

Aus dem Veterinär-Anatomischen Institut
der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

**Ex-vivo- und In-vivo-Evaluierung einer modifizierten
Klauenpflege auf unterschiedlichen Böden bei
Milchkühen**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doctor medicinae veterinariae (Dr. med. vet.)
durch die Veterinärmedizinische Fakultät
der Universität Leipzig

eingereicht von
Juliane Munzel
aus Berlin

Leipzig, 2020

Mit Genehmigung der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig

Dekan: Prof. Dr. Dr. Thomas Vahlenkamp

Betreuer: Prof. Dr. Christoph K. W. Mülling

Gutachter: Prof. Dr. Christoph K. W. Mülling
(Veterinär-Anatomisches Institut, Universität Leipzig)

Prof. Dr. Barbara Benz
(Fakultät Agrarwirtschaft, Volkswirtschaft und Management, Hochschule für
Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen)

Tag der Verteidigung: 07.07.2020

Widmung

meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Inhalt	Seite
1 Einleitung.....	1
2 Literaturübersicht.....	3
2.1 Anatomische Grundlagen.....	3
2.1.1 Makroskopischer Aufbau der Rinderklaue.....	3
2.1.1.1 Skelett.....	3
2.1.1.2 Haut.....	3
2.1.1.3 Topographische Einteilung der Hornkapsel.....	4
2.1.2 Mikroskopischer Aufbau des Klauenhorns.....	5
2.1.3 Hornqualität.....	6
2.1.4 Hornproduktion.....	6
2.2 Belastungsverhältnisse an den Klauen.....	7
2.2.1 Allgemeine Belastungsverhältnisse.....	7
2.2.2 Belastungsverhältnisse in der Bewegung.....	8
2.3 Einfluss des Bodenbelags auf Klauenform, Aktivität und Läsionen.....	8
2.4 Funktionelle Klauenpflege.....	10
2.4.1 Geschichte der funktionellen Klauenpflege.....	10
2.4.1.1 Allgäuer Methode.....	11
2.4.1.2 Modifikationen der Allgäuer Methode.....	11
2.4.2 Funktionelle Klauenpflege nach E. Toussaint-Raven.....	12
2.4.2.1 Häufige Fehler bei der funktionellen Klauenpflege.....	14
2.4.2.2 Kritik an der funktionellen Klauenpflege.....	14
2.4.2.3 Modifikationen der funktionellen Klauenpflege.....	15
2.5 Druckmessung.....	16
2.5.1 Indirekte Methoden.....	16
2.5.2 Direkte Methoden.....	17
3 Tiere, Material, Methoden.....	23
3.1 Ex-vivo-Studie.....	23
3.1.1 Bearbeitung der isolierten distalen Gliedmaßen.....	23

Inhaltsverzeichnis

3.1.2	Klauenmaße.....	24
3.1.3	Fotographische Dokumentation	25
3.1.4	Modifizierte Klauenpflege	25
3.1.5	Belastungsgerät.....	26
3.1.6	Druckmessungen mit dem Tekscan©-System	29
3.1.7	Datenaufbereitung der Druckmessdaten	31
3.1.8	Computertomographie und Erstellung der Knochenmodelle	32
3.1.9	Biplanare Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie (Fluokin)	33
3.1.10	Markerbasierte Animation der Hornkapseln und Berechnung der Sohlenfläche	33
3.1.11	Anpassung des Druckbildes an den Sohlenumriss und die Zonen	33
3.2	In-vivo-Studie.....	34
3.3	Statistische Auswertung	37
4	Ergebnisse.....	39
4.1	Ex-vivo-Studie	39
4.1.1	Klauenmaße und Sohlendicke	39
4.1.2	Ergebnisse der Druckmessungen für die gesamte Klaue	39
4.1.2.1	Kraftverteilung	40
4.1.2.2	Belastungsfläche (A_{ges}), durchschnittlicher Druck (P_{ges}), Maximaldruck (P_{max})	40
4.1.3	Ergebnisse der Druckmessungen in den einzelnen Zonen der Sohlenfläche	41
4.1.3.1	Lokalisation des Maximaldruckes.....	41
4.1.3.2	Belastete Fläche (A_{zone})	42
4.1.3.3	Kraft relativ zur Gesamtkraft der Einzelklaue (F_{zone})	44
4.1.3.4	Kraft relativ zur belasteten Fläche (P_{zone})	46
4.2	In-vivo-Studie.....	48
4.2.1	Tierdaten und Klauenbefunde	48
4.2.2	Ergebnisse der Druckmessungen	49
4.2.2.1	Kraftverteilung	49
4.2.2.2	Belastungsfläche (A_{ges})	50

Inhaltsverzeichnis

4.2.2.3	Durchschnittlicher Druck (P_{ges})	51
4.2.2.4	Maximaldruck (P_{max})	51
5	Diskussion.....	53
5.1	Diskussion von Material und Methoden.....	53
5.1.1	Versuchsaufbau und Messsystem Ex-vivo- und In-vivo-Versuch	53
5.1.2	Datenaufbereitung und –auswertung Ex-vivo- und In-vivo-Versuch	56
5.2	Diskussion der Ergebnisse	58
5.2.1	Ex-vivo-Versuche Gesamtklaue	58
5.2.2	Ex-vivo-Versuche Zoneneinteilung	61
5.2.3	In-vivo-Versuch	65
5.2.4	Schlussfolgerung und Ausblick	70
6	Zusammenfassung.....	72
7	Summary	74
8	Literaturverzeichnis	76
9	Anhang	90
10	Danksagung	92

Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
3D	Dreidimensional
Abb.	Abbildung
AK	Außenklaue
B	Ballen
Bet	Beton
BCS	Body Condition Score
cm	Zentimeter
FKP	Funktionelle Klauenpflege
ges	Gesamte Klaue
Hämorrh.	Hämorrhagie
HF	Holstein-Friesian
HL	Hinten links
HR	Hinten rechts
IK	Innenklaue
Kar	KARERA P
KP	Klauenpflege
Kur	KURA P
kV	Kilovolt
lat.	lateral
LSC	Lameness score
mA	Milliampere
med.	medial
mm	Millimeter
mod. KP	Modifizierte Klauenpflege
Ms	Millisekunde
MW	Mittelwert
N	Newton
ProK	profiKURA P
S	Sekunde
Sp	Spitze
St.-Abw.	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TMR	Totale Mischraktion
VL	Vorne links
VR	Vorne rechts

1 Einleitung

Lahmheit ist ein Symptom bei schmerzhaften Prozessen im Bewegungsapparat und stellt eine erhebliche Beeinträchtigung des Tierwohls dar (ENTING et al. 1997, GREENOUGH und WEAVER 1997, GREENOUGH 2007). Nicht nur die reinen Tierverluste, sondern auch Leistungseinbußen in Form von verminderter Milchproduktion und Fruchtbarkeitsstörungen, sowie vermehrte Tierarztkosten tragen zu einer hohen finanziellen Belastung der Tierhalter bei (DOLL und KEHLER 1997, DIRKSEN 2006, CHA et al. 2010, LIANG et al. 2017). In Sachsen ist Lahmheit die zweithäufigste Abgangsursache in Milchviehbeständen (HILGER und PASSARGE 2018). Aus den genannten Gründen ist die Prävention von Lahmheiten ein wesentliches Element im Herdengesundheitsmanagement.

90 % der Lahmheiten werden durch Klauenläsionen verursacht (BERGSTEN 2001, SHEARER et al. 2012), weshalb eine regelmäßige und professionelle Klauenpflege von großer Bedeutung ist. Die Ätiopathogenese vieler Klauenerkrankungen hat eine große biomechanische Komponente, weshalb neben der Klauenpflege auch die Gestaltung des Stallbodens entscheidend ist. Viele mechanisch-traumatische Klauenerkrankungen resultieren aus der Haltung auf harten Untergründen wie Beton oder Gussasphalt (VOKEY et al. 2001). Gummimatten werden von Rindern präferiert (TELEZHENKO et al. 2007) und haben einen positiven Effekt auf die Klauengesundheit (BENZ 2002, REUBOLD 2008) In diesem Kontext widmet sich diese Arbeit der Evaluierung unterschiedlicher Stallbodenbeläge.

Die von TOUSSAINT-RAVEN (1985b) entwickelte funktionelle Klauenpflege und zahlreiche auf ihr basierende Modifikationen werden weltweit angewendet. Diese Arbeit dient der wissenschaftlichen Prüfung einer Modifikation dieser Methode mit moderner Sensortechnik und dem Vergleich dieser Methode mit der klassischen Funktionellen Klauenpflege. Zahlreiche vorangegangene Studien untersuchten die Druckverteilung unter Rinderklauen mittels stationärer Druckmessplatten, welche aufgrund ihrer Edelstahloberfläche keine direkten Messungen der Interaktion der Klauen mit unterschiedlichen Böden zuließen (VAN DER TOL et al. 2002, GERWING 2003, FISCHER 2006, TELEZHENKO et al. 2008). In der vorliegenden Arbeit wird daher ein mobiles folienbasiertes Druckmesssystem eingesetzt, das aufgrund seiner Flexibilität den direkten Einfluss des Bodens auf die Rinderklaue erfassen kann.

Um die Übertragbarkeit auf das lebende Tier zu evaluieren, wurde für den Ex-vivo-Versuch ein Belastungsgerät konzipiert, das eine möglichst lebensnahe Befestigung und Belastung der isolierten Gliedmaßen erlaubt.

Einleitung

Folgende Hypothesen sollen überprüft werden:

1. Die modifizierte Klauenpflege unterstützt die physiologische Kraftverteilung unter der Klaue vorteilhafter als die FKP, da die vertikale Bodenreaktionskraft vermehrt auf dem Horn der Klauenwand und dem Ballen lastet.
2. Die Verwendung von Gummimatten führt zu einer biomechanisch und anatomisch vorteilhaften Druckverteilung sowie einer Reduzierung von Druckspitzen.
3. Der Ex-vivo-Versuch liefert im Hinblick auf Belastungsfläche, Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue, durchschnittlichem und maximalem Druck Ergebnisse, die denen am lebenden Tier entsprechen.

2 Literaturübersicht

2.1 Anatomische Grundlagen

2.1.1 Makroskopischer Aufbau der Rinderklaue

2.1.1.1 Skelett

Das paarige Zehenendorgan des Rindes wird als Klaue bezeichnet (BUDRAS und WÜNSCHE 2011) und besteht aus der Hornkapsel und den von ihr umschlossenen Strukturen (MAIERL und MÜLLING 2004). Die Phalangen 3 und 4 sind zu den dreigliedrigen Hauptzehen ausgebildet, Phalanx 2 und 5 zu den deutlich kleineren Afterklauen (NICKEL et al. 2003, MÜLLING 2006, LIEBICH et al. 2012). Die drei Endphalangen der Klaue werden als Fesselbein (Phalanx proximalis), Kronbein (Phalanx media) und Klauenbein (Phalanx distalis) bezeichnet. Je ein Klauensesambein (Os sesamoideum distale) befindet sich an der palmaren/plantaren Gelenkfläche des Klauengelenks, ebenso am Fesselgelenk (Os sesamoideum proximale). Die Afterklauen haben keine gelenkige Verbindung zum Gliedmaßenskelett und bestehen aus ein oder zwei Phalangen.

2.1.1.2 Haut

Die Klauenhaut ist, wie die behaarte Haut am restlichen Tierkörper, dreischichtig aufgebaut, jedoch stark modifiziert (BUDRAS und WÜNSCHE 2011). Die äußerste Schicht ist die Klauenoberhaut, Epidermis. Darunterliegend befindet sich die Klauenlederhaut, Dermis und als innerste Schicht die Klauenunterhaut, Subkutis (MÜLLING 2006, BUDRAS und WÜNSCHE 2011). Die Epidermis besteht zum Teil aus lebenden, zum Teil aus abgestorbenen Epithelzellen. Letztere sind stark verhornt und bilden die schützende Klauenkapsel. Die Epidermiszellen keratinisieren im Laufe ihrer Differenzierung, d.h. sie bilden ein Zytoskelett aus Keratinen, was zusammen mit der Bildung von Interzellulärsubstanz maßgeblich zur Stabilität und Abwehrleistung der Hornkapsel beiträgt (MAIERL und MÜLLING 2004, MÜLLING 2006). Der verhornte Klauenschuh umschließt das distale Ende des Kronbeins, das distale Sesambein und das Klauenbein, sowie den Bandapparat, die Bursa podotrochlearis und die Endabschnitte der tiefen Beuge- und Strecksehne (MAIERL und MÜLLING 2004, BUDRAS und WÜNSCHE 2011). Die Dermis dient durch ihr ausgeprägtes Gefäßsystem der Versorgung der Epidermis mit Sauerstoff und Nährstoffen. Dies geschieht durch Diffusion aus dem kapillären Netzwerk, welches sich unmittelbar an der Grenze zur Epidermis befindet (MÜLLING und BUDRAS 2002). Der bindegewebige Papillarkörper der Dermis dient der Verankerung der Hornkapsel. Die Subkutis fungiert als Stoßdämpfer und ist als gekammertes Fettpolster ausgebildet (MAIERL und MÜLLING 2004, MÜLLING 2006).

2.1.1.3 Topographische Einteilung der Hornkapsel

Topographisch werden an der Hornkapsel fünf Segmente unterschieden (MAIERL und BÖHMISCH 2001) (siehe Abb. 2.1.1.3a): Das Saumsegment bildet einen ca. 1 cm breiten Übergang zwischen behaarter Haut und Hornkapsel. Das von seiner Epidermis gebildete Horn ist weich und bröckelig und besitzt ein hohes Wasserbindungsvermögen, weshalb es stark aufquellen kann und schnell abschilfert (BUDRAS und WÜNSCHE 2011). An das Saumsegment schließt sich distal das Kronsegment an. Dieses Horn bildet den größten Teil der Klauenplatte und auch den äußeren Teil des Tragrandes (MÜLLING 2012). Darunter liegt, von außen nicht sichtbar, das Wandsegment, welches durch das Fehlen einer verschieblichen Subkutis die bei der Fußung entstehenden Kräfte direkt auf das Klauenbein überträgt. Die Epidermis des Wandsegments besitzt eine hohe Proliferationsrate, das von ihr produzierte Horn erscheint als Teil der Weißen Linie auf der Sohlenfläche der Klaue. Die Weiße Linie ist die Verbindung zwischen Sohlenhorn und Kronhorn und zieht sich mit einer Breite von 4-5 mm mit einem kürzeren axialen und einem längeren abaxialen Schenkel um die Klauenspitze. Sie ist aufgrund des besonders bei ungepflegten Klauen leicht herausbröckelnden Horns eine Prädilektionsstelle für bakterielle Besiedlung und das Eindringen chemischer Substanzen. (FIEDLER et al. 2000, MAIERL und MÜLLING 2004, MÜLLING 2006, MÜLLING 2012). Die Sohlenfläche wird größtenteils vom Sohlen- und Ballensegment gebildet (siehe Abb. 2.1.1.3b). Das Sohlensegment liegt der weißen Linie innen an und bedeckt die Klauenspitze und die Seiten der Sohlenfläche. Wegen der notwendigen festen Verbindung zwischen Klauenbein und Hornkapsel ist im Bereich des Sohlensegments keine Subkutis ausgebildet, was eine Unterscheidung zum Ballensegment erlaubt. Dieses lässt sich aufgrund funktioneller und struktureller Unterschiede in einen proximalen (weichen) und einen distalen (harten) Ballenabschnitt unterteilen (MAIERL und BÖHMISCH 2001, MAIERL und MÜLLING 2004, MÜLLING 2006, MÜLLING 2012). Der proximale Abschnitt des Ballensegments beginnt an der behaarten Haut und endet an einer gedachten Linie zwischen den beiden Enden der Weißen Linie. Lediglich der sogenannte Ballenwulst ist an der Fußung beteiligt, der palmare/plantare Abschnitt des weichen Ballens nicht. Der harte Ballen wird nur abaxial belastet, axial bildet er eine halbmondförmige Hohlkehlung und ist nicht an der Fußungsfläche beteiligt (MAIERL und BÖHMISCH 2001, MÜLLING 2006, MÜLLING 2012, GEYER 2015).

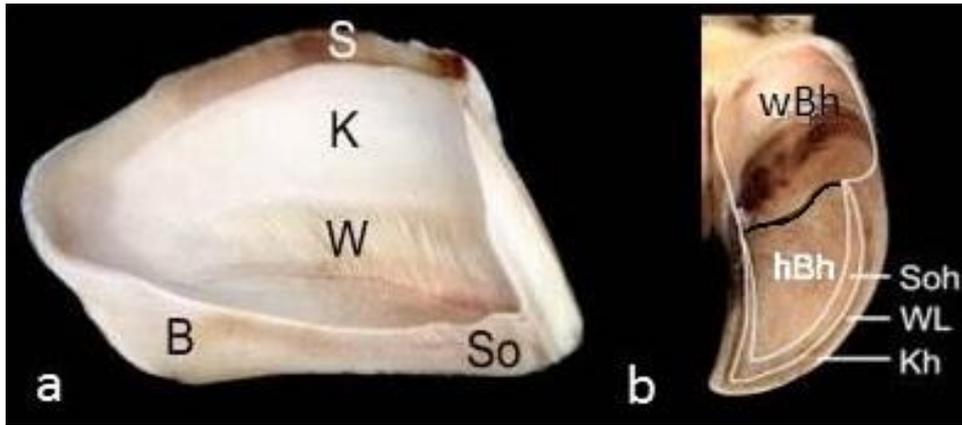


Abbildung 1: Topographische Einteilung der Hornkapsel und der Sohlenfläche, mod. nach MAIERL und MÜLLING (2004)

Abb. 1a: Innenansicht der Hornkapsel. S: Saumsegment; K: Kronsegment; W: Wandsegment; B: Ballensegment; So: Sohlensegment

Abb. 1b: Einteilung der Sohlenfläche. wBh: weiches Ballenhorn; hBh: hartes Ballenhorn; SoH: Sohlenhorn; WL: Weiße Linie; Kh: Kronhorn; schwarze Linie: Grenze zwischen den Ballensegmenten

2.1.2 Mikroskopischer Aufbau des Klauenhorns

Die mikroskopische Struktur des Klauenhorns wird durch die Beschaffenheit der Lederhaut bestimmt. Diese weist auf ihrer Oberfläche viele kleine fingerförmige Zotten, genannt Papillen, auf (MAIERL und MÜLLING 2004, BUDRAS und WÜNSCHE 2011). Dementsprechend bildet die Epidermis Röhrenformationen, das sogenannte Röhrenhorn. Zwischen den Hornröhren befindet sich das Zwischenröhren- oder interpapilläre Horn als verbindendes Element (FIEDLER et al. 2000, MAIERL und MÜLLING 2004). Dieser strukturelle Aufbau ist im Saum-, Kron-, Sohlen- und Ballensegment zu finden, im Wandsegment hingegen ist die Lederhaut zu parallel zur Klauenbeinoberfläche angeordneten Blättchen ausgebildet. Die Wandepidermis bildet folglich Hornblättchen, die für eine besonders feste Verzahnung der Lederhaut mit der Hornkapsel sorgen und durch das Fehlen der Subcutis eine direkte Kraftübertragung auf das Klauenbein gewährleisten (MAIERL und MÜLLING 2004, MÜLLING 2006). Im Bereich der weißen Linie trifft dieses Blättchenhorn auf das Röhrenhorn des Sohlensegments. Deren Heterogenität in Herkunft und Struktur erschweren eine feste Verzahnung der Klauensegmente. Zusätzlich wird durch die hohe Hornbildungsrate im distalen Wandsegment weiches, bröckeliges Horn produziert, was die weiße Linie zu einer Prädilektionsstelle für Klauenerkrankungen macht (FIEDLER et al. 2000, MAIERL und MÜLLING 2004, DIRKSEN 2006).

2.1.3 Hornqualität

Die Hornqualität umfasst Eigenschaften wie Härte, Elastizität, Resistenz gegenüber bakteriellen Enzymen und Chemikalien sowie Wasserbindungsvermögen (MÜLLING 2006, BUDRAS und WÜNSCHE 2011). Sie wird primär durch genetische Einflüsse sowie die Stoffwechsellage und Versorgung des Tieres mit Mineralstoffen, Spurenelementen und Vitaminen bestimmt (FIEDLER et al. 2000, MAIERL und MÜLLING 2004, MÜLLING 2006). Unter den exogenen oder sekundären Faktoren werden alle von außen auf die Klaue einwirkenden Umweltfaktoren zusammengefasst. Hierzu gehören chemische Einflüsse durch Gülle oder bakterielle Enzyme, die Stallbodenbeschaffenheit und, als wichtigster Faktor, der Wassergehalt des Klauenhorns (FIEDLER et al. 2000, MAIERL und MÜLLING 2004, MÜLLING 2006). Dieser hängt vom Wasserbindungsvermögen ab und bestimmt die Bruchfestigkeit. Jede Abweichung verschlechtert die biomechanischen Eigenschaften des Horns (MÜLLING 2006). Ein wichtiger histologischer Faktor ist die Dichte der Hornröhrchen pro Flächeneinheit – je mehr Hornröhrchen, desto härter und widerstandsfähiger das Horn und desto weniger Wasser kann es aufnehmen. Dabei wirken sich eine möglichst dicke Röhrchenwand und ein kleiner Markraum positiv auf die Klauenhärte aus (DIETZ und PRIETZ 1981). Härtemessungen des Klauenhorns von der dorsalen Klauenkante bis zum Ballen ergaben sowohl eine abnehmende Hornhärte als auch eine Abnahme an Trockensubstanzgehalt (HINTERHOFER et al. 2005).

2.1.4 Hornproduktion

Die Klauenform wird maßgeblich durch das Verhältnis von Hornproduktion und -abrieb bestimmt. Die Wachstumsraten der verschiedenen Klauensegmente sind relativ stabil (LEACH et al. 1997, OFFER et al. 2000, OFFER et al. 2001), der Abrieb hängt jedoch stark vom Bodenbelag ab (HAHN et al. 1986, SCHLICHTING 1986, MURPHY und HANNAN 1987). Somers et al. (2005) konnten allerdings keinen Zusammenhang zwischen Hornproduktion/-abrieb und Bodenbelag feststellen. Versuche von Ricker (1983) ergaben ein gleichmäßiges Wachstum von Wand- und Sohlenhorn, andere Autoren kamen zu abweichenden Ergebnissen: Die Neubildung vom Wandhorn beträgt ca. 5-7 mm im Monat, vom Sohlenhorn 3-4 mm und vom Ballenhorn 5-6 mm (VERMUNT und GREENOUGH 1995, GEYER et al. 2000, SHEARER und VAN AMSTEL 2001, GEYER 2015). Wenn die Hornproduktion den Abrieb übersteigt, kommt es zu einer Gewichtsumverteilung und somit zu einer fokalen Überbelastung der Lederhaut (TOUSSAINT-RAVEN 1985b). Erhöhter Druck auf einer Klaue führt dort zu vermehrter Hornneubildung (MACCALLUM 1999).

2.2 Belastungsverhältnisse an den Klauen

2.2.1 Allgemeine Belastungsverhältnisse

Anatomisch gleichen sich die Klauen der Vorder- und Hintergliedmaßen, wobei die Vorderklauen signifikant größer sind als die Hinterklauen. (SCOTT et al. 1999, MÜLLING und GREENOUGH 2006). Die Klauenform und die Körperhaltung tragen maßgeblich zur Gewichtsverteilung sowohl zwischen den Gliedmaßen als auch zwischen den Klauen und innerhalb jeder Klaue bei (BERGSTEN 2001, BRUDERER 2015, NUSS et al. 2019).

An unbeschnittenen Klauen adulter Rinder trägt an den Vordergliedmaßen die mediale Klaue die größere Last, an den Hintergliedmaßen die laterale (TOUSSAINT-RAVEN 1973, SHEARER und VAN AMSTEL 2001, VAN DER TOL et al. 2002, VAN DER TOL et al. 2003, ALSLEBEN et al. 2003, BRUDERER 2015, NUSS et al. 2019). Die Stellung der Hintergliedmaßen (gerade, bodeneng, bodenweit) trägt nur in geringem Maß zu Unterschieden in der Belastung der Einzelklauen bei (MÜLLER et al. 2019). An den Vordergliedmaßen ist der Unterschied in der Belastung geringer als an den Hintergliedmaßen, da die Gliedmaße nicht gelenkig, sondern durch verschiedene Muskelgruppen am Rumpf befestigt und somit in der Lastaufnahme flexibler ist (VAN AMSTEL und SHEARER 2006a, NUSS et al. 2011). Der Ballen und die axiale Wand sind in der medialen Klaue der Hintergliedmaßen weniger entwickelt als an der lateralen, gleichzeitig ist die Sohlenfläche der lateralen Klaue flacher und nimmt somit mehr Gewicht auf (SHEARER und VAN AMSTEL 2001). Werden die Rinder auf weichem Untergrund gehalten, spielt diese Inkongruenz keine große Rolle, erst auf Betonboden macht sich die Überbelastung der lateralen Klaue bemerkbar (SHEARER und VAN AMSTEL 2001). Eine korrekt durchgeführte funktionelle Klauenpflege (FKP) kann die ungleichen Belastungsverhältnisse an der Hintergliedmaße so ausgleichen, dass die laterale Klaue 52 % der Last trägt und die mediale 48 % (KEHLER und GERWING 2004). Ähnliche Resultate fanden Zeiner et al. (2007), die in einem Ex-vivo-Versuch eine Verschiebung von 72:28 auf 55:45 feststellten. Eine andere Studie hingegen stellte nur eine Verbesserung von 80 %:20 % auf 70 %:30 % fest (VAN DER TOL et al. 2004a). Untersuchungen an Kälbern ergaben, dass die laterale Klaue signifikant größer ist als die mediale und dass der laterale Kondylus des Metatarsus länger ist. Dieser Längenunterschied zeigt sich auch an der Vordergliedmaße, wenngleich nicht so ausgeprägt (NACAMBO et al. 2004, SCHWARZMANN et al. 2007). Bei Messungen an allen drei Zehenknochen wurde festgestellt, dass sowohl an den Vorder- als auch an den Hintergliedmaßen die laterale Zehe länger ist als die mediale (1,1 mm bzw 2 mm) (MUGGLI et al. 2011). Dass dennoch mehr Probleme an den lateralen Hinterklauen auftreten, wird mit der unflexibleren gelenkigen Verbindung der Hintergliedmaße am Rumpf begründet, die im Vergleich zur Vordergliedmaße Belastungen nicht so gut ausgleichen kann (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, VAN AMSTEL und SHEARER 2006b, MUGGLI et al. 2011).

Innerhalb der Klauen tragen der Ballen und die Klauenwand die Hauptlast (BLOWEY 2015c, DYCE et al. 2010). Letztere steht vor allem bei Tieren, die auf weichem Untergrund gehalten werden, über die Sohle hervor, sodass die Sohle nur beim Einsinken in den Boden Gewicht aufnimmt (SCOTT 1988, SHEARER und VAN AMSTEL 2001, BLOWEY 2015c). Van der Tol maß bei gepflegten Klauen die höchste Druckbelastung an der Sohle (VAN DER TOL et al. 2002). Auch die Bodenkontaktfläche war bei gepflegten Klauen signifikant größer als bei ungepflegten, allerdings nur an den Hintergliedmaßen. Die durchschnittliche Druckbelastung unter der Sohle sank nach Durchführung einer FKP (VAN DER TOL et al. 2004b). Bei übermäßigem Hornwachstum an der Klauenspitze, wie es bei Tieren in Anbindehaltung und auf nicht-abrasiven Böden vorkommt, wird das Gewicht zum großen Teil auf die Ballenregion verschoben, was zu Lederhautquetschungen führen kann (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, LISCHER 2000b, KÜMPER 2001, BLOWEY 2015c).

2.2.2 Belastungsverhältnisse in der Bewegung

An den Vordergliedmaßen verteilt sich das Gewicht laut van der Tol (2003) während aller Fußungsphasen gleichmäßig zwischen lateraler und medialer Klaue. Eine andere Studie zeigte, dass in 10 von 12 Fällen die laterale Vorderklaue den Boden zuerst berührte (SCHMID et al. 2009a). Beim Aufsetzen der Hintergliedmaße berührt zuerst der Ballen der lateralen Klaue den Boden (VAN DER TOL et al. 2003, MEYER et al. 2007, SCHMID et al. 2009b). Während der Hauptstützphase wird das Gewicht auf die mediale Klaue verlagert und in der Abdruckphase sind beide Klauen zu gleichen Teilen belastet (VAN DER TOL et al. 2003, VAN AMSTEL und SHEARER 2006a). Zum Zeitpunkt der maximalen Belastung liegt auf harten Böden das meiste Gewicht auf der abaxialen Wand und auf dem Ballen, die Sohle nimmt kaum Last auf (SCOTT 1988, KÜMPER 2001). Dabei dehnt sich die Klaue im Trachtenbereich seitlich aus, während es im Bereich der Vorderwand zu einer Verengung der Hornkapsel kommt. Der Ballen und die Sohle senken sich ab und der Zwischenklauenspalt erweitert sich (GÜNTHER 1991). Die beim Aufsetzen entstehenden Druckkräfte werden durch den Aufhängeapparat in Zugkräfte umgewandelt. Die Gesamtheit der Formveränderungen der Klaue beim Auf- und Absetzen wird als Klauenmechanismus bezeichnet.

2.3 Einfluss des Bodenbelags auf Klauenform, Aktivität und Läsionen

Klauenform

Die Gestaltung des Stallbodens, besonders dessen Abrasivität, hat großen Einfluss auf Hornproduktion und Abrieb, sowie auch auf die Form der Klauen (MURPHY und HANNAN 1987, VOKEY et al. 2001, MANSKE et al. 2002, TELEZHENKO et al. 2009). Unnachgiebiger und abrasiver Betonboden führt zu einer hohen Hornproduktionsrate (MURPHY und HANNAN 1987, OSSENT et al. 1987), was zu deformierten Klauen und ungleichmäßiger Belastung,

besonders in der lateralen Hinterklaue, führt (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, HAHN et al. 1986, VAN DER TOL et al. 2003). In modernen Milchviehbetrieben mit Laufstallhaltung werden zunehmend die Bereiche, in denen sich die Tiere frei bewegen, mit Gummimatten ausgestattet. Nach 3-, bzw. 9-monatiger Haltung auf Gummiboden bilden hingegen viele Kühe durch Abschilferung des Sohlenhorns einen deutlich überstehenden Tragrand aus, wie es auch bei Weiderindern zu beobachten ist (BENZ 2002, REUBOLD 2008). Überlange Klauen werden vor allem bei Rindern beobachtet, die auf Tiefstreu gehalten werden (BERGSTEN et al. 2015), aber auch bei Haltung auf Gummiboden wurde eine verringerte Abnutzung der Dorsalwand und dadurch ein größerer Winkel im Ballen festgestellt, was zu einer vermehrten Belastung der Ansatzstelle der tiefen Beugesehne führt (KREMER et al. 2004). Andere Autoren stellten allerdings keine signifikanten Unterschiede in Hornproduktion und-abrieb bei auf Beton und Stroh gehaltenen Kühen fest (WEBSTER 2001, SOMERS et al. 2005).

Aktivität

Ouweltjes et al. (2009) stellten beim Vergleich von Betonspalten- und Gummispaltenboden (Animat, Saint-Élie d'Orford, Canada) eine höhere Aktivität, eine größere Schrittzahl pro Minute und eine geringere Liegedauer bei Kühen, die auf Gummispaltenboden gehalten wurden, fest. Die Schrittlänge vergrößert sich auf den Gummimatten KSL, Diamond, KEN (Firma Kraiburg, Tittmoning, Deutschland) und Animat (Saint-Élie d'Orford, Canada) im Vergleich zu Betonboden (BENZ 2002, TELEZHENKO und BERGSTEN 2005, RUSHEN und PASSILLE 2006), ebenso die Laufgeschwindigkeit (BENZ 2002, RUSHEN und PASSILLE 2006). Im Vergleich zu Gussasphalt schnitt Gummiboden in Bezug auf Laufgeschwindigkeit, sowie Stütz- und Schwungphase allerdings genauso gut ab (ALSAAOD et al. 2017). Lediglich die Schrittlänge vergrößerte sich tendenziell auf Gummiboden (Kura Flex, Gummiwerke Kraiburg, Tittmoning, Deutschland), was sich mit den Ergebnissen von HAUFE et al. (2009) deckt. Im Vergleich zu Gussasphalt schnitt Weideboden in allen erfassten Bewegungsparametern signifikant besser ab (ALSAAOD et al. 2017).

Lahme Kühe verkürzen ihre Schritte auf unnachgiebigen Böden, auf Sand- oder Gummiböden (KEN (Firma Kraiburg, Tittmoning, Deutschland) und Animat (Saint-Élie d'Orford, Canada) hingegen nicht (TELEZHENKO und BERGSTEN 2005, RUSHEN und PASSILLE 2006, FLOWER et al. 2007). Vor die Wahl gestellt, bevorzugen Kühe elastische Böden wie KURA S, KURA P, KSL und KEN (Firma Kraiburg, Tittmoning, Deutschland) und PastureMat (Promat Ltd., Seaforth, Ontario, Canada) zum Laufen und Stehen (BENDEL 2005, TUCKER et al. 2006, TELEZHENKO et al. 2007, PLATZ et al. 2008). Brunstverhalten sowie Komfortverhalten nahm auf Gummiböden (Kura S, Gummiwerke Kraiburg, Tittmoning, Germany) signifikant zu (BENDEL 2005, PLATZ et al. 2008) und die Tiere rutschten weniger aus (Animat, Saint-Élie d'Orford, Canada) (JUNGBLUTH et al. 2003, RUSHEN und PASSILLE 2006). Durch das Einsinken der Klaue wird

eine größere Kontaktfläche zwischen Sohle und dem nachgiebigen Untergrund hergestellt (FLOWER et al. 2007).

Läsionen

Viele Studien zeigten, dass auf Stroh gehaltene Kühe signifikant weniger Klauenerkrankungen entwickeln als auf Beton gehaltene (LIVESEY et al. 1998, SOMERS et al. 2003, BERGSTEN et al. 2015). Ein Autor stellte allerdings eine signifikant höhere Anzahl an Ballenfäule bei dieser Haltungsform im Vergleich zu auf Beton gehaltenen Kühen fest (WEBSTER 2001). Kälber in Strohboxen wiesen im Vergleich zur Haltung auf Betonspaltenboden signifikant weniger Sohlenhämmorrhagien auf (FRANKENA et al. 1992). Zahlreiche Studien untersuchten den Einfluss von Gummiböden auf die Klauengesundheit von Milchkühen. REUBOLD (2008) stellte für das Auftreten der Erkrankungen Klauenrehe, Weiße-Linie-Defekt und Doppelte Sohle eine signifikante Abnahme auf Gummiböden fest. Zu ähnlichen Ergebnissen kam BENZ (2002), die sowohl eine Abnahme der Häufigkeit als auch des Schweregrades von mechanisch-traumatischen Klauenerkrankungen auf Gummiböden feststellte.

Auch Milchkühe in Anbindehaltung waren Gegenstand von Studien. HULTGREN und BERGSTEN (2001) stellten eine Verringerung der Prävalenz von Dermatitis, Ballenfäule, Sohlenblutungen und -geschwüren bei Haltung auf Gummimatten fest.

Andere Autoren hingegen stellten im Hinblick auf Klauenläsionen und klinischer Lahmheit keinen Vorteil von planbefestigten Gummimatten gegenüber planbefestigten Betonböden fest (VOKEY et al. 2001, VANEGAS et al. 2006), mit Ausnahme von Ballenhornfäule, die auf Betonböden häufiger auftrat (VANEGAS et al. 2006).

2.4 Funktionelle Klauenpflege

2.4.1 Geschichte der funktionellen Klauenpflege

Schon Autoren der Antike wie Aristoteles und Cato erwähnten pflegerische Maßnahmen an Rinderklauen (BELITZ 1925, STARKE 1954). Da Rinder damals größtenteils als Zug- oder Lasttiere genutzt wurde, lag der Fokus auf einem Schutz der Klauen vor übermäßiger Abnutzung, wofür Teer, Fett oder Leinenverbände oder auch Beschläge benutzt wurden (BELITZ 1925, STARKE 1954, ANKER 1854, RUTHE 1997). Prophylaktische Klauenpflege wurde erst ab Mitte des 19. Jahrhunderts von einem Schweizer Autor propagiert, davor wurden nur bereits bestehende Leiden behandelt (ANKER 1854). Eine systematische Arbeitsanleitung wurde jedoch erst mit der „Allgäuer Methode“ (siehe Kapitel 2.4.1.1) entwickelt.

2.4.1.1 Allgäuer Methode

Im bayerischen Allgäu wurde im 20. Jhd. eine Klauenpflegemethode entwickelt, um Klauenschäden infolge von Stallklauenbildung, die durch die vorherrschende Anbindehaltung entstanden und die zu Lahmheiten sowie indirekt zu geringerer Fruchtbarkeit und Leistung führten, einzudämmen (RETZL 1938, FISCHER 1949). Durch unzureichenden Abrieb kommt es zu übermäßigem Wachstum der Dorsalwand, woraufhin das Gewicht vermehrt auf die Ballenregion verlagert wird (RETZL 1938, FISCHER 1949, SCHLEITER 1966). RUSTERHOLZ (1920) beschrieb die durch die Fehlbelastung hervorgerufenen typischen Sohlengeschwüre. Für diese Methode zur prophylaktischen Klauenpflege werden Stemmeisen, Hammer, Stoßmesser, Klauenzange, Klauenraspel, Rinnmesser und ein Holzklotz benötigt (RETZL 1938, FISCHER 1949). Zunächst wird die Dorsalwand am stehenden Fuß mit Stemmeisen und Hammer senkrecht zum Boden gekürzt (FISCHER 1949, STARKE 1954). Die ideale Länge der Dorsalwand wird mit ca. vier Fingern Breite angegeben, unter Berücksichtigung von Alter und Größe des Tieres (STARKE 1954, SCHLEITER 1966). Andere Autoren empfehlen lediglich, die Klauenlänge an den Körperbau des Tieres anzupassen (RETZL 1938, FISCHER 1949). Für das Beschneiden der Sohle wird die Klaue mit der Gliedmaßenspitze auf einen Holzklotz aufgesetzt, so dass die Sohle nach kaudal weist. Scheibchenweise wird mit einem Stoßmesser Horn abgetragen, bis eine „speckige Konsistenz“ vorliegt oder sie mit dem Daumen eindrückbar ist (STARKE 1954). Der Ballen soll unbedingt geschont werden, da er bei langen Klauen ohnehin stark belastet ist (RETZL 1938). Zum Ausschneiden verdächtiger Sohlenbereiche und zur Behandlung von Geschwüren wird das Rinnmesser verwendet (FISCHER 1949). Die Ränder können bei Bedarf mit der Klauenraspel geglättet werden (RETZL 1938, FISCHER 1949, STARKE 1954). Die Afterklauen werden mit der Klauenzange auf eine Länge von ca. zwei Fingerbreit gekürzt (RETZL 1938), womit ihre Länge dem Durchmesser ihrer Basis entspricht (SCHLEITER 1966, CLEMENTE 1995). Ein Nachteil dieser Methode ist das für das Rind unangenehme und zum Teil in den Gelenken schmerzhaftes Kürzen der Dorsalwand mittels Hammerschlägen auf das Stemmeisen (STARKE 1954). Besonders an den Vordergliedmaßen reagieren viele Rinder mit Treten oder Unruhe, da die Erschütterung im Gelenk durch das härtere Horn noch größer ist (FISCHER 1949).

2.4.1.2 Modifikationen der Allgäuer Methode

Bei der Scherenmethode (SCHLEITER 1966) wird eine Klauenschere benutzt, die vom Aussehen her einer Astschere ähnelt. Ein Schenkel ist schneidend, der andere stumpf. Diese Methode ist vor allem für das meist härtere Horn an den Vorderklauen geeignet (RETZL 1938). Diese werden zum Beschneiden aufgehoben, die Hinterklauen werden zunächst im Stand beschnitten, die Bearbeitung der Sohle erfolgt wie an der Vordergliedmaße am aufgehobenen Bein (SCHLEITER 1966, GÜNTHER 1991). Diese Methode war die in der ehemaligen DDR

vorwiegend propagierte (SEITE und SEITE 1973) und wurde durch die Entwicklung von hydraulischen Klauenscheren massiv erleichtert (GÜNTHER 1991). An der Scherenmethode ist die zum Teil unkontrollierte Hebeleinwirkung, die leicht zum Verschneiden der Klaue und Quetschungen der Lederhaut führen kann, kritisch zu sehen (STARKE 1954, SCHLEITER 1966). Auch wird, im Gegensatz zur Allgäuer Methode, der Ballenbereich beschnitten (SCHLEITER 1966). An weiteren Modifikationen werden von Schleiter die Hauklingen-Methode und die Rassel-Methode beschrieben. Die Bezeichnungen weisen auf die verwendeten Geräte hin und haben keine Vorteile gegenüber der Allgäuer Methode (SCHLEITER 1966).

2.4.2 Funktionelle Klauenpflege nach E. Toussaint-Raven

Anfang der 1970er Jahre wurde in den Niederlanden von E. Toussaint-Raven eine aus fünf Arbeitsschritten bestehende Klauenpflegemethode entwickelt, die heute noch weltweit gelehrt und ausgeübt wird. Sie wird als funktionelle Klauenpflege (FKP) oder holländische Methode bezeichnet. Die FKP zielt darauf ab, eine gleichmäßige Belastungsverteilung zwischen den Klauen zu schaffen und eine möglichst große Kontaktfläche der Sohle mit dem Boden herzustellen (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, VAN DER TOL et al. 2004b).

Folgende Werkzeuge werden benötigt: eine Klauenzange, je ein rechts- und ein linksschneidendes Hufmesser und, wenn erwünscht, ein elektrischer Winkelschleifer mit Schleifscheibe (BLOWEY 2002, VAN AMSTEL et al. 2002a, FIEDLER et al. 2004). Die Kuh sollte in einem Klauenpflegestand fixiert und das zu bearbeitende Bein hochgebunden und sicher fixiert sein, um größtmögliche Sicherheit für das Tier und den Tierarzt bzw. Klauenpfleger zu gewährleisten (SHEARER und VAN AMSTEL 2001, FIEDLER et al. 2004, BLOWEY 2015b).

Die eigentliche präventive Routine-FKP umfasst die ersten drei Arbeitsschritte, die darauffolgenden beiden werden, wenn nötig, zur kurativen Klauenbehandlung eingesetzt (FIEDLER et al. 2004, FIEDLER 2006). Es wird stets mit der physiologisch geformten Klaue begonnen, an den Vordergliedmaßen also mit der Außenklaue, hinten mit der Innenklaue (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, FIEDLER et al. 2000). Hierbei ist zu beachten, dass die Definition einer normal geformten Klaue je nach Rasse und Aufstallungsform variiert (LOGUE et al. 2006). Die folgende Beschreibung der FKP bezieht sich auf die Hinterklauen. Zunächst wird die Innenklaue mit der Klauenzange durch einen senkrecht zur Sohlenfläche angesetzten Schnitt gekürzt, so dass die Dorsalwandlänge bei Holstein-Friesian-Kühen ca. 7,5 cm beträgt (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, SOHRT 1999, FIEDLER et al. 2000, VAN AMSTEL et al. 2002a). Die Länge sollte je nach Alter und Gewicht angepasst werden (SOHRT 1999). Dann wird die Sohlendicke der Klaue so eingestellt, dass an der Spitze eine 5-7 mm dicke Hornschicht bestehen bleibt (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, VAN AMSTEL und SHEARER 2006a). Die Bearbeitung erfolgt mit einem Klauenmesser oder mit einer elektrischen Schleifscheibe,

Literaturübersicht

wobei die Ballenregion geschont wird (FIEDLER et al. 2000, FIEDLER et al. 2004, VAN AMSTEL und SHEARER 2006a). Die Sohlendicke sollte 5-7 mm betragen und kann an der abgeschnittenen Klauenspitze, durch Kompressionsversuche mit einer Klauenzange oder dem Daumen (VAN AMSTEL et al. 2002a) oder sonographisch beurteilt werden (KOFLENER et al. 1999, KOFLENER und KÜBBER 2000). Die „Daumenprobe“ sollte aber nicht als Standardprobe angewendet werden, da die dafür aufgewendete Kraft personenabhängig ist (FIEDLER et al. 2000) und der für die wahrnehmbare Verformung erforderliche Druck stark von der individuellen Hornhärte abhängt. Im zweiten Arbeitsschritt wird die Außenklaue der medialen in Länge und Höhe angepasst, wobei ausdrücklich empfohlen wird, mit der Ballenregion zu beginnen, da diese an der lateralen Klaue fast immer ein übermäßiges Wachstum aufweist (VAN AMSTEL und SHEARER 2006a). Hierfür kann ein Klauenmesser benutzt werden, bei hohen Tierzahlen wird allerdings oftmals auf einen elektrischen Winkelschleifer mit Messerscheibe zurückgegriffen (LISCHER und NÄF 2000, FIEDLER et al. 2004, BLOWEY 2015b). Im dritten Schritt der FKP wird eine Hohlkehlung an beiden Klauen herausgearbeitet (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, VAN AMSTEL und SHEARER 2006a, BLOWEY 2015b). Sie umfasst ca. ein Drittel der Sohle, beginnend am axialen Klauenrand (FIEDLER et al. 2004). Die Hohlkehlung trägt zum Schutz der Klaue beim Aufsetzen auf hartem Untergrund bei, da die Sohle elastisch nachgeben kann und die Lederhaut im Bereich des Tuberculum flexorium vor hohem Druck und somit vor der Entstehung von Sohlengeschwüren geschützt wird (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, FIEDLER et al. 2004). Sie dient außerdem der Belüftung und Selbstreinigung des Zwischenklauenspaltes und der Vorbeugung von Tylomen (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, LISCHER und NÄF 2000, VAN AMSTEL und SHEARER 2006a, BLOWEY 2015b). Bis zum heutigen Tag liegen allerdings keine evidenzbasierten Studien zum Vorteil der Hohlkehlung vor, hier besteht weiterer Forschungsbedarf (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, BLOWEY 2015a).

Im vierten Schritt der von Toussaint-Raven beschriebenen Klauenpflegemethode werden Defekte entlastet, indem das den Defekt umgebende Horn abgetragen wird (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, FIEDLER et al. 2004). Es muss sämtliches lose liegendes Horn um den Defekt abgetragen werden, da sich sonst Schmutz und Erreger zwischen Hornkapsel und Lederhaut festsetzen und zu einer weiteren Infektion führen können (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, LISCHER 2000a, FIEDLER et al. 2004). Der Übergang vom Defekt zum gesunden Horn sollte fließend sein, um diesen von Druck zu entlasten und die Heilung zu ermöglichen (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, FIEDLER et al. 2004, FIEDLER 2006). Der letzte Schritt beinhaltet die Entfernung losen Horns, besonders in der Ballenregion. Hier bilden sich im Zusammenhang mit Ballenfäule oft tiefe Furchen und Taschen aus, die leicht zum Schmutzfänger und Keimreservoir werden (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, PIJL und LISCHER 2000, FIEDLER et al. 2004, BLOWEY 2015b).

Neueren Untersuchungen zufolge sollte eine prophylaktische Klauenpflege zweimal jährlich durchgeführt werden (RETZL 1938, FISCHER 1949, FIEDLER et al. 2000).

2.4.2.1 Häufige Fehler bei der funktionellen Klauenpflege

Die Einführung elektrischer Winkelschleifer ermöglichte die Behandlung großer Tierzahlen in kürzerer Zeit. Befürchtungen, dass deren Benutzung zu einer Überhitzung der Lederhaut führen könnten, erwiesen sich als unbegründet, (KOFLEER 2004, JANTSCHER et al. 2005), allerdings besteht die Gefahr, die Sohle unbemerkt zu dünn zu schleifen. Eine zu starke Kürzung der Klauenspitze führt oft dazu, dass die Sohle zu dünn geschliffen wird (BLOWEY 2002). Das Kürzen der Klauenspitze muss im rechten Winkel zur Sohlenfläche geschehen, nicht im rechten Winkel zur Dorsalwand, da die Beurteilung der Sohlendicke so erschwert wird (FIEDLER 2012). Ein häufiger Fehler ist das Abtragen des abaxialen und/oder axialen Wandhorns, welches die Last vom härtesten gewichtsaufnehmenden Teil der Klaue auf Sohle, weiße Linie und Ballen verlagert (SHEARER und VAN AMSTEL 2001, BLOWEY 2002, BURGI 2008a, BURGI 2014, BLOWEY 2015c).

2.4.2.2 Kritik an der funktionellen Klauenpflege

Studien haben gezeigt, dass ein striktes Einhalten der Prinzipien der FKP nach Toussaint-Raven Nachteile mit sich bringen kann (VAN DER TOL et al. 2004b, CARVALHO et al. 2005, NUSS und PAULUS 2006). Die letztgenannten Autoren stellten bei Ex-vivo-Untersuchungen an Hintergliedmaßen von Simmental-Rindern verschiedenen Geschlechts und Alters fest, dass bei einer strikten Einstellung der Sohlendicke auf die von Toussaint-Raven empfohlenen 5 mm an der Spitze und 8 mm im Ballenbereich die laterale Klaue 2-3 mm über die mediale heraussteht, also die laterale Zehe länger ist, was wiederum zu einer ungleichmäßigen Lastverteilung führt (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, PAULUS und NUSS 2002b, PAULUS und NUSS 2002a, NUSS und PAULUS 2006). Wird die laterale Klaue der medialen in der Höhe angepasst, um die Last gleichmäßig zwischen beiden Klauen zu verteilen, ist deren Sohle signifikant dünner als die der medialen, zum Teil liegt sogar die Lederhaut frei (PAULUS und NUSS 2002b, PAULUS und NUSS 2002a, NUSS und PAULUS 2006).

Eine ähnlich aufgebaute Ex-vivo-Studie an Vordergliedmaßen von Simmentalfärsen und -kühen zeigte ebenfalls, dass bei einer exakten Einstellung der Sohlendicke von beiden Klauen auf 5 mm, die eine über die andere hinaussteht. Bei Angleichung der beiden Klauen auf die gleiche Höhe verliert diese Klaue an Hornstärke unter der Sohle (NUSS et al. 2011). Die Ballenhöhe des lateralen Ballens sollte nicht ohne weiteres an die des medialen angepasst werden – der laterale Ballen wird leicht zu niedrig und anfälliger für Ballenfäule und Erosionen (PAULUS und NUSS 2004, NUSS und PAULUS 2006). Ein Anpassen der Höhe des lateralen an die des medialen Ballens sollte nur bei ausreichender Höhe des medialen Ballens erfolgen

(TOUSSAINT-RAVEN 1985b, PAULUS und NUSS 2004).

VAN DER TOL (2004b) diskutierte die Sinnhaftigkeit der Verteilung der Last auf eine größere Fläche, da hierbei auch die empfindlichen Bereiche der Sohle vermehrt Last aufnehmen. Auch CARVALHOS (2005) Studie, die den Effekt der FKP bei Milchkühen während eines Schrittes analysierte, kam zu dem Ergebnis, dass die auftretenden Kräfte zugunsten einer größeren belasteten Fläche vom Tragrand auf den weichen Teil der Sohle verschoben werden.

Auch die empfohlene Dorsalwandlänge von 7,5 cm, gemessen vom Übergang der behaarten Haut in die Hornkapsel bis zur Klauenspitze, (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, SOHRT 1999, FIEDLER et al. 2000, VAN AMSTEL et al. 2002a) wird immer wieder zur Diskussion gestellt. ARCHER et al. (2015) vermaßen 219 Hinterklauen von HF-Kühen mithilfe von CT-Aufnahmen und berechneten bei einer Sohlendicke von 5 mm, einer Wanddicke von 8 mm und einem Dorsalwandwinkel von 50° die minimale Dorsalwandlänge. Sie postulierten einen Wert von 85 mm, der für Kühe unter 4 Jahren angemessen war, ältere Kühe hingegen sollten eine Dorsalwandlänge von 95 mm aufweisen.

BLOWEY und INMAN (2012, 2013, 2014) vermaßen die Basal- und Dorsallänge von Klauenbeinen und stellten eine so große Variation auch zwischen dem lateralen und medialen Klauenbein einer Klaue fest, dass eine standardisierte Dorsalwandlängenempfehlung der Hornkapsel nicht angemessen erscheint. Sie stellten einen Zusammenhang zwischen der Größe der Hornkapsel und den Maßen des Klauenbeins fest und propagieren eine tier- und klauenindividuelle Beschneidung des Hornschuhs.

2.4.2.3 Modifikationen der funktionellen Klauenpflege

Einige Autoren empfehlen, nicht wie bei Toussaint Raven beschrieben, mit der kleineren medialen Klaue, sondern mit der größeren lateralen Klaue zu beginnen, da erstere (an der Hintergliedmaße meist die Innenklaue) oft nur wenig Bearbeitung nötig hat (LISCHER und NÄF 2000, KÜMPER 2006). VAN AMSTEL et al. (2002b) ergänzten einen weiteren Schritt zu der von Toussaint-Raven beschriebenen Methode, in welchem die Ballenhöhe der beiden Klauen einander angeglichen wird. An den Hintergliedmaßen bedeutet dies, dass meistens der Ballen der äußeren Klaue bearbeitet wird. Bei einem Vergleich dieser Methode mit der weiter unten beschriebenen „White line method“ (BLOWEY 2015a) fielen keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die Sohlendicke auf, allerdings schnitt die modifizierte FKP etwas besser ab. Nur 1,5 % der auf diese Art gepflegten Klauen wiesen eine Sohlendicke von < 5 mm auf, bei der „White line method“ waren es 14,6 %, weshalb der Autor empfiehlt, diese Methode mit großer Vorsicht anzuwenden.

ZEINER et al. (2007) verglichen die Druckverteilung von funktionell gepflegten mit in Bezug auf den Dorsalwandwinkel spitz- und stumpfwinklig gepflegten Klauen. Alle drei Methoden zeigten eine günstigere Druckverteilung im Vergleich zu ungepflegten Klauen, da die

Innenklaue mehr an der Lastaufnahme beteiligt war als vor der Klauenpflege. Bei den spitzwinklig gepflegten Klauen wurde die Dorsalwand nicht gekürzt, was zu einer längeren Sohle und somit zu einer größeren Belastungsfläche und geringeren Drücken führte. Die Klauen mit steiler Dorsalwand wiesen eine kleinere Sohlenfläche und dementsprechend auch höhere Drücke auf. Allerdings konnten die isolierten Gliedmaßen aufgrund von Limitationen des Messsystems nur mit ca. 60 kg belastet werden.

Im Gegensatz zu der von Toussaint-Raven empfohlenen gleichmäßigen Anbringung der Hohlkehlung postuliert BURGI (2008b), an der lateralen Klaue eine ungefähr doppelt so große Hohlkehlung anzubringen wie an der medialen.

BLOWEY (2015c) empfiehlt für seine „White line method“ genannte Klauenpflegemethode, den ersten Schnitt zum Kürzen der Dorsalwand im rechten Winkel zur Dorsalwand anzulegen, nicht im rechten Winkel zur Sohlenfläche, wie von anderen Autoren empfohlen (FIEDLER 2012). Im nächsten Schritt wird die Sohle so weit abgetragen, bis der Verlauf der weißen Linie um die Klauenspitze herum wieder sichtbar ist, was zu einer Entlastung der Sohlengeschwür-Prädilektionsstelle führt. Die nächsten Schritte werden entsprechend der bei TOUSSAINT-RAVEN (1985b) beschriebenen Methode ausgeführt.

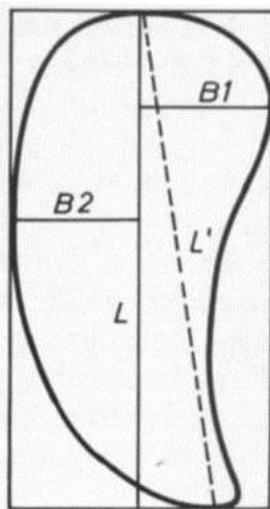
Ouweltjes et al. (2009) verglichen eine Pflegemethode, bei der die Hohlkehlung über zwei Drittel der Sohlenbreite 3 bis 5 mm tief ausgeschnitten wurde, mit einer plan geschliffenen Sohle. Die beiden Methoden unterschieden sich in Bezug auf Klauenerkrankungen nicht. BYSTRON (2012) führte, ausgehend von einer 5 mm dicken Sohle, Berechnungen zur nötigen Dorsalwandlänge durch und stellte fest, dass die von TOUSSAINT-RAVEN (1985b) empfohlene Länge von 75 mm bei bis zu 73 % der Kühe zu einer zu dünnen Sohle führt.

2.5 Druckmessung

Um den Einfluss von Bodenbelägen und unterschiedlichen Klauenpflegemethoden objektiv erfassen zu können, sind Druckmessungen unter der Rinderklaue ein sinnvolles Instrument. Eine computergestützte Visualisierung trägt dabei in hohem Maße zur Anschaulichkeit der Ergebnisse bei.

2.5.1 Indirekte Methoden

Eine indirekte Ermittlung des Druckes kann nur durch dessen Berechnung erfolgen, indem man das auf der Klaue lastende Gewicht durch die belastete Fläche teilt. Bei dieser Methode wird allerdings lediglich das durchschnittliche Gewicht berechnet, der Maximaldruck und dessen Lokalisation bleiben unberücksichtigt. FESSL (1968) ermittelte die Bodenkontaktfläche, indem er den Klauenriss auf Papier zeichnete und wie von HABACHER (1920) beschrieben, ein Rechteck mit verschiedenen Tangenten hinzufügte, siehe *Abbildung 2*.



B1 = BREITE DER AXIALEN KLAUENHÄLFTE

B2 = BREITE DER ABAXIALEN KLAUENHÄLFTE

B1+B2 = GESAMTBREITE DER KLAUE

L = LÄNGE DER KLAUE

L' = LÄNGE ZWISCHEN DEN BERÜHRUNGSPUNKTEN

Abbildung 2: Berechnung der Sohlenfläche nach HABACHER (1920)

Andere Autoren fertigten Negativabdrücke an, indem sie Rinder über eine mit feinen Sägespänen bestreute Ebene laufen ließen und die Abdrücke planimetrisch vermaßen (HUBER 1983, BAUMGARTNER 1988, SCHMID 1990) oder mit Farbe einen Abdruck der Sohle abnahmen, um diesen planimetrisch zu vermessen (ALSLEBEN 2002).

Das auf den Klauen lastende Gewicht kann durch getrennte Wägungen der Vorder- und Hinterhand, der einzelnen Gliedmaßen oder der Außen- und Innenklaue ermittelt werden. Auf den Vordergliedmaßen lasten im Stand ca. 60 % der Körpermasse, auf den Hintergliedmaßen ca. 40 % (WITZMANN 1969, FIEDLER et al. 2000). Andere Autoren stellten eine Verteilung von 55 % zu 45 % fest (FESSL 1968, IRPS 1983). Bei Tieren in der Laktation kann sich dieses Verhältnis allerdings ausgleichen (MÜLLING und GREENOUGH 2006) und nach dem Melken tragen die Hintergliedmaßen signifikant weniger Last als davor (CHAPINAL et al. 2009). Auch das Trächtigkeitsstadium hat einen Einfluss: mit fortschreitender Trächtigkeit tragen die Hintergliedmaßen bis zu 47 % des Körpergewichts (FESSL 1968).

2.5.2 Direkte Methoden

WEBB und CLARK (1981) benutzten eine Kombination aus einer Kistler Kraftmessplatte und einer Druckmessplatte, um die Interaktion von Gliedmaßen mit dem Untergrund zu erfassen. Sie zeichneten sowohl Kraft-Zeit-Kurven der Schritte einer Kuh und eines Schweins als auch deren Druckmessbilder auf. Bei der Druckmessplatte handelte es sich um einen modifizierten Pedobarographen, der von CHODERA (1957) erfunden und von BETTS (1980) weiterentwickelt wurde. Es wurden Maximaldrücke sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterklaue in Höhe von 80 N/cm² gemessen, allerdings war die Messvorrichtung nicht stabil genug für Tiere mit

Literaturübersicht

einem Gewicht von über 500 kg. SCOTT (1987) verwendete dieselbe Gerätekombination, um Kraft- und Druckmessungen an Färsen, trächtigen Kühen sowie an lahmen und nicht-lahmen Kühen durchzuführen. Es wurde das Druckbild ausgewertet, das laut Kraft-Zeit-Kurve der maximalen Belastung entsprach. Zu diesem Zeitpunkt lag die größte Belastung der lateralen Klaue auf deren Ballen und dem abaxialen Tragrand. Für die mediale Klaue konnte gezeigt werden, dass auch der axiale Tragrand in die Belastung miteinbezogen wird. In der Untersuchung zu Unterschieden des Gangbildes von lahmen und nicht-lahmen Kühen konnte mit der Kraftmessplatte eine Entlastung der betroffenen Gliedmaße nachgewiesen werden. (SCOTT 1987, SCOTT 1989).

Bereits 1976 wurde von NICOL und HENNING (1976) ein kapazitives Messsystem vorgestellt. In diesem System wird ein Dielektrikum, das sich zwischen 2 Platten befindet, beim vertikalen Einwirken einer Kraft (Normalkraft) komprimiert. Dadurch verändert sich der Abstand der Platten zueinander und somit auch die Kapazität des Kondensators. Letztere beeinflusst die Höhe einer elektrischen Spannung, die Amplitude. Diese verhält sich also proportional zur einwirkenden Kraft. Nach dem beschriebenen Messprinzip wurde, zunächst für den Einsatz in der Humanmedizin, eine Kraftmessplatte mit einer Auflösung von 4 Sensoren pro cm^2 entwickelt (BRUNNER et al. 1983).

MAIR et al. (1988) führten mit einem System dieser Art Druckmessungen an vier Holstein-Friesian-Kühen durch. Jeweils an der rechten Vordergliedmaße wurde die belastete Fläche und das auf der Klaue lastende Gewicht gemessen und daraus der durchschnittliche Druck (N/cm^2) berechnet. Dieser betrug bei einer Belastungsfläche von 35 bis 46 cm^2 ungefähr $21 \text{ N}/\text{cm}^2$. Der Maximaldruck bewegte sich zwischen 73 und $127 \text{ N}/\text{cm}^2$ und lag im Ballenbereich. Als nachteilig wird die erforderliche Messdauer von 30 s betrachtet, da schon leichte Körper- oder Kopfbewegungen zu Gewichtsschwankungen von bis zu 10 % führen können.

DISTL et al. (1990) führten an zehn Milchkühen Messungen ebenfalls an der rechten Vordergliedmaße durch. Sie stellten einen durchschnittlichen Druck von $19 \text{ N}/\text{cm}^2$ bei einer Belastungsfläche von 58 cm^2 fest. Der Maximaldruck betrug zwischen 56 und $58 \text{ N}/\text{cm}^2$. Allerdings war die gemessene Druckbelastung um den Faktor 1,5 niedriger als die erwartete, weshalb eine Kombination mit der oben erwähnten Kistler Kraftmessplatte zu empfehlen wäre, um mit deren Kraftkurven eine nachträgliche Eichung der Werte vorzunehmen.

OSSENT et al. (1987) benutzten eine Doppel-Kraftmessplatte, um die Gewichtsverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue an den Hintergliedmaßen von Färsen vor und nach der Abkalbung sowie an drei bis sieben Jahre alten Kühen zu ermitteln. Jede der beiden Kraftmessplatten lag drei Stahlringen auf, die durch das Gewicht des Tieres deformiert wurden. Der Grad ihrer Deformation wurde in eine Gewichtskraft konvertiert. Die Messwerte

schwankten sowohl zwischen den Tieren als auch zwischen den Einzelmessungen eines Tieres stark. Es konnte gezeigt werden, dass die Lastverteilung zwischen den Klauen bei jüngeren Tieren eine ausgeglichener war als bei älteren, bei denen die laterale Hinterklaue mehr Gewicht trug. Tiere mit einer starken Überbelastung der lateralen Klaue ante partum entwickelten mit einer höheren Wahrscheinlichkeit post partum ein Sohlengeschwür.

VAN DER TOL (2002) benutzte eine Druckmessplatte (RsScan- footscan) mit einer Auflösung von 2,6 Sensoren/cm², um die vertikale Druckverteilung unter drei bis fünf Wochen zuvor gepflegten Klauen von HF-Kühen zu messen. An den Vordergliedmaßen war der Maximaldruck signifikant häufiger auf der medialen Klaue lokalisiert, an den Hintergliedmaßen auf der lateralen. Er stellte fest, dass die über fünf Messungen gemittelten Druckmaxima zwischen 17 und 54 N/cm² lagen und größtenteils an der Sohle auftraten. Zur genauen Lokalisation der Maximaldrücke verwendete er die nebenstehende Unterteilung in Zonen nach GREENOUGH und WEAVER (1997). An den Vordergliedmaßen war der Maximaldruck meist in den Zonen 3 und 6 lokalisiert, an den Hintergliedmaßen in Zone 5.

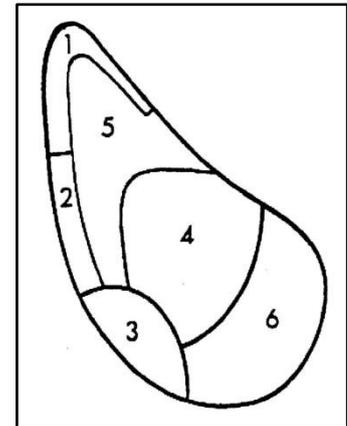


Abbildung 3:
Unterteilung der
Sohlenfläche nach
(GREENOUGH, WEAVER
1997)

GERWING (2003) untersuchte mit einer Messplattform die Lastverteilung zwischen Außen- und Innenklaue und innerhalb der Einzelklauen an den Hintergliedmaßen von HF-Kühen. Die Fußungsfläche vergrößerte sich nach der FKP um 12,9 %, hatte nach 14 Wochen allerdings wieder ihren Ausgangswert erreicht. Die Anteile der Außen- und Innenklaue an der Gesamtfußungsfläche ließen sich maximal auf 58 % zu 42 % angleichen (Außenklaue : Innenklaue). Die Lastverteilung zwischen den beiden Einzelklauen lag nach der FKP bei 52 % (Außenklaue) zu 48 % (Innenklaue), nach 6 Monaten waren die Ausgangswerte von 68 % (AK) zu 32 % (IK) wieder erreicht. Die Druckbelastung sank nach der Klauenpflege unter der Außenklaue um bis zu 9,6 N/cm². FISCHER (2006) untersuchte mit einem Pedographie-Analyser der Fa. Zebris (zebris Medical GmbH, Isny, Deutschland) ebenfalls den Einfluss der Klauenpflege auf die Druckverteilung unter Rinderklauen. Sie stellte an der Hintergliedmaße eine Entlastung der Außenklaue von 56 % des Gesamtgewichts auf 49 % fest. Dieser Effekt hielt bis zu acht Wochen nach der Klauenpflege an. Die Fußungsfläche der gesamten Klaue nahm erst vier Wochen nach der Klauenpflege signifikant zu, an der Außenklaue sogar erst nach 12 Wochen. Der mittlere Druck fiel unmittelbar nach der Klauenpflege signifikant ab und sank weiter bis zur vierten Woche, wobei der Effekt an der Außenklaue stärker ausfiel als an der Innenklaue. 12 Wochen nach der Klauenpflege hatten sich Außen- und Innenklaue auf einen Druck von ca. 25,5 N/cm² angeglichen, welcher bis zur 20. Woche stabil blieb.

Literaturübersicht

ZEINER et al. (2007) belasteten isolierte Hintergliedmaßen mittels eines hydraulischen Kolbens und untersuchten die Druckverteilung mithilfe einer Druckmessplatte. Es wurde ein metallener Dorn in die Markhöhle des Metatarsus eingebracht und die tiefe Beugesehne bei der Hälfte der untersuchten Klauen fixiert. Bezüglich einer eventuellen veränderten Druckbelastung durch die Fixierung der Sehne konnten lediglich geringe Unterschiede ohne statistische Signifikanz von wenigen Prozent bzw. wenigen N/cm^2 festgestellt werden. Aufgrund der eingeschränkten Belastbarkeit der Druckmessplatte konnte nur eine Last von 600 N aufgebracht werden.

TELEZHENKO et al. (2008) führten Druckmessungen unter der linken Hintergliedmaße von schwedischen Holstein-Milchkühen durch, die entweder auf Gummimatten, auf abrasivem Gussasphalt oder auf wenig abrasivem Betonspaltenboden gehalten wurden. Die Sohle wurde in Ballen, Sohle und Wandbereich eingeteilt (*Abbildung 4*). Kühe, die auf Gummiboden gehalten wurden, zeigten an der lateralen Klaue eine höhere Belastung auf dem Wandbereich und eine geringere auf der Sohle, verglichen mit auf Asphalt gehaltenen Tieren. An der medialen Klaue trug die Sohle auf Asphalt die größte Last, der Wandbereich wies keine Unterschiede zwischen den Untergründen auf. Das verwendete Druckmess-System (das I-Scan-System der Firma Tekscan©) erlaubte jedoch keine Analyse der Interaktion Klaue – Boden, da es sich um eine standardisierte Messoberfläche aus Stahl mit einer 5 mm dicken Gummiauflage handelte.

BERGSTEN et al. (2015) analysierten die belastete Fläche und das Druckverteilungsmuster der Klauen von Färsen, die auf Beton- oder Gummibodenbelägen gehalten wurden, mit Hilfe derselben Messtechnik. Bei den Tieren, die auf nachgiebigen Böden standen, trugen der Ballen und die abaxiale Wand die größte Last. Auf dem abrasiven Betonboden war zwar die belastete Fläche größer, dafür war bei diesen Tieren auch die Sohle mit in die Lastaufnahme einbezogen.

Die von den zuvor erwähnten Autoren verwendeten Kraftmessplatten mit unnachgiebiger Oberfläche erlaubten keine Erfassung der Interaktion der Klaue mit verschiedenen Untergründen. SPIELMANN (1984) unternahm den ersten Versuch, ein kapazitives Druckmesssystem in einen ledernen Klauenschuh zu integrieren. Die unterschiedlichen Klauengrößen, die freiliegenden Kabelverbindungen und die auftretenden Scherkräfte zeigten jedoch, dass die Anwendbarkeit und Haltbarkeit begrenzt waren, so dass keine weiteren Versuche mit diesem Messsystem stattfanden.

DE BELIE und ROMBAUT (2003) führten Messungen an isolierten Gliedmaßen durch, die kurz über dem Kronrand abgesetzt waren. Um die direkten Einflüsse von Betonböden

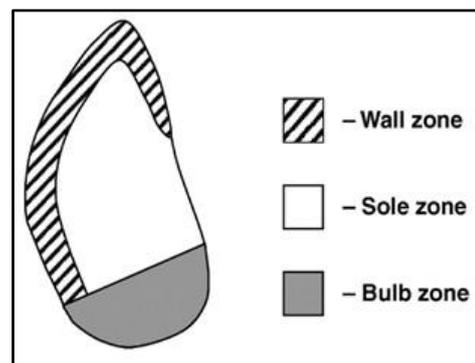


Abbildung 4: Einteilung der Sohlenfläche nach (Telezhenko et al. 2008)

Literaturübersicht

unterschiedlicher Rauigkeit auf die Rinderklauen zu testen, setzten sie das I-scan-System ein, ein piezoelektrisches Druckmesssystem mit einer Dicke von 0,1 mm und einer Auflösung von 15 Sensoren/cm². Eine Software der Firma Tekscan© ermöglichte die Auswertung von Kontaktfläche, durchschnittlichem und maximalem Druck. Mit steigender Rauigkeit stieg der maximale Druck unter den Klauen an, die Kontaktfläche sank aber. Eine ähnlich aufgebaute Studie, bei der dasselbe Druckmesssystem eingesetzt wurde, stellte bei einer Belastung von 200kg eine durchschnittliche Kontaktfläche von 11,96 cm², einen durchschnittlichen Druck von 335 N/cm² und einen Maximaldruck von 1519 N/cm² fest (FRANCK und BELIE 2006).

NILSSON et al. (2006) benutzten für einen Ex-vivo-Versuch zum Vergleich der Druckverteilung auf Betonspaltenboden mit planbefestigtem Boden ebenfalls das I-scan-System. Eine isolierte, starr fixierte Gliedmaße wurde in verschiedenen Positionen auf Betonböden mit unterschiedlicher Spaltenbreite mit 180 kg belastet. Der Maximaldruck wies auf Spaltenboden zwei- bis dreimal höhere Werte auf als auf planbefestigtem Boden.

CARVALHO et al. (2005) benutzten für Druckmessungen an Kühen mit gepflegten und ungepflegten Klauen das Matscan-System, eine flexible Druckmessmatte mit einer Auflösung von 1,4 Sensoren/cm², ebenfalls von der Firma Tekscan©. Die Matte lag einer Kraftmessplatte auf, mit derer Hilfe das Matscan-System kalibriert wurde. Um die Veränderung der Lastverteilung durch die FKP darzustellen, teilte er die Sohle in vier Regionen ein (*Abbildung 6*). In der Hauptstützphase reduzierte sich die Last der Hintergliedmaße vom ungepflegten zum gepflegten Zustand in den Zonen 3 und 4, in Zone 2 stieg sie stark und in Zone 1 nur geringgradig an. Um den Effekt auf die von TOUSSAINT-RAVEN (1985b) beschriebene Prädilektionsstelle für das Rusterholz'sche Sohlengeschwür zu überprüfen, wurde die mediale Sohlenfläche repräsentierende Zone 2 nochmals in einen größeren apikalen und einen kleineren palmaren Abschnitt unterteilt (*Abbildung 5*). Die höchsten Kräfte traten an den Hintergliedmaßen bei ungepflegten Klauen in Zone 1 und 5 auf, nach der FKP war Zone 1 immer noch stark belastet, Zone 2 und 4 allerdings mehr als vor der Pflege. Es ließe sich also der Rückschluss ziehen, dass FKP die Last in der empfindlichen Zone 2 erhöht (CARVALHO et al. 2006).

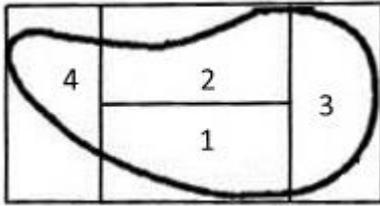


Abbildung 6: Einteilung der Sohlenfläche in vier Zonen nach (Carvalho et al. 2005)

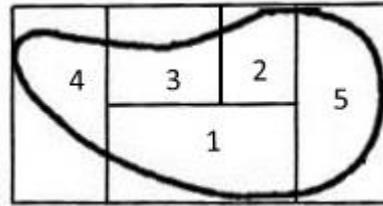


Abbildung 5: Einteilung der Sohlenfläche in 5 Zonen mit Darstellung der Prädilektionsstelle für das Rusterholz'sche Sohlengeschwür in Zone 2 nach (Carvalho 2006)

Ein weiterer Ex-vivo-Versuch an Hintergliedmaßen von Milchkühen untersuchte den Einfluss verschiedener Gummimatten und von Betonboden auf die Druckverteilung an funktionell gepflegten Klauen. Hier wurde eine Lastverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue von 70:30 festgestellt und eine signifikant größere Belastungsfläche sowie ein signifikant geringerer durchschnittlicher Druck auf den Gummimatten. Diese Untersuchungen wurden mit dem auch in dieser Arbeit verwendeten HoofTM System der Firma Tekscan© durchgeführt (OEHME et al. 2017).

In-vivo-Versuche zur Untersuchung der Druckverteilung mit dem Tekscan©-System wurden bisher vor allem an Pferden durchgeführt (JUDY et al. 2001, LANGE et al. 2012, AL NAEM 2014, HÜPPLER et al. 2015). Die Verwendung dieser mobilen Sensoren erlaubt die direkte Bewertung der Einwirkung von verschiedenen Untergründen auf den Huf oder die Klaue, da die Versuche nicht mit Kraftmessplatten mit Edelstahloberfläche durchgeführt werden. HÜPPLER et al. (2015) sowie HAGEN et al. (2016) untersuchten mit dem Tekscan©-System den Einfluss unterschiedlicher Bodenbeläge, Hufbearbeitungsmethoden und Hufbeschläge in Hinblick auf die Druckverteilung unter dem Huf. OEHME et al. (2019) verwendeten erstmals die erwähnten mobilen Sensoren unter den Klauen von Milchkühen in der Bewegung, um auf unterschiedlichen Untergründen Kraft-Zeit-Kurven aufzuzeichnen und die vertikale Bodenreaktionskraft zu erfassen.

3 Tiere, Material, Methoden

3.1 Ex-vivo-Studie

3.1.1 Bearbeitung der isolierten distalen Gliedmaßen

Die Studie wurde an 11 isolierten linken Hintergliedmaßen von Holstein-Friesian-Milchkühen durchgeführt, die von einem Schlachthof bezogen wurden (Südost Fleisch GmbH, D-04600 Altenburg) und augenscheinlich frei von pathologischen Veränderungen und Läsionen waren. Die Tiere befanden sich mindestens in ihrer ersten Laktation. Geburtsdatum und Schlachtgewicht des Tieres wurden erfasst. Die Kühe waren im Durchschnitt $49,4 \pm 17$ Monate alt und das Schlachtgewicht betrug $260,9 \pm 43,9$ kg.

Tabelle 1: Schlachtgewicht und Alter der Holstein-Friesian-Kühe

Klaue Nr	Schlachtgewicht (kg)	Alter bei Schlachtung (Monate)
K4T	284,2	65
K5T	189,6	39
K6T	314	44
K11T	225,8	61
K12T	348,8	28
K13T	249,8	39
K17T	252,2	27
K19T	274,6	87
K22T	252,2	40
K23T	226,6	57
K24T	243,8	56
Mittelwert	260,9	49,4
Standardabw.	43,9	17,0

Die Gliedmaßen wurden im Tarsalgelenk abgesetzt und mit Schlachtnummer und Studiennummer beschriftet. Im Veterinär-Anatomischen Institut wurden die Gliedmaßen gesäubert und unmittelbar distal des Tarsalgelenks mittels einer Bandsäge gekürzt. Das Knochenmark wurde entfernt und ein Dübel der Größe S14 (Fischerwerke GmbH & Co. KG, D-72178 Waldachtal) mittels eines 2-Komponenten-Klebers (Demotec95, Komponente A: Methylmethacrylat; Komponente B: Polymethylmethacrylat, Demotec Demel e.K., D-61130 Nidderau) in der Markhöhle fixiert. In den Dübel wurde eine Stockschraube (Cosch

Edelstahltechnik GmbH, D- 92533 Wernberg-Köblitz) von 10 cm Länge und 1 cm Durchmesser eingeschraubt, so dass das Gewinde 1,5 cm über das distale Gliedmaßenende herausragte. Anschließend wurden die Streck- und Beugesehnen auf einer Länge von 10 cm präpariert. Auf beide Hornkapseln wurden mit Cyanacrylat-Klebstoff je vier Edelstahlkugelmarder (\varnothing 2 mm) aufgeklebt, je drei auf die abaxiale Wand und eine auf die axiale. Die isolierten Gliedmaßen wurden ab dem Zeitpunkt der Schlachtung bis zum Ende ihres Versuchszeitraums bei 6°C gekühlt.

3.1.2 Klauenmaße

Vor Durchführung der Klauenpflege wurden mittels einer digitalen Messlehre und eines Winkelmessers folgende Klauenmaße erfasst (VERMUNT und GREENOUGH 1995, PAULUS und NUSS 2006, NUSS et al. 2011):

1. Dorsalwandlänge (DWL)
2. Ballenhöhe (BH)
3. Ballenlänge (BL)
4. Sohlenlänge (SL)
5. Sohlenbreite (SB)
6. Klauenlänge (KL)
7. Dorsalwandwinkel (DWW)

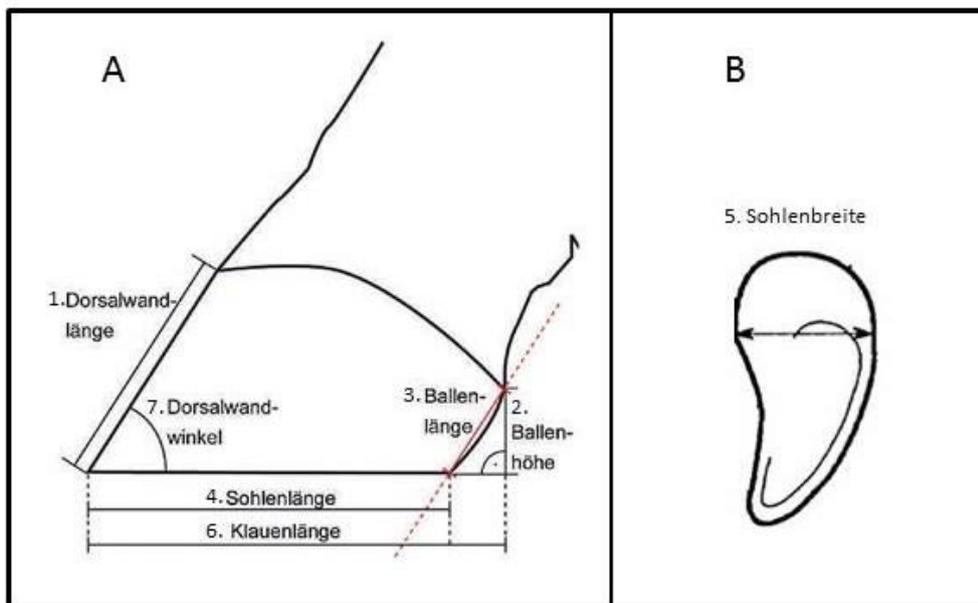


Abbildung 7: Darstellung der erhobenen Klauenmaße

A: modifiziert nach PAULUS und NUSS (2006)

B: modifiziert nach VERMUNT und GREENOUGH (1995)

Nach der modifizierten Klauenpflege wurden dieselben Parameter erfasst und um zwei weitere Maße ergänzt:

9. Tragrandhöhe (TRH)
10. Sohlendicke (SD)

Die Tragrandhöhe wurde an der Klauenspitze und an der abaxialen Wand erfasst. Zur Erfassung der Sohlendicke wurde die Klaue nach Abschluss aller Messungen im gefrorenen Zustand mit einer Bandsäge längs gesägt und die Horndicke unter der Klauenbeinspitze und unter dem Tuberculum flexorium gemessen. Die Messpunkte sind in *Abbildung 8* dargestellt.

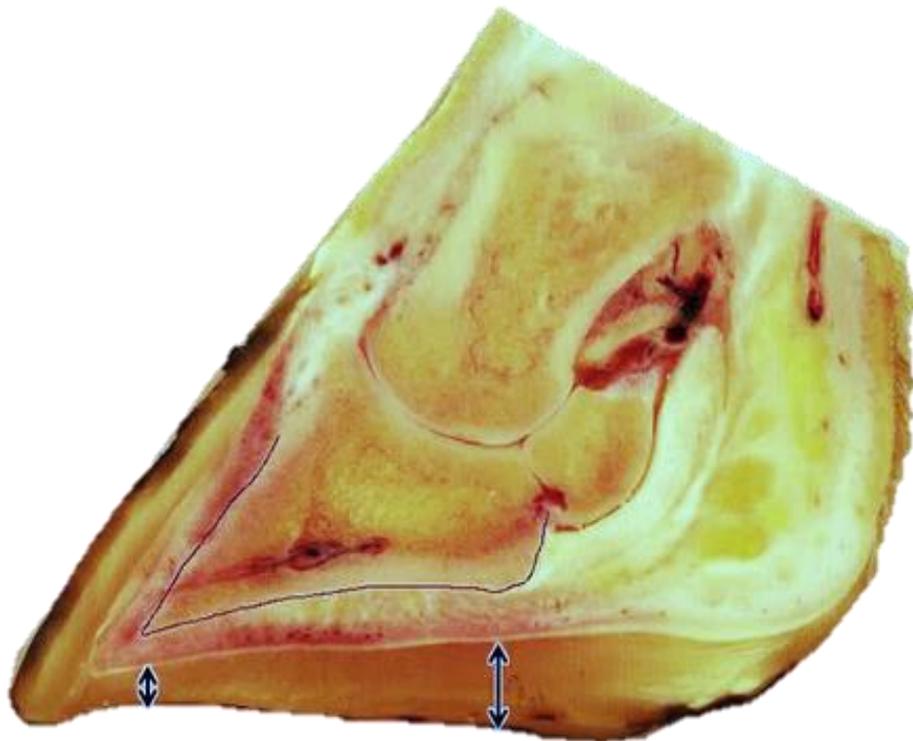


Abbildung 8: Messpunkte zur Erfassung der Sohlendicke an den modifiziert gepflegten Klauen. Teile der Klauenbeinkonturen wurden schwarz umrandet.

3.1.3 Fotografische Dokumentation

Die Klauen wurden vor und nach der modifizierten Pflege in stehender Position von kranial, kaudal, medial und lateral sowie von der Sohlenfläche aus fotografiert.

3.1.4 Modifizierte Klauenpflege

Die Klauen wurden zunächst nach der in Kapitel 2.6.2 beschriebenen Methode bis einschließlich Schritt 2 gepflegt (TOUSSAINT-RAVEN 1985a). Das heißt, die Dorsalwand wurde auf eine Länge von 7,5 cm gekürzt und die Sohlendicke der beiden Klauen angepasst. Anschließend wurde mit Hilfe einer Sandschleifscheibe und eines Dremels (DREMEL,

Leinfelden-Echterdingen, Deutschland) mit speziellem Hochgeschwindigkeits-Fräsmesser ($\varnothing 7,2$ mm) das Ballenhorn des weichen und harten Ballens sowie Teile des Sohlenhorns abgetragen (MAIERL und BÖHMISCH 2001) (siehe *Abbildung 1* und *Abbildung 9*) und somit ein Tragrand von ca. 2 mm Höhe im Bereich des Kronhorns und der weißen Linie herausgearbeitet. Der Tragrand zog sich über das kraniale Drittel der axialen Wand um die Klauenspitze über das laterale Wandhorn bis zum Beginn des weichen Ballens. Zum Schluss wurde eine Hohlkehlung an beiden Klauen angebracht, wie von TOUSSAINT-RAVEN (1985a) für die FKP beschrieben.

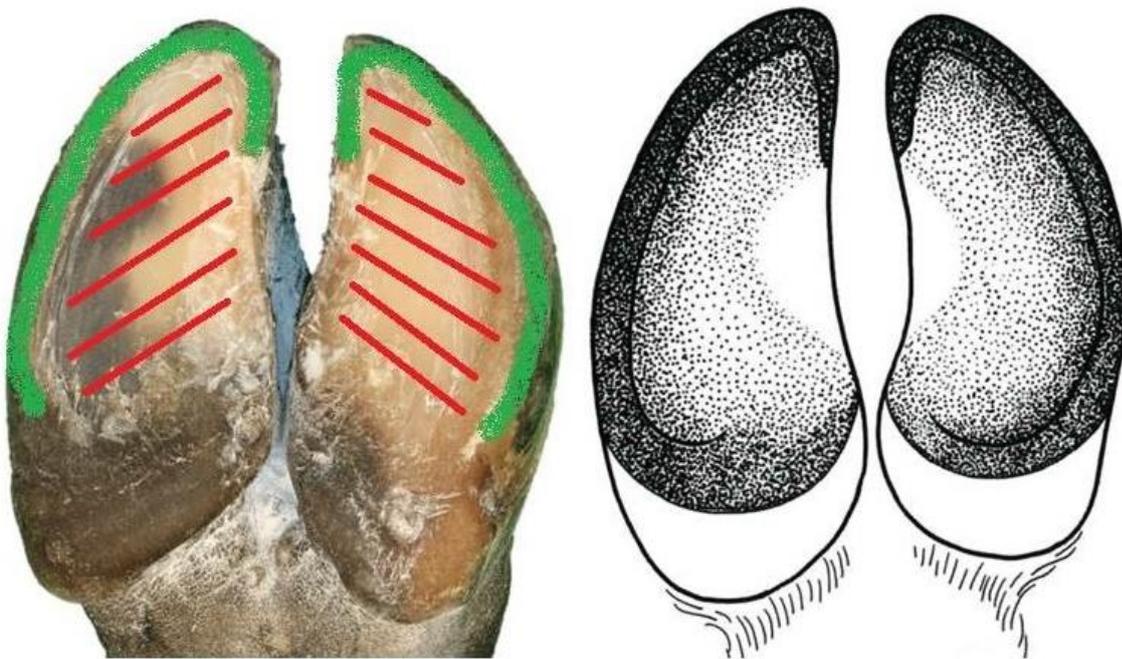


Abbildung 9: Darstellung der modifizierten Klauenpflege an der isolierten Gliedmaße.

Linkes Bild: rot schraffierter Bereich: abgetragene Sohlenfläche; grün markierter Bereich: überstehender Tragrand

Rechtes Bild: Schemazeichnung nach BLOWEY (2015c)

3.1.5 Belastungsgerät

Um die In-vivo-Verhältnisse simulieren und eine physiologische Last auf die isolierte Gliedmaße aufbringen zu können, wurde für die Ex-vivo-Versuche ein Belastungsgerät selbst konstruiert und gebaut. Das Belastungsgerät bestand aus einem Aluminiumgestänge (1,90 x 2,10 x 1,34 m), an dem mittig ein Gewichtskorb befestigt war, der mittels einer Kurbel abgesenkt und angehoben werden konnte (*Abbildung 10*).

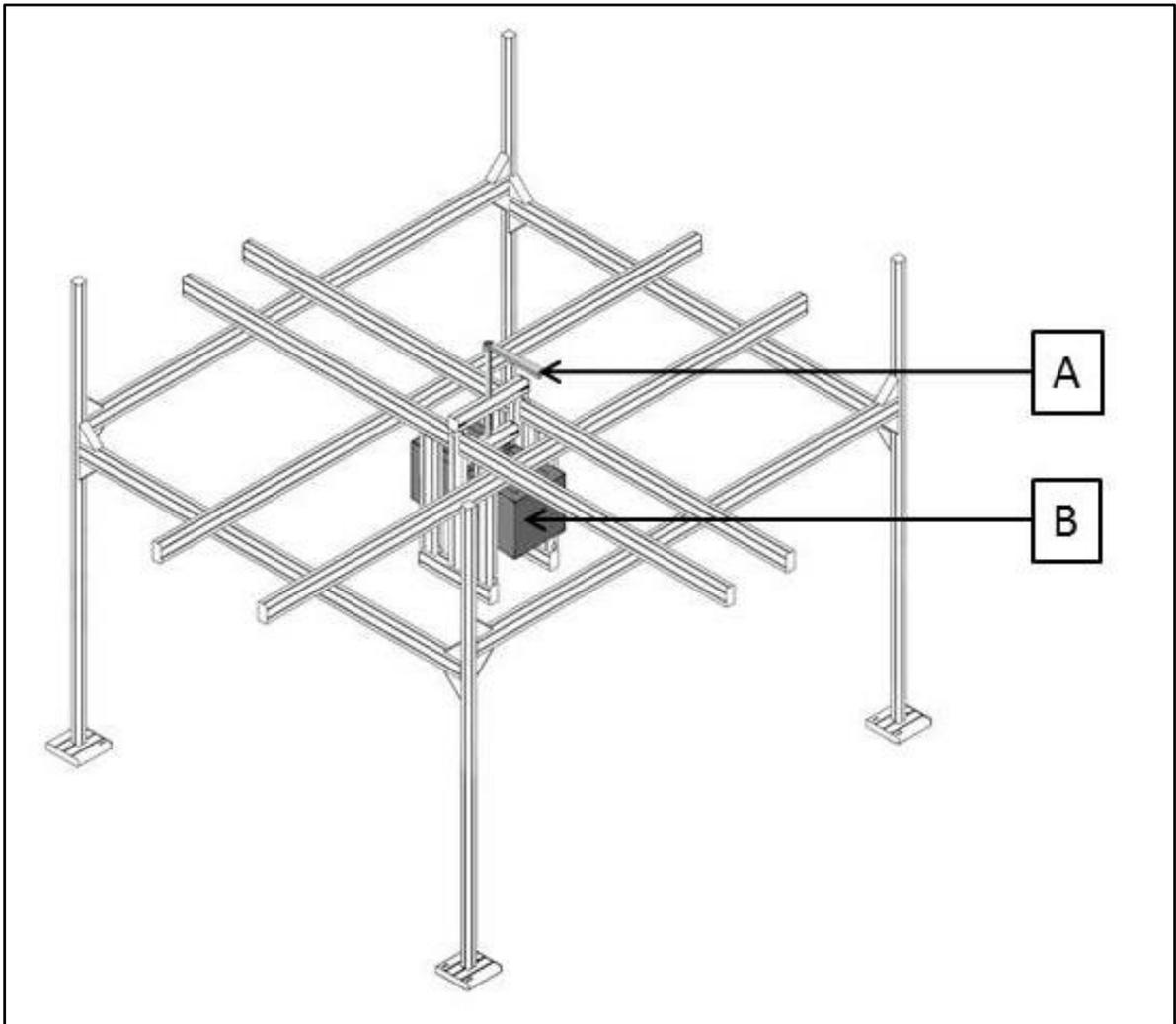


Abbildung 10: Belastungsgerät

A: Kurbel zum Absenken der Gewichte

B: Korb mit Gewichten

Eine Nocke (*Abbildung 12*) ermöglichte die Fixierung der vorbereiteten Gliedmaße über ein Gewinde, sodass die Gewichtskraft des Korbes und der darin liegenden Gewichte übertragen und eine Ausrichtung der Gliedmaße möglich war. Dabei wurde die isolierte Gliedmaße auf dem Sensor so ausgerichtet, dass die senkrechte Knochenachse des Metatarsus im 90°-Winkel zum Untergrund stand. Unter dem Sensor lag der zu testende Untergrund sowie eine Plattformwaage, (PSB 300, G&G GmbH) um das tatsächlich auf die Klaue wirkende Gewicht ablesen zu können. Um die In-vivo-Verhältnisse des Sehnenzugs bestmöglich imitieren zu können, wurde die tiefe Beugesehne mit von 50 kg, die Strecksehnen mit 5 kg belastet (RIEMERSMA et al. 1988). Zum Aufbringen der Zugkräfte wurden die Sehnen mittels Seilklemmen über Drahtseile und Umlenkrollen an Gewichten befestigt. Der Versuchsaufbau ist in *Abbildung 11* und *Abbildung 12* dargestellt. Zur Überprüfung der Ausrichtung der Gliedmaßenachse wurde von jeder Gliedmaße im belasteten Zustand eine Röntgenaufnahme

(Philips Medio 65 CP-H X-Ray Generator, Philips, Niederlande; 77-82 kV, 100 mA) angefertigt. Dabei fiel vor Versuchsbeginn eine unphysiologische, makroskopisch nicht sichtbare Brechung der Knochenachse im Krongelenk auf, welche durch den Sehnenzug nicht ausgeglichen werden konnte. Zur Korrektur wurde ein Spannungsgurt zur Stabilisierung des Krongelenks direkt proximal der Afterklauen angelegt und im Zwischenklauenspalt nach kaudal geführt (*Abbildung 11*). Dieser übte eine Zugkraft von 30 kg aus, die mit einer in den Spannungsgurt integrierten Zugwaage (WH-C 300, COLEMETER) überprüft und konstant eingestellt werden konnte. Bei röntgenologischen Nachkontrollen stellte sich die Knochenachse physiologisch dar.

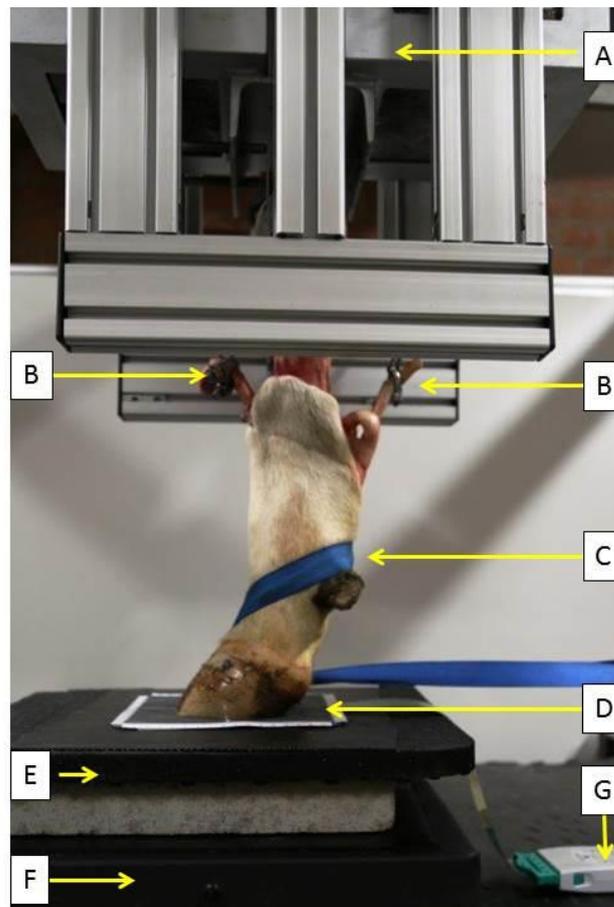


Abbildung 11: Versuchsaufbau der Druckmessung an einer isolierten Gliedmaße, laterale Ansicht.

A = Korb mit Gewichten; B = Seilklemmen zur Befestigung der Gewichte an den Sehnen;
C = Spannungsgurt zur Stabilisierung des Krongelenks; D = Druckmesssensor mit Neoprenschicht und Zentimeterskala; E = Untergrund (hier Gummimatte KURA P (Gummiwerk KRAIBURG Elastik GmbH und Co. KG, Tittmoning, Deutschland) auf Betonplatte); F = Waage;
G = Datenabnehmer des Sensors

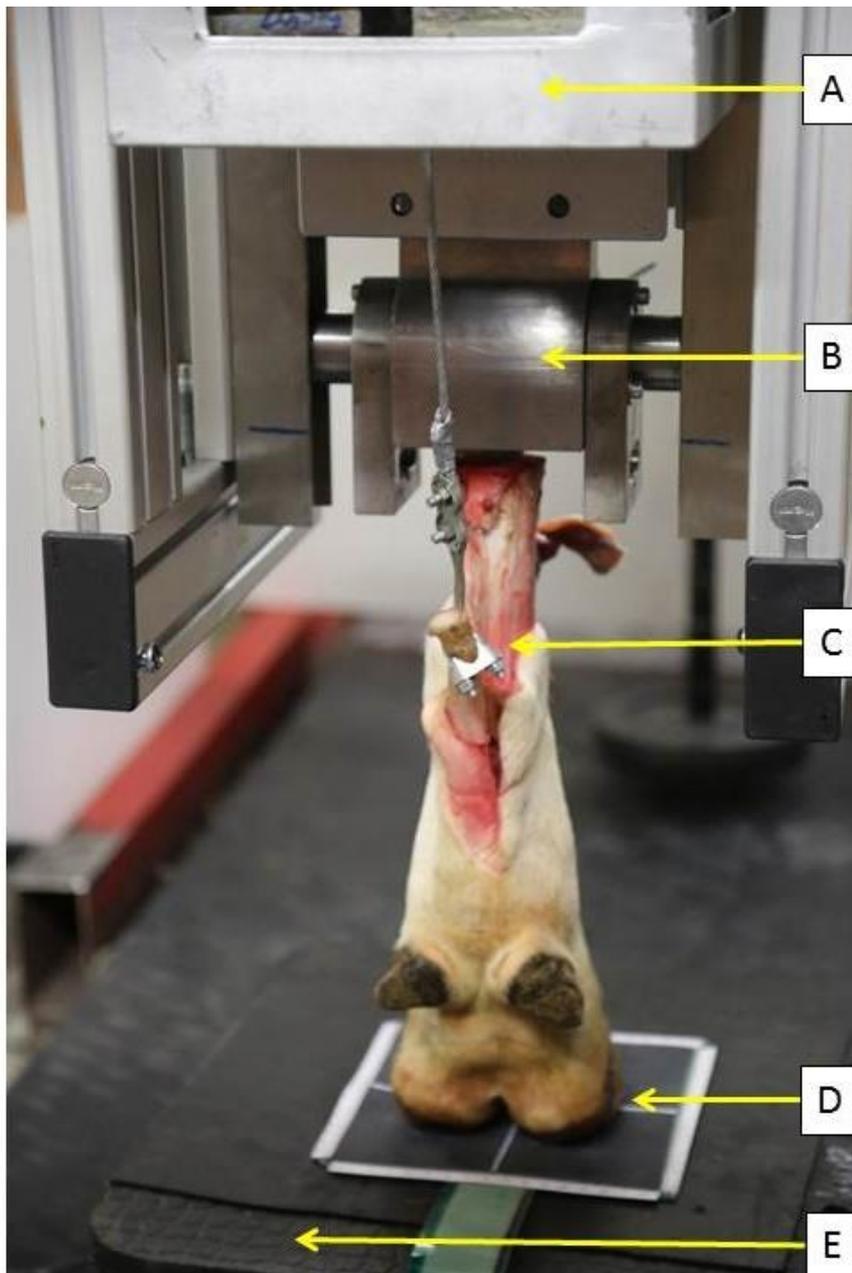


Abbildung 12: Versuchsaufbau der Druckmessung an einer isolierten Gliedmaße, kaudale Ansicht. Der gelenkstabilisierende Spanngurt (Abbildung 11) wurde für diese Aufnahme nicht angebracht.

A = Korb mit Gewichten; B = Nocke; C = Seilklemmen zur Befestigung der Gewichte an den Sehnen; D = Druckmesssensor mit Neoprenscheibe und Zentimeterskala; E = Untergrund (hier Gummimatte KURA P)

3.1.6 Druckmessungen mit dem Tekscan©-System

Die Erfassung der Druckmessdaten erfolgte mittels eines flexiblen Druckmessensors (M3200E, Hoof™ System, Tekscan© Inc., Boston, MA, USA). Die Sensormatrix hatte eine Größe von 167,6 x 167,6 mm und eine Dicke von 0,15 mm bei einer Auflösung von 4 Sensoren/cm². Die Druckmessung erfolgte resistiv mit einer Frequenz von 100 Hz.

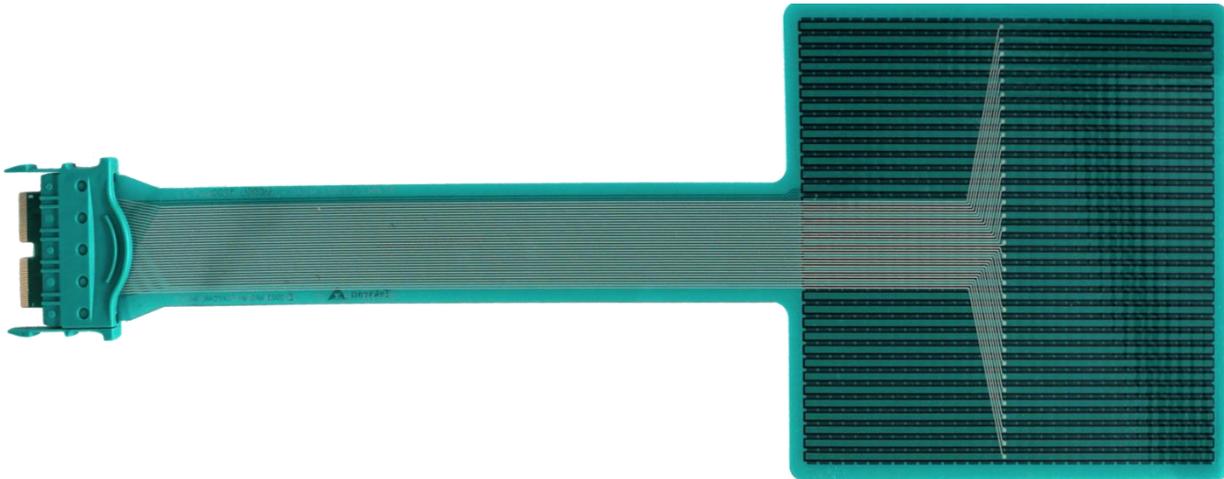


Abbildung 13: Flexibler Druckmesssensor (M3200E, HoofTM System, Tekscan[©] Inc., Boston, MA, USA)

Über einen Datenabnehmer war der Sensor mit einem PC verbunden, auf welchem mittels einer speziellen Software (HoofSCAN Research Version 6.85-29) die Daten sowohl in Echtzeit betrachtet als auch gespeichert und ausgegeben werden konnten. Der Sensor wurde auf beiden Seiten mit einer vom Hersteller dafür vorgesehenen 1 mm dicken Neoprenschiicht (3M Deutschland GmbH, Neuss, Deutschland) beklebt. Außerdem wurden Zentimeterskalen an allen vier Seiten angebracht (*Abbildung 11*), um die Position der Klaue auf dem Sensor bestimmen zu können. Die Gliedmaße wurde auf jedem Untergrund - eine Betonplatte sowie auf den Gummimatten KARERA P, KURA P und profiKURA P (Gummiwerk KRAIBURG Elastik GmbH und Co. KG, Tittmoning, Deutschland) je viermal belastet und die Druckmessdaten über je drei Sekunden aufgezeichnet und abgespeichert. Das Gewicht, das senkrecht auf den Metatarsus wirkte, betrug 240 kg. Aufgrund des Zuges an der tiefen Beugesehne und der Strecksehne sowie des Gurtes zur Korrektur der Knochenachse betrug das real an der Klaue wirkende Gewicht zwischen 137 und 140 kg. Die unter dem Messuntergrund positionierte Waage zeigte dieses Gewicht an. In *Tabelle 2* ist für jeden der vier Untergründe die über alle Klauen gemittelte einwirkende Kraft aufgeführt.

Tabelle 2: Einwirkende Gesamtkraft im Ex-vivo-Versuch

	Mittelwert (kg)	Standardabweichung (kg)
Beton	139,27	10,95
KARERA P	137,50	8,59
KURA P	140,14	8,29
profiKURA P	137,18	6,79

Nach jeder Messung wurde die Gliedmaße komplett entlastet und durch kurzes Anheben neu auf dem Sensor positioniert. Die Reihenfolge, in der die Messungen auf den Böden durchgeführt wurden, wurde für jede Klaue randomisiert. Auf jedem Boden wurde vor und nach den vier Messungen je eine 2-Punkt-Kalibration des Sensors durchgeführt. Hierfür wurde der Sensor, wie vom Hersteller empfohlen, zunächst mit ca. 20 % und dann mit ca. 80 % des erwarteten Gesamtgewichts belastet und eine Kalibrationskurve erstellt und abgespeichert. Jeder Sensor wurde zur Konditionierung zehnmal flächig mit einem Gewicht von 300 kg belastet.

3.1.7 Datenaufbereitung der Druckmessdaten

Die Druckmessdaten wurden für jede Einzelmessung mit einer Dauer von 3 s von der Tekscan©-Software gemittelt und die zugehörige Kalibrationskurve geladen, die den besseren linearen Verlauf zeigte. Das gesamte Druckmuster einer Gliedmaße wurde in einen lateralen und einen medialen Anteil separiert. Für die Einzelklauen sowie die beiden Klauen gemeinsam konnten die Kraft (kg), der durchschnittliche und maximale Druck (N/cm²) sowie die belastete Fläche (cm²) ausgegeben werden.

Um die tatsächliche Position der Klauen auf dem Sensor und die Größe der Sohlenfläche bestimmen und diese in Zonen einteilen zu können, wurden die im Folgenden beschriebenen und in *Abbildung 14* dargestellten Schritte durchgeführt.

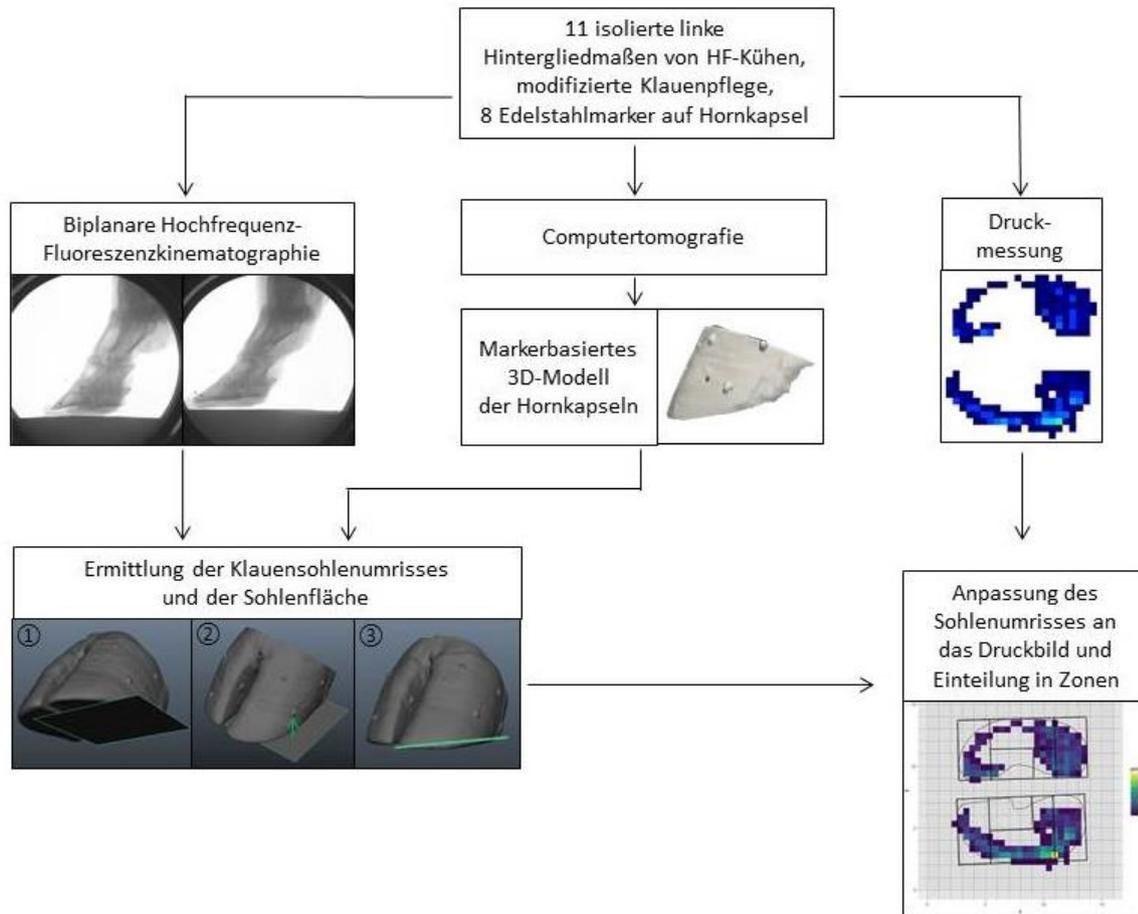


Abbildung 14: Arbeitsschritte zur Einteilung des Druckmessbildes in Zonen

3.1.8 Computertomographie und Erstellung der Knochenmodelle

Von allen 11 isolierten Gliedmaßen wurden in der Klinik für Pferde der Veterinärmedizinischen Fakultät der Universität Leipzig computertomographische-Aufnahmen angefertigt. Dies geschah mit einem multi-slice helikal Computertomographie-Scanner (Philips Healthcare, DA Best, Niederlande) mit einer Schichtdicke von 1 mm und einer Überlappung von 0,5 mm. Mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware MeVisLab 2.3.1 (MeVis medical Solutions AG, Bremen, Deutschland) wurde jeweils die mediale und laterale Hornkapsel separiert. Das Marker-Zentroid-Tool dieser Software erlaubt die Lagebestimmung der auf die Hornkapsel aufgeklebten Marker als X-, Y- und Z-Koordinate im dreidimensionalen Raum. Anschließend wurden mit der Software Paraview (Paraview 4.1.0 (Kitware Inc., NY, USA) dreidimensionale Modelle der Hornkapsel erstellt.

3.1.9 Biplanare Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographie (Fluokin)

Zur Projektion der gesamten Sohlenfläche inklusive der nicht belasteten Bereiche auf die Sensoroberfläche und zur Bestimmung der genauen Positionierung beider Klauen zueinander wurden während der Belastungsphasen biplanare Hochfrequenz-Fluoreszenzkinematographische Aufnahmen angefertigt. Die beiden Röntgenröhren (Philips Medio 65 CP-H X-Ray Generator, Philips, Niederlande) sowie die beiden Bildempfänger (Philips Typ BX 3i-2123, Philips, Niederlande) waren jeweils in einem Winkel von 60° zueinander ausgerichtet. An die Bildempfänger waren über einen Trigger synchronisierte Hochgeschwindigkeitskameras (OptronicsCR 600x2, Kehl, Deutschland) angeschlossen. Es wurden Röntgenvideosequenzen (77-82 kV, 100 mA) mit einer Länge von ca. 1,5 s, einer Bildrate von 500 Bildern pro Sekunde, einer Belichtungszeit von 0,5 ms und einer Auflösung von 1024 x 1280 Pixeln mit der Software TimeBench Version 2.5.31 (Optronis, Kehl, Deutschland) aufgenommen und gespeichert. Die Verzerrung, die durch die Anwendung der Fluoroskopie entsteht, wurde mit Hilfe eines Grids mit der Software XMALab Version 1.3.9 korrigiert. Mit einem Plexiglas-Kubus, in den auf vier Ebenen 64 röntgendichte Marker eingearbeitet sind und derselben Software wurde die Kalibration des dreidimensionalen Raums durchgeführt (KNÖRLEIN et al. 2016).

3.1.10 Markerbasierte Animation der Hornkapseln und Berechnung der Sohlenfläche

Die Software XMALab erlaubt ein automatisches Verfolgen (Tracken) der auf die Hornkapsel aufgeklebten Marker (Kapitel 3.1.1) über die gesamte Röntgenvideosequenz. Die Lage der Marker im dreidimensionalen Raum, die mit dem Marker-Zentroid-Tool der Software MeVisLab aus den computertomographischen Aufnahmen bestimmt wurde, wurde mit der Software Autodesk® Maya® Version 2014 (Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA) auf die 3D-Modelle aus Paraview übertragen, um eine Marker basierte dreidimensionale Animation der Hornkapseln zu erstellen.

In der Software Autodesk® Maya® konnte aus dem 3D-Modell der Hornkapsel der 2D-Umriss der Sohlenfläche berechnet werden, indem eine zur Klauensohlenfläche parallele Ebene im Abstand von 0,6 mm zu dem ersten Bodenkontakt aufweisenden Klauenbereichen erstellt wurde.

3.1.11 Anpassung des Druckbildes an den Sohlenumriss und die Zonen

Um den in Autodesk® Maya® erstellten Sohlenumriss (Kapitel 3.1.11) an das Tekscan©-Druckbild anzupassen, wurde die Software RStudio (RStudio Team 2016) benutzt. Der Sohlenumriss wurde um das Druckbild rotiert und verschoben, bis die seitlichen Abstände denen der fotografischen Dokumentation entsprachen. (*Abbildung 15A*). Anschließend wurde die fünfteilige Zoneneinteilung (CARVALHO et al. 2006) über die Sohlenfläche gelegt

(Abbildung 15B) und die gewünschten Daten für jede Zone ausgegeben. Analysiert wurden die belastete Fläche relativ zur Gesamtfläche der Einzelklaue (A_{zone}), die Kraft relativ zur Gesamtkraft der Einzelklaue (F_{zone}) und der durchschnittliche Druck relativ zur belasteten Fläche (P_{zone}).

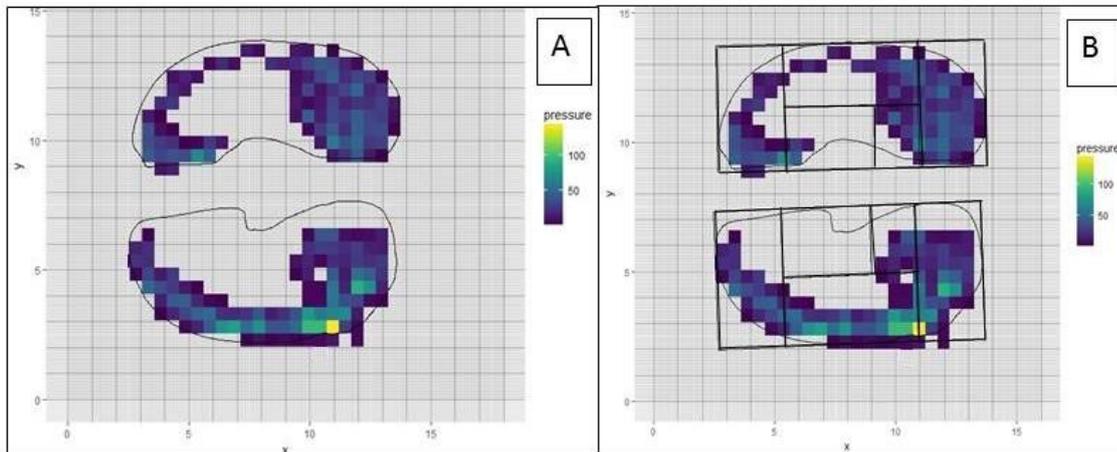


Abbildung 15: Programm Rstudio

A: Anpassen des in Maya® erstellten Sohlenumrisses an das Druckbild

B: Einfügen der Zoneneinteilung

Außerdem wurde die Lokalisation des Maximaldruckes erfasst. Dessen Zugehörigkeit zu einer der fünf Zonen konnte durch das Programm Rstudio (RStudio Team 2016) bestimmt werden. Teilweise verteilte sich der Maximaldruck auf bis zu drei Zonen, da die HoofSCAN-Software die Werte von vier Sensoren, also eine Fläche von 1 cm^2 , mittelt.

3.2 In-vivo-Studie

Um die Ergebnisse der Ex-vivo-Studie auf ihre Übertragbarkeit auf lebende Rinder zu überprüfen, wurde eine In-vivo-Studie an zehn Milchkühen durchgeführt (Tierversuchsgenehmigung 44/15).

Die Studie wurde am Lehr- und Versuchsgut Oberholz der Universität Leipzig durchgeführt. Die Kühe wurden in einem Laufstall mit Gussasphalt als Bodenbelag und Tiefboxen, die mit Stroh eingestreut wurden, gehalten. Sie wurden zweimal täglich gemolken und erhielten eine TMR mit individuell abrufbarer Kraftfuttergabe. Die Kühe befanden sich mindestens in ihrer ersten Laktation, hatten ein Alter von 56 ± 10 Monaten und ein Gewicht von 785 ± 45 kg. Das Gewicht wurde mit einem speziellen Maßband bestimmt. Es wurden eine Körperkonditionsbeurteilung (EDMONSON et al. 1989) und ein Lahmheits-Scoring (SPRECHER et al. 1997) durchgeführt. Die klinische Untersuchung der Kühe war unauffällig. Die Kühe

wurden zur Durchführung der Klauenpflege in einem Durchtreibestand fixiert. An der linken Hintergliedmaße wurde von Dr. Katrin Wilhelm, einer Tierärztin mit jahrelanger Erfahrung in der Klauenpflege, der Tragrandschnitt wie nachfolgend beschrieben angebracht. Die Klaue wurde zunächst funktionell gepflegt und anschließend die Sohle abgetragen, so dass ein Tragrand an der abaxialen Wand und im Bereich der Klauenspitze bis zum ersten Drittel der axialen Wand ausgebildet wurde (siehe Kapitel 3.1.3). Die Höhe des Tragrandes wurde mit einer digitalen Messlehre gemessen und dokumentiert. An den übrigen drei Gliedmaßen wurde eine FKP durchgeführt (TOUSSAINT-RAVEN 1985b). Eventuelle Läsionen an der distalen Gliedmaße wurden ebenfalls dokumentiert.

Zur Überprüfung der Horndicke wurde nach Anbringen des Tragrandes eine sonographische Untersuchung (Draminski4Vet, Linearsonde 40 mm, 10 MHz) der Sohlenfläche der linken Hintergliedmaße durchgeführt. An der lateralen sowie an der medialen Klaue wurde an jeweils zwei Messpunkten nach KOFLER et al. (1999) Standbilder aufgenommen und zur späteren Vermessung gespeichert. Der erste Messpunkt befand sich senkrecht über der Klauenbeinspitze und der zweite senkrecht über dem Tuberculum flexorium des Klauenbeins (*Abbildung 16*).

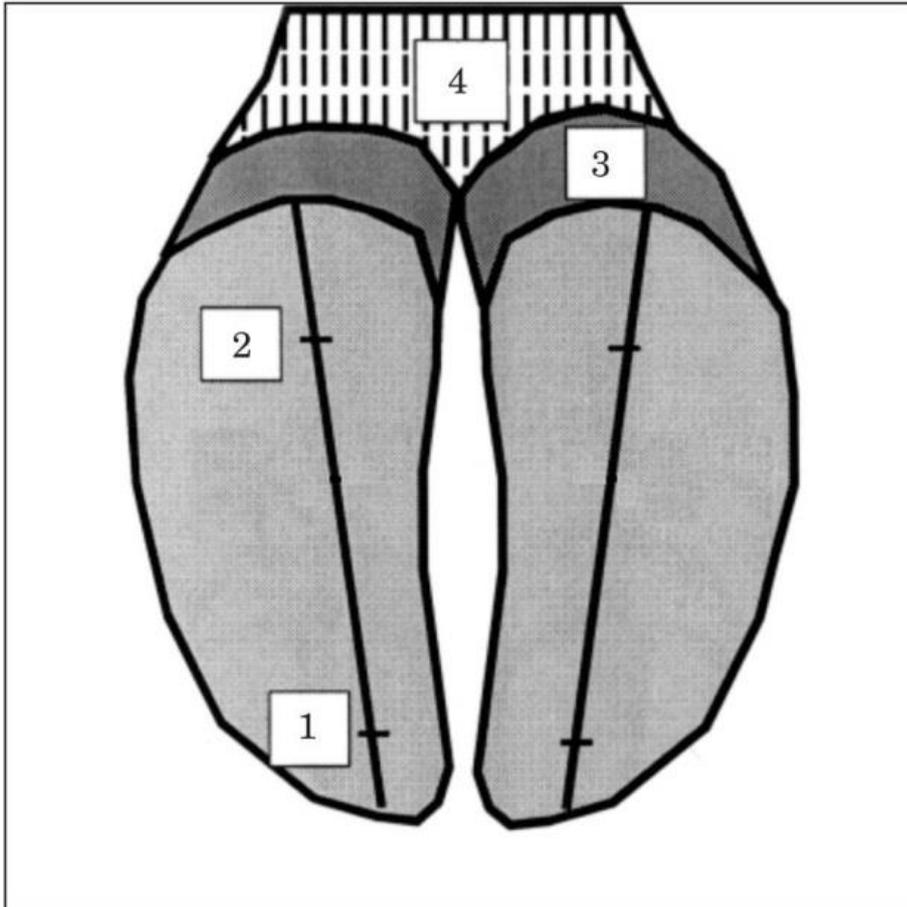


Abbildung 16: Sonographische Messung der Horndicke am Sohlenhorn; mod. nach KOFLER et al. (1999)

1: Messpunkt an der Klauenbeinspitze; 2: Messpunkt am Tuberculum flexorium; 3: Ballen; 4: behaarte Haut

An den beiden darauffolgenden Tagen wurden die Druckmessungen durchgeführt. Die Kühe wurden erneut in einem Durchtreibbestand fixiert und die linke Hintergliedmaße auf einem Tekscan®-Sensor platziert, sodass alle vier Gliedmaßen gleichmäßig belastet waren. Die Messungen wurden auf Betonboden und auf der Gummimatte KURA P (Gummiwerk KRAIBURG Elastik GmbH und Co. KG, Tittmoning, Deutschland) durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in *Abbildung 17* abgebildet. Auf jedem Untergrund wurden mehrere Messungen über eine Dauer von je drei Sekunden aufgezeichnet, sodass mindestens drei Datensätze pro Boden während eines ruhigen Standes ausgewertet werden konnten. Die Zweipunkt-Kalibration der Sensoren erfolgte wie in Kapitel 3.1.6 beschrieben unmittelbar vor und nach deren Verwendung zur Druckmessung. Vor ihrem ersten Einsatz wurden die Sensoren zur Konditionierung zehnmal flächig mit einem Gewicht von 300 kg belastet. Die übrigen Einstellungen erfolgten analog zu den Ex-vivo-Versuchen (Kapitel 3.1.6). Die Tekscan®-Software wurde benutzt, um die Kraft (kg), den durchschnittlichen und maximalen Druck (N/cm²) sowie die belastete Fläche (cm²) sowohl für die gesamte Klaue als auch für die

laterale und mediale separat auszugegeben. Nach Überprüfung der Kraft-Zeit-Kurven wurden diejenigen Messungen ausgeschlossen, bei denen durch schwankende Kurvenverläufe eine ungleichmäßige Belastung der linken Hintergliedmaße ersichtlich war.



Abbildung 17: Durchführung der In-vivo Messungen, hier auf der Gummimatte KURA P

3.3 Statistische Auswertung

Die statische Auswertung der Daten erfolgte mit der Software RStudio Version 1.0.143 (RStudio Team 2016). Die Normalverteilung der Daten wurde durch eine graphische Beurteilung der Q-Q-Plots und der Histogramme überprüft. Zusätzlich kam der Shapiro-Wilk-Test zur Anwendung. Da viele Datensets nicht normalverteilt waren, wurden signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Böden für die jeweiligen Klauen bzw. Kühen mittels gepaartem Test (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test) ermittelt. Auch der Vergleich zwischen den einzelnen Zonen sowie zwischen lateraler und medialer Klaue im In-vivo-Versuch erfolgte mit diesem Test. Eine Post-Hoc-Korrektur nach Bonferroni-Holm wurde sowohl für die übergreifenden und zonenspezifischen Vergleiche des Ex-vivo-Versuchs als auch für alle Vergleiche des In-vivo-Versuchs durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Studien erfolgte ebenfalls mit dem Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test mit anschließender Post-Hoc-Korrektur nach Bonferroni-Holm. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ festgelegt. Für

Tiere, Material, Methoden

die Darstellung der Ergebnisse wurden Box-Whisker-Plots nach J. W. Tukey gewählt, wobei die Whisker dem 1,5fachen Interquartilsabstand entsprechen. Ausreißer, die nicht in diesen Grenzen liegen, werden mit Einzelpunkten dargestellt.

4 Ergebnisse

4.1 Ex-vivo-Studie

Im Folgenden werden zunächst die allgemein erhobenen Klauendaten sowie die Ergebnisse der Ex-vivo-Studie für die gesamte Klaue dargelegt. Im Kapitel 4.1.3 folgt die Darstellung der Daten in Verbindung mit der Einteilung der Sohlenfläche in 5 Zonen (CARVALHO et al. 2006).

4.1.1 Klauenmaße und Sohlendicke

Vor und nach der modifizierten Klauenpflege wurden die in Kapitel 3.1.2 dargestellten Klauenmaße erhoben, die im Folgenden tabellarisch aufgeführt sind.

Tabelle 3: Klauenmaße vor und nach modifizierter Klauenpflege, gemittelt über alle Klauen. AK = Außenklaue; IK = Innenklaue; U = ungepflegt; TR = Tragrandschnitt (modifizierte Klauenpflege); DWL = Dorsalwandlänge; BH = Ballenhöhe; BL = Ballenlänge; SL = Sohlenlänge; SB = Sohlenbreite; KL = Klauenlänge; DWW = Dorsalwandwinkel

	DWL (mm)	DWW (°)	BH (mm)	BL (mm)	KL (mm)	SL (mm)	SB (mm)
AK U	75,9±8,8	52,0±4,5	38,1±8,4	45,8±6,7	126,3±7,9	106,3±8,1	52,2±1,6
AK TR	73,9±5,7	51,3±5,6	33,0±7,8	46,0±7,3	123,8±6,6	101,6±8,0	51,6±1,9
IK U	75,5±7,9	51,8±3,8	33,2±7,6	41,5±8,7	123,6±8,6	104,7±9,8	49,3±2,4
IK TR	72,6±5,5	52,4±3,1	28,7±5,6	42,3±6,8	123,4±3,8	99,4±8,0	49,5±2,4

Nach Durchführung der modifizierten Klauenpflege wurde an der Klauenspitze und am abaxialen Tragrand dessen Höhe und an der durchgesägten Klaue an zwei Stellen die Horndicke bestimmt. Sämtliche Messwerte der Einzelklauen sind im Anhang, *Tabelle 31*, aufgeführt.

Tabelle 4: Gemittelte Werte der Horndicken- und Tragrandhöhenmessungen an den isolierten Gliedmaßen. B = Ballen, Sp = Spitze, W = abaxiale Wand, lat. = lateral, med. = medial

	Horndicke (mm)				Tragrandhöhe (mm)			
	B lat	Sp lat	B med	Sp med	W lat	Sp lat	W med	Sp med
MW	9,4	4,2	7,5	4,7	2,3	2,4	1,9	2,2
St.-Abw.	3,6	1,2	3,2	1,2	0,5	0,7	0,5	0,6

4.1.2 Ergebnisse der Druckmessungen für die gesamte Klaue

Die nächsten Kapitel stellen die von der HoofSCAN-Software (HoofSCAN Research Version 6.85-29) ausgegebenen Daten dar.

4.1.2.1 Kraftverteilung

Die Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue war auf allen vier Böden ungleichmäßig. Auf Betonboden nahm die laterale Klaue im Schnitt 2,24-mal so viel Last auf wie die mediale. Auf den Gummiböden war die Kraftverteilung ausgeglichener: hier nahm die laterale Klaue 1,98- bis 2,12-mal so viel Last auf wie die mediale. Signifikant war der Unterschied zwischen Beton und profiKURA P sowie zwischen KARERA P und profiKURA P ($p < 0,05$).

Tabelle 5: Mittelwerte und Standardabweichungen der Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue. Die hochgestellten Abkürzungen zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Böden ($p < 0,05$).

Kraftverteilung			
Bet	2,24	±	1,44 ^{proK}
Kar	2,12	±	1,33 ^{proK}
Kur	2,00	±	1,24
proK	1,98	±	1,22 ^{Bet, Kar}

4.1.2.2 Belastungsfläche (A_{ges}), durchschnittlicher Druck (P_{ges}), Maximaldruck (P_{max})

Die belastete Fläche war mit 28,90 cm² auf Betonboden signifikant kleiner als auf den Gummimatten, auf denen Werte von 42,87 cm² – 48,84 cm² auftraten ($p < 0,05$). Auch zwischen den drei Gummimatten zeigten sich signifikante Unterschiede. Auf profiKURA P war die belastete Fläche mit 48,84 cm² am größten, die anderen Gummimatten wiesen Werte von 44,26 cm² (KURA P) bzw. 42,87 cm² (KARERA P) auf.

Der durchschnittliche Druck auf Beton betrug 49,99 N/cm² und unterschied sich damit signifikant von den Werten der Gummimatten ($p < 0,05$). Auch profiKURA P zeigte mit 28,96 N/cm² signifikante Unterschiede zu den anderen beiden Gummimatten ($p < 0,05$). Lediglich KURA P (32,53 N/cm²) und KARERA P (32,99 N/cm²) unterschieden sich im durchschnittlichen Druck nicht signifikant.

Auf Beton war der Maximaldruck mit 151,67 N/cm² am höchsten. Die drei Gummimatten wiesen Werte zwischen 82,14 N/cm² (profiKURA P) und 90,44 N/cm² (KURA P) auf. Alle vier Böden unterschieden sich signifikant ($p < 0,05$).

Ergebnisse

Tabelle 6: Mittelwerte und Standardabweichungen von Belastungsfläche (A_{ges}), durchschnittlicher Druck (P_{ges}), Maximaldruck (P_{max}). Die hochgestellten Abkürzungen bei P_{ges} zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Böden ($p < 0,05$). Bei A_{ges} und P_{max} waren die Unterschiede zwischen allen vier Böden signifikant ($p < 0,05$).

	A_{ges} [cm^2]	P_{ges} [N/cm^2]	P_{max} [N/cm^2]
Beton	28,90 ± 4,84	44,99 ± 8,90 ^{Kar, Kur, ProK}	151,67 ± 42,29
KARERA P	42,87 ± 4,83	32,99 ± 4,58 ^{Bet, ProK}	87,23 ± 22,10
KURA P	44,26 ± 9,98	32,53 ± 4,02 ^{Bet, ProK}	90,44 ± 22,48
profikURA P	48,84 ± 5,61	28,96 ± 3,04 ^{Bet, Kar, Kur}	71,9 ± 19,59

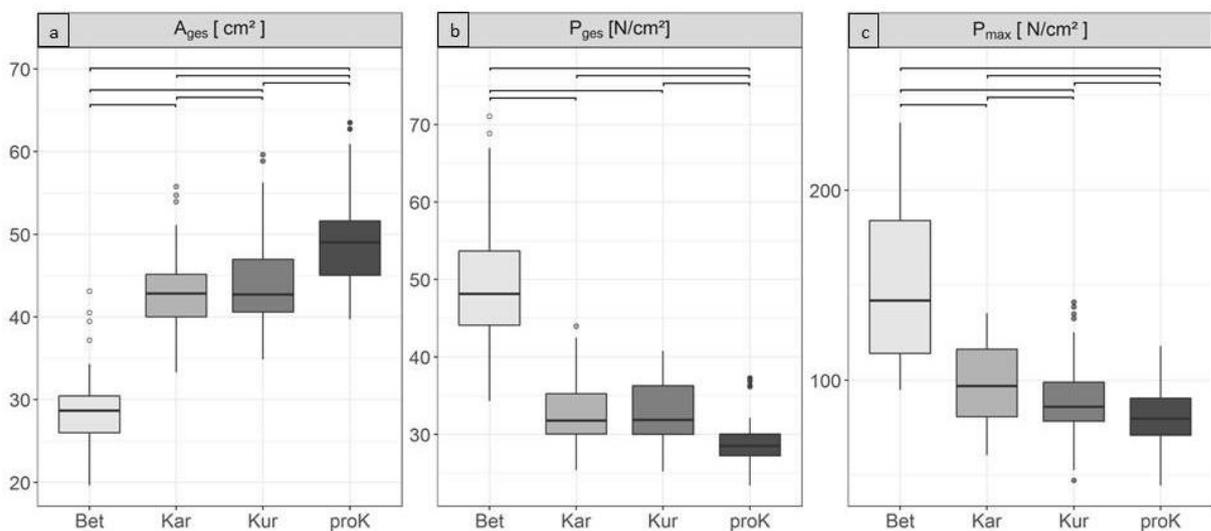


Abbildung 18: Boxplots (nach J. W. Tukey) der oben erläuterten Parameter für die gesamten Klauen aus dem Ex-vivo-Versuch.

a = belastete Fläche, b = durchschnittlicher Druck, c = Maximaldruck. Die horizontalen Linien zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Böden ($p < 0,05$).

4.1.3 Ergebnisse der Druckmessungen in den einzelnen Zonen der Sohlenfläche

Im Folgenden werden die erhobenen Parameter jeweils für die laterale und mediale Klaue nach Einteilung der Sohlenfläche in 5 Zonen dargestellt (CARVALHO et al. 2006).

4.1.3.1 Lokalisation des Maximaldruckes

Für jede Einzelmessung wurde mit Hilfe der HoofSCAN-Software der Maximaldruck ermittelt und graphisch angezeigt. Die folgende *Tabelle 7* zeigt das prozentuale Auftreten der Maximaldrücke in den fünf Zonen jeweils für die gesamte Klaue.

Ergebnisse

Tabelle 7: Prozentuales Auftreten der Maximaldrücke in der gesamten Klaue

	Zone				
	1	2	3	4	5
Bet	32,7	0,0	7,3	18,2	41,8
Kar	22,1	0,0	10,5	10,5	56,8
Kur	22,3	5,8	5,8	14,6	51,5
ProK	22,0	3,0	9,0	11,0	55,0

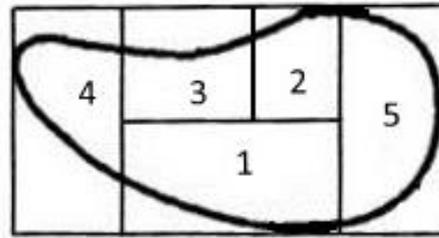


Abbildung 19: Einteilung der Sohlenfläche in 5 Zonen nach CARVALHO (2006).

Betrachtet man die Lokalisationen getrennt nach lateraler und medialer Klaue, fallen Unterschiede in der Maximalbelastung auf. In der lateralen Klaue traten die Maximaldrücke größtenteils in Zone 1 (entspricht der abaxialen Wand) und 5 (entspricht dem Ballen) auf. Die die Hohlkehlung repräsentierenden Zonen 2 und 3 enthielten nur wenige Druckspitzen, Zone 2 sogar nur eine einzige auf der Gummimatte profiKURA P. Die Maximaldrücke in der medialen Klaue waren größtenteils in Zone 5 lokalisiert, auf die Zonen 2, 3 und 4 (Klauenspitze) entfielen sehr wenig Maximaldrücke pro Zone. Die Maximalbelastung war in der medialen Klaue wesentlich seltener in Zone 1 zu finden als in der lateralen Klaue.

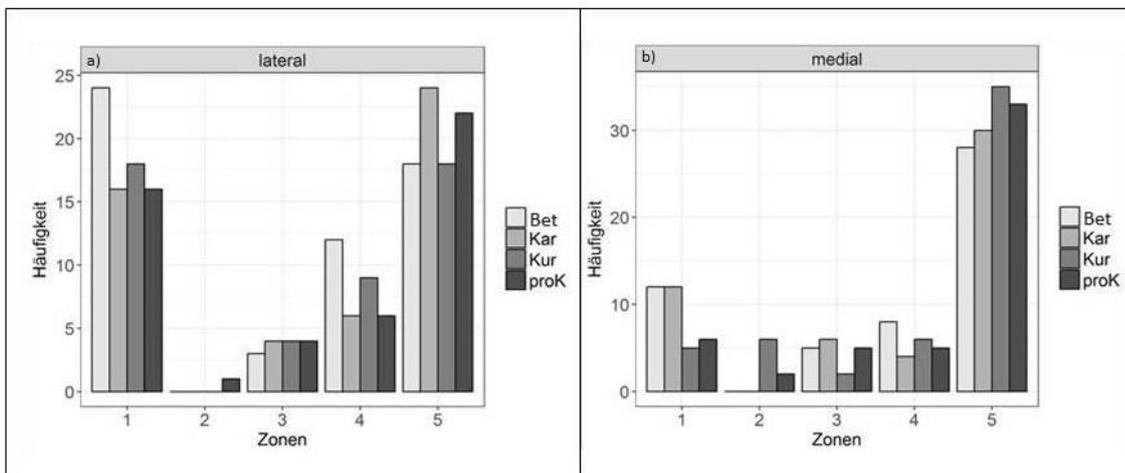


Abbildung 20: Lokalisation des Maximaldruckes

a): laterale Klaue

b): mediale Klaue

4.1.3.2 Belastete Fläche (A_{zone})

Um der unterschiedlichen Größe der Zonen Rechnung zu tragen, wurde die relative belastete Fläche pro Gesamtfläche der einzelnen Zone angegeben. Es traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Böden auf, allerdings ist die relative belastete Fläche auf

Ergebnisse

Betonboden kleiner als auf den Gummimatten. Dieser Trend war in allen Zonen zu beobachten. In den Zonen 1 und 5 zeigte sich eine Tendenz ($p = 0,06$) von A_{zone} auf Betonboden jeweils im Vergleich mit den Gummimatten. In Zone 2 unterschied sich A_{zone} auf Beton jeweils zu KARERA P und profiKURA P mit dem gleichen Signifikanzniveau ($p = 0,06$). Zone 3 zeigte keine deutlichen Trends. In Zone 4 zeigten die Vergleiche von Beton zu profiKURA P, von KARERA P zu profiKURA P sowie von KARERA P zu KURA P Tendenzen ($p = 0,06$) im Sinne einer kleineren belasteten Fläche auf Betonboden.

Tabelle 8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Belastungsfläche in den Zonen relativ zur Gesamtfläche der Zone (A_{zone}) für die laterale und mediale Klaue sowie die vier untersuchten Untergründe

Laterale Klaue					
Zone	1	2	3	4	5
Bet	0,42 ± 0,14	0,36 ± 0,25	0,09 ± 0,12	0,34 ± 0,15	0,45 ± 0,23
Kar	0,59 ± 0,13	0,55 ± 0,18	0,23 ± 0,24	0,45 ± 0,12	0,63 ± 0,24
Kur	0,59 ± 0,09	0,53 ± 0,18	0,19 ± 0,20	0,51 ± 0,12	0,68 ± 0,21
proK	0,63 ± 0,13	0,60 ± 0,17	0,25 ± 0,24	0,55 ± 0,14	0,73 ± 0,19

Mediale Klaue					
Zone	1	2	3	4	5
Bet	0,28 ± 0,24	0,23 ± 0,20	0,10 ± 0,19	0,44 ± 0,13	0,37 ± 0,17
Kar	0,43 ± 0,22	0,40 ± 0,30	0,14 ± 0,21	0,56 ± 0,14	0,54 ± 0,17
Kur	0,43 ± 0,22	0,35 ± 0,29	0,14 ± 0,20	0,61 ± 0,10	0,58 ± 0,17
proK	0,46 ± 0,24	0,41 ± 0,25	0,17 ± 0,23	0,64 ± 0,12	0,61 ± 0,18

Ergebnisse

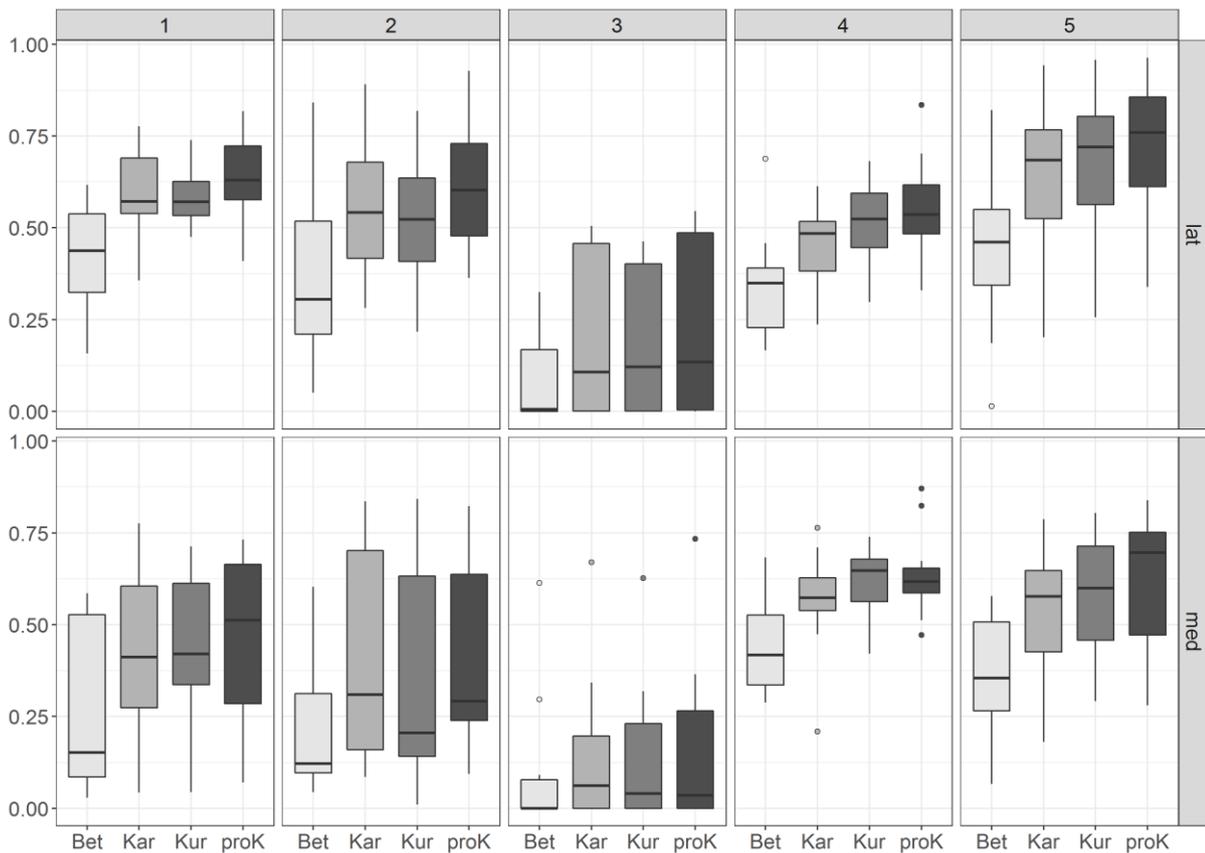


Abbildung 21: Boxplots (nach J. W. Tukey) für A_{zone} für die laterale und mediale Klaue, alle vier Untergründe und alle fünf Zonen

4.1.3.3 Kraft relativ zur Gesamtkraft der Einzelklaue (F_{zone})

Die folgenden Boxplots zeigen den relativen Anteil der auf die Zone wirkenden Kraft im Verhältnis zur auf die Klaue wirkenden Gesamtkraft. Es traten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Untergründen in den einzelnen Zonen auf.

Ergebnisse

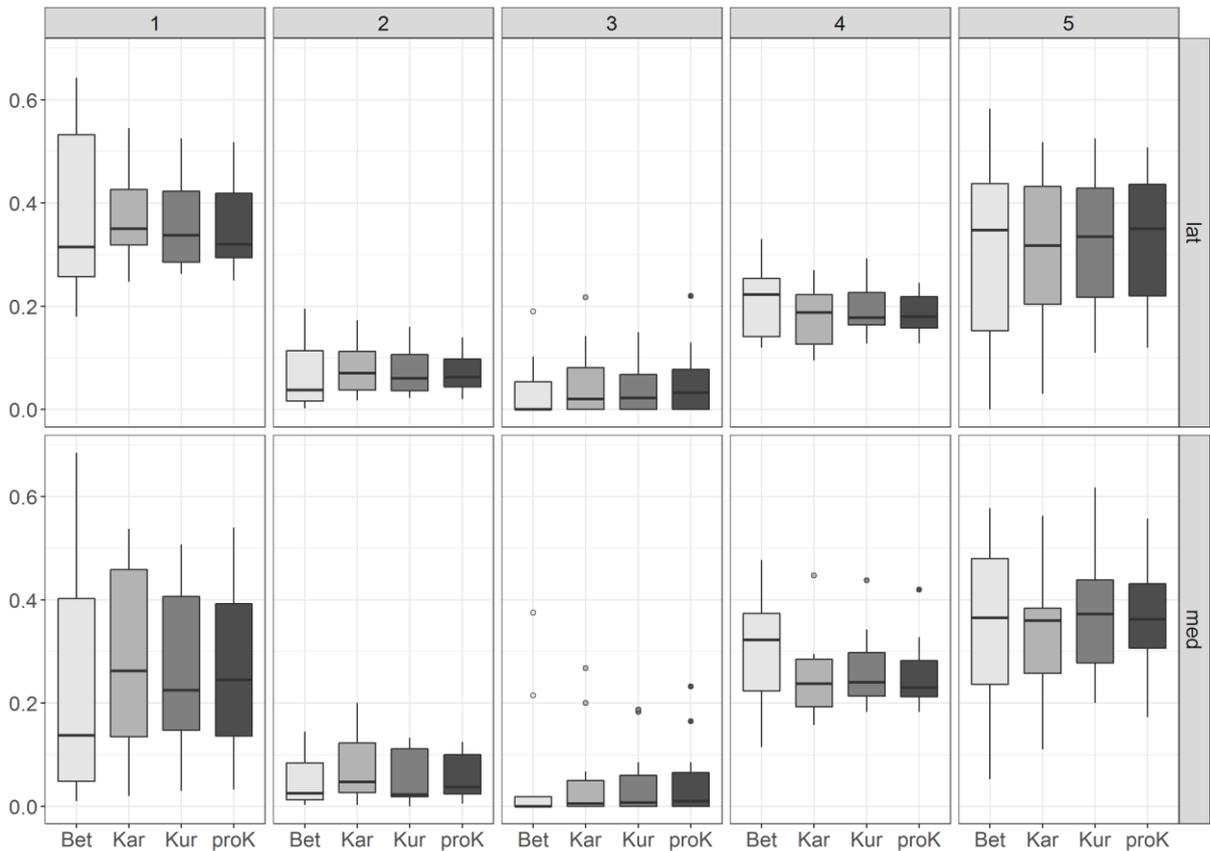


Abbildung 22: Boxplots (nach J. W. Tukey) für die auf die jeweilige Zone einwirkende Kraft relativ zur Gesamtkraft der Einzelklaue (F_{zone})

Nach Berechnung der Mittelwerte der auf allen vier Untergründen gemessenen Druckwerte traten signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Zonen innerhalb einer Klaue auf.

Tabelle 9: F_{zone} gemittelt über alle Untergründe. Die hochgestellten Ziffern zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Zonen ($p < 0,05$)

Laterale Klaue					
Zone	1	2	3	4	5
Alle Böden	$0,37 \pm 0,11^{2,3,4}$	$0,07 \pm 0,05^{1,3,4,5}$	$0,05 \pm 0,06^{1,2,4,5}$	$0,19 \pm 0,06^{1,2,3,5}$	$0,32 \pm 0,15^{2,3,4}$
Mediale Klaue					
Zone	1	2	3	4	5
Alle Böden	$0,26 \pm 0,18^{2,3}$	$0,06 \pm 0,05^{1,4,5}$	$0,05 \pm 0,09^{1,4,5}$	$0,27 \pm 0,9^{2,3}$	$0,36 \pm 0,13^{2,3}$

In der lateralen Klaue unterschieden sich alle Zonen signifikant voneinander, lediglich Zone 1 und 5 (entsprechen dem Tragrand und dem Ballen) zeigten keine signifikanten Unterschiede. In der medialen Klaue unterschieden sich Zone 1, 4 und 5 signifikant von den Zonen 2 und 3, die die Hohlkehlung repräsentieren ($p < 0,05$).

Ergebnisse

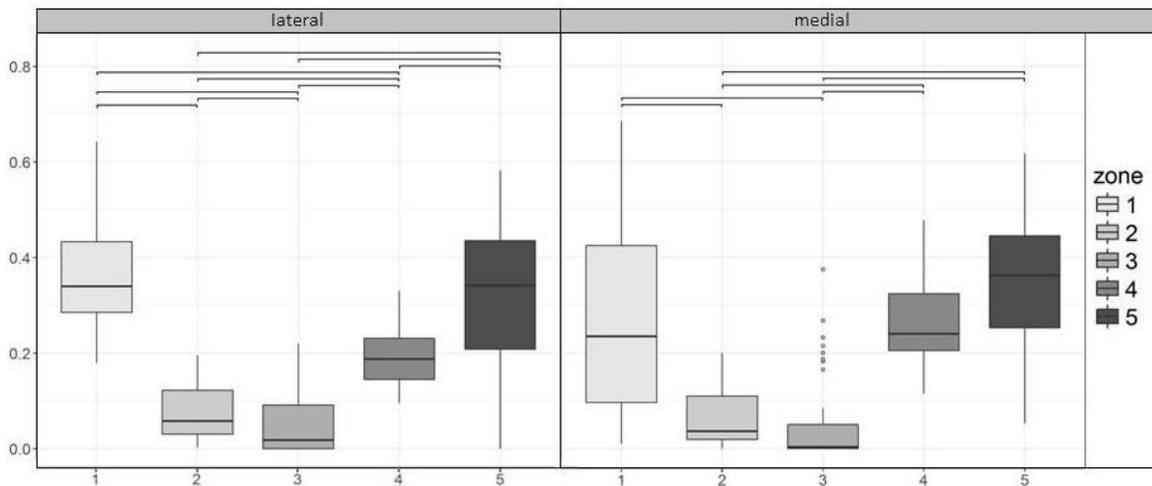


Abbildung 23: Boxplots (nach J. W. Tukey) für F_{zone} , gemittelt über alle Untergründe. Die horizontalen Linien zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Zonen ($p < 0,05$).

4.1.3.4 Kraft relativ zur belasteten Fläche (P_{zone})

Die Analyse des auf die belastete Fläche einwirkenden Druckes ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Untergründen. Trends ($p = 0,06$) zeigten sich in der lateralen Klaue in Zone 1 (abaxiale Wand) zwischen Beton und KURA und in Zone 4 (Klauenspitze) zwischen Beton und allen drei Gummimatten mit einem größeren auf die belastete Fläche einwirkenden Druck auf Betonboden. Außerdem zeigte der Vergleich von profiKURA zu KARERA und zu KURA in Zone 4 der lateralen Klaue einen Trend ($p = 0,06$). Hier war der auf die belastete Fläche einwirkende Druck auf der Gummimatte profiKURA geringer als auf den anderen beiden Gummimatten.

Ergebnisse

Tabelle 10: Mittelwerte und Standardabweichungen für den durchschnittlichen Druck in den einzelnen Zonen (P_{zone}) für die laterale und mediale Klauen sowie die vier untersuchten Untergründe

Laterale Klaue					
Zone	1	2	3	4	5
Bet	59,37± 18,08	29,14± 12,50	17,20± 18,10	58,74± 14,88	54,39± 32,49
Kar	39,04± 7,71	26,52± 8,33	14,45± 11,47	35,27± 7,75	41,08± 16,85
Kur	39,16± 9,69	26,52± 5,95	14,11± 11,98	35,83± 6,89	40,78± 14,40
proK	35,06± 6,17	23,37± 5,04	14,29± 10,84	30,97± 6,55	37,64± 12,48

Mediale Klaue					
Zone	1	2	3	4	5
Bet	32,56± 16,45	29,49± 15,79	13,10± 16,45	39,51± 11,43	56,38± 26,47
Kar	26,91± 11,25	25,32± 9,17	13,51± 12,59	26,45± 5,64	36,27± 13,34
Kur	25,57± 7,75	21,84± 8,46	16,43± 14,36	26,62± 3,47	38,36± 10,49
proK	23,73± 7,45	19,01± 6,77	13,45± 10,16	24,40± 2,99	35,08± 9,76

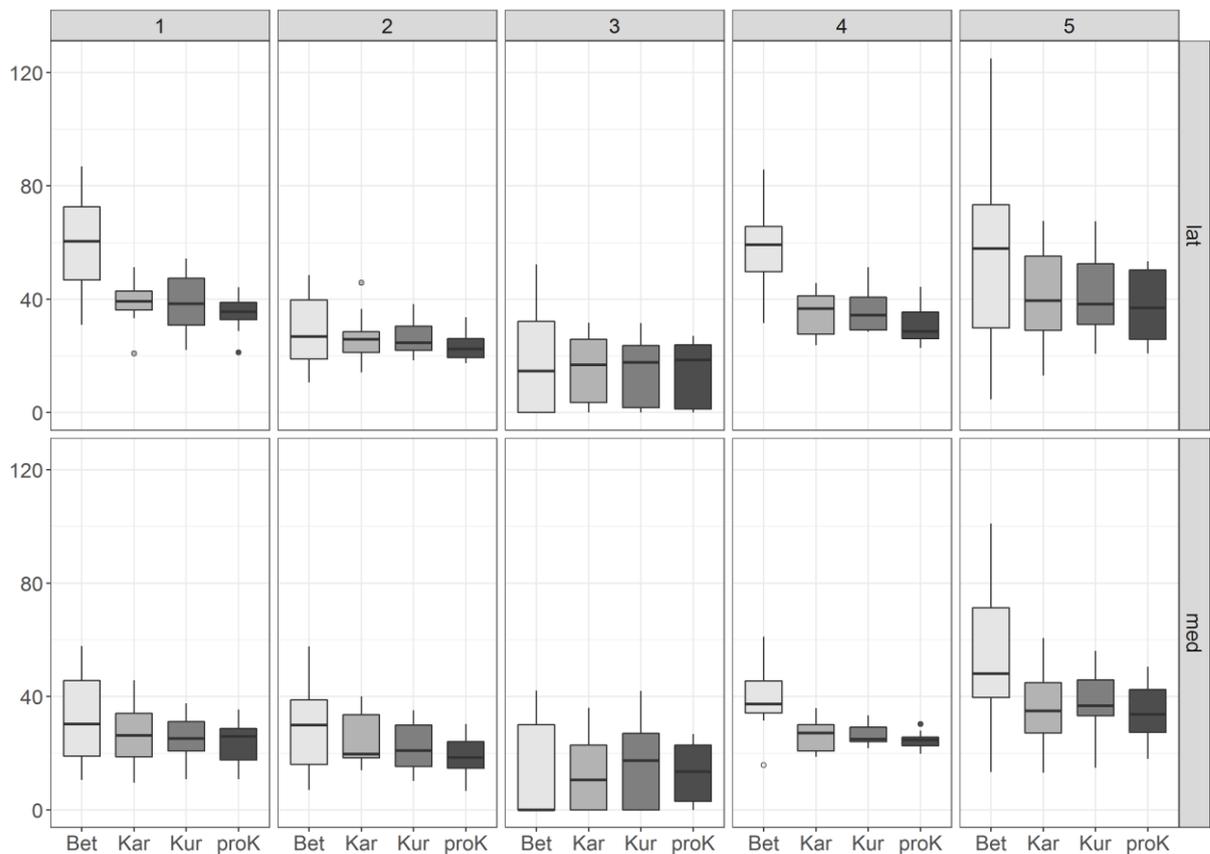


Abbildung 24: Boxplots (nach J. W. Tukey) für P_{zone} (N/cm^2) für die laterale und mediale Klaue, fünf Zonen und vier Untergründe

4.2 In-vivo-Studie

4.2.1 Tierdaten und Klauenbefunde

Die Körperkonditionsbeurteilung (EDMONSON et al. 1989) ergab einen BCS von 3,0 bis 4,5 / 5 (Durchschnittswert 3,7) und das Lahmheits-Scoring (SPRECHER et al. 1997) einen Durchschnittswert von $1,9 \pm 0,3$. Die folgende *Tabelle 11* zeigt die erfassten Daten und Klauenbefunde der Versuchstiere.

Tabelle 11: Erfasste Daten und Klauenbefunde der Versuchstiere. HR = hinten rechts, HL = hinten links, VR = vorne rechts, VL = vorne links, lat. = lateral, med. = medial, Hämorrh. = Hämorrhagie

Kuhnr.	BCS	KG (kg)	LSC	Bemerkungen
89	3,5	753	2	
75	3	773	2	
20	3	678	1	
82	4,5	822	2	HR lat. Hämorrh.
1	3,25	773	2	
83	4	802	2	HR Limax, HR lat. Wandläsion
87	3	832	2	HL lat., HR lat., VR med., VL med. Hämorrh.
86	4	782	2	VR med., VL med. Hämorrh.
81	4,25	792	2	
77	4,25	845	2	HR med. Hämorrh.

Die sonographisch gemessene Horndicke betrug an der lateralen Klaue an der Sohlenspitze durchschnittlich 3 mm und am Ballen 6,5 mm. An der medialen Klaue wies das Sohlenhorn an der Spitze eine Dicke von 4 mm auf und am Ballen von 5 mm. Die Höhe des Tragrandes betrug an der lateralen Klaue an der abaxialen Wand im Schnitt 1,7 mm und an der Spitze 1 mm. An der medialen Klaue war der Tragrand an beiden Messpunkten durchschnittlich 1,5 mm hoch. Sämtliche Messwerte der Einzelklauen sind im Anhang, *Tabelle 32*, aufgeführt.

Tabelle 12: Gemittelte Ergebnisse der sonographischen Horndickenmessung und Höhe des Tragrandes. B = Ballen, Sp = Spitze, lat. = lateral, med. = medial

	Horndicke (mm)				Tragrandhöhe (mm)			
	B lat	Sp lat	B med	Sp med	B lat	Sp lat	B med	Sp med
MW	6,5	3,0	5,0	4,0	1,7	1,0	1,5	1,5
St.-Abw.	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5	0,5

4.2.2 Ergebnisse der Druckmessungen

Die folgenden vier Abschnitte stellen die Ergebnisse der Druckmessungen des In-vivo-Versuchs analog zum Kapitel 4.1.2 dar.

4.2.2.1 Kraftverteilung

Die Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue unterschied sich auf Beton und der Gummimatte KURA nicht signifikant. Auf Beton betrug das Verhältnis lateral : medial 1,57:1 und auf KURA 1,09:1. Die folgende *Abbildung 25* zeigt die große Streuung der Einzelwerte auf Beton während die Kraftverteilung auf KURA über die zehn Einzelmessungen ausgeglichener ist.

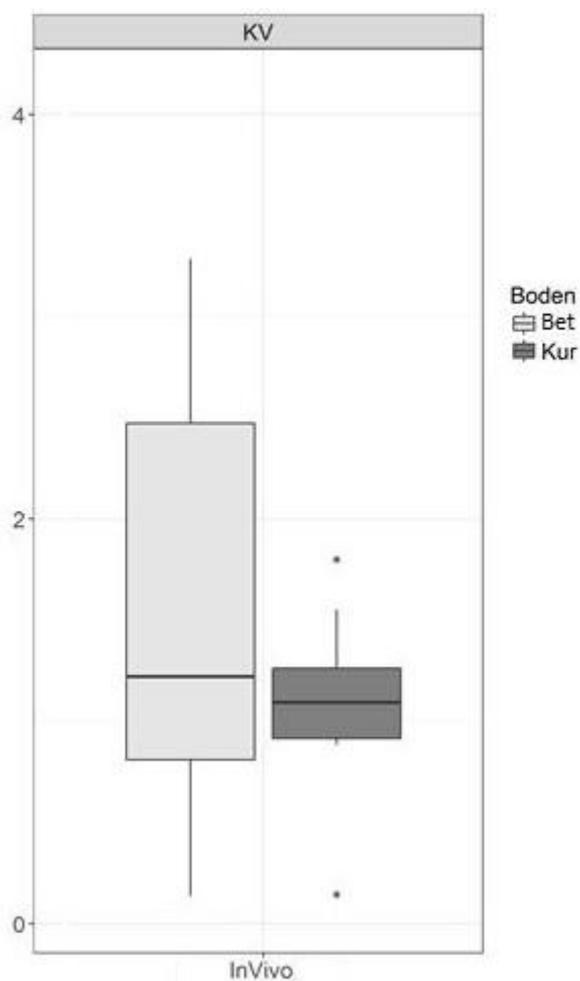


Abbildung 25: Boxplots (nach J. W. Tukey) der Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue auf Beton und KURA

Ergebnisse

Tabelle 13: Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue auf Beton und KURA

Kraftverteilung	
Beton	1,57 ± 1,02
KURA	1,09 ± 0,44

4.2.2.2 Belastungsfläche (A_{ges})

Die belastete Fläche unterschied sich sowohl für die gesamte Klaue als auch für die laterale und mediale Klaue separat betrachtet auf Beton und KURA signifikant ($p < 0,05$). Beim Vergleich der beiden Einzelklauen fiel eine fast identische Belastungsfläche unter der lateralen und medialen Klaue auf den untersuchten Böden auf (siehe *Tabelle 14*).

Tabelle 14: Belastungsfläche (cm^2) der gesamten Klaue sowie der beiden Einzelklauen auf Beton und KURA. Die Unterschiede zwischen den Böden waren sowohl für die Gesamtklaue als auch für die beiden Einzelklauen jeweils signifikant ($p < 0,05$).

	A_{ges} [cm^2]		
	gesamt	lateral	medial
Beton	45,18 ± 4,96	22,93 ± 7,11	22,10 ± 3,98
KURA	60,57 ± 8,64	30,11 ± 8,45	30,85 ± 4,86

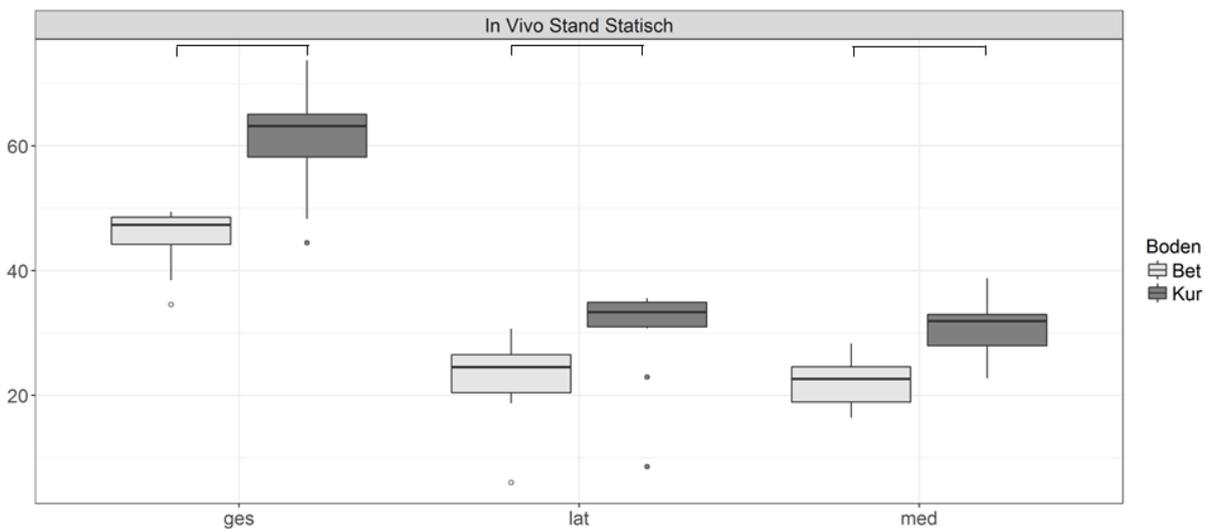


Abbildung 26: Boxplots (nach J. W. Tukey) der Belastungsfläche (cm^2) der gesamten Klaue sowie der beiden Einzelklauen auf Beton und KURA. Die horizontalen Linien zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Böden ($p < 0,05$).

4.2.2.3 Durchschnittlicher Druck (P_{ges})

Der durchschnittliche Druck unter der linken Hinterklaue betrug auf Betonboden 39,39 N/cm² und unterschied sich somit signifikant ($p < 0,05$) vom durchschnittlichen Druck auf der Gummimatte KURA (28,23 N/cm²). Auch die Werte der Einzelklauen unterschieden sich jeweils signifikant auf den beiden gemessenen Untergründen.

Tabelle 15: Mittelwerte und Standardabweichungen des durchschnittlichen Druckes (N/cm²) auf Betonboden und KURA. Die Unterschiede zwischen den Böden waren sowohl für die Gesamtklaue als auch für die beiden Einzelklauen jeweils signifikant ($p < 0,05$).

	P_{ges} [N/cm ²]		
	gesamt	lateral	medial
Beton	39,39 ± 7,96	40,27 ± 6,63	36,80 ± 12,03
KURA	28,23 ± 3,16	28,18 ± 4,06	27,92 ± 3,34

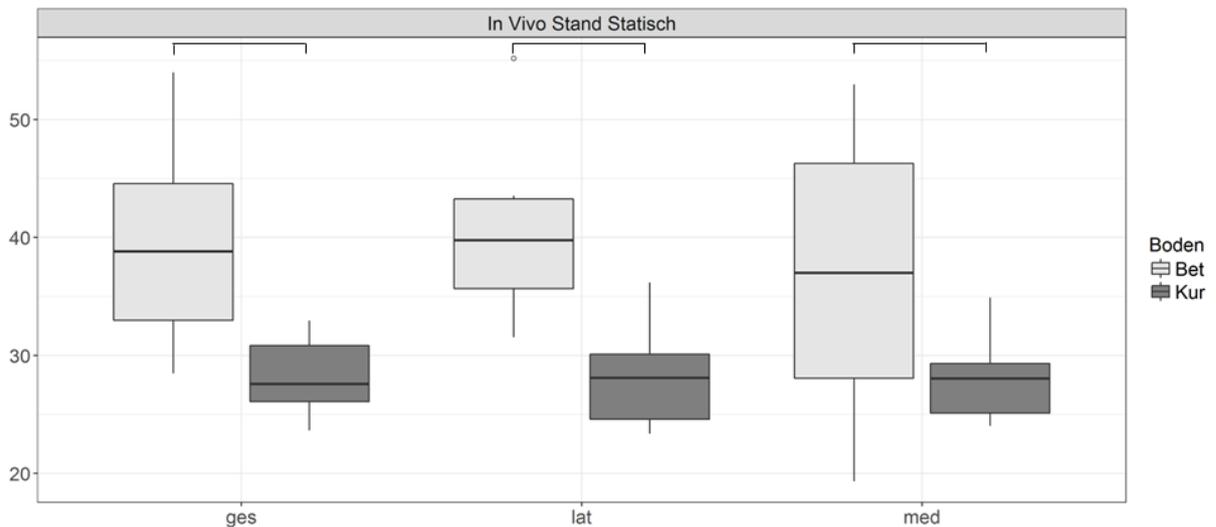


Abbildung 27: Boxplots (nach J. W. Tukey) des durchschnittlichen Druckes (N/cm²) auf Betonboden und KURA. Die horizontalen Linien zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Böden ($p < 0,05$).

4.2.2.4 Maximaldruck (P_{max})

Der Maximaldruck betrug im In-vivo-Versuch auf Beton 128,55 N/cm² und unterschied sich somit signifikant von dem auf der Gummimatte KURA gemessenen Wert von 75,16 N/cm² ($p < 0,05$).

Ergebnisse

Tabelle 16: Mittelwerte und Standardabweichungen des Maximaldruckes (N/cm^2) auf Beton und KURA

	P_{max} [N/cm^2]
Beton	128,55 \pm 21,29
KURA	75,16 \pm 12,16

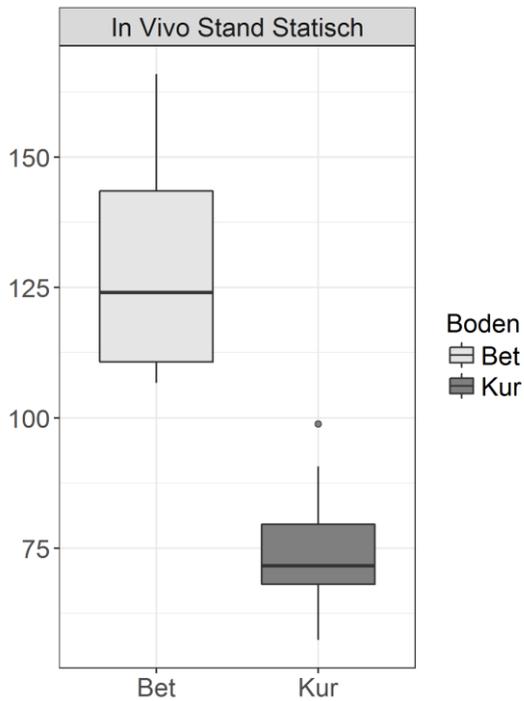


Abbildung 28: Boxplots (nach J. W. Tukey) des Maximaldruckes (N/cm^2) auf Beton und KURA. Der Unterschied zwischen den beiden Böden ist signifikant ($p < 0,05$).

5 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden der Versuchsaufbau, die Klauenpflegemethode und die Datenauswertung diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse der eigenen Ex-vivo-Versuche diskutiert und mit den Ex-vivo-Versuchen von OEHME (2018a) zur Druckbelastung der Klaue auf verschiedenen Stallböden verglichen. Nachfolgend kommt der In-vivo-Versuch zur Diskussion und zum Vergleich mit dem Ex-vivo-Versuch. Abschließend werden die In-vivo-Daten des vorliegenden Versuches mit Daten von OEHME (2018a, 2019) verglichen und in die vorhandene Literatur eingeordnet.

Außerdem sollen die Befunde vor dem Hintergrund der aufgestellten Hypothesen diskutiert werden und diese überprüft werden:

1. Die modifizierte Klauenpflege unterstützt die physiologische Kraftverteilung unter der Klaue vorteilhafter als die FKP, da die vertikale Bodenreaktionskraft vermehrt auf dem Wandhorn und dem Ballen lastet.
2. Die Verwendung von Gummimatten führt zu einer biomechanisch und anatomisch vorteilhaften Druckverteilung und Reduzierung von Druckspitzen.
3. Der Ex-vivo-Versuch liefert im Hinblick auf Belastungsfläche, Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue, durchschnittlichem und maximalem Druck Ergebnisse, die denen am lebenden Tier entsprechen.

5.1 Diskussion von Material und Methoden

5.1.1 Versuchsaufbau und Messsystem Ex-vivo- und In-vivo-Versuch

Die Verwendung eines Belastungsgerätes zur Realisierung des Ex-vivo-Versuchs ist eine Methode, die eine gute Wiederholbarkeit der Versuchsbedingungen gewährleistet. Auch andere Autoren verwendeten ähnliche oder baugleiche Geräte, um Druckmessungen an isolierten Gliedmaßen durchzuführen (NILSSON et al. 2006, ZEINER et al. 2007, OEHME et al. 2018b). Um eine reproduzierbare Ausgangssituation zu schaffen, wurde eine senkrechte Ausrichtung des Metatarsalknochens gewählt, was an der Hintergliedmaße des Rindes dem zweiten Teil der Hauptstützphase entspricht. Aufgrund nicht vorhandener Daten zur Belastung der Beuge- und Strecksehnen in den verschiedenen Phasen der Fußung des Rindes wurde auf Untersuchungen an Pferden zurückgegriffen und dementsprechend die Strecksehne mit einem zehnfach geringeren Gewicht belastet (5 kg) als die tiefe Beugesehne (50 kg), die laut RIEMERSMAA et al. (1988) in diesem Teil der Stützphase die Hauptlast trägt. Andere Studien umgingen das Problem des Sehnenzuges, indem die direkt über dem Kronrand abgesetzte Gliedmaße in Epoxidharz eingegossen wurde. Somit wurde jedoch auch der

Diskussion

Klauenmechanismus unterbunden und die Übertragbarkeit auf lebende Tiere ist infrage zu stellen (DE BELIE und ROMBAUT 2003, FRANCK und BELIE 2006).

Trotz der Anspannung der das Krongelenk stabilisierenden Strecksehne fiel nach mehrfacher Belastung in röntgenologischen Aufnahmen der Versuchsgliedmaßen eine unphysiologische Brechung der Knochenachse im erwähnten Gelenk auf. Um dadurch mögliche Veränderungen in der Belastung der Klaue zu unterbinden, wurde der weiter oben erwähnte Spanngurt zur Stabilisierung des Krongelenks angebracht (siehe *Abbildung 11*) und jede Gliedmaße röntgenologisch auf eine physiologische Stellung der phalangealen Knochenachse kontrolliert.

Aufgrund vorangegangener Untersuchungen zur Lastverteilung auf Vorder- und Hintergliedmaßen wurden die isolierten Hintergliedmaßen mit einem resultierenden Gewicht von 137-140 kg belastet, bezogen auf ein Körpergewicht von ungefähr 600 kg (FESSL 1968, CHAPINAL et al. 2009).

Um die Übertragbarkeit des Ex-vivo-Versuches auf lebende Tiere zu überprüfen, wurde ein Versuch analog zu dem von OEHME (2018a) beschriebenen statischen In-vivo-Versuch durchgeführt. Durch die Platzierung der Gesamtklaue auf einem Sensor konnte ein direkter Vergleich mit den Daten des Ex-vivo-Versuches erfolgen. Da an den Versuchskühen unmittelbar vor den Messungen die modifizierte Klauenpflege durchgeführt werden sollte und somit eine gewisse Zeit zur vorangegangenen Klauenpflege gewährleistet werden musste, wurden diese Versuche zeitversetzt zum Ex-vivo-Versuch durchgeführt. Die von anderen Arbeitsgruppen durchgeführten In-vivo-Versuche beinhalteten Kraftmessplatten, auf denen die Tiere während der Messungen standen (OSSENT et al. 1987, MAIR et al. 1988, VAN DER TOL et al. 2002, TELEZHENKO et al. 2008). So konnte der Einfluss des Bodenbelags auf die Druckverteilung nicht mit einbezogen werden. BRUDERER (2015) platzierte eine Druck- und eine Kraftmessplatte unter verschiedenen Gummimatten einer Dicke von 21-24 mm, auf denen die Kühe standen. Jedoch konnten auch mit diesem Versuchsaufbau nicht die direkten kinetischen Einflüsse der Gummimatte auf die Sohlenfläche beurteilt werden.

Das in diesem Versuch verwendete Druckmesssystem der Firma Tekscan© bietet für den Großtiersektor geeignete flexible Sensorfolien mit einer ausreichend hohen Auflösung von 4 Sensel/cm² an, an, die von verschiedenen Arbeitsgruppen im Pferdebereich bereits erfolgreich angewendet wurden (PERINO et al. 2007, LANGE et al. 2012, HAGEN et al. 2016, HÜPPLER et al. 2016, GEIGER 2019). Es bietet einen sehr guten Kompromiss hinsichtlich einer ausreichend hohen Auflösung und den finanziellen Aufwänden für die Einzelsensoren.

Modifizierte Klauenpflegemethode

Die in dieser Arbeit vorgestellte modifizierte Klauenpflegemethode imitiert die auf natürliche Art und Weise entstehende Weideklaue, bei der es durch Abschilferung des Sohlenhorns zu

einem überstehenden Tragrand kommt (SCOTT 1988, BENZ 2002, BLOWEY 2015c). Diese Klauenform ist biomechanisch gesehen günstig, da das Kron- und das Wandhorn, welche den Tragrand bilden, die größte Härte aufweisen (BAGGOTT et al. 1988, BUDRAS und WÜNSCHE 2011). Durch deren Lastaufnahme wird die Kraft im Wandsegment auf den Klauenbeinträger übertragen, was einer physiologischen Belastung entspricht und die empfindlichere Sohle schützt (MÜLLING 1993, BAGGOTT et al. 1988, MAIERL und MÜLLING 2004). In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Modifikation der FKP, eine Anpassung der hier vorgestellten Art ist jedoch bis dato einzigartig. Einige Autoren setzten den Schwerpunkt auf eine Anpassung des Dorsalwandlänge und/oder der Sohlendicke (PAULUS und NUSS 2002b, BLOWEY und INMAN 2012, ARCHER et al. 2015) oder modifizierten den Dorsalwandwinkel (ZEINER et al. 2007). OUWELTJES et al. (2009) untersuchten Klauen mit vergrößerter Hohlkehlung im Vergleich zu funktionell gepflegten Klauen auf Beton- und Gummiböden und stellten in Hinblick auf Läsionen und Aktivität der Tiere keinen Zusammenhang zur Pflegemethode fest. Die beobachteten Effekte ließen sich eher auf den Untergrund beziehen.

REUBOLD (2008) schlägt die Form des sich auf weichem Boden natürlicherweise bildenden Tragrandes als Bewertungskriterium für Laufgangsaufgaben vor. Er stellte je nach Härte der Gummimatte eine unterschiedliche Abnutzung oder Ausprägung des Tragrandes fest. Dieser Ansatz unterstreicht dessen Wichtigkeit für eine gesunde Klauenform.

Das Herausarbeiten des Tragrandes führte bei einigen Tieren zu einer Sohlendicke von insgesamt 4 mm. Diese wird als kritisch betrachtet, die empfohlene Dicke beträgt 5 mm (TOUSSAINT-RAVEN 1985b). Die geringste Dicke wurde an der Spitze der lateralen Klaue festgestellt. Bei den 10 Versuchskühen wurden nach der modifizierten Klauenpflege keine Lahmheiten festgestellt. Auch in einem Feldversuch, der Teil des Gesamtprojektes, aber nicht Teil dieser Arbeit war, wurde nach Durchführung der modifizierten Klauenpflege kein vermehrtes Auftreten von Lahmheiten festgestellt (Pers. Mitteilung Dr. K. Wilhelm, Plauen). Durch diese Messwerte wird deutlich, wie wichtig eine ausreichende Sohlendicke bei Milchkühen vor der Klauenpflege ist. Abrasive Böden wie Gussasphalt oder Beton tragen zu einem erhöhten Abrieb des Sohlenhorns und somit zu einer initial nicht ausreichenden Hornstärke bei (VOKEY et al. 2001, BENZ 2002, SAMEL 2005). Dies würde einer modifizierten Klauenpflege, wie hier beschrieben, entgegenstehen. Durch die zeitgleiche Durchführung eines Versuchs zur FKP lagen ideale Bedingungen für einen direkten Vergleich der beiden Pflegemethoden auf verschiedenen Untergründen vor (MUNZEL et al. 2017, OEHME et al. 2018b).

5.1.2 Datenaufbereitung und –auswertung Ex-vivo- und In-vivo-Versuch

Zur Lokalisation von Druckspitzen an der Klaue entwickelten mehrere Autoren unterschiedliche Einteilungen der Sohlenfläche. Die von uns verwendete nach CARVALHO (2006), siehe *Abbildung 29B*, bietet eine Zonenaufteilung, die alle klinisch relevanten Bereiche abbildet und die Prädilektionsstelle für das Rusterholz'sche Sohlengeschwür separat berücksichtigt. Außerdem ist die gradlinige Unterteilung für digitale Auswertungen von Druckmaxima gut geeignet. Die Einteilung nach GREENOUGH und WEAVER (1997) ist sinnvoll für die Lokalisation klinisch relevanter Läsionen, aber für digitale Anwendung auf unterschiedlich großen Sohlenflächen ungeeignet (*Abbildung 29A*) und die Auflösung der von uns verwendeten Sensoren mit 4 Sensoren/cm² nicht hoch genug. Die einfachere Einteilung in 3 Zonen nach TELEZHENKO et al. (2008) ist für unsere Fragestellung nicht detailliert genug (*Abbildung 29C*). Beim Übereinanderlegen von Druckbild und Zoneneinteilung kam es bei einigen Versuchsklauen zu Pixelüberständen, wie in *Abbildung 15* zu erkennen ist. Das ist auf die Software des HoofTM-Systems zurückzuführen, die die Werte von jeweils 4 benachbarten Sensoren mittelte.

Die vielen einzelnen Arbeitsschritte, die zur Bestimmung des Sohlenumrisses und dem Darüberlegen der Zoneneinteilung durchgeführt wurden, waren sehr aufwändig (siehe Kap. 3.1.7 – 3.1.11). Allerdings ist nur so eine exakte Bestimmung der einzelnen Parameter in den Zonen möglich. Vor allem bei den Druckbildern auf Betonboden, die selten den gesamten Klauenumriss abbilden, ist eine exakte Positionierung der Zoneneinteilung unmöglich. Auch VAN DER TOL (2002) berichtete von diesem Problem.

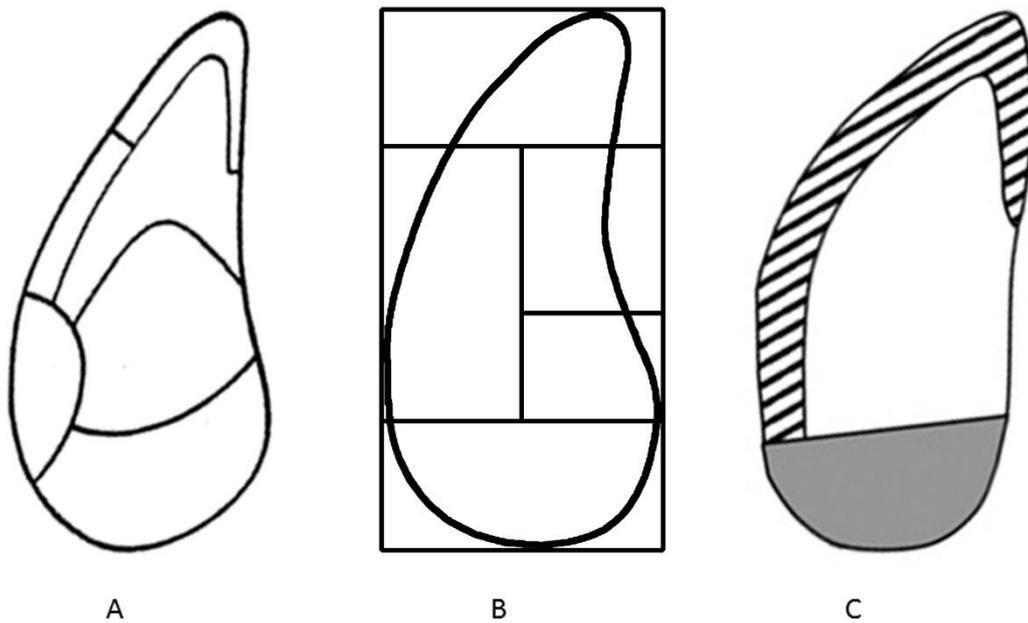


Abbildung 29: Einteilung der Klauensohlenfläche, modifiziert nach GREENOUGH und WEAVER (1997) (A); CARVALHO (2006) (B) und TELEZHENKO et al. (2008) (C)

Der Ex-vivo-Versuch der vorliegenden Arbeit wurde parallel zu einem Versuch von OEHME (2018a) durchgeführt, um eine direkte Vergleichbarkeit der modifizierten Klauenpflegemethode mit der FKP zu gewährleisten. Die Vorbereitung der isolierten Gliedmaßen und der Versuchsaufbau, der Einsatz des Belastungsgerätes, die Kalibration der Sensoren und die Datenauswertung erfolgten analog seiner Ex-vivo-Versuche.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden ausgewählte Druckmessdaten der modifizierten mit der funktionellen Klauenpflege verglichen.

5.2.1 Ex-vivo-Versuche Gesamtklaue

Tabelle 17: Vergleich der Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue der vorliegenden Arbeit mit funktionell gepflegten Klauen (OEHME 2018)

KV	Mod. KP	% Last auf lateraler Klaue	FKP (OEHME 2018a)	% Last auf lateraler Klaue
Bet	2,24 ± 1,44	69,14	4,2 ± 2,4	80,77
Kar	2,12 ± 1,33	67,95	3,4 ± 1,6	77,27
Kur	2,00 ± 1,24	66,67	2,8 ± 1,4	73,68
ProK	1,98 ± 1,22	66,44	2,7 ± 1,4	72,97

Im Datenvergleich der mit identischem Versuchsaufbau durchgeführten Klauenpflegemethoden zeigt die modifizierte Klauenpflege eine ausgeglichener Lastverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue als die FKP. Über die Gründe kann nur spekuliert werden, da die ersten Arbeitsschritte exakt gleich waren und nach TOUSSAINT-RAVEN (1985b) ausgeführt wurden. Hier könnte eine größere Zahl an Versuchsgliedmaßen sinnvoll sein. Die größte Ungleichverteilung zeigt sich in beiden Versuchen auf Betonboden, mit steigender Weichheit der Gummimatten verringert sich durch das Einsinken der Klauen das Ungleichgewicht. Im hier vorgestellten Versuchsaufbau trug die laterale Klaue auf Betonboden nach FKP **80,77 %** des Gewichtes (OEHME et al. 2018b), nach modifizierter KP **69,14 %**. ZEINER et al. (2007) stellten in ihrem Ex-vivo-Versuch nach FKP bei fixierter tiefer Beugesehne eine Lastaufnahme von **56 %** auf der lateralen Klaue fest, allerdings betrug die aufbrachte Gesamtkraft lediglich 600 N.

Tabelle 18: Vergleich der belasteten Fläche der vorliegenden Arbeit mit funktionell gepflegten Klauen (OEHME 2018)

A _{ges} (cm ²)	Mod. KP	FKP (OEHME 2018a)
Bet	28,90 ± 4,84	33,23 ± 3,41
Kar	42,87 ± 4,83	48,26 ± 3,69
Kur	44,26 ± 5,98	52,31 ± 4,78
ProK	48,84 ± 5,61	58,03 ± 3,80

Diskussion

Die belastete Fläche verkleinerte sich auf allen Untergründen bei Anwendung der modifizierten Klauenpflege, was durch das Herausarbeiten des Tragrandes zustande kam und sowohl erwünscht als auch zu erwarten war. Die Differenz zwischen den beiden Pflegemethoden vergrößerte sich vom Betonboden bis zur Gummimatte profiKURA. Die drei verwendeten Matten weisen dieselbe Shore-Härte von 65 auf, die Unterschiede der belasteten Fläche müssen also auf die Struktur der Mattenober- und Unterseite zurückgeführt werden. Die Matte KARERA P ist mit 21 mm etwas dünner als die anderen beiden Matten (24 mm). Außerdem weist KARERA P an der Unterseite keine Noppen auf. Diese bei KURA P und profiKURA P anders gestaltete Unterseite kann für eine größere Belastungsfläche verantwortlich sein. Die Oberseite von profiKURA P ist von einer dünnen, korundhaltigen Gummischicht bedeckt, welche eine Erklärung für die größere Belastungsfläche bei profiKURA P im Vergleich zu KURA P sein könnte. In einer anderen Studie, bei der in Epoxidharz fixierte Klauen mit unterschiedlichem Gewicht belastet wurden, betrug die Belastungsflächen nur knapp 12 cm² (bei ca. 200 kg aufgebrachtem Gewicht) bzw. 23,94 cm² (bei ca. 600 kg aufgebrachtem Gewicht). Die im Vergleich zu unserer Studie um einiges kleinere Belastungsfläche bei vergleichbarer Gewichtskraft kann unter anderem durch die z.T. extreme Rauigkeit der unterschiedlichen getesteten Böden erklärt werden. Raue Untergründe bestehen in der Regel aus grobkörnigem Material und die Klauensohle hat nur mit den hervorstehenden Anteilen Kontakt. Dies reduziert die Belastungsfläche stark. Die zitierten Flächen stellen die gemittelten Werte aller verwendeter Böden dar. Weiterhin wurde der Klauenmechanismus durch die Einbettung der Klauen in Epoxidharz in hohem Maße eingeschränkt, so dass eine Vergleichbarkeit hier nicht gewährleistet werden kann (FRANCK und BELIE 2006).

Tabelle 19: Vergleich des durchschnittlichen Druckes der vorliegenden Arbeit mit funktionell gepflegten Klauen (OEHME 2018)

P_{ges} (N/cm²)	Mod. KP	FKP (OEHME 2018a)
Bet	49,99 ± 8,90	44,69 ± 5,39
Kar	32,99 ± 4,58	29,70 ± 2,69
Kur	32,53 ± 4,02	27,64 ± 3,19
ProK	28,96 ± 3,04	24,89 ± 2,54

Der höhere durchschnittliche Druck der modifiziert gepflegten Klauen resultiert aus der kleineren Belastungsfläche, die durch die Modellierung des Tragrandes entsteht. Auffallend ist die über alle Böden ähnliche Differenz zwischen der modifizierten Klauenpflege und der FKP. Die Standardabweichung ist jedoch auf Betonboden größer als auf den Gummimatten, was auf die Materialeigenschaft des Betons (feinporige Oberfläche) zurückzuführen sein

Diskussion

könnte. In einer anderen Studie von FRANCK und BELIE (2006) wurde bei 200 kg aufgebracht Kraft ein durchschnittlicher Druck von 335 N/cm² festgestellt. Einflussfaktoren könnten hier im Hinblick auf die oben beschriebene sehr kleine Belastungsfläche der ausgeschaltete Klauenmechanismus, die extreme Rauigkeit einiger getesteter Böden sowie die fehlende dünne Gummischicht, die unsere Sensoren schützte, sein. In der zitierten Studie, die das I-Scan-System der Firma Tekscan© nutzte, wurden die Sensoren nicht mit Gummifolie beklebt.

Tabelle 20: Vergleich der Maximaldrücke der vorliegenden Arbeit mit funktionell gepflegten Klauen (OEHME 2018)

P_{max} (N/cm²)	Mod. KP		FKP (OEHME 2018a)	
Bet	151,67	± 42,06	130,31	± 23,29
Kar	97,90	± 22,10	87,23	± 13,31
Kur	90,44	± 22,48	78,59	± 12,30
ProK	82,14	± 19,59	71,90	± 8,41

Analog zu den durchschnittlichen Drücken liegen auch die Maximaldrücke der modifizierten Klauenpflege deutlich über denen der FKP. Dass die Differenz zwischen den beiden Methoden mit ca. 21 N/cm² auf Beton deutlich größer ist als auf den Gummimatten, lässt sich wiederum mit dem Einsinken der Klauen auf den nachgiebigen Böden erklären, was eine bessere Druckverteilung gewährleistet. Die weiter oben zitierte Studie maß Maximaldrücke von 1519 N/cm², die möglichen Gründe für die große Abweichung von den eigenen Daten sind, wie beim durchschnittlichen Druck, die höhere Auflösung der verwendeten Sensoren und eine fehlende dünne Gummischicht zwischen Sensor und Klaue (FRANCK und BELIE 2006).

5.2.2 Ex-vivo-Versuche Zoneneinteilung

Die Einteilung der Sohlenfläche in fünf Zonen nach CARVALHO (2006) sollte die Lokalisation des Maximaldrucks visualisieren und dessen Auftretshäufigkeit in den verschiedenen Zonen quantifizierbar machen. Da nur wenige Ex-vivo-Studien existieren und die einzig vorhandene vergleichbare (ZEINER et al. 2007) keine Zoneneinteilung verwendet hat, erfolgt die Diskussion der Ergebnisse der Zoneneinteilung mit vorhandenen In-vivo-Studien und mit der zeitgleich durchgeführten Ex-vivo-Studie von OEHME (2018a).

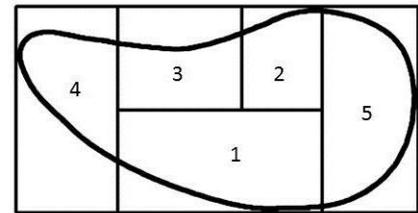


Abbildung 31: Einteilung der Sohlenfläche nach (Carvalho 2006).

Die Lokalisation des Maximaldruckes an den lateralen Klauen der Hintergliedmaßen unterschied sich kaum zwischen den beiden Pflegemethoden. Sowohl im vorliegenden als auch im Ex-vivo-Versuch von OEHME (2018a) lag der Maximaldruck auf dem Ballen (Zone 5) und dem lateralen Tragrand (Zone 1), nach der Zoneneinteilung von CARVALHO (2006). BRUDERER (2015) lokalisierte die Maximaldrücke an den Hintergliedmaßen von ca. 640 kg schweren Braunvieh-Rindern in der Ballenzone der lateralen Klaue. VAN DER TOL (2002) benutzen die Zoneneinteilung nach GREENOUGH UND WEAVER (1997), um dessen Lokalisation anzugeben (*Abbildung 30, Abbildung 31:*). An den Hintergliedmaßen war dieser an der lateralen Klaue in den Zonen 3 und 6 zu finden, was zu unseren Ergebnissen passt. Zu geringen Anteilen lag der Maximaldruck auch in Zone 5, der Klauenspitze, die durch die Anwendung der modifizierten Klauenpflege durch das Herausarbeiten des Tragrandes geschützt wird. Die funktionelle KP nach TOUSSAINT-RAVEN (1985a) hat eine gleichmäßige Lastverteilung innerhalb der Klaue und zwischen den Einzelklauen zum Ziel, sowie eine Gewichtsverteilung auf eine möglichst große Fläche, was möglicherweise nicht dem „Normalzustand“ entspricht (VAN DER TOL et al. 2004b). Die Evolution des Rindes verlief auf weichen, variablen Untergründen, die zu einer Klauenform mit überstehendem Tragrand führen (BLOWEY 2015c). Abhängig von der Nachgiebigkeit des Untergrundes sinkt der Tragrand mehr oder weniger ein, so dass Ballen und Sohle Last aufnehmen (WEBB und CLARK 1981, SCOTT 1988)

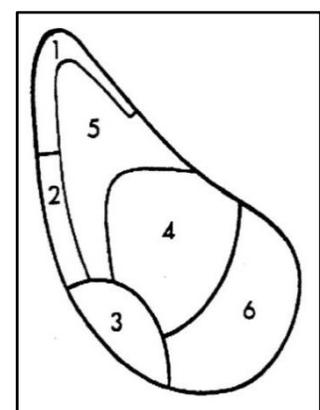


Abbildung 30: Unterteilung der Sohlenfläche nach (Greenough und Weaver 1997)

Die funktionell gepflegten medialen Klauen wiesen in der Studie von OEHME et al. (2018b) die Druckspitzen ungefähr gleichermaßen in den Zonen 4 und 5 auf, im vorliegenden Versuch (mod. KP) dominierte Zone 5. Das spricht für einen

Diskussion

Effekt der modifizierten Pflorgetechnik, bei der die Sohlenfläche abgetragen wird, um diese zu entlasten. VAN DER TOL (2002) lokalisierte den Maximaldruck an der medialen Hinterklaue im apikalen Sohlenbereich (Zone 5, *Abbildung 30*), was sich teilweise mit den Ergebnissen von OEHME (2018a) deckt.

Tabelle 21 Vergleich von A_{zone} für modifiziert und funktionell gepflegte Klauen (OEHME 2018a) auf Betonboden. Die hochgestellten Abkürzungen zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Böden bei den funktionell gepflegten Klauen ($p < 0,05$)

Laterale Klaue					
Zone	1	2	3	4	5
Mod. KP	0,42 ± 0,14	0,36 ± 0,25	0,09 ± 0,12	0,34 ± 0,15	0,45 ± 0,23
FKP	0,69 ± 0,21 ^{Kar,Kur,proK}	0,53 ± 0,15 ^{Kur}	0,24 ± 0,21 ^{Kar,Kur,proK}	0,33 ± 0,16 ^{21 Kar,Kur,proK}	0,65 ± 0,17 ^{Kar,proK}

Beim Vergleich der relativen belasteten Flächen pro Zone (A_{zone}) fällt vor allem in den lateralen Klauen auf, dass die modifiziert gepflegten Klauen geringere Werte aufweisen als die funktionell gepflegten von OEHME (2018a). Das trifft auf Zone 1, 2, 3 und 5 zu. Der Tragrand wird in den Zonen 1, 4 und 5 abgebildet und die Hohlkehlung von Zone 2 und 3. Der herausgearbeitete Tragrand hat offensichtlich den Effekt, die belasteten Flächen in den einzelnen Zonen zu verringern. Dadurch wird die empfindliche Sohle (Zonen 2 und 3) entlastet und in Zone 1 konzentriert sich die Belastung auf den Tragrand. In *Tabelle 21* sind die Werte der modifiziert gepflegten Klauen exemplarisch im Vergleich zu den funktionell gepflegten Klauen (FKP) von OEHME (2018a) für Betonboden dargestellt. Weiterhin fallen die fehlenden Signifikanzen zwischen den Böden bei den modifiziert gepflegten Klauen auf. Dies kann mit den allgemein kleineren Belastungsflächen begründet werden, die Unterschiede sind hier nicht so groß wie bei den funktionell gepflegten Klauen von OEHME (2018a).

Tabelle 22: Vergleich der Mittelwerte von F_{zone} der lateralen Klauen (Betonboden und drei Gummimatten) für die modifizierte und die funktionelle Klauenpflege (OEHME 2018a)

Laterale Klaue mod. KP					
Zone	1	2	3	4	5
Alle Böden	0,37 ± 0,11 ^{2,3,4}	0,07 ± 0,05 ^{1,3,4,5}	0,05 ± 0,06 ^{1,2,4,5}	0,19 ± 0,06 ^{1,2,3,5}	0,32 ± 0,15 ^{2,3,4}
Laterale Klaue FKP (OEHME 2018a)					
Zone	1	2	3	4	5
Alle Böden	0,40 ± 0,12 ^{2,3,4}	0,08 ± 0,03 ^{1,4,5}	0,07 ± 0,04 ^{1,4,5}	0,13 ± 0,05 ^{1,5}	0,32 ± 0,10 ^{2,3,4}

Diskussion

F_{zone} (*Tabelle 9*) beschreibt den relativen Anteil der auf die Zone einwirkenden Kraft im Verhältnis zur auf die Einzelklaue wirkenden Gesamtkraft. Hier traten erst nach Berechnung der Mittelwerte aller vier Böden gemeinsam (Betonboden und drei Gummimatten) signifikante Unterschiede zwischen den Zonen auf. OEHME (2018a) wählte das identische Vorgehen, weshalb hier ein direkter Vergleich der Ergebnisse stattfinden kann; in *Tabelle 21* beispielhaft für die laterale Klaue zusammengestellt. Im vorliegenden Versuch zeigt sich, dass sich die die Hohlkehlung repräsentierenden Zonen 2 und 3 an der lateralen Klaue jeweils signifikant von den anderen Zonen unterscheiden. Dies kann mit der kleineren Fläche der Zonen 2 und 3 erklärt werden, doch auch bei Addition der Werte bleibt die auf die Zonen wirkende relative Anteil der Kraft kleiner als in den Zonen 1, 4 und 5. Der Vergleich der beiden Methoden zeigt, dass die modifizierte Klauenpflege die die Hohlkehlung repräsentierenden Zonen 2 und 3 etwas zu entlasten scheint. Zone 4, die Klauenspitze, nimmt bei der modifizierten Klauenpflege einen größeren Anteil der einwirkenden Kraft auf als bei den funktionell gepflegten Klauen – auch dies kann ein Effekt des Tragrands sein.

CARVALHO et al. (2006) stellten eine Umverteilung des Druckes durch FKP fest, die die Prädilektionsstelle für RSG einem höheren Druck aussetzt. Zone 2 trug bei ungepflegten Klauen 15,68 % der Last, nach der Klauenpflege waren es 20,2 %. Diese Verlagerung kam durch die gleichmäßigere Druckverteilung zustande, die die FKP zum Ziel hat, was von den Autoren kritisch diskutiert wird. Beide Werte sind höher als die in *Tabelle 21* dargestellten relativen Kraftverteilungen. Zone 1, die einen Teil des abaxialen Tragrandes darstellt, trug bei ungepflegten Klauen 30,97 %, bei gepflegten 29,1 % der Last. *Tabelle 21* zeigt für den vorliegenden Versuch und den von OEHME (2018a) für diese Zone Werte von 37 % bzw. 40 %. CARVALHO et al. (2006) führten die Messungen allerdings auf Edelstahlplatten durch, im vorliegenden Versuch wurden die Werte von Betonboden und drei Gummimatten gemittelt. TELEZHENKO et al. (2008), die eine Unterteilung des Klauenabdrucks in 3 Abschnitte (Ballen, Wand, Sohle, *Abbildung 29C*) vornahmen, lokalisierten die Hauptlast bei auf **Beton** gehaltenen Kühen auf dem Ballen (57,5 % der Gesamtlast auf der lateralen Klaue) und der lateralen Wand (30,8 % der Gesamtlast auf der lateralen Klaue). Die Tiere, bei denen höchste Gewicht auf dem lateralen Tragrand lag, waren die auf Gummimatten gehaltenen. Auch in dieser Studie wurde der Sensor auf einer Edelstahlplatte positioniert, so dass der direkte Einfluss unterschiedlicher Bodenbeläge nicht erfasst werden konnte. Interessanterweise lag die Hauptlast bei Kühen, die auf **Asphaltboden** gehalten wurden, auf der Sohle (56,7 % der Gesamtlast der lateralen Klaue) – ein Phänomen, das auch von VAN DER TOL et al. (2002, 2004b) für die Hintergliedmaßen beschrieben und ein Zusammenhang mit der Klauenpflegemethode vermutet wurde.

Für die Berechnung des durchschnittlichen Druckes in den einzelnen Zonen (P_{zone}) wurde nicht die gesamte Zonenfläche herangezogen, da, wie in *Tabelle 21* erkennbar, nur ein Teil der Zone

Diskussion

belastet wird. Da auf kleine Flächen einwirkende Kraft maßgeblich zur Entstehung mechanisch-traumatischer Klauenläsionen beiträgt und eine Einbeziehung der gesamten Zonenfläche diesen Druck „verdünnen“ würde, wurde für die Berechnung des durchschnittlichen Druckes die *belastete Fläche pro Zone* hinzugezogen (CARVALHO et al. 2006). Die folgenden *Tabelle 23* und *Tabelle 24* stellen exemplarisch für die laterale Klaue ein Vergleich der beiden Methoden (modifizierte und funktionelle Klauenpflege) auf Betonboden und der Gummimatte profiKURA P dar.

Tabelle 23: Vergleich von P_{zone} (N/cm^2) der lateralen Klauen auf Betonboden für die modifizierte und die funktionelle Klauenpflege (OEHME et al. 2018b)

Laterale Klaue mod. KP					
Zone	1	2	3	4	5
Beton	59,37 ± 18,08	29,14 ± 12,50	17,20 ± 18,10	58,74 ± 14,88	54,39 ± 32,49
Laterale Klaue FKP (OEHME et al. 2018b)					
Zone	1	2	3	4	5
Beton	51,25 ± 12,36	36,51 ± 12,34	22,89 ± 14,53	40,20 ± 14,17	50,11 ± 13,75

Auf Betonboden zeigt sich ein Unterschied zwischen den die Hohlkehlung repräsentierenden Zonen 2/3 und den Zonen 1/4/5, die den abaxialen Tragrand, den Ballen und die Klauenspitze abbilden. Der durchschnittliche Druck pro Zone zeigt bei den modifiziert gepflegten Klauen größere Differenzen als bei den funktionell gepflegten. Die funktionelle Klauenpflege hat eine möglichst gleichmäßige Gewichtsverteilung innerhalb der Einzelklaue zum Ziel (TOUSSAINT-RAVEN 1985b). Die Klauenform, die sich auf „naturnäheren Untergründen“ wie Weide oder Gummimatten ausbildet, weist einen überstehenden Tragrand auf, der die empfindliche Sohle beim Laufen auf harten Untergründen entlastet, auf weichen Böden jedoch einsinkt und die Sohle an der Belastung beteiligt (SCOTT 1988, BENZ 2002, REUBOLD 2008, BLOWEY 2015c). Dieser Unterschied ist in den Werten von P_{zone} sichtbar: Die modifiziert gepflegten Klauen weisen in Zone 2/3 Werte von $29,14 \pm 12,50 N/cm^2$ bzw. $17,20 \pm 18,10 N/cm^2$ auf. Die Druckwerte der funktionell gepflegten Klauen liegen mit $36,51 \pm 12,34 N/cm^2$ bzw. $22,89 \pm 14,53 N/cm^2$ darüber. In den Zonen 1/4/5 ist das Verhältnis entgegengesetzt, hier sind die Druckwerte der modifiziert gepflegten Klauen höher als die der funktionell gepflegten. Diese Werte verdeutlichen den Effekt des Tragrandes, der die Sohle entlastet und die Hauptlast auf die abaxiale Wand und den Ballen verlagert. Die extrem hohe Standardabweichung der modifiziert gepflegten Klauen in Zone 3 ist auffällig und darauf zurückzuführen, dass diese Zone in einigen Klauen komplett entlastet war. In anderen Versuchsgliedmaßen reichte der Tragrand axial bis in Zone 3 herein. Dies verdeutlicht den starken Effekt der individuellen Klaue

(FRANCK und BELIE 2006), der durch eine höhere Anzahl an Versuchsgliedmaßen ausgeglichen werden könnte.

Tabelle 24: Vergleich von P_{zone} (N/cm^2) der lateralen Klauen auf profiKURA P für die modifizierte und die funktionelle Klauenpflege (OEHME et al. 2018b)

Laterale Klaue mod. KP					
Zone	1	2	3	4	5
proK	35,06 ± 6,17	23,37 ± 5,04	14,29 ± 10,84	30,97 ± 6,55	37,64 ± 12,48
Laterale Klaue FKP (OEHME et al. 2018b)					
Zone	1	2	3	4	5
proK	29,76 ± 5,78	26,34 ± 5,44	18,54 ± 4,82	22,07 ± 4,91	40,35 ± 5,54

Die für die Gummimatte profiKURA P ermittelten Druckwerte verhalten sich nahezu analog zu denen auf Betonboden, allerdings sind sie deutlich niedriger. Die modifizierte Klauenpflege führt zu einer höheren Belastung der Zonen 1 und 4, die Sohle (Zone 2 und 3) erfährt eine deutliche Entlastung. Der Ballen (Zone 5) erfährt auf dieser Gummimatte bei den modifiziert gepflegten Klauen eine geringgradig höhere Belastung.

5.2.3 In-vivo-Versuch

Der In-vivo-Versuch wurde einerseits durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Versuchsdurchführung und der Ergebnisse des Ex-vivo-Versuches auf das lebende Tier zu verifizieren; andererseits, um Unterschiede zum In-vivo-Versuch mit funktionell gepflegten Klauen zu ermitteln (OEHME 2018a).

Zunächst erfolgt die Gegenüberstellung von In-vivo- und Ex-vivo-Versuch für die modifiziert gepflegten Klauen auf den Untergründen Beton und KURA P.

Tabelle 25: Vergleich der Kraftverteilung der modifiziert gepflegten Klauen im Ex-vivo- und In-vivo-Versuch auf Betonboden und KURA P

Last auf lateraler Klaue	ex-vivo	in-vivo	Last auf medialer Klaue	ex-vivo	in-vivo
Beton	69,14 %	61,09 %	Beton	30,86 %	39,19 %
KURA P	66,67 %	52,15 %	KURA P	33,33 %	47,85 %

Die Kraftverteilung (Tabelle 25) zwischen lateraler und medialer Klaue war im In-vivo-Versuch ausgeglichener als im Ex-vivo-Versuch. Hier könnte der Faktor des lebenden Tieres, welches seine Gliedmaße mittels Bändern, Sehnen und Muskeln ausrichtet und nicht mit Hilfe eines Belastungsgerätes, Spannguten und Gewichten, eine Rolle spielen. Wie im Ex-vivo-Versuch war die Kraftverteilung auf der Gummimatte KURA ausgeglichener als auf Betonboden. Mit

Diskussion

52,15 % Lastaufnahme der lateralen Klaue ist hier bei Anwendung der modifizierten Klauenpflegemethode eine sehr günstige Kraftverteilung geschaffen worden, die in dem Maße bisher nur von KEHLER und GERWING (2004) für die ersten sechs Wochen nach einer FKP beschrieben wurde.

Tabelle 26: Vergleich der Ex-vivo- mit der In-vivo-Studie, Betonboden. Die signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) sind fett gedruckt.

	Beton ex vivo	Beton in vivo	p-Wert
Belastungsfläche (cm²)	28,90 ± 4,95	45,18 ± 4,96	<0,001
durchschnittlicher Druck (N/cm²)	49,99 ± 9,13	39,39 ± 7,96	0,038
Maximaldruck (N/cm²)	151,67 ± 43,77	128,55 ± 21,29	0,314

Die belastete Fläche war auf Betonboden im In-vivo-Versuch signifikant größer als im Ex-vivo-Versuch. Da dieselben Betonplatten verwendet wurden und die modifizierte Klauenpflege ein bis zwei Tage vor der Druckmessung stattgefunden hatte, kann über die Gründe nur spekuliert werden. Möglicherweise ist die physiologische Aufstellung der isolierten Gliedmaße nicht in dem Maße gelungen, wie es das lebendige Tier vermag. Die laterale und die mediale Klaue wiesen im In-vivo-Versuch fast identische Belastungsflächen auf (*Tabelle 14*), die Kraftverteilung war jedoch auf Betonboden nicht ausgeglichen. Das führt zu einer vermehrten Belastung der lateralen Klaue, was sich in der Häufigkeit von Läsionen wie Hämorrhagien, Sohlengeschwüren und Weiße-Linie-Defekten widerspiegelt (TOUSSAINT-RAVEN 1985b, BENZ 2002, VANEGAS et al. 2006, CHESTERTON et al. 2008, OUWELTJES et al. 2011).

Auch der durchschnittliche Druck wies einen signifikanten Unterschied zwischen Ex- und In-vivo-Versuch auf ($p = 0,038$). Die Differenz des Maximaldruckes war ebenfalls groß, wenn auch keine Signifikanz nachgewiesen wurde. Auch hier haben wahrscheinlich die Art der Befestigung der Klaue und die strikt senkrechte Justierung des Tarsus auf dem unnachgiebigen Boden einen so großen Einfluss, dass selbst geringe Unterschiede in der Ausrichtung oder Unebenheiten des Betonbodens verhältnismäßig große Effekte in der Belastungssituation hervorrufen.

Tabelle 27: Vergleich der Ex-vivo- mit der In-vivo-Studie, KURA P. Die signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) sind fett gedruckt.

	KURA ex vivo	KURA in vivo	p-Wert
Belastungsfläche (cm²)	44,26 ± 6,16	60,57 ± 8,64	0,003
durchschnittlicher Druck (N/cm²)	32,53 ± 4,13	28,23 ± 3,16	0,074
Maximaldruck (N/cm²)	90,44 ± 23,24	75,16 ± 12,16	0,092

Auf der Gummimatte KURA P wies die Belastungsfläche ebenfalls einen signifikanten Unterschied auf, der durchschnittliche und maximale Druck waren statistisch nicht signifikant unterschiedlich.

Im folgenden Abschnitt wird der hier beschriebene In-vivo-Versuch mit dem statischen In-vivo-Versuch von OEHME (2018a) und mit der vorhandenen Literatur verglichen.

Tabelle 28: Vergleich der Kraftverteilung bei funktionell (OEHME 2018) und modifiziert gepflegten Klauen auf Betonboden und KURA P

Last auf lateraler Klaue	Oehme (FKP)	Munzel (Mod. KP)
Beton	68,75 %	61,09 %
KURA P	66,67 %	52,15 %

Der Vergleich der mit identischem Aufbau durchgeführten Versuche von FKP und modifizierter KP zeigte für letztere auf beiden getesteten Böden eine ausgeglichene **Kraftverteilung**. Eine Begründung dafür kann der größere zeitliche Abstand der FKP zur Messung (2 Wochen) sein, was den gewichtsausgleichenden Effekt an frisch gepflegten Klauen verringern könnte. Allerdings konnten KEHLER und GERWING (2004) eine konstante Kraftverteilung bis zu sechs Wochen nach FKP nachweisen. Die modifizierte KP wurde ein bis zwei Tage vor der Messung durchgeführt. VAN DER TOL et al. (2004b) stellten in In-vivo-Versuchen nach Durchführung einer FKP eine Lastaufnahme von 70 % auf der lateralen Hinterklaue fest, GERWING (2003) von 58 % und TELEZHENKO et al. (2008) in unterschiedlichen Teilversuchen 56-65 %. Alle zitierten Versuche wurden auf Kraftmessplatten mit unnachgiebiger Oberfläche durchgeführt, weshalb hier lediglich der Vergleich zu den ermittelten Werten auf Betonboden sinnvoll ist. In einem weiteren In-vivo-Versuch von OEHME (2019), bei dem jede Einzelklaue mit einem Sensor ausgestattet war, trug die laterale Klaue auf Betonboden 57,3 % der Last, auf der Gummimatte KURA P 60,5 %.

Tabelle 29: Vergleich von Belastungsfläche, durchschnittlichem und maximalem Druck bei funktionell (OEHME 2018) und modifiziert gepflegten Klauen auf Betonboden

Beton	FKP (Oehme 2018)	Mod. KP
Belastungsfläche (cm ²)	50,15 ± 8,41	45,18 ± 4,96
durchschnittlicher Druck (N/cm ²)	32,05 ± 4,56	39,39 ± 7,96
Maximaldruck (N/cm ²)	92,12 ± 8,83	128,55 ± 21,29

Auf Betonboden war die **Belastungsfläche** der modifiziert gepflegten Klauen aufgrund des Traggrands kleiner als bei den funktionell gepflegten. Das führte zu höheren durchschnittlichen und maximalen Drücken, analog zu den Ex-vivo-Versuchen (Kap. 5.2.1).

Diskussion

TELEZHENKO et al. (2008) und BERGSTEN et al. (2015) ermittelten im Vergleich zu dem vorliegenden Versuch kleinere Belastungsflächen von **35,7 cm²** bzw. **32,6 cm²**. Andere Autoren maßen in statischen In-vivo-Versuchen mit unterschiedlichen zeitlichen Abständen zu einer FKP deutlich größere Belastungsflächen (GERWING 2003, VAN DER TOL et al. 2004b, FISCHER 2006). Auch mit einigen Wochen Abstand zur FKP sind die belasteten Flächen mit den im vorliegenden Versuch ermittelten vergleichbar:

- 4 Monate nach FKP: **49 cm²** (GERWING 2003)
- 2 Wochen nach FKP: **53 cm²** (GERWING 2003)
- 2 Wochen nach FKP: **40 cm²** (VAN DER TOL et al. 2004b)
- 2 Tage nach FKP: **51 cm²** (FISCHER 2006)
- 1 Tag nach FKP: **41 cm²** (BRUDERER 2015)

Die dennoch erkennbaren Unterschiede in der belasteten Fläche zwischen den einzelnen Studien lassen sich unter anderem mit dem zeitlichen Abstand der Messungen zur FKP erklären. Vor allem auf abrasiven Böden ist die Hohlkehlung oft nach kurzer Zeit durch Hornnachschiebung und oberflächlichen Abrieb des umliegenden Sohlenhorns „abgelaufen“ und die Sohlenfläche ist größer als direkt nach der FKP (GERWING 2003, FISCHER 2006). Auch die individuelle Klaue hat einen nicht zu vernachlässigenden Effekt und es sind Versuche mit sehr großen Tierzahlen notwendig, um diese tierindividuellen Unterschiede auszugleichen (FRANCK und BELIE 2006). Es wurden auch unterschiedliche Rinderrassen verwendet, z.B. Swedish Holstein (TELEZHENKO et al. 2008), Swedish Red, Swedish Holstein und Kreuzungen (BERGSTEN et al. 2015), Holstein Friesian (VAN DER TOL et al. 2004b) oder Schweizer Braunvieh (BRUDERER 2015).

Die von anderen Autoren festgestellten **mittleren Drücke** sind ebenfalls mit den in *Tabelle 29* aufgeführten vergleichbar:

- 5 Monate nach FKP: **39,8 N/cm²** (TELEZHENKO et al. 2008)
- 5 Monate nach FKP: **35,7 N/cm²** (BERGSTEN et al. 2015)
- 4 Monate nach FKP: **28,1 N/cm²** (GERWING 2003)
- 2 Tage nach FKP: **23,4 N/cm²** (FISCHER 2006)
- 1 Tag nach FKP: **31,6 N/cm²** (BRUDERER 2015)

Einzig VAN DER TOL et al. (2004b) weichen mit einem gemessenen mittleren Druck von **50 N/cm²** 2 Wochen nach FKP deutlich von den oben zitierten Autoren ab, was sich mit der geringen Belastungsfläche von nur 40 cm² erklären lässt. Die Unterschiede zwischen den zitierten Studien lassen sich ebenfalls auf die verwendeten Rinderrassen, den zeitlichen Abstand zur Klauenpflege und damit einhergehende Variationen in der Belastungsfläche sowie auf Unterschiede im Versuchsaufbau zurückführen. Einige Autoren erfassten die Werte,

indem die Tiere direkt auf der Druckmessplatte standen (GERWING 2003, VAN DER TOL et al. 2004b, FISCHER 2006, BRUDERER 2015), andere benutzten dünne Sensorfolien auf Kraftmessplatten, die zum Schutz mit einer 1-5 mm dicken Neoprenfolie beklebt waren (TELEZHENKO et al. 2008, BERGSTEN et al. 2015). Dies kann zu geringen Unterschieden sowohl der belasteten Fläche als auch des durchschnittlichen Druckes führen. VAN DER TOL et al. (2004b) und BERGSTEN et al. (2015) ermittelten **Maximaldrücke** von **89,0 N/cm²** bzw. **99,3 N/cm²**, BRUDERER (2015) stellte an den Hintergliedmaßen von Braunviehkühen auf hartem Untergrund einen maximalen Druck von **110,8 N/cm²** fest.

Das durchschnittliche Gewicht der von ihr verwendeten Braunvieh-Kühe betrug 641 kg, im vorliegenden In-vivo-Versuch wogen die HF-Kühe durchschnittlich 785 kg. Der im vorliegenden Versuch ermittelte höhere Maximaldruck von 128 N/cm² lässt sich mit dem höheren Gewicht der Tiere und mit dem Tragrand erklären, durch den die lastaufnehmende Fläche verkleinert wird. Dies ist aufgrund der anatomischen und histologischen Beschaffenheit des Horns im Tragrandbereich keinesfalls von Nachteil für das Tier, da die durch das Körpergewicht auf das Klauenbein entstehende Druckkraft im Klauenbeinträger in Zugkraft umgewandelt wird. Diese Zugkraft lastet nach erneuter Umwandlung in Druckkraft auf dem Tragrand und der Bodenfläche der Klaue. Gekammerte Fettpolster dienen als zusätzlicher Stoßdämpfer (MÜLLING 1993, BAGGOTT et al. 1988, MAIERL und MÜLLING 2004, BUDRAS und WÜNSCHE 2011).

Der folgende Abschnitt widmet sich dem Vergleich der modifizierten Klauenpflege mit der FKP auf der Gummimatte **KURA P**.

Tabelle 30: Vergleich von Belastungsfläche, durchschnittlichem und maximalem Druck bei funktionell (OEHME 2018) und modifiziert gepflegten Klauen auf KURA P

KURA P	FKP (OEHME 2018a)	Mod. KP
Belastungsfläche (cm²)	68,98 ± 12,79	60,57 ± 8,64
durchschnittlicher Druck (N/cm²)	25,51 ± 2,67	28,23 ± 3,16
Maximaldruck (N/cm²)	65,52 ± 10,90	75,16 ± 12,16

Auf der Gummimatte KURA P sind die gleichen Trends wie auf Betonboden zu beobachten: Der Tragrand der modifiziert gepflegten Klauen führt zu einer kleineren belasteten Fläche und höheren Drücken. Der durchschnittliche und maximale Druck liegen jedoch auf KURA P deutlich unter den Werten des Betonbodens, was für eine biomechanisch günstigere Belastungssituation spricht.

Unter einer Gummimatte vom Typ KURA betrug der durchschnittliche Druck bei BRUDERER (2015) nur **10,1 N/cm²**, was unter anderem mit der Noppenstruktur der Mattenunterseite erklärt wird. Die verwendeten Messinstrumente (Kraft- und

Druckmessplatte) befanden sich *unter* der Gummimatte, und die Noppen drückten sich durch das Gewicht der Kühe komplett durch, so dass eine gleichmäßige Messfläche entstand. Das könnte auch die von ihr ermittelte belastete Fläche von **122 cm²** unter den Hinterklauen erklären, die die Werte aller anderer hier zitierter Autoren übertrifft. Da das Messsystem im vorliegenden Versuch *über* der Gummimatte lag, sind die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar (Tabelle 30). Im selben Versuchsaufbau stellte BRUDERER (2015) einen Maximaldruck von **62,2 N/cm²** fest. In dem dynamischen In-vivo-Versuch von OEHME et al. (2019), in dem die laterale und die mediale Klaue mit einem Einzelsensor ausgestattet waren, betrug die belastete Fläche **77,83 cm²**, der durchschnittliche Druck **30,8 N/cm²** (laterale Klaue) bzw. **25,2 N/cm²** (mediale Klaue). Der Maximaldruck lag bei **68,9 N/cm²**. Auch diese Werte entsprechen in ihrer Größenordnung denen der modifizierten Klauenpflege.

5.2.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Die hier vorgestellte Modifizierung der funktionellen Klauenpflege zeigt im Hinblick auf Belastungsfläche, durchschnittlichen und maximalen Druck biomechanische Vorteile für den Klauenmechanismus. Die belastete Fläche ist zwar kleiner als bei der herkömmlichen Pflegemethode, belastet wird aber der Tragrand der Klaue, der aufgrund seiner anatomischen und histologischen Eigenschaften das eigentliche lastaufnehmende Element an der Rinderklaue ist bzw. sein sollte (SCHMID et al. 2009a, SCOTT 1988, SHEARER und VAN AMSTEL 2001, BLOWEY 2015c). Die resultierenden Druckbelastungen sind aufgrund der kleineren Fläche höher als bei funktionell gepflegten Klauen, aber aufgrund ihrer Lokalisation weniger schädigend für die Lederhaut. Die erste Hypothese kann angenommen werden.

Der etwas höhere Zeitaufwand, den die funktionelle Klauenpflege beansprucht, ist kritisch zu diskutieren. Sowohl für das Tier, welches im Klauenstand fixiert wird, als auch für die Person, die die Klauenpflege durchführt, ist eine möglichst effektive und schnelle Vorgehensweise vorteilhaft. Hier müssten Abläufe im Sinne des Tierwohls weiter optimiert werden, beispielsweise durch den Einsatz alternativer Werkzeuge, wie des „Electric Hoof Knife“ (BOSS TOOLS, Tallahassee, USA) (pers. Mitteilung Dr. K. Wilhelm, Plauen).

Die Verwendung von Gummimatten führt zu größeren Belastungsflächen, reduzierten durchschnittlichen und maximalen Drücken und folglich zu einer Entlastung der Klauen. Die zweite Hypothese kann ebenfalls angenommen werden.

Aufgrund dieser für die Biomechanik der Klaue vorteilhaften Eigenschaften sind Gummimatten harten Untergründen wie Beton oder Gussasphalt vorzuziehen. Deren abrasive Eigenschaften würden innerhalb kurzer Zeit zur Abnutzung des Tragrandes führen. Ein im Rahmen des ProKlaue-Projektes durchgeführter In-vivo-Versuch in einem Milchviehstall zeigte dies (pers. Mitteilung Dr. K. Wilhelm, Plauen). Die modifizierte Klauenpflege ist idealerweise bei Kühen anzuwenden, die auf Gummimatten gehalten werden. Auch auf diesen weniger

abrasiven Untergründen ist die Lebensdauer des Tragrandes begrenzt. Eine Durchführung der modifizierten Klauenpflege zu Beginn der Trockenstehphase könnte vorteilhaft sein, um in der stoffwechselbelasteten Transitphase eine größtmögliche Entlastung der empfindlichen Klauenbereiche zu gewährleisten.

Die modifizierte Klauenpflegemethode zeigt sowohl im Ex-vivo – In-vivo-Vergleich als auch im Vergleich mit der FKP nachvollziehbare Ergebnisse. Diese sind, unter Berücksichtigung der modifizierten Klauenpflegemethode, mit Ex- und In-vivo-Studien anderer Autoren vergleichbar. Die dritte Hypothese kann angenommen werden.

Die Verwendung des Belastungsgerätes und der flexiblen Druckmessfolien (Hoof™ System, Tekscan© Inc) bieten ideale Bedingungen, um alternative Klauenpflegemethoden oder Stallbodenbeläge zunächst ex-vivo zu evaluieren, bevor sie unter Realbedingungen getestet werden.

1. Die modifizierte Klauenpflege unterstützt die physiologische Kraftverteilung unter der Klaue vorteilhafter als die FKP, da die vertikale Bodenreaktionskraft vermehrt auf dem Wandhorn und dem Ballen lastet. Beides sind Bereiche der Klaue, die durch den Klauenbeinträger (Wand) und die druckverteilenden digitalen Fettpolster (Ballen) für Druckaufnahme- und -verteilung gut geeignet sind.
2. Die Verwendung von Gummimatten führt zu einer biomechanisch und anatomisch vorteilhaften Druckverteilung und Reduzierung von lokalen potentiell gewebeschädigenden Druckspitzen.
3. Der Ex-vivo-Versuch liefert im Hinblick auf Belastungsfläche, Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue, durchschnittlichem und maximalem Druck Ergebnisse, die denen am lebenden Tier entsprechen.

Die weit verbreitete FKP und alternative Methoden sind bisher nur sehr begrenzt wissenschaftlich untersucht worden. Die Evidenz für ihren Einsatz in der aktuell praktizierten Weise ist sehr gering. Hier besteht eindeutig Forschungsbedarf. Einerseits muss die FKP mit objektiven standardisierten Messverfahren überprüft werden, andererseits müssen aber auch modifizierte Techniken, die sich an der Anatomie und Biomechanik der Klaue orientieren, entwickelt und wissenschaftlich geprüft werden. Damit liefern die in dieser Arbeit validierte Messsensorik und die Ergebnisse einen wichtigen Beitrag in diesem Forschungskontext. Weiterführende Untersuchungen mit mobiler Messsensorik am lebenden Tier im Stall sind aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit und der Arbeiten von (OEHME 2018a) und (OEHME et al. 2019) dringend erforderlich.

6 Zusammenfassung

Juliane Munzel

Ex-vivo- und In-vivo-Evaluierung einer modifizierten Klauenpflege auf unterschiedlichen Böden bei Milchkühen

Veterinär-Anatomisches Institut der Veterinärmedizinischen Fakultät, Universität Leipzig

Eingereicht im Februar 2020

(75 Seiten, 31 Abbildungen, 30 Tabellen, 199 Literaturangaben, 2 Seiten Anhang)

Schlüsselwörter: Rinderklaue, Druckverteilung, Klauenpflege, Beton, Gummiböden

Einleitung: Die Haltung von Milchkühen in Laufställen mit Beton- oder Gussasphaltpöden ist in der modernen Milchproduktion üblich, trägt aber wesentlich zur Entstehung von Klauenschäden und durch diese verursachte Klauenschäden und durch diese verursachte Lahmheit bei. Diese stellen ein bedeutendes tierschutzrechtliches, aber auch ökonomisches Problem dar. Auch eine mindestens alle 6 Monate erfolgende präventive Klauenpflege gehört zu den Routinetätigkeiten – hier wird seit den 1980er Jahren eine in den Niederlanden entwickelte Methode angewandt, die sogenannte „funktionelle Klauenpflege“. Mit flexiblen Sensorfolien als mobiles Messsystem ist der direkte kinetische Einfluss des Bodenbelags und der Klauenpflegemethode auf die Klaue darstellbar.

Ziele der Untersuchung: Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Evaluierung einer modifizierten Klauenpflegemethode mittels Auswertung von Druckbildern auf unterschiedlichen Bodenmaterialien. Um die Übertragbarkeit des Versuchsaufbaus auf das lebende Tier zu überprüfen, wurden ein Ex-vivo-, sowie ein In-vivo-Versuch durchgeführt.

Tiere, Material und Methoden: Eine modifizierte Klauenpflegemethode, die die Form einer Weideklaue mit überstehendem Tragrand imitiert, wurde an 11 isolierten linken Hintergliedmaßen von Milchkühen und an 10 linken Hintergliedmaßen von lebenden Milchkühen angewendet (Tierversuchsgenehmigung 44/15). Die isolierten Gliedmaßen wurden in einem Belastungsgerät mit ca. 150 kg belastet und das Druckverteilungsmuster mittels flexibler Druckmessfolien (Hoof™System, Tekscan©) aufgezeichnet. Die Druckbilder wurden im Ex-vivo-Versuch auf Betonboden und drei Gummimatten (KARERA P, KURA P und profiKURA P; Gummiwerk KRAIBURG Elastik GmbH & Co. KG) erzeugt. Im In-vivo-Versuch wurden dieselben Druckmessfolien auf Betonboden und der Gummimatte KURA P verwendet. Die belastete Fläche, durchschnittlicher und maximaler Druck sowie die Kraftverteilung zwischen lateraler und medialer Klaue wurden ausgewertet. Im Ex-vivo-Versuch wurde zusätzlich eine Unterteilung der Sohlenfläche in fünf Zonen unternommen und die belastete

Zusammenfassung

Fläche relativ zur Gesamtfläche der Einzelklaue (A_{zone}), die Kraft relativ zur Gesamtkraft der Einzelklaue (F_{zone}) und der durchschnittliche Druck relativ zur belasteten Fläche (P_{zone}) für jede Zone einzeln ausgewertet. Die statistische Auswertung erfolgte mittels Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test und Post-hoc-Korrektur nach Bonferroni-Holm. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0,05$ festgelegt.

Ergebnisse: Die Kraftverteilung zeigte im Ex-vivo-Versuch eine Mehrbelastung der lateralen Klaue. Sie trug auf Betonboden 69 % der Last, auf den Gummimatten 66-68 %. Die Belastungsflächen unterschieden sich im Ex-vivo-Versuch auf allen vier Böden signifikant, auf Betonboden war die Fläche am kleinsten ($28,90 \pm 4,84 \text{ cm}^2$, dazu im Vergleich die Gummimatten: $42,87 \pm 4,83 \text{ cm}^2$ bis $48,84 \pm 5,61 \text{ cm}^2$). Der durchschnittliche Druck war auf den Gummiböden niedriger als auf Beton, signifikant unterschied sich der Betonboden ($44,99 \pm 8,90 \text{ N/cm}^2$) von allen drei Gummimatten ($28,96 \pm 3,04 \text{ N/cm}^2$ bis $32,99 \pm 4,58 \text{ N/cm}^2$). Der Maximaldruck unterschied sich auf allen vier getesteten Böden signifikant ($151,67 \pm 42,29 \text{ N/cm}^2$ auf Beton; $71,9 \pm 19,59 \text{ N/cm}^2$ bis $87,23 \pm 22,10 \text{ N/cm}^2$ auf den Gummimatten). Die zonenbezogene Auswertung des Ex-vivo-Versuches zeigte, dass die Druckspitzen an der lateralen Klaue größtenteils auf dem Ballen und dem lateralen Tragrand, an der medialen Klaue vor allem auf dem Ballen lokalisiert waren. Für die Parameter A_{zone} , F_{zone} und P_{zone} wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Untergründen festgestellt. Nach Berechnung des Mittelwertes aller Untergründe für F_{zone} traten signifikante Unterschiede zwischen den Zonen auf.

Im In-vivo-Versuch war die Kraftverteilung auf der Gummimatte KURA P fast ausgeglichen (52 % Last auf der lateralen Klaue), auf Betonboden trug die laterale Klaue 61 % der Last. Die belastete Fläche unterschied sich zwischen Betonboden und KURA P signifikant ($45,18 \pm 4,96 \text{ cm}^2$ bzw. $60,57 \pm 8,64 \text{ cm}^2$). Der durchschnittliche Druck betrug auf Beton $39,39 \pm 7,96 \text{ N/cm}^2$ und auf KURA P $28,23 \pm 3,16 \text{ N/cm}^2$. $128,55 \pm 21,29 \text{ N/cm}^2$ betrug der maximale Druck auf Betonboden, $75,16 \pm 12,16 \text{ N/cm}^2$ auf KURA P. Für den durchschnittlichen wie auch für den Maximaldruck liegen signifikante Unterschiede zwischen den Böden vor.

Schlussfolgerungen: Die Modifizierung der funktionellen Klauenpflege ist einfach anzuwenden und bietet dem Klauenmechanismus in Hinblick auf die untersuchten Parameter biomechanische Vorteile. Im Vergleich zu funktionell gepflegten Klauen ist die belastete Fläche kleiner und somit die Druckbelastung höher, diese liegt aber in hohem Maße auf dem Tragrand. Das Hoof™ System ist sowohl ex vivo als auch in vivo anwendbar und ermöglicht einen nachvollziehbaren Vergleich der beiden Versuche. Die Verwendung von Gummimatten entlastet die Klaue durch die Reduzierung von Druckspitzen, welche zur Entstehung von mechanisch-traumatischen Klauenläsionen beitragen.

7 Summary

Juliane Munzel

Ex-vivo- and in-vivo-evaluation of a modified claw trimming method in dairy cows on different floorings

Institute of Anatomy, Histology and Embryology at the Faculty of Veterinary Medicine, Leipzig University

Submitted in Feb. 2020

(75 pages, 31 figures, 30 tables, 199 references, 2 pages appendix)

Key words: bovine claw, dairy cattle, pressure distribution, claw trimming, concrete flooring, rubber flooring

Introduction: In modern dairy farming, cows are usually kept in free stall barns on concrete or mastic asphalt flooring, which is a major factor in the development of claw lesions and subsequent lameness. Lameness is an important concern regarding animal welfare as well as economics in modern dairy farming. Preventive claw trimming twice a year has become a routine work since the 1980s; the “Dutch method” of functional claw trimming with a variety of modifications is the predominant method worldwide. The use of flexible pressure sensor foils enables the evaluation of the direct kinetic impact of the stable flooring and the claw trimming method on the claw itself.

Aims of the study: The aim of this study was the development and evaluation of a modified claw trimming method by analysis of pressure distribution images on different floorings. To verify the transferability to live animals, an ex vivo as well as an in vivo trial were carried out.

Materials and Methods: A modified claw trimming method, which imitates a “pasture claw” with a protruding bearing edge, was carried out on 11 isolated distal hindlimbs of dairy cows and on 10 hindlimbs of live dairy cows. The isolated hind limbs were loaded with 150 kg in a load applicator and the pressure distribution patterns were recorded using flexible sensor foils (Hoof™System, Tekscan©). In the ex vivo trial, the pressure images were recorded on concrete flooring and three different rubber mats (KARERA P, KURA P und profiKURA P; Gummiwerk KRAIBURG Elastik GmbH & Co. KG). In the in vivo trial, the same sensor foils were used on concrete flooring and the rubber mat KURA P. The analysed parameters were contact area, mean and maximum pressure and the pressure distribution between lateral and medial claw. In the ex vivo trial, the sole was subdivided into 5 zones and the loaded area relative to the size of the single claw (A_{zone}), the force relative to the force of the single claw (F_{zone}) and the

Summary

mean pressure relative to the loaded area (P_{zone}) were analysed for each zone. The statistical analysis was carried out using the Wilcoxon signed-rank test combined with Holm-Bonferroni post hoc correction. The significance level was set to 5 %.

Results: In the ex vivo trial, the pressure distribution showed an additional load on the lateral claw. It carried 69 % of the load on concrete flooring and 66-68 % on the 3 rubber floorings. The loaded area differed significantly between all tested floorings, it was smallest on concrete flooring ($28.90 \pm 4.84 \text{ cm}^2$, compared to $42.87 \pm 4.83 \text{ cm}^2$ to $48.84 \pm 5.61 \text{ cm}^2$ on the rubber floorings). The mean pressure was lower on the rubber floorings than on concrete, the latter differed significantly from the three tested rubber floorings ($44.99 \pm 8.90 \text{ N/cm}^2$ on concrete compared to $28.96 \pm 3.04 \text{ N/cm}^2$ – $32.99 \pm 4.58 \text{ N/cm}^2$ on rubber flooring). The maximum pressure differed significantly on all of the four tested floorings ($151.67 \pm 42.29 \text{ N/cm}^2$ on concrete; $71.9 \pm 19.59 \text{ N/cm}^2$ – $87.23 \pm 22.10 \text{ N/cm}^2$ on rubber flooring). The analysis of the five zones showed that most of the maximum pressures in the lateral claw were localised at the bulb and the lateral bearing edge. In the medial claw the maximum pressures were mostly located at the bulb. No significant differences were detected for the parameters A_{zone} , F_{zone} und P_{zone} between the floorings. After calculating the mean value of all floorings for F_{zone} , significant differences between the zones occurred.

In the in vivo trial, the pressure distribution was nearly balanced on KURA P (52 % of the load on the lateral claw), on concrete flooring the lateral claw carried 61 % of the load. The loaded area differed significantly between concrete and rubber flooring ($45.18 \pm 4.96 \text{ cm}^2$ vs. $60.57 \pm 8.64 \text{ cm}^2$). The mean pressure was $39.39 \pm 7.96 \text{ N/cm}^2$ on concrete and $28.23 \pm 3.16 \text{ N/cm}^2$ on the rubber mat KURA P. The values for the maximum pressure were $128.55 \pm 21.29 \text{ N/cm}^2$ on concrete and $75.16 \pm 12.16 \text{ N/cm}^2$ on KURA P. For mean as well as for maximum pressure the differences between the floorings were significant.

Conclusions: The modified claw trimming method is easily applicable and provides biomechanical benefits for the claw mechanism with regard to the tested parameters. Compared to functionally trimmed claws ("dutch method"), the loaded area is smaller and the load therefore higher, but the localisation of the pressure is mostly on the bearing edge. The Hoof™System is applicable in ex vivo as well as in in vivo trials and allows a verifiable comparison of both trials. The use of rubber mats relieves the claw by reducing peak pressures, which contribute to the development of mechanical and traumatic lesions.

8 Literaturverzeichnis

- Al Naem M. Untersuchungen zur Hufrehe bei Pferden mit Hilfe des HufScan®-Systems [Dissertation med. vet.]. Gießen: Justus-Liebig-Universität; 2014.
- Alsaad M, Huber S, Beer G, Kohler P, Schüpbach-Regula G, Steiner A. Locomotion characteristics of dairy cows walking on pasture and the effect of artificial flooring systems on locomotion comfort. *J Dairy Sci* 2017; 100(10):8330–7.
- Alsleben B. Analyse der Zusammenhänge zwischen der Entwicklung von Körper- und Klauenmerkmalen sowie der Druckverteilung unter den Klauen bei Jungrindern der Rassen Deutsche Holsteins und Deutsches Braunvieh [Dissertation med. vet.]. Hannover: Tierärztliche Hochschule Hannover; 2002.
- Alsleben B, Russke A, Wrede J, Hamann H, Distl O. Messung der Druckverteilung unter den Klauen bei Rindern der Rasse Deutsche Holsteins in den ersten zwei Lebensjahren. *Prakt Tierarzt* 2003; 84(3):232–40.
- Anker M. Die Fußkrankheiten der Pferde und des Rindviehes: Ihre Erkenntnis, Ursachen, Heilung und Verhütung. Band 1. Bern, Zürich: Stämpflische Verlagshandlung, Bern, Zürich; 1854. URL: <http://viewer.tiho-hannover.de/viewer/image/PPN655946543/12/#head>.
- Archer SC, Newsome R, Dibble H, Sturrock CJ, Chagunda MGG, Mason CS et al. Claw length recommendations for dairy cow foot trimming. *Vet Rec* 2015; 177(9):222.
- Baggott DG, Bunch KJ, Gill KR. Variations in some inorganic components and physical properties of claw keratin associated with claw disease in the British Friesian cow. *Br Vet J* 1988; 144(6):534–42.
- Baumgartner CH. Untersuchung über Klauenmaße als Hilfsmerkmale für die Selektion auf Klauengesundheit an Töchtergruppen von Deutschen Fleckviehbullen. [Dissertation med. vet.]. München: LMU München; 1988.
- Belitz W. Wiederkäuer und ihre Krankheiten im Altertum [Dissertation med. vet.]. Berlin: Tierärztliche Hochschule; 1925.
- Bendel J. Auswirkungen von elastischen Bodenbelägen auf das Verhalten von Milchrindern im Laufstall. [Dissertation med. vet.]. München: LMU München; 2005.
- Benz B. Elastische Beläge für Betonspaltenböden in Liegeboxenlaufställen [Dissertation agr.]. Hohenheim: Universität Hohenheim; 2002.
- Bergsten C. Effects of conformation and management system on hoof and leg diseases and lameness in dairy cows. *Vet Clin North Am Food Anim Pract* 2001; 17(1):1–23.

Literaturverzeichnis

- Bergsten C, Telezhenko E, Ventorp M. Influence of Soft or Hard Floors before and after First Calving on Dairy Heifer Locomotion, Claw and Leg Health. *Animals* (Basel 2015; 5(3):662–86.
- Betts RP, Franks CI, Duckworth T, Burke J. Static and dynamic foot-pressure measurements in clinical orthopaedics. *Med Biol Eng Comput* 1980; 18(5):674.
- BLOWEY. Cattle Lameness and Hoofcare: An Illustrated Guide (3rd Edition). Portland: 5m Publishing; 2015a. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5389604>.
- Blowey R. Hoof Trimming. In: Blowey RW, Hrsg. Cattle Lameness and Hoofcare: An Illustrated Guide (3rd Edition). Portland: 5m Publishing 2015b. p. 40–53.
- Blowey R. Weight bearing surfaces and hoof overgrowth. In: Blowey RW, Hrsg. Cattle Lameness and Hoofcare: An Illustrated Guide (3rd Edition). Portland: 5m Publishing 2015c. p. 29–39.
- Blowey R. Claw Trimming - how should it be done?: A comparison of two approaches. In: Shearer JK, Shearer LC, Hrsg. Proceedings of the 12th International Symposium on Lameness in Ruminants 2002. p. 122–126.
- Blowey R, Inman B. The relevance of changes in pedal bone and hoof dimensions in relation to foot trimming protocols. In: Beggs DS, Hrsg. Proceedings of the XXVIII World Buiatrics Congress: oral communication and poster abstracts. Eight Mile Plains: Australian Cattle Veterinarians 2014. p. 25–26.
- Blowey R, Inman B. Is there a case for reassessing hoof-trimming protocols? *Vet Rec* 2012; 171(23):592–3.
- Blowey R, Inman B. Pedal Bone dimensions in relation to hoof trimming protocols. In: Whay B, Hockenhull J, Hrsg. Proceedings of the 17th International Symposium and 9th International Conference on Lameness in Ruminants 2013. p. 25–26.
- Bruderer A. Klauenbelastung von Jungrindern und Kühen beim Stehen auf verschiedenen Gummimatten [Dissertation med. vet.]. Zürich: Vetsuisse-Fakultät Universität Zürich; 2015.
- Brunner W, Kurz B, Diebschlag W. Kapazitives Druckverteilungsmesssystem für hohe Meßstellendichte A Device for the Capacitive Measurement of Pressure Distribution with high Transducer Density. *Biomed Tech (Berl)* 1983; 28(10):221–4.
- Budras KD, Wünsche A. Atlas der Anatomie des Rindes: Lehrbuch für Tierärzte und Studierende. Mit Supplement Klinisch-funktionelle Anatomie. 1. Aufl. s.l.: Schlütersche; 2011. URL: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1793515>.

- BURGI. Foot-trimming practice must change, farmers told; 2014 01.07.2014 [zitiert am 07.08.2015]. URL: <http://www.fwi.co.uk/livestock/foot-trimming-practice-must-change-farmers-told.htm>.
- Burgi K. Adequacy of Trimming Procedures of Rear Feet Collected from a Slaughterhouse. In: Saloniemi H, Hrsg. Proceedings of the 15th International Symposium & 7th Conference on Lameness in Ruminants 2008a. p. 195.
- Burgi K. Three Adaptions to the Functional Trimming Method. In: Saloniemi H, Hrsg. Proceedings of the 15th International Symposium & 7th Conference on Lameness in Ruminants 2008b. p. 196.
- Bystron S. Functional claw trimming needs to be reconsidered in Holstein-Friesian cattle. Vet Rec; 2012.
- Carvalho V, Nääs IA, Bucklin RA, Shearer JK, Shearer L, Massafera Jr. V et al. Effects of trimming on dairy cattle hoof weight bearing surfaces and pressure distributions. Braz J Vet Res Anim Sci 2006; 43(4):518–25.
- Carvalho VRC, Bucklin RA, Shearer JK, Shearer L. Effects of Trimming on Dairy Cattle Hoof Weight Bearing and Pressure Distributions during the Stance Phase. Trans ASAE 2005; 48(4):1–7.
- Cha E, Hertl JA, Bar D, Gröhn YT. The cost of different types of lameness in dairy cows calculated by dynamic programming. Prev Vet Med 2010; 97(1):1–8.
- Chapinal N, Passille AM de, Rushen J. Weight distribution and gait in dairy cattle are affected by milking and late pregnancy. J Dairy Sci 2009; 92(2):581–8.
- Chesterton RN, Lawrence KE, Laven RA. A descriptive analysis of the foot lesions identified during veterinary treatment for lameness on dairy farms in north Taranaki. N Z Vet J 2008; 56(3):130–8.
- Chodera J. Examination methods of standing in man. Prag; 1957.
- Clemente CH. Klauenpflege beim Rind. 3., überarb. Aufl. Frankfurt (Main): DLG-Verl; 1995.
- De Belie N, Rombaut E. Characterisation of Claw–floor Contact Pressures for Standing Cattle and the Dependency on Concrete Roughness. Biosyst Eng 2003; 85(3):339–46.
- Dietz O, Prietz G. Klauenhornqualität - Klauenhornstatus. Mh. Vet.-Med. 1981(36):419–22.
- Dirksen G. Krankheiten im Bereich der Zehen. In: Dirksen G, Gründer H-D, Stöber M, Hrsg. Innere Medizin und Chirurgie des Rindes. 5. Aufl. Stuttgart: Parey 2006. p. 912–978.

Literaturverzeichnis

- Distl O, Krausslich H, Mair A, Spielmann C, Diebschlag W. Computer-assisted analysis of pressure distribution on cattle claws. *DTW. Dtsch. Tierärztl. Wochenschr.* 1990; 97(11):474–9.
- Doll K, Kehler W. Klauenkrankheiten: Vorbeugen ist besser als behandeln. *Die Milchpraxis* 1997; 35(1):12–5.
- Dyce KM, Sack WO, Wensing CJG. *Textbook of veterinary anatomy.* 4th ed. St. Louis, Mo: Saunders/Elsevier; 2010.
- Edmonson AJ, Lean IJ, Weaver LD, Farver T, Webster G. A Body Condition Scoring Chart for Holstein Dairy Cows. *J Dairy Sci* 1989; 72(1):68–78.
- Enting H, Kooij D, Dijkhuizen AA, Huirne RBM, Noordhuizen-Stassen EN. Economic losses due to clinical lameness in dairy cattle. *Livest Prod Sci* 1997; 49(3):259–67.
- Fessl L. Biometrische Untersuchungen der Bodenfläche der Rinderklauen und die Belastungsverteilung auf die Extremitätenpaare. *Zentralbl Veterinarmed A* 1968; 15(9):844–60.
- Fiedler A. Funktionelle Klauenpflege: Klauenpflege als Fundament der Therapie. *Prakt Tierarzt* 2006; 87(3):214–20.
- Fiedler A. Funktionelle Klauenpflege als Grundlage der tierärztlichen Diagnostik und Therapie. *Prakt Tierarzt* 2012; 93(Suppl. 1):26–36.
- Fiedler A, Maierl J, Nuss K. Funktionelle Klauenpflege. In: Fiedler A, Maierl J, Nuss K, Hrsg. *Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes: Schattauer* 2004. p. 44–62.
- Fiedler A, Nüske S, Maierl J. *Funktionelle Klauenpflege beim Rind.* München: BLV-Verl.-Ges; 2000.
- Fischer HA. *Das Klauenbeschneiden der Rinder.: Ein wichtiger Zweig der Klauenpflege.* 10. Aufl. Hannover: Schaper; 1949.
- Fischer L. *Analyse der Druckverteilung unter den Klauen bei Kühen der Rasse Deutsche Holsteins.* Hannover: [publisher not identified]; 2006.
- Flower FC, Passillé AM de, Weary DM, Sanderson DJ, Rushen J. Softer, Higher-Friction Flooring Improves Gait of Cows With and Without Sole Ulcers. *J Dairy Sci* 2007; 90(3):1235–42.
- Franck A, Belie N de. Concrete Floor–Bovine Claw Contact Pressures Related to Floor Roughness and Deformation of the Claw. *J Dairy Sci* 2006; 89(8):2952–64.

Literaturverzeichnis

- Frankena K, van Keulen KAS, Noordhuizen JP, Noordhuizen-Straasen EN, Gundelach J, Jong D-J de et al. A cross-sectional study into prevalence and risk indicators of digital haemorrhages in female dairy calves. *Prev Vet Med* 1992; 14(1-2):1–12.
- Geiger M. Untersuchung des Einflusses orthopädischer Beschlagsmodifikationen und Bodenbeschaffenheiten auf die Druckbelastung des Hufes und den Fußungsablauf sowie die Ausrichtung der distalen Zehenknochen des Pferdes [Dissertation med. vet.]. Leipzig: Universität Leipzig; 2019.
- Gerwing TH. Beeinflussung der Lastverteilung durch Klauenpflege innerhalb der Einzelklauen und der Klauenpaare der Hintergliedmaßen von schwarzbunten Milchkühen der Rasse Deutsche Holsteins [Dissertation med. vet.]. Hannover: Tierärztliche Hochschule Hannover; 2003.
- Geyer H. Äußere Haut, Integumentum commune: Klaue, Ungula, der Wiederkäuer. In: Salomon F-V, Geyer H, Gille U, Hrsg. *Anatomie für die Tiermedizin*. 3. Aufl. Stuttgart: Enke 2015. p. 670–675.
- Geyer H, Fürst A, Warzecha C. Anatomie der Rinderklaue. In: Lischer CJ, Hrsg. *Handbuch zu Pflege und Behandlung der Klauen beim Rind*. 2. Aufl. Berlin: Verlag Parey 2000. p. 13–30.
- GREENOUGH. Bovine laminitis and lameness: A hands-on approach. Edinburgh, New York: Saunders Elsevier; 2007. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780702027802>.
- GREENOUGH und WEAVER. *Lameness in cattle*. 3. ed. Philadelphia: Saunders; 1997.
- Günther M. *Klauenkrankheiten*. 5 Aufl. Jena: Fischer; 1991.
- Habacher F. *Hufschmied* 1920(35).
- Hagen J, Hüppler M, Häfner F, Geiger S, Mäder D. Modifying Horseshoes in the Mediolateral Plane: Effects of Side Wedge, Wide Branch, and Unilateral Roller Shoes on the Phalangeal Alignment, Pressure Forces, and the Footing Pattern. *J Equine Vet Sci* 2016; 37:77–85.
- Hahn MV, McDaniel BT, Wilk JC. Rates of hoof growth and wear in Holstein cattle. *J Dairy Sci* 1986; 69(8):2148–56.
- Haufe HC, Gygax L, Steiner B, Friedli K, Stauffacher M, Wechsler B. Influence of floor type in the walking area of cubicle housing systems on the behaviour of dairy cows. *Appl Anim Behav Sci* 2009; 116(1):21–7.
- Hilger J, Passarge U. *Jahresbericht 2017*. Niederwiesa: Sächsischer Landeskontrollverband e.V; 2018.
- Hinterhofer C, Zöscher M, Gabler C, Stanek C. The hardness of horn in different segments of the bovine claw. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr* 2005; 118(7-8):334–40.

Literaturverzeichnis

- Huber M. Untersuchungen über Klauenparameter an Jungbullen in den bayerischen Eigenleistungsprüfungsanstalten. [Dissertation med. vet.]. München: LMU München; 1983.
- Hultgren J, Bergsten C. Effects of a rubber-slatted flooring system on cleanliness and foot health in tied dairy cows. *Prev Vet Med* 2001; 52(1):75–89.
- Hüppler M, Häfner F, Geiger S, Mäder D, Hagen J. Modifying the Surface of Horseshoes: Effects of Eggbar, Heartbar, Open Toe, and Wide Toe Shoes on the Phalangeal Alignment, Pressure Distribution, and the Footing Pattern. *J Equine Vet Sci* 2016; 37:86–97.
- Hüppler M, Hagen J, Häfner FS, Geiger SM, Mäder D. Untersuchung der auf den Huf einwirkenden Druckkräfte und deren Beeinflussung durch verschiedene Bodenbeschaffenheiten. *Pferdeheilkunde* 2015; 31(5):426–34.
- Irps H. Results of Research Projects into Flooring Preferences of Cattle. In: Baxter SH, Baxter MR, MacCormack JAD, Hrsg. *Farm animal housing and welfare: A seminar in the CEC Programme of Coordination of Research on Animal Welfare* 1983. p. 200–215.
- Jantscher H, Kofler J, Altenbrunner-Martinek B, Schobesberger H, Haller J, Windischbauer G. Temperatureentwicklung an der Sohlenlederhaut des Rindes während der Klauenpflege mit dem Winkelschleifer unter Verwendung verschiedener Schleif- und Messerscheiben. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr* 2005; 118(7-8):280–9.
- Judy CE, Galuppo LD, Snyder JR, Willits NH. Evaluation of an in-shoe pressure measurement system in horses. *Am J Vet Res* 2001; 62(1):23–8.
- Jungbluth T, Benz B, Wandel H. Soft walking areas in loose housing systems for dairy cows. In: . *Fifth International Dairy Housing Conference for 2003*. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers 2003.
- Kehler W, Gerwing T. Effects of functional Claw Trimming on Pressure Distribution under hind Claws of german Holstein Cows. In: Zemljič B, Hrsg. *Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants* 2004. p. 7–8.
- Knörlein BJ, Baier DB, Gatesy SM, Laurence-Chasen JD, Brainerd EL. Validation of XMA Lab software for marker-based XROMM. *J Exp Biol* 2016; 219(Pt 23):3701–11.
- Kofler J. Measurement of the Temperature Development on the Corium of Bovine Claws during Claw Trimming using various Grinding Discs. In: Zemljič B, Hrsg. *Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants* 2004.
- Kofler J, Kübber P. Sonographische Messung der Sohlenhorndicke an der Rinderklaue. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr* 2000(113):81–7.

Literaturverzeichnis

Kofler J, Kübber P, Henninger W. Ultrasonographic imaging and thickness measurement of the sole horn and the underlying soft tissue layer in bovine claws. *Vet J* 1999; 157(3):322–31.

Kremer P, S. Nüske, A. Scholz, M. Förster. Influence of Different Floor Conditions on Claw Development, Metabolism and Milk Yield in Dairy Cows Housed in Stalls with Free Cow Traffic. In: Zemljič B, Hrsg. Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants 2004. p. 210–212.

Kümper H. Funktionelle/ othopädische Klauenpflege. In: Dirksen G, Gründer H-D, Stöber M, Hrsg. Innere Medizin und Chirurgie des Rindes. 5. Aufl. Stuttgart: Parey 2006. p. 978–981.

Kümper H. Gesunde Klauen im Laufstall durch vorbeugenden Klauenschnitt. *Milchpraxis* 2001; 39(1).

Lange C, Kattelans A, Rohn K, Lüpke M, Brüchner HP, Stadler P. Die kinetische Untersuchung der Fußung, der Belastung des Hufes und des Abrollvorganges an den Vordergliedmaßen von Pferden im Schritt und im Trab auf dem Laufband mit dem Hoof™-System (Tekscan©). *Pferdeheilkunde* 2012; 28(5):538–47.

Leach KA, Logue DN, Kempson SA, Offer JE, Ternent HE, Randall JM. Claw lesions in dairy cattle: development of sole and white line haemorrhages during the first lactation. *Vet J* 1997; 154(3):215–25.

Liang D, Arnold LM, Stowe CJ, Harmon RJ, Bewley JM. Estimating US dairy clinical disease costs with a stochastic simulation model. *J Dairy Sci* 2017; 100(2):1472–86.

Liebich HG, Maierl J, König HE. Vorder- oder Schultergliedmaßen (Membra thoracica). In: König HE, Liebich HG, Hrsg. Anatomie der Haussäugetiere. 6. Aufl.: Schattauer 2012. p. 149–220.

Lischer C. Behandlung häufiger Klauenkrankheiten. In: Lischer CJ, Hrsg. Handbuch zu Pflege und Behandlung der Klauen beim Rind. 2. Aufl. Berlin: Verlag Parey 2000a. p. 83–93.

Lischer C. Biomechanik. In: Lischer CJ, Hrsg. Handbuch zu Pflege und Behandlung der Klauen beim Rind. 2. Aufl. Berlin: Verlag Parey 2000b. p. 31–46.

Lischer C, Näf I. Technik der Klauenpflege. In: Lischer CJ, Hrsg. Handbuch zu Pflege und Behandlung der Klauen beim Rind. 2. Aufl. Berlin: Verlag Parey 2000. p. 63–72.

Livesey CT, Harrington T, Johnston AM, May SA, Metcalf JA. The effect of diet and housing on the development of sole haemorrhages, white line haemorrhages and heel erosions in Holstein heifers. *Anim Sci* 1998; 67(01):9–16.

Logue DN, Offer JE, Murray RD. Improving claw trimming in cattle: onwards from the Dutch Technique. *Vet J* 2006; 172(2):204–6.

- MacCallum A. A cell biological approach to studying lameness in the dairy cow [PhD thesis]. Glasgow: University of Glasgow; 1999.
- Maierl J, Böhmisch R. Funktionelle Anatomie der Rinderklaue: Grundlagenkenntnisse für eine fachmännische Klauenpflege. Tierarztl Prax Ausg G Grosstiere Nutztiere 2001(2:06):5–13.
- Maierl J, Mülling C. Funktionelle Anatomie. In: Fiedler A, Maierl J, Nuss K, Hrsg. Erkrankungen der Klauen und Zehen des Rindes: Schattauer 2004. p. 1–28.
- Mair A, Spielmann C, Diebschlag W, Kräusslich H, Graf F, Distl O. Druckverteilungsmessungen an der Sohlenfläche von Rinderklauen - grundlegende Untersuchungen mit einem neuartigen Messsystem. DTW. Dtsch. Tierarztl. Wochenschr. 1988(95):325–8.
- Manske T, Hultgren J, Bergsten C. The effect of claw trimming on the hoof health of Swedish dairy cattle. Prev Vet Med 2002; 54(2):113–29.
- Meyer SW, Weishaupt MA, Nuss KA. Gait pattern of heifers before and after claw trimming: a high-speed cinematographic study on a treadmill. J Dairy Sci 2007; 90(2):670–6.
- Muggli E, Sauter-Louis C, Braun U, Nuss K. Length asymmetry of the bovine digits. Vet J 2011; 188(3):295–300.
- Müller J, Lüchinger I, Nuss K. Claw loading in dairy cows with different hind-limb postures. In: Taguchi K, Hrsg. Proceedings of the 20th International Symposium and 12th International Conference on Lameness in Ruminants 2019. p. 114.
- Mülling C. Struktur, Verhornung und Hornqualität in Ballen, Sohle und weisser Linie der Rinderklaue und ihre Bedeutung für Klauenerkrankungen [Dissertation med. vet.]. Berlin: Freie Universität Berlin; 1993.
- Mülling C. Funktionelle Anatomie der Rinderklaue. In: Dirksen G, Gründer H-D, Stöber M, Hrsg. Innere Medizin und Chirurgie des Rindes. 5. Aufl. Stuttgart: Parey 2006. p. 914–920.
- Mülling C. Klaue (Ungula) der Paarzeher. In: König HE, Liebich HG, Hrsg. Anatomie der Haussäugetiere. 6. Aufl.: Schattauer 2012. p. 638–648.
- Mülling C, Greenough PR. Functional Synergism of the biomechanical Systems of the Bovine Claw. In: Acuña R, Hrsg. Proceedings of the 14th International Symposium and 6th Conference on Lameness in Ruminants 2006. p. 39–42.
- Mülling CKW, Budras K-D. Morphology of the dermo-epidermal junction of the bovine hoof with reference to its biological function. Wien Tierarztl Monatsschr 2002; 89(7):188–96.
- Munzel J, Oehme B, Geiger SM, Grund S, Röhrmann N, Weiß M et al. Evaluation Of A Modified Claw Trimming Method On Different Floors. In: Fiedler A, Schindhelm K, Hrsg.

Literaturverzeichnis

- Proceedings of the 19th International Symposium and 11th Conference Lameness in Ruminants 2017. p. 79–80.
- Murphy PA, Hannan J. Effects of slatted flooring on claw shape in intensively housed fattening beef cattle. *Bovine Pract* 1987; 22:133–5.
- Nacambo S, Hässig M, Lischer C, Nuss K. Difference in Length of the metacarpal and metatarsal Condyles in Calves and the Correlation to Claw Size. In: Zemljič B, Hrsg. Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants 2004. p. 8–10.
- Nickel R, Schummer A, Wille KH, Wilkens H. Passiver Bewegungsapparat, Skelettsystem: Knochenlehre, Osteologia. In: Frewein J, Wille KH, Wilkens H, Hrsg. Lehrbuch der Anatomie der Haustiere: Bewegungsapparat. 8. Aufl.: Parey 2003. p. 15–214.
- Nicol K, Henning EM. Time-dependent Method for Measuring Force Distribution Using a Flexible Mat as a Capacitator. In: Komi P, Hrsg. Biomechanics V-B, Baltimore, University Park Press 1976. p. 433–440.
- Nilsson C, Pålsson KH, Ventorp M. Pressure Distribution on Bovine Claws in Slatted Concrete Floors. In: . Proceedings of the XVI CIGR World Congress. Düsseldorf: VDI Verlag 2006. URL: https://www.researchgate.net/profile/Christer_Nilsson4/publication/268982642_Pressure_Distribution_on_Bovine_Claws_in_Slatted_Concrete_Floors/links/547cf2fd0cf27ed9786230b4.pdf.
- Nuss K, Lüchinger I, Müller J. Changes in claw loads during weight shifting in the hind limbs of dairy cows. In: Taguchi K, Hrsg. Proceedings of the 20th International Symposium and 12th International Conference on Lameness in Ruminants 2019. p. 113.
- Nuss K, Paulus N. Measurements of claw dimensions in cows before and after functional trimming: A post-mortem study. *Vet J* 2006; 172(2):284–92.
- Nuss K, Sauter-Louis C, Sigmund B. Measurements of forelimb claw dimensions in cows using a standardised sole thickness: a post-mortem study. *Vet J* 2011; 190(1):84–9.
- Oehme B. Analyse der Druckbelastung unter der Rinderklaue mittels eines folienbasierten Druckmesssystems auf verschiedenen Stallböden [Dissertation med. vet.]. Leipzig: Universität Leipzig; 2018a.
- Oehme B, Geiger SM, Grund S, Hainke K, Munzel J, Mülling CKW. Effect of different flooring types on pressure distribution under the bovine claw - an ex vivo study. *BMC Vet Res* 2018b; 14(1):259.
- Oehme B, Geiger SM, Grund S, Munzel J, Röhrmann N, Weiß M et al. Effect Of Different Ground Conditions On Pressure Distribution Under The Bovine Claw – An Ex Vivo Study. In:

Literaturverzeichnis

- Fiedler A, Schindhelm K, Hrsg. Proceedings of the 19th International Symposium and 11th Conference Lameness in Ruminants 2017. p. 92–93.
- Oehme B, Grund S, Munzel J, Mulling CKW. Kinetic effect of different ground conditions on the sole of the claws of standing and walking dairy cows. *J Dairy Sci* 2019; 102(11):10119–28.
- Offer JE, Fisher GE, Kempson SA, Logue DN. The effect of feeding grass silage in early pregnancy on claw health during first lactation. *Vet J* 2001; 161(2):186–93.
- Offer JE, McNulty D, Logue DN. Observations of lameness, hoof conformation and development of lesions in dairy cattle over four lactations. *Vet Rec* 2000; 147(4):105–9.
- Ossent P, Peterse DJ, Schamhardt HC. Distribution of load between the lateral and medial hoof of the bovine hind limb. *Zentralbl Veterinarmed A* 1987; 34(4):296–300.
- Ouweltjes W, Holzhauer M, van der Tol PPJ, van der Werf J. Effects of two trimming methods of dairy cattle on concrete or rubber-covered slatted floors. *J Dairy Sci* 2009; 92(3):960–71.
- Ouweltjes W, van der Werf JTN, Frankena K, van Leeuwen JL. Effects of flooring and restricted freestall access on behavior and claw health of dairy heifers. *J Dairy Sci* 2011; 94(2):705–15.
- Paulus N, Nuss K. Sole Length, Sole Width, Bulb Height, Bulb Width and Sole Surface Area in Cattle before and after Functional Trimming. In: Zemljič B, Hrsg. Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants 2004. p. 39–41.
- Paulus N, Nuss K. Unterschiede zwischen den Abmessungen von lateraler und medialer Klaue an den Beckengliedmaßen bei Jungbullen. *Tierarztl Prax Ausg G Grosstiere Nutztiere* 2006; 34(2):86–93.
- Paulus N, Nuss K. Measurements on bovine claws at a defined sole thickness. In: Kaske M, Scholz H, Höltershinken M, Hrsg. Recent developments and perspectives in bovine medicine: Keynote lectures ; XXII World Buiatrics Congress ; 18-23 August, 2002 Hannover. Hannover: Klinik für Rinderkrankheiten 2002a.
- Paulus N, Nuss K. Claw Measures at defined Sole Thickness. In: Shearer JK, Shearer LC, Hrsg. Proceedings of the 12th International Symposium on Lameness in Ruminants 2002b. p. 428–430.
- Perino VV, Kawcak CE, Frisbie DD, Reiser RF, McIlwraith CW. The Accuracy and Precision of an Equine In-Shoe Pressure Measurement System as a Tool for Gait Analysis. *J Equine Vet Sci* 2007; 27(4):161–6.

Literaturverzeichnis

- Pijl R, Lischer C. Funktionelle Klauenpflege nach Dr. Egbert Toussaint Raven. In: Lischer CJ, Hrsg. Handbuch zu Pflege und Behandlung der Klauen beim Rind. 2. Aufl. Berlin: Verlag Parey 2000. p. 73–82.
- Platz S, Ahrens F, Bendel J, Meyer HHD, Erhard MH. What Happens with Cow Behavior When Replacing Concrete Slatted Floor by Rubber Coating: A Case Study. J Dairy Sci 2008; 91(3):999–1004.
- Retzl J. Die Klauenpflege der Haustiere. 2. verb. Aufl. Wien: Agrarverl; 1938.
- Reubold H. Entwicklung geeigneter Parameter zur Beurteilung von elastischen Laufgangauflagen in Liegeboxenlaufställen für Milchkühe [Dissertation agr.]. Giessen: Justus-Liebig-Universität; 2008.
- Ricker G. Untersuchungen zur rationellen Klauenpflege [Diplomarbeit]. Berlin: Humboldt-Universität; 1983.
- Riemersma DJ, Schamhardt HC, Hartman W, Lammertink JL. Kinetics and kinematics of the equine hind limb: in vivo tendon loads and force plate measurements in ponies. Am J Vet Res 1988; 49(8):1344–52.
- RStudio Team. RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA: RStudio, Inc; 2016. URL: <http://www.rstudio.com/>.
- Rushen J, Passille AM de. Effects of roughness and compressibility of flooring on cow locomotion. J Dairy Sci 2006; 89(8):2965–72.
- Rusterholz A. Das spezifisch-traumatische Klauensohlengeschwür des Rindes (Rusterholz'sches Klauensohlengeschwür) und seine Behandlung. Schweiz Arch Tierheilkd 1920(62):421–46.
- Ruthe H. Der Huf. Lehrbuch des Hufbeschlages; mit einem Beitrag über Klauenpflege und Klauenbeschlages beim Rind. 5., überarb. Aufl. / von Friedbert Reinhard. Stuttgart: Enke; 1997.
- Samel M. Gummibeschichtete Laufflächen für Milchkühe und deren Einfluss auf Klauenwachstumsparameter und Klauengesundheit im Vergleich zu betonierte Laufflächen [Dissertation med. vet.]. Hannover: Tierärztliche Hochschule Hannover; 2005.
- Schleiter H. Klauenpflege bei Haustieren: Leitfaden für Klauenpfleger und Landwirte. 3 Aufl. Leipzig: Hirzel (in Verwaltung); 1966.
- Schlichting MC. Adaptation of cattle to different floor types. In: Wierenga HK, Peterse DJ, Hrsg. Cattle Housing Systems, lameness and behaviour: Proceedings of a Seminar on the influence of the design of housing systems for cattle on lameness and on behavior, held in Brussels on June 3-4 1986. Dordrecht: Nijhoff 1986. p. 87–97.

Literaturverzeichnis

Schmid D. Untersuchungen über Klauenmaße und Klauenkrankheiten in der Rinderherde des Lehr- und Versuchsgutes Oberschleißheim. [Dissertation med. vet.]. München: LMU München; 1990.

Schmid T, Weishaupt MA, Meyer SW, Waldern N, Peinen Kv, Nuss K. High-speed cinematographic evaluation of claw-ground contact pattern of lactating cows. *Vet J* 2009a; 181(2):151–7.

Schwarzmann B, Köstlin R, Nuss K. Größenunterschiede zwischen den lateralen und medialen Zehenknochen und Klauen von Kälbern. *Tierärztl Prax Ausg G Grosstiere Nutztiere* 2007; 35(5):341–9.

Scott GB. Changes in limb loading with lameness for a number of Friesian cattle. *Br Vet J* 1989; 145(1):28–38.

Scott GB. Studies of the gait of Friesian heifer cattle. *Vet Rec* 1988; 123(10):245–8.

Scott GB. A study of the biomechanical factors involved in foot-floor interactions in Friesian cattle with reference to aspects of lameness [Ph.D.-Thesis]. Aberdeen: University of Aberdeen; 1987.

Scott TD, Naylor JM, Greenough PR. A simple formula for predicting claw volume of cattle. *Vet J* 1999; 158(3):190–5.

Seite A, Seite B. Betrachtungen zur Klauenpflege in den Kreisen Röbel und Neustrelitz sowie kritische Auswertung [Dissertation med. vet.]. Berlin: Humboldt-Univ; 1973.

Shearer JK, van Amstel SR. Functional and corrective claw trimming. *Vet Clin North Am Food Anim Pract* 2001; 17(1):53–72.

Shearer JK, van Amstel SR, Brodersen BW. Clinical diagnosis of foot and leg lameness in cattle. *Vet Clin North Am Food Anim Pract* 2012; 28(3):535–56.

Sohrt JT. Ermittlung von Standardmaßen für die Klauenpflege durch Untersuchungen über die Beziehung der anatomischen Innenstruktur zum Hornschuh an Klauen der Hintergliedmaße Deutsch Schwarzbunter Rinder mit Berücksichtigung von Reheveränderungen [Dissertation med. vet.]. Hannover: Tierärztliche Hochschule Hannover; 1999.

Somers J, Frankena K, Noordhuizen-Stassen EN, Metz JHM. Prevalence of claw disorders in Dutch dairy cows exposed to several floor systems. *J Dairy Sci* 2003; 86(6):2082–93.

Somers J, Schouten WGP, Frankena K, Noordhuizen-Stassen EN, Metz JHM. Development of claw traits and claw lesions in dairy cows kept on different floor systems. *J Dairy Sci* 2005; 88(1):110–20.

Literaturverzeichnis

- Spielmann C. Konstruktion und Bau einer Messanlage zur Kraft- und Druckverteilung unter Rinderklauen [Diplomarbeit]. München: Technische Universität; 1984.
- Sprecher DJ, Hostetler DE, Kaneene JB. A lameness scoring system that uses posture and gait to predict dairy cattle reproductive performance. *Theriogenology* 1997; 47(6):1179–87.
- Starke H. Sachgemäße Klauenpflege beim Rind und ihre Auswirkung auf die Milchleistung [Dissertation med. vet.]. Leipzig: Universität Leipzig; 1954.
- Telezhenko E, Bergsten C. Influence of floor type on the locomotion of dairy cows. *Appl Anim Behav Sci* 2005; 93(3-4):183–97.
- Telezhenko E, Bergsten C, Magnusson M, Nilsson C. Effect of different flooring systems on claw conformation of dairy cows. *J Dairy Sci* 2009; 92(6):2625–33.
- Telezhenko E, Bergsten C, Magnusson M, Ventorp M, Nilsson C. Effect of different flooring systems on weight and pressure distribution on claws of dairy cows. *J Dairy Sci* 2008; 91(5):1874–84.
- Telezhenko E, Lidfors L, Bergsten C. Dairy cow preferences for soft or hard flooring when standing or walking. *J Dairy Sci* 2007; 90(8):3716–24.
- Toussaint-Raven E. Determination of weight-bearing by the bovine foot. *The Netherlands journal of veterinary science* 1973; 5:99–103.
- Toussaint-Raven E. The Principles of Claw Trimming. *Vet Clin North Am Food Anim Pract* 1985a; 1(1):93–107.
- Toussaint-Raven E. Cattle footcare and claw trimming. Ipswich, Suffolk; 1985b.
- Tucker CB, Weary DM, Passillé AM de, Campbell B, Rushen J. Flooring in Front of the Feed Bunk Affects Feeding Behavior and Use of Freestalls by Dairy Cows. *J Dairy Sci* 2006; 89(6):2065–71.
- van Amstel SR, Palin FL, Shearer JK. Claw Trimming - An Adaption of the Dutch Method. In: Shearer JK, Shearer LC, Hrsg. *Proceedings of the 12th International Symposium on Lameness in Ruminants 2002a*. p. 127–130.
- van Amstel SR, Palin FL, Shearer JK, Robinson BF. Anatomical measurement of sole thickness in cattle following application of two different trimming techniques. *Bovine Pract* 2002b; 36(2):136–40.
- van Amstel SR, Shearer J. Biomechanics of Weight (Load) Bearing and Claw Trimming. In: van Amstel SR, Shearer J, Hrsg. *Manual for Treatment and Control of Lameness in Cattle*. Ames, Iowa, USA: Blackwell Publishing Professional 2006a. p. 42–126.

Literaturverzeichnis

- van Amstel SR, Shearer JK. Horn Formation and Growth. In: van Amstel SR, Shearer J, Hrsg. Manual for Treatment and Control of Lameness in Cattle. Ames, Iowa, USA: Blackwell Publishing Professional 2006b. p. 16–30.
- van der Tol PPJ, Metz JHM, Noordhuizen-Stassen EN. The Force and Pressure Distribution on the Claws of Cattle and the biomechanical Effect of preventive Trimming. In: Zemljič B, Hrsg. Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants 2004a. p. 11–13.
- van der Tol PPJ, Metz JHM, Noordhuizen-Stassen EN, Back W, Braam CR, Weijs WA. The vertical ground reaction force and the pressure distribution on the claws of dairy cows while walking on a flat substrate. *J Dairy Sci* 2003; 86(9):2875–83.
- van der Tol PPJ, Metz JHM, Noordhuizen-Stassen EN, Back W, Braam CR, Weijs WA. The pressure distribution under the bovine claw during square standing on a flat substrate. *J Dairy Sci* 2002; 85(6):1476–81.
- van der Tol PPJ, van der Beek SS, Metz JHM, Noordhuizen-Stassen EN, Back W, Braam CR et al. The effect of preventive trimming on weight bearing and force balance on the claws of dairy cattle. *J Dairy Sci* 2004b; 87(6):1732–8.
- Vanegas J, Overton M, Berry SL, Sisco WM. Effect of rubber flooring on claw health in lactating dairy cows housed in free-stall barns. *J Dairy Sci* 2006; 89(11):4251–8.
- Vermunt JJ, Greenough PR. Structural characteristics of the bovine claw: horn growth and wear, horn hardness and claw conformation. *Br Vet J* 1995; 151(2):157–80.
- Vokey FJ, Guard CL, Erb HN, Galton DM. Effects of Alley and Stall Surfaces on Indices of Claw and Leg Health in Dairy Cattle Housed in a Free-Stall Barn. *J Dairy Sci* 2001; 84(12):2686–99.
- Webb NG, Clark M. Livestock foot-floor interactions measured by force and pressure plate. *Farm building progress* 1981(66):23–36.
- Webster AJF. Effects of housing and two forage diets on the development of claw horn lesions in dairy cows at first calving and in first lactation. *Vet J* 2001; 162(1):56–65.
- Witzmann P. Untersuchungen über die Belastung der Extremitätenpaare bei Pferden und Rindern. [Dissertation med. vet.]. München: LMU München; 1969.
- Zeiner H, Schobesberger H, Skalicky M, Stanek C. Effect of different claw trimming methods on the pressure distribution under the bovine claw -an in vitro study. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr* 2007; 120(3-4):165–72.

Anhang

9 Anhang

Tabelle 31: ausgewählte Tierdaten und Klauenmaße nach Durchführung der modifizierten Klauenpflege des Ex-vivo-Versuchs

Klaue Nr.	Tierdaten		Außenklaue							Innenklaue						
	Alter (Monate)	Schlachtgewicht (kg)	Dorsalwandlänge (mm)	Dorsalwandwinkel (°)	Ballenhöhe (mm)	Ballenlänge (mm)	Klauenlänge (mm)	Sohlenlänge (mm)	Sohlenbreite (mm)	Dorsalwandlänge (mm)	Dorsalwandwinkel (°)	Ballenhöhe (mm)	Ballenlänge (mm)	Klauenlänge (mm)	Sohlenlänge (mm)	Sohlenbreite (mm)
K4T	65	284,2	74,4	60	32,4	47,1	118,4	102,1	52,6	72,7	56,5	31,4	36,9	121,8	106,7	49,5
K5T	39	189,6	64,1	50	32,6	40,8	115,9	94,8	51,7	64,2	57,0	27,4	41,7	118,2	90,4	45,5
K6T	44	314	83,0	51,5	41,1	50,6	132,0	105,7	51,0	72,5	49,0	34,7	52,0	126,1	96,3	52,3
K11T	61	225,8	75,5	45	52,9	63,3	132,8	108,7	53,3	80,4	50,0	40,2	51,6	123,4	98,9	49,7
K12T	28	348,8	77,7	45,5	32,9	45,8	127,9	118,5	51,9	77,9	50,5	25,9	41,2	131,1	119,0	49,1
K13T	39	249,8	78,6	60	31,8	46,1	114,9	97,3	47,5	72,7	56,0	25,1	47,6	124,3	105,4	51,6
K17T	27	252,2	80,6	51,5	31,9	50,6	119,8	94,7	49,3	80,8	54,5	29,2	43,8	125,8	96,6	48,5
K19T	87	274,6	73,0	44	24,9	39,2	129,7	108,1	52,8	74,1	48,0	23,1	42,5	120,7	91,2	50,6
K22T	40	252,2	69,0	46	32,9	47,1	130,8	102,0	54,0	70,4	49,5	33,8	44,2	120,3	95,8	52,1
K23T	57	226,6	69,9	57	25,9	41,9	119,0	88,4	50,2	70,0	54,0	24,8	37,2	118,4	92,9	44,5
K24T	56	243,8	66,7	54	23,7	33,9	120,1	96,8	53,4	62,8	51,0	20,3	26,9	127,1	100,4	50,6

Tabelle 32: Ergebnisse der sonographischen Horndickenmessung und Höhe des Tragrandes im In-vivo Versuch

Kuhnr.	Horndicke (mm)				Tragrandhöhe (mm)			
	B lat.	Sp lat.	B med.	Sp med.	W lat.	Sp lat.	W med.	Sp med.
89	4,1	2,2	3,4	1,7	1,0	1,0	1,0	1,0
75	6,3	3,5	6,3	4,0	2,2	1,7	1,8	1,8
20	3,2	2,7	2,1	1,6	2,0	1,0	1,7	2,0
82	5,2	3,3	3,2	2,5	2,0	1,7	2,0	1,2
1	4,9	2,5	4,4	4,1	1,2	0,9	1,9	0,6
83	6,8	2,5	5,6	3,6	2,8	1,1	1,3	1,1
87	5,4	2,5	4,8	2,3	2,5	1,3	1,3	1,8
86	3,7	2,9	2,5	2,6	0,9	3,0	1,7	1,7
81	6,0	2,7	5,0	2,5	1,9	3,2	2,7	1,6
77	7,0	3,0	4,5	1,8	3,7	1,7	2,2	0,8
MW	6,5	3,0	5,0	4,0	1,7	1,0	1,5	1,5
St.-Abw.	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5	0,5

B = Ballen, Sp = Spitze, W = abaxiale Wand, lat. = lateral, med. = medial

10 Danksagung

Ich danke meinem Doktorvater Prof. Dr. Christoph Mülling für die Überlassung dieses spannenden Themas und die zuverlässige und professionelle Betreuung dieser Arbeit – ich habe mich in Ihrem A-Team immer sehr zuhause gefühlt.

Dr. Sarah Grund und Dr. Sandra Geiger danke ich aufs Herzlichste für die Betreuung des ProKlaue-Projektes, meiner Arbeit und meiner Person – ihr wart Herz und Kopf des großen Ganzen, die Zeit war unvergesslich.

Benny und Moni waren die wahrscheinlich besten Doktorandenkollegen, die man sich wünschen kann – ProKlaue 4 ever! Millionenfacher Dank gebührt Benny für seinen ständigen technischen und emotionalen Support und die treue Begleitung zwischen Altenburg, Schweden und Japan.

Meiner lieben Projektkollegin und Raumteilerin Nicole danke ich für ihre hilfreiche Zuarbeit im Projekt „ProKlaue“ und ihre augenzwinkernde Geduld mit mir und dieser Arbeit.

Was wäre eine Dissertation ohne Statistik – danke an Enrico Reich und Kai Hainke für die Auswertung und grafische Darstellung der Daten sowie der Beantwortung nie zuvor gestellter Fragen.

Allen Mitarbeitern und Doktoranden des Veterinär-Anatomischen Instituts danke ich für die unglaublich schöne Zeit, die ich hier verbringen durfte – auch nach Projektende stehen mir hier alle Türen offen, danke für die ständige Unterstützung!

Frau Rauwolf und dem Team aus dem Milchviehstall des LVG-Oberholz danke ich für die großzügige Bereitstellung von Kühen, Expertise, Material und Zeit für die Durchführung des In-vivo-Versuches.

Allen Projektpartnern des Verbundprojektes „ProKlaue“ danke ich vielmals für die gute Zusammenarbeit – besonderer Dank gebührt Dr. Katrin Wilhelm für die Unterstützung des In-vivo-Versuches!

Prof. Dr. Walter Brehm und Dr. Kerstin Gerlach aus der Klinik für Pferde ermöglichten die Anfertigung von CT-Aufnahmen der isolierten Gliedmaßen – herzlichen Dank.

Mein Praxischef Dr. Martin Petzold hat mit unerschütterlicher Geduld alle meine Ideen zur Vereinbarung von Wissenschaft, Praxis und Leben mitgetragen und ermöglicht – tausend Dank dafür.

Meinen liebsten Eltern und Geschwistern, meinem Freund Rico und seinem Sohn Arjen, meinen lieben Freund*innen und Mitbewohner*innen danke ich für die ständige und bedingungslose Unterstützung im Entstehungsprozess dieser Arbeit.