

Aus der  
Klinik für Pferde  
Chirurgie und Orthopädie mit Lehrschmiede  
des Fachbereichs Veterinärmedizin  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Radiologische Untersuchungen der Zehe des Esels unter besonderer  
Berücksichtigung röntgenologischer Veränderungen des Hufbeins

Inaugural-Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktors der Veterinärmedizin  
an der  
Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von  
Juliana Wacker  
Tierärztin

Gießen 2025

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Veterinärmedizin  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Dekan: Prof. Dr. Stefan Arnhold

Erster Gutachter: PD Dr. Claus Peter Bartmann

Zweite Gutachterin: Prof. Dr. Daniela Fietz

Dritter Gutachter: PD Dr. Rainer Hospes

Vierter Gutachter: Prof. Dr. Michael Röcken

Tag der Promotion: 10.06.2025

*Für meine Familie*

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Gender-Hinweis</b> .....	<b>6</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>7</b>
<b>Die Bedeutung des Hufes für das Wohlbefinden von Equiden</b> .....	<b>7</b>
<b>Unterschiede der Hufkonformation von Pferden und Eseln</b> .....	<b>8</b>
<b>Klinische Beurteilung des Hufes von Equiden und Einfluss der Hufbearbeitung auf die Hufkonformation</b> .....	<b>9</b>
<b>Bedeutung der radiologischen Untersuchung der Zehe</b> .....	<b>11</b>
<b>Morphometrische Messungen am Huf</b> .....	<b>12</b>
Messungen am Patienten und an digitalen Fotografien.....	12
Messungen an Röntgenbildern.....	13
<b>Fragestellungen und Zielsetzungen der Arbeit</b> .....	<b>14</b>
<b>Eigene Publikationen</b> .....	<b>15</b>
<b>Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter Berücksichtigung des Alters</b> .....	<b>16</b>
<b>Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs</b> .....	<b>28</b>
<b>Diskussion</b> .....	<b>43</b>
<b>Diskussion der Fragestellungen</b> .....	<b>43</b>
<b>Diskussion der Methoden</b> .....	<b>46</b>
<b>Diskussion der Ergebnisse</b> .....	<b>48</b>
Deskriptive Statistik .....	48
Test auf Normalverteilung .....	50
Normierung von Längenmessungen .....	54
Unterschied zwischen linker und rechter Gliedmaße bzw. medialen und lateralen Anteilen des Hufes .....	55
Korrelation mit dem Alter.....	63
Korrelation mit Größe und Gewicht .....	64
Beurteilung im Hinblick auf chronische Hufrehe .....	74
<b>Ausblick</b> .....	<b>78</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>79</b>
<b>Summary</b> .....	<b>81</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>82</b>
<b>Publikationsverzeichnis</b> .....	<b>86</b>
<b>Selbstständigkeitserklärung</b> .....	<b>88</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>89</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<u>Abkürzung</u>	<u>Bezeichnung</u>
_N	Normierter Messwert
Abb.	Abbildung
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Circa
CBA	coffin bone angle, Hufbeinwinkel
Cm	Zentimeter
CR_c	coffin bone rotation (calculated), Hufbeinrotation (errechneter Wert)
CR_m	coffin bone rotation (measured), Hufbeinrotation (gemessener Wert)
CUSUM-Test	cumulative Sum Test, kumulativer Summentest
CW	coronary width, Kronsaumweite
DCH	dorsal coronet height, dorsale Kronsaumhöhe
DWL	dorsal wall length, dorsale Hufwandlänge
FD	founder distance, Rehestrecke
FFD	Film-Focus-Distance, Film-Fokus-Abstand
FW	foot width, Breite der Fußungsfläche
HA	heel angle, Trachtenwinkel
HL	heel length, Trachtenlänge
HPA 1	hoof-pastern-axis 1, Achsenabweichung der Zehenknochen im Krongelenk
HPA 2	hoof-pastern-axis 2, Achsenabweichung der Zehenknochen im Hufgelenk
HWA	hoof wall angle, Hufwandwinkel
Kg	Kilogramm
LCH	lateral coronet height, laterale Kronsaumhöhe
LST	lateral sole thickness, Laterale Sohlendicke
LWA	lateral wall angle, Lateraler Hufwandwinkel

LWL	lateral wall length, Lateraler Hufwandlänge
MCH	medial coronet height, Mediale Kronsaumhöhe
Mm	Millimeter
MST	medial sole thickness, Mediale Sohlendicke
MWA	medial wall angle, Medialer Hufwandwinkel
MWL	medial wall length, Mediale Hufwandlänge
PA	palmar angle, Palmarwinkel
PCH	palmar coronet height, Palmare Kronsaumhöhe
Proc.	Processus
s.	siehe
SA	sole angle, Sohlenwinkel
SST	sagittal sole thickness, Sagittale Sohlendicke
ST	sole thickness, Sohlendicke
Tab.	Tabelle
QQ-Plot	Quantil-Quantil-Diagramm

## Gender-Hinweis

Die in dieser Dissertation verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich immer gleichermaßen auf weibliche, männliche und diverse Personen. Auf eine Doppelnennung und gegen-derte Bezeichnungen wird zugunsten einer besseren Lesbarkeit verzichtet.

# Einleitung

## Die Bedeutung des Hufes für das Wohlbefinden von Equiden

„No foot – no horse“ – „Ohne Huf kein Pferd“ lautet eine alte Weisheit im Bereich der Pferdehaltung. Es ist unumstritten, dass der Huf enorm wichtig für die Gesundheit und das Wohlbefinden von Equiden ist. Als Huf bezeichnet man dabei die Hornkapsel und alle davon eingeschlossenen Strukturen, hierzu gehören unter anderem der distale Anteil des Kronbeins, das Hufbein, das Strahlbein, das Hufgelenk, die Bursa podotrochlearis, der distale Anteil der tiefen Beugesehne sowie die versorgenden Nerven und Blutgefäße (Wissdorf et al. 2010, Budras et al. 2020). Lahmheiten sind eines der wichtigsten Krankheitsbilder in der Pferdemedizin und der Huf ist direkt oder indirekt fast immer an diesem Krankheitskomplex beteiligt (Redden 2003). Ein großer Teil der Lahmheiten hat ihren Ursprung zumindest teilweise im Bereich des Hufes (Redden 2003). Auch beim Esel hat die Hufgesundheit einen entscheidenden Einfluss auf die Gesundheit, eine schlechte Hufpflege und -bearbeitung können das Wohlbefinden signifikant beeinträchtigen (Thiemann u. Rickards 2013, Crane u. Evans 2018). Hinzu kommt, dass Esel ursprünglich an sehr trockene, aride Klimaverhältnisse angepasst sind, hierzulande jedoch in einem insgesamt deutlich feuchteren Klima gehalten werden, was häufig die Entstehung von Pathologien im Bereich des Hufes begünstigt (Crane 2007). Die Kenntnis über den radiologischen Normalzustand ist die Grundlage dafür, Abweichungen erkennen und beurteilen zu können (Masoudifard et al. 2014) und ist im Fall des Hufes essentiell für eine zielgerichtete Hufbearbeitung und –korrektur.

## Unterschiede der Hufkonformation von Pferden und Eseln

Neben Pferden spielen auch andere Equiden, vor allem Esel, eine entscheidende Rolle im Alltag von Tierärzten und Hufschmieden. Obwohl sowohl Pferde als auch Esel zur Gattung der Equiden, gehören, weisen sie teils gravierende anatomische und physiologische Besonderheiten auf (Burnham 2002). Insbesondere bezüglich der Anatomie des Hufes gibt es erhebliche Unterschiede und auch die Funktion des Eselhufes unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht von der des Pferdes (Crane 2007, Collins et al. 2011, Thiemann u. Rickards 2013, Souza et al. 2016, Crane u. Evans 2018). Esel haben im Vergleich zum Pferd kleinere und eher kastenförmige Hufe mit dickerer Hufwand und –sohle (Burnham 2002, Crane 2007, Crane u. Evans 2018). Die Sohle eines Eselhufes ist im Gegensatz zum Pferdehuf eher U-förmig und wird zu den Trachten hin nur wenig schmaler, wodurch auch ein breiterer Strahl charakteristisch ist (Crane 2007, Thiemann u. Rickards 2013, Crane u. Evans 2018). Die Zehenachse beim Esel ist insgesamt steiler, was mit einer 5-10° stumpfer gewinkelten dorsalen Hufwand einhergeht (Crane 2007, Collins et al. 2011, Crane u. Evans 2018, El-Shafaey et al. 2018). Die Unterschiede zwischen Esel- und Pferdehuf sind in der nachfolgenden Abbildung 1a sowie 1b ersichtlich. Das Hufbein liegt beim Esel weiter distal in der Hornkapsel, sodass der Processus extensorius des Hufbeins und der Kronsaum nicht in der gleichen Ebene liegen (Crane 2007, Collins et al. 2011, El-Shafaey et al. 2017, Crane u. Evans 2018). Auch die röntgenologische Anatomie, beispielsweise im Hinblick auf die Rehestrecke, weicht demnach erheblich ab (Collins et al. 2011). Aufgrund der deutlichen Unterschiede können die fundierten Daten, die für Pferde und Ponys erhoben wurden, nicht uneingeschränkt auf Esel übertragen werden (Collins et al. 2011). Für die Beurteilung von Röntgenbildern sollten eselspezifische Referenzwerte herangezogen werden (Crane u. Evans 2018). Es gibt jedoch bislang nur wenige Daten über die radiologische Normalanatomie der Zehe beim Esel (Walker et al. 1995, Collins et al. 2011).

Abb. 1a: Vergleich zwischen Eselhuf (links) und Pferdehuf (rechts) in der Seitenansicht



Abb. 1b: Vergleich der Sohle zwischen Eselhuf (links) und Pferdehuf (rechts)



### Klinische Beurteilung des Hufes von Equiden und Einfluss der Hufbearbeitung auf die Hufkonformation

Die Evaluierung der äußeren Hufkonformation ist ein wesentlicher Aspekt bei der Beurteilung eines Equiden (Craig et al. 2001, Turner 2003). Die klinische Untersuchung stellt die Grundlage der Beurteilung des Hufes dar und kann durch weiterführende Untersuchungen wie das Röntgen lediglich ergänzt werden (Redden 2003). Trotz ihrer enormen Wichtigkeit unterliegt die klinische Beurteilung des Hufes einer gewissen Subjektivität, ebenso ist sie abhängig von der Erfahrung des Untersuchers (Craig et al. 2001). Bei der Beurteilung ist zudem unbedingt zu bedenken, dass jeder Huf individuell verschieden ist (Craig u. Craig 2019).

Zwar haben alle Hufe grundsätzlich den gleichen „Bauplan“ und sind aus denselben anatomischen Strukturen aufgebaut, nichtsdestotrotz stimmen sie in ihrer Form und der Ausprägung ihrer Strukturen nie völlig überein (Budras et al. 2020). Die Hufform unterliegt verschiedensten Einflussfaktoren wie Rasse, Bewegung des Tieres, Bodenverhältnisse, Aufzucht, Ernährung und Gewicht, aber auch Hufzubereitung und Beschlag (Colles 1983, Redden 2003, Souza et al. 2016, Craig u. Craig 2019, Budras et al. 2020). Die Hufzubereitung hat jedoch nicht nur einen Einfluss auf die Hufform, sondern damit einhergehend auch auf die gesamte Biomechanik, das Auffußen und Abrollen sowie die aus der Bewegung resultierenden Kräfte, die auf den Huf und die innenliegenden Strukturen einwirken (O’Grady u. Poupard 2001, Page u. Hagen 2002, Collins et al. 2011, Craig u. Craig 2019). Zudem spiegelt die Form des Hufes die Gliedmaßen- und Zehenstellung wider und ist damit das Resultat der auf den Huf einwirkenden Kräfte (Budras et al. 2020).

Es ist bei der Beurteilung zu beachten, dass die Hufform immer eine Momentaufnahme ist und sich relativ schnell an Veränderungen der Einflussfaktoren anpassen kann (Budras et al. 2020). Die optimale Hufkonformation des Pferdes ist in der einschlägigen Literatur bereits ausführlich beschrieben worden. Die dorsale Hufwand, die Zehenachse und der Ballen sollten nach Möglichkeit parallel sein (Colles 1983, O'Grady u. Poupard 2001, O'Grady 2013). Wenn keine Parallelität zwischen Hufwand und Trachte erreicht werden kann, so sollten sie zumindest nicht mehr als 10° voneinander abweichen (Craig u. Craig 2019). Das Rotationszentrum des Hufgelenks sollte in der Mitte der Fußungsfläche liegen (Colles 1983, Park 1989). Das palmare Ende der Fußungsfläche sollte sich in einer Linie mit dem Röhrbein befinden (Parks 2010, O'Grady 2013). Die regelmäßige Hufform, wie sie in den Fachbüchern beschrieben ist, stellt einen Idealzustand dar, doch nicht jede Abweichung davon ist als grundsätzlich krankhaft zu werten. Es ist bedeutsam, regelmäßige, unregelmäßige und krankhafte Hufformen voneinander abzugrenzen. Die Differenzierung zwischen unregelmäßigen und pathologischen Hufformen ist zudem speziesabhängig, so ist ein Trachtenzwang beim Pferd durchaus als krankhafte Hufform einzuschätzen, während er beim Maultier nicht grundsätzlich als Pathologie gewertet werden muss (Bartmann u. Pietta 2020). Dementsprechend variiert die Normalanatomie zu einem bestimmten Grad (Becht et al. 2001, Budras et al. 2020). Manche anatomischen Veränderungen, auch pathologischer Natur, verursachen gegebenenfalls keine Lahmheit und können damit auch bei klinisch gesunden Pferden vorkommen (Rendano u. Grant 1978, Becht et al. 2001). Die genaue Kenntnis über den Normalzustand ist nichtsdestotrotz die Grundlage für die Beurteilung abweichender Zustände (Linford et al. 1993, Collins et al. 2011). Es ist wichtig, abweichende und pathologische Zustände möglichst früh zu erkennen, da eventuelle Korrekturmaßnahmen in frühen Stadien am effektivsten sind (Collins et al. 2011). Trotz der deutlichen Unterschiede der Anatomie des Hufes beim Esel sind die genannten Grundsätze für die äußere Beurteilung weitestgehend auf den Esel übertragbar.

## Bedeutung der radiologischen Untersuchung der Zehe

Die Zehe ist die am häufigsten radiologisch untersuchte anatomische Region beim Pferd, die röntgenologische Untersuchung ist hierbei ein sehr wichtiges Instrument zur Evaluation von Lahmheiten, vor allem im Bereich des Hufes (Colles 1983, Kummer et al. 2004, White et al. 2008, El-Shafaey et al. 2017). Das Hufbein beispielsweise ist vollständig in die Hornkapsel eingeschlossen und damit einer klinischen Untersuchung nur sehr eingeschränkt zugänglich (Rendano u. Grant 1978). Doch neben der Untersuchung der knöchernen Strukturen ermöglicht eine Röntgenuntersuchung auch die genaue Erfassung und Beurteilung der Hufwand und Hufform sowie der Position der Zehenknochen innerhalb der Hornkapsel (Colles 1983). Dementsprechend werden Röntgenbilder der Zehe in der täglichen Arbeit von Tierärzten und Hufschmieden herangezogen, um unter anderem die Qualität der Korrekturmaßnahmen durch Hufzubereitung und –beschlag zu beurteilen (Kummer et al. 2004, Kummer et al. 2006).

Wie auch bei der klinischen Untersuchung des Hufes gilt bei der röntgenologischen Untersuchung ebenfalls, dass die in der Literatur beschriebene Norm immer einen Idealzustand darstellt, der auf viele Individuen nicht uneingeschränkt zutrifft. Der „Normalzustand“ ist immer bis zu einem gewissen Grad variabel und es kann manchmal eine Herausforderung für den Untersucher sein, zwischen anatomischer Varianz ohne klinische Auswirkung und echter Pathologie zu unterscheiden. Es ist beispielsweise beschrieben, dass die Form des Hufbeins von der in der Literatur als normal beschriebenen Form abweichen kann (Butler et al. 2000). Die Form des Hufbeins entspricht dabei der Form der äußerlich sichtbaren Hornkapsel (Butler et al. 2000, Wissdorf et al. 2010). Aufgrund der besonderen, sehr feinen und porösen Struktur des Knochens passt sich die Form des Hufbeins an die individuelle Gliedmaßen- bzw. Hufstellung und damit auch an die daraus resultierenden Belastungsverhältnisse der entsprechenden Gliedmaßen an (Budras et al. 2020). Auch wenn nicht jede radiologische Veränderung klinisch relevant ist, so ist das Vorhandensein und der Schweregrad röntgenologischer Veränderungen bei einigen Erkrankungen, wie beispielsweise der chronischen Hufrehe, maßgeblich mit der Schwere der klinischen Erkrankung assoziiert (Herthel u. Hood 1999, Hemker u. Hertsch 2002).

## Morphometrische Messungen am Huf

Die Idee, den Huf eines Pferdes durch Längen- und Winkelmessungen objektiv zu beschreiben, ist bereits sehr alt. Mit der Entwicklung der sogenannten „Hoplometrie“ unternahm bereits 1917 Ernst Hugo Meier den Versuch, die gesamte Gestalt des Hufes unter einheitlichen Gesichtspunkten metrisch zu erfassen, um jede Verschiedenheit der Form anhand der Messungen genau wiedergeben zu können (Meier 1917). Er verfolgte unter anderem das Ziel, das Augenmaß und dessen Fehlbarkeit möglichst auszuschalten. In den letzten Jahren wurden verschiedene morphometrische Parameter definiert, um die normale Hufform des Pferdes zu erfassen und Abweichungen davon zu quantifizieren (Thieme et al. 2015a). Solche Messungen, wie sie heute fast standardmäßig bei der Beurteilung von Röntgenaufnahmen des Hufes eingesetzt werden, sind eine geeignete Möglichkeit, die Hufkonformation sachlich beschreiben zu können (Craig et al. 2001, Turner 2003). Insbesondere bei milden anatomischen Veränderungen ist die Möglichkeit einer wertungsfreien Beurteilung sinnvoll (Collins et al. 2012), da Ungenauigkeiten der Beurteilung selbst für einen geübten Untersucher unvermeidlich sind (Meier 1917). Es wurden bereits zahlreiche Studien an Pferden und Ponys und auch einige Studien an Eseln und Maultieren durchgeführt, um die Normalwerte für verschiedene Messungen direkt am Huf oder anhand von Hilfsmitteln wie digitalen Fotografien und Röntgenaufnahmen zu beschreiben.

### **Messungen am Patienten und an digitalen Fotografien**

Einige Studien, die sich mit dem Thema morphometrische Messungen bei Equiden beschäftigt haben, wurden direkt am Tier und an digitalen Fotografien durchgeführt (Vilsmeier 2002, Moleman et al. 2005, White et al. 2008, Dyson et al. 2011, Mostafa et al. 2020, Khan et al. 2023). In diesen Fällen können nur deutlich weniger Parameter erhoben werden als bei Studien, die morphometrische Messungen an Röntgenbildern durchführen. Es können aber beispielsweise die dorsale Hufwandlänge, die Trachtenlänge, der Hufwand- und Trachtenwinkel, die Zehenachse und die Dimensionen der Sohle untersucht werden, wie es für den Esel unter anderem durch Vilsmeier (2002) oder an Eseln in Ägypten durch Mostafa et al. (2020) durchgeführt wurde. Ein direkter Vergleich verschiedener Messmethoden ergab jedoch, dass die Messungen am Patienten in der Regel weniger genau sind als am Röntgenbild (Moleman et al. 2005).

## Messungen an Röntgenbildern

Die häufigste und am besten etablierte Methode zur Durchführung morphometrischer Messungen am Huf ist die Auswertung von Röntgenaufnahmen (Thieme et al. 2015a). In verschiedenen Studien werden insgesamt ca. 40 verschiedene Parameter, vor allem in der lateromedialen Röntgenaufnahme, erhoben (Kummer et al. 2004). Bei der Beurteilung von Röntgenbildern muss immer in Betracht gezogen werden, dass die zweidimensionale Darstellung einer eigentlich dreidimensionalen Struktur gewisse Herausforderungen mit sich bringt (Becht et al. 2001). Sowohl an der lateromedialen als auch an der dorsopalmareren Röntgenaufnahme können verschiedene Längen- und Winkelmessungen durchgeführt werden, die das Verhältnis zwischen der Hornkapsel und den innenliegenden Knochen- und Weichteilstrukturen beschreiben. Durch die morphometrischen Messungen an Röntgenbildern können die inneren anatomischen Zusammenhänge, vor allem die Zusammenhänge zwischen knöchernen Strukturen und der Hornkapsel, genau und objektiv untersucht werden (Collins et al. 2011). Bei der Beurteilung ist es wichtig, die einzelnen Parameter nicht getrennt zu betrachten, sondern immer mehrere Parameter in die Beurteilung einzubeziehen (Collins et al. 2011). Auch Parameter, die ebenso am Patienten oder an Fotografien gemessen werden können, wie beispielsweise der Hufwandwinkel, können auf Röntgenbildern zuverlässiger und genauer erhoben werden (Dyson et al. 2011). Die Messung des Vorderwandwinkels auf lateromedialen Röntgenaufnahmen gilt deshalb beispielsweise als der Goldstandard (Tacchio et al. 2002, Moleman et al. 2005, White et al. 2008). Demzufolge wurden bereits zahlreiche Studien zum Thema radiologische Messungen am Huf von Pferden und Ponys durchgeführt (Cripps u. Eustace 1999, Kummer et al. 2004, Kummer et al. 2006, Dyson et al. 2011, Masoudifard et al. 2014, Thieme et al. 2015b, Drumond et al. 2016). Es gibt bislang jedoch trotz der deutlichen Unterschiede der Anatomie der Zehe zwischen Pferd und Esel (Burnham 2002, Crane 2007, Collins et al. 2011, Souza et al. 2016, Crane u. Evans 2018) nur wenige Studien zu morphometrischen Messungen an der Eselzehe (Walker et al. 1995, Collins et al. 2011, El-Shafaey et al. 2017). Obwohl bereits einige wenige vergleichbare Arbeiten existieren, sind weitere Untersuchungen an einer Eselpopulation unter Einbeziehung verschiedener Rassen, Geschlechter, Alters- und Gewichtsklassen nötig (El-Shafaey et al. 2017). Grund hierfür ist, dass sich die Morphometrie zwischen den Rassen unterscheidet (Kost'uková et al. 2015). Der Einfluss von Rasse, Größe und Gewicht auf verschiedene Hufparameter ist beim Pferd signifikant, beim Esel jedoch bislang nicht hinreichend untersucht (Cripps u. Eustace 1999, Thieme et al. 2015b).

## Fragestellungen und Zielsetzungen der Arbeit

Mit den Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation wurden verschiedene Fragestellungen bearbeitet.

Im Rahmen der Publikation 1: *Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter Berücksichtigung des Alters* war das Ziel, die röntgenologische Normalanatomie des Hufbeins beim Esel zu beschreiben und das Auftreten von pathologischen Abweichungen, insbesondere in Abhängigkeit vom Alter des Tieres, zu untersuchen.

Darüber hinaus sollten im Rahmen der Publikation 2 *Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs* Referenzwerte für verschiedene morphometrische Parameter an der 0° und 90° Röntgenaufnahme von klinisch allgemein gesunden und im Schritt lahmfreien Eseln erarbeitet werden. Die Untersuchungen sollten sich auf in Deutschland gehaltene Esel verschiedener Größen und Rassen sowie jeden Geschlechts und jeden Alters beziehen. Anhand der im Rahmen dieser Studie beschriebenen Messwerte sollte die physiologische und damit erstrebenswerte Hufkonformation für diese Esel beschrieben werden. Darüber hinaus sollte die Fragestellung bearbeitet werden, ob für einzelne Messwerte signifikante Unterschiede zwischen linker und rechter Gliedmaße bzw. medialen und lateralen Anteilen des Hufes oder eine signifikante Abhängigkeit einzelner Parameter von Alter, Größe und Gewicht der Probanden besteht.

## Eigene Publikationen

**Publikation 1:** Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter Berücksichtigung des Alters

**Publikation 2:** Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs

Publikation 1:

Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter  
Berücksichtigung des Alters

# Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter Berücksichtigung des Alters

Juliana Wacker<sup>1</sup>, Kyra Schaus<sup>1</sup>, Kathrin Büttner<sup>2</sup>, Michael Röcken<sup>1</sup> und Claus P. Bartmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Klinik für Pferde – Chirurgie und Orthopädie mit Lehrschmiede, Justus-Liebig-Universität, Gießen

<sup>2</sup> Institut für Biomathematik und Datenverarbeitung, Justus-Liebig-Universität, Gießen

**Zusammenfassung:** Ziel dieser Studie ist es, die röntgenologische Normalanatomie des Hufbeins beim Esel zu beschreiben und das Auftreten von pathologischen Abweichungen insbesondere unter Berücksichtigung des Alters des Tieres zu untersuchen. Es wurden lateromediale Röntgenaufnahmen der distalen Zehe aller 4 Gliedmaßen von 42 klinisch gesunden und im Schritt lahmfreien Eseln europäischer Rassen angefertigt. Anschließend wurden das Auftreten und die Schwere von radiologischen Veränderungen des Hufbeins mithilfe eines Punktesystems erfasst. Die statistische Auswertung erfolgte mit besonderem Augenmerk auf die Abhängigkeit der Veränderungen vom Alter des Tieres. Insgesamt konnten Aufnahmen von 160 Hufbeinen ausgewertet werden. Die Hufbeinspitze war in einer großen Mehrzahl der Fälle nicht entsprechend der Norm winkelig und scharf konturiert, während nur ein geringer Prozentsatz der Probanden Veränderungen im Bereich des Processus extensorius aufwies. Während die Parietalflächen bei den meisten untersuchten Gliedmaßen glatt und scharf konturiert waren, wiesen die Sohlenflächen der meisten Hufbeine milde bis moderate Unregelmäßigkeiten auf. Mittel- bis hochgradige röntgenologische Auffälligkeiten der Parietal- sowie der Sohlenfläche traten ebenso wie schwerwiegendere Veränderungen der Hufbeinspitze in Form lytisch-atrophischer Veränderungen oder Hutkrepfenbildungen deutlich häufiger an der Vorder- als an der Hintergliedmaße auf. In Bezug auf das Alter der Tiere konnte lediglich mit den Veränderungen an der Hufbeinspitze ein signifikanter, negativer Zusammenhang nachgewiesen werden ( $p < 0,05$ ). Im Hinblick auf Veränderungen des Processus extensorius, der Parietal- sowie der Sohlenfläche konnte keine signifikante Korrelation mit dem Alter nachgewiesen werden (Processus extensorius  $p = 0,3863$ , Parietalfläche  $p = 0,2958$ , Sohlenfläche  $p = 0,1712$ ). Das Gewicht der Tiere beeinflusste alle Parameter hingegen signifikant, der Zusammenhang war in jedem Fall positiv ( $p < 0,05$ ). Insgesamt zeigten fast alle Tiere (41/42 Tiere, 97,6 %) an mindestens einer Gliedmaße Veränderungen von mindestens einem Parameter. Röntgenologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel sind in einer Population klinisch gesunder Esel ein sehr häufiger Befund, deren Auftreten und Schwere nicht mit dem Alter, aber mit dem Gewicht der Tiere signifikant im Zusammenhang zu stehen scheinen ( $p < 0,05$ ). Ein Grund dafür, dass keine eindeutige Korrelation mit dem Alter der Tiere festgestellt werden konnte, ist vermutlich die Tatsache, dass ältere Tiere mit deutlichen Veränderungen entweder nicht mehr die Einschlusskriterien der vorliegenden Studie im Sinne von klinischer Allgemeingesundheit und Lahmfreiheit im Schritt erfüllen oder aber infolge der den Veränderungen zugrunde liegenden Erkrankungen gar kein entsprechend hohes Alter erreichen. Die erhobenen Befunde scheinen also keinesfalls kausal mit dem Alter der Esel im Zusammenhang zu stehen. Sie sind vermutlich vielmehr die Folge verschiedener Formen der Huflederhautentzündung, vor allem der chronischen Hufrehe.

**Schlüsselwörter:** Equiden, degenerativ, Röntgen, Zehe, Radiometrie, P3

## Incidence of radiological changes of the coffin bone in donkeys in consideration of the age

To date, only a few studies have dealt with the radiological changes of the coffin bone in all equids in terms of roughness of the bone edges, bone resorption as well as remodeling processes and bone deformation. It seems to be an empiric finding that remodeling processes, the associated deformation and new bone formation on the coffin bone are a normal sign of ageing in donkeys. So far, there are no profound studies or publications on corresponding changes in donkeys and their dependence on the age of the animal. The objective of this study is to describe the normal radiographic anatomy of the donkey's coffin bone and to investigate the occurrence of pathological abnormalities, particularly in relation to the age of the animal. Furthermore, the study aims to prove that the changes mentioned above are not a normal sign of ageing in donkeys, but rather pathological conditions, for example as a result of chronic laminitis. Lateromedial radiographs of the distal toe of all limbs of 42 clinically healthy and lameness-free donkeys of European breeds were taken. The occurrence and severity of radiographic changes in the coffin bone were assessed using a scoring system. The tip as well as the extensory process of the coffin bone were each assessed with regard to the presence of a sharply defined contour. The parietal and sole surfaces were also assessed for the presence of a smooth contour, slight irregularities through to moderate and severe changes and exostoses. The statistical evaluation was carried out with particular attention to the dependence of the changes on the age of the animal. A total of 160 limbs were examined. 28.1 % of the coffin bones showed a sharply contoured coffin bone tip, whereas 71.9 % showed deviations from the described norm in the sense of a blurred or rounded contour of the coffin bone tip, atrophic and lytic processes in the area of the coffin bone tip or the formation of a cap. The majority of these changes (69.5 %) were minor deviations in the sense of a blurred or rounded contour of the coffin bone tip. In the present study, severe changes to the tip of the coffin bone, i.e. atrophy and cap formation, occurred more frequently on the forelimbs than on the hindlimbs. The age as well as the weight of the donkeys had a significant influence on the occurrence of changes of the coffin bone tip ( $p < 0.05$ ). While age showed a negative correlation with the changes in the tip of the coffin bone, a positive correlation was found in relation to weight. 10.7 % of the coffin bones showed a blurred contour in the area of the extensory process. With regard to changes in extensory process no significant correlation with age ( $p = 0.3864$ ) or limb ( $p = 0.0962$ ), but a positive correlation with the weight of the donkeys was found ( $p < 0.05$ ). The parietal surface was smooth in the majority of the cases (65 %), 28.1 % showed slight roughness of the parietal surface and only 6.9 % showed moderate to severe changes, mainly on the front limbs. Age had no significant influence on changes in parietal surface ( $p = 0.2958$ ). However, weight was positively correlated with changes in parietal area and the forelimbs showed significantly more changes than the hindlimbs ( $p < 0.05$ ). In contrast to the parietal surface, the sole surface was sharply contoured in only 28.7 % of all cases. The majority (62.5 %) showed

mild irregularities of the sole surface, moderate changes occurred in 8.8 % of the cases and mainly on front limbs. The only parameter that influenced the occurrence of changes in the sole surface significantly was the weight of the specimens, whereas the age ( $p = 0.1712$ ) and the limb ( $p = 0.1432$ ) showed no significant correlation. Overall, almost all (41 of 42 subjects) donkeys showed changes in the coffin bone on at least one limb. The anatomical appearance of the coffin bone of the donkey is similar to that of the horse. Ideally, the tip of the coffin bone should be angular and sharply contoured, whereby a slightly rounded or somewhat unclear contour should not be regarded as pathological. The extensor process should be sharply contoured. The parietal surface should be as smooth as possible, whereas a slightly irregular contour of the sole surface can still be considered normal. In summary, it can be said that radiologically detectable changes in the coffin bone are common even in a clinically healthy donkey population and that, contrary to empirical claims, their occurrence and severity correlate less with the age of the animals and more with their weight.

Keywords: X-Rays, equids, degenerative, radiometry, phalanx

Zitation: Wacker J, Schaus K, Büttner K, Röcken M, Bartmann CP (2024) Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter Berücksichtigung des Alters. *Pferdeheilk Equine Med* 40,375–386, DOI 10.21836/PEM20240411

Korrespondenz: PD Dr. med. vet. habil. Claus P. Bartmann, Klinik für Pferde – Chirurgie und Orthopädie mit Lehrschmiede der JLU Gießen, Frankfurter Straße 108, 35392 Gießen; claus.bartmann@vetmed.uni-giessen.de

Eingereicht: 6. April 2024 | Angenommen: 25. April 2024

## Einleitung

Die Zehe ist die am häufigsten röntgenologisch untersuchte anatomische Region beim Pferd.<sup>[1,2]</sup> Die in der Hufkapsel eingeschlossenen anatomischen Strukturen, insbesondere das Hufbein, sind einer klinischen Untersuchung nur sehr eingeschränkt und einer palpatorischen Untersuchung überhaupt nicht zugänglich.<sup>[3]</sup> Demnach ist die radiologische Untersuchung eine der wichtigsten und am weitesten verbreiteten Untersuchungsmethoden, um Lahmheiten im Bereich des Hufes zu evaluieren<sup>[4,5]</sup> sowie Pathologien des Hufbeins zu diagnostizieren und zu bewerten.<sup>[3]</sup>

Grundsätzlich ist die Kenntnis über die Normalbefunde stets unerlässlich, um abweichende Befunde erkennen und quantifizieren zu können.<sup>[3,6–9]</sup> Radiologische Veränderungen am Hufbein sind sowohl bei klinisch gesunden als auch bei lahmen Pferden ein häufiger Befund.<sup>[10]</sup> In der Literatur finden sich nur wenige Studien, die sich explizit auf die radiologische Anatomie des Hufbeins beim Pferd<sup>[3]</sup> beziehungsweise pathologische Veränderungen des Hufbeins im Sinne von Ostitis, Knochenauf- und -umbauprozessen sowie Deformation des Hufbeins beziehen.

Noch deutlich weniger wissenschaftliche Untersuchungen gibt es im Hinblick auf die Physiologie und Pathologie des Hufbeins beim Esel. Obwohl es unumstritten ist, dass die Normalanatomie der distalen Gliedmaße von Pferd und Esel sich in diversen Punkten nennenswert unterscheiden,<sup>[7,11–14]</sup> wurde bislang keine Studie zum Thema der radiologischen Veränderungen des Hufbeins beim Esel publiziert.

Um die pathologischen Veränderungen des Hufbeins auch beim Esel besser erkennen und beurteilen zu können, ist die Kenntnis über den Normalzustand bei diesen Equiden unumgänglich. Das Ziel dieser Studie ist es, die röntgenologische Normalanatomie des Hufbeins beim Esel zu beschreiben und das Auftreten von pathologischen Abweichungen, insbesondere in Abhängigkeit vom Alter des Tieres, zu untersuchen.

## Material und Methoden

### Probanden

In die Studie wurden in Deutschland gehaltene Esel unterschiedlichen Alters, Geschlechts und Rasse einbezogen, davon waren insgesamt 23 Stuten, zehn Wallache und neun Hengste. Das Alter der Esel lag zwischen 3 Wochen und 40 Jahren, das Gewicht zwischen 20 kg und 408 kg. Bei den hauptsächlich vertretenen Rassen handelte es sich um europäische Hausesel inklusive Zwergesel, Poitouesel sowie Kreuzungen aus den genannten Rassen.

Zu den Einschlusskriterien der Probanden gehörte, dass sie am Untersuchungstag allgemeines und ohne Nachweis einer klinisch im Schritt erkennbaren Lahmheit waren. Eine aktuelle Behandlung mit analgetisch-antiphlogistischen Wirkstoffen führte zum Ausschluss. Alle Esel waren barhufig und der Zustand ihrer Hufe erforderte eine reguläre Hufbearbeitung.

### Vorbereitung

Alle relevanten Daten wie Rasse, Alter, Geschlecht und Lebensbedingungen der Esel sowie etwaige Besonderheiten des einzelnen Tieres, beispielsweise frühere und aktuelle Begleiterkrankungen, wurden erfasst und dokumentiert. Um die Abhängigkeit der röntgenologischen Auffälligkeiten am Hufbein vom Alter der Probanden später besser auswerten zu können, wurden die Probanden in verschiedene Altersgruppen eingeteilt. Tiere mit einem Alter von bis zu 10 Jahren wurden als junge Esel (J) gewertet. Esel zwischen 10 und 20 Jahren wurden der Gruppe der mittelalten Esel (M) zugeordnet. Tiere mit einem Alter ab 20 Jahren hingegen wurden als alte Esel (A) angesprochen. Vor der Anfertigung der Röntgenbilder wurden die Tiere klinisch untersucht und gewogen. Unmittelbar vor der Röntgenuntersuchung erhielten alle Tiere eine Hufzubereitung entsprechend der Fesselstandstheorie durch die Hufschmiede der Klinik für Pferde – Chirurgie und Orthopädie mit Lehrschmiede der JLU Gießen.

## Röntgentechnik

Um vergleichbare und damit aussagekräftige Röntgenbilder erzielen zu können, wurde die radiologische Untersuchung nach einem standardisierten Verfahren durchgeführt. Eine 90°-Röntgenaufnahme der distalen Zehe aller vier Gliedmaßen wurde so angefertigt, wie es bereits durch andere Autoren umfassend beschrieben wurde.<sup>[2,15]</sup> Um den Tragrand auf eine Ebene mit dem Zentralstrahl zu bringen und die Röntgenkassette distal des Tragrandes platzieren zu können, ist es notwendig, je beide Vorder- beziehungsweise Hinterhufe des Probanden auf Blöcke zu stellen.<sup>[15]</sup> In diesem Fall wurden speziell hierfür angefertigten Holzblöcke (23 × 18 × 8 cm) verwendet. Es wurde darauf geachtet, dass eine möglichst vertikale Ausrichtung der Gliedmaßenachse und eine gleichmäßige Lastaufnahme der beiden Hufe erreicht wurde. In die Holzblöcke wurde vorab kranial sowie lateral eine 2 cm tiefe Kerbe eingefräst, in die eine 82 cm lange Holzleiste eingelegt wurde. Am Ende dieser Holzleiste wurde dann die Röntgenröhre positioniert, wodurch ein immer gleicher Objekt-Fokus-Abstand von 80 cm sowie eine exakt rechtwinkelige Ausrichtung des Zentralstrahls garantiert werden konnten. (Abb. 1) Die Einstellungen der Röntgenanlage (kV und mAs) mussten entsprechend der unterschiedlichen Größen und Gewichte der Probanden variiert werden.

## Beurteilung der Röntgenbilder

Die Röntgenbilder wurden im Rahmen dieser Studie ausschließlich im Hinblick auf Veränderungen des Hufbeins beurteilt. Eine weitere Auswertung der Bilder im Rahmen von



Abb. 1 Der frisch zubereitete Huf wird zentral auf dem eigens angefertigten Holzblock platziert. Die in die Kerbe eingelegte Holzlatte garantiert einen immer gleichen Objekt-Fokus-Abstand von 80 cm sowie eine korrekte 90° Ausrichtung des Zentralstrahls. Am Ende der Latte wird dann die Röntgenröhre positioniert, die Röntgenkassette wird auf den Boden aufgestellt und an den Block angelehnt, um sie so nah wie möglich an der Gliedmaße zu platzieren. | *The freshly prepared hoof is placed centrally on the wooden block made for this purpose. The batten inserted in the notch guarantees a distance of 80 cm. The X-ray tube is placed at the end of the batten in order to take the 90°-radiograph. The X-ray plate will be placed directly medial to the wooden block and is thus as close as possible to the limb.*

morphometrischen Messungen wird im Rahmen einer zusätzlichen Studie erfolgen.

Für die Auswertung im Hinblick auf Hufbeinveränderungen wurde angelehnt an eine Studie, die sich mit dem radiologischen Erscheinungsbild des Hufbeins beim Pferd beschäftigt,<sup>[3]</sup> ein Punktesystem angewandt. Auf jeder lateromedialen Röntgenaufnahme wurde das Hufbein nach vier verschiedenen Kriterien beurteilt und es wurden für jedes Kriterium Punkte vergeben. (Tab. 1) Zunächst einmal wurde die Hufbeinspitze im Hinblick auf eine scharfe Kontur beurteilt. 0 Punkte wurden in diesem Fall für eine glatte Oberfläche bei winkelliger Ausrichtung und ohne Hutkrempebildung (Abb. 2a) vergeben, wohingegen 1 Punkt bei Veränderungen der Hufbeinspitze im Sinne von unscharfer beziehungsweise abgerundeter Kontur der Hufbeinspitze, atrophischen und lytischen Prozessen in diesem Bereich oder Hutkrempebildung (Abb. 2b) vergeben wurde. Ebenso wurde der Processus extensorius im Hinblick auf das Vorliegen einer scharfen Kontur beurteilt, wobei 0 Punkte eine scharfe Begrenzung (Abb. 3a) und 1 Punkt eine unregelmäßige Kontur (Abb. 3b) bedeutete. Darüber hinaus wurden die Parietal- und die Sohlenfläche des Hufbeins im Hinblick auf ihre Kontur beurteilt: 0 Punkte wurden für eine glatte und scharfe Kontur vergeben (Abb. 4a bzw. 5a), 1 Punkt erhielten Hufbeine mit geringgradigen Veränderungen im Sinne einer rauen Knochenkante (Abb. 4b bzw. 5b), 2 Punkte wurden für mittelgradige Veränderungen mit Exostosen von bis zu 2 mm vergeben (Abb. 4c bzw. 5c) und 3 Punkte erhielten jene Hufbeine, die durch Exostosen von 3 mm oder mehr einen Verlust der normalen Kontur zeigten (Abb. 4d).

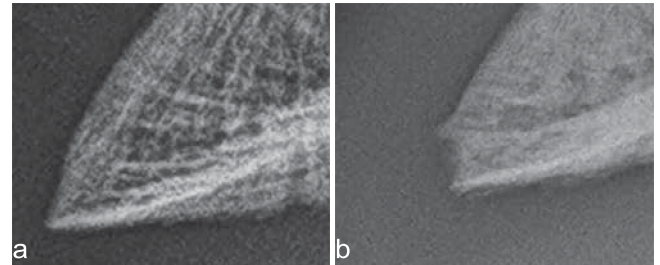


Abb. 2 a Diese Hufbeinspitze zeigt eine klar umschriebene, spitze Kontur – Bewertung mit 0 Punkten. b Die Hufbeinspitze dieses Esels ist nicht klar umschrieben. Die Kontur in diesem Bereich wirkt unregelmäßig – Bewertung mit 1 Punkt. | *a This coffin bone tip shows a clearly circumscribed, pointed contour – scored 0 points. b The points of the coffin bone of this donkey is not clearly defined. The contour in this area appears irregular – rating 1 point.*

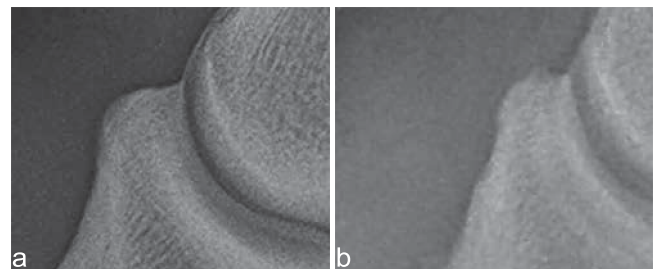


Abb. 3 a Der Processus extensorius dieses Hufbeins ist klar umschrieben – Bewertung mit 0 Punkten. b Dieses Hufbein zeigt einen unklar umschriebenen Processus extensorius. – Bewertung mit 1 Punkt. | *a The extensor process of this coffin bone is clearly contoured – scored 0 points. b This coffin bone shows an unclearly circumscribed extensor process – scored 1 point.*

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit besonderem Augenmerk auf eine mögliche Altersabhängigkeit der Veränderungen. Im Anschluss an eine rein deskriptive Auswertung einschließlich des Mittelwertes und der Standardabweichung ( $\bar{x} \pm sd$ ) der Veränderungen des Hufbeins wurde die Abhängigkeit der Befunde von Alter und vom Gewicht der Probanden mittels generalisierter Schätzgleichungen (Generalized Esti-

mation Equations/GEE-Modell) untersucht. Für die Kriterien a und b, für die es jeweils nur zwei Ausprägungen gab, wurde die binäre und für die Kriterien c und d mit mehreren Ausprägungen wurde die ordinale logistische Regression mit Messwiederholung gewählt. Das Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgelegt. Die Auswertung wurde mithilfe SAS® 9,4 berechnet.

Ergebnisse

Insgesamt wurden 160 Gliedmaßen von 42 Eseln untersucht. Von acht Hintergliedmaßen konnten aufgrund mangelnder Kooperationsbereitschaft der Probanden keine oder keine verwertbaren Röntgenaufnahmen angefertigt werden.

Die genaue Altersverteilung der Probanden ist in Abb. 6 dargestellt. Zu der Gruppe der unter zehn Jahre alten Esel wur-

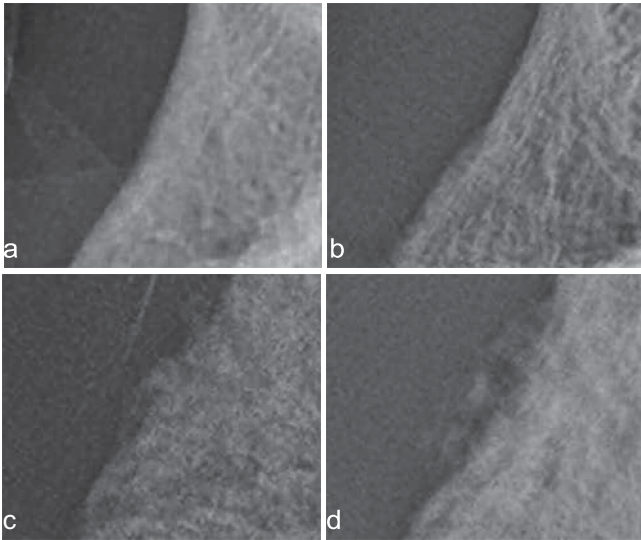


Abb. 4 a Die Parietalfläche dieses Hufbeins ist glatt und scharf konturiert. Sie weist keinerlei Unregelmäßigkeiten auf – Bewertung mit 0 Punkten. b Dieser Esel zeigt eine leicht irreguläre Kontur der Parietalfläche des Hufbeins im Sinne einer rauen Knochenkante – Bewertung mit 1 Punkt. c Die Parietalfläche dieses Hufbeins zeigt deutliche Auffälligkeiten mit Exostosenbildung bis zu 2 mm – Bewertung mit 2 Punkten. d Dieser Esel zeigt eine hochgradige Ostitis ossificans der Dorsalfläche des Hufbeins mit Exostosen von über 2 mm und einem Verlust der normalen Kontur des Hufbeins – Bewertung mit 3 Punkten. | a The parietal surface of this coffin bone is smooth and sharply contoured. It shows no irregularities – score 0 points. b This donkey shows a slightly irregular contour of the parietal surface of the coffin bone in the sense of a rough bony edge – evaluation with 1 point. c The parietal surface of this coffin bone shows clear abnormalities with exostosis formation up to 2 mm – rated with 2 points. d This donkey shows severe osteitis ossificans of the dorsal surface of the coffin bone with exostoses of more than 2 mm and a loss of the normal contour of the coffin bone – score 3.

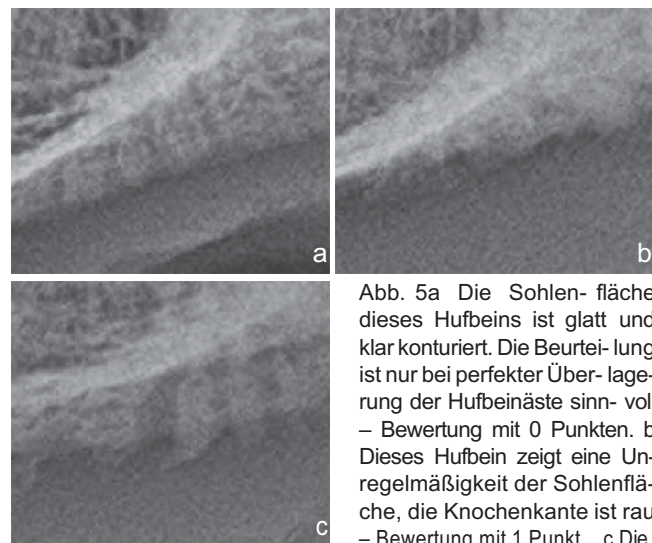


Abb. 5a Die Sohlenfläche dieses Hufbeins ist glatt und klar konturiert. Die Beurteilung ist nur bei perfekter Überlagerung der Hufbeinäste sinnvoll – Bewertung mit 0 Punkten. b Dieses Hufbein zeigt eine Unregelmäßigkeit der Sohlenfläche, die Knochenkante ist rau – Bewertung mit 1 Punkt. c Die Sohlenfläche dieses Hufbeins zeigt deutliche Abweichungen im Sinne von Ab- und Umbauprozessen am Knochen. Die Unregelmäßigkeiten sind > 2 mm. – Bewertung mit 2 Punkten. | a The sole surface of this coffin bone is smooth and clearly contoured. The assessment is only meaningful if the coffin bone branches are perfectly superimposed – score 0 points. b This coffin bone shows an irregularity of the sole surface, the bone edge is rough – rating 1 point. c The sole surface of this coffin bone shows clear deviations in the sense of degradation and remodeling processes on the bone. The irregularities are > 2 mm. – Rating with 2 points.

Tab. 1 Punktesystem für die Bewertung der Hufbeinveränderungen. Die Bewertung erfolgte nach 4 Kriterien: Kriterium a – Hufbeinspitze, Kriterium b – Processus extensorius, Kriterium c – Parietalfläche, Kriterium d – Sohlenfläche. | Scoring system for the evaluation of coffin bone changes. The evaluation was based on 4 criteria: Criterion a – coffin bone tip, criterion b – processus extensorius, criterion c – parietal surface, criterion d – sole surface.

	0 Punkte	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte
Kriterium a - Hufbeinspitze	Winkelig und scharf konturiert, keine Hutkrempebildung	Abgerundet oder unscharf konturiert, Atrophie, Osteolyse oder Hutkrempebildung		
Kriterium b - Processus extensorius	Scharfe Kontur	Unscharfe Kontur		
Kriterium c - Parietalfläche	Glatte und scharfe Kontur	Raue, etwas unregelmäßige Kontur	Exostosen bis 2 mm	Exostosen > 2 mm bis Konturverlust
Kriterium d - Sohlenfläche	Glatte und scharfe Kontur	Raue, etwas unregelmäßige Kontur	Unregelmäßigkeiten bis 2 mm	Unregelmäßigkeiten > 2 mm, Konturverlust

den 16 Tiere zugeordnet (J - Jung), 22 Esel waren von zehn bis 20 Jahre alt (M - Mittelalt) und vier Esel waren über 20 Jahre alt (A - Alt) und wurden dementsprechend den verschiedenen Altersgruppen zugeordnet. Wie im Teil „Material und Methoden“ beschrieben, wurden die Hufbeine der Probanden anhand von vier verschiedenen Kriterien (Hufbeinspitze, Processus extensorius, Parietalfläche und Sohlenfläche) nach einem Punktesystem bewertet. Die hierfür vergebenen Punktzahlen sind in Tab. 2 bzw. Abb. 7 dargestellt.

Insgesamt zeigten 41 von 42 Probanden, also 97,6 % röntgenologische Auffälligkeiten des Hufbeins an mindestens einer Gliedmaße und in Bezug auf mindestens eines der vier erhobenen Kriterien.

Sehr häufig waren Veränderungen der Hufbeinspitze. Insgesamt wiesen 95,2 % der 42 Tiere an mindestens einer Gliedmaße Veränderungen der Hufbeinspitze auf. Nur 45 der 160 und damit 28,1 % der Hufbeine wiesen eine scharf konturierte Hufbeinspitze auf. Davon waren 24 Vordergliedmaßen und 21 Hintergliedmaßen. Die restlichen 115 Hufbeine, also 71,9 %, wiesen Abweichungen von der beschriebenen Norm im Sinne von unscharfer beziehungsweise abgerundeter Kontur der Hufbeinspitze, atrophischen und lytischen Prozessen im Bereich der Hufbeinspitze oder Hutkrempebildung auf. Bei der Mehrheit dieser Veränderungen, nämlich bei 80 Gliedmaßen und damit 50 % handelte es sich um geringgradige Abweichungen im Sinne von unscharfer oder runder Konturierung der Hufbeinspitze. Bei 31 Gliedmaßen und damit bei 19,4 % konnten osteolytische Prozesse und eine Atrophie der Hufbeinspitze festgestellt werden. An vier Gliedmaßen und damit bei 2,5 % zeigte sich eine Hutkrempebildung.

Schwerwiegende Veränderungen der Hufbeinspitze, also Atrophie und Hutkrempebildung traten in der vorliegenden Studie häufiger an den Vordergliedmaßen als an den Hintergliedmaßen auf. Ein Tier zeigte außerdem an einer Vordergliedmaße bei scharfer Konturierung der Hufbeinspitze einen deutlichen zystoiden Defekt in diesem Bereich. Insgesamt zeigten sowohl das Alter als auch das Gewicht einen signifikanten Einfluss auf das Vorliegen von Veränderungen der Hufbeinspitze ( $p < 0,05$ ). Mit dem Alter der Probanden be-

steht in der vorliegenden Studie eine negative Korrelation, das bedeutet, wenn das Alter um 1 Jahr steigt, sinkt die Chance für den Nachweis einer Veränderung der Hufbeinspitze um den Faktor 0,92. Das mittlere Alter der Tiere mit Veränderungen der Hufbeinspitze an mindestens einer Gliedmaße betrug  $11,9 \pm 7,8$  Jahre, wohingegen das Durchschnittsalter derer ohne Veränderungen der Hufbeinspitze  $13 \pm 2,8$  Jahre betrug. Die Inzidenz der röntgenologischen Veränderungen des Hufbeins im Bereich der Hufbeinspitze in den verschiedenen Altersgruppen ist in Tab. 3 dargestellt.

Mit dem Gewicht hingegen besteht eine positive Korrelation, was mit steigendem Gewicht um 1 kg auch eine steigende Wahrscheinlichkeit auf eine Veränderung der Hufbeinspitze um den Faktor 1,02 bedeutet. Das mittlere Gewicht der Tiere mit Veränderungen der Hufbeinspitze an mindestens einer Gliedmaße betrug  $194,1 \pm 83,1$  kg, wohingegen das Gewicht der Tiere ohne Auffälligkeiten an der Hufbeinspitze im Mittel  $138,5 \pm 24,7$  kg betrug.

Seltener konnten Veränderungen des Processus extensorius nachgewiesen werden. Veränderungen im Bereich des Processus extensorius konnten bei 28,6 % der Probanden an mindestens einer Gliedmaße nachgewiesen werden. Eine unscharfe Kontur im Bereich des Processus extensorius zeigten nur 10,7 % der Hufbeine. Bei den restlichen 89,3 % war der Processus extensorius klar abgegrenzt und wies eine scharfe Kontur auf. Auch auf diese Veränderung hatte das Gewicht der Probanden einen signifikanten Einfluss ( $p < 0,05$ ). Mit dem Anstieg des Gewichts um 1 kg steigt die Wahrscheinlichkeit auf eine Veränderung des Processus extensorius um den Faktor 1,009. Das mittlere Gewicht der Tiere ohne Veränderungen betrug  $166,4 \pm 47,7$  kg, wohingegen die Tiere mit röntgenologischen Veränderungen des Processus extensorius an mindestens einer Gliedmaße im Mittel  $254,2 \pm 114,2$  kg wogen. Für das Alter der Tiere konnte kein signifikanter Einfluss auf das Vorliegen von radiologischen Veränderungen im Bereich des Processus extensorius des Hufbeins nachgewiesen werden ( $p = 0,3864$ ). Die Häufigkeit der radiologischen Veränderungen des Hufbeins im Bereich des Processus

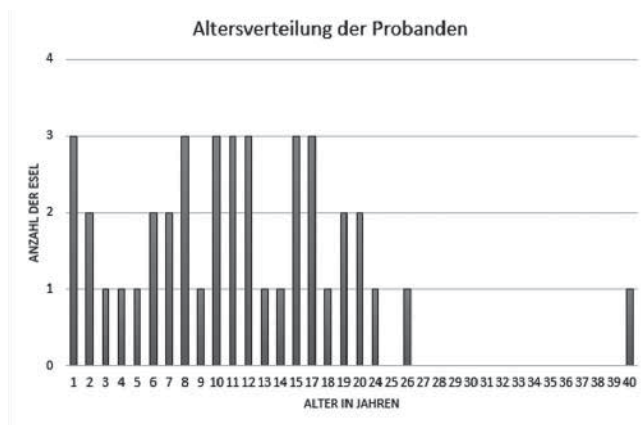


Abb. 6 Altersverteilung der 41 Probanden mit röntgenologischen Veränderungen des Hufbeins. | Age distribution of the 41 donkeys with radiological changes of the coffin bone.

#### VERGEBENE PUNKTZAHLEN FÜR DIE VERSCHIEDENEN BEWERTUNGSKRITERIEN

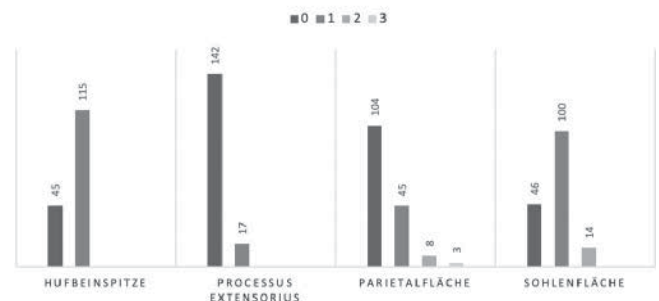


Abb. 7 Verteilung der vergebenen Punktzahlen für die verschiedenen Bewertungskriterien bei 160 Hufbeinen. Veränderungen der Hufbeinspitze sowie der Sohlenfläche waren sehr häufig, Veränderungen des Processus extensorius und der Parietalfläche seltener. | Distribution of the scores awarded for the various assessment criteria of 160 coffin bones. Changes to the tip of the coffin bone and the sole surface were very common, while changes to the extensor process and the parietal surface were less common.

extensorius in den verschiedenen Altersgruppen ist in Tab. 3 dargestellt.

Ebenso konnte kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen den genannten Veränderungen und der Tatsache, welche Gliedmaße untersucht wurde, festgestellt werden ( $p = 0,0962$ ).

Etwas häufiger wurden Auffälligkeiten im Bereich der Parietalfläche dokumentiert. Insgesamt zeigten 59,5 % der Tiere an mindestens einer Gliedmaße Veränderungen an der Parietalfläche. Eine glatte Kontur zeigten 104 Hufbeine (65 %). Bei 45 Hufbeinen (28,1 %) war die Dorsalfläche rau. Mittelgradige Veränderungen mit Exostosen bis 2 mm waren bei 8 Hufbeinen (5 %) festzustellen und 3 Hufbeine (1,9 %) zeigten hochgradige Veränderungen mit Exostosen von mehr als 3 mm bis hin zum Konturverlust. Auch für dieses Kriterium konnte kein signifikanter Zusammenhang mit dem Alter nachgewiesen werden ( $p = 0,2958$ ). Die Verteilung der vergebenen Punktzahlen für die entsprechenden Veränderungen des Hufbeins

im Bereich der Parietalfläche in den verschiedenen Altersgruppen ist in Tab. 3 dargestellt.

Mit dem Gewicht der Probanden bestand hingegen ein signifikanter Zusammenhang ( $p < 0,05$ ). Bei einem Anstieg des Gewichts um 1 kg steigt auch die Wahrscheinlichkeit einer Veränderung an der Parietalfläche um den Faktor 1,017. Während das mittlere Gewicht der Tiere ohne Auffälligkeiten an der Parietalfläche  $142 \pm 49,5$  kg betrug, wogen die Tiere mit Veränderungen der Parietalfläche an mindestens einer Gliedmaße im Mittel  $225,1 \pm 83,3$  kg. Ebenso wie das Gewicht hatte auch die Gliedmaße einen deutlichen Einfluss, denn die Vordergliedmaßen wiesen signifikant mehr Veränderungen auf als die Hintergliedmaßen ( $p < 0,05$ ). Vor allem die mittel- und hochgradigen Veränderungen traten überwiegend an den Hufbeinen der Vordergliedmaße auf (81,8 %).

In Bezug auf die Beurteilung der Sohlenfläche konnten zahlreiche Veränderungen festgestellt werden, 88,1 % der Tiere wiesen an mindestens einer Gliedmaße röntgenologische

Tab. 2 Ergebnisse der Bewertung der Hufbeinveränderungen nach dem Punktesystem. Für jede Veränderung sind Anzahl und der prozentuale Anteil an der Gesamtpopulation von 160 Hufbeinen dargestellt. | Results of the evaluation of coffin bone changes according to the scoring system. The number and percentage of the total population of 160 coffin bones are shown for each change.

Bewertung der Hufbeinspitze			
Definition	Punkte	Anzahl	Prozent
Winkelige, scharf konturierte Hufbeinspitze	0	45	28,1 %
Abgerundete oder unscharf konturierte Hufbeinspitze	1	80	50,0 %
Osteolyse/Atrophie der Hufbeinspitze	1	31	19,4 %
Hutkrempebildung	1	4	2,5 %
		160	100 %
Bewertung des Processus extensorius			
Definition	Punkte	Anzahl	Prozent
Scharf konturierter Processus extensorius	0	142	89,3 %
Unscharf definierter Processus extensorius	1	17	10,7 %
		159	100 %
Bewertung der Parietalfläche			
Definition	Punkte	Anzahl	Prozent
Glatt und scharf konturierte Parietalfläche	0	104	65 %
Raue, etwas unregelmäßige Parietalfläche	1	45	28,1 %
Exostosen bis max. 2 mm	2	8	5 %
Exostosen > 2 mm, Konturverlust	3	3	1,9 %
		160	100 %
Bewertung der Sohlenfläche			
Definition	Punkte	Anzahl	Prozent
Glatt und scharf konturierte Sohlenfläche	0	46	28,7 %
Raue, etwas unregelmäßige Sohlenfläche	1	100	62,5 %
Unregelmäßigkeiten bis max. 2 mm	2	14	8,8 %
Unregelmäßigkeiten > 2 mm, Konturverlust	3	0	0 %
		160	100 %

Auffälligkeiten an der Sohlenfläche auf. Nur 46 Hufbeine (28,8 %) zeigten eine wirklich scharfe Kontur der Sohlenfläche. Eine leicht unregelmäßige Sohlenfläche hatten 100 Hufbeine (62,5 %). Im Bereich der Sohlenfläche konnten bei 14 Gliedmaßen (8,8 %, 10 Vorder- und 4 Hintergliedmaßen) mittelgradige Veränderungen mit Unregelmäßigkeiten bis 2 mm festgestellt werden. Hochgradige Veränderungen der Kontur der Sohlenfläche konnten im vorliegenden Probandengut nicht festgestellt werden. In Bezug auf dieses Kriterium konnte ebenso wie für alle anderen ein signifikanter Einfluss des Gewichts festgestellt werden ( $p < 0,05$ ). Bei einem Anstieg des Gewichts um 1 kg steigt auch die Wahrscheinlichkeit auf Veränderungen an der Sohlenfläche um den Faktor 1,011. Die Tiere ohne Veränderungen an der Sohlenfläche wogen im Mittel  $123 \pm 61,9$  kg, die Probanden mit Veränderungen der Sohlenfläche an mindestens einer Gliedmaße hingegen wo-

gen durchschnittlich  $200,7 \pm 80,6$  kg. Im Gegensatz zum Gewicht, konnte ein signifikanter Einfluss auf Auffälligkeiten der Sohlenfläche des Hufbeins weder für das Alter ( $p = 0,1712$ ) der Esel noch für die Gliedmaße ( $p = 0,1432$ ) festgestellt werden. Die Häufigkeit der vergebenen Punktzahlen für die Auffälligkeiten des Hufbeins im Bereich der Sohlenfläche in den verschiedenen Altersgruppen ist in Tab. 3 dargestellt.

## Diskussion

Das Ziel dieser Studie war es, die röntgenologische Normalanatomie des Hufbeins beim Esel zu beschreiben und das Auftreten von pathologischen Abweichungen, insbesondere in Abhängigkeit vom Alter des Tieres, zu untersuchen. In Ermangelung spezifischer auf den Esel bezogener Studien, wird die

Tab. 3 Häufigkeit der vergebenen Punktzahlen für die Hufbeinveränderungen in den verschiedenen Altersgruppen bei 160 Hufbeinen von 42 Eseln – Angaben in Anzahl der Hufbeine sowie in Prozent. | Frequency of the scores awarded for the coffin bone changes in the various age groups for 160 coffin bones of 42 donkeys - figures in number of coffin bones and as a percentage.

Verteilung der Esel in den Altersgruppen								
	Anzahl der Tiere				Anzahl der Gliedmaßen			
Jung	16				59			
Mittel	22				85			
Alt	4				16			
Veränderungen der Hufbeinspitze								
	0 Punkte		1 Punkt		0 Punkte		1 Punkt	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Jung	17	28,8%	42	71,2%				
Mittel	22	25,9%	63	74,1%				
Alt	6	37,5%	10	62,5%				
Veränderungen des Processus Extensorius								
	0 Punkte		1 Punkt		0 Punkte		1 Punkt	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Jung	56	96,6%	2	3,4%				
Mittel	72	84,7%	13	15,3%				
Alt	14	87,5%	2	12,5%				
Veränderungen der Parietalfläche								
	0 Punkte		1 Punkt		2 Punkte		3 Punkte	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Jung	45	76,3%	12	20,3%	2	3,4%	0	0%
Mittel	51	60,0%	25	29,4%	6	7,1%	3	3,5%
Alt	8	50,0%	8	50,0%	0	0%	0	0%
Veränderungen der Sohlenfläche								
	0 Punkte		1 Punkt		2 Punkte		3 Punkte	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Jung	26	44,1%	32	54,2%	1	1,7%	0	0%
Mittel	15	17,6%	62	72,9%	8	9,4%	0	0%
Alt	5	31,3%	6	37,5%	5	31,3%	0	0%

folgende Diskussion sich auch auf wissenschaftliche Arbeiten zum eng verwandten Equiden Pferd beziehen.

Im Gegensatz zum Hufbein des Esels, wurde das Erscheinungsbild eines gesunden Hufbeins des Pferdes und dessen Lage innerhalb der Hornkapsel bereits in der einschlägigen Fachliteratur ausführlich beschrieben.<sup>[15]</sup> Die dorsale Kontur des Hufbeins sollte glatt<sup>[9,15]</sup> und röntgendicht sein. Eine eventuell auftretende leichte Konkavität der dorsalen Hufbeinkontur ist nicht zwingend als klinisch relevant anzusehen.<sup>[15]</sup> Manche Autoren beschreiben die physiologische Kontur des Hufbeins auch als elliptisch.<sup>[16]</sup> Die Hufbeinspitze sollte eine klare Kante beschreiben.<sup>[9,15]</sup> Die dorsale Hufwand und die dorsale Kontur des Hufbeins sollten beim gesunden Pferd ebenso wie beim Esel annähernd parallel zueinander sein, auch wenn ein etwas größerer Hufbeinwinkel dabei beim Esel nicht ungewöhnlich ist.<sup>[15]</sup> Die Sohlenfläche des Hufbeins sollte glatt sein und einen leicht positiven Winkel im Verhältnis zur Fußungsfläche beschreiben.<sup>[15]</sup> Die Angaben für diesen Palmarwinkel variieren zwischen 3–10°. <sup>[1,8,15,17,18]</sup> Da keine spezifisch auf den Esel bezogenen Arbeiten bezüglich des physiologischen radiologischen Bildes des Hufbeins existieren, wurden diese Eckdaten des Pferdes trotz der teilweise deutlichen Unterschiede in der Anatomie dieser beiden Equiden bislang auch auf den Esel angewandt.

Die korrekte lateromediale Röntgenaufnahme wird als Goldstandard für die Beurteilung anatomischer Veränderungen innerhalb der Hornkapsel angesehen.<sup>[19]</sup> Eine sorgfältige und einheitliche Röntgentechnik ist jedoch unerlässlich, um korrekte, auswertbare und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.<sup>[15,20]</sup> Bei der Beurteilung der Sohlenfläche des Hufbeins muss beispielsweise berücksichtigt werden, dass eine akzidentell leicht schräge Projektion zu einer inkompletten Überlagerung der Hufbeinäste und damit zu einer eingeschränkten Beurteilbarkeit führen kann.<sup>[3]</sup> Um möglichst korrekte und vergleichbare Röntgenbilder zu erzielen, wurden im Rahmen der eigenen Untersuchungen die Aufnahmen folglich nach einem standardisierten Verfahren angefertigt, welches sich bereits in den Arbeiten anderer Autoren bewährt hatte.<sup>[2,7,8,17–19]</sup> Aufgrund möglicher Abweichungen der Gliedmaßenachse und einer nicht ganz mittigen und geraden Platzierung der Hufe auf dem Holzblock, kann auch hiermit nicht immer eine exakte 90°-Projektion gewährleistet werden. Minimale Messabweichungen können entsprechend nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Die hier gewählte Auswertung mithilfe verschiedener Kriterien und eines Punktesystems bringt sowohl Vor- als auch Nachteile mit sich. Die Bepunktung wurde an ein System angelehnt an ein System, das von anderen Autoren zumindest in Teilen verwendet wurde.<sup>[3]</sup> Dennoch unterliegt auch diese Form der Beurteilung einer gewissen Subjektivität. Die Einteilung in Kategorien war jedoch sinnvoll und notwendig, um die Abhängigkeit der Veränderungen von Alter und Gewicht nachvollziehbar analysieren zu können. Darüber hinaus war die Auswertung in der vorliegenden Studie auf eine Standard-Röntgenprojektion, die lateromediale Aufnahme, beschränkt. Durch die Anfertigung und Auswertung weiterer Projektionen wie beispielsweise die Oxspringaufnahme, könnten unter Umständen zusätzliche Erkenntnisse im Hinblick auf die röntgenologische Anatomie des Hufbeins beim Esel gewonnen werden.

Als erstes Kriterium wurde die Kontur der Hufbeinspitze bewertet (Kriterium a). Mit 115 von 160 Hufbeinen (71,9 %) zeigte ein Großteil der beurteilten Hufbeine keine scharf konturierte, winkelige Hufbeinspitze ohne Hutkrempebildung sondern zumindest geringgradige Auffälligkeiten im Sinne einer abgerundeten oder unscharf konturierten Hufbeinspitze. In einer vergleichbaren Arbeit beim Pferd hingegen wiesen nur 27,4 % der Hufbeine eine raue Kontur der Hufbeinspitze auf.<sup>[3]</sup> Dies entspricht in etwa dem Prozentsatz, der in der vorliegenden Studie deutliche Veränderungen der Hufbeinspitze, also atrophisch-lytische Veränderungen oder Hutkrempebildung zeigte (35 von 160 Hufbeinen/21,9 %). Entsprechend der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit, muss beim Esel in Bezug auf die Beurteilung der Hufbeinspitze unbedingt zwischen geringgradigen Veränderungen im Sinne einer abgerundeten oder etwas unscharf konturierten Hufbeinspitze und schwerwiegenderen Veränderungen im Sinne von Atrophie und Lyse oder Hutkrempebildung unterschieden werden. Veränderungen der Kontur der Hufbeinspitze wurden entsprechend im Vergleich zum Pferd in der untersuchten Eselpopulation vergleichsweise häufig vorgefunden.

Mit 142 Hufbeinen, und damit 89,3 %, zeigte die überwiegende Mehrzahl der Hufbeine einen scharf konturierten Processus extensorius (Kriterium b). Unregelmäßigkeiten in diesem Bereich waren ein eher seltener Befund (17 Hufbeine, 10,7 %). Diese Ergebnisse stimmen mit denen anderer Autoren überein, *Rendano* und *Grant* beispielsweise fanden beim Pferd ebenfalls nur in 9,67 % der Fälle einen rauen Processus extensorius.<sup>[3]</sup> Aus wissenschaftlichen Arbeiten beim Pferd ist bekannt, dass der Processus extensorius eine variable Form, beispielsweise im Sinne von einer abgerundeten oder doppelspitzigen Kontur aufweisen kann.<sup>[3]</sup> Anhand der eigenen Auswertungen stellte sich die Form des Processus extensorius beim Esel als weniger variabel dar. Unter Einbeziehung der bereits vorliegenden Literatur und der Ergebnisse der aktuellen Studie kann die scharfe Konturierung des Processus extensorius des Hufbeins beim Esel als anatomischer Normalbefund angesehen werden.

Selten zeigten sich in der vorliegenden Studie Veränderungen an der Parietalfläche des Hufbeins (Kriterium c). Eine glatte Parietalfläche zeigten 104 von 160 Hufbeinen und damit 65 %. Gering- bis hochgradige Veränderungen der Dorsalfläche zeigten 56 Hufbeine und damit 35 %. Generell kann eine irreguläre, raue Oberfläche der Dorsalfläche auf Entzündungsprozesse hinweisen.<sup>[9]</sup> Ein häufiger Befund ist beispielsweise eine verstärkte Mineralisierung mittig auf der Dorsalfläche des Hufbeins, die in geringgradiger Ausprägung als Zufallsbefund auftritt, bei einer stärkeren Ausprägung jedoch durchaus als Lahmheitsursache in Betracht gezogen werden muss.<sup>[10]</sup> Entsprechend der Ergebnisse der vorliegenden Studie und nach Betrachtung der Ergebnisse anderer Arbeiten, ist beim Esel eine glatte Dorsalfläche des Hufbeins als physiologisch anzusehen, während Rauheiten und Exostosen im Bereich der Parietalfläche als pathologisch zu werten sind und als mögliche Ursache klinischer Symptome in Betracht gezogen werden müssen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie decken sich im Hinblick auf Kriterium d – Rauheit der Sohlenfläche – mit diesen Ergebnissen anderer Autoren,<sup>[3]</sup> die in Studien an Pferden

ebenfalls überwiegend milde Rauheiten an der Sohlenfläche des Hufbeins feststellen konnten. In einer Studie an klinisch gesunden und an chronischer Hufrehe erkrankten Mammuteseln hatten ebenfalls fast alle Probanden eine unregelmäßige Sohlenfläche des Hufbeins.<sup>[21]</sup> In der vorliegenden Studie zeigten 100 von 160 und damit 62,5 % eine geringgradig raue Sohlenfläche. Nach Betrachtung dieser Befunde und unter Einbeziehung der Ergebnisse anderer Autoren ergeben sich Hinweise darauf, dass eine milde Rauheit an der Sohlenfläche des Hufbeins ähnlich des Pferdes auch beim Esel als normaler und klinisch in der Regel nicht relevanter röntgenologischer Befund anzusehen ist.

Die statistische Auswertung ergab in Bezug auf alle Kriterien einen positiven Zusammenhang zwischen dem Auftreten von radiologischen Veränderungen des Hufbeins und dem Gewicht der Probanden. Eine mögliche Erklärung hierfür ist sicher die aus einem höheren Gewicht resultierende einwirkende Kraft auf die Hufbeinspitze. Das Phänomen von druckbedingten Umbauprozessen ist bei verschiedenen Erkrankungen wie beispielsweise auch bei der chronischen Hufrehe beschrieben.

Zudem zeigte die statistische Auswertung, dass Veränderungen an der Parietalfläche signifikant häufiger an der Vordergliedmaße auftreten ( $p < 0,05$ ). Auch wenn kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit Veränderungen der Hufbeinspitze im Allgemeinen nachgewiesen werden konnte, so traten schwerwiegendere Veränderungen der Hufbeinspitze im Sinne von Atrophie, Lyse oder Hutkrempebildung ebenfalls überwiegend an der Vordergliedmaße auf (23/35 Gliedmaßen, 65,7 %). Aufgrund der Anatomie und Biomechanik des Pferdes, besteht eine Verschiebung des Schwerpunktes nach kranial, wodurch die Vordergliedmaßen bei geringerer Bemuskelung einen höheren Anteil des Körpergewichts tragen, nämlich ca. 58 %.<sup>[22]</sup> Es ist bereits statistisch nachgewiesen worden, dass die Vordergliedmaßen insgesamt häufiger von Sehnen-, Muskel- und Gelenkerkrankungen betroffen sind.<sup>[22]</sup>

In der Praxis wird die Hypothese vertreten, dass röntgenologisch darstellbare Veränderungen des Hufbeins alleine altersassoziiert entstehen und mit steigendem Alter des Esels zunehmen.

In der aktuellen Studie konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen den röntgenologischen Auffälligkeiten des Hufbeins und dem Alter des Tieres festgestellt werden. Obwohl mittel- und hochgradige Veränderungen des Hufbeins überwiegend bei mittelalten und alten Eseln festgestellt wurden, ergab sich nicht durchgängig eine Zunahme der Häufigkeit von Befunden von jung nach alt. Statistisch zeigte sich in der vorliegenden Studie sogar insofern eine negative Korrelation, dass bei Anstieg des Alters um ein Jahr die Chance für den Nachweis einer Veränderung der Hufbeinspitze um den Faktor 0,92 absank.

Es besteht dementsprechend kein alleiniger kausaler Zusammenhang der Veränderungen mit dem Alter der Tiere. Im Gegenteil fällt sogar auf, dass einzelne röntgenologische Befunde im Vergleich zu den alten Tieren gehäuft in der Gruppe der jungen oder mittelalten Esel beobachtet werden konnten. Ein Grund hierfür könnte sein, dass die Tiere mit deutlichen

röntgenologischen Veränderungen entweder im Alter nicht mehr klinisch gesund und im Schritt lahmfrei sind – demzufolge also auch nicht den Einschlusskriterien der vorliegenden Studie entsprechen – oder aber auch krankheitsbedingt kein so hohes Alter erreichen. Von einer Studie am nahe verwandten Equiden Pferd ist bekannt, dass bis zu 50 % der Abgänge durch Lahmheiten bzw. orthopädische Probleme verursacht werden.<sup>[23]</sup> Obwohl keine vergleichbare Studie an Eseln existiert, ist davon auszugehen, dass auch bei dieser Tierart orthopädische Probleme einen nicht unerheblichen Anteil an allen Todesursachen haben. Auf die wesentliche klinische Relevanz von Hufproblemen beim Esel, besonders auch der Hufrehe, wurde ohnehin bereits hingewiesen.<sup>[12,14,24]</sup> Entsprechend besitzt ein älterer Esel auch eine höhere Wahrscheinlichkeit, eine Huferkrankung zu erleiden, die mit röntgenologisch nachweisbaren Veränderungen des Hufbeins einhergeht.

Grundsätzlich werden röntgenologisch darstellbare Veränderungen am Hufbein durch verschiedene Pathologien des Hufes oder in deren Verlauf auffällig. Dazu zählen Zusammenhangstrennungen im Sinne von Frakturen, Folgen aseptischer oder septischer Entzündungen der anliegenden Lederhäute, raumfordernde Prozesse oder Insertionstendinopathien.<sup>[25]</sup> Dies gilt neben dem Pferd grundsätzlich auch für den Esel.<sup>[12,14,24]</sup> Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Hufbeine klinisch gesunder Esel radiologisch untersucht. Trotz der Tatsache, dass ausschließlich klinisch gesunde und im Schritt lahmfreie Tiere in die Untersuchung einbezogen wurden, konnten zahlreiche röntgenologische Veränderungen festgestellt werden. Aus früheren Untersuchungen bei Pferden ist bekannt, dass gewisse Abweichungen von der beschriebenen normalen Form des Hufbeins als Variation auftreten können und nicht zwingend als klinisch relevant anzusehen sind.<sup>[15]</sup> Am Hufbein können sowohl bei klinisch gesunden als auch bei lahmen Pferden relativ häufig pathologische Abweichungen festgestellt werden.<sup>[10]</sup> Als Ursache für Veränderungen kommen Fehlstellungen ebenso wie krankhafte Prozesse infrage.

Im Hinblick auf das Auftreten radiologischer Auffälligkeiten des Hufbeins scheinen auch die Hufform und -stellung eine wichtige Rolle zu spielen. Von Untersuchungen beim Pferd ist bekannt, dass insbesondere Tiere mit Bockhuf oftmals radiologische Veränderungen des Hufbeins aufweisen.<sup>[10]</sup> Bei betroffenen Pferden ist das Auftreten von Knochenabbauprozessen an der Sohlenfläche des Hufbeins im Bereich der Zehenspitze und damit einhergehend Knochenneubildung an der Dorsalfäche des Hufbeins beschrieben.<sup>[10]</sup> Der Bockhuf des Pferdes ist definiert als stumpf gewinkelter Huf mit einem Vorderwandwinkel von mindestens 60°, in Extremfällen von bis zu 90°,<sup>[25–27]</sup> sowie einer charakteristisch im Hufgelenk nach vorne gebrochenen Zehennachse.<sup>[26]</sup> Darüber hinaus zeigen Bockhufe typischerweise verhältnismäßig hohe Trachten sowie eine stark gewölbte Sohle ohne eine Belastung des Strahls.<sup>[25,27]</sup> Weiterhin kann ein Bockhuf mit einer konkaven Form der dorsalen Hufwand assoziiert sein.<sup>[25]</sup> Vom Bockhuf abgegrenzt werden müssen die verschiedenen Formen des Stelzfußes, der durch eine angeborene oder erworbene Verkürzung der Beugesehnen entsteht und in dessen Konsequenz sich ein Bockhuf entwickeln kann.<sup>[25,27]</sup>

Im Vergleich zum Pferd weisen Esel einen deutlich steiler gewinkelten Huf auf. Beim Esel ist die dorsale Hufwand 5–10°

steiler als beim regelmäßigen Huf des Pferdes,<sup>[13]</sup> wengleich von verschiedenen Autoren Hufwandwinkel an der Vordergliedmaße zwischen 41 und 78° gemessen wurden.<sup>[7,24,28]</sup> Ein durchschnittlicher Zehenwandwinkel von 59–62° wird als normalanatomisch beschrieben.<sup>[24,28]</sup>

Der Grenzwert für den Zehenwandwinkel für den Bockhuf beim Pferd liegt mit 60° mindestens 5–15° über dem für den Vorderhuf des Pferdes beschriebenen Normwert von 45–55°.<sup>[27]</sup> Die Referenzwerte des Pferdes können aufgrund der speziesbedingten anatomischen Abweichung nicht uneingeschränkt auf den Esel übertragen werden, sodass die Definition des Bockhufes beim Esel folglich entsprechend angepasst werden muss.

Überträgt man die genannten Kriterien des Bockhufes auf die Normalwerte beim Esel, so müsste beim Esel ein Zehenwandwinkel von mindestens 70° in Kombination mit einer nach vorne gebrochenen Zehenachse vorliegen.

Eine nach vorne gebrochene Zehenachse wird von manchen Autoren beim Esel als normal angesehen.<sup>[12,13]</sup> Ein stumpf gewinkelter Huf kombiniert mit einer Hyperflexion im Hufgelenk sollte aber auch beim Esel nicht als physiologisch, sondern als angeborene oder erworbene pathologische Abweichung im Sinne eines Bockhufes betrachtet werden.<sup>[24]</sup>

Neben einer abweichenden Hufform und dadurch veränderten Druckverhältnissen, kommen auch weitere pathologische Zustände des Hufes als Ursache radiologischer Auffälligkeiten des Hufbeins infrage. Die Hufbeine von Patienten mit Hufbeinostitiden zeigen bekanntermaßen ein sehr deutlich von der beschriebenen Norm abweichendes radiologisches Bild. Diese Erkrankung führt zu einer aufgerauten Sohlenfläche, erweiterten Gefäßkanälen<sup>[3,10]</sup> sowie dem generellen Verlust von Röntgendichte. Hufbeinostitis kann möglicherweise, muss aber nicht zwingend, mit weiteren klinischen Symptomen einhergehen.<sup>[3]</sup> Ein typisches klinisches Symptom bei Hufbeinostitis ist eine Lahmheit, die insbesondere auf hartem und unebenem Boden deutlich wird.<sup>[29]</sup> Hufbeinostitiden sind überwiegend die Folge primärer aseptischer oder septischer Entzündungen der Lederhäute und können mit Knochenappositionen oder auch Substanzverlusten im Sinne von Osteolyse einhergehen. Auch im Rahmen einer chronischen Hufrehe können röntgenologisch darstellbare Veränderungen des Hufbeins entstehen.<sup>[30–32]</sup> Etwa 80 % der Pferde mit klinisch sichtbarer Hufrehe zeigen radiologische Veränderungen bezüglich der Form und Struktur des Hufbeins.<sup>[33]</sup> Grund dafür ist, dass es bei chronischer Hufrehe nicht nur zu Veränderungen der Verhältnisse zwischen den knöchernen Strukturen untereinander und zur Hornkapsel im Sinne einer Hufbeinrotation und -absenkung mit vergrößerter Rehestrecke, einer verdickten dorsalen Hufwand und einer verminderten Sohlendicke kommt,<sup>[15]</sup> sondern auch zu morphologischen Veränderungen des Hufbeins selbst,<sup>[19]</sup> dem sogenannten „Digital Phalanx Remodelling“.<sup>[30]</sup> Die Lageveränderung des Hufbeins ist abhängig von Ausmaß und Lokalisation des Funktionsverlustes des Aufhängeapparates. Bei einer Schwächung im distalen Bereich kommt es zu einer Hufbeinrotation, während durch einen Funktionsverlust auf der gesamten Parietalfläche eine Hufbeinabsenkung entsteht.<sup>[33]</sup> Durch die daraus resultierenden, erhöhten einwirkenden Kräfte, kann es zu Umbauprozessen

am Knochen<sup>[34]</sup> mit Knochenresorption und Knochenneubildung kommen.<sup>[10]</sup> Typisch ist eine Demineralisierung der Sohlenfläche des Hufbeins und die sogenannte „Hutkrempebildung“<sup>[15,30,31]</sup> die durch dauerhaft erhöhten Druck im Bereich der Hufbeinspitze und eine damit einhergehende verminderte Sohlenhornproduktion entsteht.<sup>[15,30,33]</sup> Die morphologischen Veränderungen entstehen durch eine chronische Ostitis, die auf der Parietalfläche als sogenannte Ostitis ossificans zu Knochenneubildung und auf der Sohlenfläche als sogenannte Ostitis rarefaciens zu Knochenabbau führt.<sup>[31,33]</sup> Bei der Ostitis ossificans lässt das radiologische Bild Rückschlüsse auf den zeitlichen Ablauf zu, da aktive Prozesse sich durch unregelmäßige, raue Hyperostosen kennzeichnen, die bei weniger aktiven Prozessen oftmals bereits glatter geworden sind.<sup>[33]</sup> Die Ostitis rarefaciens der Sohlenfläche wird sichtbar als zerklüfteter und aufgelockerter Sohlenrand mit Aufhellungen in der Peripherie.<sup>[33]</sup> Umbauprozesse und Lyse am Knochen, die im Rahmen einer chronischen Hufrehe entstehen können<sup>[34]</sup> führen dazu, dass sich unwiderruflich eine refraktäre Phase der Erkrankung entwickelt.<sup>[7]</sup> Die Veränderungen, die röntgenologisch am Knochen sichtbar sind, sind irreversibel und jede anatomische Veränderung beeinflusst Motorik und Funktion.<sup>[19]</sup> Nichtsdestotrotz korreliert die Schwere der radiologischen Befunde nicht zwingend mit der Ausprägung der klinischen Symptome.<sup>[35]</sup> Durch den Substanzverlust am Knochen reduziert sich jedoch auch die Ansatzfläche für den Hufbeinträger<sup>[30,34]</sup> und führt zu einem weiter voranschreitenden Verlust der Stabilität der Verankerung des Hufbeins. Das Ausmaß der so entstehenden Instabilität zwischen Hufbein und Hornkapsel ist der wichtigste Faktor bei der chronischen Hufrehe.<sup>[35]</sup> Es ist wichtig, septisch bedingte Veränderungen des Hufbeins von denen, die durch veränderte Druckverhältnisse im Rahmen einer chronischen Hufrehe entstanden sind, abzugrenzen.<sup>[30]</sup> Bei der Beurteilung der radiologischen Veränderungen muss der Untersuchende immer bedenken, dass eine röntgenologische Auffälligkeit nicht zwingend mit einem aktiven Entzündungsprozess einhergeht.<sup>[10]</sup>

In der vorliegenden Studie konnte festgestellt werden, dass in einer Population klinisch gesunder und im Schritt lahmfreier Esel durchaus röntgenologische Veränderungen des Hufbeins dargestellt werden können und dass diese Veränderungen mit steigendem Gewicht zunehmen. Auch beim Pferd können sowohl bei klinisch gesunden als auch bei lahmen Individuen relativ häufig pathologische Abweichungen des radiologischen Bildes des Hufbeins festgestellt werden.<sup>[10]</sup> Beim Esel kommt hinzu, dass aufgrund des stoischen Naturells der Tiere und der hohen Schmerztoleranz,<sup>[14]</sup> orthopädische Erkrankungen oft lange keine sichtbare Lahmheit verursachen. Esel werden hierzulande überwiegend als Freizeittiere genutzt und im Gegensatz zum Pferd in der Regel überwiegend im Schritt bewegt. Somit wäre davon auszugehen, dass beim Esel mindestens eine mittelgradige Lahmheit vorliegen muss, um klinisch erkannt zu werden. Dementsprechend werden krankhafte Zustände beim Esel oft erst verhältnismäßig spät diagnostiziert und therapiert. Umso wichtiger sind die Erkenntnisse dieser Arbeit, die die röntgenologischen Normalbefunde des Hufbeins beim Esel beschreiben und damit auch die Erkennung und Beurteilung pathologischer Abweichungen erleichtern.

Das Ziel dieser Studie war es, die röntgenologische Normalanatomie des Hufbeins beim Esel zu beschreiben und das

Auftreten von pathologischen Abweichungen, insbesondere in Abhängigkeit vom Alter des Tieres, zu untersuchen. Das Hufbein des Esels ähnelt dem des Pferdes, wobei eine abgerundete oder unscharf konturierte Hufbeinspitze ebenso wie eine etwas raue Sohlenfläche als physiologisch angesehen werden können. Die Dorsalfläche und der Processus extensorius hingegen sollten glatt und scharf konturiert sein.

Es konnte keine Abhängigkeit zwischen der Häufigkeit von Röntgenbefunden am Hufbein und dem zunehmenden Alter der Tiere nachgewiesen werden. Vielmehr sind die Veränderungen mit einem steigenden Körpergewicht positiv korreliert. Schwerwiegende Veränderungen und Veränderungen an der Parietalfläche treten signifikant häufiger an der Vorder- als an der Hintergliedmaße auf ( $p < 0,05$ ).

Entsprechend der hier vorliegenden abweichenden Befunde muss davon ausgegangen werden, dass ursächlich Pathologien des Hufes beteiligt waren. Die Befunde waren dabei überwiegend typisch für die Auswirkungen verschiedener Formen von Lederhautentzündungen, in erster Linie im Sinne der chronischen Hufrehe.

Die vorliegenden Erkenntnisse können bei der orthopädischen Untersuchung von Eseln unterstützend verwertet werden und gerade auch die Auswertung der bildgebenden Untersuchung des Hufes erleichtern.

#### Danksagung

Unser Dank gilt allen Einrichtungen sowie Privatpersonen, die uns Ihre Esel als Probanden zur Verfügung gestellt haben und die uns auch bei der Anfertigung der Röntgenbilder so tatkräftig unterstützt haben: Dr. Barbara Bach und der Zoo Heidelberg, Anne-Marie Bank-Lauer und der Deutsche Eselzuchtverband, Dr. Anabell Jandowsky und der Tierpark Arche Warder, Dr. Hermann Will und Dr. Kathrin Baumgärtner aus dem Tiergarten Nürnberg sowie Dr. Uta Westerhüs und der Opel-Zoo Kronberg im Taunus. Ein ebenso großer Dank geht selbstverständlich an unsere Kollegen aus der Lehrschmiede für die fachkundige Hufzubereitung unserer Probanden, insbesondere an Melanie Striebinger, Javier Palancares und Kai Wörtge.

#### Literatur

- Colles CM (1983) Interpreting radiographs 1: the foot. *Equine Vet J* 15, 297–303; DOI 10.1111/j.2042-3306.1983.tb01804.x
- Kummer M, Lischer C, Ohlert S, Vargas J, Auer J (2004) Evaluation of a standardised radiographic technique of the equine hoof. *Schweiz Arch Tierheilkd* 146, 507–514; DOI 10.1024/0036-7281.146.11.507
- Rendano CR, Grant B (1978) The Equine Third Phalanx: Its Radiographic Appearance 1. *Vet Radiol* 19, 125–135; DOI 10.1111/j.1740-8261.1978.tb01152.x
- El-Shafae EA, Salem MG, Mosbah E, Zaghoul AE (2018) Morphometric evaluation of relevant radiographic parameters of the forefoot of clinically normal donkeys (*Equus asinus*). *Hellenic Vet Med Soc* 68, 467–478; DOI 10.12681/jhvms.15543
- White JM, Mellor DJ, Duz M, Lischer CJ, Voute LV (2008) Diagnostic accuracy of digital photography and image analysis for the measurement of foot conformation in the horse. *Equine Vet J* 40, 623–628; DOI 10.2746/042516408X313625
- Linford RL, O'Brien TR, Trout DR (1993) Qualitative and morphometric radiographic findings in the distal phalanx and digital soft tissues of sound thoroughbred racehorses. *Am J Vet Res* 54, 38–51, PMID 8427471
- Collins SN, SJ, Murray RC, Burden F, Trawford A (2011) Radiological anatomy of the donkey's foot: objective characterization of the normal and laminitic donkey foot. *Equine Vet J* 43, 478–86; DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00312.x
- Masoudifard M, Vajhi A, Mansouri S, Molazem M, Bahonar A, Zehtabvar O (2014) Radiographic measurements of front feet of the sound Akhal-Teke horses. *Irani J Vet Med* 8, 21–25; DOI 10.22059/IJVM.2014.50559
- Park RD (1989) Radiographic examination of the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract* 5, 47–66; DOI 10.1016/s0749-0739(17)30603-x
- Dyson S (2011) Nonseptic osteitis of the distal phalanx and its palmar processes. *Equine Vet Educ* 23, 472–485; DOI 10.1111/j.2042-3292.2011.00261.x
- Burnham SL (2002) In Depth: Anatomical Differences of the Donkey and Mule, *Am Assoc Equine Pract Ann Conv* 48, 102–109
- Crane M (2007) Hoof Disorders of the Donkey. In: 10<sup>th</sup> Geneva Congress of Equine Medicine and Surgery, 11.-13.12.2007, Geneva, Switzerland
- Crane M, Evans L (2018) The clinical companion of the donkey. The donkey sanctuary, Sidmouth
- Thiemann A, Rickards K (2013) Donkey hoof disorders and their treatment. *In Pract* 35, 134–140; DOI 10.1136/inp.f1074
- Butler JA, Colles CM, Dyson SJ, Kold SE, Poulos PW (2017) The foot. In: *Clinical Radiology of the Horse*, 4<sup>th</sup> Ed., Butler JA (Ed.) John Wiley & Sons, Chichester, 67–160
- Koblik PD, O'Brien TR, Coyne CP (1988) Effect of dorsopalmar projection obliquity on radiographic measurement of distal phalangeal rotation angle in horses with laminitis. *J Am Vet Med Assoc* 192, 346–349
- Dyson SJ, Tranquille CA, Collins SN, Parkin TDH, Murray RC (2011) An investigation of the relationships between angles and shapes of the hoof capsule and the distal phalanx. *Equine Vet J* 43, 295–301; DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00162.x
- Cripps PJ, Eustace RA (1999) Radiological measurements from the feet of normal horses with relevance to laminitis. *Equine Vet J* 31, 427–432; DOI 10.1111/j.2042-3306.1999.tb03844.x
- Collins SN, Dyson SJ, Murray RC, Newton JR, Burden F, Trawford AF (2012) Development of a quantitative multivariable radiographic method to evaluate anatomic changes associated with laminitis in the forefeet of donkeys. *Am J Vet Res* 73, 1207–1218; DOI 10.2460/ajvr.73.8.1207
- Craig J, Craig M, Weltner TN (2001) Quantifying conformation of the equine digit from lateromedial radiographs. *Proceed Assoc Equine Sports Med* 21, 20–25
- Walker M, Taylor T, Slater M, Hood D, Weir V, Elslander J (1995) Radiographic appearance of the feet of mammoth donkeys and the finding of subclinical laminitis. *Vet Radiol Ultrasound* 36, 32–37; DOI 10.1111/j.1740-8261.1995.tb00210.x
- Wieland M, Schebsdat C, Rentsch J (2021) Gewichtsverteilung und Belastung. In: Wieland M, Schebsdat C, Rentsch J (Hrsg) *Bewegungsapparat Pferd*. 3. Aufl., Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 65
- Von Butler I, Armbruster B (1984) Population structure and reasons for slaughter of horses. *Dtsch Tierarzt Wschr.* 91 (330–331)
- Bartmann CP, Pietta D (2020) Hufpflege und Hufbeschlag bei Esel und Maultier. In: Litzke LF (Hrsg.) *Der Huf. Lehrbuch des Hufbeschlags*, 7. Aufl., Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 358–365

- 25 Brehm W, Hagen J, Litzke LF (2017) Krankheiten der distalen Gliedmaße. In: Brehm W, Gehlen H, Ohnesorge B, Wehrend A (Hrsg.) Handbuch Pferdepraxis, 4. Aufl., Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 1002–1099
- 26 Baxter GM (2020) Examination for Lameness: History, Visual exam and conformation. In: Adams and Stashak's Lameness in Horses, 7<sup>th</sup> Ed., Baxter GM (Ed.), John Wiley & Sons, Chichester, 67–188
- 27 Wissdorf H, Otto B, Geburek F, Fürst A, Hertsch B, Keller H (2010) Hufbereich. In: Wissdorf H, Gerhards H, Huskamp B, Deegen E (Hrsg.) Praxisorientierte Anatomie und Propädeutik des Pferdes, 3. Aufl., Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 375–407
- 28 Vilsmaier A (2005) Untersuchungen zur Hufform und zum Hornwachstum beim Esel (*Equus asinus*). Diss Med Vet Leipzig.
- 29 Röcken M, Stadtbäumer G, Becker M (2018) Differentialdiagnostische Aufarbeitung der Gliedmaßenabschnitte anhand der Klinik und diagnostischen Anästhesien. In: Röcken M, Stadtbäumer G, Becker M (Hrsg.) Lahmheitsuntersuchung beim Pferd, 1. Aufl., Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 99–171
- 30 Herthel D, Hood DM (1999) Clinical presentation, diagnosis, and prognosis of chronic laminitis. *Vet Clin North Am Equine Pract* 15,375–394; DOI 10.1016/s0749-0739(17)30151-7
- 31 Berndt A, Brehm W, Litzke LF, Rau B, Striebinger M (2020) Hufbeschlag beim erwachsenen Pferd inkl. orthopädischer Beschläge. In: Litzke LF (Hrsg.) Der Huf. Lehrbuch des Hufbeschlags, 7. Aufl., Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 196–311
- 32 Sherlock C, Parks A (2013) Radiographic and radiological assessment of laminitis. *Equine Vet Educ* 25, 524–535; DOI 10.1111/eve.12065
- 33 Hemker S, Hertsch B (2002) Radiologic evaluation of chronic founders. *Prakt Tierarzt* 83, 610–617
- 34 Collins SN, van Eps AW, Pollitt CC, Kuwano A (2010) The lamellar wedge. *Vet Clin North Am Equine Pract* 26, 179–195; DOI 10.1016/j.cveq.2010.01.004
- 35 Hunt RJ, Wharton RE (2010) Clinical presentation, diagnosis, and prognosis of chronic laminitis in North America. *Vet Clin North Am Equine Pract* 26, 141–153; DOI 10.1016/j.cveq.

Publikation 2:

Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys  
with emphasis on the front limbs



## OPEN ACCESS

EDITED BY  
Sokol Duro,  
Agricultural University of Tirana, Albania

REVIEWED BY  
Aris Pourlis,  
University of Thessaly, Greece  
Kerstin Gerlach,  
Leipzig University, Germany

## \*CORRESPONDENCE

Juliana Wacker  
✉ Juliana.Wacker@vetmed.uni-giessen.de

RECEIVED 02 October 2024  
ACCEPTED 27 November 2024  
PUBLISHED 11 December 2024

## CITATION

Wacker J, Schaus K, Jandowsky A, Büttner K, Röcken M and Bartmann CP (2024) Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs.  
*Front. Vet. Sci.* 11:1505253.  
doi: 10.3389/fvets.2024.1505253

## COPYRIGHT

© 2024 Wacker, Schaus, Jandowsky, Büttner, Röcken and Bartmann. This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](#). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

# Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs

Juliana Wacker<sup>1\*</sup>, Kyra Schaus<sup>1</sup>, Anabell Jandowsky<sup>2</sup>, Kathrin Büttner<sup>3</sup>, Michael Röcken<sup>1</sup> and Claus Peter Bartmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Clinic for Equine Surgery and Orthopedics, Justus-Liebig-University Giessen, Giessen, Germany, <sup>2</sup>Arche Warder – Zentrum für alte Haus- und Nutztierassen e.V., Warder, Germany, <sup>3</sup>Unit for Biomathematics and Data Processing, Justus-Liebig-University Giessen, Giessen, Germany

**Introduction:** Due to the tremendous importance of the hoof for the welfare of equids, plenty of studies have investigated the foot conformation of horses, which can be objectively described by morphometric measurements. Although the foot conformations of horses and donkeys differ, only poor data exists describing the physiological foot conformation of donkeys. The objective of this study was to provide reference values for different radiographic parameters for healthy donkeys. Additionally, this study aimed to evaluate differences between the left and right limb or between the medial and lateral parts of the hoof and the dependence of various parameters on size, age, and weight.

**Materials and methods:** Lateromedial and dorsopalmar radiographs were taken of 46 generally sound donkeys, that were lame-free in walk, following a hoof correction due to their hoof pastern axis. With the help of radiopaque markers, several measurements were performed on the radiographs. The statistical analysis was carried out by determining mean values and standard deviations. All parameters were tested for significant differences between the left and right limbs as well as the medial and lateral hoof parts. The methodology included using a paired T-test after proof of a normal distribution of the data using a Shapiro–Wilk Test. For parameters without a normal distribution, the Wilcoxon rank-sum test was used instead. The dependence of the parameters on height, weight, and age was examined using a Spearman rank correlation.

**Results:** Reference values for the various parameters were provided for an average population of healthy donkeys. For two parameters, heel length and sole thickness, a significant difference between the left and right limb was shown. There was evidence the medial wall angle was significantly bigger than the lateral wall angle ( $p = 0.0075$ ), whereas the sole thickness was significantly larger on the lateral aspect ( $p < 0.001$ ). No correlation with age was found for most variables, with a few exceptions. Almost all absolute lengths measured showed a moderate to strong positive correlation with the weight and height of the subject, while most angle measurements were not dependent on these parameters. The data obtained specifically for the donkeys in this study differ substantially from the data already published for horses. Thus, this data serves as a helpful guideline for the assessment of radiographs of the donkey's foot. All donkeys included in this study were generally sound and lame-free in walk, but there was undeniable evidence of chronic laminitis and not all the values collected can be considered to be physiological.

## KEYWORDS

equid, donkey, foot, hoof, forelimb, X-ray, radiometry, measurements

## Introduction

It is generally accepted that the equine hoof is of utmost importance for the health and soundness of equids. The horn capsule protects internal structures, including soft and osseous tissues (1, 2). Orthopedic problems have a high priority in equine medicine and the foot is involved in the great majority of lameness cases (3). Trimming and shoeing are frequently performed processes that influence horses' soundness to a great extent. Farriery, a very regularly used procedure, affects the hoof pastern axis and the shape of the hoof (4) and, subsequently, significantly influences horses' soundness (1). A profound knowledge of normal conditions is the foundation for evaluating pathological findings. The foot is the most frequently radiographed anatomical region in a horse, and many studies have investigated horses' normal radiological foot conformation by morphometric measurements (5–8), as they are an appropriate method to describe the foot conformation objectively (9, 10). It is commonly known that the foot conformation of horses and donkeys differ (11–16). Donkeys' hooves are smaller in relation to their body, more boxy and steeper angled, and the sole is shaped like a U. The pastern axis of donkeys is much more upright. Hence, many authors doubt the unrestricted transferability of reference values, which had been investigated for horses (11, 15), and instead recommend that one should rather use reference values developed especially for donkeys (13). Nevertheless, only insufficient data exists describing the radiologic foot conformation in donkeys. Walker et al. (17) described the radiographic appearance of the feet of mammoth donkeys and the finding of sub-clinical laminitis. Collins et al. (11) examined the radiological anatomy of the normal and the laminitic donkey foot in lateromedial radiographs. El-Shafaey et al. (18) performed a morphometric evaluation of relevant radiographic parameters of clinically normal donkeys, and Mostafa et al. (14) did some morphometric measurements of the feet of working donkeys in Egypt. Most previous studies were restricted, with a small sample size or a very special population of subjects. Further studies have shown that hoof morphometry depends on individual aspects, breed, size, and body weight (19, 20). To the author's knowledge, no study has performed morphometric measurements on lateromedial and dorsopalmar radiographs of generally sound donkeys' forelimbs considering individuals of different sizes, breeds, genders, and ages. The present study aims to provide reference values for different radiographic parameters of the physiological and thus desirable hoof conformation of European donkeys' front limbs to create guideline values and simplify the detection and quantification of deviations for farriers and veterinarians. Additionally, the authors aim to evaluate differences between the left and

right limbs, just as between the medial and lateral parts of the hoof, as well as the dependence of various parameters on size, age, and weight.

## Materials and methods

### Donkeys

In this study, 46 donkeys of different ages, sex, and breed were included. The age of the donkeys ranged from three weeks to 40 years. Twenty-seven mares, ten geldings, and nine stallions were included in the study. The donkeys were presented in terms of this study by different scientific and private institutions, or they were inpatients in the Equine Clinic in Giessen due to non-orthopedic diseases. Non-orthopaedic diseases for which the donkeys were hospitalized in the equine clinic were mainly colic, removal of skin tumors and castrations. None of the subjects were known to have a metabolic disease that could affect hoof and horn quality, although this could not be completely ruled out in all cases. The donkeys were in a moderately thin to moderately fleshy nutritional state, the body condition score was 2 to 4 out of 5 (13). The most represented breeds were European domestic donkeys, including miniature breeds, the Poitou, Baroque donkeys, and mixed breeds. There were no special findings in the general examination, and the donkeys showed no lameness in walk. Exclusion criteria were lameness or current treatment with anti-inflammatory drugs as well as a reported history of lameness, especially due to laminitis. Most donkeys were barefoot, and the condition of their hooves required regular hoof correction by the farriers.

As very different individuals in terms of size, age, and weight were included in this study, the specimens were allocated in two different groups: the whole donkey population (Population A) and the adult, medium-weight domestic donkeys (Population B).

### Preparation

All relevant data, such as breed, age, sex, and living conditions of the donkeys, were collected. The animals were clinically examined and weighed before the radiographs were taken. Immediately before the radiological examination, all animals received a hoof preparation according to their fetlock status by one of the farriers, all of whom were educated in and are currently team members of the Clinic for Equine Surgery and Orthopedics of the Justus Liebig University in Giessen.

### Radiographic technique

The radiological examination was performed according to a standardized procedure to obtain valuable results. Lateromedial (90°) and dorsopalmar (0°) radiographs of the distal toe of both forelimbs were taken as described elsewhere. The hooves were placed on the center of a specially made wooden block (23x18x8 cm), into which a 2 cm deep notch was milled cranially and laterally. The examiner took care that the donkey put equal weight on both front limbs, and the leg

Abbreviations: CBA, Coffin bone angle; CR\_c, Calculated coffin bone rotation; CR\_m, Measured coffin bone rotation; CUSUM test, Cumulative sum test; CW, Coronary band width; DCH, Dorsal coronet height; DWL, Dorsal hoof wall length; FD, Founder distance; FW, Width of the foot; HA, Heel angle; HL, Heel length; HPA 2, Hoof Pastern Axis 2; HPA1, Hoof Pastern Axis 1; HWA, Hoof wall angle; LCH, Lateral coronet height; LHA, Lateral hoof wall angle; LST, Lateral sole thickness; LWL, Lateral wall length; MCH, Medial coronet height; MHA, Medial hoof wall angle; MST, Medial sole thickness; MWL, Medial wall length; PA, Palmar angle; PCH, Palmar coronet height; SST, Sagittal sole thickness; ST, Sole thickness.

was positioned perpendicular to the ground. An 82 cm long wooden batten inserted into the notch always guaranteed the same film-focal distance (FFD) of 98 cm from the X-ray tube placed at the end of the wooden batten to the X-ray plate leaning against the wooden block. This method also made it easier to achieve a correct 90° projection. The setting can be seen in Figure 1. The settings of the X-ray equipment had to be varied due to the very different sizes and weights of the specimens.

## Radiopaque markers

Several radiopaque markers were attached to the hoof, as they are a very useful tool to optimize and simplify the performance of morphometric measurements (21). The coronary band was defined as the transition from hair to horn.

For the 90° radiograph, the dorsal hoof wall was marked with a wire centrally from the coronary band downwards. A small metal ball with a diameter of exactly 5 mm was attached to the center of the animal's bulb on the palmar aspect of the coronary band. In addition to the exact marking of the heel, the metal ball also served as a reference size to calibrate length measurements. Furthermore, the sole was marked in the area of the coffin bone tip, respectively, the tip of the frog, by means of a paper clip applied longitudinally from the dorsal to the palmar aspect of the sole.

For the 0° radiograph, the paper clip was left in place. Additionally, the medial and lateral hoof walls were marked with a wire from the coronary band downwards at the broadest part of the hoof.

The X-ray images taken with a digital X-ray system were directly transferred and stored digitally for later evaluation.

## Morphometric measurements

Morphometric measurements were obtained from both lateromedial and dorsopalmar radiographs. All the parameters taken are defined in Table 1 and visualized in Figures 2–5. The length measurements were taken as an original value and a standardized value by calibration to minimize the effects of magnification. Calibration was performed by dividing all length measurements by the measured diameter of the sphere and then multiplying them by the sphere's real diameter of 5 mm.



FIGURE 1

A standardized radiographic technique - the hooves were placed on a specially made wooden block, into which a wooden batten was inserted.

## Statistical analysis

Firstly, a descriptive statistical analysis was performed with regard to the distribution of race, age, and weight of the donkeys. The mean value ( $\bar{x}$ ), standard deviation ( $\bar{x} \pm \text{sd}$ ), minimum (min), and maximum (max) were determined for each parameter. For the length measurements on the lateromedial radiograph, the original values were compared with those standardized by calibration and tested for agreement. The CUSUM (Cumulative Sum) test for linearity and the Passing–Bablok regression were used for this purpose. The data was checked for a normal distribution using the Shapiro–Wilk test. In the case of a normal distribution of the data, a paired t-test was used to check for differences between the right and left limbs and between the medial and lateral parts of the hoof for various parameters. The Wilcoxon rank-sum test was used if the data were not normally distributed. In addition, a Spearman rank correlation was used to analyze the relationship between the individual parameters and age, weight, and size. All statistical tests were done for the whole donkey population (Population A) and the adult, medium-weight domestic donkeys (Population B). Additionally, all tests, except for the comparison between original and standardized values, were calculated for the original values and those standardized by calibration. For all tests, the significance level was set to  $p = 0.05$ . Statistical analysis was done in SAS® 9.4.

## Results

A total of 91 forelimbs of 46 donkeys were radiographically examined. In one foal the examination was discontinued after one leg due to the donkey's extreme defensiveness. Most donkeys examined were European domestic donkeys (39 donkeys, 84.8%), followed by Pottou donkeys (five donkeys, 10.9%) and Baroque donkeys (two donkeys, 4.3%). The majority of the subjects (41 donkeys, 89.1%) were adults (3 years and older), and only five donkeys (10.9%) were juveniles (up to 2 years of age). On average, the donkeys were 11.86 years old. Twenty-five (54.35%) of the animals were assigned to the medium weight class (151–299 kg), 15 (32.61%) were small animals (up to 150 kg), and six donkeys (13.4%) were large (over 300 kg). The test subjects weighed 191.26 kg on average. The results of descriptive statistical analysis are shown in Table 2.

The abbreviations for the morphometric parameters used in the following section are defined in Table 1. A linear relationship between measured and calibrated values was demonstrated for all variables using the CUSUM test ( $p > 0.05$ ). The Spearman rank correlation coefficient was  $r > 0.95$  for all parameters and thus described a very strong positive correlation between originally measured and standardized values. The Passing–Bablok regression could neither prove a systemic nor a proportional difference between the two measured values for most parameters. Only HL (Heel length), PCH (Palmar coronet height), and FD (Founder distance) showed a proportional difference when evaluated for Population A. When looking at Population B, a proportional difference was proven for ST (Sole thickness).

The Shapiro–Wilk test and the QQ-Plot showed approximately a normal distribution for most variables' data. Only ST and HPA2 (Hoof palmar axis 2) were not normally distributed when looking at Population A. After calibration, a normal distribution of data could not be proven for PCH.

TABLE 1 Definition of all measured morphometric parameters including full names and abbreviations.

Abbreviation	Measurement	Definition
<b>Morphometric measurements on the lateromedial X-Ray</b>		
Length measurements		
DWL	Dorsal hoof wall length	Distance from the proximal end of the wire at the coronet band along the dorsal hoof wall to the intersection of an imaginary extension of the dorsal hoof wall with the footing surface
ST	Sole thickness	Vertical distance between the coffin bone tip and the sole
DCH	Dorsal coronet height	Vertical distance between the coronet at the transition from hair to horn - marked by the proximal end of the radiopaque marker - to the sole
HL	Heel length	Distance measured from the attached metal ball in the region of the bulb to the palmar end of the sole along the contour of the heel
PCH	Palmar coronet height	Vertical distance between the metal ball attached to the heel and the footing surface
FD	Founder distance	Vertical distance from the level of the coronary band, which is marked by the proximal end of the radiopaque marker, to the extensory process of the coffin bone
Angles		
HWA	Hoof wall angle	Angle between the dorsal hoof wall and the footing surface (In case of an irregular dorsal contour of the hoof, the line was drawn according to the course of the radiopaque marker)
CBA	Coffin bone angle	Angle between the dorsal contour of the coffin bone and the footing surface (In case of an irregular dorsal coffin bone contour the line was drawn from the extensory process to the tip of the coffin bone)
CR_m / _c	Coffin bone rotation	Angle between the dorsal hoof wall and the dorsal contour of the coffin bone CR_m measured CR_c calculated = CBA - HWA
PA	Palmar angle	Angle between the palmar contour of the coffin bone and the sole
HA	Heel angle	Angle between the heel (connection between the bulb marked by the metal ball and the palmar end of the footing surface) and the sole
HPA1	Hoof Pastern Axis 1	Angle between the first and the second phalanx
HPA 2	Hoof Pastern Axis 2	Angle between the second and the third phalanx
<b>Morphometric measurements on the dorsopalmar X-Ray</b>		
Length measurements		
CW	Coronary band width	Distance between the proximal end of the lateral marker and the proximal end of the medial marker
FW	Width of the foot	Distance between the points where the medial and lateral hoof walls meet the ground
MWL	Medial wall length	Distance between the proximal and distal end of the marker of at the medial hoof wall
LWL	Lateral wall length	Distance between the proximal and distal end of the marker of at the lateral hoof wall
MCH	Medial coronet height	Vertical distance between the proximal end of the marker of at the medial hoof wall and the footing surface
LCH	Lateral coronet height	Vertical distance between the proximal end of the marker of at the lateral hoof wall and the footing surface
SST	Sagittal sole thickness	Vertical distance between the most distal point of the coffin bone and the footing surface at the half of the foot width
MST	Medial sole thickness	Vertical distance between the most distal point of the coffin bone and the footing surface at the most medial aspect of the coffin bone
LST	Lateral sole thickness	Vertical distance between the most distal point of the coffin bone and the footing surface at the most lateral aspect of the coffin bone
Angles		
MHA	Medial hoof wall angle	Angle between the medial hoof wall and the footing surface
LHA	Lateral hoof wall angle	Angle between the lateral hoof wall and the footing surface

A significant difference between the right and left limbs could only be proven for HL and ST ( $p < 0.05$ ). The HL was significantly greater on the left than on the right when evaluating the original values of Population A. When looking at the original values of Population B or when using the standardized values, there was a

significant difference in the ST between both front limbs, which was considerably greater on the right.

Comparing the medial and lateral parts of the hoof, a significant difference was shown for wall angle and sole thickness ( $p < 0.05$ ). The MWA (Medial hoof wall angle) was significantly

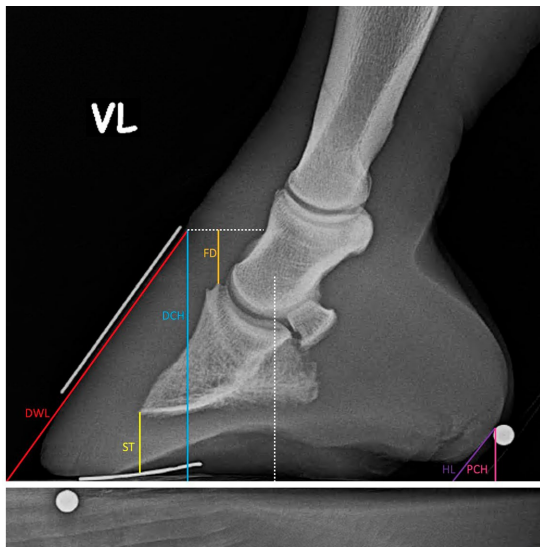


FIGURE 2 Length measurements on the lateromedial X-Ray.

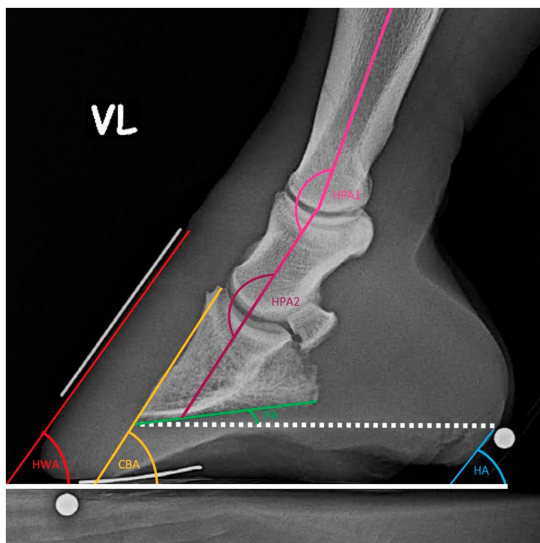


FIGURE 3 Angular measurements on the lateromedial X-Ray.

larger; therefore, the medial hoof wall is steeper than the lateral one. The sole thickness, on the other hand, was significantly larger on the lateral aspect of the hoof. No significant differences were observed between the medial and lateral wall length or coronet height.

For most variables, no significant correlation with the age of the test subjects could be proven ( $p > 0.05$ ). When assessing the original and calibrated values of Population A, only CR (Coffin bone rotation) and FW (Width of the foot) showed a moderate positive and significant correlation with age. A weak to moderate positive and significant correlation could also be shown for CBA (Coffin bone angle), FD, LWA (Lateral hoof wall angle), LCH (Lateral coronet

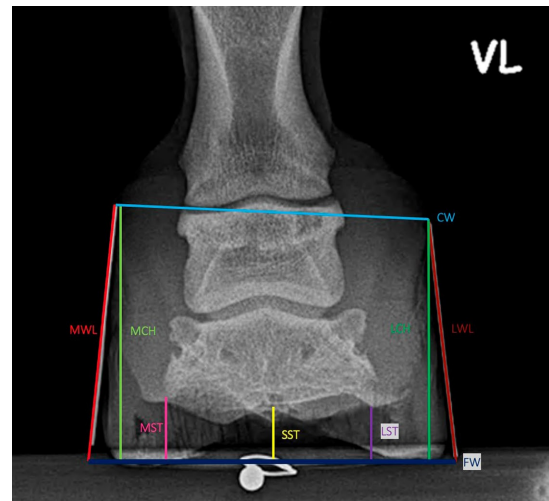


FIGURE 4 Length measurements on the dorsopalmar X-Ray.

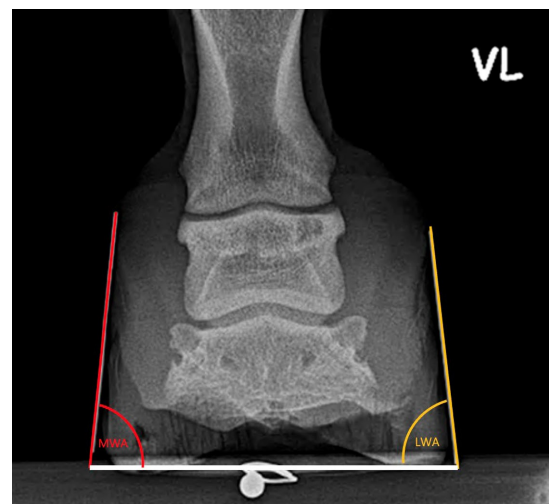


FIGURE 5 Angular measurements on the dorsopalmar X-Ray.

height), and CW (Coronary band width). In the evaluation of Population B, a moderate negative correlation was shown for HL, PCH, HWA (Hoof wall angle), and FW.

Numerous parameters, on the other hand, showed a significant correlation with the weight and size of the donkeys ( $p < 0.05$ ). If there is a correlation with the weight, despite a few exceptions, the corresponding parameter correlates with the animal's size, too. All length measurements on both radiographs (DWL (Dorsal hoof wall length), ST, DCH (Dorsal coronet height), HL, PCH, FD // CW, FW, LWL (Lateral hoof wall length), LCH, MCH (Medial coronet height), MWL (Medial hoof wall length), LST (Lateral sole thickness), MST (Medial sole thickness)) showed a moderate to very strong positive correlation with the weight and size of the test subjects, both when using the original measured values and when evaluating the standardized value. There was either no or a weak

TABLE 2 Results of descriptive statistical analysis for right frontlimb (RF) and left frontlimb (LF) of the whole donkey population (Population A) and adult, middle-weight domestic donkeys (Population B).

Parameter		Limb	N	Mean ( $\bar{x}$ ) value	Standard deviation ( $\bar{x} \pm$ sd)	Minimum (min)	Maximum (max)
DWL	Population A	RF	45	81.41 mm	23.00 mm	43.39 mm	181.34 mm
		LF	46	80.41 mm	22.07 mm	40.56 mm	152.96 mm
	Population B	RF	24	74.03 mm	7.68 mm	52.42 mm	87.90 mm
		LF	24	74.45 mm	8.85 mm	60.11 mm	92.23 mm
ST	Population A	RF	45	16.66 mm	5.83 mm	7.95 mm	41.31 mm
		LF	46	15.82 mm	4.50 mm	7.71 mm	32.04 mm
	Population B	RF	24	15.48 mm	3.16 mm	7.95 mm	29.96 mm
		LF	24	14.52 mm	2.78 mm	7.71 mm	20.65 mm
DCH	Population A	RF	45	70.03 mm	19.82 mm	38.55 mm	159.46 mm
		LF	46	69.16 mm	19.11 mm	38.22 mm	133.43 mm
	Population B	RF	24	64.90 mm	6.84 mm	47.98 mm	78.20 mm
		LF	24	64.47 mm	8.82 mm	53.89 mm	86.12 mm
HL	Population A	RF	42	18.48 mm	5.65 mm	8.98 mm	32.39 mm
		LF	44	20.29 mm	5.95 mm	10.13 mm	36.11 mm
	Population B	RF	23	17.46 mm	5.21 mm	9.06 mm	29.23 mm
		LF	22	18.65 mm	5.17 mm	10.39 mm	28.37 mm
PCH	Population A	RF	42	14.92 mm	4.89 mm	7.16 mm	28.39 mm
		LF	44	16.28 mm	5.81 mm	7.70 mm	32.03 mm
	Population B	RF	23	14.35 mm	4.41 mm	7.73 mm	25.14 mm
		LF	22	14.91 mm	5.25 mm	7.70 mm	24.91 mm
FD	Population A	RF	45	18.39 mm	7.52 mm	5.57 mm	49.05 mm
		LF	46	18.50 mm	7.31 mm	6.49 mm	38.37 mm
	Population B	RF	24	15.89 mm	3.27 mm	5.57 mm	21.05 mm
		LF	24	16.69 mm	3.88 mm	10.24 mm	24.93 mm
HPA1	Population A	RF	45	9.27°	4.64°	-4.32°	16.67°
		LF	46	9.77°	4.01°	3.64°	22.29°
	Population B	RF	24	8.16°	4.94°	-4.32°	14.96°
		LF	24	8.91°	3.35°	3.64°	15.22°
HPA2	Population A	RF	45	-9.71°	10.26°	-28.40°	16.13°
		LF	46	-8.96°	8.71°	-25.91°	18.03°
	Population B	RF	24	-10.53°	9.21°	-24.42°	16.13°
		LF	24	-11.69°	7.20°	-25.91°	-0.44°
HWA	Population A	RF	45	58.28°	4.63°	46.77°	67.01°
		LF	46	57.97°	4.68°	48.45°	68.29°
	Population B	RF	24	58.85°	5.09°	46.77°	67.01°
		LF	24	59.10°	4.94°	48.45°	68.29°
CBA	Population A	RF	45	59.57°	4.62°	52.41°	70.72°
		LF	46	59.14°	4.47°	51.21°	69.76°
	Population B	RF	24	61.13°	4.81°	52.89°	70.72°
		LF	24	61.13°	4.48°	53.83°	69.76°
CR_c	Population A	RF	45	1.29°	3.65°	-4.92°	15.13°
		LF	46	1.17°	3.50°	-3.98°	15.39°
	Population B	RF	24	2.28°	3.63°	-3.56°	15.13°
		LF	24	2.03°	3.71°	-3.04°	15.39°

(Continued)

TABLE 2 (Continued)

Parameter		Limb	N	Mean ( $\bar{x}$ ) value	Standard deviation ( $\bar{x} \pm$ sd)	Minimum (min)	Maximum (max)
CR_m	Population A	RF	45	1.45°	3.73°	-4.21°	16.23°
		LF	46	1.27°	3.73°	-6.42°	16.28°
	Population B	RF	24	2.49°	3.80°	-3.33°	16.23°
		LF	24	2.32°	3.71°	-1.91°	16.28°
PA	Population A	RF	45	6.37°	3.98°	-1.30°	16.77°
		LF	46	5.43°	3.37°	-2.23°	13.35°
	Population B	RF	24	6.96°	4.23°	0.17°	16.77°
		LF	24	6.09°	3.23°	0.56°	13.35°
HA	Population A	RF	45	50.58°	8.82°	22.41°	67.30°
		LF	46	51.59°	8.82°	26.86°	77.69°
	Population B	RF	24	51.93°	8.96°	34.61°	67.30°
		LF	24	51.15°	8.26°	38.46°	69.15°
LWA	Population A	RF	45	87.47°	4.68°	79.67°	101.11°
		LF	46	86.87°	4.77°	76.06°	100.58°
	Population B	RF	24	85.89°	3.18°	79.69°	95.01°
		LF	24	85.76°	3.94°	76.06°	94.52°
MWA	Population A	RF	45	88.63°	4.88°	77.46°	101.16°
		LF	46	89.61°	5.72°	75.42°	99.92°
	Population B	RF	24	88.27°	3.97°	80.07°	95.12°
		LF	24	88.82°	5.16°	75.42°	98.28°
CW	Population A	RF	45	84.62 mm	23.87 mm	49.73 mm	190.19 mm
		LF	46	83.84 mm	24.82 mm	42.37 mm	187.29 mm
	Population B	RF	24	78.86 mm	9.89 mm	60.01 mm	110.56 mm
		LF	24	78.67 mm	10.67 mm	60.05 mm	102.68 mm
FW	Population A	RF	45	87.39 mm	22.36 mm	46.67 mm	176.71 mm
		LF	46	86.43 mm	23.20 mm	43.41 mm	174.98 mm
	Population B	RF	24	82.62 mm	10.47 mm	60.01 mm	110.59 mm
		LF	24	82.88 mm	11.24 mm	61.65 mm	115.20 mm
LWL	Population A	RF	45	62.96 mm	16.37 mm	32.38 mm	126.05 mm
		LF	46	63.20 mm	15.50 mm	29.43 mm	115.83 mm
	Population B	RF	24	60.88 mm	7.87 mm	46.69 mm	82.41 mm
		LF	24	61.15 mm	8.97 mm	48.88 mm	77.18 mm
MWL	Population A	RF	45	61.76 mm	16.94 mm	33.53 mm	136.28 mm
		LF	46	62.03 mm	15.61 mm	31.17 mm	112.46 mm
	Population B	RF	24	60.19 mm	9.59 mm	46.92 mm	94.39 mm
		LF	24	60.56 mm	9.62 mm	46.94 mm	84.50 mm
LCH	Population A	RF	45	62.42 mm	16.22 mm	33.79 mm	126.01 mm
		LF	46	62.36 mm	15.45 mm	29.17 mm	116.06 mm
	Population B	RF	24	60.24 mm	7.69 mm	46.13 mm	82.08 mm
		LF	24	60.83 mm	8.91 mm	47.70 mm	77.13 mm
MCH	Population A	RF	45	61.19 mm	16.96 mm	33.00 mm	134.87 mm
		LF	46	61.57 mm	15.25 mm	30.88 mm	110.55 mm
	Population B	RF	24	59.55 mm	9.68 mm	46.94 mm	94.40 mm
		LF	24	60.17 mm	9.46 mm	46.94 mm	84.09 mm

(Continued)

TABLE 2 (Continued)

Parameter		Limb	N	Mean ( $\bar{x}$ ) value	Standard deviation ( $\bar{x} \pm$ sd)	Minimum (min)	Maximum (max)
SST	Population A	RF	45	17.60 mm	5.30 mm	9.27 mm	32.17 mm
		LF	46	17.24 mm	4.99 mm	7.68 mm	35.93 mm
	Population B	RF	24	16.55 mm	4.07 mm	9.27 mm	24.58 mm
		LF	24	16.53 mm	3.59 mm	7.68 mm	23.57 mm
LST	Population A	RF	45	19.75 mm	5.73 mm	10.60 mm	38.15 mm
		LF	46	19.39 mm	5.59 mm	9.36 mm	38.69 mm
	Population B	RF	24	18.91 mm	4.49 mm	10.60 mm	29.78 mm
		LF	24	19.30 mm	4.42 mm	11.43 mm	28.08 mm
MST	Population A	RF	45	18.23 mm	5.60 mm	6.10 mm	33.13 mm
		LF	46	17.93 mm	4.89 mm	8.84 mm	37.31 mm
	Population B	RF	24	17.56 mm	4.22 mm	8.74 mm	25.92 mm
		LF	24	17.20 mm	3.26 mm	9.55 mm	24.11 mm

correlation ( $p > 0.05$ ) of weight and size with all angle measurements on both projections (HWA, CBA, CR\_c (Calculated coffin bone rotation), CR\_m (Measured coffin bone rotation), PA (Palmar angle), HA (Heel angle), LWA, MWA, HPA2), with one exception. For the HPA 1 (Hoof pastern axis 1), which describes the axial deviation in the pastern joint, there was a moderate negative correlation shown with the size of the donkey ( $p < 0.05$ ).

## Discussion

This study aimed to provide reference values for different radiographic parameters of the physiological and, thus, desirable hoof conformation of European donkeys' front limbs. Additionally, the authors aimed to evaluate differences between the left and right limbs or between the medial and lateral parts of the hoof, as well as the dependence of various parameters on size, age, and weight.

The way to assess the hoof configuration most objectively and comparably is to perform radiographic measurements on high-quality x-rays. For example, concerning the hoof angle, there are different methods possible for the measurement of this parameter. Although you can achieve good and consistent results with measurements on digital photographs, too (22), measurement on correctly taken lateromedial radiographs is the most precise of all options (23, 24). With morphometric measurements on radiographs, the anatomical relationships between soft tissue structures, bones, and horn capsules can be precisely described (11). During the evaluation of measurements on X-ray images, one must always keep in mind that imaging a three-dimensional structure as a two-dimensional image presents certain challenges (25). Despite all efforts, the morphometric measurements on the X-ray image are still subject to a certain degree of error due to several aspects, such as imprecise limb positioning (2, 26) or inaccurate positioning of radiopaque markers (5), magnification effects, and false calibration (10, 27, 28), errors due to accidental obliquity (26, 28, 29), and the influence of farriery (4).

It has to be taken into account that there was a wide spread of values due to the very different individuals in the population in terms of size, age, and weight among the specimens of this study. To assess the population as a whole (Population A) and achieve a precise

assessment of the most frequently represented type of donkey (Population B), all statistical tests were carried out and evaluated for both groups. The values of length measurements of extremely small and large animals, of course, differ clearly from those of the medium-sized subjects. Still, the average values in both groups are relatively similar except for a different standard deviation.

## Discussion of the results in comparison with the values of other authors

The results of the measurements in the present study compared to other authors' results are shown in Table 3 for donkeys, where available, and horses. There is little specific data on morphometric measurements on donkey hooves in the literature, and, to the author's knowledge, no reference values could be found at all for some morphometric parameters.

Comparing the values, especially angles, of different authors for horses and donkeys, it becomes clear that the data already differ considerably within the individual species.

## Dorsal wall length (DWL)

When comparing DWL to previous results of other authors it is absolutely necessary to differentiate whether hoof preparation was performed before the radiographic measurements were taken or not. The dorsal wall length is not an invariable hoof parameter but it is definitely influenced by hoof trimming, as it is reduced by 1.0–1.1 cm / 10% of the initial DWL throughout the trimming process (4). As for the DWL, it is noticeable that the average values of the present study are considerably larger than those of previous studies on donkeys. In the study by El-Shafae et al. (18), which was performed pre-trimming and after removal of the shoes, the donkeys weighed an average of 150 kg, around 40 kg less than in the present study. The dependence of DWL on the size and weight of the animals has already been pointed out. In the study by Mostafa et al. (14), in which the examined donkeys were also not given a full trimming of their hooves prior to the radiological examination, the average weight of the test subjects

TABLE 3 Results of the present study in comparison with results of previous studies on donkeys, horses and ponies.

Parameter	Results of the present study (all donkeys, original values)		Results of other authors (Donkeys)		Results of other authors (Horses and Ponies)	
	Right frontlimb	Left frontlimb				
DWL	81.41 mm	80.41 mm	77.4 mm 67.3 mm	El-Shafaey et al. (18) and Mostafa et al. (14)	95–97 mm 77.8–78.0 mm	Kummer et al. (4) and Thieme et al. (8)
ST	16.66 mm	15.82 mm	24.3 mm	El-Shafaey et al. (18)	15 mm (pre-trimming) // 13 mm (post-trimming) 10.7 mm 10.6 mm	Kummer et al. (4), Masoudifard et al. (31), and Thieme et al. (8)
DCH	70.03 mm	69.16 mm	Not found		Not found	
HL	18.48 mm	20.29 mm	3.5 mm	Mostafa et al. (14)		
PCH	14.92 mm	16.28 mm	Not found		Not found	
FD	18.39 mm	18.50 mm	10.4 mm 25 mm	Collins et al. (11) and El-Shafaey et al. (18)	4.1 mm 11 mm 6.2 mm 9.4 mm	Cripps et al. (6), Kummer et al. (4), Masoudifard et al. (31), and Thieme et al. (8)
HWA	58.28°	57.92°	61.61° 70.2° 61.41° - 62.51°	Collins et al. (11), El-Shafaey et al. (18), and Khan et al. (44)	50.5° 54.2–54.8° 49.6° 54.01–54.37	Cripps et al. (6), Kummer et al. (4), Masoudifard et al. (31), and Thieme et al. (8)
CBA	59.57°	61.13°	61.11° 70.2°	Collins et al. (11) and El-Shafaey et al. (18)	49.4° 48.8–49.5° 48.5° 52.36–52.62°	Cripps et al. (6), Kummer et al. (4), Masoudifard et al. (31), and Thieme et al. (8)
CR	1.29°	2.28°	2.5°	Collins et al. (11)	–0.9° 0.4° –1.65–1.75°	Cripps et al. (6), Masoudifard et al. (31), and Thieme et al. (8)
PA	6.37°	5.43°	25.0°	El-Shafaey et al. (18)	<8° 5.4–6.4° 3.6° 6.02°	Cripps et al. (6), Kummer et al. (4), Masoudifard et al. (31), and Thieme et al. (8)
HA	50.36°	51.59°	54.71°	Mostafa et al. (14)	Not found	
HPA1	9.27°	9.77°	Not found		4.7–6.5°	Kummer et al. (4)
HPA 2	–10.2°	–8.96°	–4.3°	Collins et al. (11)	5.0–6.1° –0.2°	Kummer et al. (4) and Masoudifard et al. (31)
CW	84.62 mm	83.84 mm	Not found		85.06–85.02 mm	Thieme et al. (8)
FW	87.39 mm	86.43 mm	68.6 mm	El-Shafaey et al. (18)	104, 32–104, 42 mm	Thieme et al. (8)
MWL	61.76 mm	62.03 mm	55.3 mm	El-Shafaey et al. (18)	53, 05–53, 47 mm	Thieme et al. (8)
LWL	62.96 mm	63.20 mm	49.5 mm	El-Shafaey et al. (18)	53, 70–54, 41 mm	Thieme et al. (8)
MCH	60.74 mm	61.57 mm	Not found		52, 15–52, 68 mm	Thieme et al. (8)
LCH	62.42 mm	62.36 mm	Not found		52, 43–52, 86 mm	Thieme et al. (8)
SST	17.60 mm	17.24 mm	Not found		12, 78–13, 10 mm	Thieme et al. (8)
MST	18.23 mm	19.02 mm	Not found		16, 86–17, 01 mm	Thieme et al. (8)
LST	19.75 mm	19.39 mm	Not found		18, 70–19, 05 mm	Thieme et al. (8)
MWA	88.63°	89.39°	20.2	El-Shafaey et al. (18)	80.9–81.5°	Thieme et al. (8)
LWA	87.47°	86.87°	43.8	El-Shafaey et al. (18)	77, 36–78, 33°	Thieme et al. (8)

was 186 kg, which was very similar to the population of the present study. However, the population of working donkeys kept in Egypt was clearly different and subjected to a different type and degree of stress. These two factors explain the difference between our results and those already available. Although in both previous studies measurements were performed pre-trimming, the results for the DWL were considerably smaller than the results for DWL in the present study. Added to that, in the study by El-Shafaey et al. (18) the donkeys were shod and the shoes, which were removed immediately before the radiologic examination, should have protected the dorsal hoof wall against wear. If the effect of hoof trimming on the feet would be considered additionally and the DWL was reduced by about 10%, the difference between our measurements and the data published previously would be even more material. When comparing the values for DWL with those of horses and ponies, there is overwhelming agreement with the values from Thieme et al. (8). These authors examined morphometric parameters on ponies from 81.5–148.5 cm in height at withers in Germany post-trimming. Although no height was recorded for this population, a similar weight distribution and living and usage conditions to our donkey population can be assumed. Under these comparable conditions, the DWL of donkeys and ponies do not appear to differ in a noteworthy manner. In contrast, the study by Kummer et al. (4), which examined warmblood horses pre-and post-trimming, showed a 1.5–2 cm larger DWL than in the present study due to the huge difference in weight and size.

## Hoof angle (HA)

Probably the most frequently taken angle is the hoof angle. The hoof angle is important because it influences the forces on the superficial and the deep flexor tendon and the suspensory ligament (1, 4). It is out of debate that the donkey has a steeper hoof wall angle than the horse (11, 12, 17, 18). This fact was confirmed in our data set and should, therefore, not be discussed further.

## Coffin bone angle and coffin bone rotation (CBA and CR\_c / CR\_m)

It is generally accepted that the dorsal hoof wall and the dorsal contour of the coffin bone of equids should be straight and nearly parallel to each other (5, 21), which means the CBA should be equivalent to the HWA (30). Previously published values for the CBA in donkeys are very similar to our findings. Due to the parallelism between the dorsal contour of the hoof capsule and the dorsal contour of the coffin bone, the CR, which is defined as the divergence between HWA and CBA (11), should go toward zero. For horses as well as for donkeys, it is reported that there can be a slight difference between HWA and CBA (4, 5, 7, 21, 23, 31). Dependent on the study a CR of up to 2° (11) to 4° (32) or 5° (33) is not considered to be clinically relevant. The mean CR in the present study was 1.19°–2.28° and, therefore, is definitely within the normal range for horses and similar to a previously described value for donkeys (11). Nevertheless, when looking at our results in Table 2, it becomes clear, values were recorded for coffin bone rotation in generally sound donkeys that certainly cannot be classified as physiological. All the animals included in our study were without special findings in the

clinical examination, lame-free in walk and the owners were not aware of any previous laminitis. Nevertheless, some of the animals showed considerable changes in position of as well as structural changes in the coffin bone.

## Palmar angle (PA)

One parameter that has increasingly come into focus in recent studies is the palmar angle. The specifications for a normal PA differ clearly in the literature, and the information is within the range between 2°–10°. Redden (3) claims the PA is correlating positively with the HWA (3). The mean PA in our study was 5.43°–6.37°, which matches previous findings. The PA of a horse and a donkey seem to be very similar (13). A very small or negative PA can result in increased stress on several soft tissues, such as the deep digital flexor tendon, and cause chronic foot pain and lameness (21). In contrast, a large PA is suspicious for the presence of a coffin bone rotation and can be associated with pathologies like a club foot or laminitis (34).

## Heel angle (HA)

The heel angle should be nearly the same or not more than 5°–10° smaller compared to the HWA (21), otherwise, the equid was suffering from so-called underrun heels. In this study, the HA is, on average, less than 10° smaller than the HWA and is within the normal range described for horses. One aspect that could lead to the slight difference between HWA and HA in the majority of equids could be the influence of trimming and farriery (23). The influence of the previous hoof preparation on this measurement must also be considered in the present study.

## Sole thickness (ST)

A sufficient sole thickness is necessary to protect osseous and soft tissues within the horn capsule (19). A small ST can also be a hint of a dislocation of the coffin bone (35). For horses, the mean ST is 11 mm (5). Redden (3) suggests the minimum ST should be 15 mm; otherwise, the sole will have a disrupted perfusion. This will result in smaller and lower horn growth in the area of the sole. The ST in the present study appears to be the same or slightly greater than in horses and ponies in both lateromedial and dorsopalmar radiographs. However, our results differ from the data published by El-Shafaey et al. (18) who found considerably greater sole thicknesses in donkeys in Egypt. This is possibly due to a heavier workload of the animals on dry and hard soils and, as a result, heavier abrasion of the hoof horn. Once again, the aspect of hoof processing must be considered. The sole thickness of warmblood horses was reduced by an average of 2 mm (13%) as a result of hoof trimming (4). The difference between the data previously published and the values determined in the present study is considerably greater, even if 13% of thickness was subtracted from the values determined by El-Shafaey et al. (18). Nevertheless, according to Kummer et al. (4) the sole thickness stays relatively constant throughout the trimming process as the net growth and the natural wear seem to be almost equal. Subsequently, the influence of trimming to this measurement can nearly be neglected, as only loose horn is removed during hoof processing.

## Founder distance (FD)

A radiometric parameter often considered when assessing X-rays of the equine foot regarding chronic laminitis is the founder distance. Several authors claimed that the coffin bone was located more distally in a donkey than in a horse (12, 13, 18) and, therefore, a donkey had a bigger FD in relationship to their body size. Hence, the donkey's extensor process of the coffin bone is not in line with its coronary band (12). Collins et al. (11) could already confirm this empirical conception as they evaluated FD-values three times as big as in a pony of similar size. The mean FD in donkeys published in previous studies is between 10 mm (11, 13) and 25 mm (18). In conclusion, the founder distance seems to be greater and less expressive in donkeys than in horses (18).

## Hoof pastern axis and the club foot conformation in donkeys (HPA1 and HPA2)

Axial alignment of all phalanges should be considered normal in equids (19, 30, 33) and provides optimal mechanical conditions (4). Nevertheless, a pastern axis broken backwards in the pastern joint and broken forwards in the coffin joint was frequently found in the donkey population in a previous (14) as well as in the present study. Hence, some authors claim that in donkeys, a slightly broken forward pastern axis can also be accepted as a normal finding (12–16). These facts lead to the discussion about whether a club foot conformation is a normal finding in donkeys. In horses, the club foot is defined as a blunt angled hoof with a hoof angle of more than 60° and high heels combined with a broken forward pastern axis (36). This foot conformation is predisposing for heels-first-landing, results in increased forces on the heel, and can, therefore, lead to inflammations of the coffin joint and sole bruising (1). The limit for the dorsal hoof wall angle in horses with club foot conformation is 60°, approximately 5°–15° above the physiological front wall angle of 45°–55° described for the horse (37). Since the donkey has a 5°–10° steeper hoof wall than the horse, this would mean a dorsal hoof wall angle of at least 70° with a toe axis broken forward at the coffin joint if the criteria for a club foot were applied to the donkey. All these criteria combined could be found very rarely in the population of the present study. Consistent with the opinion of other authors (38), all these aspects lead to the conclusion that club foot conformation should not be considered normal in donkeys. A straight pastern axis should be aimed for. The relatively frequent occurrence of a broken toe axis can most probably be explained by the fact that many donkeys receive hoof preparation not at appropriate intervals. However, correcting a broken toe axis requires not just a one-off treatment but consistent and regular trimming of the hooves over a longer period.

## Parameters with relevance to dorsopalmar foot conformation

### CW, FW, MWA, LWA, MWL, LWL, MCH, and LCH

While the coronet width CW found in the present study is very similar to the one published by Thieme et al. (8), the FW is much smaller. This can be explained simply by the fact that donkeys have not only a steeper dorsal but also up to 10° steeper medial and lateral hoof wall than horses and ponies (16). The medial and lateral coronet

height, as well as the wall length, seem to be bigger than in the ponies examined by Thieme et al. (8).

## Comparison between the medial and lateral parts of the hoof

When assessing the measurements on the dorsopalmar X-ray and therefore evaluating the mediolateral foot balance and symmetry, the examiner should take into account the high importance of correct positioning of the limb (9, 21). A bilateral symmetric foot conformation is considered normal (21), which means a line bisecting the third metacarpal bone perpendicular to the ground should also bisect the foot (21). The medial and lateral hoof wall length should be similar, and the medial and lateral hoof wall angle should be nearly the same and should both be below 90° so the sole is broader than the coronary band (35). One has to remember that in donkeys, not only the dorsal but also the lateral and medial hoof walls are steeper than in horses (16).

Former studies have shown mediolateral imbalance is common in horses and seems to be normal to a certain extent (39). Mediolateral imbalance is present if the measurements of medial and lateral hoof wall length differ more than 5 mm (14). This can result in unequal force application and, consequently, in sheared heels, cracks, or lameness.

Former studies on horses have shown that a larger lateral part of the hoof combined with a steeper medial hoof angle is common (9, 21). This matches the results of the present study, as a significantly steeper medial hoof wall angle was also observed. The hoof shape should not be assessed separately but always in context with the position of the limbs. Just as in horses, a regular limb position is optimal in donkeys but is very rare in practice. In the subjects of the present study, a slightly toe-width limb position was observed in many donkeys, resulting in a significantly steeper medial hoof wall angle.

Although the medial and lateral sole thickness should be approximately the same, about 63% of all horses show a significantly lower medial than lateral sole thickness (21). Also, in chronic founders, it can be seen that the sinking of the coffin bone is not always equal but often more severe on the medial aspect, causing a smaller medial sole thickness. This finding can be fully supported after considering the present study's data, as a significantly lower sole thickness on the medial aspect of the hoof was also shown.

## Correlation with the body weight

Further studies have shown a correlation between different hoof parameters and the hoof size to the body weight (14, 38). The hoof has to be big enough to carry the body weight adequately (38). If the hoof is too small in relation to the body size, the horn capsule cannot protect the soft and osseous tissues strongly enough (38). Turner (9) claimed a hoof is too small if it has to carry more than 5.5 kg of weight per m<sup>2</sup>. Especially concerning the DWL, a significant correlation with the body was shown in previous studies (9, 15, 19). In the present study, the dispersion of results was very high for this value, and DWL depended on the donkey's body weight, too.

The current study showed a moderate to strong positive correlation not only of the DWL but of all linear parameters with the height and weight of the test subjects in both X-ray projections. There

was a somewhat weaker but still significant and detectable correlation with the sole thickness in both projections and with FD when only Population B was considered. The finding that FD is not dependent on the size of the animal to the same extent as the rest of the linear parameters has already been detected by other authors before (4, 7). In contrast, there was no significant correlation with most of the angular measurements. Only HWA and CBA correlated minimally positively with height and weight. Larger donkeys, therefore, appear to have a slightly steeper hoof than smaller donkeys. On the other hand, there was a weak to moderate negative correlation with HPA 1. Consequently, heavier donkeys seem to be less prone to a toe axis that is broken backwards in the pastern joint than smaller donkeys do.

## Correlation with the age

No correlation with age was found for most parameters. Only the CR correlated moderately positively with the age of the test subjects. This is accompanied by a weak correlation of CBA, which automatically becomes steeper during rotation. In addition, a weak correlation of FD with age was discovered. The correlation of all these parameters with the age of the animal seems logical because a significant CR is often seen and considered to be pathognomonic in horses with chronic laminitis (21, 30, 40) due to the loss of function of the suspensory apparatus of the coffin bone (21, 41). An older animal naturally has a higher probability of suffering from laminitis during its longer life, which causes such a change in the position of the coffin bone.

In the dorsopalmar X-ray, some parameters also correlated weakly but significantly with the subjects' age. There was a positive correlation with the FW and CW, whereas there was a negative correlation with LWA. Therefore, the hoof appears to tend to become wider and laterally less steep with age.

When looking only at Population B, there was also a moderate negative correlation between age and the HWA, HL, and PCH. Therefore, the hoof appears to become somewhat flatter, and the heels slightly lower with age.

In summary, with regard to the age dependency of various parameters, it can be stated that the hoof shape changes marginally differently with increasing age, and typical radiographic changes caused by chronic laminitis can be found comparatively more frequently. Although only clinically healthy animals were included in the study, some animals showed radiographic changes in the sense of chronic laminitis. Due to a donkey's high pain tolerance (42), donkeys with laminitis show very different clinical signs compared to horses with this disease, and therefore, acute and chronic laminitis are often not detected in early and mild stages (13, 16). In donkeys, clinical symptoms of laminitis often do not appear until displacement of and degenerative changes in the osseous structures are already evident (43). Hence, it seems likely some donkeys with mild chronic laminitis that never caused perceptible clinical signs also were included in the present study and had some impact on the parameters that were measured.

## Limitations of the study

The present study is limited by a clinically extensive and versatile but statistically comparatively small sample size. The specimens used

in the study (Population A) are very different in age, weight, and size and thus are only restrictedly comparable. Subsequently, an even smaller sample size was examined in a second step (Population B) to have subjects more similar and comparable and reduce standard deviation. Furthermore, the fact that different farriers prepared the donkeys' feet may have further influenced the data, although all of the handling farriers underwent an equal education in the Clinic for Equine Surgery and Orthopedics of the Justus-Liebig-University Giessen and followed an equal and accepted technique of hoof trimming. In addition, two different examiners took the X-rays, which might have also influenced the results.

## Conclusion

All in all, it is not up for discussion that there are substantial differences between a horse's and a donkey's hoof. This paper provides useful reference values for several morphometric measurements of the hoof of normal donkeys as a guide for trimming and evaluating changes in foot conformation by farriers and veterinarians. It is necessary to be aware of the fact not every donkey that appears lame-free really is basically free of orthopedic disease or pathological changes of the toe. Donkeys and horses differ not only concerning anatomy, but also in terms of their interior and pain expression. Foot problems are the main cause of lameness in donkeys and are often associated with deviating values for morphometric measurements. Although all donkeys included in this study were generally sound and lame-free in walk, there was undeniable evidence of chronic laminitis in several of the specimens. Consequently, it is of tremendous importance not to consider the measurements performed in isolation but always in connection with each other and the clinical picture.

## Data availability statement

The raw data supporting the conclusions of this article will be made available by the authors, without undue reservation.

## Ethics statement

Ethical approval was not required for the studies involving animals in accordance with the local legislation and institutional requirements because the data was collected to optimize regular hoof trimming. Thus, permission from the animal welfare authority was not necessary. Local legislation and institutional requirements were complied with throughout the study's performance. Written informed consent was not obtained from the owners for the participation of their animals in the study but verbal informed consent was obtained instead.

## Author contributions

JW: Writing – original draft, Writing – review & editing. KS: Writing – original draft, Writing – review & editing. AJ:

Writing – original draft, Writing – review & editing. KB: Writing – original draft, Writing – review & editing, Formal analysis. MR: Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing. CB: Conceptualization, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing.

## Funding

The author(s) declare that no financial support was received for the research, authorship, and/or publication of this article.

## Acknowledgments

We would like to thank the farriers of the Clinic for Equine Surgery and Orthopedics in Giessen for their great support. Likewise, we thank the scientific institutions and all other animal owners who provided us with our test subjects. We would also like to thank all our colleagues and friends who supported us in taking the radiographs.

## References

- O'Grady SE, Pupard DA. Physiological horseshoeing: an overview. *Equine Vet Education*. (2001) 13:330–4. doi: 10.1111/j.2042-3292.2001.tb00123.x
- Parks AH. Aspects of functional anatomy of the distal limb. *Proceedings*. (2012). Anaheim, California
- Redden RF. Radiographic imaging of the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract*. (2003) 19:379–92. doi: 10.1016/s0749-0739(03)00026-9
- Kummer M, Geyer H, Imboden I, Auer J, Lischer C. The effect of hoof trimming on radiographic measurements of the front feet of normal warmblood horses. *Vet J*. (2006) 172:58–66. doi: 10.1016/j.tvjl.2005.03.008
- Linford RL, O'Brien TR, Trout DR. Qualitative and morphometric radiographic findings in the distal phalanx and soft tissues of sound thoroughbred racehorses. *Am J Vet Res*. (1993) 54:38–51. doi: 10.2460/ajvr.1993.54.01.38
- Cripps PJ, Eustace RA. Factors involved in the prognosis of equine laminitis in the UK. *Equine Vet J*. (1999) 31:433–42. doi: 10.1111/j.2042-3306.1999.tb03845.x
- Cripps PJ, Eustace RA. Radiological measurements from the front feet of normal horses with relevance to laminitis. *Equine Vet J*. (1999) 31:427–32. doi: 10.1111/j.2042-3306.1999.tb03844.x
- Thieme K, Ehrle A, Lischer C. Radiographic measurements of the hooves of normal ponies. *Vet J*. (2015) 206:332–7. doi: 10.1016/j.tvjl.2015.10.005
- Turner TA. Examination of the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract*. (2003) 19:309–32. doi: 10.1016/s0749-0739(03)00023-3
- Craig J, Craig M, Weltner T. Quantifying conformation of the equine digit from lateromedial radiographs. *Proceedings Assoc Equine Sports Med*. (2001) 21:20–5.
- Collins SN, Dyson SJ, Murray RC, Burden F. Trawford a radiological anatomy of the donkey's foot: objective characterization of the normal and laminitic donkey foot. *Equine Vet J*. (2011) 43:478–86. doi: 10.1111/j.2042-3306.2010.00312.x
- Crane M. *Hoof Disorders of the donkey*. 10th Geneva Congress of Equine Medicine and Surgery. Geneva: Switzerland (2007).
- Crane M, Evans L. The clinical companion of the donkey. The donkey sanctuary. Great Britain: Sidmouth (2018).
- Mostafa MB, Abdelgalil AI, Farhat SF, Raw Z, Kubasiewicz LM. Morphometric measurements of the feet of working donkeys *Equus asinus* in Egypt. *J Equine Sci*. (2020) 31:17–22. doi: 10.1294/jes.31.17
- Souza AF, Kunz JR, Laus R, Moreira MA, Muller TR, Fonteque JH. Biometrics of hoof balance in equids. *Arq Bras Med Vet Zootec*. (2016) 68:825–31. doi: 10.1590/1678-4162-8848
- Thiemann A, Rickards K. Donkey hoof disorders and their treatment. *In Pract*. (2013) 35:134–40. doi: 10.1136/inp.f1074
- Walker M, Taylor T, Slater M, Hood D, Weir V, Elslander J. Radiographic appearance of the feet of mammoth donkeys and the finding of subclinical laminitis. *Vet Radiol Ultrasound*. (1995) 36:32–7. doi: 10.1111/j.1740-8261.1995.tb00210.x

## Conflict of interest

The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

## Generative AI statement

The author(s) declare that no Generative AI was used in the creation of this manuscript.

## Publisher's note

All claims expressed in this article are solely those of the authors and do not necessarily represent those of their affiliated organizations, or those of the publisher, the editors and the reviewers. Any product that may be evaluated in this article, or claim that may be made by its manufacturer, is not guaranteed or endorsed by the publisher.

- El-Shafaey EA, Salem MG, Mosbah E, Zaghloul AE. Morphometric evaluation of relevant radiographic parameters of the forefoot of clinically normal donkeys (*Equus asinus*). *J Hellenic Vet Med Soc*. (2018) 68:467–78. doi: 10.12681/JHVMS.15543
- Balch O, White K, Butler D. Factors involved in the balancing of equine hooves. *J Am Vet Med Assoc*. (1991) 198:1980–9. doi: 10.2460/javma.1991.198.11.1980
- Kost'uková M, Černohorská H, Bihuncová I, Oravcová I, Sobotková E, Jiskrová I. Characteristics of morphological parameters of donkeys in the Czech Republic. *Acta Univ Agric Silv Mendeliana Brun*. (2015) 63:419–24. doi: 10.11118/actaun201563020419
- Butler JA, Colles CM, Dyson SJ, Kold SE, Poulos PW. The foot In: JA Butler, editor. *Clinical radiology of the horse*. 4th ed. Chichester: John Wiley & Sons (2017). 67–170.
- White JM, Mellor DJ, Duz M, Lischer CJ, Coute LC. Diagnostic accuracy of digital photography and image analysis for the measurement of foot conformation in the horse. *Equine Vet J*. (2008) 40:623–8. doi: 10.2746/042516408X313625
- Dyson SJ, Tranquille CA, Collins SN, Parkin TDH, Murray RC. An investigation of the relationships between angles and shapes of the hoof capsule and the distal phalanx. *Equine Vet J*. (2011) 43:295–301. doi: 10.1111/j.2042-3306.2010.00162.x
- Moleman M, van Heel MCV, van den Belt AJM, Back W. Accuracy of hoof angle measurement devices in comparison with digitally analyzed radiographs. *Equine Vet Ed*. (2005) 17:319–22. doi: 10.1111/j.2042-3292.2005.tb00401.x
- Becht JL, Park RD, Kraft SL, Steyn PF, Wrigley RH. Radiographic interpretation of normal skeletal variations and pseudolesions in the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract*. (2001) 17:1–18. doi: 10.1016/s0749-0739(17)30072-x
- Koblik PD, O'Brien TR, Coyne CP. Effect of dorsopalmar obliquity on radiographic measurement of distal phalangeal rotation angle in horses with laminitis. *J Am Vet Med Assoc*. (1988) 192:346–9.
- Read RL, Duncan CG, Wallace AD, Perry JA, Duerr FM. Assessment of on-screen measurements, magnification, and calibration in digital radiography. *J Am Vet Med Assoc*. (2012) 241:782–7. doi: 10.2460/javma.241.6.782
- Kummer M, Lischer C, Olerth S, Vargas J, Auer J. Evaluation of a standardized radiographic technique of the equine hoof. *Schweiz Arch Tierheilkd*. (2004) 146:507–14. doi: 10.1024/0036-7281.146.11.507
- Tacchio G, Davies HMS, Morgante M, Bernardini D. A radiographic technique to assess the longitudinal balance in front hooves. *Equine Vet J Suppl*. (2002) 34:368–72. doi: 10.1111/j.2042-3306.2002.tb05450.x
- Colles CM. Interpreting radiographs 1: the foot. *Equine Vet J*. (1983) 15:297–303. doi: 10.1111/j.2042-3306.1983.tb01804.x
- Masoudifard M, Vajhi A, Mansouri S, Molazem M, Bahonar A, Zehtabvar O. Radiographic measurements of front feet of the sound Akhal-Teke horses. *Irani J Vet Med*. (2014) 8:21–5. doi: 10.22059/IJVM.2014.50559

32. Stick JA, Jann HW, Scott EA, Robinson NE. Pedal bone rotation as a prognostic sign in laminitis of horses. *J Am Vet Med Assoc.* (1982) 180:251–3.
33. Park RD. Radiographic examination of the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract.* (1989) 5:47–66. doi: 10.1016/s0749-0739(17)30603-x
34. Drumond B, Guimarães Ginelli AM, Resende Faleiros R, Fontana de Magalhães J, Simões Coelho C. Hoof capsule distortion and radiographic measurements of the front feet in Mangalarga Marchador horses subjected to athletic training. *Pferdeheilk Equine Med.* (2016) 32:110–8. doi: 10.21836/pem20160203
35. Sherlock C. Parks a radiographic an radiological assessment of laminitis. *Equine Vet Ed.* (2013) 25:524–35. doi: 10.1111/eve.12065
36. Brehm W, Hagen J, Litzke LF. Krankheiten der distalen Gliedmaße In: W Brehm, H Gehlen, B Ohnesorge and A Wehrend, editors. *Handbuch Pferdepraxis.* 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG (2017). 1002–99.
37. Budras KD, Coenen M, Hirschberg RM, von Zadow C. Funktionelle Anatomie des Pferdes In: LF Litzke, editor. *Der Huf. Lehrbuch des Hufbeschlags.* 7th ed. Stuttgart: Georg-Thieme-Verlag KG (2020). 82–147.
38. Parks AH Examination of the equine foot. Proceedings. (2012). Anaheim, California
39. Bartmann CP, Pietta D. Hufpflege und Hufbeschlag bei Esel und Maultier In: LF Litzke, editor. *Der Huf. Lehrbuch des Hufbeschlags.* 7th ed. Stuttgart: Georg-Thieme- Verlag KG (2020). 358–65.
40. Stachurska A, Kolstrung R, Pieta M, Silmanowicz P. Hoof size as related to body size in the horse (*Equus caballus*). *Anim Sci Paper Rep.* (2011) 29:2013–222.
41. Herthel D, Hood DM clinical presentation, diagnosis and prognosis of chronic laminitis. *Vet Clin North Am Equine Pract.* (1999) 15:375–94. doi: 10.1016/s0749-0739(17)30151-7
42. Collins SN, van Eps AW, Pollitt CC. Kuwano a the lamellar wedge. *Vet Clin North Am Equine Pract.* (2010) 26:179–95. doi: 10.1016/j.cveq.2010.01.004
43. Collins SN, Dyson S, Murray RC, Newton R, Burden F, Trawford AF development of a quantitative multivariable radiographic method to evaluate anatomic changes associated with laminitis in the forefeet of donkeys. *Am J Vet Res.* (2012) 73:1207–18. doi: 10.2460/ajvr.73.8.1207
44. Khan RZU, Rosanowski SM, Parkes RSV. Hoof morphometry in a population of lame and nonlame working donkeys in Pakistan. *Equine Vet J.* (2023) 55:435–445. doi: 10.1111/evj.13861

# Diskussion

## Diskussion der Fragestellungen

Ziel der Studie war es, zum einen Normwerte für verschiedene morphometrische Parameter auf der lateromedialen und der dorsopalmaren Röntgenaufnahme der Zehe der Vordergliedmaßen von in Deutschland gehaltenen Eseln unter Einbeziehung verschiedener Rassen sowie aller Geschlechter, Gewichts- und Altersklassen bereitzustellen. Auf diese Weise sollten Referenzwerte für die tägliche Arbeit von Tierärzten und Hufschmieden geschaffen werden. Zum anderen sollte die Abhängigkeit der erhobenen morphometrischen Parameter von Alter, Gewicht und Größe der Tiere untersucht und eventuelle Unterschiede zwischen linker und rechter Gliedmaße sowie medialen und lateralen Anteilen des Hufes dargelegt werden.

Die Hufgesundheit spielt eine zentrale Rolle für die Gesamtkonstitution und das Wohlbefinden von Equiden. Erkrankungen im Bereich des Hufes sind für einen Großteil der Lahmheiten zumindest teilweise verantwortlich (Redden 2003). Um Abweichungen der Hufkonformation erkennen und beurteilen zu können, ist die Kenntnis des Normalzustandes unerlässlich (Masoudifard et al. 2014). Im Fall des Hufes ist das fundierte Wissen über die physiologischen Verhältnisse der innenliegenden Strukturen zueinander und zur umgebenden Hornkapsel essentiell für eine korrekte Hufzubereitung und –korrektur durch Hufbearbeiter. Die Zehe ist die am häufigsten radiologisch untersuchte anatomische Region beim Pferd und die radiologische Untersuchung ist zur Abklärung von Lahmheiten, die ihren Ursprung im Bereich des Hufes haben, unerlässlich (Colles 1983, Kummer et al. 2004, White et al. 2008, El-Shafaey et al. 2017). Das Röntgen gibt Tierärzten und Hufschmieden die Möglichkeit, die Hufwand und Hufform sowie die Position der Zehenknochen innerhalb der Hornkapsel, zu erfassen und zu beurteilen (Colles 1983). Eine objektive Beschreibung der Hufkonformation kann gut durch morphometrische Messungen erfolgen, diese werden am häufigsten an lateromedialen Röntgenbildern vorgenommen (Craig et al. 2001). Es wurden bislang zahlreiche Studien zu morphometrischen Messungen an den Hufen von Pferden und Ponys vorgenommen. Der Esel hat im Vergleich zum Pferd diverse anatomische und physiologische Besonderheiten, vor allem auch hinsichtlich der Anatomie und Funktion der distalen Gliedmaße gibt es erhebliche Unterschiede (Burnham 2002, Crane 2007, Collins et al. 2011, Souza et al. 2016, Crane u. Evans 2018). Nichtsdestotrotz wurden erst wenige Studien zu diesem Thema an Eseln vorgenommen. Das Ziel der vorliegenden Studie war es demnach, morphometrische Messungen an den Röntgenaufnahmen der Zehe in Deutschland gehaltener Esel unter Einbeziehung verschiedener Rassen, Geschlechter sowie Alters- und Gewichtsgruppen durchzuführen.

Auf der lateromedialen Röntgenaufnahme wurden sechs Längenmessungen (Dorsale Hufwandlänge, Sohlendicke, Dorsale Kronsaumhöhe, Trachtenlänge, Palmare Kronsaumhöhe, Rehestrecke) sowie sieben Winkelmessungen (Vorderwandwinkel, Hufbeinwinkel, Hufbeinrotation, Palmarwinkel, Trachtenwinkel und die Achsenabweichung im Kron- sowie im Hufgelenk) erhoben. Auf der dorsopalmaren Röntgenaufnahme wurden zudem neun Längenmessungen (Kronsaumweite, Breite der Fußungsfläche, Mediale und Laterale Hufwandlänge, Mediale und Laterale Kronsaumhöhe sowie Mediale, Laterale und Sagittale Sohlendicke) sowie zwei Winkelmessungen (Mediale und Laterale Seitenwandwinkel) ermittelt. Eine Zusammenstellung aller erhobenen Messwerte in beiden Projektionen einschließlich der entsprechenden Definitionen findet sich in Tabelle 1 bzw. in den Abbildungen 2, 3, 4 und 5 der Veröffentlichung 2.

Es wurden für alle Parameter Mittelwert, Standardabweichung und Median ermittelt, um für die erhobenen Messgrößen Normwerte bereitstellen zu können. Alle erhobenen Daten wurden statistisch auf Normalverteilung überprüft.

Weiterführend wurde zunächst die Fragestellung bearbeitet, ob die originalen Messwerte mit den rechnerisch kalibrierten Längenmessungen übereinstimmen. Eine Kalibrierung von Längenmessungen auf Röntgenaufnahmen ist sehr wichtig, um die sich ergebenden Vergrößerungseffekte zu berücksichtigen (Craig et al. 2001, Read et al. 2012, Craig u. Craig 2019). Die Normierung von Längenmessungen ist zwingend erforderlich, um realistische Werte zu erhalten (Craig et al. 2001, Kummer et al. 2004). Im Gegensatz zu vielen anderen Herausforderungen und Artefakten konnte das Problem der Vergrößerungseffekte und der dadurch notwendigen Kalibrierung mit der Entwicklung und weiten Verbreitung digitaler Röntgenanlagen nicht beseitigt werden (Read et al. 2012). Es ist demnach sehr wichtig, die Kalibrierung und Normierung von Messwerten in die Auswertung einer solchen Studie mit einzubeziehen.

Eine weitere Fragestellung war, ob sich die Messwerte zwischen rechter und linker Gliedmaße beziehungsweise zwischen medial und lateral signifikant unterscheiden. Bei Pferden konnte in einigen Studien ein signifikanter Unterschied zwischen linker und rechter Gliedmaße festgestellt werden (Kummer et al. 2004, Kummer et al. 2006), während in anderen Studien keine signifikanten Unterschiede bewiesen werden konnten (Cripps u. Eustace 1999, Masoudifard et al. 2014). Auch bei Eseln konnten bereits für einige Parameter signifikant verschiedene Werte für die linke und die rechte Gliedmaße ermittelt werden (Khan et al. 2023). Da sich die Ergebnisse diesbezüglich je nach Studie unterscheiden und aus der bisher zur Verfügung stehenden Literatur keine eindeutige Schlussfolgerung hinsichtlich dieser Fragestellung gezogen werden konnte, wurde dieser Aspekt in die Auswertung mit einbezogen.

Auch in Bezug auf den Vergleich zwischen Messungen an medialen und lateralen Anteilen des Hufes konnten für verschiedene Messwerte bereits in einigen Studien signifikante Unterschiede bei Pferden und Eseln festgestellt werden (Butler et al. 2000, Turner 2003, O'Grady 2013, El-Shafaey et al. 2017). Die Symmetrie des Hufes ist ein viel diskutiertes, aber bislang nicht abschließend geklärtes Thema. Aus diesem Grund wurde auch diese Fragestellung im Rahmen der eigenen Studie bearbeitet.

Des Weiteren wurde bei allen Parametern die Abhängigkeit von Größe, Gewicht und Alter untersucht. Zumindest beim Pferd scheint der Einfluss von Rasse und Gewicht auf bestimmte Parameter signifikant zu sein (Cripps u. Eustace 1999, Collins et al. 2011). Frühere Studien haben gezeigt, dass bestimmte Hufparameter und die Größe des Hufes insbesondere vom Gewicht des Tieres abhängen (Stachurska et al. 2011, Mostafa et al. 2020). Ist ein Huf in Relation zum Körpergewicht zu klein, so kann die Hornkapsel innenliegende Strukturen unter Umständen nicht adäquat schützen (Stachurska et al. 2011). Vor allem für die dorsale Hufwandlänge konnte bereits eine positive Korrelation mit dem Körpergewicht festgestellt werden (Balch et al. 1991, Souza et al. 2016).

Für Pferde gibt es diesbezüglich sogar eine Kategorisierung in verschiedene Gewichtsklassen und die entsprechende dorsale Hufwandlänge (Turner 2003). Um diese Abhängigkeit sowie die Korrelation aller anderen erhobenen Hufparameter von verschiedenen Faktoren auch beim Esel zu überprüfen, wurde die Korrelationsanalyse der Parameter von Größe und Gewicht in diese Arbeit einbezogen. Ebenso wurde die Abhängigkeit der verschiedenen Messwerte vom Alter des Tieres untersucht.

Neben der Korrelation der morphometrischen Messungen mit dem Alter wurde im Rahmen einer zweiten Studie großer Wert auf das Vorliegen und das Ausmaß radiologischer Veränderungen des Hufbeins in Abhängigkeit vom Alter gelegt. Vom Pferd weiß man, dass radiologische Veränderungen am Hufbein sowohl bei klinisch gesunden als auch bei lahmen Pferden ein häufiger Befund sind (Becht et al. 2001). In Bezug auf die normale röntgenologische Anatomie des Hufbeins beim Esel sowie hinsichtlich des Auftretens pathologischer Abweichungen existieren bislang keine fundierten Untersuchungen. Ein weiterer Grund für diese Untersuchung war außerdem die Überprüfung einer bei Eselhaltern populären Vermutung, vor allem bei Großeseln seien radiologisch sichtbare Ab- und Umbauprozesse am Hufbein eine normale Alterserscheinung.

## Diskussion der Methoden

Es ist unumstritten, dass eine qualitativ hochwertige lateromediale (90°) Röntgenaufnahme die beste und nützlichste Hilfestellung ist, um eine korrekte Hufzubereitung und einen sinnvollen Beschlag bestmöglich planen und umsetzen zu können (Herthel u. Hood 1999, Crane 2007). Sie bleibt außerdem der Goldstandard für die Diagnose anatomischer Abweichungen (Collins et al. 2012). Morphometrische Messungen sind eine gute Möglichkeit, die Röntgenbilder objektiv und mit einer gewissen Quantifizierung auswerten zu können (Craig et al. 2001). Im Rahmen der eigenen Untersuchungen wurden die morphometrischen Messungen an Röntgenbildern vorgenommen, da hierdurch im Gegensatz zu Messungen am Patienten oder an digitalen Fotografien auch die inneren anatomischen Zusammenhänge, vor allem die Zusammenhänge zwischen knöchernen Strukturen und der Hornkapsel, genau und objektiv untersucht werden können (Collins et al. 2011). Außerdem wurde im direkten Vergleich bestimmter Messmethoden bewiesen, dass mit der Messung auf der lateromedialen Röntgenaufnahme die genauesten Ergebnisse erzielt werden können (Moleman et al. 2005). Die Hufzubereitung hat einen hohen Einfluss auf morphometrische Messungen am Röntgenbild, insbesondere Knochen- und Gelenkwinkel werden durch den Zeitpunkt zwischen den Hufzubereitungen beeinflusst (Kummer et al. 2006, Collins et al. 2011). Aus diesem Grund wurde bei allen Probanden unmittelbar vor der Anfertigung der Röntgenbilder eine Hufzubereitung durch die Lehrschmiede der Klinik für Pferde – Chirurgie und Orthopädie der JLU Gießen durchgeführt. Die Hufzubereitung erfolgte bei allen Probanden nach der Fesselstandstheorie.

Die Dicke und das Material der Blöcke, auf denen die Gliedmaßen zur Anfertigung der Röntgenaufnahmen positioniert werden müssen, um den ganzen Huf auf der Röntgenaufnahme abbilden zu können, variieren in der Literatur sehr stark (Butler et al. 2000). In der vorliegenden Arbeit wurde eine Dicke von ca. 8 cm gewählt, was mit den Methoden der meisten anderen Autoren übereinstimmt (Cripps u. Eustace 1999, Kummer et al. 2004, White et al. 2008, Collins et al. 2011, Masoudifard et al. 2014, Cardona et al. 2021) und einen Kompromiss zwischen sehr dünnen (Butler et al. 2000) und sehr dicken Blöcken (Dyson et al. 2011) darstellt. Hiermit wurden die Blöcke zudem so gewählt, dass sie praktikabel die Darstellung des gesamten Hufes einschließlich Sohle und Tragrand auf dem Röntgenbild gewährleisten. Der relativ große Film-Fokus-Abstand (FFD) von 98 cm wurde gewählt, um Verzerrungseffekte zu minimieren (Craig u. Craig 2019). Die verwendeten röntgendichten Marker optimieren und vereinfachen die nachfolgend durchgeführten morphometrischen Messungen (Herthel u. Hood 1999, Butler et al. 2000). Anstelle der Platzierung der Marker am Übergang von Horn zu Haar (Kummer et al. 2006) hätte der Kronsaum auch als jener Punkt definiert werden können, an dem das Horn unter moderatem Fingerdruck nachzugeben beginnt (Cripps u. Eustace 1999). Diese Definition

unterliegt jedoch einer gewissen Subjektivität. Üblicherweise werden Drähte, Kugeln oder Bariumpaste als Marker verwendet (Sherlock u. Parks 2013, Thieme et al. 2015a). Anstelle eines Drahtes und einer Büroklammer hätte beispielsweise auch Bariumpaste als Marker verwendet werden können (Thieme et al. 2015a). Diese hätte jedoch im Gegensatz zu den verwendeten Materialien nicht bei mehreren Probanden wiederverwendet werden können. Ein weiterer Marker, der angebracht wurde, war eine Metallkugel mit dem Durchmesser von 5 mm. Auch diese hätte theoretisch durch einen anderen Marker ersetzt werden können, sie diente jedoch neben der genauen Markierung des Kronsaums im Trachtenbereich auch der Kalibrierung der Längenmessungen. Die Normierung der absoluten Werte ist aufgrund der Vergrößerungseffekte unumgänglich, um realistische Werte zu erhalten (Craig et al. 2001, Kummer et al. 2004, Read et al. 2012, Craig u. Craig 2019). Der Vergrößerungseffekt beträgt in der Regel jedoch weniger als 0,075 cm (Page u. Hagen 2002). Die praktische Relevanz der Normierung in der standardmäßigen täglichen Arbeit eines Tierarztes kann demnach durchaus angezweifelt werden. Eine Kugel eignet sich unabhängig davon am besten als Referenzgröße, da sie aus jeder Richtung in einem rechten Winkel abgebildet wird und Verzerrungseffekte so minimiert werden können (Schropp et al. 2009). Die gewählte manuelle Kalibrierung ist die genaueste der zur Verfügung stehenden Methoden (Read et al. 2012). Da auch eine versehentliche Obliquität der Aufnahmen vor allem Winkelmessungen verfälschen kann (Tacchio et al. 2002, Kummer et al. 2004), wurde in den angefertigten Holzblock eine Kerbe eingefräst, in die eine Holzlatte eingelegt wurde. Diese vereinfachte neben der Gewährleistung einer immer gleichen FFD von 98 cm auch die Realisierung einer möglichst korrekten Ausrichtung bei der 0° und 90° Projektion. Durch die etwas größer gewählte FFD können Verzerrungseffekte minimiert werden (Craig u. Craig 2019). Die erhobenen Parameter wurden aus mehreren Studien zusammengestellt und in Studie 2 „*Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs*“ genau beschrieben und diskutiert. Die Anfertigung der Röntgenbilder erfolgte durch zwei verschiedene Tierärzte, was aufgrund des Einflusses des Untersuchers potentiell zu Abweichungen der Ergebnisse geführt haben könnte (Moleman et al. 2005). Beide Untersucher haben jedoch die exakt gleiche Ausbildung erhalten und befanden sich zum Zeitpunkt der Anfertigung der Röntgenbilder auf einem sehr ähnlichen Ausbildungsstand und Erfahrungsniveau. Die überwiegende Anzahl der ausgewerteten Röntgenaufnahmen wurde ohnehin durch beide Untersucher gemeinsam angefertigt. Hierdurch konnte ein potentieller Einfluss des Untersuchers minimiert werden.

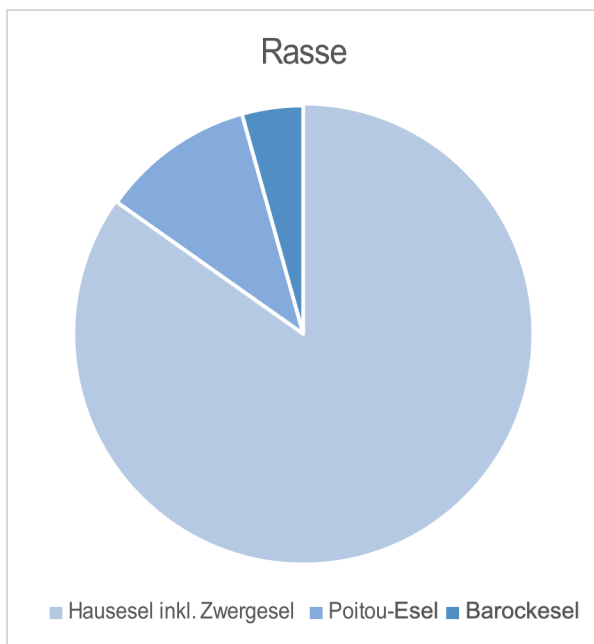
## Diskussion der Ergebnisse

Die statistische Auswertung des generierten Datensatzes erfolgte durch PD Dr. Kathrin Büttner und ihr Team vom Institut für Biomathematik und Datenverarbeitung der Justus-Liebig-Universität Gießen. Das für die Auswertung genutzte Programm war SAS ® 9.4.

### **Deskriptive Statistik**

Im Rahmen der Studie konnten 90 Vordergliedmaßen von 46 Eseln untersucht werden. Bei zwei Probanden wurde die Untersuchung nach einer Gliedmaße aufgrund massiver Wehrhaftigkeit abgebrochen. Die Mehrzahl der untersuchten Esel waren Hausesel inklusive Zwergesel (84,78 %), gefolgt von Poitou-Eseln (10,87 %) und Barockesel (4,35 %). Die Verteilung der Rassen ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abb. 2: Verteilung der Rassen im Probandengut



89,13 % der Probanden waren mit mindestens 3 Jahren adulte Tiere, nur 10,87 % waren mit unter 3 Jahren Jungtiere. Im Durchschnitt betrug das Alter 13,84 Jahre. Das Alter der Probanden war normalverteilt. Die Altersverteilung ist in Abbildung 3 dargestellt.

Abb. 3: Altersverteilung im Probandengut: a) Boxplot und b) Säulendiagramm

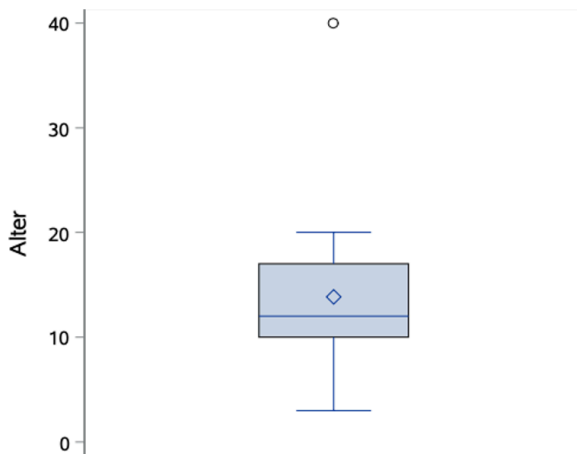


Abb.3a

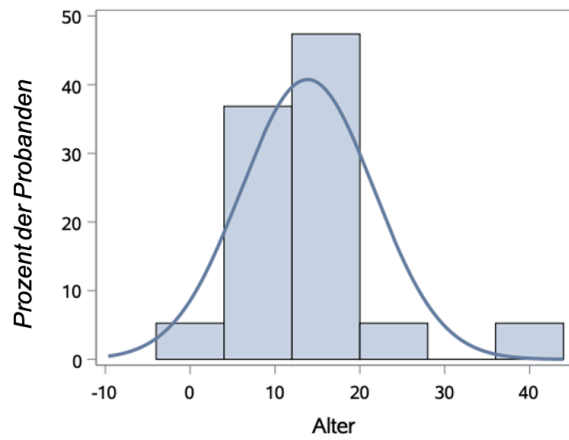
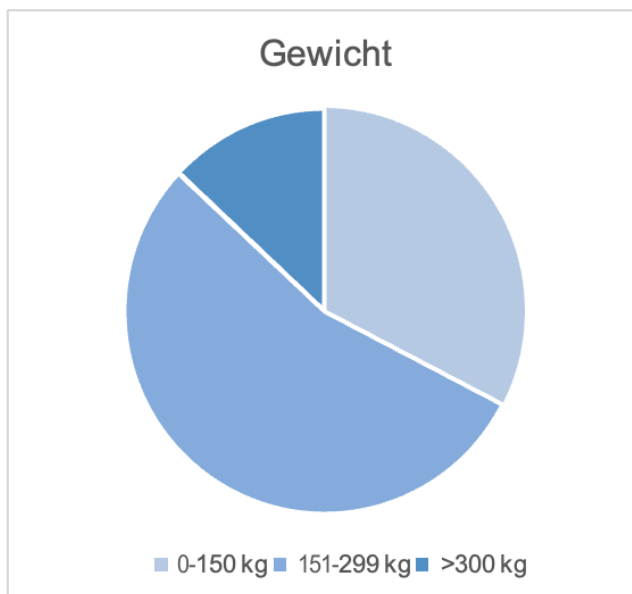


Abb. 3b

54,35 % der Probanden wurden in die mittlere Gewichtsklasse eingeteilt (151-299 kg), 32,61 % waren kleine Esel (bis 150 kg) und 13,04 % waren Großesel (ab 300 kg). Das Durchschnittsgewicht der Probanden betrug 183,21 kg. Die Gewichtsverteilung der Probanden ist in Abbildung 4 dargestellt.

Abb. 4: Gewichtsverteilung der Probanden



Die ermittelten Mittelwerte inklusive Standardabweichung sowie maximaler und minimaler Wert für die verschiedenen Parameter sind getrennt nach Gesamtpopulation (Population A) und Population adulter mittelgroßer Hausesel (Population B) sowie als Originalwerte und für die Längenmessungen zusätzlich als normierte Werte in Tabelle 2 der Veröffentlichung „Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs“ dargestellt.

In dieser Publikation wurden die Ergebnisse für die Messwerte im Einzelnen mit den durch andere Autoren publizierten Werten verglichen. Insgesamt bestand eine überwiegende Übereinstimmung der in der eigenen Studie ermittelten zu den durch Collins et al. (2011) publizierten eselspezifischen Werten. Die Ergebnisse von El-Shafaey et al. (2017) sowie Mostafa et al. (2020) weichen hingegen in einigen Punkten deutlich von den eigenen Werten ab. Dies ist mutmaßlich auf die durch diese Autoren untersuchte unterschiedliche Eselpopulation mit wesentlich anderen Lebens- und Nutzungsbedingungen und damit auch einer höheren Beanspruchung des Hufes zurückzuführen. Die Zusammenstellung der eigenen sowie der durch andere Autoren für Pferde und Esel publizierten Werte ist in Tabelle 3 der Veröffentlichung 2 zu finden. Bei Betrachtung dieser Werte wird deutlich, dass bislang nur wenige eselspezifische Daten in der Fachliteratur veröffentlicht wurden, für einige der erhobenen Messwerte konnten gar keine eselspezifischen Vergleichswerte gefunden werden. Weiterhin fällt auf, dass bereits innerhalb der Spezies teilweise sehr unterschiedliche Messwerte von verschiedenen Autoren ermittelt wurden. Im Speziesvergleich zeigen sich bei einigen Messwerten klare Übereinstimmungen, bei anderen Parametern hingegen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Werten von Pferden bzw. Ponys und den eselspezifischen Werten. Die im Rahmen der vorliegenden Studie ermittelten Werte können als Referenz bei der Beurteilung von Eselhufen und Röntgenbildern herangezogen und unterstützend verwertet werden.

### **Test auf Normalverteilung**

Mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests konnte für die meisten Parameter eine Normalverteilung nachgewiesen werden ( $p < 0,05$ ). Zusätzlich zum Shapiro-Wilk-Test wurde jeweils ein Scatterplot-Diagramm ausgewertet. Sofern ein Großteil der Punkte innerhalb des QQ-Plots der Geraden liegen, kann auch bei einem  $p < 0,05$  von einer annähernden Normalverteilung der Daten ausgegangen werden. Lediglich für die Sohlendicke ST sowie die HPA2 bei Betrachtung der Originalwerte bzw. für die Palmare Kronsaumhöhe PCH und die HPA2 bei Betrachtung der normierten Werte konnte bei kombinierter Betrachtung des Shapiro-Wilk-Tests und des Scatterplots keine Normalverteilung bestätigt werden. Die entsprechenden p-Werte sind für jede Variable für die Gesamtpopulation und die Population adulter mittelalter Hausesel sowie für die

Originalwerte und für die Längenmessungen zusätzlich für die normierten Werte in der nachfolgenden Tabelle 1 dargestellt.

**Tab. 1:** Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Testes für die morphometrischen Parameter im Hinblick auf Normalverteilung der Daten

<b>VARIABLE</b>	<b>Shapiro-Wilk-Test</b>	
<b>Kriterium</b>	<b>p-Wert</b>	<b>Normalverteilung?</b>
<b>a) alle Esel</b>		
DWL	0,0299	annähernd
ST	0,0002	nein
DCH	0,0131	annähernd
HL	0,7442	ja
PCH	0,1209	ja
FD	0,1078	ja
HWA	0,0274	annähernd
CBA	0,1070	ja
CR_c	0,1398	ja
CR_m	0,0535	ja
PA	0,7474	ja
HA	0,1493	ja
HPA1	0,2975	ja
HPA 2	<0,0001	nein
LWA	0,4037	ja
MWA	0,8368	ja
CW	0,5749	ja
FW	0,0765	ja
LWL	0,4172	ja
MWL	0,0608	ja
LCH	0,5179	ja
MCH	0,0383	annähernd
SST	0,0394	annähernd
LST	0,4002	ja
MST	0,4389	ja

---

**a) alle Esel (normierte Werte) → nur Längenmessungen**

---

DWL_N	0,0438	annähernd
ST_N	0,4665	ja
DCH_N	0,4119	ja
HL_N	0,5762	ja
PCH_N	0,0425	nein
FD_N	0,2748	ja
CW_N	0,4436	ja
FW_N	0,0757	ja
LWL_N	0,3171	ja
MWL_N	0,3571	ja
LCH_N	0,6002	ja
MCH_N	0,1403	ja
SST_N	0,4319	ja
LST_N	0,4491	ja
MST_N	0,9952	ja

---

**b) nur adulte mittelgroße Hausesel**

---

DWL	0,7164	ja
ST	0,9581	ja
DCH	0,5893	ja
HL	0,6331	ja
PCH	0,1047	ja
FD	0,4589	ja
HWA	0,1942	ja
CBA	0,1141	ja
CR_c	0,2973	ja
CR_m	0,6990	ja
PA	0,2823	ja
HA	0,0407	annähernd
HPA1	0,7960	ja
HPA2	<0,0001	nein
LWA	0,6438	ja
MWA	0,2951	ja

---

CW	0,3164	ja
FW	0,3136	ja
LWL	0,8489	ja
MWL	0,6577	ja
LCH	0,6277	ja
MCH	0,5546	ja
SST	0,9679	ja
LST	0,4659	ja
MST	0,8806	ja

**b) nur adulte mittelgroße Hausesel (normierte Werte) → nur Längenmessungen**

DWL_N	0,0839	ja
ST_N	0,9571	ja
DCH_N	0,7533	ja
HL_N	0,5518	ja
PCH_N	0,0016	nein
FD_N	0,1079	ja
CW_N	0,7700	ja
FW_N	0,2955	ja
LWL_N	0,7733	ja
MWL_N	0,3521	ja
LCH_N	0,5731	ja
MCH_N	0,3278	ja
SST_N	0,8833	ja
LST_N	0,5656	ja
MST_N	0,5756	ja

## Normierung von Längenmessungen

Nach der deskriptiven Statistik wurde zunächst die Fragestellung bearbeitet, ob die normierten Werte und die originalen Messwerte im Falle der absoluten Längenmessungen übereinstimmen. Die Notwendigkeit der Kalibrierung und Normierung von Längenmessungen wurde bereits unter dem Punkt „Diskussion der Fragestellungen“ dargelegt. Mithilfe des CUSUM-Tests auf Linearität konnte ein linearer Zusammenhang zwischen normierten und originalen Messwerten nachgewiesen werden. Die durchgeführte Spearman-Rangkorrelation und die Passing-Bablok-Regression zeigten in den meisten Fällen weder einen systematischen noch proportionalen Unterschied zwischen den genannten Werten. Die Ergebnisse der statistischen Tests sind in der nachfolgenden Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Ergebnisse der Spearman-Rangkorrelation und der Passing-Bablok-Regression sowie des CUSUM-Tests auf Linearität

VARIABLE	Spearman-Rangkorrelation		Passing-Bablok-Regression		CUSUM-Test auf Linearität
Kriterium	r	Bedeutung (Zusammenhang)	Systematischer Unterschied (95 % KI a schließt 0 nicht ein)	Proportionaler Unterschied (95 % KI b schließt 1 nicht ein)	$p > 0,05$
<b>a) alle Esel</b>					
DWL	0,96	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,6644$
ST	0,99	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,3034$
DCH	0,97	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,8558$
HL	0,99	Sehr stark +	-	+	+ $p = 0,9639$
PCH	0,99	Sehr stark +	-	+	+ $p = 0,9639$
FD	0,99	Sehr stark +	-	+	+ $p = 0,4670$
<b>b) nur adulte mittelalte Hausesel</b>					
DWL	0,91	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,8186$
ST	0,98	Sehr stark +	-	+	+ $p = 0,8186$
DCH	0,96	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,9780$
HL	0,99	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,7658$
PCH	0,99	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,7658$
FD	0,98	Sehr stark +	-	-	+ $p = 0,5596$

Demzufolge ist davon auszugehen, dass die Normierung / Kalibrierung zwar für die Ermittlung genauer Messwerte notwendig und sinnvoll ist, die Notwendigkeit im klinischen Alltag kann aufgrund des sehr starken linearen Zusammenhangs und der überwiegenden Übereinstimmung der Messwerte jedoch angezweifelt werden. In Einzelfällen kann die Kalibrierung von Längenmessungen im klinischen Alltag notwendig und sinnvoll sein, beispielsweise im Rahmen der Planung komplexer chirurgischer Eingriffe mit Einbringen von passgenauen Implantaten. Für die gewöhnliche Auswertung von Röntgenbildern und die Erfassung morphometrischer Messwerte ist sie jedoch nicht immer zwingend erforderlich.

### **Unterschied zwischen linker und rechter Gliedmaße bzw. medialen und lateralen Anteilen des Hufes**

Weiterhin wurde bei allen Parametern mithilfe eines gepaarten t-Tests - bzw. bei nicht normalverteilten Daten mithilfe des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests - untersucht, ob ein signifikanter Unterschied zwischen linker und rechter Gliedmaße bzw. im Falle der Messungen auf der dorsopalmaren Röntgenaufnahme ein signifikanter Unterschied zwischen medialen und lateralen Anteilen des Hufes bestand. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in den nachfolgenden Tabellen 3a und 3b dargestellt. Bei Parametern, die laut dem Ergebnis des Shapiro-Wilk-Tests nicht normalverteilt waren, ist eine Durchführung bzw. Auswertung des gepaarten t-Tests nicht zulässig, die Ergebnisse dieser Parameter sind deshalb durchgestrichen. Umgekehrt ist eine Auswertung des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests wiederum bei normalverteilten Daten nicht zulässig, weshalb die entsprechenden p-Werte ebenfalls durchgestrichen dargestellt sind. Bei den Parametern, bei denen der Shapiro-Wilk-Test ein  $p < 0,05$  ergab, deren Wertepunkte jedoch überwiegend innerhalb des QQ-Plots liegen, sodass von einer annähernden Normalverteilung ausgegangen werden kann, wurden sowohl der gepaarte t-Test als auch der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test herangezogen und deren Ergebnisse verglichen.

Tab. 3a: Ergebnisse der statistischen Tests im Hinblick auf einen Unterschied zwischen linker und rechter Gliedmaße

VARIABLE	Shapiro-Wilk-Test		gepaarter t-Test (wenn normalverteilt)		Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (wenn nicht normalverteilt)	
	p-Wert	Normalverteilung	p-Wert	signifikanter Unterschied?	p-Wert	signifikanter Unterschied?
<b>a) alle Esel</b>						
DWL	0,0299	annähernd	0,8247	nein	0,8113	nein
ST	0,0002	nein	<del>0,0867</del>	-	0,2494	nein
DCH	0,0131	annähernd	0,8213	nein	0,8200	nein
HL	0,7442	ja	0,0218	ja → L > R	<del>0,0346</del>	-
PCH	0,1209	ja	0,0529	nein	<del>0,1452</del>	-
FD	0,1078	ja	0,6158	nein	<del>0,5859</del>	-
HWA	0,0274	annähernd	0,6585	nein	0,3488	nein
CBA	0,1070	ja	0,5653	nein	<del>0,4937</del>	-
CR_c	0,1398	ja	0,7254	nein	<del>0,8765</del>	-
CR_m	0,0535	ja	0,6066	nein	<del>0,4523</del>	-
PA	0,7474	ja	0,0837	nein	<del>0,0928</del>	-
HA	0,1493	ja	0,4742	nein	<del>0,2759</del>	-
HPA1	0,2975	ja	0,6268	nein	<del>0,8809</del>	-
HPA 2	<0,0001	nein	<del>0,4936</del>	-	0,0642	nein
LWA	0,4037	ja	0,2341	nein	<del>0,3404</del>	-
MWA	0,8368	ja	0,1824	nein	<del>0,2203</del>	-
CW	0,5749	ja	0,9122	nein	<del>0,9469</del>	-
FW	0,0765	ja	0,8678	nein	<del>0,8678</del>	-
LWL	0,4172	ja	0,3961	nein	<del>0,3961</del>	-
MWL	0,0608	ja	0,5276	nein	<del>0,2077</del>	-
LCH	0,5179	ja	0,5007	nein	<del>0,5695</del>	-
MCH	0,0383	annähernd	0,4818	nein	0,1806	nein
SST	0,0394	annähernd	0,6818	nein	0,8678	nein
LST	0,4002	ja	0,7532	nein	<del>0,5669</del>	-
MST	0,4389	ja	0,8556	nein	<del>0,9602</del>	-

VARIABLE	Shapiro-Wilk-Test		gepaarter t-Test (wenn normalverteilt)		Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (wenn nicht normalverteilt)	
Kriterium	p-Wert	Normalverteilung	p-Wert	signifikanter Unterschied?	p-Wert	signifikanter Unter- schied?

**a) alle Esel (normierte Werte) → nur Längenmessungen**

DWL_N	0,0438	annähernd	0,1806	nein	0,3416	nein
ST_N	0,4665	ja	0,0447	ja → R > L	<del>0,0706</del>	-
DCH_N	0,4119	ja	0,1934	nein	<del>0,4668</del>	-
HL_N	0,5762	ja	0,0638	nein	<del>0,1047</del>	-
PCH_N	0,0425	nein	<del>0,0596</del>	-	0,1937	nein
FD_N	0,2748	ja	0,8317	nein	<del>0,0667</del>	-
CW_N	0,4436	ja	0,7689	nein	<del>0,4398</del>	-
FW_N	0,0757	ja	0,6902	nein	<del>0,5864</del>	-
LWL_N	0,3171	ja	0,1833	nein	<del>0,2202</del>	-
MWL_N	0,3571	ja	0,0819	nein	<del>0,0408</del>	-
LCH_N	0,6002	ja	0,2509	nein	<del>0,2369</del>	-
MCH_N	0,1403	ja	0,0673	nein	<del>0,0415</del>	-
SST_N	0,4319	ja	0,9367	nein	<del>0,8149</del>	-
LST_N	0,4491	ja	0,4540	nein	<del>0,6036</del>	-
MST_N	0,9952	ja	0,7557	nein	<del>0,7570</del>	-

VARIABLE	Shapiro-Wilk-Test		gepaarter t-Test (wenn normalverteilt)		Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (wenn nicht normalverteilt)	
Kriterium	p-Wert	Normalverteilung	p-Wert	signifikanter Unterschied?	p-Wert	signifikanter Unterschied?

**b) nur adulte mittelgroße Hausesel**

DWL	0,7164	ja	0,6629	nein	0,6629	-
ST	0,9581	ja	0,0167	ja → R > L	0,0187	-
DCH	0,5893	ja	0,6912	nein	0,5046	-
HL	0,6331	ja	0,1509	nein	0,1627	-
PCH	0,1047	ja	0,5124	nein	0,8508	-
FD	0,4589	ja	0,3302	nein	0,5046	-
HWA	0,1942	ja	0,7366	nein	0,8790	-
CBA	0,1141	ja	0,9946	nein	0,9338	-
CR_c	0,2973	ja	0,5933	nein	0,8572	-
CR_m	0,6990	ja	0,6722	nein	0,6775	-
PA	0,2823	ja	0,2428	nein	0,3567	-
HA	0,0407	annähernd	0,6295	nein	0,9938	nein
HPA1	0,7960	ja	0,4850	nein	0,5046	-
HPA2	<0,0001	nein	0,5393	-	0,5597	nein
LWA	0,6438	ja	0,8826	nein	0,8900	-
MWA	0,2951	ja	0,6108	nein	0,8247	-
CW	0,3164	ja	0,8492	nein	0,9559	-
FW	0,3136	ja	0,8147	nein	0,9779	-
LWL	0,8489	ja	0,8551	nein	0,8247	-
MWL	0,6577	ja	0,7914	nein	0,6573	-
LCH	0,6277	ja	0,6701	nein	0,7291	-
MCH	0,5546	ja	0,6671	nein	0,5252	-
SST	0,9679	ja	0,9755	nein	0,8032	-
LST	0,4659	ja	0,5734	nein	0,8247	-
MST	0,8806	ja	0,5356	nein	0,6373	-

VARIABLE	Shapiro-Wilk-Test		gepaarter t-Test (wenn normalverteilt)		Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test (wenn nicht normalverteilt)	
Kriterium	p-Wert	Normalverteilung	p-Wert	signifikanter Unterschied?	p-Wert	signifikanter Unter- schied?

**b) nur adulte mittelgroße Hausesel (normierte Werte) → nur Längenmessungen**

DWL_N	0,0839	ja	0,3871	nein	<del>0,5958</del>	-
ST_N	0,9571	ja	0,0110	ja → R > L	<del>0,0083</del>	-
DCH_N	0,7533	ja	0,2663	nein	<del>0,2732</del>	-
HL_N	0,5518	ja	0,1691	nein	<del>0,2645</del>	-
PCH_N	0,0016	nein	<del>0,4280</del>	-	0,9408	nein
FD_N	0,1079	ja	0,5649	nein	<del>0,7562</del>	-
CW_N	0,7700	ja	0,4775	nein	<del>0,3488</del>	-
FW_N	0,2955	ja	0,3547	nein	<del>0,3488</del>	-
LWL_N	0,7733	ja	0,6216	nein	<del>0,6215</del>	-
MWL_N	0,3521	ja	0,4951	nein	<del>0,3488</del>	-
LCH_N	0,5731	ja	0,4463	nein	<del>0,5039</del>	-
MCH_N	0,3278	ja	0,3838	nein	<del>0,2620</del>	-
SST_N	0,8833	ja	0,8122	nein	<del>0,9854</del>	-
LST_N	0,5656	ja	0,1996	nein	<del>0,2024</del>	-
MST_N	0,5756	ja	0,7921	nein	<del>0,9845</del>	-

Tab. 3b: Ergebnisse der statistischen Tests im Hinblick auf einen Unterschied zwischen medialen und lateralen Anteilen des Hufes

VARIABLE	Shapiro-Wilk-Test		gepaarter t-Test	
	p-Wert	Normalverteilung	p-Wert	signifikanter Unterschied?
<b>a) alle Esel</b>				
MWA vs. LWA	0,0290	annähernd	0,0075	ja
MWL vs. LWL	0,5927	ja	0,0789	nein
MCH vs. LCH	0,3575	ja	0,1111	nein
MST vs. LST	0,7010	ja	<0,001	ja
<b>b) nur adulte mittelgroße Hausesel</b>				
MWA vs. LWA	0,2158	ja	0,0003	ja (MWA > LWA)
MWL vs. LWL	0,9796	ja	0,4373	nein
MCH vs. LCH	0,7972	ja	0,4008	nein
MST vs. LST	0,5959	ja	<0,0001	ja (LST > MST)

Ebenso wie beim Pferd ist auch beim Esel der absolut regelmäßige und in sich und im Seitenvergleich symmetrische Huf eine Idealvorstellung. Diese wird von verschiedenen Faktoren wie Rasse, Bewegung des Tieres, Bodenverhältnisse, Aufzucht und Gewicht, Hufzubereitung und Beschlag, insbesondere aber auch durch die Gliedmaßen- und Zehenstellung abweichend beeinflusst (Budras et al. 2020). Es ist von großer Relevanz, eine regelmäßige von einer abweichenden Hufform zu unterscheiden, jedoch weiterhin die abweichenden Hufformen in unregelmäßige und krankhafte Hufformen zu differenzieren. So weist ein spitz oder stumpf gewinkelter Huf ebenso wie ein enger oder weiter Huf zwar eine unregelmäßige Hufform auf, ist jedoch nicht zwingend als krankhaft einzustufen. Im Kontrast dazu stellen beispielsweise ein Umformungshuf, ein Vollhuf oder ein krummer Huf durchaus krankhafte Hufformen dar.

Ebenso wie eine Abweichung vom Ideal des regelmäßigen und in sich symmetrischen Hufes ist auch eine milde Asymmetrie zwischen linker und rechter Gliedmaße bis zu einem bestimmten Grad normal (Parks 2010). Eine vor kurzem veröffentlichte Studie an Eseln konnte nachweisen, dass vor allem im Hinblick auf Trachtenhöhe, Hufwandlänge und Zehen- bzw. Trachtenwinkel signifikante Unterschiede zwischen linker und rechter Gliedmaße bestanden (Khan et al. 2023). Andere Studien wiederum konnten beim Pferd keinen signifikanten Unterschied zwischen linker und rechter Gliedmaße feststellen (Cripps u. Eustace 1999, Masoudifard et al. 2014).

Ein signifikanter Unterschied zwischen linker und rechter Gliedmaße konnte im Rahmen der eigenen Untersuchungen lediglich für die Trachtenlänge und die Sohlendicke mithilfe eines gepaarten t-Tests nachgewiesen werden. Während die Trachtenlänge an der linken Gliedmaße signifikant größer war, konnte eine signifikant höhere Sohlendicke der rechten Gliedmaße festgestellt werden. Die Ergebnisse der Auswertungen im Hinblick auf Unterschiede zwischen den Messwerten an linker und rechter Gliedmaße bleibt auch unter Einbeziehung der eigenen Ergebnisse in der Literatur sehr uneinheitlich, was die Fragwürdigkeit der klinischen Relevanz dieser statistischen Ergebnisse unterstreicht. Denn auch wenn Hufe grundsätzlich aus denselben anatomischen Strukturen und in derselben Art und Weise aufgebaut sind, so stimmen sie nie vollständig überein und sind individuell verschieden (Budras et al. 2020).

Bei der Beurteilung der Symmetrie des Hufes im mediolateralen Vergleich ist erneut die Tatsache von großer Relevanz, dass Gliedmaßen- und Zehenstellung einen entscheidenden Einfluss auf die Hufform haben (Budras et al. 2020). So führt zum Beispiel bereits das Vorliegen eines halbengen-halbweiten Hufes zwangsläufig zu einer deutlichen Asymmetrie zwischen medialen und lateralen Anteilen des Hufes. Eine solche Asymmetrie konnte auch beim Vergleich der medialen mit den lateralen Messungen auf der dorsopalmar Aufnahme in den eigenen Untersuchungen nachgewiesen werden: Der mediale Hufwandwinkel war signifikant größer und die mediale Hufwand damit steiler als die laterale Hufwand bzw. deren Winkel. Andere Autoren haben ebenfalls bereits beschrieben, dass beim Pferd die mediale Hufwand oft marginal kürzer ist beziehungsweise der mediale Hufwandwinkel steiler ist als der laterale (Turner 2003, O'Grady 2013). Bei der Beurteilung dieser Ergebnisse ist jedoch eben nicht nur die Hufkonformation, sondern die gesamte Gliedmaßenstellung relevant. Beide Aspekte sollten immer im Zusammenhang betrachtet werden. Im untersuchten Probandengut zeigten zahlreiche Probanden, wie auch der Esel in der nachfolgenden Abbildung 5, eine leicht zehenweite oder X – Beinige Stellung, hierzu passt folglich der Befund eines signifikant steileren medialen Hufwandwinkels. Auch wenn zahlreiche Probanden dieser Studie wie zu erwarten keine perfekt symmetrischen Hufe hatten, konnte keine klinische Relevanz dieser Asymmetrie im Sinne einer Lahmheit festgestellt werden. Dies unterstützt die These, dass ein in jeder Hinsicht regelmäßiger Huf mehr eine Idealvorstellung und ein theoretisches Konstrukt ist als die Realität.

Abb. 5: Ein Esel aus dem Probandengut mit leicht zehenweiter Gliedmaßenstellung



Neben einer unterschiedlichen Winkelung der medialen und lateralen Seitenwand konnte in den eigenen Untersuchungen außerdem medial eine signifikant kleinere Sohlendicke als lateral festgestellt werden. Dieses Ergebnis erhielten bereits andere Autoren bei vergleichbaren Auswertungen. Ein Erklärungsansatz für eine medial kleinere Sohlendicke war dort eine einseitige Hufbeinabsenkung im Rahmen einer chronischen Hufrehe (Baxter 1986, Herthel u. Hood 1999, Hunt u. Wharton 2010, Sherlock u. Parks 2013, Khan et al. 2023). Im Rahmen der eigenen Auswertung kann jedoch vielmehr davon ausgegangen werden, dass für diese Messunterschiede erneut die Gliedmaßen- und Zehenstellung der Probanden ursächlich in Frage kommt. Eine leicht zehenweite oder X-Beinige Gliedmaßenstellung, wie sie bei vielen der Probanden vorlag, resultiert in einer stärkeren Belastung der medialen Hufanteile und folglich in einem stärkeren Hornabrieb auf dieser Seite.

Zusammenfassend muss betont werden, dass das Ideal eines perfekt harmonischen, statisch und dynamisch symmetrischen Hufes aufgrund der Komplexität der Bewegung des Tieres und der Interaktion verschiedener innengelegener Strukturen kombiniert mit äußeren Einflüssen nahezu unmöglich zu erreichen scheint (Souza et al. 2016). Der statistische Nachweis von Unterschieden zwischen rechter und linker Gliedmaße oder zwischen medialen und lateralen Anteilen des Hufes, wie er auch in den eigenen Untersuchungen erbracht werden konnte, ist also wenig verwunderlich.

## **Korrelation mit dem Alter**

Für die meisten hier erhobenen Variablen konnte keine Korrelation mit dem Alter festgestellt werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen früherer Studien, die belegen, dass beim Pferd der Einfluss des Alters auf die Größe des Hufes nur sehr gering ist (Stachurska et al. 2011). In der eigenen Studie zeigten lediglich einige Parameter, die im Zusammenhang mit der chronischen Hufrehe stehen, eine schwache bis moderate positive Korrelation mit dem Alter (Hufbeinrotation, Hufbeinwinkel, Rehestrecke). Diese Beobachtung lässt sich mit der Tatsache erklären, dass ältere Tiere eine deutlich größere Wahrscheinlichkeit haben, im Laufe ihres längeren Lebens einmal an chronischer Hufrehe erkrankt zu sein, die eine irreversible Lageveränderung des Hufbeins verursachen kann. Des Weiteren zeigte die Weite der Sohlenfläche eine schwache positive, signifikante Korrelation mit dem Alter der Probanden. Der Eselhuf scheint also mit steigendem Alter marginal seine Form dahingehend zu verändern, dass der Huf im Bereich der Fußungsfläche etwas breiter wird. Eine frühere Studie fand heraus, dass der Zehenwinkel bei älteren Pferden flacher ist als bei jüngeren (Verschooten et al. 1989). Dies konnte anhand der vorliegenden Studie für den Esel so nicht bestätigt werden.

Neben der Korrelation morphometrischer Messungen mit dem Alter wurde in Studie 1 „*Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter Berücksichtigung des Alters*“ besonderer Wert auf das Auftreten von Hufbeinveränderungen beim Esel gelegt. Im Rahmen der Untersuchungen konnten in einer Population klinisch gesunder Esel zahlreiche röntgenologische Auffälligkeiten am Hufbein festgestellt werden, die als Abweichung von der röntgenologischen Normalanatomie bewertet wurden. Statistisch war jedoch keinerlei positiver Zusammenhang mit dem Alter der Tiere nachzuweisen. Hiermit konnte widerlegt werden, dass es sich bei den teilweise mittel- bis hochgradigen Veränderungen im Sinne von Knochenab- und -umbauprozessen um eine normale Alterserscheinung beim Esel handelt.

Insgesamt lässt sich also zusammenfassen, dass der Einfluss des Alters des Esels sowohl in Bezug auf Morphometrie und radiometrische Parameter als auch in Bezug auf strukturelle Eigenschaften des Hufbeins sehr gering ist.

## **Korrelation mit Größe und Gewicht**

Zahlreiche Parameter hingegen zeigten einen positiven Zusammenhang mit der Größe beziehungsweise dem Gewicht der Probanden. Wann immer eine Korrelation mit dem Gewicht eines Tieres bestand, so konnte auch eine Korrelation mit der Größe nachgewiesen werden und umgekehrt. Die Korrelation mit dem Gewicht war jedoch in der Regel stärker ausgeprägt. So waren ausnahmslos alle linearen Parameter, die auf der lateromedialen sowie der dorsopalmaren Röntgenaufnahme erhoben wurden, positiv mit dem Gewicht bzw. der Größe korreliert. Die Winkelmessungen hingegen wiesen keine Korrelation mit dem Gewicht oder der Größe der Tiere auf. Es bestand eine eindeutige Abhängigkeit absoluter Längenmessungen von Größe und Gewicht der Tiere, dadurch entstand eine hohe Varianz der Werte je nach Art und Größe der Probanden und eine sehr viel geringere Übereinstimmung der Längen- im Vergleich zu den Winkelmessungen. Aus diesem Grund sollen im Folgenden, abgesehen von wenigen Ausnahmen, die in der vorliegenden Arbeit ermittelten absoluten Längenwerte nicht mit denen durch andere Autoren publizierten Werten verglichen werden (Kummer et al. 2006).

Eine dieser wenigen Ausnahmen ist die Länge der dorsalen Hufwand DWL, für die eine besonders starke Streuung der Werte bestand. Die starke Abhängigkeit der Länge der dorsalen Hufwand vom Körpergewicht beim Pferd konnte bereits in früheren Studien nachgewiesen werden (Balch et al. 1991, Turner 2003). Für Pferde existiert aufgrund der starken Abhängigkeit der Zehenwandlänge vom Körpergewicht eine Kategorisierung in verschiedene Gewichtsklassen und eine Zuordnung zu entsprechend zu erwartenden Längen der dorsalen Hufwand (Turner 2003). Beim Esel hingegen konnte bislang nur eine schwache Abhängigkeit der Hufwandlänge vom Gewicht nachgewiesen werden (Souza et al. 2016). Demnach soll die in der eigenen Arbeit bewiesene moderate bis starke Abhängigkeit der Längenmessungen vom Gewicht der Probanden am Beispiel der dorsalen Hufwandlänge DWL noch einmal verdeutlicht werden. Eine Auswertung nach Gewichtskategorien ergab in dieser Studie die in der nachfolgenden Tabelle 4 dargestellten Ergebnisse.

Tab. 4: Auswertung des Parameters Dorsale Hufwandlänge DWL nach Gewichtskategorien

Dorsale Hufwandlänge in mm		
Kleine Esel (Bis 150 kg)	Mittelgroße Esel (151-299 kg)	Große Esel (Ab 300 kg)
40,4	52,00	77,72
42,13	53,48	79,57
59,4	57,74	84,26
59,61	59,56	88,57
62,66	59,98	93,72
65,65	60,29	93,85
66,20	60,73	96,36
68,71	62,21	103,7
68,72	62,57	104,11
70,02	62,68	109,44
70,82	63,41	
72,03	63,74	
74,02	65,89	
77,1	66,69	
	66,91	
	67,28	
	68,14	
	69,14	
	69,73	
	69,94	
	70,16	
	70,21	
	71,09	
	71,63	
	72,04	
	72,25	
	72,61	
	73,55	
	73,76	

73,85		
74,13		
74,24		
76,22		
76,81		
76,92		
76,95		
79,29		
80,49		
80,61		
85,56		
<b>Durchschnitt: 64,105 mm</b>	<b>Durchschnitt 69,112 mm</b>	<b>Durchschnitt 93,13 mm</b>

Die Esel wurden aufgeteilt in kleine (bis 150 kg), mittelgroße (151 - 299 kg) und große Esel (ab 300 kg). In der eigenen Studie gab es deutliche Überschneidungen zwischen den Gruppen. In der Gruppe der kleinen Esel ergaben sich DWL von 40,4 - 77,1 mm / Durchschnitt 64,1 mm, in der Gruppe der mittelgroßen Esel wurden DWL von 52,0 - 85,7 mm / Durchschnitt 69,1 mm gemessen und in der Gruppe der großen Esel variierten die Messungen der DWL zwischen 77,7 - 109,4 mm / Durchschnitt 93,13 mm. Im Durchschnitt bestätigte sich demnach dennoch eine Zunahme mit dem steigenden Gewicht, die bereits durch die Spearman-Rangkorrelation mit dem Korrelationskoeffizienten von 0,64 (starke positive Korrelation) und einem  $p < 0,0001$  bewiesen werden konnte.

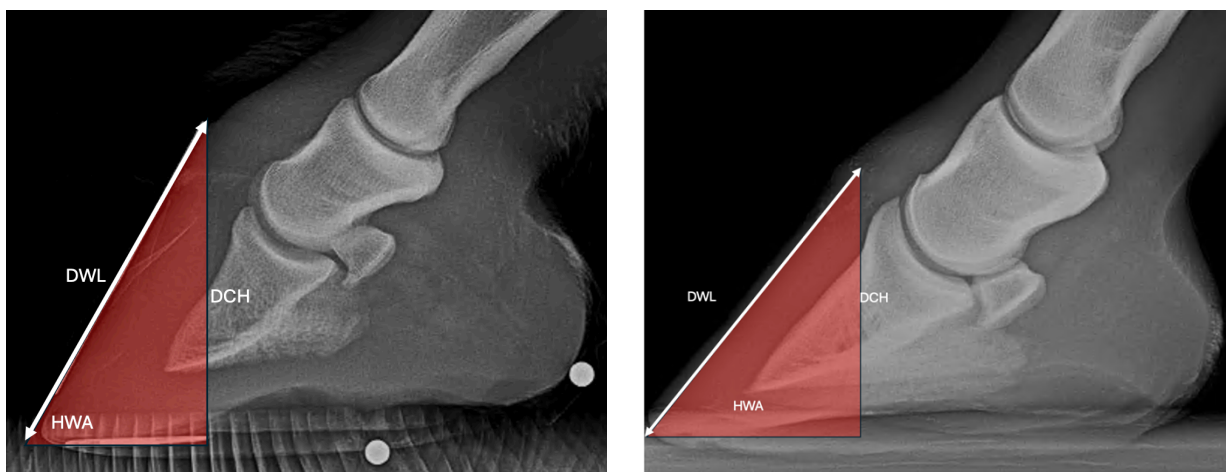
Beim Vergleich der Werte mit den Werten von Turner (2003) fällt jedoch auf, dass der hier angegebene Wert für Kleinpferde mit einem Gewicht von 360 - 400 kg mit 7,6 cm deutlich unterhalb dem in der eigenen Studie ermittelten entsprechenden Wert beim Großesel (300 - 408 kg) von durchschnittlich 9,3 cm liegt. Andere Autoren geben dorsale Hufwandlängen von 9,5 - 9,7 cm für beschlagene Warmblutpferde (Kummer et al. 2006) und 7,8 cm für Ponys (Thieme et al. 2015b) an, beide Autoren machen jedoch keine Angaben zum Gewicht ihrer Probanden.

Ein Aspekt, der bei der Beurteilung der DWL im Vergleich zwischen den beiden Tierarten einen entscheidenden Einfluss hat, ist der größere Vorderwandwinkel des Esels. Jedoch muss nicht nur dieser, sondern auch die Kronsaumhöhe bei der Beurteilung in Betracht gezogen werden. Vergleichswerte für die dorsale Kronsaumhöhe konnten, wie in der Tabelle 3 der Veröffentlichung 2 veranschaulicht wurde, in der Literatur nicht gefunden werden. Der Vergleich der eigenen Ergebnisse mit denen von Thieme et al. (2015b) zeigt jedoch, dass zumindest in der dorsopalmaren Ansicht bei Messung der medialen und lateralen Kronsaumhöhe im Bereich

der medialen und lateralen Seitenwand der Esel eine größere Kronsaumhöhe als die von Thieme et al. (2015b) untersuchten Ponys hat. Unterstützt wird diese Beobachtung zusätzlich davon, dass der Esel grundsätzlich enge Hufe besitzt, die in der Regel höher sind als regelmäßige Hufe (Budras et al. 2020).

Ginge man davon aus, dass bei ähnlichem Gewicht die dorsale Kronsaumhöhe bei Pferd und Esel ähnlich sei, so müsste bei einem größeren Hufwandwinkel die Länge der dorsalen Hufwand automatisch kürzer sein. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung 6 demonstriert.

Abb. 6: Lateromediale Röntgenaufnahme der Zehe eines Esels aus dem Probandengut (links) und eines Pferdes aus dem Patientengut der Klinik (rechts)



Die Abbildungen 7 und 8 veranschaulichen in Kombination mit Tabelle 5 die mathematische Grundlage für die Tatsache, dass die dorsale Hufwand, die im Dreieck der Hypotenuse entspricht, bei einem größeren Winkel  $\alpha$  und gleichbleibender dorsaler Kronsaumhöhe (im Dreieck entsprechend der Gegenkathete) kürzer würde. Wie in Tabelle 5 sichtbar wird, wird  $\sin(\alpha)$  größer, je größer der Winkel ist. Da diese Funktion in der Formel in der Abbildung 8 im Nenner steht, wird die Hypotenuse mit steigendem Winkel kürzer.

Aufgrund der Tatsache, dass der Esel jedoch einen engen Huf und damit auch im Literaturvergleich eine größere Kronsaumhöhe hat, ist dieser einfache mathematische Beweis hier leider nicht anwendbar. Die Kronsaumhöhe entspricht im Dreieck der Gegenkathete  $a$ , diese steht im Zähler der Formel (Abb. 8), sodass mit größer werdender Kronsaumhöhe (entsprechend Gegenkathete  $a$ ) auch die Dorsale Hufwandlänge (entsprechend Hypotenuse  $c$ ) länger werden muss.

Abb. 7: Rechtwinkliges Dreieck als Grundlage der Trigonometrie

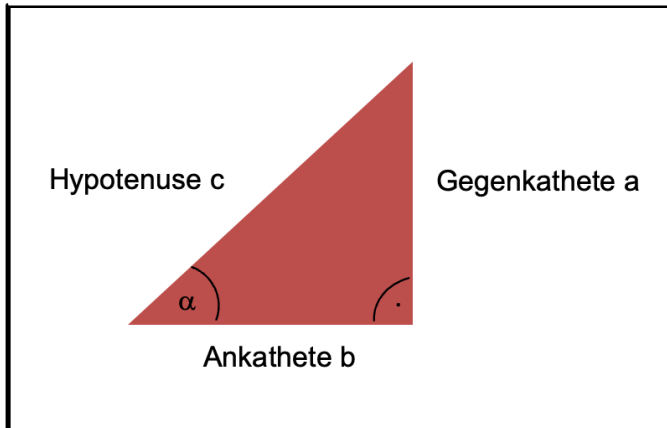


Abb. 8: Formel zur Berechnung der Hypotenuse

$$\sin(\alpha) = \frac{\text{Gegenkathete}}{\text{Hypotenuse}} \rightarrow \text{Hypotenuse} = \frac{a}{\sin \alpha}$$

Tab. 5: Sinustabelle von 0° bis 90°

Winkel	Sinuswert (gerundet)
0°	0,000
10°	0,174
20°	0,342
30°	0,500
40°	0,643
50°	0,766
60°	0,866
70°	0,940
80°	0,985
90°	1,000

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass ein größerer Hufwandwinkel  $\alpha$  die DWL zwar verkürzt, eine größere Kronsaumhöhe sie wiederum aber verlängert. Aus diesem Grund ist die Länge der Dorsalen Hufwand zwischen Pferd und Esel nicht direkt vergleichbar. Dies wiederum unterstreicht die große Relevanz dieser Arbeit zur Schaffung eselspezifischer Referenzwerte aufgrund der nicht unerheblichen speziesspezifischen Unterschiede.

Unbestritten davon bleibt jedoch die nachgewiesene Korrelation der DWL mit dem Gewicht der Probanden, diese steht im Einklang mit bereits veröffentlichten Ergebnissen sowie mit der Tatsache, dass ein Huf in Relation zum Körpergewicht groß genug sein muss, um durch die Hornkapsel die innenliegenden Strukturen hinreichend zu schützen (Stachurska et al. 2011). Neben den morphometrischen Längenmessungen korrelierten auch alle erhobenen Hufbeinveränderungen signifikant mit dem Gewicht der Tiere. Ein hohes Gewicht scheint für – dementsprechend vermutlich druckbedingte – Umbauprozesse am Knochen zu prädisponieren.

Die Ergebnisse der Spearman-Rangkorrelation zur Berechnung der Abhängigkeit der verschiedenen Parameter von Alter, Größe und Gewicht der Probanden ist in der nachfolgenden Tabelle 6 detailliert dargestellt.

Tab. 6: Ergebnisse der Spearman-Rangkorrelation im Hinblick auf mögliche Korrelationen der Parameter mit Alter, Größe und Gewicht der Probanden

**Spearman-Rangkorrelation ( $p < 0,05$ )**

**a) alle Esel**

VAR	Korrelation mit dem Alter				Korrelation mit dem Gewicht				Korrelation mit der Größe			
	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign
DWL	0,18	Schwach +	0,0938	-	0,48	Mod +	<0,0001	+	0,33	Mod +	0,0015	+
DWL_N	0,21	Schwach+	0,0791	-	0,64	Stark+	<0,0001	+	0,56	Stark +	<0,0001	+
ST	0,03	Kein	0,8117	-	0,29	Schwach +	0,0077	+	0,15	Schwach +	0,1688	-
ST_N	-0,02	Kein	0,8986	-	0,38	Mod +	0,0017	+	0,34	Mod+	0,0040	+
DCH	0,14	Schwach +	0,2056	-	0,51	Mod +	<0,001	+	0,34	Mod +	0,0012	+
DCH_N	0,14	Schwach+	0,2539	-	0,67	Stark+	<0,0001	+	0,57	Stark+	<0,0001	+
HL	-0,06	Kein	0,5652	-	0,39	Mod +	0,0004	+	0,23	Schwach +	0,0310	+
HL_N	-0,21	Schwach-	0,0909	-	0,48	Mod+	0,0001	+	0,33	Mod+	0,0072	+
PCH	-0,08	Kein	0,4823	-	0,37	Mod +	0,0006	+	0,25	Schwach +	0,0191	+
PCH_N	-0,23	Schwach -	0,0707	-	0,49	Mod+	<0,0001	+	0,35	Mod+	0,0043	+
FD	0,23	Schwach +	0,0337	+	0,45	Mod +	<0,0001	+	0,31	Mod +	0,0024	+
FD_	0,22	Schwach+	0,0726	-	0,47	Mod+	0,0001	+	0,43	Mod+	0,0002	+
HWA	0,02	Kein	0,8690	-	0,24	Schwach +	0,0244	+	0,16	Schwach+	0,12	-
CBA	0,29	Schwach+	0,0061	+	0,23	Schwach +	0,0311	+	0,23	Schwach +	0,0272	+

VAR	Korrelation mit dem Alter				Korrelation mit dem Gewicht				Korrelation mit der Größe			
	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign
CR_c	0,34	Mod +	0,0010	+	-0,02	Kein	0,8928	-	0,08	Kein	0,4773	-
CR_m	0,33	Mod +	0,0017	+	-0,09	Kein	0,3827	-	0,00	Kein	0,9959	-
PA	0,08	Kein	0,4454	-	0,13	Schwach+	0,2205	-	0,15	Schwach+	0,1542	-
HA	-0,12	Schwach-	0,2696	-	0,09	Kein	0,4173	-	0,14	Schwach+	0,1805	-
HPA1	-0,11	Schwach-	0,2904	-	-0,22	Schwach-	0,0393	+	-0,38	Mod -	0,0002	+
HPA2	-0,05	Kein	0,6631	-	-0,09	Kein	0,4453	-	-0,04	Kein	0,7326	-
LWA	-0,22	Schwach-	0,0365	+	0,05	Kein	0,6835	-	-0,11	Schwach-	0,3091	-
MWA	-0,16	Schwach-	0,1319	-	-0,01	Kein	0,9258	-	-0,05	Kein	0,6312	-
CW	0,18	Schwach+	0,0867	-	0,61	Stark+	<0,0001	+	0,44	Mod+	<0,0001	+
CW_N	0,26	Schwach+	0,0342	+	0,86	Sehr Strk+	<0,0001	+	0,76	Sehr Strk+	<0,0001	+
FW	0,27	Schwach+	0,0097	+	0,59	Stark +	<0,0001	+	0,44	Mod+	<0,0001	+
FW_N	0,34	Mod+	0,0054	+	0,76	Sehr Strk+	<0,0001	+	0,69	Stark+	<0,0001	+
LWL	0,19	Schwach+	0,0778	-	0,49	Mod+	<0,0001	+	0,39	Mod+	0,0001	+
LWL_N	0,24	Schwach+	0,0538	-	0,65	Stark+	<0,0001	+	0,64	Stark+	<0,0001	+
MWL	0,17	Schwach+	0,1113	-	0,55	Stark+	<0,0001	+	0,40	Mod+	<0,0001	+
MWL_N	0,19	Schwach+	0,1297	-	0,71	Sehr Strk+	<0,0001	+	0,62	Stark+	<0,0001	+

VAR	Korrelation mit dem Alter				Korrelation mit dem Gewicht				Korrelation mit der Größe			
	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign
LCH	0,20	Schwach+	0,0548	-	0,49	Mod+	<0,0001	+	0,39	Mod+	0,0001	+
LCH_N	0,27	Schwach+	0,0280	+	0,64	Stark+	<0,0001	+	0,62	Stark+	<0,0001	+
MCH	0,19	Schwach+	0,0834	-	0,56	Stark+	<0,0001	+	0,42	Mod+	<0,0001	+
MCH_N	0,21	Schwach+	0,0946	-	0,71	Sehr Strk+	<0,0001	+	0,63	Stark+	<0,0001	+
SST	0,11	Schwach+	0,2934	-	0,34	Mod+	0,0014	+	0,19	Schwach+	0,0685	-
SST_N	0,14	Schwach+	0,2467	-	0,48	Mod+	<0,0001	+	0,41	Mod+	0,0006	+
LST	0,17	Schwach+	0,1170	-	0,44	Mod +	<0,0001	+	0,29	Schwach+	0,0054	+
LST_N	0,1	Kein	0,4401	-	0,54	Stark+	<0,0001	+	0,46	Mod+	<0,0001	+
MST	0,17	Schwach+	0,1200	-	0,39	Mod+	0,0002	+	0,24	Schwach+	0,0225	+
MST_N	0,16	Schwach+	0,1885	-	0,44	Mod+	0,0002	+	0,38	Mod+	0,0016	+

**b) nur adulte mittelgroße Hausesel**

VAR	Korrelation mit dem Alter				Korrelation mit dem Gewicht				Korellation mit der Größe → entfällt
	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign	
DWL	0,16	Schwach+	0,3033	-	0,53	Stark+	0,0002	+	
DWL_N	0,18	Schwach+	0,2819	-	0,49	Mod+	0,0019	+	
ST	-0,03	Kein	0,8697	-	0,31	Mod+	0,0370	+	
ST_N	-0,16	Schwach-	0,3310	-	0,28	Schwach+	0,0870	-	
DCH	-0,02	Kein	0,8874	-	0,61	Stark+	<0,0001	+	
DCH_N	-0,03	Kein	0,8832	-	0,58	Stark+	0,0001	+	
HL	-0,23	Schwach-	0,1343	-	0,55	Stark+	0,0001	+	
HL_N	-0,35	Mod-	0,0343	+	0,64	Stark+	<0,0001	+	

VAR	Korrelation mit dem Alter				Korrelation mit dem Gewicht			
	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign
PCH	-0,26	Schwach-	0,0848	-	0,53	Stark+	0,0003	+
PCH_N	-0,39	Mod-	0,0186	+	0,65	Stark+	<0,0001	+
FD	0,14	Schwach+	0,3504	-	0,30	Mod+	0,0416	+
FD_	0,15	Schwach+	0,3735	-	0,24	Schwach+	0,1459	-
HWA	-0,32	Mod-	0,0305	+	0,19	Schwach+	0,2145	-
CBA	-0,19	Schwach-	0,2107	-	-0,003	Kein	0,9838	-
CR_c	0,08	Kein	0,5812	-	-0,25	Schwach-	0,0920	-
CR_m	0,12	Schwach+	0,4186	-	-0,27	Schwach -	0,0659	-
PA	-0,09	Kein	0,5386	-	0,07	Kein	0,6267	-
HA	-0,11	Schwach-	0,4887	-	0,06	Kein	0,6950	-
HPA1	0,02	Kein	0,8874	-	0,32	Moderat+	0,0311	+
HPA2	0,09	Kein	0,5112	-	-0,12	Schwach-	0,4156	-
LWA	-0,17	Schwach-	0,2553	-	0,25	Schwach+	0,0987	-
MWA	-0,17	Schwach-	0,2522	-	0,06	Kein	0,6980	-
CW	0,15	Schwach+	0,3092	-	0,65	Stark+	<0,0001	+
CW_N	0,23	Schwach+	0,1693	-	0,65	Stark+	<0,0001	+

VAR	Korrelation mit dem Alter				Korrelation mit dem Gewicht			
	r	Bed	p	Sign	r	Bed	p	Sign
FW	0,34	Mod+	0,0214	+	0,51	Stark+	0,0003	+
FW_N	0,40	Mod+	0,0122	+	0,47	Mod+	0,0028	+
LWL	0,19	Schwach+	0,1941	-	0,35	Mod+	0,0179	+
LWL_N	0,29	Schwach+	0,0814	-	0,34	Mod+	0,0365	+
MWL	0,09	Kein	0,5600	-	0,46	Mod+	0,0013	+
MWL_N	0,16	Schwach+	0,3334	-	0,49	Mod+	0,0019	+
LCH	0,17	Mod+	0,2474	-	0,36	Mod+	0,0133	+
LCH_N	0,26	Schwach+	0,1154	-	0,36	Mod+	0,0273	+
MCH	0,09	Kein	0,5170	-	0,47	Mod+	0,0011	+
MCH_N	0,19	Schwach+	0,2597	-	0,49	Mod+	0,0016	+
SST	0,24	Schwach+	0,1116	-	0,41	Mod+	0,0050	+
SST_N	0,15	Schwach+	0,3565	-	0,37	Mod+	0,0205	+
LST	0,21	Schwach+	0,1524	-	0,44	Mod+	0,0021	+
LST_N	0,07	Kein	0,6840	-	0,43	Mod+	0,0066	+
MST	0,20	Schwach+	0,1814	-	0,39	Mod+	0,0082	+
MST_N	0,14	Schwach+	0,4164	-	0,33	Mod+	0,0455	+

Abkürzungen

Bed – Bedeutung  
Mod – Moderat  
Sign – Signifikanz  
VAR – Variable

## **Beurteilung im Hinblick auf chronische Hufrehe**

Die Hufrehe ist eine der häufigsten Lahmheitsursachen beim Esel und für bis zu 13 % der Euthanasien bei dieser Tierart verantwortlich (Thiemann u. Rickards 2013, Crane u. Evans 2018). Es ist absolut nachvollziehbar, dass im Rahmen der eigenen Arbeit Tiere untersucht wurden, die eindeutige röntgenologische Befunde im Sinne einer chronischen Hufrehe aufweisen.

Alle Probanden wiesen ein ungestörtes Allgemeinbefinden auf und waren im Schritt lahmfrei. Diese Einschlusskriterien ließen allerdings nicht den Rückschluss auf eine vollumfängliche Gesundheit in jeder Hinsicht, insbesondere auch im Hinblick auf die orthopädische Situation der Tiere, zu. Bereits in früheren Studien wurde festgestellt, dass nicht immer ausgeschlossen werden kann, dass auch Tiere mit einer Hufkrankung in eine vermeintlich „normale“ Gruppe einbezogen werden (Collins et al. 2011). Als normal wurden in dieser Studie alle Tiere angesehen, die keine bekannte Vorgeschichte im Zusammenhang mit hufassoziierten Problemen und außerdem keine deutlichen, visuell wahrnehmbaren Pathologien der Hufkapsel aufwiesen (Collins et al. 2011).

Da diese Einschlusskriterien nahezu identisch sind zu denen der eigenen Studie, ist die Aussage durchaus auf die eigene Untersuchung übertragbar. In einer bereits durchgeführten Untersuchung an Mammuteseln konnte in der „klinisch gesunden“ Gruppe hingegen keine Hufbeinrotation nachgewiesen werden. Als klinisch gesund wurden in dieser Studie jene Tiere angesehen, die sowohl in der Anamnese als auch in der Allgemeinen und der Lahmheitsuntersuchung keine Hinweise auf eine frühere oder zum Zeitpunkt der Untersuchung bestehende Erkrankung sowie optisch „normale“ Hufe hatten (Walker et al. 1995). Bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Studie ist jedoch anzumerken, dass eine kleine Population von 10 Tieren im jungen Alter von 2 bis 4 Jahren untersucht wurde (Walker et al. 1995). Im Rahmen der eigenen Untersuchungen konnte für die Hufbeinrotation als einen der wenigen Parameter eine signifikante positive Korrelation mit dem Alter der Tiere nachgewiesen werden. Aufgrund dieser Korrelation und der sehr unterschiedlichen Altersverteilung der Probanden zwischen den eigenen und denen durch Walker et al. (1995) durchgeführten Untersuchungen können dessen Ergebnisse nicht uneingeschränkt auf die eigenen Untersuchungen übertragen werden.

Sowohl die akute als auch die chronische Form der Hufrehe werden beim Esel oftmals nicht oder erst spät erkannt (Crane u. Evans 2018). Die Klinik der Hufrehe beim Esel unterscheidet sich in vielerlei Hinsicht deutlich von der des Pferdes (Walker et al. 1995, Herthel u. Hood 1999, Collins et al. 2011, Collins et al. 2012, Crane u. Evans 2018). In den eigenen Untersuchungen wies ein nicht unerheblicher Anteil der Probanden trotz einer Lahmfreiheit im Schritt deutliche röntgenologische Veränderungen am Hufbein auf. Collins et al. (2012) äußern sich

sogar dahingehend, dass oftmals erst dann klinische Symptome und eine andauernde Lahmheit auftreten, wenn bereits sehr deutliche degenerative Veränderungen der knöchernen Strukturen erkennbar sind.

Bereits die Hufform kann in Bezug auf chronische Hufrehe hinweisend sein, sofern sie beispielsweise eine konkave dorsale Hufwand oder Wachstumsringe, die im Ballenbereich weiter sind als an der Zehenspitze, aufweist (Parks 2010). Die röntgenologische Untersuchung gibt Hinweise auf Vorliegen, Schwere, Chronizität und Progressivität der Erkrankung, ist also unter anderem wichtig zur Einschätzung der Prognose sowie zur Planung von Korrekturmaßnahmen (Herthel u. Hood 1999, Crane u. Evans 2018). Die Röntgenbilder sollten aber immer im Zusammenhang mit dem klinischen Bild beurteilt werden, denn der prognostisch wichtigste Parameter bleibt die klinische Einschätzung und die Einteilung in die verschiedenen Formen der Hufrehe (Cripps u. Eustace 1999, Crane u. Evans 2018). Nichtsdestotrotz ist die objektive radiologische Beurteilung anatomischer Veränderungen vor allem bei milden Abweichungen relevant, auch wenn die röntgenologischen Veränderungen variieren und nicht zwingend mit der Schwere der Klinik korrelieren (Collins et al. 2012).

Röntgenologische Veränderungen im Rahmen der chronischen Hufrehe beinhalten zum einen Lageveränderungen, zum anderen aber auch strukturelle Veränderungen des Hufbeins. Während der chronischen Phase der Erkrankung kommt es zur laminaren Dysadhäsion des Halteapparates des Hufbeins, die dann zur Lageveränderung des Hufbeins im Sinne von Hufbeinrotation und -absenkung führt, welche die am häufigsten beurteilten röntgenologischen Parameter zur Einschätzung dieses Krankheitsbildes darstellen (Collins et al. 2010, Hunt u. Wharton 2010, Collins et al. 2012, Sherlock u. Parks 2013).

Sind Lageveränderungen des Hufbeins nachweisbar, so handelt es sich ausnahmslos um eine chronische Hufrehe (Hemker u. Hertsch 2002). Sofern nur der distale Anteil des Hufbeinträgers vom Funktionsverlust betroffen ist, kommt es zur Hufbeinrotation, während ein Versagen des Hufbeintragapparates auf der gesamten Dorsalfläche zur Hufbeinabsenkung führt (Hemker u. Hertsch 2002). Das Ausmaß der Instabilität zwischen Hufbein und Hornkapsel wird als der wichtigste Faktor bei chronischer Hufrehe angesehen, die Hufbeinrotation ist hierbei pathognomonisch für die entsprechende Erkrankung (Herthel u. Hood 1999, Hunt u. Wharton 2010).

In der normalanatomischen Beschaffenheit sollten die dorsale Kontur des Hufbeins und die dorsale Hufwand parallel zueinander sein (Linford et al. 1993, Dyson et al. 2011, Sherlock u. Parks 2013, Crane u. Evans 2018). Eine Divergenz zwischen dorsaler Kontur des Hufbeins und dorsaler Hufwand zwischen 0 und 5° kann jedoch als physiologisch angesehen werden (Colles 1983, Park 1989, Linford et al. 1993, Collins et al. 2011, Cardona et al. 2021). Die Parallelität dieser Strukturen geht im Rahmen der chronischen Hufrehe infolge des Funktionsverlustes des Aufhängeapparates des Hufbeins verloren (Colles 1983, Butler et al. 2000). Es

handelt sich bei dem Winkel, der die Divergenz zwischen dorsaler Kontur des Hufbeins und dorsaler Hufwand beschreibt, jedoch um einen Parameter, der mit viel Vorsicht interpretiert werden sollte. Er kann erheblich durch das Kürzen bzw. langes Wachsen der Zehe beeinflusst werden und sollte optimalerweise vor der Hufbearbeitung sowie mit wiederholten Röntgenaufnahmen untersucht werden, um ein aussagekräftigeres Ergebnis zu erzielen (Butler et al. 2000, Thieme et al. 2015a). Auch hinsichtlich der prognostischen Relevanz dieses Parameters ist je nach Autor zwar eine Korrelation zwischen einer stärkeren Rotation und einer vorsichtigeren Prognose beschrieben, die prognostische Aussagekraft ist insgesamt jedoch relativ gering (Cripps u. Eustace 1999, Herthel u. Hood 1999).

Ein weiterer Parameter, der bei Equiden mit chronischer Hufrehe erhoben wird, ist die Rehestrecke als vertikaler Abstand zwischen Niveau des Kronsaums und Processus extensorius des Hufbeins. Die Angaben für Normwerte dieses Parameters variieren in der Literatur sehr deutlich, bewegen sich beim Pferd aber überwiegend zwischen 0 und 15 mm (Sherlock u. Parks 2013, Thieme et al. 2015a, Thieme et al. 2015b). Beim Esel ist das Hufbein erwiesenermaßen weiter distal in der Hornkapsel lokalisiert, sodass der Processus extensorius des Hufbeins und der Kronsaum anders als beim Pferd physiologischerweise nicht in einer Ebene liegen (Collins et al. 2011, El-Shafaey et al. 2017). Die Rehestrecke ist laut früheren Untersuchungen beim Esel dreimal so groß wie bei ähnlich großen Ponys und ist eher vergleichbar mit Werten, die bei größeren Voll- oder Warmblütern erhoben werden konnten (Linford et al. 1993, Cripps u. Eustace 1999). Für den Esel wurden bisher Normwerte von 10,4 mm bis zu 25,2 mm publiziert (Collins et al. 2011, El-Shafaey et al. 2017). In dieser Studie konnte ein Mittelwert von 14 bis 16 mm ermittelt werden, sodass die eigenen Ergebnisse im Mittel zwischen anderen bereits publizierten Daten für den Esel liegen und sich im oberen Bereich der für Pferde veröffentlichten Werte befinden. In Bezug auf die prognostische Relevanz dieses Parameters existieren auch bei diesem Parameter unterschiedliche Angaben in der Fachliteratur. Während er von manchen Autoren als ein aussagekräftiger Parameter bei chronischer Hufrehe angesehen wird (Cripps u. Eustace 1999, Herthel u. Hood 1999), versprechen sich andere Autoren von der Messung der Rehestrecke keine prognostisch verwertbaren Ergebnisse (Hemker u. Hertsch 2002). Vor allem in den frühen Phasen der Erkrankung scheint die Aussagekraft der Rehestrecke eingeschränkt zu sein (Linford et al. 1993, Cripps u. Eustace 1999, Kummer et al. 2006, Thieme et al. 2015a). Zusammenfassend scheint die Rehestrecke beim Esel aber definitiv weniger aussagekräftig zu sein als beim Pferd.

Einigkeit herrscht in der Fachliteratur jedoch in Bezug auf die Tatsache, dass im Rahmen der chronischen Hufrehe nicht nur Lageveränderungen des Hufbeins beobachtet werden können, sondern auch Umbauprozesse mit Knochenresorption und Knochenneubildung am Hufbein selbst, die als „Digital Phalanx Remodelling“ die einwirkenden Kräfte widerspiegeln (Herthel u.

Hood 1999, Dyson et al. 2011, Sherlock u. Parks 2013). Der erhöhte Druck auf die Sohlenfläche und insbesondere auf den Bereich der Hufbeinspitze führt zur Demineralisierung der Sohlenfläche, zur Ostitis rarefaciens und zur Aufbiegung der Margo solearis des Hufbeins dorsal („Hutkrempebildung“) sowie zur verminderten Sohlenhornproduktion (Herthel u. Hood 1999, Butler et al. 2000, Hemker u. Hertsch 2002). Im Bereich der Dorsalfläche des Hufbeins führt die Ostitis hingegen durch eine Ernährungsstörung zur Lösung der Hufmatrix vom Hufbein und zur Ostitis ossificans (Herthel u. Hood 1999, Hemker u. Hertsch 2002). Die Umbauprozesse des Hufbeins weisen eine signifikante Korrelation mit der Hufbeinrotation, nicht aber mit der Rehestrecke, auf (Collins et al. 2011). Bei den eigenen Probanden, ausnahmslos allgemein gesunde und lahmfreie Esel, konnten röntgenologische Veränderungen des Hufbeins vergleichsweise häufig vorgefunden werden. Dabei wurden hochgradige, mit einer chronischen Hufrehe im Zusammenhang stehende Veränderungen signifikant häufiger an den Vordergliedmaßen nachgewiesen.

Alles in allem geht die Hufrehe also sowohl mit einer Dislokation des Hufbeins und dadurch auch veränderten morphometrischen Messwerten - beispielsweise in Bezug auf Hufbeinrotation, Hufbeinwinkel, Rehestrecke, Palmarwinkel und Sohlendicke - als auch mit strukturellen Veränderungen des Knochens einher. Die Dislokation des Hufbeins führt zu veränderten Druckverhältnissen, welche wiederum die strukturellen Umbauprozesse bedingen.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der eigenen Untersuchungen im Hinblick auf das Vorliegen von chronischer Hufrehe bei den untersuchten Probanden lässt sich schlussfolgern, dass einige der allgemeingesunden und im Schritt lahmfreien Probanden deutliche Veränderungen des Hufbeins im Sinne von Lageveränderung – welche mit veränderten morphometrischen Messungen einhergeht – sowie im Sinne von strukturellen Umbauprozessen am Knochen, aufwiesen. Diese Patienten sind laut dem gültigen Hufreheleitfaden von 2017 dem chronisch stabilen Stadium der Hufrehe zuzuordnen, welches unter anderem durch eine Lahmfreiheit im Schritt und eine stabile Lage des Hufbeins gekennzeichnet ist (GPM Hufrehe-Leitfaden 2017). Die röntgenologisch feststellbaren Veränderungen haben also im Stadium der chronisch stabilen Hufrehe keine direkte klinische Relevanz. Die Tatsache, dass einige Probanden sich offensichtlich im chronisch stabilen Stadium einer Hufrehe befanden, ist bei der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse dieser Studie zu berücksichtigen.

## Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die morphometrischen Messungen lediglich an den Vordergliedmaßen durchgeführt. Eine Durchführung ähnlicher Untersuchungen an den Hintergliedmaßen wäre erstrebenswert, um auch die Unterschiede zwischen Vorder- und Hintergliedmaßen untersuchen zu können.

Zudem war die Auswertung auf allgemeingesunde und im Schritt lahmfreie Tiere beschränkt. Interessant wäre es, Folgestudien an Tieren mit einer nachgewiesenen chronischen Hufrehe vorzunehmen und den genauen Einfluss dieser Erkrankung auf die verschiedenen morphometrischen Parameter zu untersuchen.

Darüber hinaus wäre es wertvoll zu untersuchen, welche Werte bei vergleichbaren Untersuchungen bei Hybriden von Pferden und Eseln (Mauleseln und Maultieren) sowie anderen Equiden (Zebras) ermittelt werden könnten.

## Zusammenfassung

Das Ziel dieser Untersuchungen war es, Normalwerte für verschiedene morphometrische Parameter an der dorsopalmaren sowie der lateromedialen Röntgenaufnahme der Zehe des Esels zu ermitteln, um Referenzwerte für die Beurteilung solcher Röntgenbilder bereitzustellen. Die ermittelten Normwerte können bei der orthopädischen Untersuchung von Eseln unterstützend verwertet werden und insbesondere die Auswertung der bildgebenden Untersuchungen erleichtern.

Darüber hinaus sollte im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Abhängigkeit der Parameter von Alter, Größe und Gewicht der Probanden untersucht werden. Die einzigen Parameter, die eine deutliche Abhängigkeit vom Alter der Tiere zeigten, waren jene, die mit pathologischen Abweichungen im Sinne der chronischen Hufrehe in Verbindung gebracht werden können. Für alle anderen erhobenen Messwerte konnte ebenso wie für die Hufbeinveränderungen keine signifikante Korrelation mit dem Alter nachgewiesen werden.

Mit dem Gewicht der Probanden korrelierten hingegen alle erhobenen Längenwerte signifikant. Je schwerer der Esel, umso größer sind demnach auch die Dimensionen des Hufes. Die Rehestrecke und die Sohlendicke zeigten dabei eine schwächere Korrelation als die übrigen Längenmessungen. Auch die röntgenologischen Hufbeinveränderungen standen signifikant mit dem Gewicht im Zusammenhang.

Insgesamt scheint das Gewicht des Esels also einen deutlich größeren Einfluss auf dessen Konformation des Hufes und Morphometrie des Hufbeins zu haben als das Alter des Tieres. Beim Vergleich zwischen linker und rechter Gliedmaße konnte ein signifikanter Unterschied hinsichtlich Sohlendicke und Trachtenlänge nachgewiesen werden. Diese Ergebnisse sind jedoch nicht mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen in Einklang zu bringen, sodass die klinische Relevanz dieses statistischen Nachweises zweifelhaft bleibt. In der dorsopalmaren Aufnahme konnte ein steilerer medialer Hufwandwinkel sowie eine geringere mediale Sohlendicke nachgewiesen werden. Dies deckt sich mit früheren Untersuchungen und spiegelt außerdem die recht häufige Beobachtung einer geringgradigen Carpus valgus - Stellung oder leicht zehenweiter Gliedmaßenstellung mit daraus resultierender unregelmäßiger Hufform im Probandengut wider.

Da die röntgenologische Untersuchung bei einigen Probanden Hinweise auf das Vorliegen einer chronisch stabilen Hufrehe mit Lageveränderung des und Umbauprozessen am Hufbein ergab, sind nicht alle im Rahmen dieser Studie ermittelten Werte als physiologisch anzusehen. Sowohl in Bezug auf die morphometrischen Messungen als auch im Hinblick auf die Morphometrie des Hufbeins konnten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen deutliche Übereinstimmungen zu vergleichbaren Arbeiten am Pferd festgestellt werden, es wurden jedoch

auch in beiden Fällen deutliche Unterschiede zum vermeintlich physiologischen Zustand des Pferdes erfasst, was in vielerlei Hinsicht die große Relevanz der Unterscheidung zwischen diesen zwei Spezies unterstreicht.

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen erleichtern wesentlich die Interpretation von Normalbefunden und pathologischen Abweichungen bildgebender Methoden im Bereich der Zehe des Esels.

## Summary

The aim of these investigations was to determine normal values for various morphometric parameters on the dorsopalmar and lateromedial X-ray projections of the donkey's distal limb in order to provide reference values for the assessment of such X-ray images. The standard values determined can be used supportative in the orthopaedic examination of donkeys and, in particular, simplify the evaluation of diagnostic imaging.

In addition, the dependence of the parameters on the age, height and weight of the test subjects was investigated as part of this work. The only parameters that showed a clear dependence on the age of the animals were those that can be associated with a dislocation of the coffin bone in the context of chronic laminitis. For all other measured values, as well as for structural changes of the coffin bone, no significant correlation with age could be demonstrated. However, all length measurements correlated significantly with the weight of the test subjects. The heavier the donkey, the larger the dimensions of the hoof are. The founder distance and sole thickness showed a weaker correlation than the other linear parameters. Radiographic coffin bone changes were also significantly related to weight, but not to age. Overall, the weight of the donkey seems to have a much greater influence on the conformation of the hoof and the morphometry of the coffin bone than the age of the animal has.

A comparison between the left and right limb showed a significant difference in sole thickness and heel length, but these results cannot be reconciled with the results of previous studies, so the clinical relevance of this statistical evidence remains doubtful. The dorsopalmar image showed a steeper medial hoof wall angle and a lower medial sole thickness. This is consistent with earlier investigations and also reflects the fairly frequent observation of a mild carpus valgus in the test subjects.

As the radiographic examination revealed indications of chronic laminitis with changes in the position of the coffin bone and remodeling processes in some subjects, not all of the values determined in this study can be regarded as physiological. Both with regard to the morphometric measurements and with regard to the morphometry of the coffin bone, clear similarities to comparable work on horses were found in the course of the investigations carried out, but in both cases clear differences to the supposedly physiological condition of the horse were also identified, which in many respects underlines the great relevance of the distinction between these two species.

The results of the examinations carried out significantly facilitate the interpretation of normal findings and pathological deviations of imaging methods in the area of the distal limb of the donkey.

## Literatur

- Balch O, White K, Butler D (1991) Factors involved in the balancing of equine hooves. *J Am Vet Med Assoc* 198,1980-1989
- Bartmann CP, Pietta D (2020) Hufpflege und Hufbeschlag bei Esel und Maultier. In: Litzke LF (Hrsg.) *Der Huf. Lehrbuch des Hufbeschlags*, 7. Aufl., Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 358–365
- Baxter GM (1986) Equine laminitis caused by distal displacement of the distal phalanx: 12 cases (1976-1985). *J Am Vet Med Assoc* 189, 326-329.
- Becht JL, Park RD, Kraft SL, Steyn PF, Wrigley RH (2001) Radiographic interpretation of normal skeletal variations and pseudolesions in the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract* 17, 1-18; DOI 10.1016/S0749-0739(17)30072-X.
- GPM Gesellschaft für Pferdemedizin (2017) *Hufrehe-Leitfaden – Zur Sorgfalt bei der Diagnostik und Therapie der Hufrehe*
- Budras KD, Coenen M, Hirschberg RM, von Zadow C (2020) Funktionelle Anatomie des Pferdes. In: Litzke LF (Hrsg.) *Der Huf. Lehrbuch des Hufbeschlags*, 7. Aufl., Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart, 82 – 147
- Burnham SL (2002) In Depth: Anatomical differences of the the donkey and the mule. *Am Assoc Equine Pract Ann Conv* 48, 102-209
- Butler JA, Colles CM, Dyson SJ, Kold SE, Poulos PW (2017) The foot. In: *Clinical Radiology of the Horse*, 4th Ed., Butler JA (Ed.) John Wiley & Sons, Chichester, 67-170
- Cardona GA, Uribe A, Ortved K (2021) Determination of positional parameters of the distal phalanx within the hoof capsule in sound colombian paso horses. *J Equine Vet Sci* 101, 103434; DOI 10.1016/j.jevs.2021.103434.
- Colles CM (1983) Interpreting radiographs 1: the foot. *Equine Vet J* 15, 297-303; DOI 10.1111/j.2042-33061983.tb01804.x.
- Collins SN, Dyson S, Murray RC, Newton JR, Burden F, Trawford AF (2012) Development of a quantitative multivariable radiographic method to evaluate anatomic changes associated with laminitis in the forefeet of donkeys. *Am J Vet Res* 73, 1207– 1218 DOI; 10.2460/ajvr.73.8.1207.
- Collins SN, Dyson SJ, Murray RC, Burden F, Trawford AF (2011) Radiological anatomy of the donkey's foot: objective characterization of the normal and laminitic donkey foot. *Equine Vet J* 43, 478-486; DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00312x.
- Craig J, Craig M, Weltner TN (2001) Quantifying conformation of the equine digit from latero-medial radiographs. *Proceedings Assoc Equine Sports Med* 21, 20-25

- Craig J, Craig M (2019, 1<sup>st</sup> June) Measuring the equine hoof in radiographs – a focus on calibration.  
<https://medium.com/eponamind/measuring-the-equine-hoof-in-radiographs-7db141bd28f2>
- Crane M (2007) Hoof disorders of the donkey. 10th Geneva Congress of Equine Medicine and Surgery, 11.-13.12.2007, Geneva, Switzerland
- Crane M, Evans L (2018) The clinical companion of the donkey. The donkey sanctuary, Sidmouth, Great Britain, ISBN 978-1-78901-390-0.
- Cripps PJ, Eustace RA (1999) Radiological measurements from the front feet of normal horses with relevance to laminitis. *Equine Vet J* 31, 427-432; DOI 10.1111/j.2042-33061999.tb03844.x.
- Drumond B, Guimarães Ginelli AM, Faleiros RR, Fontana de Magalhães J, Coelho CS (2016) Hoof capsule distortion and radiographic measurements of the front feet in mangalarga marchador horses subjected to athletic training. *Pferdeheilk Equine Med* 32, 10-118; DOI 10.21836/pem20160203.
- Dyson SJ, Tranquille CA, Collins SN, Parkin TDH, Murray RC (2011) An investigation of the relationships between angles and shapes of the hoof capsule and the distal phalanx. *Equine Vet J* 43, 295-301; DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00162x.
- El-Shafaey EA, Salem MG, Mosbah E, Zaghloul AE (2017) Morphometric evaluation of relevant radiographic parameters of the forefeet of clinically normal donkeys (*Equus asinus*). *J Hellenic Vet Med Soc* 68, 467-478; DOI 10.12681/JHVMS.15543.
- Hemker S, Hertsch B (2002) Radiologic evaluation of chronic founders. *Prakt Tierarzt* 83, 610-617
- Herthel D, Hood DM (1999) Clinical presentation, diagnosis, and prognosis of chronic laminitis. *Vet Clin North Am Equine Pract* 15, 375-394; DOI 10.1016/s0749-0739(17)30151-7.
- Hunt RJ, Wharton RE (2010) Clinical presentation, diagnosis, and prognosis of chronic laminitis in north america. *Vet Clin North Am Equine Pract* 26, 141-153; DOI 10.1016/j.cveq.2009.12.006.
- Khan RZU, Rosanowski SM, Parkes RSV (2023) Hoof morphometry in a population of lame and nonlame working donkeys in Pakistan. *Equine Vet J* 55, 435-445; DOI 10.1111/evj.13861.
- Kostůková M, Černohorská H, Bihuncová I, Oravcová I, Sobotková E, Jiskrová I (2015) Characteristics of morphological parameters of donkeys in the czech republic. *Acta Univ Agric Silv Mendelianae Brun* 63, 419-424; DOI 10.11118/actaun201563020419.
- Kummer M, Geyer H, Imboden I, Auer J, Lischer C (2006) The effect of hoof trimming on radiographic measurements of the front feet of normal warmblood horses. *Vet J.* 172, 58-66; DOI 10.1016/j.tvjl.2005.03.008.
- Kummer M, Lischer C, Olerth S, Vargas J, Auer J (2004) Evaluation of a standardized radiographic technique of the equine hoof. *Schweiz Arch Tierheilkd* 146, 507-514; DOI 10.1024/0036-7281.146.11.507.
- Linford RL, O'Brien TR, Trout DR (1993) Qualitative and morphometric radiographic findings in

- the distal phalanx and soft tissues of sound thoroughbred racehorses. *Am J Vet Res* 54, 38-51
- Masoudifard M, Vajhi A, Mansouri S, Molazem M, Bahonar A, Zehtabvar O (2014) Radiographic measurements of front feet of the sound akhal-teke horses. *Irani J Vet Med* 8, 21-25
  - Meier EH (1917) Über Hoplometrie – Grundzüge einer systematischen Charakteristik der Hufformen des Pferdes durch Messung. *Diss Med Vet, Königliche Tierärztliche Hochschule zu Berlin*
  - Moleman M, van Heel MCV, van den Belt AJM, Back W (2005) Accuracy of hoof angle measurement devices in comparison with digitally analyzed radiographs. *Equine Vet Ed* 17, 319-322; DOI 10.1111/j.2042-32922005.tb00401.x.
  - Mostafa MB, Abdelgalil AI, Farhat SF, Raw Z, Kubasiewicz LM (2020) Morphometric measurements of the feet of working donkeys *equus asinus* in egypt. *J Equine Sci* 31, 17-22; DOI 10.1294/jes.31.17.
  - O'Grady SE (2013) How to evaluate the equine hoof capsule. *Am Assoc Equine Pract Ann Conv*, 11.12.2013, Nashville, Tennessee
  - O'Grady SE, Poupard DA (2001) Physiological horseshoeing: an overview. *Equine Vet Ed* 13, 330-334; DOI 10.1111/j.2042-3292.2001.tb00123.x.
  - Page BT, Hagen TL (2002) Breakover of the hoof and its effect on structures and forces within the foot. *J Equine Vet Sci* 22, 258-264; DOI h10.1016/S0737-0806(02)70062-2.
  - Park RD (1989) Radiographic examination of the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract* 5, 47-66; DOI 10.1016/s0749-0739(17)30603-x.
  - Parks AH (2010) Examination of the equine Foot. *Am Assoc Equine Pract Ann Conv*, 8.12.2010, Baltimore, Maryland
  - Read RL, Duncan CG, Wallace AD, Perry JA, Duerr FM (2012) Assessment of on-screen measurements, magnification, and calibration in digital radiography. *J Am Vet Med Assoc* 241, 782-787; DOI 10.2460/javma.241.6.782.
  - Redden RF (2003) Radiographic imaging of the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract* 19, 379-392; DOI 10.1016/s0749-0739(03)00026-9.
  - Rendano CR, Grant B (1978) The equine third phalanx: Its Radiographic Appearance. *Vet Radiol* 19, 125-135; DOI 10.1111/j.1740-82611978.tb01152.x
  - Schropp L, Stavropoulos A, Gotfredsen E, Wenzel A (2009) Calibration of radiographs by a reference metal ball affects preoperative selection of implant size. *Clin Oral Investig* 13, 375-381; DOI10.1007/s00784-009-0257-5.
  - Sherlock C, Parks A (2013) Radiographic and radiological assessment of laminitis. *Equine Vet Ed* 25, 524-535; DOI 10.1111/eve.12065.
  - Souza AF, Kunz JR, Laus R, Moreira MA, Muller TR, Fontequé JH (2016) Biometrics of hoof balance in equids. *Arq Bras Med Vet Zootec* 68, 825-831; DOI 10.1590/1678-4162-8848.
  - Stachurska A, Kolstrung R, Pieta M, Silmanowicz P (2011) Hoof size as related to body size in

the horse (*Equus caballus*). *Animal Science Papers and Reports* 29, 213-222

- Tacchio G, Davies HMS, Morgante M, Bernardini D (2002) A radiographic technique to assess the longitudinal balance in front hooves. *Equine Vet J Suppl* 34, 368-372; DOI 10.1111/j.2042-33062002.tb05450.x.
- Thiemann A, Rickards K (2013) Donkey hoof disorders and their treatment. *In pract* 35, 134-140; DOI 10.1136/inp.f1074.
- Thieme K, Ehrle A, Lischer C (2015a) Morphometrische Messungen am Pferdehuf – eine Literaturübersicht. *Pferdeheilk Equine Med* 31, 108-118
- Thieme K, Ehrle A, Lischer C (2015b) Radiographic measurements of the hooves of normal ponies. *Vet J* 206, 332-337; DOI 10.1016/j.tvjl.2015.10.005.
- Turner TA (2003) Examination of the equine foot. *Vet Clin North Am Equine Pract* 19, 309-332; DOI 10.1016/s0749-0739(03)00023-3.
- Verschooten F, Roels J, Lampo P, Desmet P, Moor A de, Picavet T (1989) Radiographic measurement from the lateromedial projection of the equine foot with navicular disease. *Res Vet Sci* 46, 15-21
- Vilsmaier A (2005) Untersuchungen zur Hufform und zum Hornwachstum beim Esel (*Equus asinus*). *Diss Med Vet, Veterinärmedizinische Fakultät der Universität Leipzig*.
- Walker M, Taylor T, Slater M, Hood D, Weir V, Elslander J (1995) Radiographic appearance of the feet of mammoth donkeys and the finding of subclinical laminitis. *Vet Radiol Ultrasound* 36, 32-37; DOI 10.1111/j.1740-82611995.tb00210.x.
- White JM, Mellor DJ, Duz M, Lischer CJ, Voute LC (2008) Diagnostic accuracy of digital photography and image analysis for the measurement of foot conformation in the horse. *Equine Vet J* 40, 623-628; DOI 10.2746/042516408X313625.
- Wissdorf H, Otto B, Geburek F, Fürst A, Hertsch B, Keller H (2010) Hufbereich. In: Wissdorf H, Gerhards H, Huskamp B, Deegen E (Hrsg.) *Praxisorientierte Anatomie und Propädeutik des Pferdes*, 3. Aufl., Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 375-406

## Publikationsverzeichnis

Ergebnisse dieser Dissertation wurden in international anerkannten Fachzeitschriften mit unabhängigem Gutachtersystem (peer-review) veröffentlicht:

- Wacker J, Schaus K, Büttner K, Röcken M, Bartmann CP (2024) Radiologische Veränderungen des Hufbeins beim Esel unter Berücksichtigung des Alters. *Pferdeheilkunde – Equine Medicine* 40, 375-386; DOI 10.21836/PEM20240411.
- Wacker J, Schaus K, Jandowsky A, Büttner K, Röcken M and Bartmann CP (2024) Radiographic measurements of the hoof in generally sound donkeys with emphasis on the front limbs. *Front. Vet. Sci.* 11:1505253. doi: 10.3389/fvets.2024.1505253.

(Teil-)Ergebnisse dieser Dissertation wurden auf folgenden Fachkongressen präsentiert:

- Schaus K, Wacker J, Striebinger M, Bartmann CP. Aktuelles von der Eselzehe. In: 19. Gießener Hufbeschlagstagung, Juni 29, 2024, Gießen
- Wacker J, Schaus K, Büttner K, Röcken M, Bartmann CP. Untersuchungen zur Röntgenanatomie der Eselzehe. In: 7. Internationaler Kongress zur Pferdemedizin (DVG Vet-Congress), Berlin, Oktober 30 – November 2, 2024

# Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre:

Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der "Satzung der Justus-Liebig- Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis" niedergelegt sind, eingehalten.

Gießen, den 17.03.2025

Juliana Wacker

# Danksagung

Die Anfertigung dieser Doktorarbeit war ein großes Ziel, das ich ohne die Hilfe vieler ganz wunderbarer Menschen niemals hätte verwirklichen können.

Zunächst einmal gilt mein Dank meinen beiden Betreuern, Claus Bartmann und Michael Röcken. Claus, vielen Dank für die Idee zu dieser Arbeit, für die Überlassung des Themas und für die herausragende Betreuung und Unterstützung. Ohne deine Hilfe und deine sehr konstruktiven Korrekturen hätte ich diese Dissertation niemals fertigstellen können, ich bin dir dafür unglaublich dankbar! Vielen Dank auch an Professor Röcken, der dieses Projekt über die Jahre hinweg begleitet hat. Auch die finanzielle Unterstützung, die wir für die Umsetzung erhalten haben, hat entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein nächster riesengroßer Dank gilt den Mitarbeitern unserer Lehrschieme, ihr seid einfach die Besten! Insbesondere Melli, Kai und Javier – einfach danke für die Ausflüge in verschiedene Zoos und Tierparks Deutschlands, die nicht nur Teil dieses Projekts, sondern einfach auch eine tolle und lustige Zeit waren. Danke, dass ihr all unsere Probanden, die uns ja leider nicht immer wohlgesonnen waren, zu den unmöglichsten Uhrzeiten eingeschoben habt, damit wir unsere Röntgenbilder machen konnten.


Danke auch an alle Privatpersonen und Einrichtungen, die uns durch die Bereitstellung von Probanden, Arbeitskraft, Zeit und teilweise auch Equipment unterstützt haben: Dr. Barbara Bach und der Zoo Heidelberg, Anne-Marie Bank-Lauer und der deutsche Eselzuchtverband, Dr. Annabell Jandowsky und der Tierpark Arche Warder, Dr. Hermann Will und Dr. Kathrin Baumgärtner aus dem Tiergarten Nürnberg sowie Dr. Uta Westerhüs und der Opel-Zoo in Kronberg im Taunus und natürlich alle, die hier nicht namentlich erwähnt sind – Sie alle haben einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser wissenschaftlichen Arbeit geleistet.

Ein weiterer Dank gilt Frau Dr. Kathrin Büttner und Herrn Andreas Schaubmar sowie ihrem Team von der AG Biomathematik und Datenverarbeitung, die die statistische Auswertung übernommen und bei Fragen immer erreichbar waren.

Kyra, mit niemand anderem hätte ich dieses Projekt lieber umgesetzt als mit dir. Danke, dass wir uns immer wieder gegenseitig zum Weitermachen motiviert haben, wenn eine von uns kurz davor war, aufzugeben. Du bist ein wunderbarer Mensch und eine noch bessere Freundin, ich bin so dankbar, dich zu haben ♥

Danke auch an alle Freunde und Kollegen, die sich eher halb- als freiwillig als Eselbändiger zur Verfügung gestellt haben! 🐎 Sebastian, Lena, Benni, Leonie, Aeneas, Jules, Marieke, unsere Famulanten, Rotis und alle, die ich vergessen habe – wir haben euch eine Erwähnung in der Danksagung versprochen und hier ist sie: Danke euch!

Und auch Danke an meine lieben Kollegen aus der Klinik, die fachlich und mental immer für mich da waren, auch wenn die Bezeichnung „Kollegen“ euch einfach nicht gerecht wird. Ihr seid viel mehr als das, ihr seid Freunde und ich hoffe natürlich auch, dass das noch lange so bleibt!

Und das Beste kommt ja bekanntlich ganz zum Schluss: Zuguterletzt möchte ich meiner ganzen wunderbaren Familie danken. Mama, du hast mich zu dem ehrgeizigen und zielstrebigem Menschen erzogen, der ich heute bin. Ohne dich hätte ich das niemals geschafft. Kati, danke für die Hilfe mit Excel und unzählige Korrekturen, du bist die Beste! Und natürlich Philip und Oski  – danke, dass ihr immer für mich da seid. Ich weiß nicht, was ich ohne euch machen würde!