch veränderte Lage des Klauenbeins wird die Lederhaut

permanent gequetscht. Einblutungen und Nekrosen sind die Konsequenz daraus (NUSS und STEINER, 2003a).

Neben der chronischen Form unterscheidet man bei der Klauenrehe subklinische, subakute und akute Zustände, wobei der letztgenannte eine untergeordnete Rolle spielt. Ein akut an Klauenrehe erkranktes Rind leidet zusätzlich unter systemischen Beschwerden und zeigt dementsprechende Veränderungen wie Anorexie und verminderte Milchleistung. Es werden vermehrt Schonhaltungen eingenommen. Die Klauen sind – bis auf eventuell auftretende Rötungen und vermehrte Wärme – adspektorisch unauffällig. Auf Druck zeigt das Tier jedoch an allen betroffenen Klauen eine ausgeprägte Schmerzreaktion (NUSS und STEINER, 2003a).

Ähnliche Symptome, wenn auch in abgeschwächter Form, treten bei einer subakut verlaufenden Rehe auf. Die recht unspezifischen Symptome können leicht übersehen oder falsch interpretiert werden (NUSS und STEINER, 2003a).

Die subklinische Klauenrehe ist insofern die wirtschaftlich bedeutsamste als sie unerkannt bleibt und sich häufig zu einer chronischen Form entwickelt, welche in vielen Fällen den Grund für einen verfrühten Abgang des Tieres darstellt. Dass eine subklinische Klauenrehe vorgelegen haben muss, zeigt erst das in dieser Phase gebildete, minderwertige Horn. Treten solche Schübe gehäuft auf, da sich die Umstände, welche die Rehe verursacht oder begünstigt haben, nicht ändern, wird die Pododermatitis chronisch und entzieht sich jeglicher Behandlung (NUSS und STEINER, 2003a). Aufgrund ihres Einflusses auf den Klauenbeinträger und die Integrität des Klauenhorns hat sich seit einiger Zeit die Bezeichnung „claw horn disruption“ (CHD) für die subklinische Form der Klauenrehe etabliert. Akute Entzündungserscheinungen fehlen in der Regel vollständig (BYSTRON und MÜLLING, 2012). Besonders in einem Zeitraum 2-3 Monate nach der Abkalbung lassen sich vermehrt Anzeichen auf eine subklinische Klauenrehe diagnostizieren. Dies sind z.B. Einblutungen in das Sohlenhorn, welche eine Folge der Quetschung des Gewebes durch das in seiner Position veränderte Klauenbein darstellen (BYSTRON und MÜLLING, 2012).

2006 untersuchte Widauer im Rahmen ihrer Dissertation zum Thema „Biomechanische Eigenschaften des Klauenbeinträgers bei Rindern mit unterschiedlicher Laktationszahl“ die Klauen von weiblichen Tieren der Rassen Deutsches Fleck- und Braunvieh nach der Schlachtung auf Rehemerkmale

(WIDAUER, 2006). Dazu wurden die Tiere abhängig von Alter und Anzahl der Trächtigkeiten in 4 Gruppen unterteilt. Sie kam zu folgenden Ergebnissen: In der Gruppe der jüngsten Tiere, die noch nie gekalbt hatten, wurden keine Anzeichen für eine Klauenrehe gefunden. In Gruppe II und III (mindestens eine, maximal 4 Kalbungen) zeigten jeweils etwa 20 % der Tiere Anzeichen für eine durchgemachte bzw. für eine chronische Klauenrehe. In Gruppe IV (mehr als 4 Kalbungen) hingegen waren lediglich 20 % der Tiere gänzlich unauffällig, weitere 20 % zeigten Hinweise für eine durchgemachte Rehe, der Rest wies Anzeichen chronischer Klauenrehe auf (WIDAUER, 2006). Diese Ergebnisse zeigen, in welcher Häufigkeit die Klauenrehe bei Milchkühen auftritt und an welchen Stellen eventuell Einfluss auf die Pathogenese genommen werden kann.

Prädisponierende Faktoren:

Eine Reihe von Faktoren wird als prädisponierend für das Entstehen einer Reheerkrankung angesehen. In den seltensten Fällen ist jedoch ein einzelner von ihnen ausschlaggebend, vielmehr kommen oft mehrere Faktoren zusammen und begünstigen die Entstehung der Krankheit. Eine der Hauptursachen für eine Pododermatitis aseptica diffusa ist eine systemische Erkrankung wie etwa eine Stoffwechselstörung oder Unregelmäßigkeiten im Zusammenhang mit Trächtigkeit und Geburt. Des Weiteren kann die Fütterung einen entscheidenden Einfluss auf die Klauengesundheit haben (NUSS und STEINER, 2003a). Eine zu kohlenhydrathaltige Fütterungsration bewirkt eine Verschiebung der Bakterienflora im Pansen von überwiegend gramnegativ zu vorwiegend grampositiv, was ein Absinken des Pansen-pH nach sich zieht. Die auf diese Art entstehende Azidose kann ebenso ursächlich für die Klauenrehe sein wie die durch das Zugrundegehen der gramnegativen Pansenbakterien entstehenden Toxine. Weitere Futterbestandteile, bei denen ein Zusammenhang mit Klauenrehe nachgewiesen wurde oder vermutet wird, sind Proteine, Rohfasergehalt und Nitrat sowie Mykotoxine (NUSS und STEINER, 2003a).

Wie bei allen Klauenerkrankungen spielen auch bei der Klauenrehe die Haltungsbedingungen eine große Rolle. Rinder, die aufgrund von zu wenigen oder ungeeigneten Liegeflächen vermehrt stehen, sind anfälliger für Klauenrehe. Harte Untergründe und feuchte Einstreu tun ihr Übriges (NUSS und STEINER, 2003a).

Ebenso hat die Rangordnung Auswirkungen. Beispielsweise auf das Liegeverhalten und somit auch auf die Klauengesundheit (NUSS und STEINER, 2003a). Primär verändern sich an einer an Klauenrehe erkrankten Klaue die Qualität des Horns, die Sohle und der Hornschuh selbst. Es treten in der Folge vermehrt Sohlengeschwüre auf. Durch Einblutungen oder Flüssigkeitsaustritt anderer Art kommt es zur Zusammenhangstrennung einzelner Hornschichten, was den Eintritt von Bakterien und anderen schädlichen Umwelteinflüssen fördert und im schlimmsten Fall in der Bildung einer sogenannten doppelten Sohle münden (NUSS und STEINER, 2003a).

3.2.3.2 Pododermatitis septica circumscripta (Rusterholzsches Sohlengeschwür)

Als Folge einer Rehe senkt sich das Klauenbein ab. Daraus ergibt sich ein andauernder Druck auf die Sohlenlederhaut, welcher bei längerer Dauer nekrotische Veränderungen zur Folge hat. Die Lederhaut wird schließlich freigelegt. Aufgrund der Anatomie des Aufhängeapparats des Klauenbeins löst dieses sich besonders im axialen Wandbereich ab, was die typische, nach ihrem Erstbeschreiber benannte, Lokalisation des Geschwürs verursacht (NUSS und STEINER, 2003a). Lischer bezeichnet das Rusterholzsches Sohlengeschwür als die häufigste Klauenerkrankung der Welt (LISCHER, 2000b).

Es tritt besonders häufig an der Außenklaue der Hintergliedmaßen auf, was darauf schließen lässt, dass die Absenkung des Klauenbeins nicht die alleinige Ursache sein kann. Als weitere Faktoren werden die Erweichung des Horns durch übermäßige Wasseraufnahme und eine Umverteilung des Körpergewichts auf den Ballen und die Außenklaue beschrieben (NUSS und STEINER, 2003a). Es sind vor allem Tiere in Anbinde- und anderer Stallhaltung, die älter als zwei Jahre sind von Sohlengeschwüren betroffen (LISCHER, 2000b).

Bei einem graviden oder laktierenden Rind nimmt das Gewicht, das von der hinteren Körperhälfte getragen werden muss stetig zu. Zunächst wächst die Frucht im Mutterleib heran, anschließend stellt das laktierende Euter eine andauernde Belastung dar. Dies ist einer der Gründe, warum Sohlengeschwüre vermehrt in Zusammenhang mit einer Trächtigkeit beobachtet werden (NUSS und STEINER, 2003a).

Ungepflegte Klauen, die einen mangelnden Abrieb erfahren, wachsen unphysiologisch. In der Stallhaltung werden die Klauen zu wenig abgenutzt. Zwei Stellen sind besonders betroffen von übermäßigem Wachstum bei ungenügender Abnutzung: Die Klauenspitze und die Sohle der Außenklaue (LISCHER, 2000a). Je länger die Klauenwand wird, desto mehr verliert die Klauenspitze den Bodenkontakt. Das Horn an der Spitze wird folglich noch weniger abgenutzt, das am Ballen dafür umso mehr. Der Zehenspitzenwinkel verkleinert sich zunehmend (LISCHER, 2000a). Die Körperlast wird somit immer mehr von der Sohle in Richtung Ballen verlagert und führt hier zu einer Überlastung, besonders in den axialen Arealen der Klaue. Eine Überdehnung der tiefen Beugesehne führt zu Veränderungen und Zubildungen am Tuberculum flexorium, welche wiederum die darunter liegende Lederhaut in zunehmendem Maße schädigen. Ähnliche Auswirkungen hat auch das Nichtvorhandensein einer natürlichen Hohlkehlung in Kombination mit hartem Untergrund (NUSS und STEINER, 2003a).

Bei Fortschreiten der Erkrankung breiten sich die Veränderungen unter die Lederhaut in die Tiefe aus. Eitrige Veränderungen der Tiefen Beugesehne und ihres Ansatzes komplizieren das Geschehen. Eine Ausbreitung der Infektion ist möglich (NUSS und STEINER, 2003a).

Die Symptome der Krankheit verschärfen sich mit zunehmendem Schweregrad. Leichte Formen können zunächst übersehen werden, da außer geringgradiger Schonhaltung und eventuell etwas trippelndem Gang keine Symptome auftreten. Je weiter die Erkrankung fortschreitet, desto schmerzhafter wird sie. Infolge dessen wird die Lahmheit deutlich, es werden zunehmend Schon- und Entlastungshaltungen eingenommen, Futteraufnahme und Milchleistung gehen zurück (NUSS und STEINER, 2003a).

Aufgrund der typischen Lokalisation und Ausprägung fällt die Diagnose meist nicht schwer. Unter Umständen ist bei leichteren Formen zunächst eine diagnostische Klauenpflege notwendig, um den Defekt freizulegen. Hier zeigen sich anfangs besonders Umfangsvermehrungen im Ballenbereich. Wie tief ein Defekt wirklich reicht, und welche Strukturen von einer Infektion betroffen sind, lässt sich mithilfe einer Sonde feststellen. Gegebenenfalls muss diese Untersuchung durch Röntgenaufnahmen ergänzt werden (NUSS und STEINER, 2003a). Je nach Schweregrad reicht bei der Behandlung eine gründliche Klauenpflege, bei der der

Defekt großzügig freigelegt und entlastet wird, aus. Die Prognose ist in diesem Fall günstig. In schwereren Fällen muss ein Kothurn an der gesunden Partnerklaue geklebt werden. Ein Verband schützt das empfindliche Gewebe zusätzlich vor chemischen und bakteriellen Noxen. Bei besonders schweren Erkrankungen ist der Zustand der übrigen Klauen in den Therapieplan miteinzubeziehen. Liegen auch hier krankhafte Zustände vor, oder leidet das Tier zusätzlich unter systemischen Erkrankungen, ist eine Therapie häufig aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll (NUSS und STEINER, 2003a).

Das wichtigste Instrument bei der Vorbeugung von Klauenrehe, und damit auch von Sohlengeschwüren, ist eine regelmäßig und korrekt durchgeführte Klauenpflege (NUSS und STEINER, 2003a).

3.2.3.3 Pododermatitis septica circumscripta abaxialis (Eitrig-hohle Wand, White Line Disease)

Diese Erkrankung hat ihren Ursprung im Bereich der weißen Linie. Besonders betroffen sind auch hier die hinteren Außenklauen, typischerweise an der breitesten Stelle der Klaue. Das weiche Horn in diesem Bereich ist besonders anfällig. Kommt es infolge einer Reheerkrankung zum Auseinanderweichen der Hornblättchen, oder führen Umwelteinflüsse zu Mazerationen, ist der Weg offen für Schmutz und Bakterien. Unbehandelt wird das Horn zusehends zersetzt und Infektionen breiten sich aus (NUSS und STEINER, 2003a). Wenn der Prozess nicht nach außen wandert und es statt zum Ausbruch zu einem Einbruch von Eiter unter die Lederhaut kommt, ist die Folge eine Doppelsohle, in der sich Eiter ansammelt.

An der Weißen Linie treffen hartes und weiches Horn aufeinander. Das weichere Horn kann mechanischen Belastungen recht gut folgen, das härtere Horn ist in seiner Elastizität deutlich eingeschränkter. Wenn nun in diesem Bereich zusätzlich durch Entzündung und Mazeration der Zusammenhalt der Hornzellen vermindert ist, kommt es schnell zu einer kompletten Trennung der einzelnen Schichten. Es ist unter diesen Gesichtspunkten nicht verwunderlich, dass doppelte Sohlen besonders häufig im Laufstall beobachtet werden, wo die mechanische Belastung durch die Bewegung besonders groß ist (NUSS und STEINER, 2003a). Symptome und Diagnose ähneln den beim Rusterholzschon Sohlengeschwür beschriebenen. Auch die Therapie ist im Wesentlichen ähnlich: Das unterminierte Horn muss komplett entfernt und der Defekt

entlastet werden. Ist die Lederhaut bereits infiziert, muss auch sie, in diesem Fall unter Lokalanästhesie, abgetragen werden. Bei Bedarf kommen auch hier Kothurn und Verband zum Einsatz. In ganz gravierenden Fällen kann das Amputieren einzelner Zehenabschnitte nötig werden (NUSS und STEINER, 2003a).

3.3 Funktionelle Klauenpflege

3.3.1 Geschichte und Grundlagen

Bereits im späten 19. Jahrhundert hatte man erkannt, dass es bei domestizierten Rindern teilweise notwendig ist, die Form der Klauen manuell zu korrigieren. Die damals angewendete „Allgäuer Methode“ der Klauenpflege wurde seither stetig weiterentwickelt. Die Veränderung hin zu immer größer werdenden Tierbeständen und die zunehmende Verbreitung der Laufstallhaltung machten eine Anpassung der Klauenpflegemethoden an diese gestiegenen Anforderungen unabdingbar, um die Klauen auch unter den vorherrschenden Bedingungen gesund zu erhalten (FIEDLER et al., 2003). Im Gegensatz zu früher werden nur noch wenige Rinder in Weide- oder Alphaltung oder auf Stroh gehalten, vielmehr werden die meisten Tieren auf hartem Untergrund aufgestellt, was ein natürliches Einsinken der Klauen in den Boden bei Belastung unmöglich macht und zu einer permanenten Überlastung, besonders der hinteren Außenklauen, führt. Daraus resultiert ein gesteigertes Hornwachstum, welches wiederum die Belastung auf die Außenklauen weiter steigert. Ein Teufelskreis, dem nur durch regelmäßige, korrekt durchgeführte, Klauenpflege entgegen gewirkt werden kann (FIEDLER und MÜLLER, 2008).

Ein weiterer Circulus vitiosus kann aus der Tatsache entstehen, dass der Hornschuh ein direktes Produkt aus dem lebenden Gewebe ist, das er schützt. Das tiefer liegende Gewebe bildet also quasi seinen Schutz selbst aus, bzw. ist maßgeblich daran beteiligt. Probleme der Lederhaut führen also dazu, dass der Schutz nicht mehr optimal ist, weil das aus krankem oder überlastetem Gewebe gebildete Horn von minderwertiger Qualität ist. So führt eine gestörte Durchblutung der Lederhaut zu einer unzureichenden Ernährung der hornbildenden Epidermiszellen, was sich wiederum auf Quantität und Qualität des Horns selbst auswirkt. Der unzureichende Schutz der zugrunde liegenden Strukturen verschlimmert folglich deren Zustand weiter (TOUSSAINT RAVEN, 2003d).

In der Regel nutzt sich das Klauenhorn in heutigen Haltungsformen sehr ungleichmäßig ab: Das Horn im Ballenbereich, welches weicher ist und weniger schnell wächst, ist einer stärkeren Belastung durch das Körpergewicht ausgesetzt und wird daher stärker abgerieben als das Horn im Bereich der Klauenspitze. Dieses Horn ist von härterer Konsistenz, verzeichnet eine schnellere Hornbildungsrate und die Gewichtsbelastung ist höher (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Dieser Umstand führt dazu, dass der Bereich der Klauenspitze zunehmend in die Länge wächst, wohingegen der Ballenbereich immer flacher wird. In der Folge verkleinert sich der Winkel der Seitenwand zum Boden von physiologischen 45° auf 30° oder weniger (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

2014 wurde in der Schweiz eine Studie gemacht, die den Einfluss der Bodenbeschaffenheit im Laufstall sowie vom Weidegang auf Form und Dimension der Klauen von Milchkühen untersuchte (HAUFE et al., 2014). Auf Gummimatten stehende Tiere verzeichneten das höchste Nettowachstum der Klauen, am geringsten war dieses bei Haltung auf Gussasphaltboden. Im Gegensatz zu Betonspalten oder Gussasphaltboden war das Auftreten von überwachsenem Klauenhorn bei der Haltung auf Gummimatten deutlich reduziert. Auf Gussasphaltboden hingegen war die Anzahl der Tiere mit konkaven Sohlen gegenüber den beiden anderen Haltungsformen geringer (HAUFE et al., 2014). Bei der Haltung auf Betonspaltenboden oder Gummimatten sehen die Autoren aufgrund des höheren Klauenwachstums kürzere Intervalle zwischen den Klauenpflegen als erforderlich an. Das Hauptaugenmerk sollte bei der Klauenpflege von auf diese Weise gehaltenen Tieren auf der Rekonstruktion der physiologischen Klauenform liegen. Durch den verstärkten Abrieb des Horns auf Gussasphaltboden ist bei dieser Haltungsform besonders wichtig, der Sohle durch die Klauenpflege ihre konkave Form zurück zugeben. Außerdem muss bei diesen Tieren verstärkt auf mögliche Anzeichen für zu starken Klauenabrieb geachtet werden (HAUFE et al., 2014). Ein positiver Einfluss von zusätzlichem Weidegang konnte in der Studie nicht bestätigt werden. Allerdings hatten die in der Studie verwendeten Tiere durchschnittlich auch nur ca. 4 Stunden täglich Zugang zu einer Weide (HAUFE et al., 2014).

Die heutzutage in Europa dominierende Methode der Klauenpflege ist die der in den Niederlanden entwickelte sogenannte „funktionellen Klauenpflege“ (FIEDLER et al.,

2003). Die Grundlagen der funktionellen Klauenpflege sind in „Cattle Foot Care and Claw Trimming“ von Toussaint Raven ausführlich beschrieben (TOUSSAINT RAVEN, 2003g). Das Adjektiv „funktionell“ ist in diesem Zusammenhang ganz bewusst gewählt, da sich diese Form der Klauenpflege nicht auf rein kosmetische Korrekturen beschränkt, sondern vielmehr das Haupt-Augenmerk auf die Wiederherstellung der natürlichen Gegebenheiten und somit Funktionen der Klaue richtet (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Im Wesentlichen werden 3 Ziele verfolgt: 1. Die Wiederherstellung ausgeglichener Verhältnisse der Gewichtsverteilung innerhalb jeder einzelnen Klaue, 2. Die Korrektur übermäßigen Hornwachstums, 3. Das frühzeitige Erkennen und Beheben von Klauenläsionen (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Der Fokus hierbei liegt auf der gleichmäßigen Verteilung des Körpergewichts auf die Hintergliedmaßen. Um punktuelle Belastung zu vermeiden und den Druck möglichst gleichmäßig auf die gesamte Sohle zu verteilen, wird angestrebt, die Klauenspitze so kurz, den Ballenbereich so hoch wie möglich zu halten. Das anvisierte Ziel ist es, eine optimale Belastung der Klauenpaare, und in der Folge auch der gesamten Gliedmaße, zu erreichen (FIEDLER et al., 2003). Das Klauenpaar wird hierbei stets als Einheit betrachtet (FIEDLER und MÜLLER, 2008).

Indem man den Klauen ihre natürliche Gestalt zurückgibt, erreicht man auch eine natürliche Klauenfunktion. Zum einen ist dies eine angemessene Gewichtsverteilung unter den verschiedenen Gliedmaßen und auch den beiden Klauen einer Gliedmaße, zum anderen wird auch der Gefahr von Klauenerkrankungen infolge von Fehlbildungen des Horns vorgebeugt (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

Eine regelmäßig und korrekt durchgeführte Klauenpflege verbessert die Klauengesundheit signifikant. Durch eine unsachgemäße Durchführung jedoch werden die Klauen gegenüber den auf sie einwirkenden Belastungen eher geschwächt als gestärkt, was eine Zunahme von Lahmheitserkrankungen zur Folge hat (HAGEN und MÜLLING, 2012).

Die wichtigsten Werkzeuge bei der funktionellen Klauenpflege sind das traditionelle Klauenmesser und der geschulte Sachverstand des Klauenpflegers. Letzterer bedarf der regelmäßigen Weiterbildung und vor allem der kontinuierlichen Übung. Wie Toussaint Raven schreibt: „ Das Kürzen der Klauen kann nicht gemessen werden, man muss ein Auge dafür haben“ (TOUSSAINT RAVEN, 2003f).

Für sicheres und qualitatives Arbeiten ist ein Klauenstand, in dem die Tiere sicher fixiert und so Patient und Personal vor Verletzungen geschützt werden können unabdingbar. Um zu vermeiden, dass beim Beschneiden der Klauen mehr Schaden als Nutzen verursacht wird, müssen alle verwendeten Werkzeuge scharf und funktionstüchtig sein. Damit verhindert wird, dass das Rind durch ausholende Bewegungen sich oder andere verletzt, ist es erforderlich, dass die zu bearbeitende Klaue sicher fixiert ist. Licht und Platz müssen ausreichend vorhanden sein und die Person, die die Klauenpflege durchführt, muss über fundierte anatomische Kenntnisse verfügen und mit Bedacht arbeiten (FIEDLER et al., 2003).

Spätestens zum Zeitpunkt der ersten Besamung, vorzugsweise ab einem Alter von 9-12 Monaten, sollte ein Jungrind die erste Klauenpflege erfahren, um eine dauerhafte Fehlstellung der Gliedmaße infolge andauernder, durch unphysiologische Längenverhältnisse an den Klauen verursachte, Entlastungshaltung zu vermeiden (FIEDLER, 2006; 2012). Die Intervalle zwischen den Klauenpflegen sind in hohem Maße abhängig von der Haltungsform, in der die Tiere leben. Durchschnittlich sollten aber alle Rinder etwa halbjährlich zur Klauenpflege vorgestellt werden. Im Laufstall sind tendenziell kürzere Intervalle erforderlich als in der Anbindehaltung (FIEDLER, 2012). Lahmheiten oder andere augenscheinliche Probleme an den Extremitäten können zusätzliche Termine erforderlich machen (FIEDLER et al., 2003; SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

In der Realität ist es jedoch oft so, dass viele Rinder erst dann zur Klauenpflege vorgestellt werden, wenn sie ein Problem mit den Klauen haben. Allerdings hat in dieser Hinsicht ein Umdenken bereits eingesetzt und viele Landwirte messen dem Thema regelmäßige und vorbeugende Klauenpflege mehr Bedeutung bei. Manche Halter nutzen auch das Trockenstellen für eine Klauenpflege (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). In einer 2014 in Bayern durchgeführten Studie (HANEMANN, 2014) wurden die meisten Klauenhornerkrankungen zwischen dem 61. und 120. Tag der Laktation festgestellt. Unter Berücksichtigung dieser Tatsache ist das Trockenstellen als Zeitpunkt für die Klauenpflege nicht optimal gewählt. Wird die Klauenpflege professionell und sachkundig durchgeführt, ist sie zu jedem Zeitpunkt der Produktion möglich und kann in einem festen Rhythmus zweimal jährlich erfolgen (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

3.3.2 Durchführung an den Beckengliedmaßen

Da es in der Regel die Klauen der Hintergliedmaße sind, von denen eher Probleme ausgehen, wurden die Regeln der Klauenpflege in erster Linie für die Beckengliedmaße formuliert. Für die Schultergliedmaße werden diese Grundsätze im Wesentlichen übernommen, wenn eine Korrektur notwendig ist (TOUSSAINT RAVEN, 2003g).

Bevor mit der eigentlichen Klauenpflege begonnen wird, muss eine adspektorische Untersuchung der Klauen im Stehen und in Bewegung erfolgen (FIEDLER et al., 2003). Um eine korrekte Funktion der Klauen wiederherzustellen, muss der Untersucher in der Lage sein, Klauendefekte in frühen und fortgeschrittenen Stadien zu erkennen und zu beheben (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Sollten sich bei der Adspektion Hinweise auf pathologische Zustände ergeben, muss das Vorgehen beim Korrigieren der Klauen entsprechend an diese Veränderungen angepasst werden. Häufig auftretende Fehlstellungen sind zum Beispiel Spreiz-, Zwang- oder Stallklauen oder auch Veränderungen, die auf das Vorliegen einer Klauenreihe hinweisen (FIEDLER et al., 2003).

Bei der Durchführung der funktionellen Klauenpflege wird nach einem 5-Punkte-Schema gearbeitet:

- Schritt 1: Innenklaue
- Schritt 2: Außenklaue
- Schritt 3: Hohlkehlung
- Schritt 4: Defekte
- Schritt 5: loses Horn

3.3.2.1 Schritt 1:

Dem ersten Schritt geht immer eine Beurteilung der Klauenform voran. Da die Innenklaue an der Beckengliedmaße der geringeren Belastung ausgesetzt ist, bleibt ihr oft die natürliche Form erhalten. Darum ist es möglich, sie als Maßstab für die optimale Länge der Außenklaue heranzuziehen. Der Dorsalwand-Winkel einer gesunden Klaue liegt zwischen 45° und 50°. Er wird in die Beurteilung ebenso mit einbezogen wie die Länge der Dorsalwand. Je nach Alter, Rasse und Gewicht der

Tiere gilt eine Länge von ca. 7,5 cm an der Dorsalwand, gemessen ab dem Übergang der behaarten Haut in das Saumhorn als optimal, wobei individuelle Unterschiede berücksichtigt werden müssen (FIEDLER et al., 2003; SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Mit zunehmender Größe der heutzutage gehaltenen Rinder werden diese Angaben zukünftig wohl nach oben korrigiert werden müssen. Fiedler nennt ein Körpergewicht von 650 kg als Grenzwert. Bei Tieren, die dieses Gewicht überschreiten, sollte die Vorderwandlänge 7,8 cm betragen (FIEDLER, 2012).

Mit einem Schnitt senkrecht zur Sohlenfläche wird zunächst die Innenklaue auf die entsprechende Länge gekürzt. Als „normale Länge“ der Klaue gibt Toussaint Raven den Bereich zwischen „zu lang“ und „zu kurz“ an. Wenn die Wand nicht zu lang ist, sollte sie auch nicht beschnitten werden (TOUSSAINT RAVEN, 2003g). Das Werkzeug der Wahl ist die Klauenzange. Die Fußungsfläche wird nun soweit bearbeitet, dass sie gleichmäßig und stabil ist (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Die Innenklaue sollte insgesamt so hoch wie möglich belassen werden (TOUSSAINT RAVEN, 2003g).

Auf der entstandenen glatten Schnittfläche kann man jetzt die Dicke des Sohlenhorns beurteilen. Ergänzend kann durch Kompression mit der Klauenuntersuchungszange die Sohlendicke geschätzt werden. Eine Mindestdicke von 5-7 mm im Bereich der Spitze und 8-12 mm am hinteren Ballen sollte niemals unterschritten werden, um schwerwiegende Konsequenzen für die Klaue zu vermeiden (FIEDLER et al., 2003; SHEARER und VAN AMSTEL, 2001; TOUSSAINT RAVEN, 2003f). Bei einer Klaue, an der keine Korrektur der Länge vonnöten war, sollte auch die Sohlenfläche weitgehend unbearbeitet bleiben. Es ist wahrscheinlich, dass die Dicke der Sohle in diesem Fall ebenfalls korrekt ist. Es besteht die Gefahr, durch das Beschneiden eine zu dünne, ein drückbare Sohle zu produzieren (FIEDLER, 2012).

Anders als bei Rindern in Weidehaltung, bei denen durch die fortwährende Abnutzung des weniger harten Sohlenhorns eine natürliche Kehlung der Sohle erhalten bleibt, sind die meisten Rinder in heutigen Haltungssystemen mit weitaus härteren Untergründen konfrontiert. Die Klauen können nicht in den Laufstallboden einsinken. Optimalerweise sollte als Anpassung daran der Großteil der Sohlenfläche Bodenkontakt behalten. In erster Linie wird der apikale Bereich der Sohle, das Sohlenhorn und harte Ballenhorn, bearbeitet. Die Trachtenhöhe und der weiche

Ballen bleiben weitestgehend unberührt. Ausgehend vom Ende der weißen Linie wird der Hornschnitt in apikaler Richtung ausgeführt. Auf diese Weise wird garantiert, dass der Ballen so hoch wie möglich bleibt, die Sohle im vorderen Bereich so weit wie nötig abgetragen wird. Dies bewirkt, dass die gesamte Gliedmaße aufgerichtet und das Gewicht gleichmäßig auf die ebene Fußungsfläche verteilt wird. Dabei soll sich bei Blickrichtung von hinten ein rechter Winkel zwischen dem Horn der axialen Wand und der Sohle ergeben (FIEDLER et al., 2003).

Es muss vermieden werden, dass die Sohle in Richtung Zwischenklauenspalt abfällt. Wäre dies der Fall, würden die Klauen bei Belastung auseinander gespreizt werden. Außerdem bestünde die Gefahr von Verletzungen aufgrund unterschiedlicher und teilweise zu geringer Sohlendicke. Um solche Verletzungen zu vermeiden, sollte zunächst immer die Dicke mit der Klauenzange geprüft werden. Die Sohle sollte auf Druck mit der Zange nur leicht nachgeben und nicht schmerzhaft sein. Nach dem Entfernen der obersten Hornschicht lässt sich die Dicke der Sohle zum Teil auch optisch beurteilen. Bei einer zu dünnen Sohle schimmert die Lederhaut rötlich durch sie hindurch (FIEDLER et al., 2003).

Wenn nötig, wird nun die äußere Form der Klaue korrigiert. Je stärker die tatsächliche Form der Klaue von der natürlichen Form abweicht, desto schwieriger ist es, diese zu erkennen und wiederherzustellen (TOUSSAINT RAVEN, 2003g).

3.3.2.2 Schritt 2

Im zweiten Schritt wird die Außenklaue in Form gebracht. Da sie stärker beansprucht wird als die Innenklaue, kann es hier zu massiveren Abweichungen von Dicke und Höhe kommen. Die bereits korrigierte Innenklaue dient als Modell zur Korrektur der Außenklaue. Zunächst wird die Dorsalwand beider Klauen auf gleiche Länge gebracht. Dies geschieht bei angehobener Gliedmaße ebenfalls durch einen senkrechten Schnitt an der Klauenspitze (FIEDLER et al., 2003). Es folgt die Bearbeitung der Sohle. Durch schichtweises Abtragen des Sohlenhorns wird eine ebene Fußungsfläche beider Klauen erreicht. Oftmals muss der hintere Ballen der lateralen Klaue stark redigiert werden, um den erzielten Zustand zu erreichen (FIEDLER et al., 2003). Beide Klauen sollten auf die gleiche Höhe gebracht werden (TOUSSAINT RAVEN, 2003g). Wenn sich zeigt, dass aufgrund der zu geringen Sohlendicke die Gefahr von Lederhautverletzungen besteht, wird auf weiteres

Entfernen von Horn verzichtet, auch wenn dies zu Lasten einer gleichmäßigen Sohlenebene beider Klauen geht (FIEDLER et al., 2003; TOUSSAINT RAVEN, 2003g). Das Ergebnis des zweiten Schrittes sollte sein, dass sich Dorsalwände beider Klauen auf demselben Niveau befinden und die Sohlenflächen glatt und ausbalanciert gleichmäßig das Körpergewicht tragen (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Manchmal kann es angebracht sein, die Außenklaue etwas niedriger zu schneiden als die Innenklaue. So wird mehr Gewicht auf die Innenklaue verlagert und die Außenklaue entlastet (TOUSSAINT RAVEN, 2003g).

3.3.2.3 Schritt 3

Bei Belastung der Gliedmaße durch das Auftreten senkt sich das Klauenbein ab. Wenn die Lederhaut diesem Druck nicht entkommen kann, da sie zwischen Klauenbein und hartem Untergrund gequetscht wird, kommt es früher oder später zu enormen Schädigungen der Lederhaut. Durch das Anbringen einer Hohlkehlung im axialen Bereich der Sohlenfläche soll dieser die Möglichkeit gegeben werden, sich der Druckbelastung zu entziehen (FIEDLER et al., 2003).

Das Horn wird ab dem vorderen Drittel der Klaue ballenwärts entfernt. Dabei muss mit großer Vorsicht vorgegangen und die Dicke des Horns regelmäßig durch Daumendruck überprüft werden. Die richtige Dicke ist erreicht, wenn das Horn im Bereich der Hohlkehlung auf Druck mit dem Daumen ganz leicht nachgibt. Die Kehlung fügt sich an die übrige Sohlenfläche, die noch etwa zwei Drittel der Gesamtfläche betragen sollte, nahtlos an. Zum Ballen hin läuft sie aus (FIEDLER et al., 2003). Um eine Schwächung der axialen Wand zu vermeiden und der Bildung von Tylomen in Folge übermäßigen Auseinanderspreizens der Klauen vorzubeugen, darf die Kehlung nicht bis in den Spitzenbereich der Klaue reichen (FIEDLER, 2012). Eventuell ist es angezeigt, besonders scharfe Kanten am Klauenrand mit geeignetem Werkzeug leicht zu brechen. Dabei muss sowohl eine starke Verringerung der Auftrittfläche als auch das Freilegen der Weißen Linie unbedingt vermieden werden. Ein kritischer Blick in den Zwischenklauenspalt sollte sich an den dritten Schritt der Klauenpflege anschließen (FIEDLER et al., 2003). Er sollte zur Vermeidung von interdigitalen Erkrankungen offen und frei von Schmutz sein (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

3.3.2.4 Schritt 4

Nach diesen ersten drei Schritten ist die physiologische Stellung und Belastung der Klauen hergestellt. Nun kann man sich dem Aufsuchen und gegebenenfalls Korrigieren etwaiger Defekte widmen (FIEDLER et al., 2003). Diese kurativen oder therapeutischen Maßnahmen werden unter dem Begriff der korrigierenden Klauenpflege zusammengefasst (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Bei der Klauenpflege eines offensichtlich lahmen Tieres ist es ratsam, das Bein, von welchem die Lahmheit ausgeht, zuerst zu bearbeiten. Nach der Behandlung wird es dem Tier leichter fallen, dieses Bein für die Bearbeitung der übrigen Gliedmaße zu belasten (TOUSSAINT RAVEN, 2003g). Die Behandlung der benachbarten Gliedmaße ist ebenfalls unabdingbar. Zum einen können die Gründe für die Lahmheit des anderen Beines auch Auswirkungen auf das (noch) gesunde Bein haben, zum anderen muss dieses Bein infolge der Entlastung der erkrankten Gliedmaße einen größeren Anteil des Körpergewichtes tragen, was die Klauengesundheit entsprechend beeinflusst.

Schäden am Hornschuh werden durch Beseitigung des umliegenden Horns freigelegt. Da sich in Hohlräumen Keime vermehren können, müssen unterhöhlte oder doppelte Sohlenanteile komplett entfernt werden. Liegen derartige Defekte im Bereich der Wand vor, muss sie ebenfalls soweit wie möglich abgetragen werden. Je nach Lokalisation wird auch das umliegende Horn großflächig entfernt, um die Belastung auf die geschädigte Stelle zu minimieren bzw. zu beseitigen. Unter Umständen kann es angezeigt sein, um den schadhafte Bereich einen keilförmigen Schnitt zu machen, sodass er nicht länger Bodenkontakt hat und in Ruhe ausheilen kann (FIEDLER et al., 2003).

Es gilt, dass nur gesundes Klauenhorn belassen wird. Allerdings muss eine Schädigung der Lederhaut unbedingt vermieden werden, und beim Auftreten von Blutungen wird nicht weiter beschnitten. Von der gewichtstragenden Fläche wird so viel wie möglich stehen gelassen, beschädigtes Horn aber komplett entfernt. Nur wenn die Ursache für eine Klauenläsion beseitigt wird und diese vollständig ausheilen kann, wird der Erfolg der Klauenpflege von Dauer sein (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001). Bei Tieren, die an einer Klaue ein offensichtliches Problem aufweisen, darf die gründliche Behandlung der vermeintlich gesunden Partnerklaue nicht vernachlässigt werden. Oftmals liegen hier ähnliche Defekte vor, die aber durch

den schlimmeren Zustand an der anderen Klaue überdeckt werden (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

Das Entfernen von losem oder geschädigtem Horn in Kombination mit der Entlastung der betroffenen Klauenabschnitte stellt das grundlegende Prinzip der funktionellen Klauenpflege dar und wirkt sich sowohl auf einen raschen Heilungsprozess als auch auf das Wohlbefinden der erkrankten Tiere positiv aus (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

3.3.2.5 Schritt 5

Zum Abschluss der Klauenpflege wird alles lose Horn, das Nährboden für Keime sein könnte, entfernt. Besonders gefährdet sind jeweils die Übergänge zwischen den einzelnen Hornabschnitten. Die abschließenden Schnitte sollten so ausgeführt werden, dass weiche Grenzen geschaffen und die Bildung von Keimreservoirs vermieden werden. Der Ballen sollte dabei möglichst wenig beschnitten werden, um einer zusätzlichen Schwächung vorzubeugen.

Bei allen Korrekturen an den Klauen muss die jeweilige Partnergliedmaße und die Gesamtbelastung berücksichtigt werden (FIEDLER et al., 2003).

3.3.3 Durchführung an den Schultergliedmaßen

Obwohl die Klauen der Vorderextremitäten den höheren Belastungen ausgesetzt sind, sind sie seltener von Erkrankungen und Defekten betroffen als die Klauen der Beckengliedmaße. Treten dennoch Probleme auf, findet man diese größtenteils an der Innenklaue. Auch bei den vorderen Klauen ist mindestens eine Klauenpflege pro Jahr ratsam (FIEDLER et al., 2003).

Wie an den Hinterbeinen kann auch bei der Pflege der Vorderbeine nach einem Punkte-Schema vorgegangen werden, das Fiedler wie folgt beschreibt:

3.3.3.1 Schritt 1:

Abweichend zum Vorgehen an den Beckengliedmaßen beginnt man die Klauenpflege vorne an der Außenklaue. Die Länge ihrer Dorsalwand wird zur Orientierung für die normalen Verhältnisse genutzt. Sie sollte, je nach Alter und Rasse, knappe 7,5 cm lang sein. Rasse, Alter und Größe des Tieres müssen

selbstverständlich auch hier bei den Messungen berücksichtigt werden. Ist ein Kürzen notwendig, geht man dabei vor, wie für die Beckengliedmaße beschrieben (FIEDLER et al., 2003). Dem ersten Schnitt zur Korrektur der Wandlänge dorsal schließt sich die Korrektur der Sohle an. Hierbei muss wieder sehr vorsichtig vorgegangen werden, und nur das Nötigste an Horn darf entfernt werden. Zu dünnes Sohlenhorn sollte tunlichst vermieden werden. Das Augenmerk liegt darauf, etwaige schadhafte Stellen zu entdecken (FIEDLER et al., 2003).

Sollte die Trachtenhöhe das angestrebte Verhältnis von 2:1 Vorderwandlänge zu Trachtenhöhe überschreiten, muss sie entsprechend reduziert werden. Ansonsten ist das Vorgehen ähnlich dem an der Beckengliedmaße. Das hintere Drittel der Sohle wird weitgehend unberührt gelassen, im vorderen Bereich wird im 90°-Winkel zur senkrechten Achse der Gliedmaße die erforderliche Menge an Sohlenhorn abgetragen (FIEDLER et al., 2003).

3.3.3.2 Schritt 2:

Im zweiten Schritt wird die Innenklaue den Verhältnissen an der Außenklaue angepasst (FIEDLER et al., 2003).

3.3.3.3 Schritt 3:

Analog zu hinten wird auch an den Klauen der Schultergliedmaßen eine Hohlkehlung angebracht, die es dem Ballenhorn erlaubt, dem durch das Absinken des Klauenbeins bei der Fußung aufgebauten Druck zu entgehen. Sie sollte sich von der axialen Wand zum Ballen hin erstrecken (FIEDLER et al., 2003).

3.3.3.4 Schritte 4 und 5:

An gesunden Klauen ist die Klauenpflege nach dem 3. Schritt beendet. Klauen, die Defekte oder Erkrankungen aufweisen, werden gegebenenfalls noch einem 4. bzw. 5. Schritt unterzogen. Dabei werden, wie in Kapitel 3.3.2.4 und 3.3.2.5 beschrieben, lockeres Horn entfernt und Schäden im Horn ausgeschnitten bzw. durch Entfernen von umliegenden Hornanteilen entlastet (FIEDLER et al., 2003).

Ernsthaft erkrankte Klauen benötigen eine über die funktionelle Klauenpflege hinaus gehende kurative Klauenpflege, die sich an den Gegebenheiten des jeweiligen

Krankheitsbildes orientiert und dementsprechend im Ablauf etwas variiert. Beispiele für derartige Erkrankungen können Rehe, Ballenhornfäule, Spreiz-, Zwang- oder Korkenzieherklauen oder auch Geschwüre sein. Auch Verletzungen durch Fremdkörper kommen vor (FIEDLER et al., 2003).

Im Zuge der kurativen Klauenpflege kommt es mitunter vor, dass mehr oder weniger große Areale der Lederhaut frei gelegt werden müssen oder versehentlich freigelegt werden. Das Anlegen von Verbänden in einem solchen Fall wird kontrovers diskutiert. Bei kleineren Defekten ist man sich einig, dass Bandagen nicht nötig sind. Liegen größere Anteile der Lederhaut frei, kann ein schützender Verband – ggf. kombiniert mit desinfizierenden oder antibiotischen Wirkstoffen – hilfreich sein. Dagegen spricht jedoch, dass in der Umgebung der Klauen eine recht hohe Kontaminationsgefahr gegeben ist. Der negative Einfluss eines mit Feuchtigkeit, Exkrementen und Keimen vollgesogenen Verbands auf den Heilungsprozess der Klaue ist nach Meinung einiger Autoren größer als dessen schützende Wirkung (SHEARER und VAN AMSTEL, 2001).

Ein Tier, das in zeitlichem Bezug zur Klauenpflege zu lahmen beginnt, oder dessen zuvor bereits bestehende Lahmheit danach nicht besser oder sogar schlimmer wird, muss unbedingt erneut untersucht und gegebenenfalls behandelt werden: „If there is no lameness problem trimming can produce it!“ (TOUSSAINT RAVEN, 2003g).

3.4 Biomechanik

3.4.1 Dehnung

Ein elastischer Gegenstand (s. 3.4.4) kann z.B. durch Zugkraft verformt werden. Die Ausgangslänge l wird dabei um Δl verlängert. Δl ist das Maß für die Größe der Verformung. Das Verhältnis der Längenänderung zur Ausgangslänge wird durch die dimensionslose Größe ε beschrieben. Sie wird als Dehnung bezeichnet. In einer Formel ausgedrückt gilt: $\varepsilon = \Delta l / l$ (GROSS et al., 2005b). Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Definition ist, dass ε über die gesamte Körperlänge konstant bleibt. Wenn der Querschnitt des betrachteten Körpers variiert, oder von außen Kräfte einwirken, muss die Dehnung des Körpers jeweils abschnittsweise betrachtet werden (GROSS et al., 2005b).

3.4.2 Spannung

Wird ein Gegenstand von außen belastet, entstehen in seinem Inneren verteilte Kräfte. Man bezeichnet sie als Spannungen. Mit der Dimension Kraft pro Fläche können Spannungen definiert werden (GROSS et al., 2005b). Kraft wird in Newton (N) gemessen, demnach gibt man Spannungen z.B. mit der Einheit Newton pro Quadratmillimeter (N/mm^2) an. Möglich ist auch, sie in Pascal (Pa) anzugeben ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, $1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$) (GROSS et al., 2005b).

Eine Kraft, die senkrecht zur Schnittfläche eines Körpers ausgeübt wird und sich gleichförmig verteilt, kann als Normalkraft N bezeichnet werden (GROSS et al., 2005b). In den meisten Fällen sind die inneren Spannungen jedoch über die Schnittfläche eines Körpers inhomogen verteilt (GROSS et al., 2005a).

Für gleichförmige Spannungen gilt: $N = \sigma A$. Aus der Normalkraft kann die Spannung σ berechnet werden: $\sigma = N/A$, wobei A die Querschnittsfläche bezeichnet.

Eine positive Normalkraft hat auch eine positive Spannung zur Folge: Zugspannung. Umgekehrt ist bei negativer Normalkraft die Spannung ebenfalls negativ. Es handelt sich dann um Druckspannung (GROSS et al., 2005b).

Zwischen der Spannung und der Schnittrichtung gibt es einen unmittelbaren Zusammenhang. Ebenso hat der Querschnitt des Körpers einen Einfluss auf die in ihm herrschenden Spannungen. Ist dieser nicht regelmäßig, sondern weist z.B. Kerben auf, erhöht sich die Spannung im Restquerschnitt des Körpers. Je größer die Querschnittsänderungen im Vergleich zu einem stabförmigen Körper sind, desto komplexer gestaltet sich die Ermittlung der ihm immanenten Spannungsverhältnisse (GROSS et al., 2005b).

Als Maß für die Beanspruchung eines Körpers werden Spannungen angegeben. Das Maß für die Verformung sind die Dehnungen. Die physikalische Beziehung dieser beiden Größen zueinander wird als sogenanntes Stoffgesetz bezeichnet und unterscheidet sich je nach Material eines Prüfgegenstandes (GROSS et al., 2005b).

Wird eine maximal zulässige Spannung überschritten, kommt es bei einem nicht-elastischen Körper zum Versagen des Körpers. In einem Zugversuch also zum Zerreißen des Prüfgegenstandes.

3.4.3 Zugversuch

Im Zugversuch übt eine Materialprüfmaschine auf einen Prüfgegenstand eine Kraft F aus und bewirkt dadurch in dessen Innerem die Normalspannung $\sigma = F/A$. Zusätzlich wird eine Änderung der Länge des Prüfkörpers bewirkt (Δl), aus der sich die Dehnung berechnen lässt. Ein Spannungs-Dehnungsdiagramm gibt das Verhältnis von σ und ε zueinander wieder:

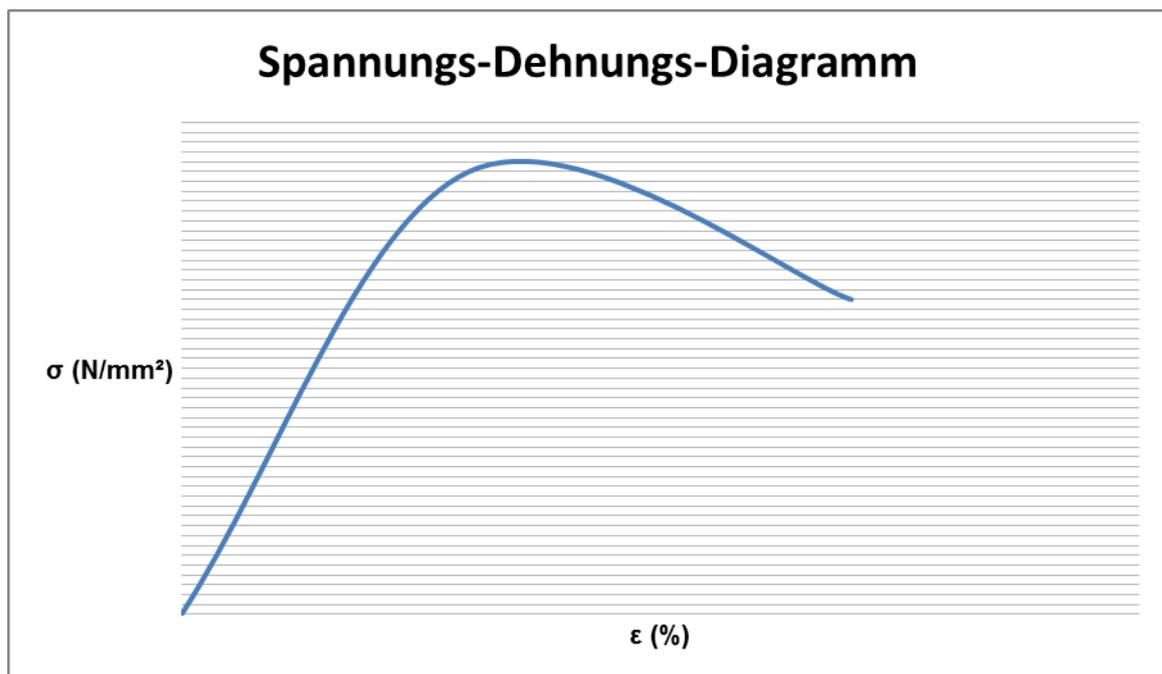
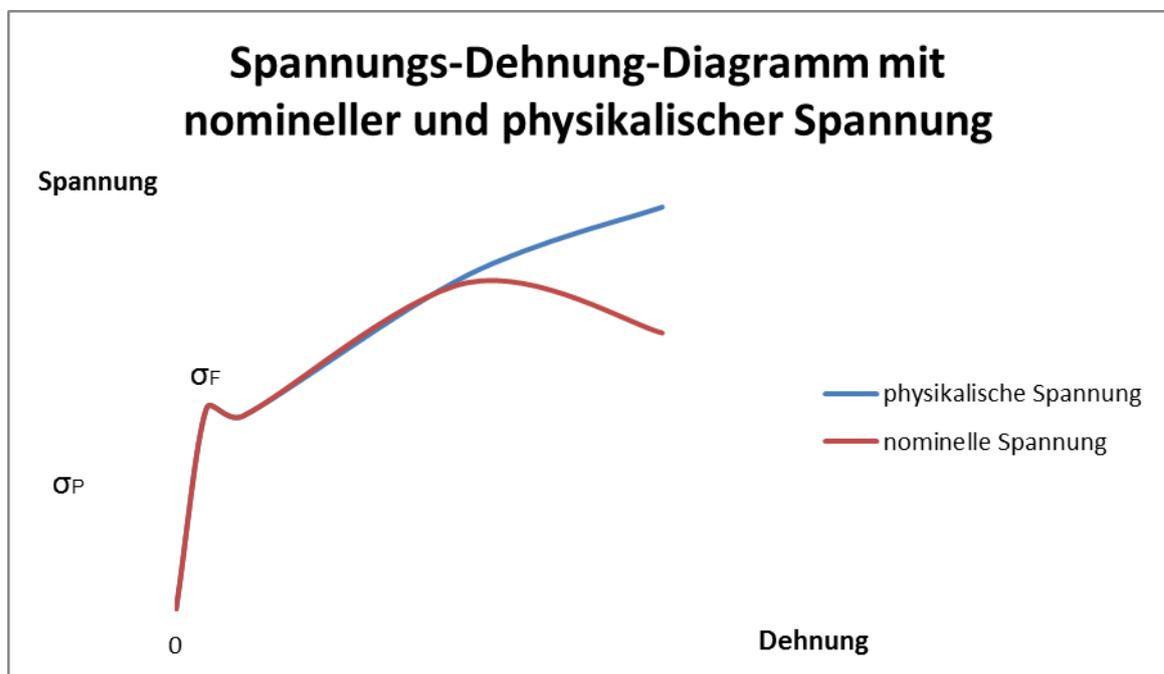


Abbildung 4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

In der Regel gilt, dass bei wachsender Zugkraft bis zur sogenannten Proportionalitätsgrenze (σ_p) Spannung und Dehnung proportional zueinander anwachsen. Es gibt einen linearen Zusammenhang. Wird die Spannung über diesen Punkt hinaus erhöht, beginnt die Dehnung überproportional anzusteigen. Wird dann ein als Streckgrenze (σ_F) bezeichneter Punkt erreicht, der wiederum abhängig vom Werkstoff ist, beginnt der Prüfkörper zu „fließen“. Dies bedeutet, dass die Dehnung weiterhin zunimmt, die Spannung aber annähernd gleich bleibt (GROSS et al., 2005b). Der Streckgrenze schließt sich der sogenannte Verfestigungsbereich an, in welchem die Kurve wieder zu steigen beginnt, da der Prüfgegenstand in der Lage ist, weitere Belastung aufzunehmen. Bei der Verlängerung eines stabförmigen Prüfkörpers nimmt dessen Querschnittsfläche A ab. Dies geschieht bei starken

Spannungen nicht gleichförmig über die volle Länge. Vielmehr wird der Stab eingeschnürt. Da nun die Formel $\sigma = F/A$ (nominelle Spannung) aber von einer gleichbleibenden Querschnittsfläche ausgeht, kann sie die Verhältnisse nicht mehr korrekt beschreiben. In diesem Fall muss die „wirkliche Spannung“ σ_w benutzt werden. Sie bezieht sich auf die wirkliche Querschnittsfläche A_w . Die Formel für die Berechnung der wirklichen, auch physikalische Spannung genannten Spannung lautet folglich: $\sigma_w = F/A_w$

Abbildung 5 stellt die beschriebenen Verhältnisse grafisch dar.



σ_F : Streckgrenze;

σ_P : Proportionalitätsgrenze

Abbildung 5 Schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit nomineller und physikalischer Spannung

3.4.4 Elastizität

Als Elastizität wird die Eigenschaft beschrieben, die ein Objekt nach einer Verformung in seinen Ausgangszustand zurückkehren lässt (ALEXANDER, 1988a). Auch wenn man angesichts dieser Definition eher an Materialien wie Gummi denkt, gilt sie doch für alle Materialien. Folglich auch für Horn.

Um in seinen Ursprungszustand zurückkehren zu können, darf das Objekt nur bis zu einer bestimmten Spannung, der sogenannten Streckgrenze (s. 3.4.3) belastet werden, und muss anschließend wieder komplett *entlastet* werden. Die Dehnung geht in diesem Fall bis auf null zurück. Übersteigt die Belastung allerdings die Streckgrenze, bleibt eine gewisse Dehnung erhalten, auch wenn die Spannung entfällt. Man nennt sie plastische Dehnung (ϵ_{pl}). Dieses Verhalten eines Körpers wird als plastisches Verhalten bezeichnet (GROSS et al., 2005b)

Für elastische Materialien gilt: $\sigma = E\epsilon$. Spannung und Dehnung hängen linear miteinander zusammen. Dies ist allerdings nur solange gültig, wie die Spannung die Proportionalitätsgrenze (σ_p , s. 3.4.3) nicht überschreitet. E ist der als Elastizitätsmodul bezeichnete Proportionalitätsfaktor. Er ist eine Materialkonstante und für Zug und Druck identisch. Der Elastizitätsmodul ist allerdings bei biologischen Materialien nicht immer 100% anwendbar, weil – je nach Wassergehalt – dieses im Gewebe verschoben wird und sich nach Entlastung wieder „zurückverlagert“. Da dieser Vorgang aber länger dauert als die unmittelbare Entlastung, spricht man hier von der „Viskoelastizität“. Es ist anzunehmen, dass dies auch in geringem Maß bei Horn gilt, vor allem spielt diese Tatsache aber eine Rolle bei wasserreichen Geweben wie z. B. Knorpel oder Sehnen.

Die Dimension, in der der Elastizitätsmodul angegeben wird, ist analog zur Spannung N/mm^2 . Multipliziert man den Elastizitätsmodul E mit der Querschnittsfläche A , erhält man die sogenannte Dehnsteifigkeit (GROSS et al., 2005b).

Das Elastizitätsgesetz wird nach seinem Autor R. Hooke (1635-1703) auch als Hooksches Gesetz bezeichnet (GROSS et al., 2005b).

Die Tatsache, dass zum Beispiel Sehnen die Eigenschaft besitzen, sich elastisch zu verformen, reduziert die Kraft, die die Muskeln von Mensch und Tier aufbringen müssen, um den Körper in Bewegung zu versetzen (ALEXANDER, 1988b).

3.5 Grundlagen der Fütterung in der Bullenmast

Der Bullenmast kommt in Deutschland eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung zu. Allein in Bayern werden jährlich etwa 390.000 Bullen gemästet und geschlachtet (INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG UND FUTTERWIRTSCHAFT DER LFL, 2014).

Das durchschnittliche Mastendgewicht bei Fleckvieh-Bullen liegt ca. bei 750 kg. Es wird angestrebt, dieses Gewicht in maximal 500 Masttagen (ab Kalb) zu erreichen (INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG UND FUTTERWIRTSCHAFT DER LFL, 2014). Nach einer ca. 15-wöchigen Aufzuchtphase, in der Milch bzw. Milchaustauscher das Hauptnahrungsmittel darstellt, beginnt für die Jungbullen die Hauptmast. Das Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) gibt in der sogenannten „Gruber Tabelle zur Fütterung in der Rindermast“ Empfehlungen darüber, wie die Energie- und Nährstoffversorgung der Tiere während der Mast im Idealfall aussehen könnte. Ausschnittsweise sind diese Empfehlungen in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4 Richtwerte zur Futtermittelaufnahme (kg TM/Tag), Empfehlungen zur Energieversorgung (MJ ME/Tag) und zur Rohproteinversorgung (g/Tag) bei Fressern (Fleckvieh) mit mittleren Zunahmen von 1150 g (INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG UND FUTTERWIRTSCHAFT DER LFL, 2014)

LM (kg)	Momentane Zunahmen	TM-Aufnahme	MJ ME	g Rohprotein
80	800	0,9-1,2	17	239
140	1220	3,1-3,4	42	508
200	1450	4,8-5,1	62	728

In gleicher Weise gibt das Institut auch Empfehlungen für die Futterzusammensetzung bei der Mastbullenfütterung. Diese sind vereinfacht in Tabelle 5 dargestellt. Die Empfehlungen bezüglich Rohprotein berücksichtigen dabei auch die Versorgung der Pansenmikroben mit Stickstoff, wenn die Proteinsynthese maximal ausgelastet ist.

In verschiedenen Fütterungsversuchen der LfL wurde nachgewiesen, dass die derzeit gültigen Empfehlungen zur Proteinversorgung deutlich unterschritten werden können, ohne Einbußen bei der Tiergesundheit oder den erreichten Leistungen zu haben. Eine Überversorgung mit Rohprotein hatte dabei sogar eindeutig negative Auswirkungen. Das Ergebnis der Versuche ist eine Empfehlung von ca. 12-14% Rohproteinanteil in der Trockenmasse für eine optimale Bullenmast (ETTLE, 2014).

Durch Supplementierung von Futterharnstoff konnte zwar mutmaßlich die mikrobielle Fermentation verbessert werden, was sich durch eine gesteigerte Faserverdaulichkeit zeigte, auf die Versorgung mit nutzbarem Rohprotein konnte jedoch kein positiver Effekt nachgewiesen werden (ETTLE, 2014).

Tabelle 5 Empfehlungen zur Energie- (MJ ME / Tag) und Rohproteinversorgung (g/Tag) von Mastbullen bei mittleren Tageszunahmen von 1350 g (Fleckvieh) (INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG UND FUTTERWIRTSCHAFT DER LFL, 2014)

LM (kg)	Momentane Zunahmen	MJ ME	g Rohprotein
200	1278	55,6	670
300	1399	75,1	862
400	1458	92,9	1033
500	1455	108,3	1178
600	1390	120,4	1292
700	1263	128,7	1372
750	1176	131,1	1398

3.6 Fütterung und Klauengesundheit

Wie auf den restlichen Organismus hat die Fütterung auch Auswirkungen auf die Gesundheit der Klauen. Eine wiederkäuergerechte Futtermittelration ist dabei ebenso entscheidend wie die ausreichende Versorgung mit Spurenelementen, Vitaminen und Mineralstoffen. Den Kohlenhydraten kommt dabei eine eher indirekte Bedeutung zu, da eine Über-oder Unterversorgung zu Pansenazidosen oder Ketosen führen können, welche sich sekundär auf die Klauen auswirken (MÜLLING, 2014). Allerdings wird der Einfluss der Pansenazidose und ihrer Genese auf die Entstehung subklinischer Klauenrehe heute als wesentlich geringer angesehen als Faktoren wie Haltungsbedingungen und Klauenpflege (MÜLLING und HAGEN, 2012). Direkten Einfluss hingegen haben z.B. Biotin, Zink, Mangan, Kupfer und Selen sowie die Vitamine A und E, die für die Synthese der Keratine bzw. des Interzellularkitts essentiell sind (MÜLLING, 2014).

Durch Biotin-Supplementierung beispielsweise konnten Qualität und

Widerstandsfähigkeit des Klauenhorns in verschiedenen Studien nachweislich verbessert werden (MÜLLING, 2014). Mülling et al. konnten 1993 an einem Kalb, das unter einem experimentell herbeigeführten massiven Biotin-Mangel litt, die gravierenden Auswirkungen eines solchen Biotin-Defizits auf das Klauenhorn nachweisen. Das gesamte Horn war hell und von brüchiger Konsistenz. Es konnten zahlreiche Veränderungen an den Keratinfilamenten beobachtet werden, die Verhornung war unvollständig und lückenhaft. Durch die minderwertige Qualität des Interzellularkitts infolge des Biotin-Mangels kam es zu fortschreitendem Verlust der Zell-zu-Zell-Verbindungen bis hin zu einem regelrechten Zerfall des Stratum corneum (MÜLLING et al., 1999).

Über Calcium ist bekannt, dass es bei der Aktivierung der epidermalen Transglutaminase von entscheidender Bedeutung ist. Dieses Enzym ist maßgeblich an der Zell-Verhornung beteiligt. Ein Mangel an Kalzium, etwa zum Zeitpunkt der Geburt, hat direkte Auswirkungen auf die Qualität des Horns (MÜLLING, 2014; MÜLLING et al., 1999).

Dem Synthese-Co-Faktor Zink konnte ebenfalls eine positive Wirkung auf die Robustheit der Klauen nachgewiesen werden. Diese ist wahrscheinlich darauf zurück zu führen, dass die Keratinsynthese stimuliert wird (MÜLLING, 2014). Ein hoher Proteinanteil im Futter kann die Aufnahme von Zink verbessern (FIEDLER, 2003).

Die für die Stabilität des Hornzellverbundes essentiellen Disulfidbrücken erhalten ihre Sulfhydrylgruppen durch schwefelhaltige Aminosäuren wie Methionin. Eine Unterversorgung mit diesen Aminosäuren kann sich also ebenfalls direkt auf die Gesundheit der Rinderklaue auswirken. Ob das Supplementieren von Methionin einen positiven Effekt hat, ist bisher noch nicht ausreichend erforscht (MÜLLING, 2014).

3.7 Verdauung und Resorption von Proteinen

3.7.1 Proteine und Nicht-Protein-N-haltige Verbindungen

Neben Proteinen nehmen Rinder auch andere stickstoffhaltige Verbindungen, sogenannte NPN-Verbindungen, über die Nahrung auf. Dies sind unter anderem freie Aminosäuren, Nitrat und Harnstoff. Durch das Abschilfern von Epithelzellen und

die Sekretion von Mucoproteinen und Harnstoff über den Speichel gelangen auch N₂-Verbindungen endogenen Ursprungs in die Vormägen des Rindes (BREVES, 2005). Die Bakterien, die die natürliche Flora des Pansens bilden, stellen den größten Teil der für den Proteinabbau essentiellen Proteasen zur Verfügung. Nur ein sehr geringer Teil von ihnen stammt von verschiedenen Protozoen. Die Proteine werden im Pansen zu Oligo- und Dipeptiden sowie zu Aminosäuren abgebaut. In welchem Umfang dies geschieht, hängt von Faktoren wie der Löslichkeit der Proteine, ihrer Struktur und der An- oder Abwesenheit von Disulfidbrücken ab und variiert zwischen 30% und 70% (BREVES, 2005). Kleinere Peptide und einzelne Aminosäuren werden entweder intrazellulär zu Ammoniak und Carbonsäure umgewandelt, oder sie dienen der Neugewinnung von mikrobiellen Proteinen. Aus den NPN-Verbindungen entstehen hauptsächlich Ammonium (NH₄⁺) und CO₂ (BREVES, 2005). Das in beträchtlicher Menge entstehende Ammoniak/Ammonium wird in die Pansenflüssigkeit sezerniert, von wo aus es resorbiert wird und auf dem Blutwege zur Leber gelangt. Hier findet die Umwandlung von Ammoniak zu Harnstoff statt. Dieser wird wiederum über den Umweg des Lungenkreislaufes zu den Speicheldrüsen und in die Wand der Vormägen transportiert und gelangt so zurück ins Vormagensystem (ruminohepatischer Kreislauf). Dort können die ortsansässigen Mikroorganismen den gebundenen Stickstoff zur Proteinsynthese nutzen. Mikroorganismen und Proteine werden gleichermaßen bei der weiteren Passage des Magen-Darm-Kanals verdaut und schließlich durch das Epithel des Dünndarms resorbiert (BREVES, 2005).

Das Hauptendprodukt des Proteinabbaus ist Ammoniak, welches bei der mikrobiellen Proteinsynthese Wiederverwendung findet. Aufgrund der niedrigen pH-Werte in den Vormägen liegt das Ammoniak fast ausschließlich als Ammonium-Ion (NH₄⁺) und nicht als NH₃ vor. Als solches ist es sehr lipoid löslich. Dies erleichtert den Durchtritt durch das Epithel und somit die Resorption (BREVES, 2005).

Der ruminohepatische Kreislauf ermöglicht es den Wiederkäuern, den Harnstoff, welcher bei Monogastriern mit dem Urin größtenteils verloren geht, zur neuerlichen Synthese von Protein zu nutzen. Dieser Umstand kommt besonders dann zum Tragen, wenn der Proteinbedarf allein über die Futteraufnahme nicht gedeckt werden kann. In diesem Fall können bis zu 90% des Harnstoffes, der im Körper synthetisiert wird, recycelt werden. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine ausreichende

Energieversorgung, da nur dann ein mikrobieller Stoffwechsel in entsprechendem Umfang möglich ist (BREVES, 2005). Bei Milchkühen ist der Leistungsabfall bei einer Unterversorgung mit Protein auch bei bedarfsgerechter Energiezufuhr enorm. Zu einem großen Teil werden auch körpereigene Proteine abgebaut, um die Milchleistung aufrecht zu erhalten. Im umgekehrten Fall, wenn ein deutlicher Mangel an Energie herrscht, Protein aber ausreichend zur Verfügung steht, geht die Milchleistung weniger drastisch zurück. Auch dieser Umstand geht jedoch stark zu Lasten der Körpersubstanz.

Ist der Gehalt an NH_4^+ in der Pansenflüssigkeit hingegen hoch, da ausreichend Proteine über das Futter aufgenommen wurden, wird die Rezirkulation von Harnstoff gehemmt, und der Harnstoff wird annähernd vollständig über die Nieren ausgeschieden (BREVES, 2005).

Wie Steinwigger et al. zeigten, hat das Proteinversorgungsniveau einer Futterration einen signifikanten Einfluss auf Parameter wie die Futteraufnahme, die Milchleistung und den Gehalt an Harnstoff in Milch, Blut und Harn (STEINWIGGER et al., 2009). Bei Rohproteingehalten von 14%, 16% und 18% nahmen die Aufnahme von Grund- und Kraftfutter sowie die Milch- und Eiweißleistung mit steigendem Proteingehalt jeweils deutlich zu. Die Stickstoffausscheidung stieg im selben Maße an, wohingegen sich die Verwertung des Stickstoffes zunehmend verschlechterte (STEINWIGGER et al., 2009). Die LfL zeigte in verschiedenen Fütterungsversuchen mit Fleckvieh-Rindern, dass sich neben der Mangelversorgung auch eine Überversorgung mit Rohprotein negativ auf die Futteraufnahme sowie auf die Mast- und Schlachtleistung auswirken kann (ETTLE, 2014).

3.7.2 Proteinverdauung

Die Verdauung von Proteinen beginnt im Magen, läuft aber schwerpunktmäßig im Dünndarm ab. Als resorptionsfähige Endprodukte entstehen vor allem Di- und Tripeptide und in geringerem Umfang Aminosäuren. Maßgeblich an der Proteinverdauung beteiligt sind verschiedene Endo- und Exopeptidasen, die in den Drüsen des Magen und im Pankreas gebildet werden (BREVES, 2005).

Neben den Proteinen, die dem Körper über die Nahrung zugeführt werden, gelangt über gastrointestinale Sekrete und Epithelzellen auch etwa die gleiche Menge an sogenannten endogenen Proteinen in den Verdauungstrakt (BREVES, 2005).

Proteine unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Verdaulichkeit aufgrund ihrer Zusammensetzung. Steinwigger et al. konnten bei unterschiedlicher Proteinverdaulichkeit der Futtermittel keine signifikanten Unterschiede in Futteraufnahme, Harnstoffgehalt in Blut und Milch, Milchleistung und Milcheiweißleistung feststellen (STEINWIGGER et al., 2009). Auch Faktoren wie die Passagerate und die im Pansen herrschenden Verhältnisse sowie die Konstitution der Mikroorganismen spielen bei der Verdaulichkeit von Proteinen eine Rolle (FLACHOWSKY et al., 2009).

Versuche der LfL konnten den Anteil an Rohprotein in einer Futtermittelration als den entscheidenden Faktor für die tägliche Gewichtszunahme in der Bullenmast ermitteln (ETTLE, 2014).

3.7.3 Ruminale Stickstoffbilanz

Um die Proteinversorgung bei Rindern bewerten zu können, muss neben dem Stickstoffgehalt der Ration auch der Energiegehalt in die Rechnung miteinbezogen werden. Die maximale mikrobielle Proteinsynthese ist eine Voraussetzung für die bedarfsdeckende Proteinversorgung. Um diese zu gewährleisten, muss nicht nur genügend Energie und nutzbares Rohprotein (nXP) in ausreichender Menge vorhanden sein, den Mikroorganismen des Pansens muss auch genügend Stickstoff zur Verfügung stehen. Um die Versorgung der Pansenmikroorganismen mit Stickstoff bewerten zu können, wird die ruminale Stickstoffbilanz herangezogen. Sie berechnet sich aus der Differenz zwischen dem aufgenommenen Rohprotein (XP) und dem nutzbaren Rohprotein (nXP) geteilt durch 6,25 ($RNB = (XP - nXP) / 6,25$). Nutzbares Rohprotein schließt neben dem Protein, das den Pansen unverändert passiert (Durchflussprotein, unabgebautes Futterprotein, UDP), auch das Protein ein, das von den Pansenmikroorganismen theoretisch gebildet werden könnte, wenn genügend Energie zur Synthese verfügbar ist. Für eine effiziente Nutzung von Futterproteinen sollte eine zu stark positive ruminale Stickstoffbilanz vermieden werden (GFE, 2001). Die Menge an aus dem Futter freigesetzten N_2 übersteigt dabei die Menge an N_2 , die bei der mikrobiellen Proteinsynthese verwertet werden kann. Es herrscht also im Pansen ein N_2 -Überschuss, der nicht nur den Organismus des Tieres belastet, sondern aufgrund der vermehrten renalen Stickstoff-Ausscheidung auch negative Auswirkungen auf die Umwelt haben kann. Bei einer negativen RNB steht den

Pansenmikroben aufgrund der zu geringen Menge an N_2 aus dem Futter nicht genügend Stickstoff für die Proteinsynthese zur Verfügung, weshalb vermehrt auf zirkulierende N_2 -Verbindungen zurückgegriffen werden muss. Bei einer negativen ruminalen Stickstoffbilanz kann keine Proteinbewertung durchgeführt werden, da der Parameter nXP in diesem Fall nur theoretisch ist.

Die Gesellschaft für Ernährungsphysiologie empfiehlt eine ausgeglichene RNB mit Werten von null, bzw. etwas größer null. Aber auch eine negative RNB bis zu -0,3 g RNB/MJ ME werden als unkritisch betrachtet (GFE, 2001).

Riemeier konnte nachweisen, dass Tiere mit einer deutlich negativen ruminalen Stickstoffbilanz signifikant weniger mikrobielle Proteinsynthese zeigen als Tiere mit einer ausgeglichenen oder positiven RNB. Die höchsten Werte wurden hierbei in der Tat bei einer ausgeglichenen RNB (0 g / MJ ME) erreicht. Sowohl eine Über- als auch eine Unterversorgung mit pansenverfügbarem Stickstoff führten dazu, dass weniger mikrobiell gebildetes Protein und auch weniger nutzbares Rohprotein gemessen wurde (RIEMEIER, 2004).

3.7.4 Resorption von Aminosäuren

Alle Aminosäuren können über Na^+ -Cotransport-Systeme in die Epithelzellen des Dünndarms gelangen, wo sie akkumulieren. Es existieren 5 verschiedene solche Systeme. Die basischen Aminosäuren Lysin, Arginin und Cystin werden zusätzlich über einen Na^+ -unabhängigen Carrier transportiert. In beiden Fällen handelt es sich um einen sekundär aktiven Transport. Eine Na^+/K^+ -Pumpe hält dabei den Na^+ -Gradienten aufrecht (BREVES, 2005). Durch Carrier-vermittelte erleichterte Diffusion verlassen die Aminosäuren die Enterocyten wieder und gelangen auf der anderen Seite in das Interstitium (BREVES, 2005). In heutigen Empfehlungen zur Nährstoffversorgung von Rindern, beispielsweise von der GfE, (GFE, 2001), wird nicht näher auf den Bedarf an Aminosäuren im Speziellen eingegangen. Der Bedarf wird einzig in nutzbarem Rohprotein angegeben. Für eine – sicherlich sinnvolle – Bewertung des bovinen Proteinbedarfs auf Ebene der Aminosäuren fehlen derzeit noch die entscheidenden Kenntnisse (FLACHOWSKY et al., 2009).

3.7.5 Resorption von Di- und Tripeptiden

Ein elektrochemischer H^+ -Gradient, welcher über die Bürstensaummembran des Dünndarmepithels hinweg besteht, liefert die Energie für die Aufnahme von Di- und Tripeptiden entgegen eines Konzentrationsgefälles. Ein Na^+/H^+ -Austauscher schleust H^+ entgegen dem elektrochemischen Gradienten aus der Zelle aus und Na^+ entlang des Gradienten in die Zelle hinein. Somit ist der Transport von Peptiden, der durch einen H^+ -Peptid-Cotransporter vermittelt wird, indirekt abhängig vom Vorhandensein von Na^+ (BREVES, 2005).

3.7.6 Verdauung und Resorption von Nucleoproteinen und Nucleinsäuren

Über das Futter werden auch Nucleoproteine und freie Nucleinsäuren aufgenommen. Diese werden im Verdauungskanal zunächst durch Peptidasen zu Oligonucleotiden bzw. zu Oligopeptiden abgebaut. Anschließend, wenn sie das Epithel des Dünndarms überwunden haben, erfolgt durch Endo- und Exonucleasen und andere Enzyme der weitere Abbau zu Mononucleotiden und schließlich zu Nucleosiden, Purin- und Pyrimidinbasen, Pentosen und Ribose-1-Phosphat. Besonders bei den Wiederkäuern spielt diese Form der Proteinverdauung eine große Rolle, da die Pansenbakterien Nucleinsäuren in beträchtlicher Menge liefern, welche dann im Dünndarm resorbiert werden. Der Transport in das Dünndarmepithel erfolgt bei Purin- und Pyrimidinbasen sowie bei den Nucleosiden durch Na^+ -Cotransportsysteme (BREVES, 2005).

4 Material und Methoden

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode erarbeitet, wie sich aus Rinderklauenhorn Prüfkörperchen herstellen lassen, an denen mithilfe einer Materialprüfmaschine standardisierte Zugversuche durchgeführt werden können. Darüber hinaus wurde untersucht, ob sich eine unterschiedliche nutritive Proteinaufnahme auf die Reißfestigkeit des Klauenhorns auswirkt. Als Probenmaterial dienten Hornproben aus den medialen und lateralen Klauen von Vorder- und Hintergliedmaße von Fleckvieh-Mastbullen. Im Idealfall lagen von jedem Tier eine Vorder- und eine Hintergliedmaße vor, wobei die Seite zufallsverteilt war (s. Tabelle 6).

Tabelle 6 Seitenverteilung der Gliedmaßen

ProbeNr.	Proteinanteil der Ration	Vorderbein	Hinterbein
11	9%	links	links
13	9%	rechts	rechts
15	9%	rechts	links
16	9%	rechts	links
17	9%	links	links
18	9%	links	rechts
19	9%	links	links
110	9%	links	rechts
21	11%	rechts	rechts
24	11%	links	links
27	11%	rechts	rechts
28	11%	links	links
29	11%	links	rechts
212	11%	rechts	rechts
31	13%	links	links
34	13%	rechts	links
35	13%	rechts	links
37	13%	links	links
38	13%	rechts	rechts
310	13%	rechts	links
311	13%	links	rechts
41	15%	rechts	rechts
42	15%	links	rechts
43	15%	links	rechts
44	15%	links	links

49	15%	links	rechts
410	15%	links	links
411	15%	rechts	rechts
412	15%	rechts	rechts
51	17%	rechts	?
52	17%	links	links
53	17%	rechts	links
54	17%	rechts	links
55	17%	rechts	links
58	17%	rechts	links
59	17%	links	rechts
510	17%	links	links
511	17%	rechts	links
512	17%	links	links

Von jedem Tier wurden insgesamt 4 Hornproben entnommen, aus denen dann schlussendlich 8 Prüfkörper entstanden. Insgesamt standen die Proben von 39 Tieren zur Verfügung, was einer Probenzahl von 312 Stück entspricht. Da einzelne Prüfkörperchen während des Herstellungsprozesses beschädigt wurden und nicht beprobt werden konnten, wurden letztlich Daten an 304 Proben erhoben (s. Tabelle 7). Wie sich die einzelnen Proben auf die verschiedenen Lokalisationen verteilen, zeigt Tabelle 8.

Tabelle 7 Anzahl der Tiere und Proben innerhalb der einzelnen Fütterungsgruppen

Fütterungsgruppe	Anzahl der Tiere	Anzahl der Proben insgesamt
9% Rohprotein	8	63
11% Rohprotein	6	46
13% Rohprotein	7	54
15% Rohprotein	8	61
17% Rohprotein	10	80
gesamt	39	304

Tabelle 8 Anzahl der Proben an den verschiedenen Lokalisationen

RP	Anzahl der Tiere	Anzahl der Proben vorne lateral			Anzahl der Proben vorne medial			Anzahl der Proben hinten lateral			Anzahl der Proben hinten medial		
		prox.	dist.	ges.	prox.	dist.	ges.	prox.	dist.	ges.	prox.	dist.	ges.
9% RP	8	8	8	16	8	8	16	8	7	15	8	8	16
11% RP	6	6	6	12	5	6	11	5	6	11	6	6	12
13% RP	7	7	7	14	7	7	14	7	7	14	6	6	12
15% RP	8	8	8	16	8	8	16	8	8	16	8	6	14
17% RP	10	10	10	20	10	10	20	10	10	20	10	10	20
gesamt	39	39	39	78	38	39	77	38	38	76	38	36	74

Das ursprünglich angelieferte Probenmaterial bestand aus Vorder- und Hinterfüßen der beschriebenen Tiere, die während des Schlachtvorganges jeweils im Karpal- bzw. Tarsalgelenk abgesetzt worden waren. Ziel war es, in Anlehnung an die „Bestimmungen für die Verleihung und Führung des DLG-Qualitätssiegels für Mittel zur Klauenpflege und Klauenhygiene“ (DLG, 2011) daraus Horn-Prüfkörperchen anzufertigen, die alle eine reproduzierbare Form und Größe haben und aus der immer identischen Stelle an der Rinderklaue stammen sollten. Als Entnahmestelle wurde der dorso-abaxiale Bereich der Klaue, ca. 25-30 mm distal des Kronsaums, gewählt (s. Abbildung 6).

In einer 2002 von Maierl et al. durchgeführten Studie hatte dieser Bereich sich als derjenige mit der signifikant höchsten Zugfestigkeit erwiesen (MAIERL et al., 2002). Die Anordnung der Proben war jeweils parallel zum Kronsaum. Der Verlauf des Röhrenhorns stand somit im 90°-Winkel zur Längsausrichtung der Prüfkörperchen.

Die Hornprüfkörper hatten folgende Abmessungen: Eine Länge von 10 mm, eine Breite von 5 mm und eine Dicke von ca. 2 mm. In der Mitte befand sich eine präformierte Rissstelle von 2 mm Breite.

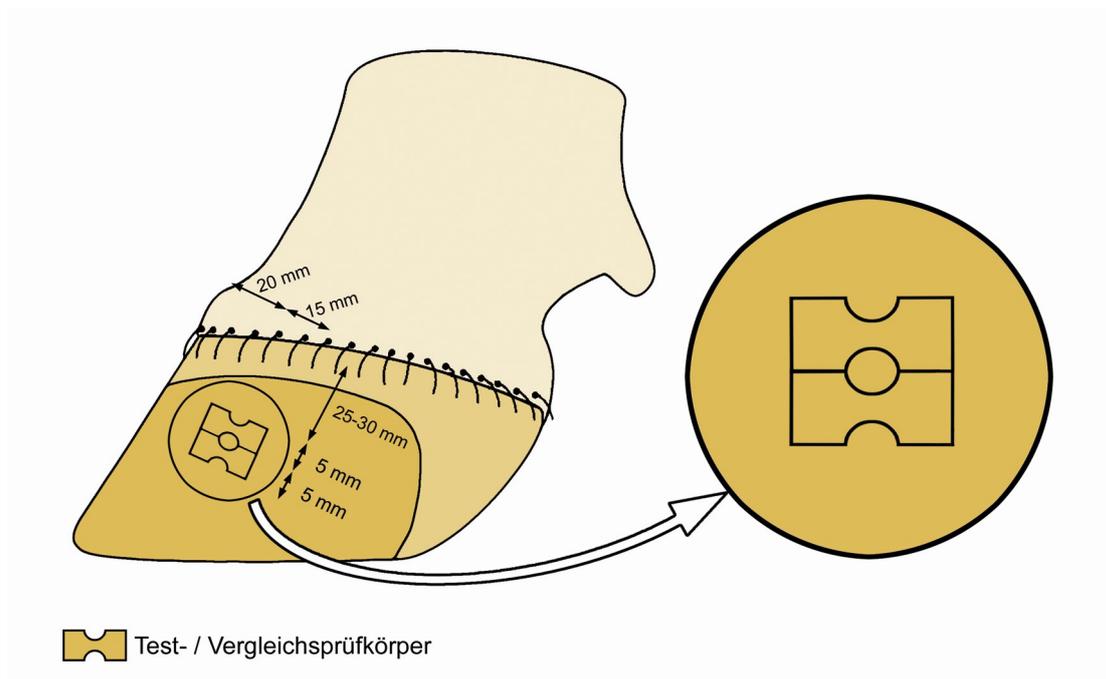


Abbildung 6 Entnahmestelle der Prüfkörperchen (nach „Bestimmungen für die Verleihung und Führung des DLG-Qualitätssigels für Mittel zur Klauenpflege und Klauenhygiene“ (DLG, 2011))

4.1.1 Untersuchungsgut

Die untersuchten Hornproben stammen von insgesamt 39 Mastbullen der Rasse Deutsches Fleckvieh, die zwischen September 2010 und Januar 2012 im Lehr- und Versuchszentrum der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) in Grub gemästet und mit einem durchschnittlichen Alter von 500 Tagen geschlachtet wurden (s. Abbildung 7). Dabei wurden die Tiere unter Berücksichtigung von Lebendmasse und Alter gleichmäßig auf fünf Versuchsgruppen aufgeteilt und nach Versuchsgruppe getrennt in einem Tretmiststall untergebracht. Die Liegebereiche waren mit Stroh ausgestreut, im Bereich der Fresströge war der Boden mit Gummimatten ausgelegt. Eingestellt wurden die Tiere mit einem Gewicht von 216 ± 17 kg Lebendgewicht und einem Alter von 148 ± 7 Tagen.

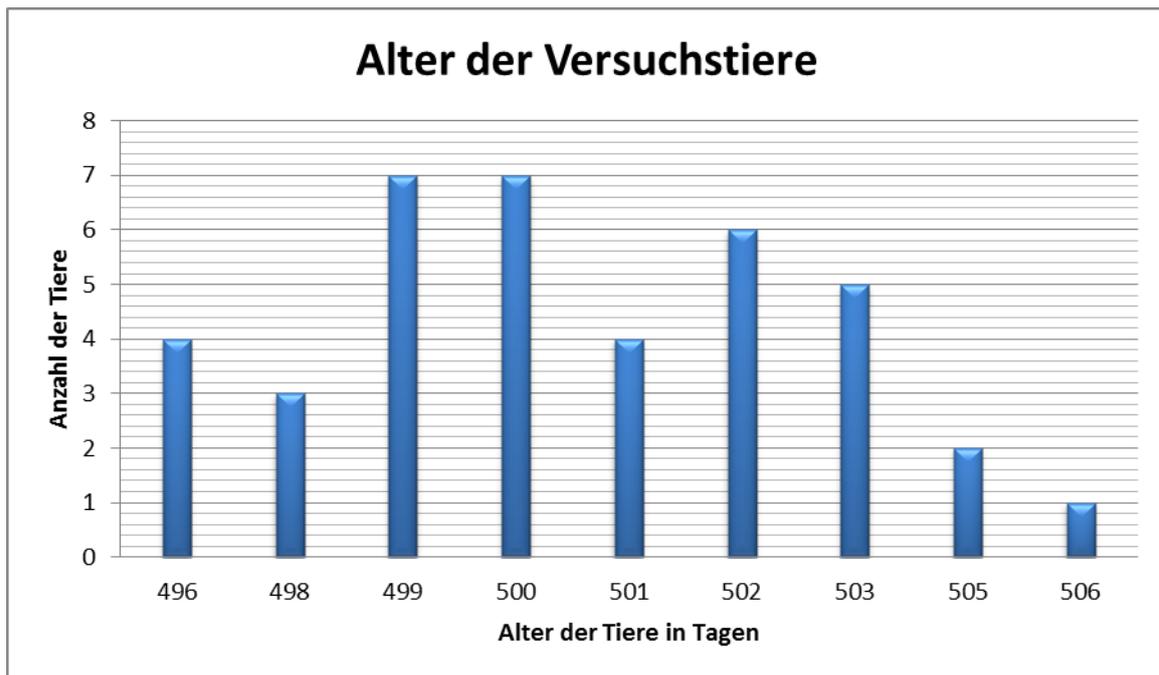


Abbildung 7 Altersverteilung der Versuchstiere (n=39)

Jeder der 5 Gruppen wurde ein unterschiedlicher Proteingehalt (9%, 11%, 13%, 15%, 17%) innerhalb der ansonsten gleichen Mastration (Totale Mischration) verfüttert. Der Energiegehalt aller Rationen betrug etwa 11,5 MJ ME / kg TM. Details zur Mastration können Tabelle 9 entnommen werden. Die verschiedenen Rohproteinanteile blieben über den gesamten Versuchszeitraum bestehen. Das Futter stand den Bullen ad libitum zur Verfügung.

Tabelle 9 Nährstoff- und Energiegehalte der Mischfuttermation

Gruppe	Trocken- masse (TM)	Roh- protein	Roh- faser	Roh- asche	Rohfett	nXP	ME	XP / ME
	g / kg TM						MJ / kg TM	g / MJ
9% RP	417 ± 10	83 ± 4	153 ± 6	60 ± 4	40 ± 2	140 ± 2	11,5 ± 0,1	7,3 ± 0,01
11% RP	417 ± 10	103 ± 4	150 ± 6	61 ± 3	39 ± 2	146 ± 2	11,5 ± 0,1	9,0 ± 0,01
13% RP	416 ± 10	123 ± 4	147 ± 6	62 ± 2	37 ± 2	152 ± 1	11,5 ± 0,1	10,5 ± 0,01
15% RP	415 ± 10	144 ± 4	144 ± 6	63 ± 2	36 ± 2	158 ± 2	11,5 ± 0,1	12,5 ± 0,01
17% RP	415 ± 10	164 ± 5	141 ± 6	63 ± 2	35 ± 2	164 ± 2	11,5 ± 0,1	14,2 ± 0,01

Ziel des Versuchsaufbaus in Grub war es, darzustellen, wie weit die Proteinzufuhr in der Bullenmast gesenkt werden kann, ohne dass sich negative Folgen einstellen (ETTLE, 2014). Bezüglich Mastration und Mastengewicht konnten dabei bei annähernd gleichem Alter erhebliche Unterschiede festgestellt werden (s. Abbildung 8).

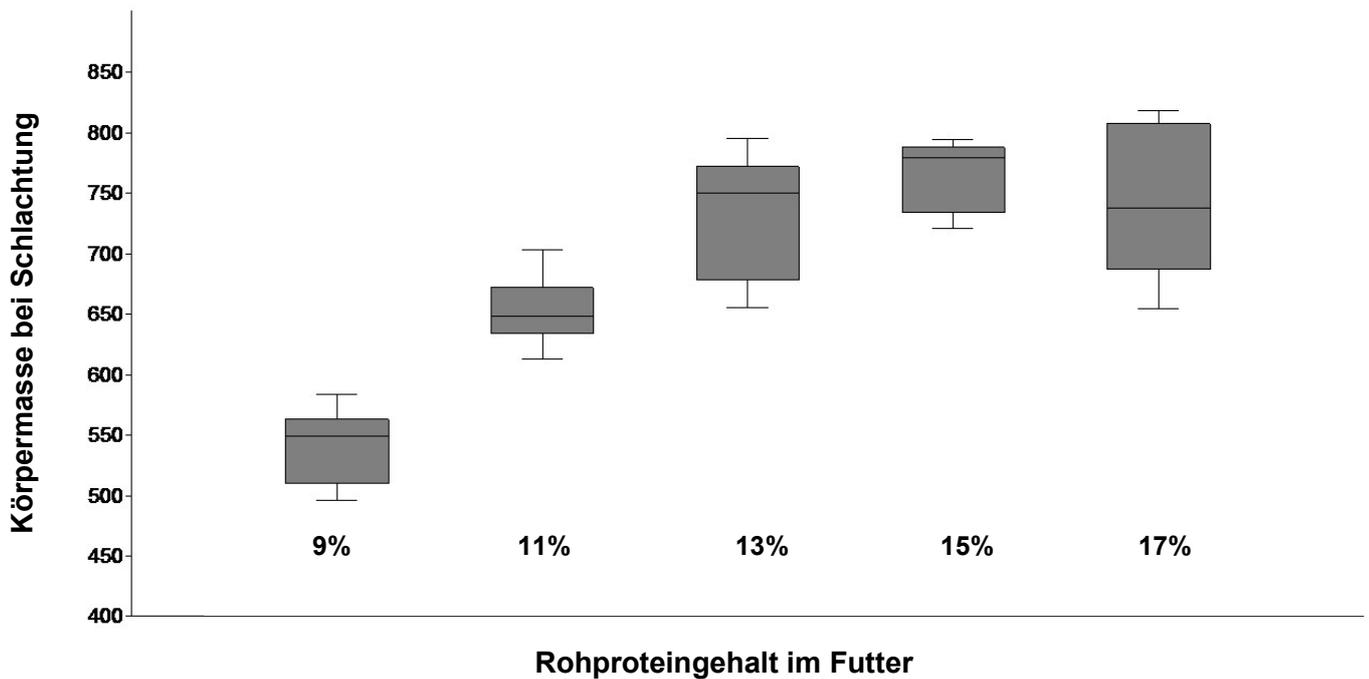


Abbildung 8 Mastengewicht der Bullen in den verschiedenen Mastgruppen nach durchschnittlich 500 Tagen

4.2 Methoden

4.2.1 Sägen der Gliedmaßen

In einem ersten Schritt wurden die Gliedmaßen auf die Klauen reduziert, um sie platzsparender lagern zu können. Zudem wurden mediale und laterale Klaue durch einen Schnitt im Zwischenklauenspalt voneinander getrennt. Für diesen Arbeitsschritt wurde die institutseigene Bandsäge (C.-E. REICH GMBH, Remshalden, Deutschland) verwendet.

Zeitgleich wurde bestimmt, ob es sich um Vorder- oder Hinterbeine handelte, und von welcher Körperseite diese stammten. Zur Unterscheidung der Vorder- von der

Hinterextremität betrachtet man von proximal die Schnittfläche der zum Hauptmittelfuß (Röhrbein) verwachsenen Metacarpal- bzw. Metatarsalknochen III und IV. Dieser Querschnitt stellt sich an der Hintergliedmaße eher quadratisch, an der Vordergliedmaße dagegen nahezu queroval dar. Als weiteres Unterscheidungsmerkmal kann das nicht regelmäßig vorkommende Os metatarsale secundum (Os sesamoideum metatarsale) proximal am Hintermittelfuß herangezogen werden, welches in vergleichbarer Weise an der Vorderextremität fehlt. Zur Unterscheidung des rechten vom linken Fuß zieht man sowohl den unterschiedlichen Sehnenverlauf heran als auch die Form der proximalen Metacarpalfläche. Diese ist an der lateralen Seite deutlich abgeflacht.

Die Ergebnisse bezüglich der Identifizierung der Beine wurden zusammen mit der Probennummer der Tiere auf den Aufbewahrungsbeuteln wasserfest markiert. In einer digitalen Liste wurden zusätzlich noch beobachtete Besonderheiten wie starke Pigmentierung, Verletzungen, Verformungen etc. notiert.

Die hinteren Klauen wurden zur späteren eindeutigen Identifizierung mit einer querverlaufenden Kerbe auf der Schnittfläche markiert.

4.2.2 Konservierung

Erste Versuche mit eingefrorenem Klauenhorn ergaben, dass das Horn während der Lagerung in der Gefrierzelle Feuchtigkeit in Form von Eis verliert. Es kommt quasi zur Gefriertrocknung. Es musste also eine Methode entwickelt werden, um dies und die möglicherweise daraus resultierenden Änderungen der biomechanischen Eigenschaften zu vermeiden.

4.2.3 Markieren

Um später in den Zugversuchen vergleichbare Werte zu bekommen, mussten die Prüfkörperchen stets an der identischen Stelle der Klaue entnommen werden. Da die Klauen sowohl von unterschiedlicher Größe als auch ganz verschieden geformt waren, galt es, hierfür eine Schablone zu entwickeln, die sich an allen so heterogenen Klauen anwenden ließ.

4.2.4 Zurechtsägen

Das Ziel war es, die Klauen auf ein Stück mit einer Kantenlänge von je ca. 1 cm zu reduzieren, aus dem dann wiederum die Prüfkörperchen gewonnen werden mussten. Außerdem musste ein System entwickelt werden, wie die einzelnen Hornproben hinterher zweifelsfrei zuzuordnen blieben.

4.2.5 Entfernen des Weichteilgewebes

Da die Prüfkörperchen ausschließlich aus Kronhorn bestehen sollten, musste das anhaftende Gewebe - Knochenfragmente, Sehnen, Weichteilgewebe - rückstandslos und möglichst zeitsparend von den Hornproben entfernt werden.

4.2.6 Anfertigen planparalleler Proben

4.2.6.1 Hobeln

Für die Arbeit mit der Fräse, und um vergleichbare Daten zu erhalten, war es unerlässlich, planparallele Proben mit einer definierten Dicke zu erstellen. Zudem sollte die Oberfläche der Prüfkörper frei von Rillen sein, um die Messergebnisse der Belastungsversuche nicht zu verfälschen. Zu diesem Zweck wurde ein Dickenhobel der Firma Proxxon (DH40, Proxxon, Föhren, Deutschland) angeschafft.

Die Befestigung des Probenmaterials erwies sich hierbei als Herausforderung. Da der Hobel die nur ca. 1 x 1 cm großen Hornproben nicht greifen konnte, um sie mittels des Führungsmechanismus durch die Hobelvorrichtung zu ziehen, mussten die Hornstücke auf einem Führholz befestigt werden. Eine Vorrichtung zum Fixieren der Proben mittels Klemm- oder Spanntechnik wurde rasch verworfen, da sie sich als nicht praktikabel erwies. So ging man dazu über, die Hornproben mit Klebstoff an der Führvorrichtung zu befestigen.

In ersten Versuchen wurden die Klauenstücke mit Heißkleber aus einer Klebepistole auf unbearbeiteten Weichholzlatten befestigt und durch die Maschine geschoben. Was zunächst vielversprechend begann, stellte sich bald als unmöglich heraus: Zum einen befestigte der Heißkleber die Prüfkörper nicht ausreichend fest, so dass bereits bei leichtem Verkanten des Hobelmessers die Hornstücke vom Holz gelöst und katapultartig aus dem Gerät geschleudert wurden. Zum anderen entwickelte der

Heißkleber punktuell so hohe Temperaturen, dass eine Gefährdung des Probenmaterials nicht sicher ausgeschlossen werden konnte.

Auch weitere Versuche mit Sekundenkleber konnten das Problem der Haftung nicht zufriedenstellend lösen.

4.2.7 Anfertigen der Prüfkörper

Um aus den planparallelen Hornplättchen die endgültigen, sanduhrförmigen Prüfkörper zu fertigen, wurde eine computergesteuerte Portalfräse der Firma GoCNC (Hemer, Deutschland) verwendet. Es handelte sich hierbei um das Modell „Evolution Hobby A4“.

Die Bohrköpfe (VHM-Fräser, 2-schneidig) stammten von der Firma AS Toolstore (Inzigkofen, Deutschland). Sie hatten einen Durchmesser von 1 mm und einen Fischschwanz-Anschluss (s. Abbildung 9). Angetrieben wurden die Fräsköpfe von einem Fräsmotor der Firma Proxxon (Proxxon Industrie-Bohrschleifer IB/E, Föhren, Deutschland).

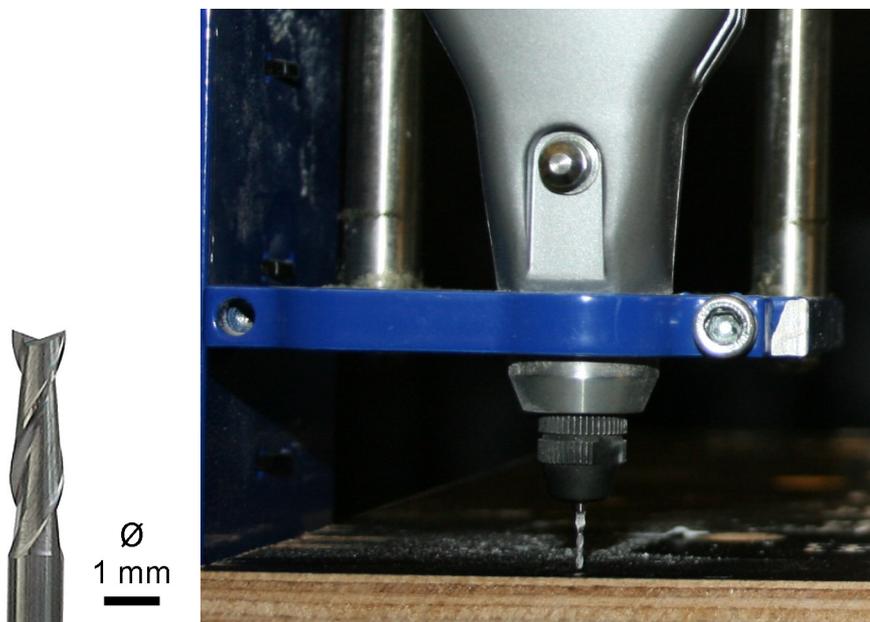


Abbildung 9 VHM Fräskopf Fischschwanz (AS-Toolstore.de)

4.2.7.1 Erstellen der Fräsdatei

In Anlehnung an die „Bestimmungen für die Verleihung und Führung des DLG-Qualitätssiegels für Mittel zur Klauenpflege und Klauenhygiene“ sollten die Prüfkörper jeweils eine Länge von 10 mm und eine Breite von 5 mm haben. Die als Sollbruchstelle fungierende Taille sollte 2 mm breit sein (s. Abbildung 10).

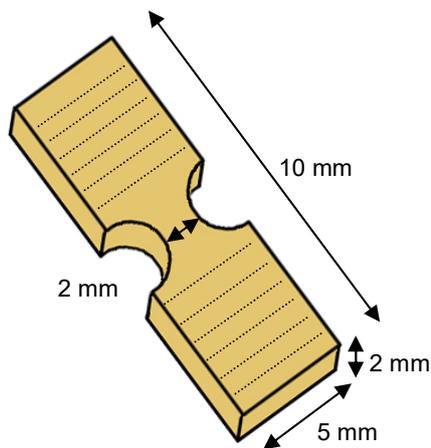


Abbildung 10 Prüfkörperchen (schematisch, nicht maßstabsgetreu)

Zunächst musste mit dem Programm „CorelDraw“ eine Datei erstellt werden, die dann mithilfe der Steuersoftware der Fräse abgearbeitet werden konnte.

Anfangs wurde die Datei so programmiert, dass eine möglichst große Anzahl von Proben innerhalb eines Fräsvorganges abgearbeitet wurde. Aus Gründen der besseren Durchführbarkeit, die weiter unten genauer erläutert werden, ging man aber dazu über, in jedem Durchgang jeweils nur die Proben dreier Tiere zeitgleich zu fräsen. Es wurde also eine Datei mit 12 Proben in der entsprechenden Größe erstellt.

4.2.7.2 Fräsen

Die vorbereiteten Hornproben wurden unmittelbar vor dem Fräsen aufgetaut und so weit als möglich abgetrocknet. Nachdem die Hornproben auf der Platte der Fräse befestigt waren, wurde mit der entsprechenden Software „CNC-Studio USB by

GoCNC“ die *.cdr-Datei aufgerufen und schließlich computergesteuert abgearbeitet (s. Abbildung 11).

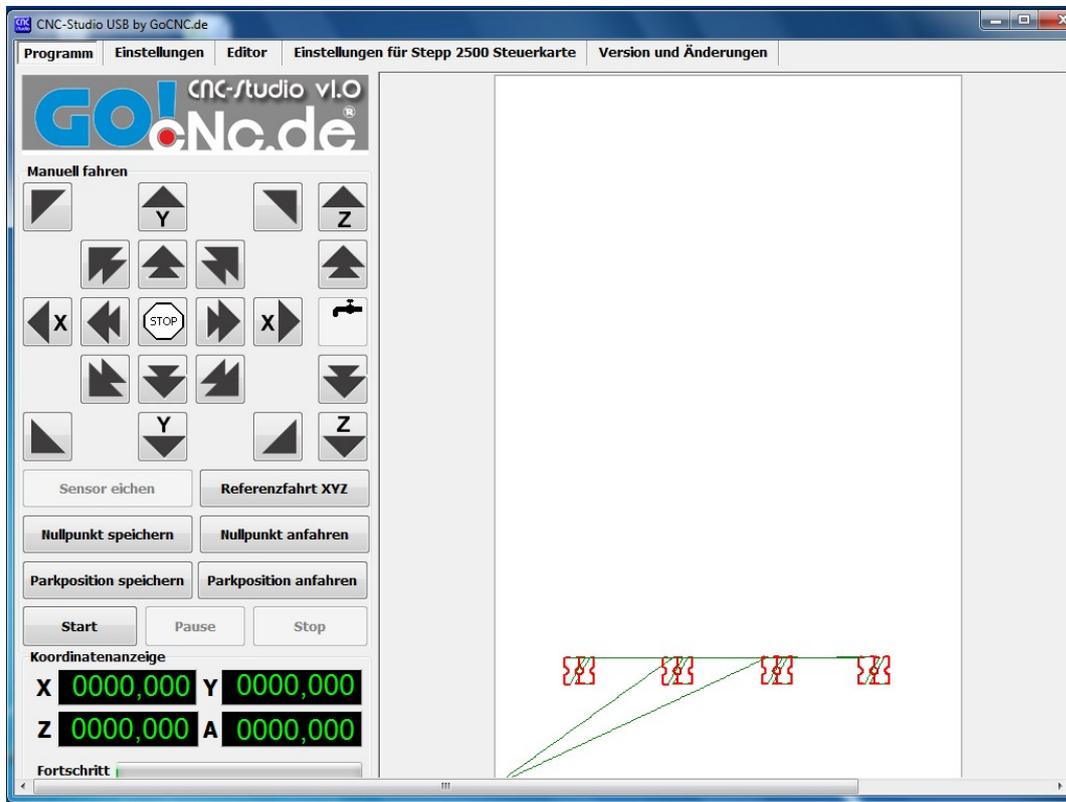


Abbildung 11 Arbeitsmaske der Fräsdatei

4.2.8 Zugversuche

Die Zugversuche wurden mit der institutseigenen Universalprüfmaschine „Zwick Z010“ (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) durchgeführt.

4.2.8.1 Einspannvorrichtung

Da die Prüfmaschine üblicherweise für Zugversuche mit Sehnen etc. verwendet wird, waren die dazu gehörigen Klemmbaken für die Zwecke der vorliegenden Arbeit zu groß. Eine passende Einspannvorrichtung wurde freundlicherweise von der DLG (Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V., DLG-Testzentrum Technik & Betriebsmittel, Groß-Umstadt, Deutschland) zur Verfügung gestellt, die für ihre

eigenen Materialprüfungen eine entsprechende Apparatur entwickelt und gefertigt hat (s. Abbildung 12).



Abbildung 12 Einspannvorrichtung zum Durchführen der Zugversuche

Für die Versuche an der Zwick Z010 musste die Einspannvorrichtung insgesamt leicht modifiziert und an die Gegebenheiten angepasst werden.

4.2.9 Statistik

Für die statistische Auswertung wurde von jeder Klaue jeweils aus den Ergebnissen des proximalen und distalen Prüfkörperchens der Mittelwert gebildet.

Verglichen wurden jeweils die Ergebnisse eines Tieres lateral gegen medial und vorne gegen hinten. Die jeweils gleichen Lokalisationen wurden innerhalb der einzelnen Fütterungsgruppen und über alle 5 Fütterungsgruppen hinweg miteinander verglichen. Zur statistischen Auswertung wurde das Statistikprogramm „IBM SPSS Statistics“ Version 23.0 (IBM Corp. New York) verwendet. Es kamen eine ANOVA-Analyse, ein Dunnett-T-Test, ein Mauchly-Test und die Auswertung mittels Pillai-Spur zur Anwendung (siehe auch 5.2.3 Statistische Auswertung).

5 Ergebnisse

5.1 Methodenentwicklung

5.1.1 Konservierung des Probenmaterials

Um eine Gefriertrocknung des Horns und die möglicherweise daraus resultierenden Änderungen der biomechanischen Eigenschaften zu vermeiden, wurde den Rinderklauen vor dem Einfrieren Wasser beigelegt, so dass sie in gefrorenem Zustand von Eis umgeben waren. Die Lagerung erfolgte in handelsüblichen Gefrierbeuteln mit Zip-Verschluss, welche nach sorgfältiger Beschriftung bei -20°C gelagert wurden. Für einzelne Arbeitsschritte wurden die Proben aufgetaut, bearbeitet und anschließend wieder unter gleichen Bedingungen eingefroren.

5.1.2 Gewinnen der Hornproben

Durch Sägeversuche an anderen Rinderklauen wurde ermittelt, wie man am schnellsten und einfachsten die benötigten Hornstücke auf die richtige Größe bringen kann. Erste Überlegungen, die axiale Klauenfläche mit einer Säge zu entfernen und die Klauen anschließend mit einem Fleischermesser oder Skalpell „auszuhöhlen“, wurden schnell verworfen, da sie sich als nicht praktikabel und sehr zeitraubend erwiesen.

Schließlich wurden die Klauen durch eine Reihe von Sägeschnitten (s. Abbildung 13) mit der Bandsäge des Institutes für Anatomie, Histologie und Embryologie (C.-E. REICH GMBH, Remshalden, Deutschland) schrittweise auf ein Stück mit einer Kantenlänge von je ca. 1 cm reduziert. Der Rest wurde verworfen. Um eine sichere Zuordnung der Proben zu gewährleisten, wurden die nun entstandenen Hornstücke einzeln in kleinen, eindeutig beschrifteten Plastikbeuteln verpackt. Wie zuvor wurde auch jetzt wieder Wasser beigegeben, um eine Gefriertrocknung des Horns zu vermeiden. Die 4 Proben eines Tieres wurden jeweils gemeinsam in einer größeren Umverpackung gelagert.



Abbildung 13 Schritte des Sägens der Prüfkörper

Um die Position, an welcher dieses Hornstück entnommen werden sollte, zu standardisieren, wurde eine Schablone entwickelt. Mithilfe dieser selbstgefertigten Schablone aus Metall (s. Abbildung 14) wurde im immer gleichen Abstand zu Kronsaum und Zwischenklauenspalt ein Quadrat auf der Klaue angezeichnet. Dazu wurde die Schablone so aufgelegt, dass die breiteste Stelle seitlich genau am äußeren Rand der Klaue anlag. Die Enden der beiden oberen Dornen wurden genau an der Grenze zum Kronsaum angelegt. So wurde an den individuell unterschiedlich dimensionierten Klauen immer der gleiche Abstand von Kronsaum und Außenrand beibehalten. Das angezeichnete Quadrat wurde anschließend unter Verwendung der Bandsäge aus dem Horn herausgesägt. Eine kleine Bohrung in der linken oberen Ecke stellte sicher, dass auch nach dem Sägen zweifelsfrei das proximale und distale Ende der Probe identifiziert werden konnten.



Abbildung 14 Schablone zur Markierung der Probenentnahmestelle

5.1.3 Entfernen des Weichteilgewebes

5.1.3.1 Grobarbeit

Um eine Verschmutzung des später verwendeten Proxxon Dickenhobels zu vermeiden, sollte nur das reine Horn gehobelt werden. Deswegen musste anhaftendes Weichteilgewebe vor dem Hobeln rückstandslos von den Hornproben entfernt werden. Der Großteil des nach dem Sägen noch vorhandenen Weichteilgewebes wurde zunächst mittels eines Fleischermessers bzw. eines Skalpells grob entfernt (s. Abbildung 15).



Abbildung 15 Entfernen des Weichteilgewebes

5.1.3.1 Feinarbeit

Die letzten Reste der Lederhaut, die nicht mit einer Klinge entfernt werden konnten, wurden schließlich unter Zuhilfenahme einer Flexmaschine (Bosch PWS 5-115 550W, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Deutschland) mit Schrupscheibe abgetragen (s. Abbildung 16). Übrig blieben Proben aus reinem Kronhorn.

Die Ecken der Proben wurden ebenfalls mit der Flex leicht abgerundet und besonders prominent hervorstehende Unebenheiten eingeebnet. Dies sollte einer leichteren Verarbeitung mit dem Hobel zuträglich sein.



Abbildung 16 Flex mit Schrupscheibe

5.1.4 Anfertigen planparalleler Proben

5.1.4.1 Hobeln

Aufgrund der in 4.2.6.1 beschriebenen Schwierigkeiten, die sich beim Hobeln mit dem Proxxon Dickenhobel ergeben hatten, wurden schließlich mittels eines Forstner-Bohrers in Holzlatten kreisförmige Vertiefungen gefräst. Dies erwies sich als die Lösung zur Befestigung des Prüfmaterials. Die Hornproben wurden zu mehreren hintereinander mit Epoxidharzkleber (UHU Plus Binder&Härter, UHU GmbH&Co.KG, Bühl, Deutschland) in den Vertiefungen aufgeklebt, so dass die Hornoberfläche sich

auf gleichem bzw. sogar unter dem Niveau des Führholzes befand (s. Abbildung 17). Horn und Holz wurden nun gleichermaßen abgetragen, was ein Verkanten im Hobel verhinderte und so zu einer glatten, planparallelen Probenoberfläche führte.



Abbildung 17 Hobeln der Proben mithilfe eines Führholzes

Um eine Verwechslung der Proben möglichst sicher auszuschließen, wurden jeweils die 4 Hornproben eines Tieres gemeinsam gehobelt. Dabei wurde beim Aufkleben der Hornstücke die stets identische Reihenfolge eingehalten. Auf der Rückseite der Holzplatte sowie auf den Hornstücken selbst wurden sowohl die Tiernummer als auch Seite und Extremität genau gekennzeichnet.

5.1.4.1 Schleifen

Die Bearbeitung der Probenrückseite erfolgte mittels eines Dreiecksschleifers (Budget BDS 1805). Zu diesem Zweck wurden die Hornstücke mit doppelseitigem Klebeband auf einer Holzplatte befestigt und mit dem Dreiecksschleifer so lange bearbeitet, bis die Oberfläche eben war. Dabei kamen drei verschiedene Schleifpapiere unterschiedlich starker Körnung (40, 80, 320) zum Einsatz.

5.1.5 Fräsen der Prüfkörper

Wie in 4.2.7 beschrieben, wurden die eigentlichen Prüfkörper mittels einer computergesteuerten Portalfräse aus den 1 cm² großen Hornstücken herausgefräst. Um zu verhindern, dass sich während des Fräsvorganges Prüfkörper von der Maschine lösen und somit eine spätere Zuordnung der Proben unmöglich würde, wurde die zugrunde liegende CorelDraw-Datei so programmiert, dass an jedem Prüfkörper jeweils am oberen und unteren Ende ein kleiner Steg Horn stehen blieb, der den Prüfkörper innerhalb des restlichen Hornstückes fixieren sollte (s. Abbildung 18).



Abbildung 18 CorelDraw-Datei zum Fräsen der Prüfkörper

Damit die Hornproben immer genau an der richtigen Stelle der Maschine befestigt werden konnten, war es nötig, eine Art Matrize auf der Platte der Portalfräse zu haben. Zu diesem Zweck wurde die Datei, die anschließend auch zum Fräsen der Prüfkörper verwendet wurde, in die Platte der Maschine gefräst. Auf diese Vorlage konnte nun jeweils das Horn geklebt werden. Unter Berücksichtigung der Röhrchenorientierung im Horn wurden die Hornstücke mit doppelseitigem Klebeband auf die zuvor gefertigte Matrize auf der Platte der Fräse so aufgeklebt, dass die Hornröhrchen immer quer zur Längsachse des Prüfkörperchens verliefen.

Dann wurde damit begonnen, die vorher programmierte CorelDraw-Datei entsprechend durch die Fräse aus dem Horn heraus arbeiten zu lassen. Die Benutzeroberfläche der CNC-Software ist in Abbildung 11 dargestellt.

Da die Hornproben zwar in sich planparallel waren, jedoch keine einheitliche Dicke hatten, musste beim Setzen des Nullpunktes jeweils von der dicksten Probe ausgegangen werden. Er wurde so gewählt, dass der Fräskopf minimal auf der dicksten Probe aufsaß. Von diesem Niveau aus drang der Fräskopf während des Fräsvorganges 1 mm tief ins Material ein. In der Regel mussten 3-4 Durchgänge gefahren werden, um die Prüfkörpersilhouette vollständig auszufräsen.

Während die Hornplättchen zu Beginn noch plan auf der Unterlage auflagen und das Klebeband somit gut haftete, wölbten sie sich mit zunehmendem Trocknungsgrad mehr und mehr, was die Auflagefläche auf der Platte und somit die Klebekraft deutlich verringerte. Aus diesem Grund wurden im weiteren Verlauf der Untersuchung nur noch 12 Proben pro Durchgang bearbeitet. Dadurch konnte die Fräszeit verringert und einer zu starken Krümmung des Hornes infolge der Austrocknung vorgebeugt werden.

Nach Beendigung des Fräsdurchganges wurden die Hornproben abgelöst und wiederum in ihren beschrifteten Beuteln unter Zugabe von Wasser eingefroren.



Abbildung 19 Fertig gefräste Prüfkörper im Hornplättchen (links), aus dem Plättchen gelöst (Mitte und rechts)

5.1.6 Zugversuche

Die Einspannvorrichtung der DLG besteht aus zwei identischen Endstücken aus Edelstahl, die jeweils mittig eine Vertiefung und an beiden Seiten eine Lochbohrung aufweisen. Durch die Lochbohrungen wird je ein Führungsstift geschoben, der gewährleistet, dass die Kräfte während des Zugversuchs ausschließlich in vertikaler Richtung wirken, und die Probe somit keinen Scher- und Torsionskräften ausgesetzt ist. Auf diese Weise konnte ohne Verfälschung durch ein etwaiges Verdrehen der Hornprobe exakt die Kraft gemessen werden, die zum Zerreißen der Probe notwendig war.

In der Vertiefung in der Mitte wurde das Prüfkörperchen so eingebracht, dass sich die als Sollbruchstelle fungierende Taille genau mittig zwischen den beiden Baken

befand. Zur Verbesserung der Haftung wurde grobkörniges Schleifpapier mit Sekundenkleber in die Vertiefung geklebt. Befestigt wurden die Proben mittels je eines gelochten Metallstücks auf jeder Seite, durch das eine Schraube gedreht und mit einer Langmutter angezogen wurde (s. Abbildung 12).

Auch an den Befestigungsplatten wurden die Kontaktflächen mit grobkörnigem Schleifpapier beklebt, um die Haftung der Proben in der Klemmvorrichtung zu verbessern.

Da sich die Materialprüfmaschine der DLG von der verwendeten Zwick Z010 etwas unterscheidet, musste die Aufhängung der Einspannvorrichtung dahingehend verändert werden, dass sie mittels einer Metallscheibe an den beiden Zugpolen der Materialprüfmaschine angeschraubt werden konnte.

Das Gewinde der Schrauben, die die Befestigungsplatten über den Prüfkörperchen festzogen, wurde zur Hälfte entfernt, um ein freies Gleiten der Schrauben durch die Befestigungsplatten zu gewährleisten. Dies war notwendig, da die Prüfkörperchen eine unterschiedliche Dicke aufwiesen und sich nur durch diese Form der stufenlosen Befestigung bei allen Proben eine sichere Befestigung gewährleisten ließ.

Da sich die Körnung des Schleifpapiers, welches in den Vertiefungen und an den Befestigungsplatten für einen sicheren Halt der Hornproben sorgte, während der Zugversuche deutlich abnutzte, musste das Papier im Sinne standardisierter Versuchsbedingungen regelmäßig gewechselt werden.

Um die Komplikationen, die die Länge der beiden Befestigungsschrauben mit sich brachte, zu umgehen, wurde die gesamte Einspannvorrichtung zum Einlegen der Prüfkörperchen auf ein Gestell aus Holz aufgebracht. Die beiden nach unten ragenden Schrauben wurden durch zwei Öffnungen in diesem Gestell geschoben, sodass die Einspannvorrichtung plan auflag und ein präzises Einlegen der Hornproben ohne Schwierigkeiten möglich war.

5.1.6.1 Zugversuche

Zur Durchführung der Zugversuche wurden die Klemmbaken mit den eingespannten Prüfkörperchen so in der Zugprüfmaschine befestigt, dass sie locker gespannt und ohne Zug zwischen den beiden Polen hingen (s. Abbildung 20).

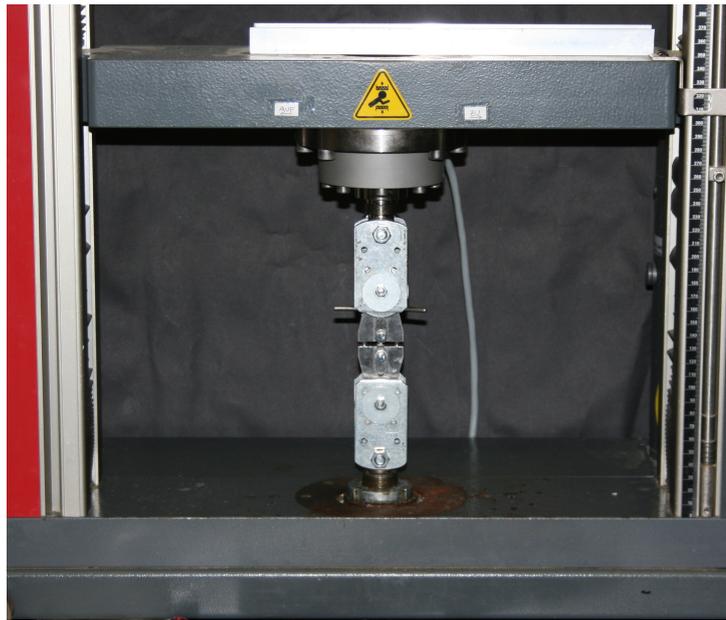


Abbildung 20 Zugprüfmaschine

Mit der Zwick/Roell Software testXpert V12.0 Master wurden die Versuche gesteuert. Es handelte sich um einen zeitgesteuerten Ablauf. Dabei wurde die Kraft kontinuierlich um 2 N pro Sekunde gesteigert. Bei einem Kraftabfall von 90% wurde der Zerreivorgang automatisch abgebrochen. Die Software wurde so programmiert, dass vor Beginn des Versuchs die Eingaben „Probendicke“ und „Probenbreite“ erzwungen wurden. Dies war unerlässlich, da diese Angaben bei jeder einzelnen Probe minimal variierten und zur Auswertung der Ergebnisse später eine Umrechnung auf den Quadratmillimeter erfolgen musste. Voraussetzung war, dass jedes einzelne Prüfkörperchen sorgfältig vermessen wurde. Zu diesem Zweck wurde ein digitaler Messschieber (Gedema GmbH Abt. Messwelt, 58093 Hagen, Deutschland, Guilin Guanglu Measuring Instrument Co. Ltd., 115-441A) verwendet.

Ein Versuch endete jeweils mit der kompletten Zerreißung des Prüfkörperchens. Das Ergebnis wurde sowohl digital gespeichert als auch zusätzlich in einer handschriftlich geführten Liste vermerkt, in der auch zusätzliche Informationen über die Form der zerrissenen Probe, Besonderheiten während des Versuchs oder Auffälligkeiten des Kurvenverlaufes notiert wurden. Alle Proben zerrissen an der präformierten Stelle.

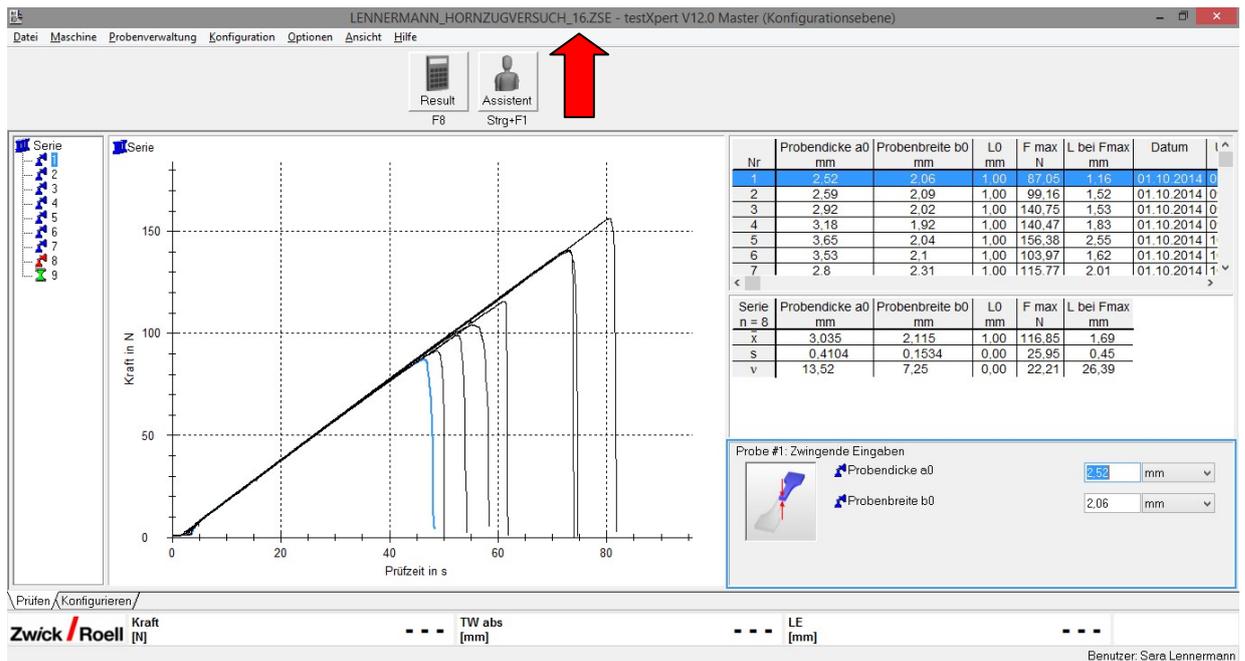


Abbildung 21 Prüfsoftware der Firma Zwick Roell

Die 8 Proben eines jeden Tieres wurden jeweils als eine Probenserie gespeichert und mit der individuellen Tiernummer zweifelsfrei benannt (s. Abbildung 21).

In Abbildung 22 ist der typische Verlauf eines einzelnen Zugversuchs grafisch dargestellt. Die Kurve steigt bis zu einem Wert von ca. 265 N an und fällt dann mit Zerreißen der Probe abrupt ab.

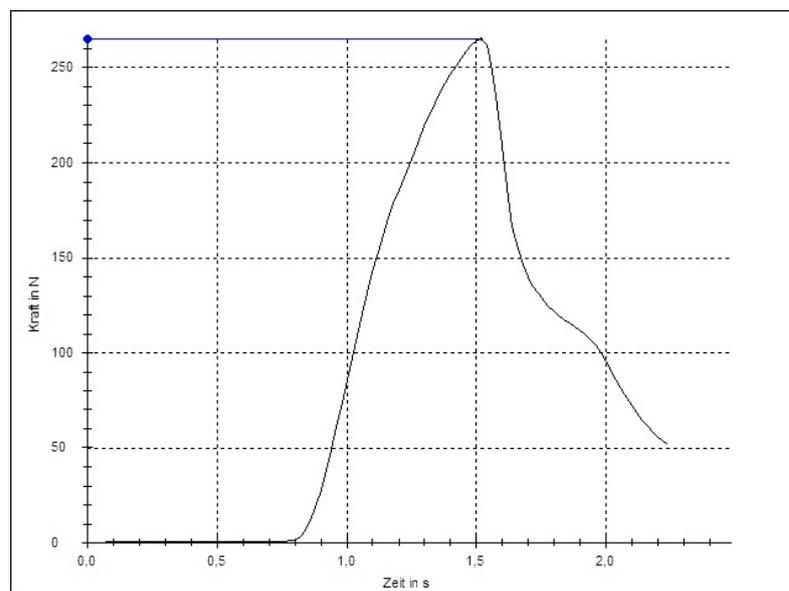


Abbildung 22 Kurvenverlauf eines Zugversuchs

Um eine genaue Zuordnung der Ergebnisse zu den einzelnen Proben zu gewährleisten, wurde dabei stets genauestens auf die Einhaltung folgender Reihenfolge geachtet:

1. Vorne lateral proximal
2. Vorne lateral distal
3. Vorne medial proximal
4. Vorne medial distal
5. Hinten lateral proximal
6. Hinten lateral distal
7. Hinten medial proximal
8. Hinten medial distal

5.2 Ergebnisse der Zugversuche

5.2.1 Umrechnung der Werte

Da nicht alle getesteten Prüfkörperchen die exakt gleichen Abmessungen hatten, mussten die unmittelbar erhobenen Messwerte zunächst auf eine vergleichbare Einheit umgerechnet werden. Dazu wurde die gemessene Zugfestigkeit durch den Querschnitt des Prüfkörpers dividiert. So erhielt man für alle Messungen Werte in der vergleichbaren Einheit Newton pro Quadratmillimeter (N/mm²).

5.2.2 Grafische Darstellung

Alle erhobenen Befunde wurden mithilfe des Programmes „Past“ in Form von Boxplots dargestellt. Dies ermöglichte es, bestimmte Verteilungsdaten direkt aus der grafischen Darstellung abzulesen und miteinander zu vergleichen: Zur besseren Vergleichbarkeit der Grafiken untereinander wurde die Länge der Y-Achse immer identisch dargestellt. Sie reicht von 0 bis 40 N/mm².

Im Folgenden werden die aus den im Zugversuch erhobenen Daten erstellten Boxplots näher erläutert.

Tabelle 7 enthält eine Auflistung über die Gesamttier- und -probenzahlen innerhalb der einzelnen Fütterungsgruppen.

5.2.2.1 9%

Die Bullengruppe mit 9% Rohproteinanteil in der Mastration umfasste 8 Tiere.

Bei Tier Nr. 17 konnte die Probe 17-6 (hinten lateral distal) nicht ausgewertet werden, da das Prüfkörperchen bei der Vorarbeit zu stark beschädigt wurde. Es wurden also insgesamt 63 Werte erhoben. Abbildung 23 zeigt diese Werte. Die gemessene Zugfestigkeit, in N/mm^2 , ist auf der Y-Achse aufgetragen, die X-Achse zeigt die 8 verschiedenen Lokalisationen, an denen Messungen gemacht wurden.

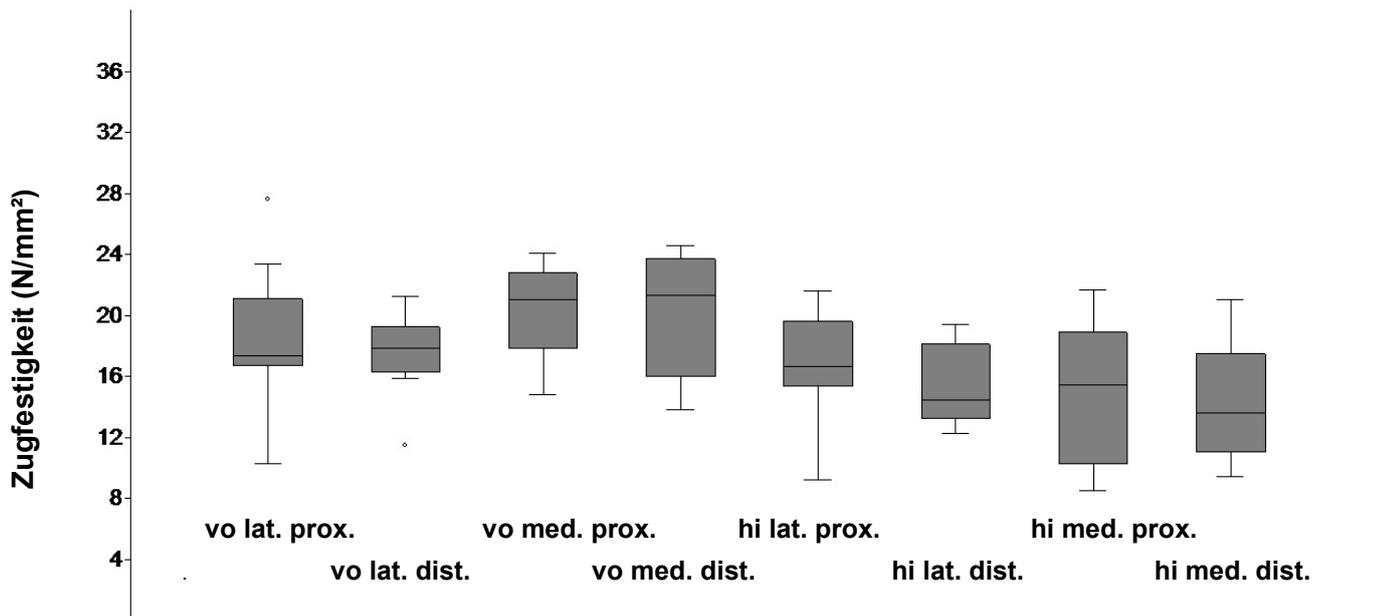


Abbildung 23 Darstellung der Zugfestigkeit bei den Tieren in der Gruppe mit 9% Rohprotein in der Mastration

Insgesamt liegen alle Werte recht nah beieinander. Die Boxen umfassen Werte zwischen ca. 10 und maximal ca. 24 N/mm^2 , wobei der Median immer ca. zwischen 13 und 21 N/mm^2 liegt. Die Antennen hinten lateral proximal reichen am weitesten

nach unten bis etwa 9 N/mm², vorne lateral proximal gibt es einen Ausreißer nach oben, der annähernd 28 N/mm² erreicht. Die an den Vordergliedmaßen gemessenen Werte liegen insgesamt leicht über den Werten der Hintergliedmaße. Den mit ca. 21 N/mm² höchsten Median erreichen die beiden Boxplots der Proben vorne medial proximal und vorne medial distal. Den niedrigsten Median weist die Probe hinten medial distal auf. Er liegt bei etwa 13 N/mm². Vorne lateral distal liegen die Werte innerhalb der beiden Quartile am dichtesten beieinander, hinten medial proximal haben sie die größte Spannweite.

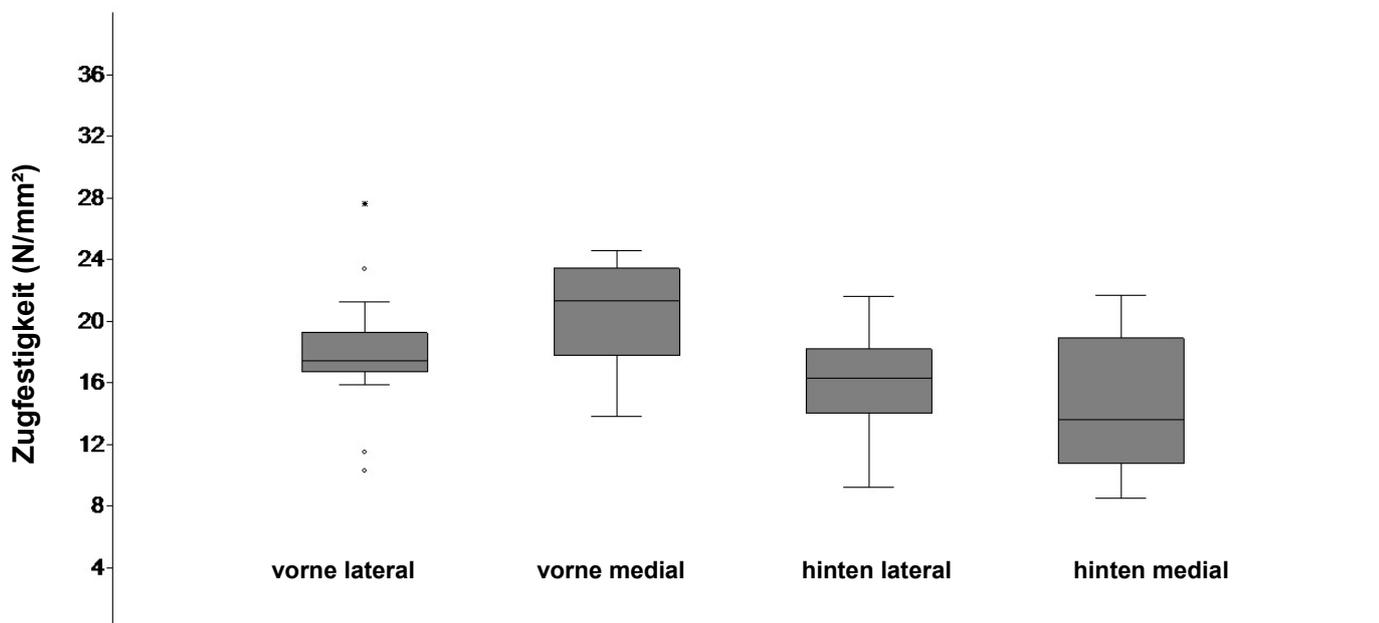


Abbildung 24 Darstellung der Zugfestigkeit in der 9%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben.

In Abbildung 24 sind ebenfalls die gemessenen Werte der Bullen aus der Gruppe mit 9% Rohprotein in der Mastration dargestellt. Allerdings sind hier jeweils die Ergebnisse der proximalen und distalen Proben einer Gliedmaße in einem Plot zusammengefasst. Es wird also nur zwischen vorne und hinten lateral und vorne und hinten medial unterschieden. Auch in dieser Darstellung zeigt sich, dass die vorne erreichten Messwerte etwas höher liegen als die an den Hintergliedmaßen. Der Median liegt vorne medial am höchsten, ca. bei 17 N/mm². Hinten medial ist er mit

ca. 13 N/mm² am niedrigsten. Vorne medial ist das obere Quartil am höchsten. Es liegt bei nahezu 24 N/mm². Am niedrigsten ist das obere Quartil hinten lateral, wo es knapp 17 N/mm² misst. Ebenfalls etwa 17 N/mm² beträgt das höchste untere Quartil, welches auch vorne medial erreicht wird. Hinten medial beobachtet man das niedrigste untere Quartil, welches etwa bei 11 N/mm² positioniert ist. Die Werte innerhalb der Box liegen vorne lateral enger zusammen als bei den drei übrigen Proben, nämlich ca. zwischen 16 und 19 N/mm². Am weitesten auseinander liegen die Daten der Proben hinten medial. Sie bewegen sich etwa zwischen 10 und 18 N/mm². Bei den Vordergliedmaßen wurden jeweils medial die höheren Messwerte erreicht, hinten hingegen lateral.

5.2.2.2 11%

Die Gruppe, welche mit 11% Rohprotein in der Mastration gefüttert wurde, bestand aus 6 Tieren. Da von Tier Nummer 21 die Proben 21-3 und 21-5 (vorne medial proximal und hinten lateral proximal) fehlten, wurden aus dieser Gruppe insgesamt 46 Hornproben einem Zugversuch unterzogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 25 dargestellt. Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse der proximalen und distalen Prüfkörperchen einer Klaue erwartungsgemäß sehr dicht beieinander liegen, werden im Folgenden jeweils die Ergebnisse zusammengenommen betrachtet. Es wird also nur noch zwischen vorne/hinten lateral und vorne/hinten medial differenziert.

In dieser Grafik zeigt sich, dass die Messwerte etwas weiter verteilt sind als bei den Tieren aus der 9%-Gruppe. Insgesamt werden Zugfestigkeiten zwischen 10 und 32 N/mm² erreicht, wobei die Werte an den Vordergliedmaßen tendenziell etwas höher sind als an den Hintergliedmaßen. Auch der Median liegt bei den beiden vorderen Plots höher als bei denen der Hintergliedmaßen. Den höchsten Median, ca. 27 N/mm², haben die Messwerte vorne lateral, den niedrigsten, ca. 19 N/mm², die hinten medial. Vorne lateral liegt das obere Quartil bei 29 N/mm² und ist somit das höchste. Das niedrigste obere Quartil von ca. 20 N/mm² zeigt sich hinten medial. Gleichermaßen verhält es sich auch beim unteren Quartil: Das höchste untere Quartil kann vorne lateral abgelesen werden. Es beträgt rund 24 N/mm². Das niedrigste untere Quartil, welches hinten medial erreicht wird, rangiert bei ca. 16 N/mm². Vorne medial ist die Box am kleinsten, hinten lateral am größten. Bei diesem Plot ist auch

die Streuung am größten. Wäre nicht das obere Quartil hinten lateral minimal größer als das vorne medial, könnte man die Grafik als von links nach rechts absteigend beschreiben. Im Vergleich lateral zu medial weisen vorne und hinten jeweils die lateralen Boxen die höheren Ergebnisse auf.

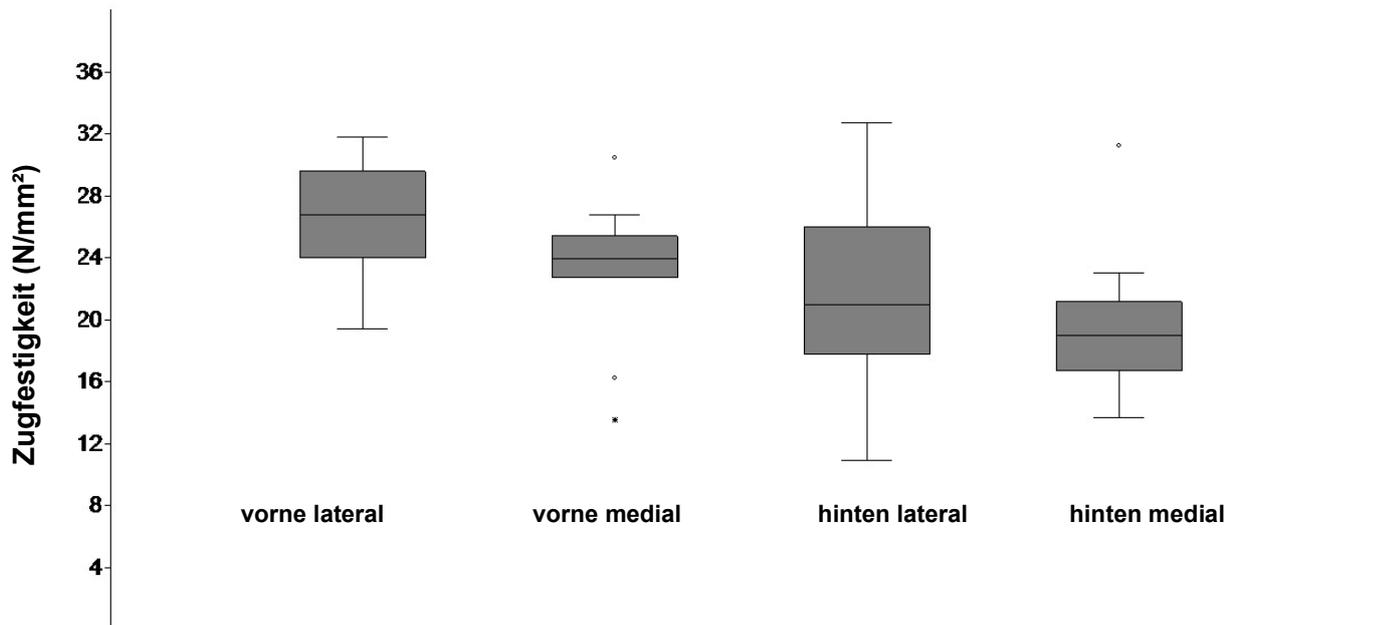


Abbildung 25 Darstellung der Zugfestigkeit in der 11%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben

5.2.2.3 13%

Die Gruppe mit 13% Rohprotein in der Mastration bestand aus 7 Tieren. Aufgrund der nicht auswertbaren Ergebnisse von Probe Nummer 37-7 und 37-8 (hinten medial proximal und distal) flossen die Ergebnisse von 54 Zugversuchen in die Auswertung ein und sind in Abbildung 26 dargestellt.

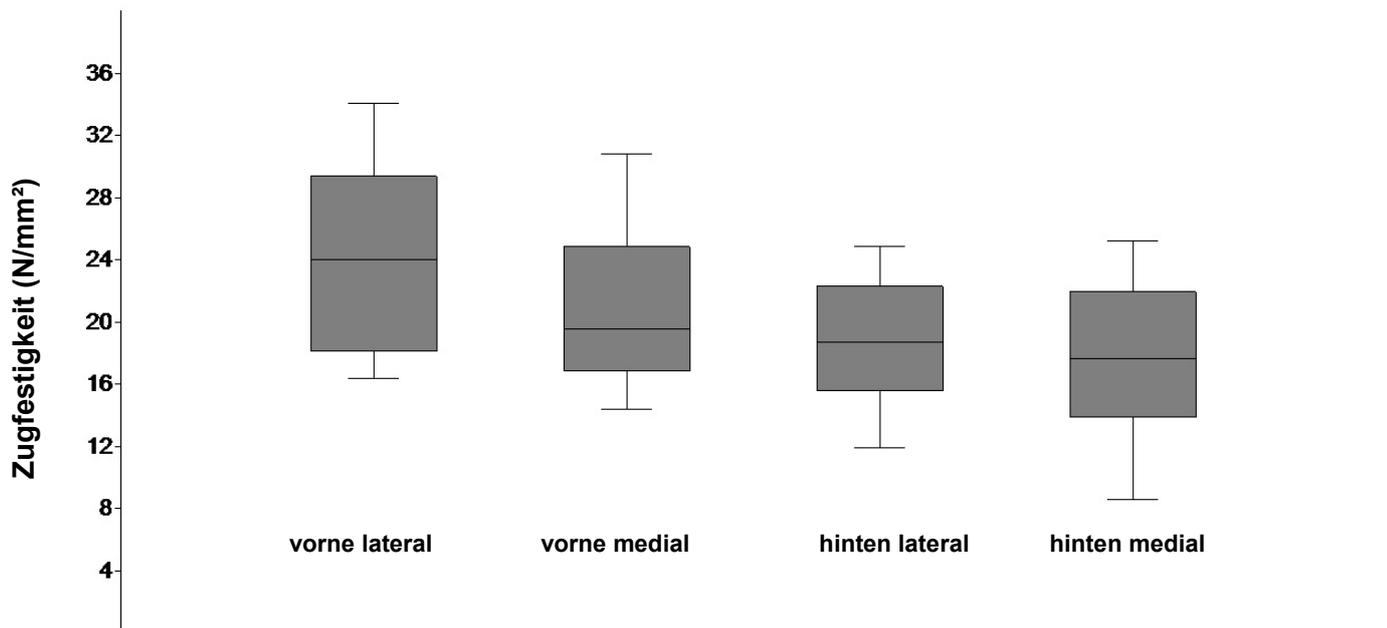


Abbildung 26 Darstellung der Zugfestigkeit in der 13%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben

Die Mediane liegen dicht beieinander bei ca. 18-20 N/mm², wobei sie von links nach rechts minimal abfallen. Lediglich der Median der Proben vorne lateral liegt etwas weiter entfernt bei ca. 24 N/mm². Die Messwerte reichen von minimal ca. 8, bis zu maximal ca. 34 N/mm². Die höchste Antenne nach oben trifft man vorne lateral an, der kleinste Wert wurde hinten medial gemessen. Insgesamt erreichen die Prüfkörperchen der beiden vorderen Lokalisationen minimal höhere Werte als die der hinteren. Vergleicht man die Werte vorne medial und lateral sowie hinten medial und lateral, so zeigt sich, dass die lateralen Werte jeweils geringfügig höher ausfallen als die medialen. Das obere Quartil vorne lateral beispielsweise liegt bei 30 N/mm², vorne medial befindet sich das obere Ende der Box bei etwas über 24 N/mm². Hinten lateral liegen die Messergebnisse näher beieinander als bei den anderen drei Plots, die weiteste Streuung findet man vorne lateral, wo insgesamt die höchsten Werte erzielt werden. Das mit ca. 30 N/mm² höchste obere Quartil kann vorne lateral beobachtet werden, ebenso das höchste untere Quartil mit rund 18 N/mm². Bei ca. 21 N/mm² rangiert das niedrigste obere Quartil. Es gehört, ebenso wie das niedrigste untere Quartil, welches bei annähernd 14 N/mm² liegt, zu hinten medial.

5.2.2.4 15%

8 Tiere gehörten zu der Bullengruppe, der eine Mastration mit 15% Rohproteinanteil gefüttert wurde. Da drei Proben nicht in die Auswertung einfließen (43-8, 411-7, 411-8), standen 61 Messergebnisse zu Verfügung und werden in Abbildung 27 dargestellt.

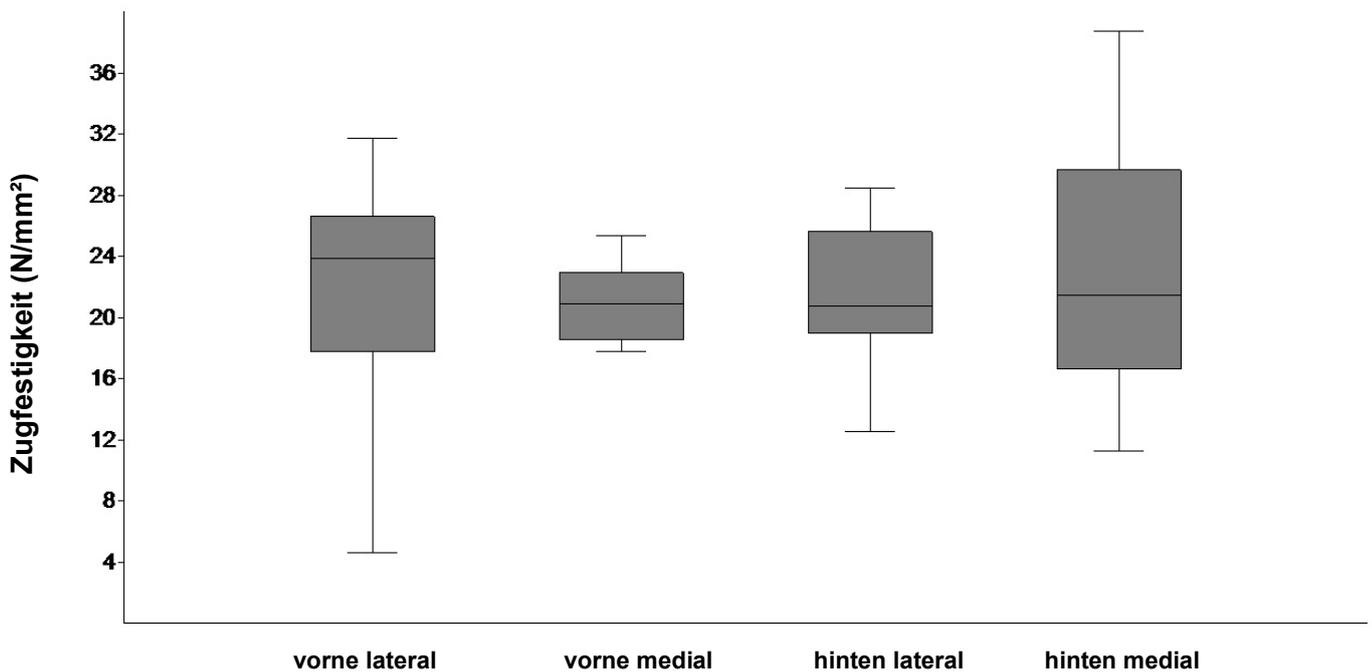


Abbildung 27 Darstellung der Zugfestigkeit in der 15%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben

Insgesamt wurden in der 15%-Gruppe Werte zwischen etwa 5 N/mm² und ca. 38 N/mm² gemessen, wobei die höchste Antenne hinten medial auftaucht und vorne lateral die niedrigste. Es fällt auf, dass die Mediane alle nahezu auf einer Linie um die 20 N/mm² liegen. Lediglich der Median von vorne lateral liegt unwesentlich höher bei rund 24 N/mm². Vorne medial liegen die Messergebnisse am dichtesten beieinander. Hier findet man sowohl das höchste untere, 18 N/mm² als auch das niedrigste obere Quartil, 23 N/mm². Im Gegensatz dazu sind die Ergebnisse hinten medial am weitesten gestreut. Das höchste obere und auch das niedrigste untere Quartil können in diesem Plot abgelesen werden. Sie liegen bei 29 bzw. 16 N/mm².

Die Unterschiede zwischen Schulter- und Beckengliedmaße sind in der 15%-Gruppe weniger deutlich als in anderen Gruppen. Auch die Tendenz, lateral höhere Werte zu finden als medial, zeigt sich in der 15%-Gruppe nur bei den Schultergliedmaßen.

5.2.2.5 17%

Die 17%-Gruppe stellte mit 10 untersuchten Tieren die stärkste Gruppe des Versuchs. Da von allen Tieren alle 8 Proben untersucht werden konnten, flossen in Abbildung 28 insgesamt 80 Ergebnisse ein.

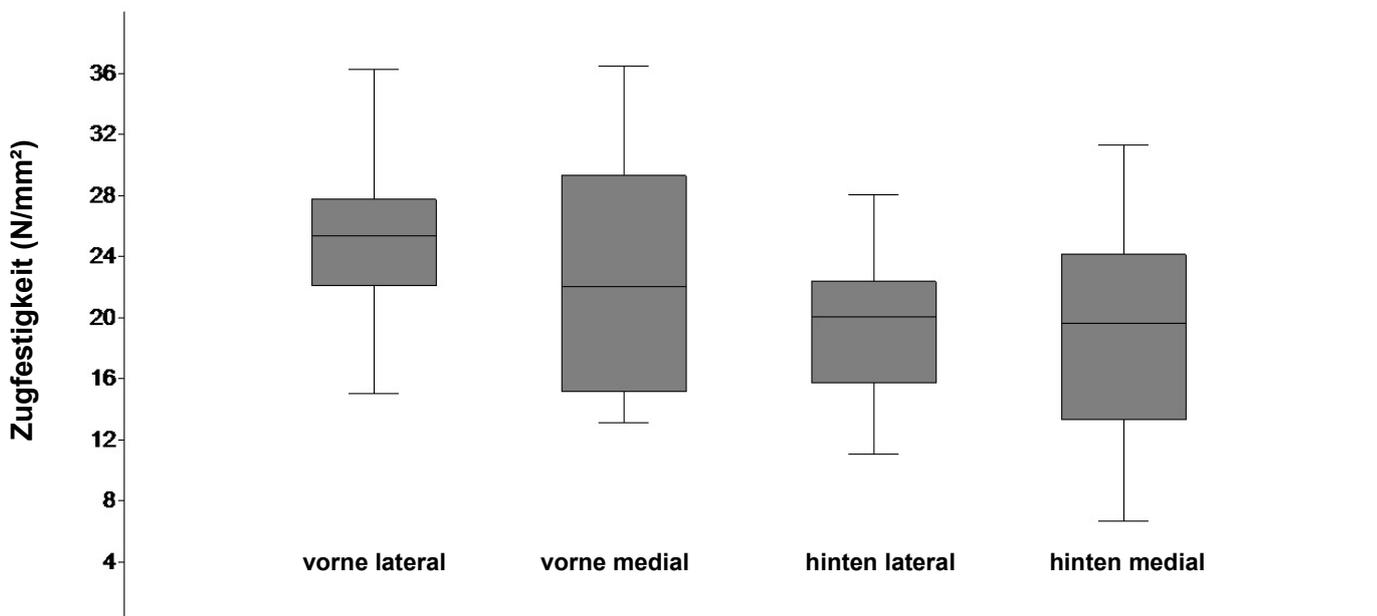


Abbildung 28 Darstellung der Zugfestigkeit in der 17%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben

In Abbildung 28 werden die Ergebnisse der 17%-Gruppe betrachtet. Die Gesamtheit der Ergebnisse liegt in etwa zwischen 6 N/mm² und 36 N/mm². Der Median bewegt sich zwischen 19 und 25 N/mm², wobei er vorne lateral am höchsten und hinten medial am tiefsten ist. Dazwischen fällt er von links nach rechts ab. Im Vergleich vorne lateral zu vorne medial ist der Median der lateralen Messwerte merklich höher als der der medialen (25 N/mm² zu 21 N/mm²). Das höhere obere Quartil weisen jedoch mit 30 N/mm² gegenüber 20 N/mm² die medialen Proben auf. An den

Hintergliedmaßen zeigt sich ein ähnliches Bild, wenn auch der Unterschied der beiden Mediane nicht so deutlich ist. Aber auch hier ist der Median hinten lateral höher, nämlich bei ca. 20 N/mm², das obere Quartil hingegen hinten medial. Es liegt bei ca. 24 N/mm², während das obere Quartil hinten lateral nur etwa 22 N/mm² erreicht. Das höhere untere Quartil findet man vorne wie auch hinten bei den lateralen Ergebnissen. Vorne lateral liegt es etwa bei 22 N/mm², vorne medial nur bei ungefähr 15 N/mm². Das insgesamt höchste obere Quartil liest man vorne medial ab, das niedrigste hinten lateral. Hinten medial zeigt sich das niedrigste untere Quartil, das höchste vorne lateral. Die vorderen Werte überstiegen insgesamt die hinteren leicht.

5.2.2.6 Vorne lateral

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Zugversuche an den einzelnen Lokalisationen mithilfe der Darstellung als Boxplots verglichen. In Abbildung 29 sind alle Ergebnisse abgebildet, die an den vorderen lateralen Klauen gemessen wurden. Sowohl diejenigen der proximalen als auch die der distalen Prüfkörperchen. Auf einer separate Darstellung der Ergebnisse proximal und distal getrennt wurde verzichtet, da die Ergebnisse an beiden Lokalisationen erstens sehr ähnlich waren und zweitens die Aussagekraft der Ergebnisse durch eine höhere Zahl an Werten verbessert werden sollte.

Die Y-Achse stellt wiederum den Wert dar, bei dem die Proben im Zugversuch jeweils versagten, angegeben in N/mm². Auf der X-Achse sind die Prozentzahlen des jeweiligen Rohproteinanteils der verschiedenen Fütterungsgruppen aufgetragen. Insgesamt beinhaltet die Grafik 78 Messergebnisse. Angaben zur Verteilung der einzelnen Proben auf die verschiedenen Gruppen sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Die Mediane aller Proben, die vorne lateral gemessen wurden, liegen zwischen 17 und 27 N/mm². In der 9%-Gruppe ist der Median auf dem niedrigsten Niveau, den höchsten Median verzeichnet die Gruppe mit 11%-Rohproteinanteil. Die Mediane bei 13 % und 15% liegen etwa auf gleicher Höhe bei ca. 24 N/mm², bei 17% ist der Median ein kleines bisschen höher. Eine vergleichbare Verteilung beobachtet man auch bei den 75%-Quartilen. Das mit 19 N/mm² kleinste obere Quartil gehört zu 9%, das höchste obere Quartil teilen sich 11% und 13%, es liegt bei etwa 30 N/mm².

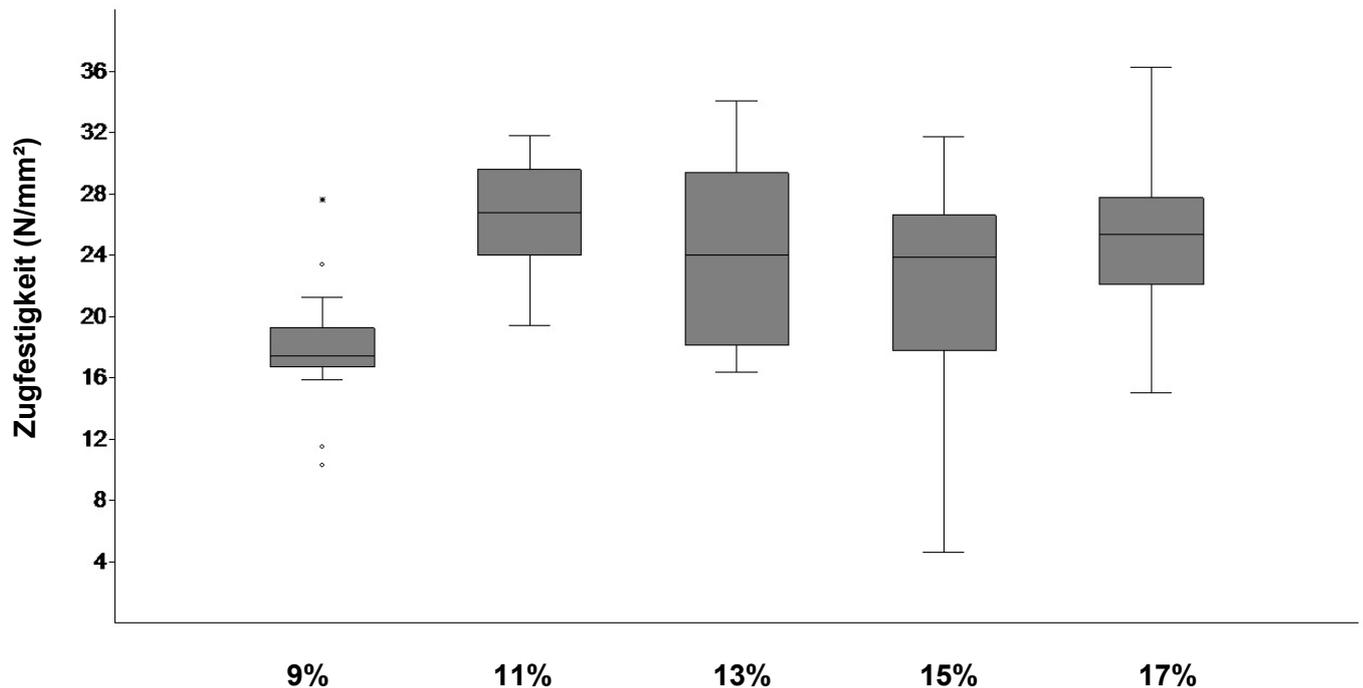


Abbildung 29 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben vorne lateral, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen

Auch das kleinste untere Quartil, ca. 16 N/mm², stammt aus der 9%-Gruppe. Etwas höher (ca. 18 N/mm²) liegen die unteren Quartile bei 13% und 15%, das untere Quartil der 17%-Gruppe rangiert bei knapp 21 N/mm². Spitzenreiter mit 24 N/mm² ist abermals die Gruppe 11%. Insgesamt wurden vorne lateral Ergebnisse zwischen 4 und 36 N/mm² gemessen. Die längsten Antennen nach unten verzeichnet die 15%-Gruppe. Bei den Antennen nach oben liegt 17% knapp vor 13%. 9% bewegt sich mit allen Werten im Mittelfeld. Hier liegen auch die mittleren 50% der Daten am dichtesten beieinander (ca. 3 Messpunkte). Allerdings gibt es einige Ausreißer nach oben, wie auch nach unten. Den weitesten Interquartilsabstand, ca. 11 Messpunkte, weisen die Werte der 13%-Gruppe auf.

5.2.2.7 Vorne medial

Vorne medial wurden insgesamt 77 Messergebnisse verwertet.

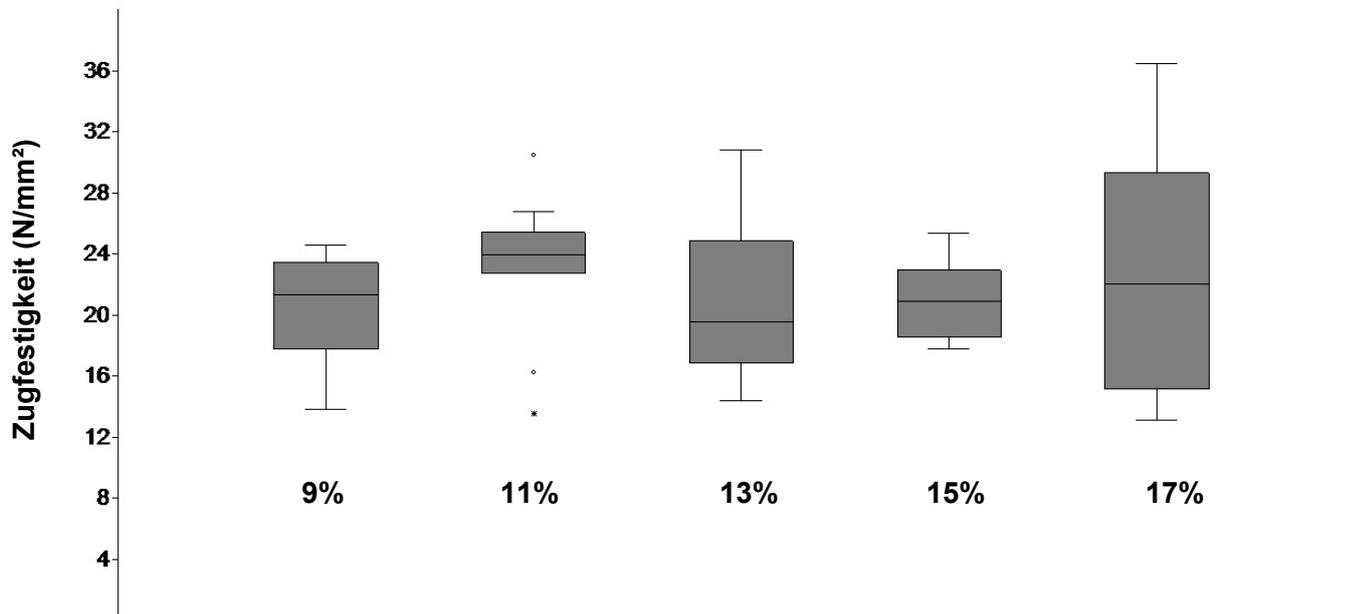


Abbildung 30 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben vorne medial, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen

Vorne medial gehören sowohl der höchste als auch der niedrigste gemessene Wert in die 17%-Gruppe. Der höchste Wert liegt dabei bei ca. 36 N/mm², der niedrigste bei ca. 12 N/mm². Auch innerhalb der beiden Quartile liegen die Werte bei 17% weiter auseinander als bei den anderen Gruppen. Das obere Quartil rangiert bei 29 N/mm² und ist somit das höchste in Abbildung 30. Das untere Quartil, welches etwa bei 15 N/mm² liegt, ist hingegen bei 17% das niedrigste aller Gruppen. Bei ca. 23 N/mm² liegt das niedrigste obere Quartil. Es gehört zur Gruppe mit 15% Rohproteinanteil in der Mastration. Das mit ca. 23 N/mm² höchste untere Quartil weist, ebenso wie den höchsten Median, die 11%-Gruppe auf. Letzterer liegt bei annähernd 24 N/mm². Den niedrigsten Median, der etwa bei 19 N/mm² liegt, hat die Gruppe mit 13% inne. Bei 11% liegen die Werte zwischen den beiden Quartilen nur etwa 3 Messpunkte auseinander, was den kleinsten Interquartilsabstand innerhalb dieser Grafik bedeutet.

5.2.2.8 Hinten lateral

Hinten lateral konnten insgesamt 76 Proben ausgewertet werden.

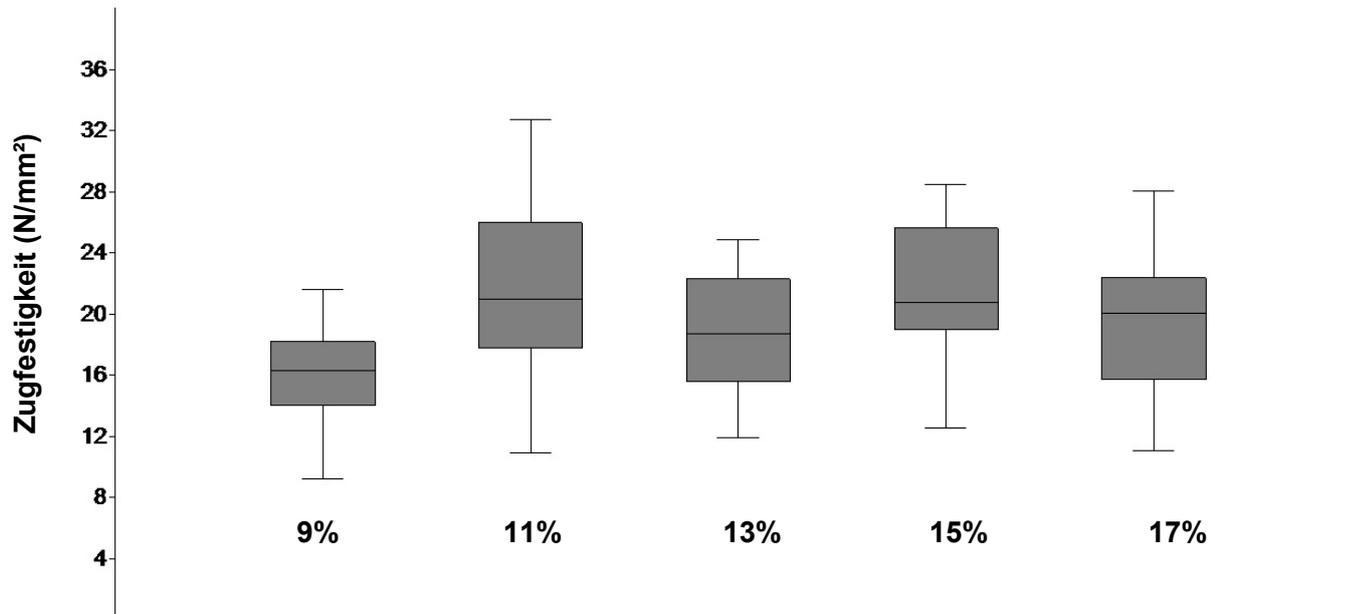


Abbildung 31 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben hinten lateral, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen

Hinten lateral liegt der höchste gemessene Wert bei knapp 33 N/mm² und gehört in die Gruppe der Bullen, die 11% Rohproteinanteil im Mastfutter hatten. Den niedrigsten Wert verzeichnet die 9%-Gruppe mit ca. 9 N/mm². Dies liegt nur wenige N/mm² unter den niedrigsten Werten der restlichen Gruppen. Auch die Werte der mittleren 50% der Daten liegen in Abbildung 31 vergleichsweise nah beieinander: Das niedrigste untere Quartil (9%) bemisst sich auf ca. 14 N/mm², das höchste obere Quartil (11%) auf ca. 26 N/mm². Das niedrigste obere Quartil und das höchste untere Quartil liegen beide bei etwa 18-19 N/mm². Ersteres gehört in die 9%-Gruppe, letzteres kann in der 15%-Gruppe beobachtet werden. Den niedrigsten Median verzeichnet mit ca. 16 N/mm² abermals die 9%-Gruppe. Die übrigen Mediane liegen jedoch mit 18 N/mm² (13%), 20 N/mm² (17%) und 21 N/mm² (11% und 15%) nicht wesentlich höher. Der Interquartilsabstand ist bei allen 5 Boxen ähnlich. Die 9%-Box ist geringfügig kleiner, die 11%-Box unwesentlich größer als die übrigen 3 Boxen.

5.2.2.9 Hinten medial

Es wurden insgesamt 74 Prüfkörperchen im Zugversuch getestet, die von vorne medial stammten. Die Abbildung 32 bildet diese Ergebnisse ab.

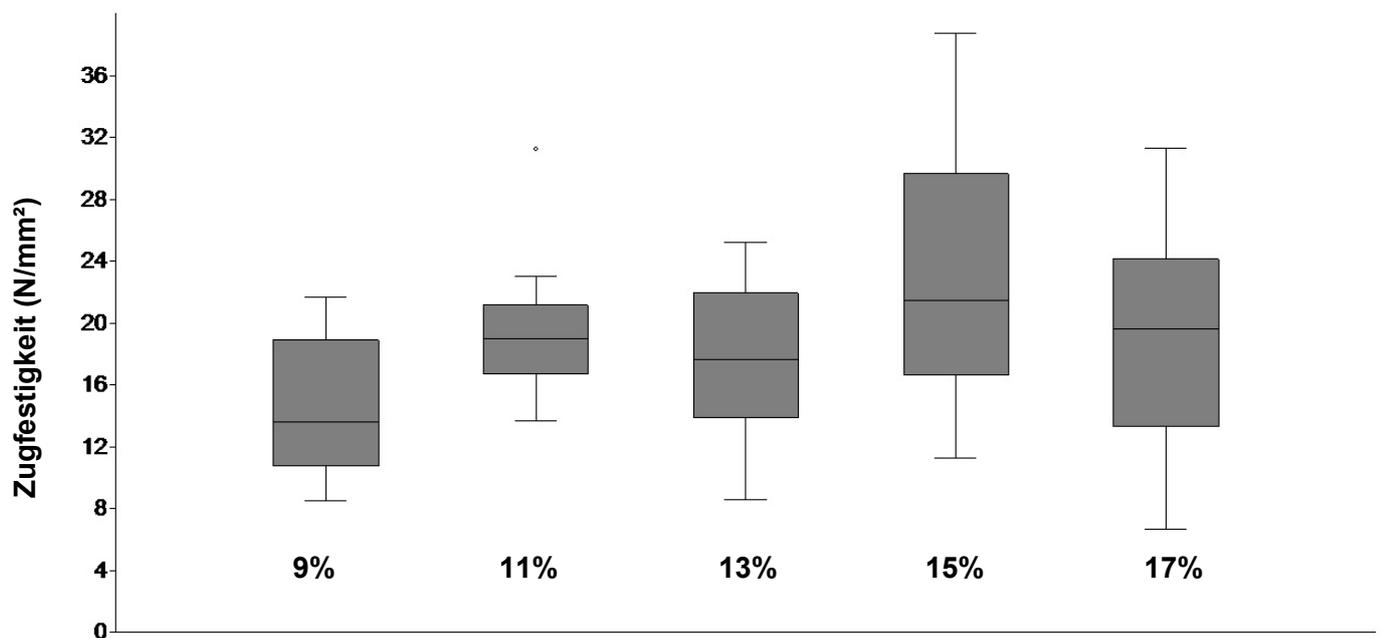


Abbildung 32 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben hinten medial, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen

Die Ergebnisse hinten medial variieren zwischen 6 N/mm², die bei der 17%-Gruppe auftraten, und maximal 38 N/mm², die bei 15% erreicht wurden. In derselben Fütterungsgruppe findet sich auch der höchste Median von ca. 21 N/mm². Den niedrigsten Median verzeichnet die 9%-Gruppe. Er liegt bei ca. 13 N/mm². Auch das mit etwa 10 N/mm² niedrigste untere Quartil und das bei ca. 18 N/mm² liegende niedrigste obere Quartil beobachtet man bei 9%. Das höchste obere Quartil liegt bei ca. 29 N/mm² und gehört zu 15%. Das höchste untere Quartil, das bei knapp 17 N/mm² liegt, weist die 11%-Gruppe auf. Diese Gruppe hat auch den kleinsten Interquartilsabstand: Die Werte zwischen den beiden Quartilen liegen ca. 5 Messpunkte auseinander. Den größten Abstand zwischen oberem und unterem

Quartil weist die Gruppe auf, die mit 15% Rohproteinanteil gefüttert wurde. Der Interquartilsabstand in dieser Gruppe beträgt ca. 13 Messpunkte.

5.2.2.10 Zusammengefasste Ergebnisse

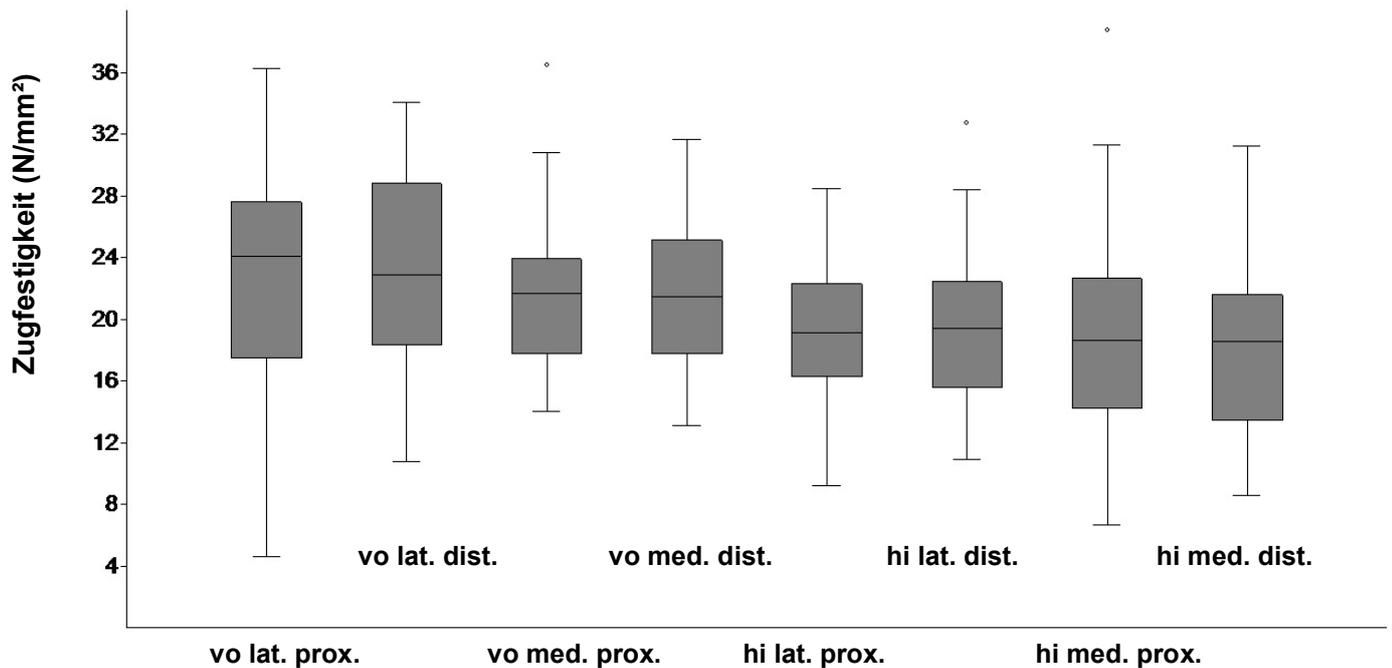


Abbildung 33 Ergebnisse aller Messungen, aufgeschlüsselt nach Lokalisation

In Abbildung 33 sind die Ergebnisse der Zugversuche aus allen 5 Fütterungsgruppen zusammen in Boxplots dargestellt. Die Y-Achse zeigt wieder die Zugfestigkeit, angegeben in N/mm^2 . Auf der X-Achse sind die 8 verschiedenen Entnahmestellen der Prüfkörperchen aufgetragen. Die Zugfestigkeit reicht von minimal 5 N/mm^2 bei vorne lateral proximal, bis hin zu 38 N/mm^2 , die ein einzelner Ausreißer hinten medial proximal erreicht. Die höchste Antenne nach oben hat ebenfalls der Plot vorne lateral proximal. Sie reicht hinauf bis ca. 36 N/mm^2 . Das höchste obere Quartil liegt bei ca. 29 N/mm^2 und wird vorne lateral distal erreicht. Auch das höchste untere Quartil, welches bei etwa 18 N/mm^2 liegt, kann vorne lateral distal abgelesen werden. Hinten lateral proximal zeigt sich das niedrigste obere Quartil, was bei ca. 22 N/mm^2 positioniert ist. Das niedrigste 25%-Quartil ist hinten medial distal zu verzeichnen. Es beträgt ca. 13 N/mm^2 . Betrachtet man die Mediane aller Boxen, so fallen sie von links

nach rechts sanft ab. Dabei liegen die beiden Mediane einer Klaue, z.B. vorne medial proximal und vorne medial distal, jeweils fast vollständig gleichauf. Eine Ausnahme hierbei stellen nur die beiden Boxen vorne lateral dar. Hier liegt der Median vorne lateral proximal ein wenig höher als distal und ist mit ca. 24 N/mm² der höchste Median in der Abbildung. Bei etwa 18 N/mm² liegen die niedrigsten Mediane, diejenigen der beiden Boxen hinten medial. Den mit 6-7 Messpunkten kleinsten Interquartilsabstand haben die Boxen vorne medial proximal und hinten lateral proximal. Vorne medial distal, hinten lateral distal, hinten lateral und hinten medial verfügen über einen etwas größeren Abstand von ca. 8-9 Messpunkten zwischen den beiden Quartilen. Den mit 11 bzw. 12 Messpunkten größten Interquartilsabstand weisen die Plots vorne lateral proximal und vorne lateral distal auf.

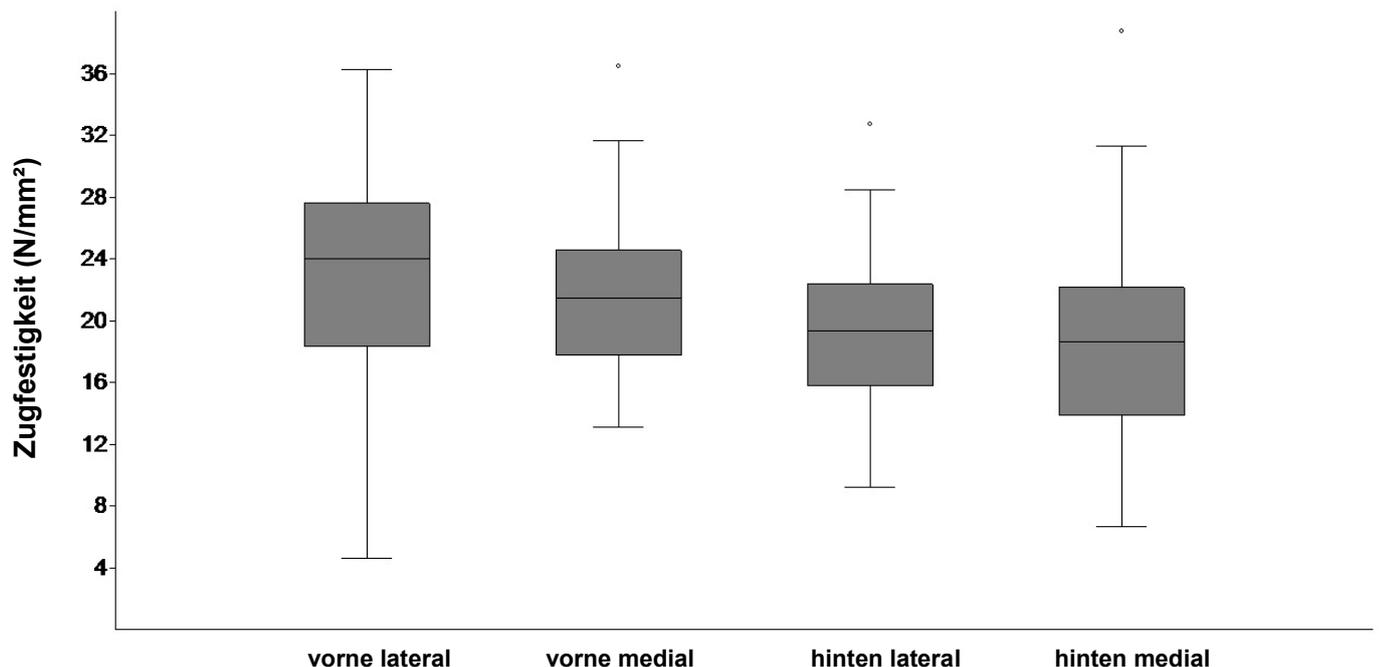


Abbildung 34 Ergebnisse aller Messungen, Messwerte der proximalen und distalen Prüfkörperchen gemittelt

In Abbildung 34 sind gleichfalls die Messergebnisse aller Fütterungsgruppen, nach Lokalisation geordnet, abgebildet. Die proximalen und distalen Ergebnisse einer Klaue sind in diesem Fall allerdings gemeinsam dargestellt, weshalb nur zwischen vorne lateral, vorne medial, hinten lateral und hinten medial unterscheiden wird.

Der Wertebereich der Daten ist analog dem in Abbildung 33 beschriebenen. Die nach oben und unten längste Antenne weist vorne lateral auf. Von links nach rechts werden die Werte der übrigen Boxen niedriger, lediglich die obere Antenne hinten medial löst die Linearität der drei Plots auf, indem sie die Antenne hinten lateral überragt. Das höchste obere und untere Quartil ist jeweils vorne lateral zu verzeichnen. Das obere liegt bei ca. 27 N/mm², das untere bei ca. 18 N/mm². Das mit etwa 13 N/mm² niedrigste untere Quartil weist hinten medial auf. Die oberen Quartile hinten lateral und medial liegen auf gleicher Höhe bei ca. 22 N/mm² und somit unter den anderen 75%-Quartilen. Auch die Mediane nehmen von vorne lateral (24 N/mm²) über vorne medial (22 N/mm²) und hinten lateral (19 N/mm²) nach hinten medial ab. Dort erreicht der Median nur noch einen Wert von rund 18 N/mm². Die Messergebnisse vorne medial und hinten lateral liegen mit einem Interquartilsabstand von etwa 7 Messpunkten etwas dichter beieinander als hinten medial, wo die beiden Quartile ca. 9 Messpunkte auseinander liegen. Den größten Interquartilsabstand verzeichnet vorne lateral. Er bemisst sich auf knapp 10 Messpunkte.

Um die Unterschiede an den verschiedenen Lokalisationen noch deutlich darzustellen, wurden für

Abbildung 35 Mittelwerte aller Messergebnisse nach Lokalisationen

jeweils gruppenweise die Mittelwerte der Messergebnisse gebildet. Für die Box ganz links in der Abbildung wurden beispielsweise aus allen Ergebnissen, die vorne lateral gemessen wurden, in jeder der 5 Fütterungsgruppen der Mittelwert errechnet. Diese 5 Werte wurden dann der Grafik zugrunde gelegt. Auf diese Weise wurden extreme Ausreißer aus den Ergebnissen herausgefiltert. Die Werte reichen bei dieser Form der Datendarstellung von 16 N/mm² bis maximal 26 N/mm². Der höchste Wert wird vorne lateral erreicht, der niedrigste hinten lateral. Allerdings weist hinten medial einen einzelnen Ausreißer auf, der bei ca. 15 N/mm² und somit noch darunter liegt. Als Mittelwerte ausgedrückt zeigen die Daten einen noch anschaulicheren Abstieg der Zugfestigkeit von links nach rechts: Sowohl das höchste obere und untere Quartil als auch der höchste Median kann vorne lateral beobachtet werden. Hinten medial liegen die Werte am dichtesten beieinander. Antennen sind in dieser Box gar keine ausgebildet, es gibt lediglich je einen Ausreißer nach oben und unten. Bei der Box

vorne lateral liegen oberes und unteres Quartil am weitesten voneinander entfernt. Ihr Abstand beläuft sich auf rund 3 Messpunkte.

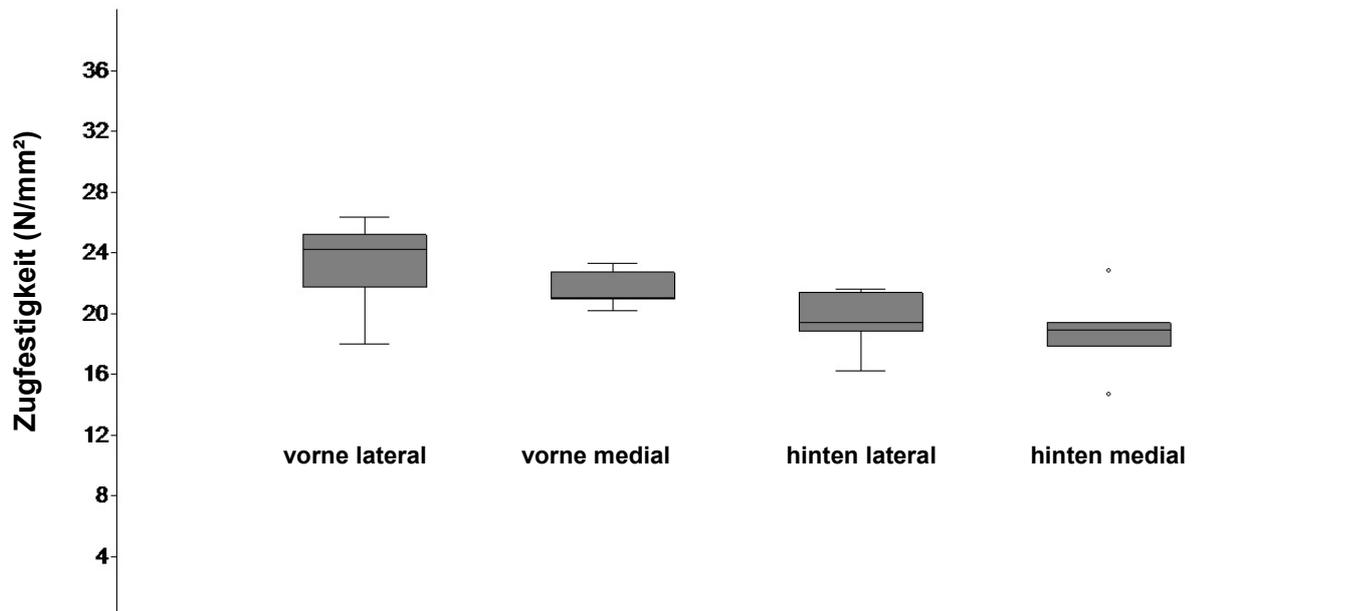


Abbildung 35 Mittelwerte aller Messergebnisse nach Lokalisationen

Nach den verschiedenen Fütterungsgruppen sortiert ist die Gesamtheit aller Messwerte in Abbildung 36 dargestellt. Eine Box enthält jeweils alle Ergebnisse, die innerhalb einer Fütterungsgruppe über alle 8 Entnahmestellen gemessen wurden. Die Werte reichen dabei von 6 N/mm² bis zu 36 N/mm², wobei Minimum und Maximum beide aus der 17%-Gruppe stammen. In der Gruppe mit 15% Rohprotein gibt es jedoch sowohl einen Ausreißer nach oben, der ca. 38 N/mm² erreicht als auch einen Ausreißer nach unten, der nur etwa 5 N/mm² erzielt. Die oberen Quartile von 11%, 15% und 17% liegen alle etwa bei 26 N/mm², das obere Quartil von der 13%-Gruppe liegt bei rund 24 N/mm². Das mit Abstand niedrigste obere Quartil weist 9% auf. Es liegt bei etwa 21 N/mm². Auch das mit ca. 14 N/mm² niedrigste untere Quartil findet man in der 9%-Gruppe. Das höchste untere Quartil (knapp 18 N/mm²) verzeichnet die Fütterungsgruppe, in der die Mastration 15% Rohprotein enthielt. Bei den Medianen stellt sich die Verteilung ähnlich dar. Den höchsten Median, der bei knapp 22 N/mm² liegt, kann man bei 11% ablesen, den niedrigsten, der sich auf etwa

17 N/mm² bemisst, bei 9%. Die Mediane der übrigen Gruppen bewegen sich alle zwischen 19 N/mm² und 21 N/mm². Der Interquartilsabstand der 17%-Gruppe ist mit ca. 11 Messpunkten etwas größer als die der anderen Boxen, bei denen die Quartile rund 7 Messpunkte auseinander liegen.

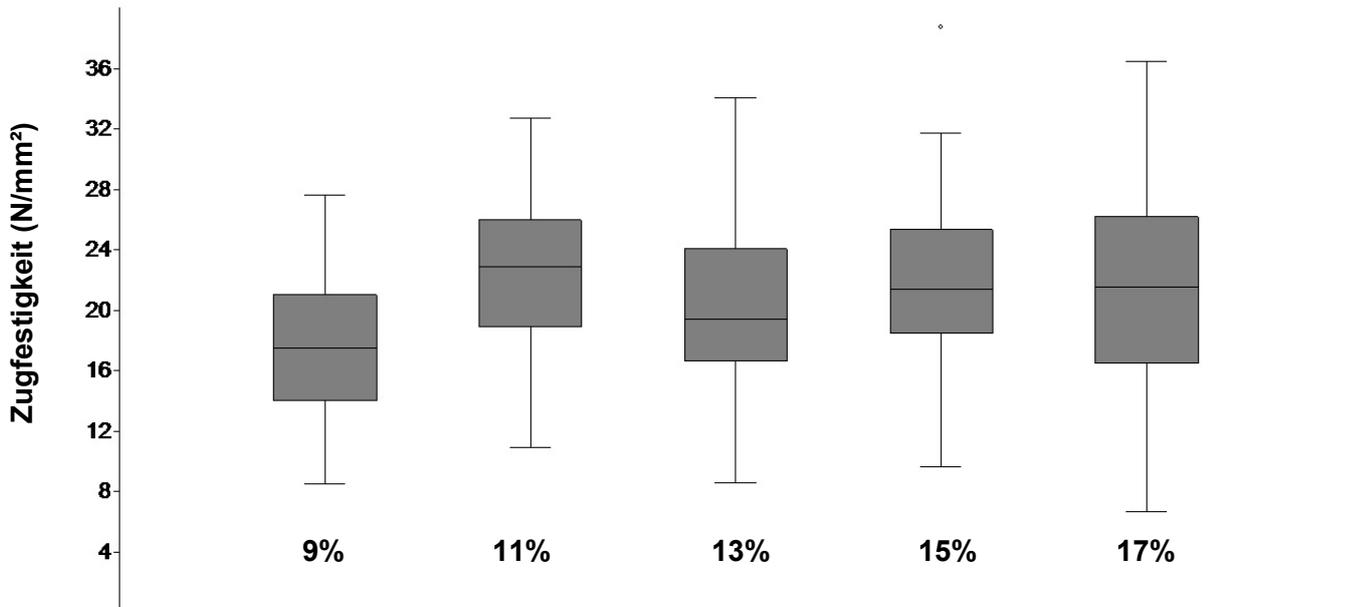


Abbildung 36 Ergebnisse aller Messungen nach Fütterungsgruppen

Tabelle 10 Zusammenfassung der grafischen Darstellung der Ergebnisse aus den Zugversuchen nach Fütterungsgruppen

	9% RP	11% RP	13% RP	15% RP	17% RP	gesamt
Höchster gemessener Wert	25 N/mm ² vorne medial	33 N/mm ² hinten lateral	34 N/mm ² vorne lateral	38 N/mm ² hinten medial	36 N/mm ² vorne lateral / medial	36 N/mm ² vorne lateral
Niedrigster gemessener Wert	8 N/mm ² hinten medial	10 N/mm ² hinten lateral	8 N/mm ² hinten medial	5 N/mm ² vorne lateral	6 N/mm ² hinten medial	5 N/mm ² vorne lateral
Höchster Median	17 N/mm ² vorne medial	27 N/mm ² vorne lateral	24 N/mm ² vorne lateral	24 N/mm ² vorne lateral	25 N/mm ² vorne lateral	24 N/mm ² vorne lateral
Niedrigster Median	13 N/mm ² hinten	19 N/mm ² hinten	18 N/mm ² hinten	20 N/mm ² hinten	18 N/mm ² hinten	19 N/mm ² hinten

	medial	medial	medial	lateral	medial	medial
Höchstes oberes Quartil	24 N/mm ² vorne medial	29 N/mm ² vorne lateral	30 N/mm ² vorne lateral	29 N/mm ² hinten medial	29 N/mm ² vorne medial	27 N/mm ² vorne lateral
Niedrigstes oberes Quartil	17 N/mm ² hinten lateral	20 N/mm ² hinten medial	21 N/mm ² hinten lateral / medial	22 N/mm ² vorne medial	16 N/mm ² hinten lateral	22 N/mm ² hinten lateral / medial
Höchstes unteres Quartil	17 N/mm ² vorne medial	24 N/mm ² vorne lateral	18 N/mm ² vorne lateral	18 N/mm ² hinten lateral	22 N/mm ² vorne lateral	18 N/mm ² vorne lateral
Niedrigstes unteres Quartil	11 N/mm ² hinten medial	16 N/mm ² hinten medial	13 N/mm ² hinten medial	16 N/mm ² hinten medial	12 N/mm ² hinten medial	13 N/mm ² hinten medial

Tabelle 11 Zusammenfassung der grafischen Darstellung der Ergebnisse aus den Zugversuchen nach Lokalisation

	Vorne lateral	Vorne medial	Hinten lateral	Hinten medial	gesamt
Höchster gemessener Wert	36 N/mm ² 17%	36 N/mm ² 17%	33 N/mm ² 11%	38 N/mm ² 15%	38 N/mm ² 15%
Niedrigster gemessener Wert	4 N/mm ² 15%	12 N/mm ² 17%	9 N/mm ² 9%	6 N/mm ² 17%	6 N/mm ² 17%
Höchster Median	27 N/mm ² 11%	24 N/mm ² 11%	21 N/mm ² 11% / 15%	21 N/mm ² 15%	22 N/mm ² 11%
Niedrigster Median	17 N/mm ² 9%	19 N/mm ² 13%	16 N/mm ² 9%	13 N/mm ² 9%	17 N/mm ² 9%
Höchstes oberes Quartil	30 N/mm ² 11% / 15%	29 N/mm ² 17%	26 N/mm ² 11%	29 N/mm ² 15%	26 N/mm ² 17%
Niedrigstes oberes Quartil	19 N/mm ² 9 %	23 N/mm ² 15%	18 N/mm ² 9%	18 N/mm ² 9%	21 N/mm ² 9%
Höchstes unteres Quartil	24 N/mm ² 11%	23 N/mm ² 11%	19 N/mm ² 15%	17 N/mm ² 11%	18 N/mm ² 15%
Niedrigstes unteres Quartil	16 N/mm ² 9%	15 N/mm ² 17%	14 N/mm ² 9%	10 N/mm ² 9%	14 N/mm ² 9%

5.2.3 Statistische Auswertung

Aufgrund der geringen Anzahl an Proben haben die Ergebnisse aus den Zugversuchen nur eingeschränkte statistische Aussagekraft und sind unter Vorbehalt zu bewerten. Um die Ergebnisse zu verifizieren, müsste eine deutlich größere Zahl von Proben in die Statistik einbezogen werden.

Für die mittlere Zugfestigkeit (maximale Zugkraft pro mm²) wurde vorne lateral ein Wert von $23 \pm 5,74$ N/mm² (zwischen 10,85 und 32,08 N/mm²) ermittelt. Vorne medial lag dieser Wert bei $21,64 \pm 4,78$ N/mm² (14,19-33,32 N/mm²). Hinten lateral lag die mittlere Zugfestigkeit bei $19,34 \pm 4,08$ N/mm² (11,2-27,72 N/mm²), hinten medial bei $18,93 \pm 6,16$ N/mm² (9,13-38,74 N/mm²).

Tabelle 12 Zusammenfassung der statistischen Messergebnisse aus den Zugversuchen

RP 9%		Körpermasse	Vorne lateral	Vorne medial	Hinten lateral	Hinten medial
	Mittelwert	540,13	17,98	20,17	16,14	14,64
	Standardabweichung	31,33	3,27	3,4	2,71	4,13
	Minimum	496	10,85	15,77	11,2	9,13
	Maximum	583	21,73	24,33	19,86	21,34
RP 11%						
	Mittelwert	652,83	26,32	23,33	21,17	19,42
	Standardabweichung	32,10	3,95	4,37	4,62	3,71
	Minimum	612	19,59	14,85	13,99	16,67
	Maximum	703	30,50	27,61	26,21	26,69
RP 13%						
	Mittelwert	733,714	24,22	21,05	18,8	18,29
	Standardabweichung	51,98	5,82	4,95	3,73	4,5
	Minimum	655	16,84	15,62	12,57	11,02
	Maximum	795	31,24	29,01	22,63	23,7
RP 15%						
	Mittelwert	764,38	21,74	20,99	21,61	23,41
	Standardabweichung	30,09	7,15	2,44	4,13	8,31
	Minimum	720	12,03	18,17	16,89	12,57
	Maximum	794	28,87	24,3	27,76	38,74

RP 17%						
	Mittelwert	737,8	25,19	22,74	19,41	18,94
	Standardabweichung	61,54	4,69	7,08	3,74	6,1
	Minimum	654	16,02	14,19	13,79	11,14
	Maximum	818	32,08	33,32	26,20	28,34
Gesamt						
	Mittelwert	688,9	23	21,64	19,35	18,93
	Standardabweichung	94,18	5,74	4,78	4,08	6,16
	Minimum	496	10,85	14,19	11,2	9,13
	Maximum	818	32,08	33,32	27,76	38,74

Mittels einer ANOVA-Analyse (univariate Varianzanalyse) wurden die Ergebnisse der einzelnen Lokalisationen zwischen den Gruppen und innerhalb der Gruppen gegeneinander ausgewertet. Einzig bei den Ergebnissen vorne lateral gab es dabei signifikante Unterschiede zum Rest der Ergebnisse zu verzeichnen ($p < 0,05$).

Auch beim Vergleich der Körpermasse zwischen den Gruppen waren die Unterschiede signifikant.

Aufgrund der Tatsache, dass sich sowohl bei der Zugfestigkeit als auch bei der Körpermasse (s. Abbildung 8, Abbildung 37) die Werte der 9%-Gruppe von denen der übrigen Fütterungsgruppen deutlich unterschieden, wurde bei der weiteren Datenanalyse jeweils die 9%-Gruppe gegen die vier anderen Gruppen analysiert.

Im Dunnett.T-Test wurde die 9%-Gruppe als Steuerungsgruppe definiert, und alle anderen Gruppen einzeln mit ihr verglichen. Vorne lateral unterschieden sich die Ergebnisse der Gruppe 9% signifikant von den Ergebnissen der Gruppen mit 11% und 17% Rohproteinanteil. Vorne medial konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Hinten lateral und hinten medial unterschied sich die 15%-Gruppe signifikant von der 9%-Gruppe.

Bei der Analyse mittels Pillai-Spur wurde deutlich, dass die Lokalisation einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit hat. Keine Signifikanz konnte für den Effekt von Lokalisation*Rohprotein nachgewiesen werden ($p < 0,01$).

Laut Mauchly-Test lässt sich keine signifikante Abweichung von der Sphärizität verzeichnen.

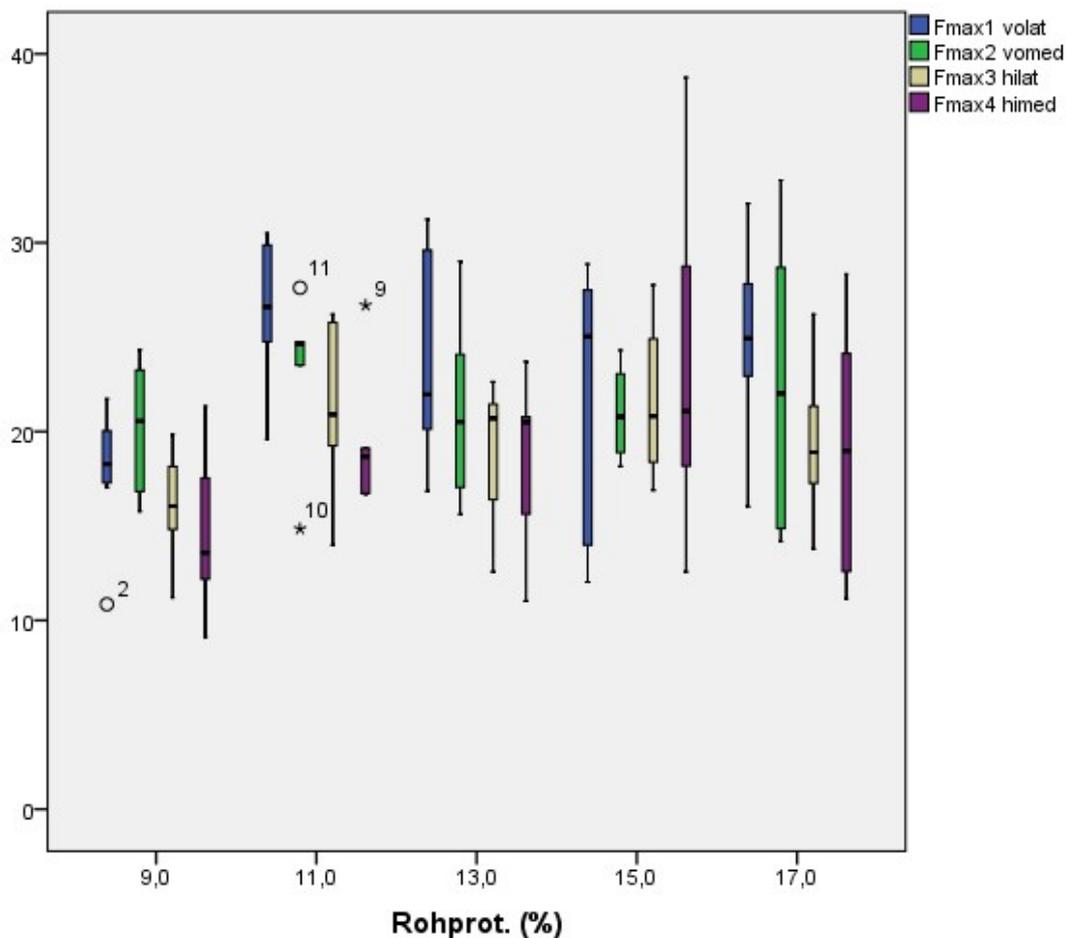


Abbildung 37 Maximale Zugfestigkeit nach Lokalisation und Fütterungsgruppe sortiert

Mittels T-Test wurde binär die 9%-Gruppe mit den zusammen genommenen Werten der Gruppen >9% verglichen. Außer vorne medial unterschieden sich die Ergebnisse an allen Lokalisationen signifikant ($p < 0,05$). Auch in diesem Fall konnte anhand der Pillai-Spur der Einfluss der Lokalisation auf die Zugfestigkeit als signifikant nachgewiesen werden ($p < 0,001$). Zu etwa 44% wird die Zugfestigkeit durch die Lokalisation beeinflusst.

Im Vergleich der Lokalisationen miteinander zeigten sich bei der Analyse über alle 5 Gruppen, dass die Zugfestigkeit vorne lateral signifikant höher lag als die Zugfestigkeit hinten lateral und hinten medial ($p < 0,05$). Auch die Zugfestigkeiten vorne medial und hinten lateral unterschieden sich signifikant voneinander.

Innerhalb der 9%-Gruppe konnten zwischen den Lokalisationen keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

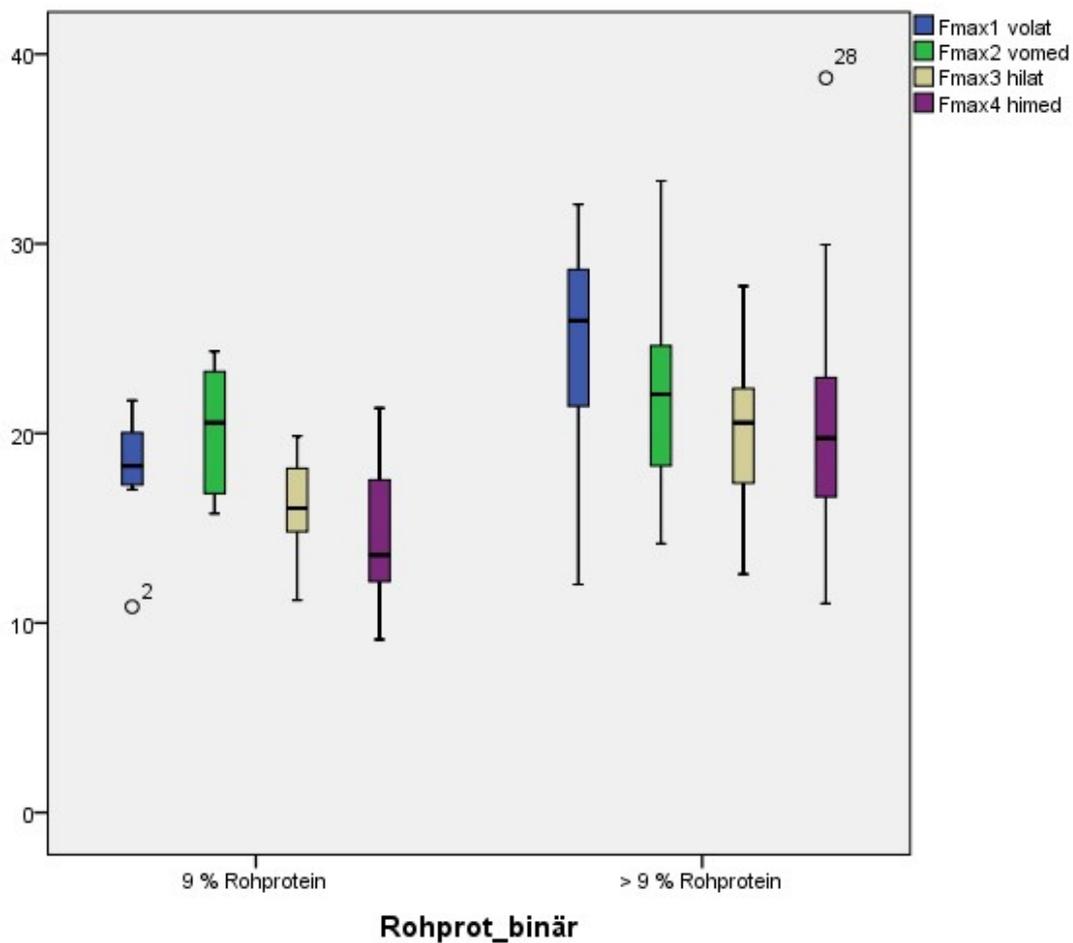


Abbildung 38 Maximale Zugfestigkeiten der 9%-Gruppe im Vergleich zu den Gruppen >9%

Die Werte der Gruppen >9% wurden ebenfalls über die verschiedenen Lokalisationen miteinander verglichen. Wie auch bei der Analyse der Gesamtwerte zeigten sich auch hier signifikante Unterschiede der Zugfestigkeitswerte vorne lateral zu den hinten lateral und hinten medial gemessenen Zugfestigkeiten ($p < 0,05$), wobei jeweils vorne lateral ein signifikant höherer Wert erreicht wurde.

Tabelle 13 Vergleich der Zugfestigkeiten zwischen den verschiedenen Lokalisationen

(I) Lokalisation	Mittelwertdifferenz (I-J)	Standardfehler	Sig. ^b	95 % Konfidenzintervall für Differenz ^b		
				Untergrenze	Obergrenze	
1	2	1,36	,93	,92	-1,24	3,96
	3	3,65*	,82	,00	1,36	5,94
	4	4,07*	,93	,00	1,48	6,67
2	1	-1,36	,93	,92	-3,96	1,24
	3	2,29*	,77	,03	,16	4,42

	4	2,71	1,12	,12	-,41	5,83
3	1	-3,65*	,82	,00	-5,94	-1,36
	2	-2,29*	,77	,03	-4,42	-,16
	4	,42	,92	1,00	-2,15	2,983
4	1	-4,07*	,93	,00	-6,67	-1,48
	2	-2,71	1,12	,12	-5,83	,41
	3	-,42	,92	1,00	-2,98	2,15

Basierend auf geschätzten Randmitteln

*. die Mittelwertdifferenz ist auf der Stufe 0,05 signifikant.

b. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Lokalisation 1 = vorne lateral, 2 = vorne medial, 3 = hinten lateral, 4 = hinten medial

5.2.4 Fazit

Das Fazit, was man unter Berücksichtigung der geringen Gesamtzahl an Proben ziehen kann ist, dass die Lokalisation einen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit des Klauenhorns hat. So lagen die Werte in allen Gruppen vorne lateral signifikant höher als an den beiden Hintergliedmaßen. Die Zugfestigkeit vorne medial war auch deutlich höher als hinten, eine Signifikanz konnte aber nicht nachgewiesen werden. Es ist wahrscheinlich, dass sich dies bei einer höheren Zahl an Proben anders dargestellt hätte.

Der Einfluss des Rohproteingehaltes in der Futtermittelration scheint bis zu einem gewissen Wert Einfluss zu haben, da die 9%-Gruppe signifikant niedrigere Werte aufwies als die Fütterungsgruppen mit einem höheren Anteil an Rohprotein. Darüber hinaus konnten zwischen den verschiedenen Fütterungsgruppen keine signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden. Eine mögliche Korrelation zwischen Körpergewicht und Zugfestigkeit des Klauenhorns innerhalb der verschiedenen Fütterungsgruppen ist in Abbildung 41 dargestellt.

6 Diskussion

6.1 Methodik

6.1.1 Auswahl der Entnahmestelle

Für die Zugversuche sollten Proben aus reinem Kronhorn verwendet werden, deren Oberfläche möglichst wenig gekrümmt sein sollte. Die Prüfkörperchen aus einem Bereich dorsal an der Klaue zu entnehmen war also ebenso wenig möglich, wie sie aus dem Ballen- oder Sohlenbereich zu entnehmen. Die Fläche an der gewählten Entnahmestelle weist die geringste Krümmung und eine homogene Hornqualität auf. Je weiter distal an der Klaue man geht, desto abgenutzter wird zum Teil das Horn. In der Studie von Maierl et al., die sich mit den biomechanischen Verhältnissen des Aufhängeapparats des Klauenbeins beschäftigte, wurden an der Testposition, die am ehesten mit der hier gewählten Lokalisation vergleichbar ist, an allen vier Klauen signifikant höhere Zugfestigkeiten gemessen als an den drei übrigen Testpositionen. Dies ist den Autoren zufolge darauf zurückzuführen, dass das Wandsegment der Klaue in diesem Bereich höheren Belastungen ausgesetzt ist (MAIERL et al., 2002). Auch dieses Ergebnis wurde bei der Wahl der Entnahmestelle zugrunde gelegt. Zu vergleichbaren Ergebnissen kam 2006 auch Widauer, die zeigte, dass die Verbindung des Klauenbeins mit dem Hornschuh im abaxialen Teil des Wandsegments signifikant am stabilsten ist (WIDAUER, 2006).

Bohli kam 1993 in einem ähnlichen Versuchsaufbau wie dem vorliegenden zu dem Ergebnis, dass die Zugfestigkeit im axialen Wandbereich höher ist als im abaxialen (BOHLI, 1993). Allerdings wäre eine Entnahme an dieser Stelle aus oben genannten Gründen für das angestrebte Ziel nicht sinnvoll gewesen.

6.1.2 Ausrichtung der Hornröhrchen innerhalb der Prüfkörperchen

In der vorliegenden Arbeit wurden die Prüfkörperchen so produziert, dass sie im rechten Winkel zur Ausrichtung der Hornröhrchen zerrissen wurden (s. Abbildung 39). Da die durch das Körpergewicht ausgeübte Kraft jedoch parallel zu den Hornröhrchen wirkt, laut Toussaint Raven wirkt das Gewicht als Kraft in Richtung der longitudinalen Achse des Fesselbeines (TOUSSAINT RAVEN, 2003f), ist

anzunehmen, dass bei einem Versuchsaufbau mit Zugrichtung parallel zur Ausrichtung der Hornröhrchen (s. Abbildung 39) höhere Zugfestigkeitswerte hätten erzielt werden können. Ergebnisse aus institutsinternen Versuchen, die nicht publiziert wurden, konnten diese Annahme bestätigen.

Da sowohl Bohli (BOHLI, 1993) als auch die „Bestimmungen für die Verleihung und Führung des DLG-Qualitätssiegels für Mittel zur Klauenpflege und Klauenhygiene“ der DLG (DLG, 2011) für ihre Zugversuche die Zugrichtung im rechten Winkel zur Ausrichtung der Hornröhrchen wählten, wurden die Prüfkörperchen in der vorliegenden Arbeit im Sinne der Vergleichbarkeit in gleicher Weise hergestellt.

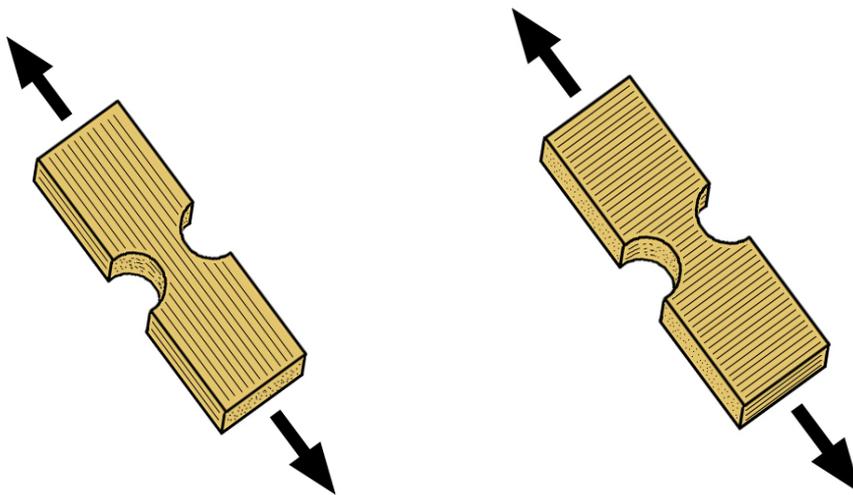


Abbildung 39 Zugrichtung parallel zur Ausrichtung der Hornröhrchen (links) und Zugrichtung im rechten Winkel zur Ausrichtung der Hornröhrchen (rechts)

6.1.3 Wahl der Methoden

Die Arbeit mit dem Proxxon Dickenhobel und den eingekerbten Führhölzern hat sich prinzipiell bewährt. Was bei künftigen Versuchen dieser Art verbessert werden sollte, ist eine einheitliche Dicke der Proben. Dies könnte erreicht werden, indem die Vertiefungen in den Führhölzern ebenfalls alle auf eine identische Tiefe gebracht werden. Dies würde alle darauf folgenden Arbeitsschritte deutlich erleichtern und zu leichter vergleichbaren Ergebnissen führen.

Noch zeitsparender wäre es, die Oberfläche der Prüfkörperchen ebenfalls durch die CNC-Fräse abtragen und einebnen zu lassen. Allerdings müsste hierfür das System der Befestigung der Hornproben auf der Fräse noch optimiert werden. Doch damit tatsächlich eine plane Oberfläche entsteht, die nicht mehr weiterer Nacharbeit

bedarf, müsste ein Fräskopf in entsprechender Breite gewählt werden, der die gesamte Oberfläche des Prüfkörpers in einem Arbeitsschritt bearbeiten kann.

Durch das Schleifen mit dem Dreiecksschleifer wurde das angestrebte Ziel, planparallele Proben mit riefenfreier Oberfläche zu bekommen, erreicht. Die Befestigung der Proben könnte allerdings noch optimiert werden. Zudem war dieser Arbeitsschritt recht zeitraubend. Eine Oberfläche, die frei von Kerben und Riefen ist, ist allerdings für die Vergleichbarkeit der Zugfestigkeits-Ergebnisse unabdingbar. Eine Änderung des Probenquerschnittes durch derlei Unebenheiten würde zu einer Spannungsüberhöhung innerhalb des Prüfkörpers führen, was ein verändertes Verhalten im Zugversuch wahrscheinlich machen würde (GROSS et al., 2005b).

Da der Winkel zwischen der Unterseite des Arbeitsgeräts und der Probenoberfläche und der Druck, mit dem dieses bedient wurde ausschließlich von der Person am Schleifgerät bestimmt wurden und nicht standardisiert waren, ließ sich nicht gänzlich vermeiden, dass einige Prüfkörper keine zu 100% parallele Oberfläche hatten. Um bei der Herstellung von Prüfkörperchen effizienter zu werden und die Konvergenz des Probenmaterials zu erhöhen, könnte dieser Schritt noch weiter standardisiert bzw. automatisiert werden. Wenn es gelänge, beide Seiten der Proben mit dem Dickenhobel zu bearbeiten, oder mittels der CNC-Fräse eine plane Probenoberfläche zu bekommen, könnte man davon absehen, nochmals mit einem Schleifgerät nachzuarbeiten. In diesem Fall wäre die Bearbeitung von Hand mit einem feinen Schleifpapier ausreichend, um die letzten Unebenheiten auszugleichen.

Die Portalfräse kann als Werkzeug zur Gewinnung von Horn-Prüfkörperchen empfohlen werden. Die Befestigung der Proben bietet dabei noch Optimierungspotential. Die Lösung mit doppelseitigem Klebeband funktioniert zwar, allerdings lässt die Haftung mit zunehmender Versuchsdauer immer weiter nach. Andere Möglichkeiten der Befestigung mussten während der Arbeit an dieser Studie jedoch alle verworfen werden, da sie sich nie so realisieren ließen, dass der Fräskopf nicht mit den Befestigungselementen in Berührung kam, was eine Beschädigung des Fräasers zur Folge hatte.

Sowohl die Durchführung der Zugversuche als auch das dafür verwendete Material haben sich im Sinne des Untersuchungsziels bewährt. An der Einspannvorrichtung könnte man Zeit und Arbeit sparen, indem man das Sandpapier durch ein fest installiertes Bauteil aus aufgerautem Metall ersetzt. Dadurch würde das regelmäßige Austauschen des abgenutzten Papiers entfallen und zusätzlich

könnten Verfälschungen der Ergebnisse infolge von Verrutschen oder vorzeitigem Lösen des Papiers ausgeschlossen werden.

Denkbar wäre, den Versuchsaufbau dahingehend zu modifizieren, dass die Kraft langsamer gesteigert wird. Dies würde dem Material mehr Zeit geben, sich an die Belastung anzupassen. Möglicherweise könnten so höhere Dehnungswerte erreicht werden. Ob die Zugfestigkeit auch steigen würde, ist allerdings fraglich. Da alle Proben aber unter identischen Bedingungen getestet wurden, hätte ein geänderter Versuchsaufbau auf die relativen Ergebnisse freilich keinen Einfluss.

Für die Bewertung der Ergebnisse und die statistische Untersuchung wurden jeweils die Werte der proximalen und distalen Prüfkörperchen einer Klaue gemeinsam betrachtet. Dies diene zum einen dazu, die Anzahl der Proben innerhalb einer Vergleichsgruppe zu vergrößern und damit die statistische Aussagekraft zu erhöhen. Zum anderen lagen die Lokalisationen so dicht beieinander, dass eine nicht zufällige Abweichung der Zugfestigkeit zwischen beiden Proben nahezu ausgeschlossen werden konnte. Der Abstand zwischen den beiden Sollbruchstellen betrug 5 mm. Dass sich innerhalb einer so kurzen Distanz die Zugfestigkeit des Horns merklich ändert, ist unter physiologischen Gesichtspunkten abwegig.

6.2 Bewertung der Ergebnisse

Bei der 1993 in Zürich publizierten Arbeit von Bohli wurden Normalwerte für die Zugfestigkeit des Klauenhorns von Rind und Schwein ermittelt. Die Zugfestigkeit wird in Bohlis Arbeit in Kp/mm² angegeben. Zur Umrechnung: 1 Kp = 9,81 N. Im Mittel erreichten die Proben aus der abaxialen Seitenwand der Klauen in den Zugversuchen eine Zugfestigkeit von $7,19 \pm 0,73$ Kp/mm² ($70,51 \pm 7,16$ N/mm²) bei einer Variationsbreite von 6,06-9,017 Kp (59,43 – 89,93 N/mm²) (BOHLI, 1993). In der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt deutlich niedrigere mittlere Zugfestigkeitswerte erzielt. Diese reichen von $18,93 \pm 6,16$ N/mm² (9,13-38,74 N/mm²) hinten medial, bis $23 \pm 5,74$ N/mm² (10,85-32,08 N/mm²) vorne medial. Ein Grund dafür könnte das Alter der verwendeten Tiere sein. Die Tiere, die Bohli untersuchte, waren zwischen 3 und 10 Jahre alt und somit deutlich älter als die in dieser Arbeit verwendeten Rinder (ca. 1,4 Jahre). Im Versuch von Russke zeigte sich eine konstante Zunahme der Klauenhärte mit steigendem Lebensalter (RUSSKE, 2001). Allerdings wurde dieser Versuch nur bis zu einem Alter von ca. 24 Monaten

durchgeführt (s. Abbildung 40).

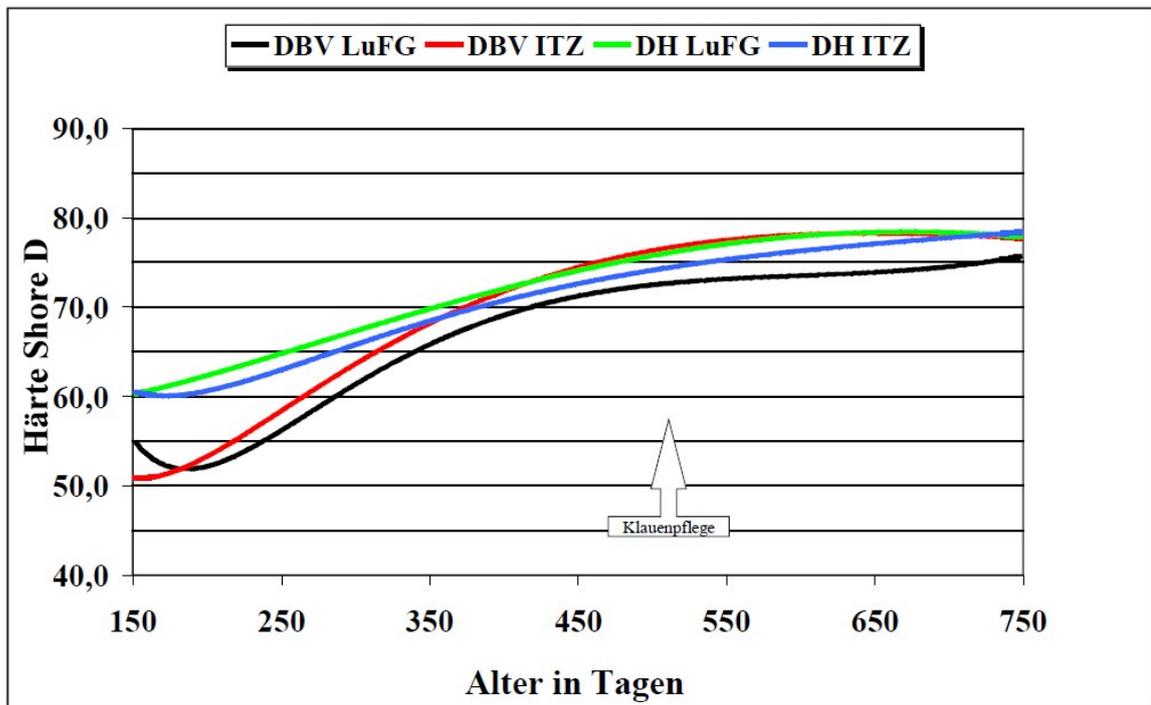


Abbildung 40 Altersabhängige Klauenhornhärte nach Rasse und Standort (RUSSKE, 2001), S. 134)

DBV = Deutsches Braunvieh, DH = Deutsche Holsteins, ITZ = Institut für Tierzucht und Vererbungsforschung (TiHo Hannover), LuFG = Lehr- und Forschungsgut Ruthe

Ein weiterer Punkt, den es beim Vergleich zu bedenken gilt, ist, dass die Tiere in Bohlis Versuch alle weiblich waren. Im hier beschriebenen Versuch kamen ausschließlich Jungbullen zum Einsatz. Inwiefern sich die Zugfestigkeit zwischen den Geschlechtern unterscheidet, ist nicht ausreichend erforscht.

Über das Gewicht der in Bohlis Arbeit verwendeten Tiere gibt es keine Angaben, für einen aussagekräftigen Vergleich der Werte müsste dieser Parameter jedoch berücksichtigt werden. Hinzu kommt, dass der Großteil der 1993 verwendeten Tiere im Gegensatz zu den in Grub gemästeten Bullen, welche im Laufstall gehalten wurden, aus Anbindehaltung stammte. Der Einfluss der Haltungsform auf die Klauengesundheit (TOUSSAINT RAVEN, 2003c), (FIEDLER, 2003; HAUFE et al., 2014) ist allgemein anerkannt, was einen Vergleich zwischen so unterschiedlich gehaltenen Tieren erheblich erschwert.

Die Zugfestigkeit an den Hintergliedmaßen war bei Bohli an der axialen Seitenwand zwar geringer als vorne, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant. Dieses Ergebnis konnte in den dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuchen bestätigt werden. Die Werte vorne lateral waren in diesem Falle sogar signifikant höher als die an den beiden Hintergliedmaßen gemessenen Werte. In beiden Arbeiten war die Variationsbreite der erreichten Zugfestigkeitswerte sehr groß. Da bei Bohli alle Tiere über eine histologisch nachgewiesene gute Hornqualität verfügten, und im vorliegenden Fall nur sehr junge Tiere zum Einsatz kamen, muss von einer großen, physiologisch vorhandenen, individuellen Schwankung bei der Zugfestigkeit des Klauenhorns ausgegangen werden. Bei dieser Schwankung spielt sicher auch das unterschiedliche Körpergewicht der Tiere eine Rolle. Eine mögliche Korrelation zwischen Gewicht und Zugfestigkeit des Klauenhorns stellt Abbildung 41 dar. Im Sinne einer besseren grafischen Darstellbarkeit ist die Zugfestigkeit in diesem Fall in Dezinewton (dN) angegeben (1 N = 10 dN).

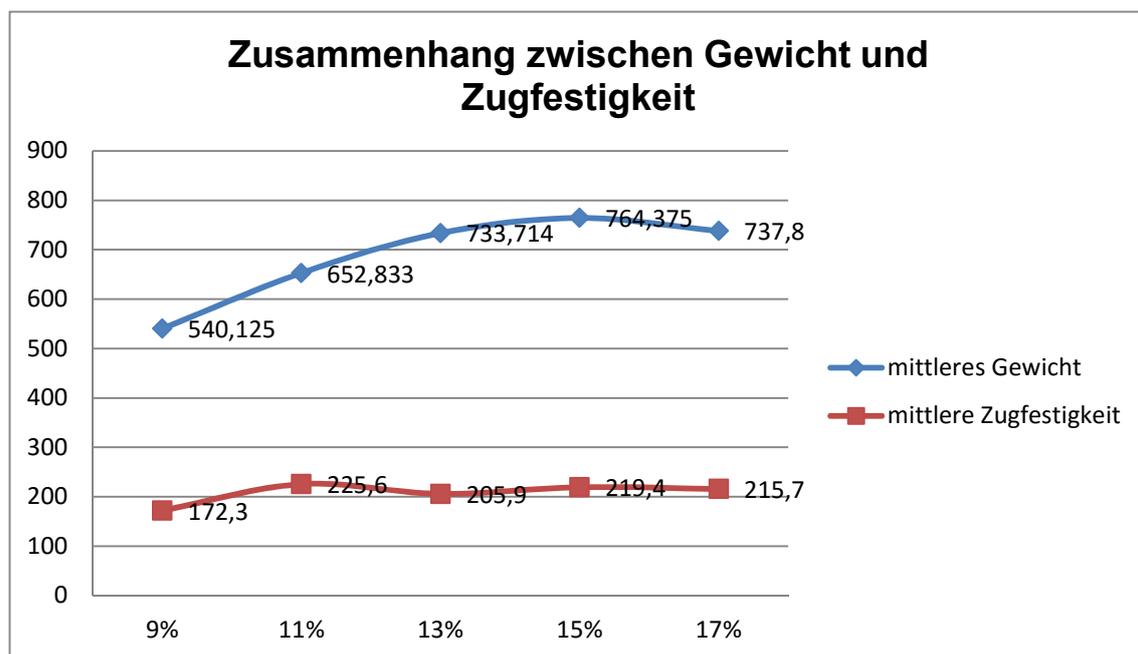


Abbildung 41 Zusammenhang zwischen dem mittleren Schlachtgewicht (in kg) und der mittleren Zugfestigkeit (in dN/mm²) der verschiedenen Fütterungsgruppen

Bis auf die 11%-Gruppe verlaufen die beiden Kurven für Gewicht und Zugfestigkeit nahezu parallel und steigen jeweils mit zunehmendem Anteil an Rohprotein an, um bei der 17%-Gruppe wieder leicht abzufallen. Allerdings verläuft die Zugfestigkeitskurve deutlich flacher. Ein Zusammenhang zwischen dem

Körpergewicht und der Zugfestigkeit des Klauenhorns scheint möglich, ist aber nicht eindeutig zu belegen.

Da auch die Rasse einen signifikanten Einfluss auf Klauenhärte und -form hat (RUSSKE, 2001), ist es schwierig, generelle Normalwerte für diese Parameter zu formulieren.

Über alle fünf Fütterungsgruppen zeigte sich, dass die Zugfestigkeitswerte an den lateralen Klauen tendenziell höher waren als an den medialen. Das steht im Einklang mit den Ergebnissen aus der Untersuchung der Zugfestigkeit des Klauenbeinträgers von Widauer (WIDAUER, 2006). Auch das Ergebnis, dass die Zugfestigkeit an den Klauen der Schultergliedmaße höher ist als die an den Klauen der Beckengliedmaße – zum Teil signifikant – deckt sich mit den Ausführungen Widauers (WIDAUER, 2006). Eine Ursache für die höhere Zugfestigkeit der Klauen an den Vordergliedmaßen könnte in der unterschiedlichen Verteilung der Körperlast liegen. Wie in 3.1.5 beschrieben, tragen die Vordergliedmaße etwa 56% des Körpergewichtes, die Hintergliedmaßen nur ca. 44% (TOUSSAINT RAVEN, 2003f). Dass die stärker belasteten vorderen Klauen eine höhere Zugfestigkeit des Horns ausbilden, ist plausibel.

Studien zufolge haben die Klauen der Hinterextremitäten ein höheres Wasseraufnahmevermögen gegenüber den Vorderklauen (LEOPOLD und PRIETZ, 1979). In Übereinstimmung damit sind die vorderen Klauen entsprechend signifikant härter (nach Shore D) als die hinteren (RUSSKE, 2001). Die in der vorliegenden Arbeit gemessenen höheren Zugfestigkeitswerte an den Klauen der Schultergliedmaße erscheinen daher auch unter diesen Gesichtspunkten schlüssig. Im Widerspruch zu den Ergebnissen steht das Ergebnis von Leopold und Prietz (LEOPOLD und PRIETZ, 1979) hinsichtlich mikroskopischer Untersuchungen, etwa in Bezug auf die durchschnittliche Hornröhrchendichte an den Klauen. Sie beschrieben, dass an den Hinterextremitäten signifikant mehr Hornröhrchen je mm² gezählt wurden als an den Vorderextremitäten. Auch die Rinde der Hornröhrchen erwies sich in dieser Untersuchung an den hinteren Klauen als stärker als vorne. Beide Parameter galten als Indiz für eine gute Klauenhornqualität. Allerdings konnten die Autoren keinen Nachweis für einen Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften des Horns und dessen Mikrostruktur erbringen (LEOPOLD und PRIETZ, 1979).

Die natürlichen Abmessungen der vorderen Klauen im Vergleich zu denen der Hintergliedmaße lassen darauf schließen, dass die Klauen der Vordergliedmaße an die Belastungen durch das Körpergewicht besser angepasst sind als die hinteren Klauen. So weisen sie einen spitzeren Zehenwinkel und einen höheren Ballenbereich auf und sind insgesamt größer (NUSS et al., 2011). Eine höhere Zugfestigkeit an den vorderen Klauen lässt sich mit diesen Ergebnissen gut vereinbaren und verdeutlicht ebenso die Tatsache, dass die Klauen der Schultergliedmaßen stärkeren Belastungen ausgesetzt sind als die hinteren Klauen und sich dementsprechend in ihrer Physiognomie anpassen.

Die tendenziell höheren Zugfestigkeiten an den lateralen Klauen lassen sich eventuell mit den von Muggli et al. und Nacambo et al. beschriebenen Differenzen zwischen den lateralen und medialen Zehenknochen erklären (MUGGLI et al., 2011; MUGGLI et al., 2015; NACAMBO et al., 2007). Da die lateralen Zehenknochen diesen Autoren zufolge eine geringfügig größere Länge aufweisen als die der medialen Partnerklaue, nimmt die laterale Klaue vermutlich auch einen etwas größeren Teil des Körpergewichtes auf. Dem entgegen stehen Aussagen, wonach eine gleichmäßige Gewichtsverteilung zwischen Innen- und Außenklaue angenommen wird (MÜLLING und HAGEN, 2012). Der andauernde Druckreiz jedenfalls stimuliert die Hornproduktion der lateralen Klaue vermehrt, was zu einer Zunahme von Größe und Dicke führt. Möglicherweise ergibt sich daraus auch eine erhöhte Zugfestigkeit des Klauenhorns.

Dass eine gute Fütterung entscheidend für die Qualität des Klauenhorns und das Auftreten von Klauenerkrankungen ist, ist allgemein anerkannt (MÜLLING et al., 1999). Voraussetzung für die Klauenhornsynthese ist eine physiologische Versorgung der Epidermis mit Sauerstoff, Nährstoffen, Spurenelementen, Mineralien und Vitaminen (MÜLLING und HAGEN, 2012). Ein zuverlässiges, durchdachtes Fütterungssystem kann helfen, Klauenerkrankungen zu vermeiden. Wenn in einem Betrieb vermehrt Probleme mit den Klauen auftreten, sollte immer auch das Fütterungsmanagement sowie die Futterzusammensetzung hinterfragt werden (TOUSSAINT RAVEN, 2003e).

Eine wiederkäuergerechte Zusammensetzung der Futtermittelration ist dabei ebenso entscheidend, wie die ausreichende Versorgung mit Spurenelementen, Vitaminen und Mineralstoffen (MÜLLING, 2014).

Zu Beginn der Studie schien nicht unwahrscheinlich, dass die mit dem Futter aufgenommene Menge an Rohprotein aufgrund der bei Wiederkäuern besonderen Form der Proteinverdauung auf die Qualität des Klauenhorns geringen bis keinen Einfluss hat (BREVES, 2005). Über den Einfluss von Futterprotein auf die Klauenbeschaffenheit gibt es in der Literatur unterschiedliche Aussagen. Manson und Leaver stellten bei Rindern mit einem höheren Anteil an Rohprotein in der Futtermischung einen stärkeren Zuwachs an Horn fest als in der Vergleichsgruppe mit geringerem Proteinanteil (MANSON und LEAVER, 1988). Greenough et al. kamen 2 Jahre später zu genau gegenteiligen Ergebnissen: Mit steigendem Anteil an Rohprotein nahm die Dicke der Sohle bei den nach der Schlachtung untersuchten Tieren ab (GREENOUGH et al., 1990).

Tatsächlich ist so, dass zwar die Zugfestigkeit in der Tiergruppe, welche nur 9% Rohprotein in der Mastration bekamen, signifikant niedriger war als in den übrigen 4 Gruppen. Innerhalb der vier Gruppen mit höheren Rohproteinanteilen jedoch gab es keine signifikanten Unterschiede mehr.

Durch den allen Wiederkäuern eigenen Mechanismus des rumino-hepatischen Kreislaufes und das Vorhandensein spezifischer Mikroorganismen im Vormagen-System sind Rinder in der Lage, aus allen stickstoffhaltigen Verbindungen Proteine zu synthetisieren. Voraussetzung dafür ist, dass für die Umsetzung ausreichend Energie vorhanden ist. Wie viel verwertbares Protein dem Tier also tatsächlich zur Verfügung steht – etwa für den Aufbau von Klauenhorn – hängt von deutlich mehr Faktoren ab als der reinen Menge an aufgenommenem Rohprotein. Fütterungsformen und -zeiten spielen dabei ebenso eine Rolle wie der Gesundheitszustand des Tieres. Der Umstand, dass ab einem Anteil von 11% Rohprotein in der Futtermischung eine zunehmende Menge Protein keinen nennenswerten Einfluss mehr auf die Zugfestigkeit des Horns hatte, unterstreicht die Vermutung, dass das Rind aus den zur Verfügung stehenden Ressourcen die maximal mögliche Menge an Proteinen synthetisiert und für die Vorgänge im Körper nutzt, sobald ein gewisser Mindestwert der benötigten Ressourcen erreicht ist. Ein Überangebot der Ressourcen führt oberhalb des Schwellenwertes keine Verbesserung des Zustandes mehr herbei. Den gleichen Effekt konnte man auch bei dem Fütterungsversuch an den Mastbullen beobachten, deren Zehen nach der Schlachtung in dieser Arbeit verwendet wurden: Der Rohproteinanteil hatte bis zu einer Menge von 15% einen signifikant positiven Effekt auf die Tageszunahmen,

durch eine weitere Erhöhung des Proteingehaltes konnten die Zuwachsraten jedoch ab dieser Menge nicht weiter gesteigert werden. Im Gegenteil, die Gruppe mit 17% Rohproteinanteil wies sogar wieder niedrigere Ergebnisse auf (AICHNER et al., 2013; ETTLE, 2014). Man könnte im entgegengesetzten Sinne sogar fragen, ob ein deutliches Überangebot an Protein, bzw. der daraus entstehende Ammoniak, letztlich nicht vielleicht sogar einen negativen Effekt hat. Zum Beispiel auf die Ausscheidungsorgane Niere und Leber, die den Körper von dem ungenutzt in großer Menge vorhandenen Protein - in Form von Stickstoff - befreien müssen. Die Ergebnisse aus dem Versuch der LfL zeigen zumindest, dass eine Versorgung mit mehr Rohprotein als für Erhalt und Zunahme benötigt wird, nur noch die N₂-Ausscheidung erhöhte. Bei den auf eine Hepatopathie hindeutenden Blutparametern konnten aber über die gesamte Versuchsdauer keine Unterschiede zwischen den Fütterungsgruppen festgestellt werden (AICHNER et al., 2013; ETTLE, 2014).

Die höhere Gewichtszunahme mit steigendem Proteinangebot ist wohl nicht allein auf die bessere Proteinversorgung zurückzuführen. Wie Steinwigger et al. und auch die Versuche der LfL zeigten, nimmt die Futteraufnahme mit zunehmendem Proteinversorgungsniveau signifikant zu (AICHNER et al., 2013; ETTLE, 2014; STEINWIGGER et al., 2009). In der Gruppe mit dem höchsten Anteil an Rohprotein (17%) zeigte sich jedoch wieder ein Rückgang der Futteraufnahme. Auch dieser Umstand wird die Ergebnisse des Fütterungsversuchs in Grub hinsichtlich des Gewichtes beeinflusst haben. Ein weiterer Grund könnte ein indirekter Energiemangel sein, der sich aufgrund der großen Menge an für die Harnstoffsynthese aus überschüssigem Stickstoff und dessen Ausscheidung benötigte Energie einstellt.

Es hat sich alles in allem gezeigt: Die Supplementation von Rohprotein alleine hatte auf die Hornqualität im Bereich der Konzentration von 11-17 % keinen signifikanten Einfluss.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, eine Methode zur Gewinnung von standardisierten Prüfkörperchen aus Rinderklauenhorn zu entwickeln, die sich für die Testung mittels einer Materialprüfmaschine eignen. Die Prüfkörperchen wurden mit einer Länge von 10 mm, einer Breite von 5 mm und einer Dicke von 2 mm hergestellt. In der Mitte befand sich eine präformierte Rissstelle in Form einer Taille von 2 mm Breite. Die Hornkörper wurden aus reinem Kronhorn gewonnen und mit einer planparallelen, riefenfreien Oberfläche hergestellt. Als Entnahmestelle wurde ein Bereich dorso-abaxial an der Außenklaue gewählt.

Als zweiter Teil der Studie wurde die erarbeitete Methode angewandt, um die Fragestellung zu bearbeiten, ob – und wenn ja, wie – der Gehalt an Rohprotein den Mastbullen über die Futterration zugeführt bekommen, sich auf die Zugfestigkeit des Klauenhorns dieser Tiere auswirkt. Zu diesem Zweck wurden von insgesamt 39 Mastbullen der Rasse Deutsches Fleckvieh Hornproben von jeweils einer Vorder- und einer Hintergliedmaße, deren Seite zufallsverteilt war, entnommen. Es wurden dabei jeweils an der äußeren und inneren Klaue der Gliedmaße ein proximales und ein distales Prüfkörperchen entnommen, was nach Abzug einiger nicht verwertbarer Hornkörperchen zu einer endgültigen Probenzahl von insgesamt 304 Stück führte. Die Bullen waren zuvor gemästet und mit einem durchschnittlichen Alter von 500 Tagen geschlachtet worden. Während der Mast wurden die Tiere gleichmäßig auf fünf Versuchsgruppen verteilt. Bei gleicher Mastration (Totale Mischration) wurde jeder der 5 Gruppen ein unterschiedlicher Rohproteingehalt (9%, 11%, 13%, 15%, 17%) verfüttert. Der Energiegehalt aller Rationen betrug etwa 11,5 MJ ME / kg TM. Die verschiedenen Rohproteinanteile blieben über den gesamten Versuchszeitraum bestehen.

Die Entnahmestelle wurde unter Zuhilfenahme einer Schablone markiert und der markierte Bereich mit einer Bandsäge aus der Klaue ausgesägt. Anschließend wurde das anhaftende Weichteilgewebe in mehreren Schritten entfernt, sodass Proben aus reinem Kronhorn mit einer Kantenlänge von 1 x 1 cm übrig blieben. Zur Beseitigung von Oberflächenunebenheiten und um planparallele Prüfkörperchen zu erhalten, wurden die Hornproben im nächsten Schritt mit einem Proxxon Dickenhobel bearbeitet. Zu diesem Zweck wurden kreisförmige Vertiefungen in Weichholzlatten gefräst, in denen dann die Hornstücke befestigt wurden. Die Holzlatten dienten somit

als Führung für die Proben. Die Probenunterseite wurde mittels eines Dreiecksschleifers plan geschliffen. Zur Gewinnung der eigentlichen Prüfkörperchen aus den nun planparallelen, riefenfreien Hornquadraten wurde eine computer-gesteuerte Portalfräse der Firma CNC benutzt. Aus jedem Hornstück entstanden auf diese Weise je zwei Prüfkörperchen mit den Maßen 10 mm Länge, 5 mm Breite und 2 mm Höhe. Dabei waren die Hornröhrchen quer zur Längsachse angeordnet. In der Mitte wiesen die Prüfkörper eine Sollbruchstelle mit einem Querschnitt von 2 mm² auf. Diese Prüfkörperchen wurden nun einem Zugversuch mit einer Materialprüfmaschine („Zwick Z010“, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) unterzogen, wobei für die Einspannung der Prüfkörper eine bei der DLG entwickelte und für den aktuellen Versuch leicht modifizierte Vorrichtung aus Metall verwendet wurde, die ein Verrutschen der Probe und das Auftreten von Scherkräften verhinderte. Die Zugkraft wurde in rechtem Winkel zur Ausrichtung der Hornröhrchen innerhalb der Proben ausgeübt und dabei kontinuierlich um 2 N pro Sekunde gesteigert, bis die Probe schließlich zerriss. Die maximalen Kraftwerte beim Versagen der Probe wurden für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse in N/mm² umgerechnet und statistisch ausgewertet.

Die Lokalisation zeigte sich als ein signifikanter Faktor für die Zugfestigkeit des Klauenhorns. An den Schultergliedmaßen wurden tendenziell höhere maximale Zugkräfte gemessen als an den Beckengliedmaßen. Diese Beobachtung konnte durch signifikante Unterschiede in der statistische Analyse belegt werden. Innerhalb einer Gliedmaße wiesen die lateralen Klauen häufig höhere Werte auf als die medialen. Diese Unterschiede waren allerdings nicht signifikant.

Im Vergleich über die verschiedenen Fütterungsgruppen unterschieden sich die Zugfestigkeiten der Gruppe, welche mit 9% Rohprotein in der Mastration gefüttert worden war, signifikant von den übrigen Fütterungsgruppen, die höhere Rohproteinanteile bekommen hatten. Diese erreichten alle vergleichbare Ergebnisse, die deutlich über denen der 9%-Gruppe lagen.

Neben methodischen Details wird in der Diskussion die Frage nach dem Einfluss des komplexen Proteinstoffwechsels beim Wiederkäuer auf die Hornqualität besprochen.

8 Summary

Development of a method for the production of small test pieces for biomechanical testing of hoof horn in fattening bulls (Deutsches Fleckvieh)

It was the objective of the present investigation to develop a method for the production of small test pieces for biomechanical testing made of hoof horn from fattening bulls (Fleckvieh cattle). The test pieces should be standardized and appropriate for tensile testing with a material testing machine. Referring to the "Bestimmungen für die Verleihung und Führung des DLG-Qualitätssiegels für Mittel zur Klauenpflege und Klauenhygiene" of the DLG the test pieces should be 10 mm long, 5 mm wide and 2 mm high. In the middle there was a waisted predetermined breaking point which had a diameter of 2 mm². The horn pieces were produced from coronary horn exclusively and had a coplanar, smooth surface. An area at the dorso-abaxial surface of the hoof was chosen as sampling point.

In the second part of the study the method developed before was applied to answer the question whether, and if so, how the content of crude protein in the feeding stuff affects the tensile strength of the hoof horn of these animals. For this purpose horn samples have been taken randomly from one of the front and hind feet of 39 fattening bulls (German Simmental). The bulls had been fattened and slaughtered at the age of about 500 days. During fattening the bulls were distributed evenly in 5 groups. Being fed the same fattening ration each of five experimental groups received a different content of crude protein (9%, 11%, 13%, 15%, 17%) in their feeding ration. Apart from the crude protein the ration was identical with an energy content of 11.5 MJ ME / kg dry weight. The contents of crude protein did not change during the whole experiment.

It was in each case a foreleg and a hind leg, with the side being chosen by random selection. Taking a proximal and a distal test piece out of the abaxial wall of the lateral and medial claw of each limb a number of 312 test pieces were produced. Some of the testing samples got damaged so overall 304 test pieces could be examined in the end.

The sampling site was marked with a pattern. The marked area was cut out of the hoof with a bandsaw. Subsequently the soft tissue still adhering at the raw samples

was removed in several steps. The resulting samples were made up of coronary horn exclusively with 1 x 1 cm length of the edge. In order to get coplanar pieces with even surfaces, the samples were planed with an electrical slicer by Proxxon. For this circular slots were milled into wooden slats and horn samples were fixed therein with 2-component epoxy resin adhesive. Thus the wooden slats served as guidance for the samples. The bottom side of the horn samples was dragged with a portable grinder. To get the test pieces proper out of the horn squares a computerised portal milling machine (CNC) was employed. So from every piece of horn two test pieces could be produced measuring 10 mm x 5 mm x 2 mm with the horn tubules being oriented vertically to the longitudinal axis of the test pieces. The waist had a cross section of 2 mm² and acts as rated break point. These test pieces were tested in tensile tests with the material testing machine Zwick Z010“ (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland). For the restraint of the horn test pieces we used a clamping tool which was developed and produced by the DLG and slightly modified for this experiment. It was constructed of metal and prevented the test pieces from slipping within the clamp and avoided shear forces. The tensile force was exerted on the samples orthogonal to the orientation of the horn tubules. It was raised continuously by 2 N/s until the sample ruptured. Maximal forces at failure were converted into N/mm² and evaluated statistically in order to compare the results.

The localisation turned out to be a significant factor for the tensile strength of hoof horn. In thoracic limbs maximal tensile forces were significantly higher than the results in pelvic limbs. Within a single limb the lateral claw often showed higher values than the medial one. These differences, however, were not significant.

Comparing the different protein cohorts maximal tensile force of the group fed 9% crude protein differed significantly from the other feeding groups which remained feeding on more crude protein. The results of these other groups were all comparable and exceeded the results of the 9%-group.

In the discussion next to methodological details the question is addressed whether the complex protein metabolism in ruminants influences the hoof horn quality.

9 Anhang

Tabelle 14 Zugfestigkeiten aller Proben (in N/mm²)

ProbeNr.	RP	vo lat prox	vo lat dist	vo med prox	vo med dist	hi lat prox	hi lat dist	hi med prox	hi med dist
		1	2	3	4	5	6	7	8
11	9%	23,366	16,745	14,799	17,749	15,318	17,456	19,520	20,317
13	9%	10,261	11,447	17,919	21,248	16,963	14,461	18,337	9,436
15	9%	17,489	19,660	21,605	21,433	9,185	13,211	8,632	9,626
16	9%	16,770	18,319	23,862	23,006	21,002	14,025	17,899	12,407
17	9%	16,712	17,356	20,503	14,283	15,367		21,641	21,038
18	9%	18,776	21,266	21,752	24,412	21,579	18,140	13,003	13,241
19	9%	27,622	15,833	17,744	13,788	16,253	12,253	11,958	14,616
110	9%	17,152	18,829	24,063	24,589	18,209	19,375	8,509	13,990
21	11%	25,584	23,936		23,505		19,240	22,181	31,194
24	11%	19,760	19,430	16,196	13,506	17,054	10,927	14,274	19,070
27	11%	24,154	29,403	24,768	30,454	18,871	32,688	22,998	13,643
28	11%	24,026	28,819	23,917	25,297	22,688	22,161	18,830	19,411
29	11%	31,821	27,917	25,424	23,856	26,441	25,969	17,918	20,122
212	11%	29,766	31,240	22,748	26,758	20,981	17,786	15,465	17,984
31	13%	31,000	29,397	30,795	27,234	22,293	19,356	25,177	22,217
34	13%	16,321	17,351	16,759	14,698	11,917	13,229	12,990	14,294
35	13%	24,056	18,134	18,424	22,577	18,021	23,366	18,743	16,479
37	13%	27,591	30,455	28,934	19,606	19,294	24,836		
38	13%	28,451	34,030	22,963	24,815	22,324	22,929	24,501	16,482
310	13%	24,012	19,923	16,870	14,368	17,759	15,600	19,375	21,665
311	13%	21,373	16,951	17,229	19,478	16,645	15,587	13,458	8,575
41	15%	9,622	19,145	22,917	21,103	20,202	18,357	13,876	11,269
42	15%	31,478	25,319	18,187	18,147	22,897	19,215	27,867	14,834
43	15%	16,435	10,766	17,742	18,700	15,338	19,632	16,614	
44	15%	4,591	19,470	22,925	21,438	27,117	28,407	17,956	21,526
49	15%	26,049	31,690	23,217	25,376	28,434	26,568	25,309	29,792
410	15%	22,425	30,067	20,674	18,456	18,702	22,408	30,233	29,663
411	15%	25,995	27,180	20,511	18,626	12,535	21,239	38,743	
412	15%	24,800	22,856	22,687	25,133	24,637	19,990	20,216	21,377
51	17%	24,618	22,436	14,671	15,070	20,012	15,481	12,308	9,965
52	17%	24,384	19,171	22,997	21,121	12,631	21,879	18,527	25,805
53	17%	30,351	32,013	36,486	30,144	19,338	27,579	22,625	25,633
54	17%	21,698	24,174	29,054	31,663	20,362	22,342	19,915	20,961
55	17%	17,035	15,009	15,248	13,123	11,077	20,047	6,661	17,553
58	17%	20,779	27,109	29,636	26,765	11,617	15,957	14,246	10,942

59	17%	27,598	24,281	20,789	17,676	23,177	18,725	15,478	19,568
510	17%	26,290	27,116	21,328	22,650	20,881	14,588	19,706	11,016
511	17%	26,041	29,601	26,030	31,340	17,731	22,366	31,304	25,369
512	17%	36,213	27,945	14,035	14,928	24,362	28,047	22,979	28,180

Tabelle 15 Angaben zu den verwendeten Mastbullen

ProbeNr.	Geburt	Proteingehalt der Ration	Alter d	Gewicht kg
11	04.10.2010	9%	499	583
13	27.09.2010	9%	499	514
15	19.09.2010	9%	500	505
16	25.09.2010	9%	501	496
17	30.09.2010	9%	503	561
18	04.10.2010	9%	506	547
19	28.09.2010	9%	498	551
110	30.09.2010	9%	503	564
21	24.09.2010	11%	502	703
24	10.10.2010	11%	500	658
27	28.09.2010	11%	498	634
28	30.09.2010	11%	503	672
29	23.09.2010	11%	496	638
212	26.09.2010	11%	500	612
31	27.09.2010	13%	499	768
34	05.10.2010	13%	505	718
35	26.09.2010	13%	500	678
37	27.09.2010	13%	499	750
38	01.10.2010	13%	502	795
310	01.10.2010	13%	502	655
311	08.10.2010	13%	502	772
41	08.10.2010	15%	502	794
42	25.09.2010	15%	501	728
43	07.09.2010	15%	505	788
44	30.09.2010	15%	503	773
49	20.09.2010	15%	499	740
410	04.10.2010	15%	499	720
411	26.09.2010	15%	500	784
412	02.10.2010	15%	501	788
51	03.10.2010	17%	500	818
52	04.10.2010	17%	499	747
53	23.09.2010	17%	496	687
54	23.09.2010	17%	496	770
55	28.09.2010	17%	498	692
58	07.10.2010	17%	503	807
59	01.10.2010	17%	502	808

510	02.10.2010	17%	501	728
511	03.10.2010	17%	500	654
512	23.09.2010	17%	496	667

Tabelle 16: Auflistung der mit der Materialprüfmaschine erhobenen Werte

Nr.	Kraftmax. (N)	Weg bei Fmax (mm)	Breite (mm)	Dicke (mm)	Querschnitt (mm)	Zugfestigkeit (N/mm ²)
11-1	115,962	2,33718	2,13	2,33	4,9629	23,36577404
11-2	92,7461	1,80134	2,27	2,44	5,5388	16,74480032
11-3	139,793	1,86721	2,46	3,84	9,4464	14,79854759
11-4	132,791	1,91418	2,24	3,34	7,4816	17,74901091
11-5	103,539	1,92998	2,38	2,84	6,7592	15,31823293
11-6	99,8139	1,78143	2,11	2,71	5,7181	17,45578077
11-7	159,449	2,44494	2,19	3,73	8,1687	19,51950739
11-8	180,686	2,44092	2,45	3,63	8,8935	20,31663575
13-1	64,5233	1,79419	2,4	2,62	6,288	10,26133906
13-2	70,7761	1,56565	2,29	2,7	6,183	11,44688662
13-3	76,5633	1,31534	1,96	2,18	4,2728	17,91876521
13-4	90,0333	1,373	1,98	2,14	4,2372	21,24830076
13-5	50,1552	0,827683	1,92	1,54	2,9568	16,96266234
13-6	58,653	1,42735	1,95	2,08	4,056	14,46079882
13-7	93,06	1,67045	2,03	2,5	5,075	18,33694581
13-8	58,6697	1,17966	2,32	2,68	6,2176	9,43606858
15-1	131,972	1,74956	2,2	3,43	7,546	17,4890008
15-2	139,622	1,76329	2,12	3,35	7,102	19,65953253
15-3	121,346	1,60536	2,22	2,53	5,6166	21,60488552
15-4	100,343	0,969658	2,09	2,24	4,6816	21,43348428
15-5	77,5603	1,25723	2,27	3,72	8,4444	9,18482071
15-6	111,302	1,39858	2,36	3,57	8,4252	13,21060628
15-7	70,6091	1,08845	2,42	3,38	8,1796	8,632341435
15-8	80,6035	1,62727	2,47	3,39	8,3733	9,626252493
16-1	87,054	1,16281	2,06	2,52	5,1912	16,76953306
16-2	99,1601	1,51509	2,09	2,59	5,4131	18,31854206
16-3	140,75	1,52949	2,02	2,92	5,8984	23,86240336
16-4	140,467	1,83339	1,92	3,18	6,1056	23,00625655
16-5	156,381	2,5519	2,04	3,65	7,446	21,0020145
16-6	103,966	1,61779	2,1	3,53	7,413	14,02482126
16-7	115,773	2,01402	2,31	2,8	6,468	17,89935065
16-8	91,2447	1,2676	2,38	3,09	7,3542	12,4071551
17-1	135,678	1,62998	2,36	3,44	8,1184	16,71240639
17-2	144,508	1,71287	2,3	3,62	8,326	17,35623349
17-3	184,734	2,21798	2,65	3,4	9,01	20,50321865
17-4	121,127	1,39305	2,43	3,49	8,4807	14,28266535

17-5	120,146	1,41904	2,32	3,37	7,8184	15,36708278
17-6						
17-7	144,391	1,98376	2,4	2,78	6,672	21,64133693
17-8	143,144	2,1732	2,43	2,8	6,804	21,03821282
110-1	135,088	1,63159	2,469	3,19	7,87611	17,15161419
110-2	129,517	1,6248	2,11	3,26	6,8786	18,82897683
110-3	189,519	2,63725	2,2	3,58	7,876	24,06284916
110-4	178,842	2,70275	2,09	3,48	7,2732	24,5891767
110-5	148,076	2,25704	2,14	3,8	8,132	18,20905066
110-6	156,624	2,28762	2,15	3,76	8,084	19,37456705
110-7	99,05	2,08263	3,27	3,56	11,6412	8,508572999
110-8	110,525	3,33902	2,29	3,45	7,9005	13,98962091
21-1	183,963	1,90794	2,29	3,14	7,1906	25,58381776
21-2	173,868	1,76841	2,27	3,2	7,264	23,93557269
21-3						
21-4	194,639	1,48927	2,22	3,73	8,2806	23,50542231
21-5						
21-6	151,401	1,25763	2,15	3,66	7,869	19,240183
21-7	148,773	1,48063	2,62	2,56	6,7072	22,18108898
21-8	151,384	1,39521	2,3	2,11	4,853	31,19390068
24-1	108,072	1,85519	2,42	2,26	5,4692	19,76011117
24-2	114,557	1,59359	2,2	2,68	5,896	19,4296133
24-3	106,908	2,31035	2,23	2,96	6,6008	16,19621864
24-4	96,2485	1,6412	2,22	3,21	7,1262	13,50628666
24-5	112,811	1,74474	2,25	2,94	6,615	17,05381708
24-6	66,1334	0,912081	2,25	2,69	6,0525	10,92662536
24-7	95,5833	1,31311	2,27	2,95	6,6965	14,27362055
24-8	121,624	1,69216	2,23	2,86	6,3778	19,06989871
25-1	160,878	2,0337	2,19	3,77	8,2563	19,48548381
25-2	179,787	1,96312	2,19	3,77	8,2563	21,77573489
25-3	195,552	2,41241	2,2	3,8	8,36	23,39138756
25-4	82,6842	1,45009	2,01	2,38	4,7838	17,28420921
25-5	78,8926	1,27619	2,02	2,5	5,05	15,62229703
25-6	81,8028	1,14569	2,16	2,13	4,6008	17,7801252
25-7	85,9105	1,26504	1,95	2,01	3,9195	21,91873964
25-8	190,596	2,78313	2,23	3,7	8,251	23,09974549
27-1	153,228	1,98557	2,18	2,91	6,3438	24,15397711
27-2	192,99	1,90959	2,21	2,97	6,5637	29,40262352

27-3	100,944	1,80483	1,95	2,09	4,0755	24,76849466
27-4	127,934	2,37358	2,09	2,01	4,2009	30,45395034
27-5	98,1332	1,12595	2,14	2,43	5,2002	18,87104342
27-6	175,579	2,38376	2,14	2,51	5,3714	32,68775366
27-7	172,901	1,90746	2,1	3,58	7,518	22,99827082
27-8	99,3804	0,931759	2,13	3,42	7,2846	13,64253356
28-1	170,565	2,10476	2,32	3,06	7,0992	24,02594659
28-2	221,117	2,68763	2,25	3,41	7,6725	28,81942001
28-3	147,317	1,56011	2,36	2,61	6,1596	23,91665043
28-4	168,353	1,7849	2,42	2,75	6,655	25,29722014
28-5	163,896	1,95789	2,4	3,01	7,224	22,68770764
28-6	159,556	2,11757	2,4	3	7,2	22,16055556
28-7	172,294	1,71334	2,44	3,75	9,15	18,82994536
28-8	179,312	1,81289	2,47	3,74	9,2378	19,4106822
212-1	251,079	2,1732	2,41	3,5	8,435	29,76633076
212-2	268,789	2,09312	2,39	3,6	8,604	31,24000465
212-3	205,948	3,16157	2,37	3,82	9,0534	22,74813882
212-4	231,623	1,91611	2,29	3,78	8,6562	26,75804626
212-5	127,394	1,7804	2,3	2,64	6,072	20,98056653
212-6	101,037	1,3358	2,16	2,63	5,6808	17,7856992
212-7	105,311	1,60946	2,24	3,04	6,8096	15,46507871
212-8	121,657	1,98672	2,27	2,98	6,7646	17,98435976
31-1	232,753	2,94333	2,17	3,46	7,5082	30,99984017
31-2	225,819	2,62315	2,17	3,54	7,6818	29,39662579
31-3	157,137	2,27436	2,19	2,33	5,1027	30,7948733
31-4	151,084	1,82823	2,07	2,68	5,5476	27,23411926
31-5	124,725	2,79328	1,97	2,84	5,5948	22,29302209
31-6	97,5017	2,22625	1,96	2,57	5,0372	19,35632891
31-7	149,853	2,83073	1,92	3,1	5,952	25,17691532
31-8	153,146	1,94145	2,07	3,33	6,8931	22,21728975
34-1	160,104	2,36968	2,63	3,73	9,8099	16,32065566
34-2	160,287	2,27213	2,49	3,71	9,2379	17,35102134
34-3	151,607	2,46416	2,57	3,52	9,0464	16,75882119
34-4	139,052	2,01629	2,55	3,71	9,4605	14,69816606
34-5	112,745	1,48933	2,55	3,71	9,4605	11,91744622
34-6	62,1593	1,38514	2,46	1,91	4,6986	13,22932363
34-7	56,0564	1,37002	2,48	1,74	4,3152	12,99045235
34-8	68,6446	1,77494	2,61	1,84	4,8024	14,29381143

35-1	158,479	1,77716	2,44	2,7	6,588	24,05570735
35-2	119,686	1,82487	2,4	2,75	6,6	18,13424242
35-3	114,964	1,76023	2,6	2,4	6,24	18,42371795
35-4	123,544	1,95417	2,28	2,4	5,472	22,57748538
35-5	115,862	1,74541	2,39	2,69	6,4291	18,02149601
35-6	115,962	2,33718	2,13	2,33	4,9629	23,36577404
35-7	105,553	1,4631	2,28	2,47	5,6316	18,74298601
35-8	92,9157	1,28677	2,33	2,42	5,6386	16,4785053
36-1	124,002	1,57218	2,25	1,89	4,2525	29,15978836
36-2	168,419	2,00592	2,28	2,17	4,9476	34,04054491
36-3	36,0683	0,0966418	2,49	3,63	9,0387	3,99043004
36-4	171,428	1,25692	2,49	3,63	9,0387	18,96600175
36-5	199,265	1,88371	2,47	3,72	9,1884	21,68658308
36-6	134,728	1,35069	2,43	3,34	8,1162	16,59988665
36-7	186,029	1,67866	2,55	3,18	8,109	22,94105315
36-8	155,598	2,43666	2,23	1,97	4,3931	35,41872482
37-1	145,545	3,51757	2,11	2,5	5,275	27,59146919
37-2	192,01	2,16793	2,22	2,84	6,3048	30,45457429
37-3	169,642	2,42988	2,05	2,86	5,863	28,93433396
37-4	166,981	2,33522	2,55	3,34	8,517	19,6056123
37-5	162,042	3,09482	2,32	3,62	8,3984	19,29438941
37-6	209,222	3,29098	2,4	3,51	8,424	24,83641975
37-7						
37-8						
38-1	133,357	1,84179	2,16	2,17	4,6872	28,45131422
38-2	176,329	2,43828	2,15	2,41	5,1815	34,0304931
38-3	176,895	1,52663	2,22	3,47	7,7034	22,96323701
38-4	186,923	1,86619	2,11	3,57	7,5327	24,81487382
38-5	113,451	1,68687	2,2	2,31	5,082	22,32408501
38-6	166,119	2,14332	2,56	2,83	7,2448	22,92941144
38-7	192,145	2,2921	2,26	3,47	7,8422	24,50141542
38-8	124,976	1,13873	2,25	3,37	7,5825	16,48216288
310-1	192,11	2,36919	2,18	3,67	8,0006	24,0119491
310-2	170,923	5,57392	2,3	3,73	8,579	19,92341765
310-3	134,853	2,11793	2,19	3,65	7,9935	16,87033214
310-4	119,836	4,54736	2,23	3,74	8,3402	14,36848037
310-5	143,067	1,99235	2,12	3,8	8,056	17,75906157
310-6	129,913	1,91193	2,18	3,82	8,3276	15,600293
310-7	156,936	1,68879	2,16	3,75	8,1	19,37481481

310-8	171,205	3,45143	2,13	3,71	7,9023	21,66521139
311-1	108,395	1,80802	2,07	2,45	5,0715	21,37336094
311-2	76,8979	1,78527	2,15	2,11	4,5365	16,95093133
311-3	131,195	2,34926	2,22	3,43	7,6146	17,22940141
311-4	142,038	1,96954	2,23	3,27	7,2921	19,47833957
311-5	95,7065	1,4798	2,5	2,3	5,75	16,6446087
311-6	78,8935	1,12602	2,28	2,22	5,0616	15,5866722
311-7	120,835	1,16557	2,32	3,87	8,9784	13,4584113
311-8	69,0484	1,12103	2,2	3,66	8,052	8,575310482
41-1	63,893	3,52575	2,33	2,85	6,6405	9,621715232
41-2	77,3302	2,99573	2,39	1,69	4,0391	19,14540368
41-3	152,182	3,1611	2,33	2,85	6,6405	22,91725021
41-4	131,644	2,6744	2,22	2,81	6,2382	21,10288224
41-5	163,175	2,71523	2,05	3,94	8,077	20,20242664
41-6	158,685	2,96294	2,33	3,71	8,6443	18,35718335
41-7	119,72	1,12288	2,39	3,61	8,6279	13,87591419
41-8	102,691	0,878573	2,43	3,75	9,1125	11,26924554
42-1	173,057	1,75189	2,31	2,38	5,4978	31,47750009
42-2	189,586	1,60794	2,34	3,2	7,488	25,31864316
42-3	103,448	1,3567	2,4	2,37	5,688	18,18706048
42-4	100,621	1,25051	2,39	2,32	5,5448	18,14691242
42-5	174,67	1,80658	2,34	3,26	7,6284	22,89733103
42-6	151,19	1,10831	2,37	3,32	7,8684	19,21483402
42-7	204,535	1,325	2,36	3,11	7,3396	27,86732247
42-8	107,788	0,606005	2,48	2,93	7,2664	14,83375537
43-1	96,9643	1,03243	2,36	2,5	5,9	16,43462712
43-2	69,7092	0,838919	2,28	2,84	6,4752	10,76556709
43-3	148,282	1,35615	2,62	3,19	8,3578	17,74175022
43-4	155,449	1,30476	2,55	3,26	8,313	18,6995068
43-5	88,683	1,29451	2,36	2,45	5,782	15,3377724
43-6	124,652	2,16077	2,49	2,55	6,3495	19,63178203
43-7	90,5122	0,930374	2,4	2,27	5,448	16,61383994
43-8						
44-1	45,832	0,672946	2,6	3,84	9,984	4,590544872
44-2	185,224	2,03041	2,65	3,59	9,5135	19,46959584
44-3	150,7	2,45994	2,49	2,64	6,5736	22,92503347
44-4	127,418	1,87241	2,54	2,34	5,9436	21,43784912

44-5	120,101	2,42079	2,06	2,15	4,429	27,11695642
44-6	136,764	2,36896	2,04	2,36	4,8144	28,40727817
44-7	68,4653	2,06281	2,05	1,86	3,813	17,95575662
44-8	98,3659	1,90106	2,04	2,24	4,5696	21,52615109
49-1	173,489	2,54494	2,22	3	6,66	26,0493994
49-2	215,577	2,42849	2,26	3,01	6,8026	31,69038309
49-3	191,481	2,26438	2,37	3,48	8,2476	23,21657209
49-4	191,249	2,02651	2,37	3,18	7,5366	25,37603163
49-5	200,178	2,87059	2,2	3,2	7,04	28,434375
49-6	177,729	2,72837	2,26	2,96	6,6896	26,56795623
49-7	236,013	1,80543	2,28	4,09	9,3252	25,30916227
49-8	170,163	1,99084	2,41	2,37	5,7117	29,79200588
410-1	48,2905	1,20015	2,22	0,97	2,1534	22,42523451
410-2	91,8583	1,49972	2,23	1,37	3,0551	30,06719911
410-3	142,277	1,7534	2,22	3,1	6,882	20,67378669
410-4	115,072	1,19287	2,15	2,9	6,235	18,45581395
410-5	141,995	1,1107	2,28	3,33	7,5924	18,70225489
410-6	169,632	1,61154	2,22	3,41	7,5702	22,40786241
410-7	138,586	2,19144	1,91	2,4	4,584	30,23254799
410-8	157,726	2,15113	2,11	2,52	5,3172	29,66335665
411-1	218,919	2,64788	2,32	3,63	8,4216	25,99494158
411-2	218,919	2,64788	2,32	3,63	8,4216	25,99494158
411-3	222,993	2,10334	2,12	3,87	8,2044	27,17968407
411-4	162,626	1,85555	2,12	3,74	7,9288	20,51079609
411-5	151,866	1,41155	2,24	3,64	8,1536	18,62563776
411-6	180,986	1,32553	2,63	3,24	8,5212	21,23949678
412-1	211,965	2,1674	2,31	3,7	8,547	24,7999298
412-2	195,352	1,8953	2,31	3,7	8,547	22,85620686
412-3	188,716	1,94696	2,33	3,57	8,3181	22,68739255
412-4	203,118	2,07675	2,37	3,41	8,0817	25,13307844

412-5	209,454	1,99499	2,45	3,47	8,5015	24,6372993
412-6	171,737	1,39247	2,42	3,55	8,591	19,99033873
412-7	162,042	1,9393	2,31	3,47	8,0157	20,21557693
412-8	131,426	2,13828	2,65	2,32	6,148	21,37703318
51-1	147,027	2,14823	2,37	2,52	5,9724	24,61774161
51-2	141,505	2,2848	2,38	2,65	6,307	22,43618202
51-3	110,889	2,07337	2,34	3,23	7,5582	14,67135032
51-4	108,145	2,19501	2,33	3,08	7,1764	15,06953347
51-5	131,677	2,02451	2	3,29	6,58	20,01170213
51-6	111,455	1,43377	2,13	3,38	7,1994	15,48115121
51-7	52,285	2,4046	2,4	1,77	4,248	12,30814501
51-8	55,0289	2,46157	2,37	2,33	5,5221	9,96521251
52-1	225,585	2,5286	2,36	3,92	9,2512	24,38440419
52-2	177,358	1,55508	2,36	3,92	9,2512	19,17135074
52-3	199,243	2,22752	2,28	3,8	8,664	22,99665282
52-4	183,179	1,88015	2,45	3,54	8,673	21,12060417
52-5	99,713	1,09546	2,23	3,54	7,8942	12,63117225
52-6	95,7384	1,42981	2,34	1,87	4,3758	21,87906211
52-7	99,2806	1,53441	2,29	2,34	5,3586	18,52733923
52-8	204,265	3,62198	2,37	3,34	7,9158	25,80471967
53-1	190,53	1,79667	2,25	2,79	6,2775	30,35125448
53-2	205,281	2,0978	2,25	2,85	6,4125	32,01263158
53-3	213,446	2,19756	2,34	2,5	5,85	36,48649573
53-4	154,243	1,82038	2,46	2,08	5,1168	30,1444262
53-5	104,453	1,71751	2,26	2,39	5,4014	19,33813456
53-6	151,649	2,24728	2,36	2,33	5,4988	27,5785626
53-7	118,372	1,23968	2,4	2,18	5,232	22,62461774
53-8	129,398	1,39948	2,37	2,13	5,0481	25,63301044
54-1	135,125	2,28251	2,14	2,91	6,2274	21,69846164
54-2	142,924	1,56403	2,06	2,87	5,9122	24,174419
54-3	179,774	2,59579	2,25	2,75	6,1875	29,05438384
54-4	202,139	2,78924	2,28	2,8	6,384	31,66337719
54-5	124,034	1,14372	2,29	2,66	6,0914	20,36214992
54-6	134,045	1,40337	2,29	2,62	5,9998	22,34157805
54-7	156,41	1,07314	2,38	3,3	7,854	19,91469315
54-8	145,718	0,893159	2,2	3,16	6,952	20,96058688
55-1	120,046	1,89176	2,43	2,9	7,047	17,03505038
55-2	104,547	1,57417	2,47	2,82	6,9654	15,00947541
55-3	122,956	2,00755	2,8	2,88	8,064	15,24751984
55-4	93,2394	1,23507	2,45	2,9	7,105	13,12306826
55-5	99,1926	0,833282	2,44	3,67	8,9548	11,07703131

55-6	186,18	2,15111	2,47	3,76	9,2872	20,04694633
55-7	50,2532	0,461341	2,49	3,03	7,5447	6,660728723
55-8	129,873	2,04211	2,45	3,02	7,399	17,5527774
58-1	174,811	1,66665	2,35	3,58	8,413	20,77867586
58-2	222,937	2,47296	2,31	3,56	8,2236	27,1094168
58-3	164,633	1,92838	2,24	2,48	5,5552	29,63583669
58-4	148,686	1,75676	2,24	2,48	5,5552	26,76519297
58-5	100,526	1,77657	2,32	3,73	8,6536	11,61666821
58-6	144,245	1,76035	2,43	3,72	9,0396	15,95701137
58-7	77,6438	1,17193	2,38	2,29	5,4502	14,24604602
58-8	43,5197	0,651689	2,44	1,63	3,9772	10,94229609
59-1	187,429	1,92012	2,31	2,94	6,7914	27,59799158
59-2	176,703	2,06	2,34	3,11	7,2774	24,28106192
59-3	162,419	2,04675	2,57	3,04	7,8128	20,78883371
59-4	131,405	1,4517	2,52	2,95	7,434	17,67621738
59-5	140,219	1,68934	2,2	2,75	6,05	23,17669421
59-6	122,957	1,7139	2,28	2,88	6,5664	18,72517666
59-7	114,576	1,00813	2,35	3,15	7,4025	15,47801418
59-8	155,734	2,39104	2,39	3,33	7,9587	19,56776861
510-1	153,595	1,79299	2,18	2,68	5,8424	26,28970971
510-2	155,341	1,75873	2,17	2,64	5,7288	27,11580087
510-3	128,567	1,72247	2,2	2,74	6,028	21,32830126
510-4	115,412	1,41912	2,15	2,37	5,0955	22,64978903
510-5	153,179	1,47698	2,09	3,51	7,3359	20,8807372
510-6	115,163	1,24977	2,23	3,54	7,8942	14,58830534
510-7	116,31	1,32522	2,17	2,72	5,9024	19,70554351
510-8	73,0225	0,634773	2,53	2,62	6,6286	11,01627795
511-1	199,259	2,02987	2,18	3,51	7,6518	26,04080086
511-2	221,61	2,331	2,17	3,45	7,4865	29,60128231
511-3	225,8	1,90604	2,23	3,89	8,6747	26,02971861
511-4	240,568	2,67539	2,02	3,8	7,676	31,3402814
511-5	106,681	1,09472	2,18	2,76	6,0168	17,73052121
511-6	134,802	1,99482	2,05	2,94	6,027	22,36635142

511-7	170,706	2,07447	2,19	2,49	5,4531	31,30439566
511-8	144,647	2,06762	2,21	2,58	5,7018	25,36865551
512-1	111,586	1,71269	2,17	1,42	3,0814	36,21276043
512-2	66,4028	1,12695	2,18	1,09	2,3762	27,94495413
512-3	91,3641	1,68447	2,06	3,16	6,5096	14,03528635
512-4	90,8819	1,82627	2,19	2,78	6,0882	14,92754837
512-5	155,073	1,79427	2,06	3,09	6,3654	24,36186257
512-6	201,553	1,99691	2,03	3,54	7,1862	28,04722941
512-7	179,352	1,53952	2,23	3,5	7,805	22,97911595
512-8	215,123	1,87555	2,2	3,47	7,634	28,1795913

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schema der Hornbildung (abaxiale Ansicht der Klauenhaut, Epidermis teilweise entfernt) (FIEDLER A et al., 2004).....	10
Abbildung 2 Übergang zwischen Kron- und Wandsegment zur Darstellung der Hornbildung (FIEDLER A et al., 2004).....	11
Abbildung 3 Sägescheiben S I bis S III mit ausgestanzten und isolierten Horntrapezen (WIDAUER, 2006).....	24
Abbildung 4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm	50
Abbildung 5 Schematisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit nomineller und physikalischer Spannung.....	51
Abbildung 6 Entnahmestelle der Prüfkörperchen (nach „Bestimmungen für die Verleihung und Führung des DLG-Qualitätssigels für Mittel zur Klauenpflege und Klauenhygiene“ (DLG, 2011)	64
Abbildung 7 Altersverteilung der Versuchstiere (n=39)	65
Abbildung 8 Mastendgewicht der Bullen in den verschiedenen Mastgruppen nach durchschnittlich 500 Tagen.....	66
Abbildung 9 VHM Fräskopf Fischschwanz (AS-Toolstore.de)	69
Abbildung 10 Prüfkörperchen (schematisch, nicht maßstabsgetreu).....	70
Abbildung 11 Arbeitsmaske der Fräsdatei.....	71
Abbildung 12 Einspannvorrichtung zum Durchführen der Zugversuche	72
Abbildung 13 Schritte des Sägens der Prüfkörper.....	74
Abbildung 14 Schablone zur Markierung der Probenentnahmestelle	75
Abbildung 15 Entfernen des Weichteilgewebes	75
Abbildung 16 Flex mit Schruppscheibe	76
Abbildung 17 Hobeln der Proben mithilfe eines Führholzes	77
Abbildung 18 CorelDraw-Datei zum Fräsen der Prüfkörper	78
Abbildung 19 Fertig gefräste Prüfkörper im Hornplättchen (links), aus dem Plättchen gelöst (Mitte und rechts)	79
Abbildung 20 Zugprüfmaschine	81

Abbildung 21 Prüfsoftware der Firma Zwick Roell.....	82
Abbildung 22 Kurvenverlauf eines Zugversuchs	82
Abbildung 23 Darstellung der Zugfestigkeit bei den Tieren in der Gruppe mit 9% Rohprotein in der Mastration.....	84
Abbildung 24 Darstellung der Zugfestigkeit in der 9%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben.	85
Abbildung 25 Darstellung der Zugfestigkeit in der 11%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben	87
Abbildung 26 Darstellung der Zugfestigkeit in der 13%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben	88
Abbildung 27 Darstellung der Zugfestigkeit in der 15%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben	89
Abbildung 28 Darstellung der Zugfestigkeit in der 17%-Gruppe, Mittelwerte von proximalen und distalen Proben	90
Abbildung 29 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben vorne lateral, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen	92
Abbildung 30 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben vorne medial, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen	93
Abbildung 31 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben hinten lateral, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen	94
Abbildung 32 Darstellung der maximalen Zugfestigkeit der Proben hinten medial, verteilt auf die verschiedenen Fütterungsgruppen	95
Abbildung 33 Ergebnisse aller Messungen, aufgeschlüsselt nach Lokalisation.....	96
Abbildung 34 Ergebnisse aller Messungen, Messwerte der proximalen und distalen Prüfkörperchen gemittelt	97
Abbildung 35 Mittelwerte aller Messergebnisse nach Lokalisationen	99
Abbildung 36 Ergebnisse aller Messungen nach Fütterungsgruppen.....	100
Abbildung 37 Maximale Zugfestigkeit nach Lokalisation und Fütterungsgruppe sortiert.....	104
Abbildung 38 Maximale Zugfestigkeiten der 9%-Gruppe im Vergleich zu den Gruppen >9%	105

Abbildung 39 Zugrichtung parallel zur Ausrichtung der Hornröhrchen (links) und Zugrichtung im rechten Winkel zur Ausrichtung der Hornröhrchen (rechts).....	108
Abbildung 40 Altersabhängige Klauenhornhärte nach Rasse und Standort (RUSSKE, 2001), S. 134)	111
Abbildung 41 Zusammenhang zwischen dem mittleren Schlachtgewicht (in kg) und der mittleren Zugfestigkeit (in dN/mm ²) der verschiedenen Fütterungsgruppen.....	112

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ergebnisse der Messungen von Alsleben (ALSLEBEN et al., 2003).....	19
Tabelle 2: Ergebnisse der Messungen von Widauer (WIDAUER, 2006)	21
Tabelle 3 Checkliste zur Risikoanalyse im Haltungssystem (HAGEN und MÜLLING, 2012)	26
Tabelle 4 Richtwerte zur Futteraufnahme (kg TM/Tag), Empfehlungen zur Energieversorgung (MJ ME/Tag) und zur Rohproteinversorgung (g/Tag) bei Fressern (Fleckvieh) mit mittleren Zunahmen von 1150 g (INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG UND FUTTERWIRTSCHAFT DER LFL, 2014).....	53
Tabelle 5 Empfehlungen zur Energie- (MJ ME / Tag) und Rohproteinversorgung (g/Tag) von Mastbullen bei mittleren Tageszunahmen von 1350 g (Fleckvieh) (INSTITUT FÜR TIERERNÄHRUNG UND FUTTERWIRTSCHAFT DER LFL, 2014).....	54
Tabelle 6 Seitenverteilung der Gliedmaßen	61
Tabelle 7 Anzahl der Tiere und Proben innerhalb der einzelnen Fütterungsgruppen	62
Tabelle 8 Anzahl der Proben an den verschiedenen Lokalisationen	63
Tabelle 9 Nährstoff- und Energiegehalte der Mischfuttermischung.....	65
Tabelle 10 Zusammenfassung der grafischen Darstellung der Ergebnisse aus den Zugversuchen nach Fütterungsgruppen	100
Tabelle 11 Zusammenfassung der grafischen Darstellung der Ergebnisse aus den Zugversuchen nach Lokalisation	101
Tabelle 12 Zusammenfassung der statistischen Messergebnisse aus den Zugversuchen.	102
Tabelle 13 Vergleich der Zugfestigkeiten zwischen den verschiedenen Lokalisationen	105
Tabelle 14 Zugfestigkeiten aller Proben (in N/mm ²)	121

Tabelle 15 Angaben zu den verwendeten Mastbullen	122
Tabelle 16: Auflistung der mit der Materialprüfmaschine erhobenen Werte.....	123

12 Literaturverzeichnis

- 1 Aichner, V. S., Ettle, T., Obermaier, A., Spiekers, H. und Windisch, W. (2013): Untersuchungen zum Rohproteinbedarf in der intensiven Mast von Fleckviehbullen. Forum angewandte Forschung in der Rinder- und Schweinefütterung, Fulda, Verband der Landwirtschaftskammern.
- 2 Alexander, M. (1988a): Elastic materials. In, Elastic Mechanisms in animal Movement. Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney: S. 1-21.
- 3 Alexander, M. (1988b): Springs as energy stores: running. In, Elastic Mechanisms in animal Movement. Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney: S. 31-71.
- 4 Alsleben, A., Russke, A., Wrede, J., Hamann, H. und Distl, O. (2003): Messung der Druckverteilung unter den Klauen bei Rindern der Rasse Deutsche Holstein in den ersten zwei Lebensjahren. Praktischer Tierarzt 84(3): 232-240.
- 5 Apprich, V., Ferguson J C, Hinterhofer C, Polsterer E und C, S. (2008): Is moisture really the most important influencing factor on the mechanical properties of claw horn? Modulus of elasticity and dry-matter content in flat and contracted claws Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift 121(3-4): 95-101.
- 6 Bayern-Genetik-GmbH (2016, 04.01.2016): Fleckvieh - Das Zuchtziel. from http://www.fleckvieh.de/Deutsch/Fleckvieh_Zuchtziel.htm.
- 7 Bohli, E. (1993): Die Normalwerte der Zugfestigkeit des Klauenhorns von Rind und Schwein. Universität Zürich, Zürich.
- 8 Bragulla, H. H., Budras, K. D., Mülling, C., Reese, S. und König, H. E. (2015): Allgemeine Körperdecke (Integumentum commune). In: H. E. König und H. G. Liebich, Anatomie der Haussäugetiere. Schattauer, Stuttgart: S.
- 9 Breves, G. (2005): Physiologie des Magen-Darm-Kanals. In: W. v. Engelhardt und G. Breves, Physiologie der Haustiere. Enke, Stuttgart. 2: S. 313-422.
- 10 Budras, K. D., Mülling, C. und Reese, S. (2015): Zehenendorgan (Organum digitale). In: H. E. König und H. G. Liebich, Anatomie der Haussäugetiere. Schattauer, Stuttgart: S. 628-657.
- 11 Bystron, S. und Mülling, C. K. (2012): Einfluss metabolischer Störungen auf die Klaue. Der Praktische Tierarzt 93(1): 19-25.

-
- 12 DLG (2011): Bestimmungen für die Verleihung und Führung des DLG-Qualitätssiegels für Mittel zur Klauenpflege und Klauenhygiene. DLG e.V. Zertifizierungsstelle. Frankfurt am Main, DLG: 60.
 - 13 El-Ghoul, W. und Hofmann, W. (2002): Einfluss von Klauenkrankheiten verschiedenen Grades auf die Höhe der messbaren Stressreaktion unter Berücksichtigung von Cortisol und Laktat im Blutserum beim Rind. *Praktischer Tierarzt* 83(4): 354-361.
 - 14 Ettle, T. (2014): Untersuchungen zur Proteinversorgung von Rindern, zum Einsatz von heimischem Eiweiß beim Rind und zur Proteinbewertung von Sojaprodukten aus heimischem Anbau und heimischer Verarbeitung Freising-Weihenstephan, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 74.
 - 15 Fiedler, A. (2003): Der Einfluss von Haltungsbedingungen und Fütterung auf die Klauengesundheit. In: A. Fiedler, J. Maierl und K. Nuss, *Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes*. Schattauer, Stuttgart: S. 185-194.
 - 16 Fiedler, A. (2006): Funktionelle Klauenpflege - Klauenpflege als Fundament der Therapie. *Vetkolleg Nutztiere*.
 - 17 Fiedler, A. (2012): Funktionelle Klauenpflege als Grundlage der tierärztlichen Diagnostik und Therapie. *Der Praktische Tierarzt* 93(1): 26-36.
 - 18 Fiedler A, Maierl J und K., N. (2004). In, *Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes*. Schattauer, Stuttgart. 1: S. 7,11.
 - 19 Fiedler, A., Maierl, J. und Nuss, K. (2003): Funktionelle Klauenpflege. In: A. Fiedler, J. Maierl und K. Nuss, *Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes* Schattauer, Stuttgart: S. 44-61.
 - 20 Fiedler, A. und Müller, M. (2008): Folgen mangelhafter Klauenpflege. *Praktischer Tierarzt* 89(2): 152-157.
 - 21 Flachowsky, G., Lebzién, P. und Meyer, U. (2009): Energie- und Nährstoffbedarfsableitung für Hochleistungskühe. *Züchtungskunde* 81(6): 429-441.
 - 22 GfE (2001): Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchtrinder (Zitiert nach Riemeier 2004 und nach Ettle 2014).
 - 23 Greenough, P. R., Vermunt, J. J., McKinnon, J. J., Fathy, F. A., Berg, P. A. und Cohen, R. D. H. (1990): Laminitis-like changes in the claws of feedlot cattle. *The Canadian Veterinary Journal* 31(3): 202-208.
 - 24 Gross, D., Hauger, W. und Schröder, J. (2005a): Spannungszustand. In: Gross, Hauger, Schnell und Schröder, *Technische Mechanik 2 - Elastostatik*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 8: S. 34-55.

-
- 25 Gross, D., Hauger, W. und Schröder, J. (2005b): Zug und Druck in Stäben. In: Gross, Hauger, Schnell und Schröder, Technische Mechanik 2 - Elastostatik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York. 8: S. 4-33.
- 26 Gundling N, Hellerich B, Hoedemaker M, Prien K und Ruddat I (2015): Erkrankungshäufigkeit von Milchviehherden in Schleswig-Holstein: Einfluss der Milchleistung bei der ersten Milchleistungsprüfung der Laktation, der Herdenmilchleistung und der Laktationsnummer. Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift 128(5/6): 225-232.
- 27 Hagen, J. und Mülling, C. K. (2012): Klauenerkrankungen: Risiken und Prävention. Der Praktische Tierarzt 93(1): 11-18.
- 28 Hanemann, M. (2014): Die Auswirkung der Klauengesundheit auf die Milchleistung bayerischer Fleckviehkühe Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
- 29 Haufe, H. C., Friedli, K., Gygax, L. und Wechsler, B. (2014): Influence of floor surface and access to pasture on claw characteristics in dairy cows kept in cubicle housing systems. Schweizer Archiv für Tierheilkunde 156(4): 171-177.
- 30 Heinz, S., Römer, A. und Kanswohl, N. (2014): Einfluss differenzierter Haltungsbedingungen auf die Klauengesundheit von Milchkühen. Züchtungskunde 83(6): 385-395.
- 31 Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft der LfL, A. W.-u. P. (2014): Gruber Tabelle zur Fütterung in der Rindermast. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Arbeitsbereich Wiederkäuer- und Pferdeernährung. Freising-Weihenstephan, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): 92.
- 32 Keplinger, J., Rinner, D. und Kofler, J. (2013): Evaluation of claw health status of beef suckler cows in Austria using a digital claw trimming database program. Wiener Tierärztliche Monatsschrift 100(5-6): 115-126.
- 33 Kofler, J., Pesenhofer, R., Landl, G., Sommerfeld-Stur, I. und Peham, C. (2013): Langzeitkontrolle der Klauengesundheit von Milchkühen in 15 Herden mithilfe des Klauenmanagers und digitaler Kennzahlen. Tierärztliche Praxis 41(1): 31-44.
- 34 Leopold, G. und Prietz, G. (1979): Die Bedeutung der Beziehungen zwischen physikalischen Eigenschaften und histologischen Merkmalen für die Erkennung der Klauenhornqualität beim Rind. Monatsh. Vet. Med. 35: 173-175.
- 35 Liebich, H. G., Maierl, J. und König, H. E. (2015): Vorder- oder Schultergliedmaßen (Membrana thoracica). In: H. E. König und H. G. Liebich, Anatomie der Haussäugetiere. Schattauer, Stuttgart: S. 149-220.

-
- 36 Lischer, C. (2000a): Biomechanik. In: C. Lischer, Handbuch zur Pflege und Behandlung der Klauen beim Rind. Parey, Berlin. 2: S. 31-46.
- 37 Lischer, C. (2000b): Häufige Klauenkrankheiten. In: C. Lischer, Handbuch zur Pflege und Behandlung der Klauen beim Rind. Parey, Berlin. 2: S. 95-114.
- 38 Maierl, J. (2004): Die Aufhängung des Klauenbeins – funktionelle Anatomie und Biomechanik der Rinderklaue. Tierärztl. Prax. 32(4): 239-244.
- 39 Maierl, J., Böhmisch, R. und Metzner, M. (2002): Biomechanische Testung des Aufhängeapparates des Klauenbeins im Hornschuh bei Mastbullen. Wien. Tierärztl. Mschr. 89: 203-210.
- 40 Maierl, J. und Mülling, C. (2003): Funktionelle Anatomie. In: A. Fiedler, J. Maierl und K. Nuss, Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes. Schattauer, Stuttgart: S. 1-28.
- 41 Manson, F. J. und Leaver, J. D. (1988): The influence of dietary protein intake and of hoof trimming on lameness in dairy cattle. Animal Production 47(2): 191-199.
- 42 Muggli, E., C., S.-L., Braun, U. und Nuss, K. (2011): Length asymmetry of the bovine digits. The Veterinary Journal 188(295-300).
- 43 Muggli, E., Weidmann, E., Kircher, P. und Nuss, K. (2015): Radiographic Measurement of Hindlimb Digit Length in Standing Heifers. Anatomia, Histologia, Embryologia: 6.
- 44 Mülling, C. (2015): Klaue (Ungula) der Paarzeher. In: H. E. König und H. G. Liebich, Anatomie der Haussäugetiere. Schattauer, Stuttgart: S. 638-48.
- 45 Mülling, C. und Hagen, J. (2012): Bedeutungen von Klauenerkrankungen und funktionelle Anatomie der Klaue. Der Praktische Tierarzt 93(1): 4-10.
- 46 Mülling, C. K. (2014): Bedeutung der Fütterung für die Klauengesundheit beim Rind; Was wissen wir und was ist möglich? Themen zur Tierernährung Fachtagung 2013/2014, 49434 Neuenkirchen-Vörden, Deutsche Vilomix Tierernährung GmbH. http://www.vilomix.de/de/infopool/themen_zur_tierernaehrung/2013_2014_1/themen_zur_tierernaehrung_2014.html.
- 47 Mülling, C. K. W., Bragulla, H. H., Reese, S., Budras, K. D. und Steinberg, W. (1999): How Structures in Bovine Hoof Epidermis are Influenced by Nutritional Factors. Anatomia, Histologia, Embryologia: Journal of Veterinary Medicine Series C 28(2): 103-108.
- 48 Nacambo, S., Hässig, M., Lischer, C. und Nuss, K. (2007): Difference in the Length of the Medial and Lateral Metacarpal and Metatarsal Condyles in Calves and Cows – A Post-Mortem Study. Anatomia, Histologia, Embryologia 36(6): 408-412.

-
- 49 NAV (2012): Nomina Anatomica Veterinaria. International Committee on Veterinary Gross Anatomical Nomenclature (I.C.V.G.A.N.), Hannover (Germany), Columbia, MO (U.S.A.), Ghent (Belgium), Sapporo (Japan).
- 50 Neveux, S., Keyserlingk, M. A. G. v., Passille, A. M. d., Rushen, J. und Weary, D. M. (2006): Hoof Discomfort Changes How Dairy Cattle Distribute Their Body Weight. *Journal of Dairy Science* 89(7): 2503–2509
- 51 Nuss, K., Sauter-Louis, C. und Sigmund, B. (2011): Measurements of forelimb claw dimensions in cows using a standardised sole thickness: A post-mortem study. *The Veterinary Journal* 190: 84-89.
- 52 Nuss, K. und Steiner, A. (2003a): Spezielle Diagnostik und Therapie. In: A. Fiedler, J. Maierl und K. Nuss, *Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes*. Schattauer, Stuttgart: S. 77-125.
- 53 Nuss, K. und Steiner, A. (2003b): Untersuchung des Bewegungsapparates bei Erkrankungen im Zehenbereich. In: A. Fiedler, J. Maierl und K. Nuss, *Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes*. Schattauer, Stuttgart: S. 63-76.
- 54 Nuss, K., Waldern, N. M., Weishaupt, M. A. und Wiestner, T. (2015): Kinetische Auswertung des Schrittes von Jungrindern und Kühen auf einem instrumentierten Laufband. *Tierärztliche Praxis Großtiere* 43(2): 73-80.
- 55 Riemeier, A. (2004): Einfluss der ruminalen Stickstoffbilanz (RNB) auf die Pansenfermentation, mikrobielle Proteinsynthese, Menge des am Dünndarm anflutenden nutzbaren Proteins (nXP) sowie die Stickstoffausscheidung. *Tierärztliche Hochschule Hannover Hannover*.
- 56 Russke, A. (2001): Entwicklung von Klauenform und Klauenhorneigenschaften bei Jungrindern der Rassen Deutsche Holsteins und Deutsches Braunvieh. *Tierärztlichen Hochschule Hannover, Hannover*.
- 57 Shearer, J. und van Amstel, S. (2001): Functional and Corrective Claw Trimming. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice* 17(1): 53-72.
- 58 Steinwigger, A., Guggenberger, T., Gasteiner, J., Podstatzky, L., Gruber, L., Häusler, L., Gallnböck, M. und Schauer, A. (2009): Einfluss der Proteinversorgung auf Futteraufnahme, Milchleistung, Pansen- und Blutparameter sowie N-Ausscheidung von Milchkühen. *Züchtungskunde* 81(2): 104-124.
- 59 Toussaint Raven, E. (2003a): Breeding. In, *Cattel Footcare and Claw Trimming*. The Crowood press, Marlborough: S. 121-123.
- 60 Toussaint Raven, E. (2003b): Diseases of the Quick. In, *Cattle Footcare and Claw Trimming*. The Crowood Press, Marlborough: S. 35-65.

-
- 61 Toussaint Raven, E. (2003c): Housing. In, Cattle Footcare and Claw Trimming. The Crowood Press, Marlborough: S. 117-120.
 - 62 Toussaint Raven, E. (2003d): Introduction. In, Cattle Foot Care and Claw Trimming. The Crowood Press, Marlborough: S. 8-9.
 - 63 Toussaint Raven, E. (2003e): Nutrition. In, Cattle Footcare and Claw Trimming. The Crowood Press, Marlborough: S. 114-116.
 - 64 Toussaint Raven, E. (2003f): Structure and Function. In, Cattle Footcare and Claw trimming. The Crowood Press, Marlborough: S. 13-34.
 - 65 Toussaint Raven, E. (2003g): Trimming. In, Cattle Footcare and Claw Trimming. The Crowood Press, Marlborough: S. 75-106.
 - 66 Weiler, S. (2014): Untersuchungen zur Klauengesundheit bayerischer Milchkühe zum Zeitpunkt der Schlachtung. Ludwig-Maximilians-Universität München, München.
 - 67 Widauer, S. (2006): Biomechanische Eigenschaften des Klauenbeinträgers bei Rindern mit unterschiedlicher Laktationszahl. Ludwig-Maximilians-Universität München.

13 Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr. Johann Maierl, der mir das Thema überlassen und mich über die ganze Zeit hinweg hervorragend beraten, unterstützt und gefördert hat. Mit welcher Flexibilität und Nachsicht und mit welchem Verständnis er mir während der 3 Jahre begegnete, ist nicht selbstverständlich und verdient meinen aufrichtigen Dank!

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Anatomie, Histologie und Embryologie möchte ich ebenfalls danken. Wann immer ich eine Frage hatte oder ihre Hilfe benötigte, konnte ich auf sie zählen: Marlene Amrhein war mir nicht nur fachlich, sondern auch als moralischer Beistand und Krankentransport eine große Hilfe. Die guten Ideen und der beeindruckend umfangreiche Werkzeugschrank von Stephan Baidl trugen maßgeblich zur Lösung manches Problems bei. Wann immer ich ihre Hilfe brauchte, waren die Präparatoren Siegfried Hecher, Hans Kelm und Hermann Obermayer zur Stelle. Silvia Mitterer lieh mir nicht nur ihr Arbeitszimmer als Materiallager und Werkstatt, sondern auch stets ein offenes Ohr. Außerdem hatte sie immer einige aufmunternde Worte parat. Ihnen allen ein herzliches Dankeschön!

Besondere Unterstützung erfuhr ich durch meine Studentische Hilfskraft Benjamin Faller, der viel Zeit und Geduld in das Experimentieren mit der CNC-Fräse investierte und mir auch sonst bei vielen anfallenden Fragestellungen und Tätigkeiten assistierte. Insbesondere in der Zeit zwischen Juni 2013 und März 2014 war er eine große Hilfe bei allen körperlich schweren Arbeiten. Gemeinsam bearbeiteten wir auch das Projekt im Rahmen von VetResearch. Vielen Dank für alles!

Großer Dank gebührt dem DLG-Testzentrum Technik und Betriebsmittel in Groß-Umstadt, besonders Herrn Dr. Michael Eise. Er war während der Methodenentwicklung ein wichtiger Ansprechpartner und stellte mir während der heißen Phase der Zugversuche die bei der DLG entwickelte und genutzte Einspannvorrichtung für die Prüfkörperchen leihweise zur Verfügung. Auch in Sachen Literaturbeschaffung war er mir eine große Hilfe.

Bedanken möchte ich mich auch bei Alina Nielsen, die mich tatkräftig bei der Durchführung der Zugversuche unterstützte, und bei Sandra Suchanek, die sich der

zeitraubenden Arbeit widmete, die dabei erhobenen Daten in ein verwertbares Format zu exportieren.

Theresa Hillebrecht, Jessica Lakemann und Nora Papenheim haben mir zu Anfang des Projektes beim Sägen einiger hundert Rinderbeine geholfen, wofür ich mich auch bei ihnen herzlich bedanken will.

Ein großes Dankschön geht ins Studiensekretariat der Tierärztlichen Fakultät, besonders an den Studiendekan Prof. Dr. Thomas Göbel. Er und seine Mitarbeiter Dr. Christina Beitz-Radzio, Dr. Sabine Ramspott, Dr. Martina Schwarzenbeck und Thomas Thielemann waren ganz wunderbare Kollegen, die es mir zu jeder Zeit ermöglichten, Arbeit und Promotion zeitlich und organisatorisch zu vereinbaren. Ich möchte dafür meinen herzlichen Dank aussprechen! Außerdem danke ich Frau Dr. Christina Beitz-Radzio noch zusätzlich für ihre Tätigkeit im Rahmen von Lehre@LMU. Aspekte der vorliegenden Arbeit im Rahmen des Projektes VetResearch bearbeiten zu können war ein großer Gewinn für mich. Liebe Christina, ich habe immer sehr gerne mit dir zusammen gearbeitet!

Herrn PD Dr. Sven Reese danke ich sehr für seine große Hilfe bei allen statistischen Fragestellungen und die Unterstützung in der Anfangsphase der Arbeit mir der computergesteuerten Fräse.

Einen sehr persönlichen Dank schulde ich meinen Schwiegereltern Wolfgang und Gudrun Hornuff. Sie haben mich während meines gesamten Studiums, und ganz besonders in der Endphase der Promotion, voll umfänglich unterstützt und mir wann immer es ging Zeit verschafft, indem sie als Babysitter einsprangen.

Auch meinen Eltern danke ich von Herzen. Sie haben mich seit frühester Kindheit darin bestärkt, meinen Berufswunsch zu verwirklichen. Während Studium und Promotion waren sie mir moralische Stütze und sprangen auch immer wieder kurzfristig ein, wenn Not am Mann war.

Außerdem möchte ich auch allen Freunden, Bekannten und Verwandten meinen Dank aussprechen, die mich während der ganzen Zeit unterstützt und ermutigt haben.

Der abschließende und größte Dank gilt meinem Mann und meinen beiden Kindern. Lieber Daniel, liebe Melia, lieber Levi, schön, dass es euch gibt!