

Aus dem Department für Kleintiere und Pferde
der Veterinärmedizinischen Universität Wien

Universitätsklinik für Pferde

(Leiterin: Jenner, Florian, Dipl.ACVS Univ.-Prof.ⁱⁿ Dr.ⁱⁿ med.vet. Dipl.ECVS)

**Messung und Berechnung des dreidimensionalen Winkels des Hufbeins zum Boden
aus der radiologisch vermessenen mediolateralen und dorsopalmaren Imbalance**

Diplomarbeit

Veterinärmedizinische Universität Wien

vorgelegt von

Teresa Partel

Wien, im Juni 2023

Betreuerin:

Licka, Theresia, Ao. Univ. -Prof.ⁱⁿ Dipl.ACVS MR Dr.ⁱⁿ med.vet.

Universitätsklinik für Pferde, Department für Kleintiere und Pferde

Veterinärmedizinische Universität Wien

Begutachter:

Kofler, Johann, Ao. Univ. -Prof. Dipl.ECBHM Dr.med.vet.

Universitätsklinik für Wiederkäuer, Department für Nutztiere und öffentliches
Gesundheitswesen in der Veterinärmedizin

Veterinärmedizinische Universität Wien

Danksagung

Ein großes Dankeschön gilt meiner Betreuerin Theresia Licka, die mir zu jeder Zeit mit ihrer fachlichen Expertise zur Seite stand und mir immer neue Motivation gab, wenn ich vor einem Problem stand. Danke, dass ich während meiner klinischen Ausbildung so unglaublich viel von Dir lernen durfte, sei es auf der Vortrabbahn, im OP oder bei unseren Diplomarbeitstreffen.

Danke an Max, der mir mit seinem Wissen aus dem Physik-Studium bei mathematischen Fragen und Problemen zur Hilfe kam und mit mir mit Geduld und Ruhe die Formel durchgedacht hat.

Danke an meine Familie und Freunde, die mich während meiner Studienzeit so unglaublich unterstützt haben. Allen voran bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir dieses Studium überhaupt ermöglicht haben. Danke an meine Tante Sigrid für die Unterstützung und Korrekturen.

Zusammenfassung

Imbalancen des Hufes und Hufgelenks zählen zu häufigen Lahmheitsursachen des Pferdes. Die Hypothese dieser Arbeit war, dass das Hufbein eines Pferdes meist nicht nur in einer Ebene, sondern fast immer in beiden Ebenen, in der dorsopalmaren und mediolateralen, verkippt ist und dadurch ein dreidimensionaler Winkel zwischen Hufbein und Boden entsteht. Ziel dieser Arbeit war es, eine Formel anzuwenden, mit welcher aus den Winkeln der dorsopalmaren und mediolateralen Imbalance, vorher gemessen auf Röntgenstudien, der dreidimensionale Winkel sowie der maximale Abstand zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins berechnet werden kann. Hierfür wurde das mathematische System der Drehmatrix angewandt. Röntgenstudien von zehn Patienten wurden vermessen und anschließende Berechnungen des 3D Winkels und des maximalen Abstandes durchgeführt. Diese Messmethoden wurden zwei Mal überarbeitet und wiederholt. Anschließend wurden die Rechenergebnisse mit Messergebnissen aus den beiden obliquen Röntgenaufnahmen verglichen. Alle zehn Patienten wiesen sowohl eine mediolaterale als auch dorsopalmar Imbalance auf. Der 3D Winkel war immer größer als die einzelnen Winkel und er war weder das Produkt noch die Summe der beiden. Alle zehn Patienten wiesen einen höheren lateralen als medialen Hufbeinaspekt auf und hatten ihren tiefsten Punkt demnach dorsomedial oder palmaromedial. Die Formel zur Berechnung des 3D Winkels könnte für TierärztInnen und HufschmiedInnen von großem Nutzen sein, um eine Hufkorrektur noch genauer durchführen zu können und Imbalancen auszugleichen.

Abstract

Imbalance of the hoof and coffin joint are described as a common cause of lameness in horses. The hypothesis of this work was that the coffin bone of a horse is usually tilted not only in one plane, but almost always in both planes, the dorsopalmar and mediolateral planes, creating a three-dimensional angle between the coffin bone and the ground. The aim of this work was to implement a formula with which the three-dimensional angle as well as the maximum distance between the lowest and highest point of the coffin bone can be calculated from the angles of the dorsopalmar and mediolateral imbalance, previously measured on X-ray studies. For this purpose, the mathematical system of rotation matrix was applied and radiographic studies of ten patients were measured and following calculations of the 3D angle and maximum distance were performed. These measurement methods were reviewed and repeated twice. Then, the calculation results were compared with measurement results from the two oblique radiographs. All ten patients showed both mediolateral and dorsopalmar imbalance. The 3D angle was always greater than the individual angles and neither the product nor the sum of the two. All ten patients had a higher lateral than medial coffin bone aspect and consequently had their lowest point dorsomedially or palmaromedially. The formula for calculating the 3D angle could be of great use to veterinarians and farriers to perform hoof correction even more accurately and to compensate for imbalances.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Fragestellung.....	1
1.1. Anatomie und Physiologie des Hufes und Hufgelenks im Bezug auf Ausgleich von Imbalancen	2
1.2. Imbalancen des Hufgelenks und assoziierte Krankheiten	3
1.3. Radiologische Diagnostik von Imbalancen im Hufgelenk	5
2. Material und Methode	7
2.1. Herstellung der Beispielbilder	7
2.2. Überlegungen und Herleiten der Formel für den errechneten 3D Winkel	7
2.3. Auswahl der Röntgenbilder.....	12
2.4. Messungen an Beispielfotos eines knöchernen Hufbeinpräparats und Röntgenstudien von Patienten	13
2.5. Qualitätskontrolle mittels Messungen an obliquen Aufnahmen	13
2.6. Statistik.....	15
2.7. Erste Messungen.....	15
2.8. Adaption der Methode - zweite Messungen	18
2.9. Adaption der Methode - dritte Messungen	21
3. Ergebnisse.....	26
3.1. Vergleich der Ergebnisse des maximalen Abstandes A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins mit der Qualitätskontrolle aus den obliquen Aufnahmen ...	30
3.2. Ergebnisse bezüglich der obliquen Aufnahmen	32
4. Diskussion	34
5. Literaturverzeichnis.....	39
6. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	43

Abkürzungsverzeichnis

a	Gerade, die bei Messung eins durch die breiteste Stelle des Hufbeins auf der dorsopalmaren Röntgenaufnahme gezogen wurde
a ₂	Gerade, die bei Messung zwei durch jeweils den Mittelpunkt der beiden Anschnitte des <i>Arcus terminalis</i> auf der dorsopalmaren Röntgenaufnahme gezogen wurde
a ₃	Gerade, die bei Messung drei durch die beiden tiefsten Punkte der Hufgelenksgruben auf der dorsopalmaren Röntgenaufnahme gezogen wurde
Abb.	Abbildung
b	Gerade, die bei Messung eins von der Hufbeinspitze zum Hufbeinastende auf der seitlichen Aufnahme gezogen wurde
b ₂	Gerade, die bei Messung zwei von der Hufbeinspitze bis zum Mittelpunkt der beiden dargestellten Hufbeinäste auf der seitlichen Aufnahme gezogen wurde
b ₃	Gerade, die bei Messung drei von der Hufbeinspitze bis zum resultierenden Punkt der vorhergegangenen Schritte auf der seitlichen Aufnahme gezogen wurde
d	maximale lateromediale Distanz des dargestellten Hufbeins, gemessen auf der Oxspring- oder High-Coronary-Aufnahme
DJD	Degenerative Joint Disease
DL	dorsolateral
DLPMO	dorsolateral-palmaromedial oblique
DM	dorsomedial
DMPLO	dorsomedial-palmarolateral oblique
DP	dorsopalmar
ggr.	geringgradig
L	Distanz zwischen lateralem Hufbeinast und Boden, gemessen auf der dorsopalmaren Aufnahme
LM	lateromedial
M	Distanz zwischen medialem Hufbeinast und Boden, gemessen auf der dorsopalmaren Aufnahme

M ₁	Messmethode eins/erste Messungen
M ₂	Messmethode zwei/zweite Messungen
M ₃	Messmethode drei/dritte Messungen
P	Distanz zwischen distalem Hufbeinast und Boden, gemessen auf der seitlichen Aufnahme
PL	palmarolateral
PM	palmaromedial
S	Distanz zwischen Hufbeinspitze und Boden, gemessen auf der seitlichen Aufnahme
t	dorsopalmare Distanz des dargestellten Hufbeins, gemessen auf der Oxspring- oder High-Coronary-Aufnahme
Tab.	Tabelle

1. Einleitung und Fragestellung

Imbalancen des Hufbeins und Hufgelenks können eine Ursache für das Auftreten von Lahmheit sein (1). Das Hufgelenk ist ein Sattelgelenk und bewegt sich vorwiegend in sagittaler und kaum in transversaler Ebene (2, 3). Erfährt das Hufgelenk eine asymmetrische Belastung durch Abweichung der mediolateralen Balance oder inadäquate Hufbearbeitung, entstehen Zug auf den Bändern, abnorme Rotation der Zehe und ungleichmäßige Krafteinwirkung auf die Gelenke (4–6). Fehlerhafte Hufbearbeitung ist einer der vermuteten Hauptgründe für mediolaterale Imbalance im Hufgelenk. Sind laterale und mediale Hufwand ungleich lang und verlaufen in deutlich unterschiedlicher Winkelung zum Boden, entsteht eine Asymmetrie im Gelenk mit Krafteinwirkung an jener Seite, an der die Hufwand zu hoch ist. Der Gelenksspalt wird an der höheren Seite verschmälert dargestellt und das Hufbein rotiert weg von der angehobenen Seite. Durch die Körperhaltung der HufschmiedInnen und die Seite der dominanten Hand wird in den meisten Fällen zu viel laterale Hufwand stehen gelassen und die mediale zu stark gekürzt (2, 7).

Das Anfertigen von Röntgenstudien gilt als eines der wichtigsten diagnostischen Mittel, um Informationen über den Pferdehuf zu sammeln (8). HufschmiedInnen und HufbearbeiterInnen brauchen Röntgenstudien der Zehe, um korrektive Hufbearbeitung genau vornehmen und sich orientieren zu können. Es ist bekannt, dass richtige Hufbearbeitung und korrekter Beschlag einen bedeutenden Einfluss auf den Bewegungsablauf des Pferdes und Therapie von Lahmheiten haben (9–11). Standardmäßig werden zur radiologischen Beurteilung des Hufgelenks Röntgenbilder in lateromedialer (LM) und dorsopalmarer (DP) Strahlenrichtung angefertigt. Auf diesen kann sowohl die mediolaterale (auf der dorsopalmaren Aufnahme) als auch die dorsopalmarer (auf der seitlichen Aufnahme) Winkelung des Hufbeins zum Boden in Graden vermessen werden.

Die Fragestellung der vorliegenden Studie war die Messung von Dimensionen des Hufbeins und daraus die Berechnung eines dreidimensionalen Winkels des Hufbeins zum Boden aus der gemessenen mediolateralen und dorsopalmarer Imbalance. Aufgrund der Tatsache, dass Pferde radiologisch sowohl eine mediolaterale als auch eine dorsopalmarer Imbalance im Hufgelenk zeigen können, wurde eine Berechnungsmethode aus der Mathematik für den korrelierenden 3D Winkel angewandt und verschiedene Messungen am Röntgenbild für die Winkelmessung der lateromedialen und dorsopalmarer Imbalance untersucht. Da im Rahmen dieser Arbeit eine Methodenentwicklung der Messmethode durchgeführt wird, entspricht der

formale Aufbau dieser Diplomarbeit der chronologischen Reihenfolge, nach welcher die Methode entwickelt wurde. Die Größe des 3D Winkels könnte in der Praxis von Nutzen sein, da anhand dieses Winkels HufschmiedInnen und -bearbeiterInnen noch genauer korrigieren könnten und ein möglichst ausbalancierter Huf erreicht werden könnte.

1.1. Anatomie und Physiologie des Hufes und Hufgelenks im Bezug auf Ausgleich von Imbalancen

Das Hufgelenk besteht aus dem Hufbein (*Os ungulare, Phalanx distalis*), Strahlbein (*Os sesamoideum distale*) und Kronbein (*Os coronale, Phalanx media*). Es ist ein Sattelgelenk und lässt sich in zwei Ebenen bewegen. Vorrangig kann es gebeugt und gestreckt werden, aber auch Rotationsbewegungen sind möglich. Das Gelenk zwischen Hufbein und Strahlbein ist kaum beweglich (12, 13).

Bei einem ausbalancierten Huf und regelmäßiger und gerader Gliedmaßenstellung erwartet man sich in Ruhe eine gerade Zehenachse (dorsale Hufwand, Kronbein und Fesselbein verlaufen in einer Linie) und symmetrische gleichhohe Ballen. Mediale und laterale Seitenwand sollen gleich hoch sein. Bei Betrachtung von der Seite soll die Dorsalwand der Vorderhufe in einem Winkel von 50-54° zum Boden stehen und parallel zu den Trachten verlaufen. Das Hufgelenk sollte sich, wenn man seinen Mittelpunkt auf die Sohle projiziert, genau in der Mitte zwischen Hufspitze und Trachten befinden. Das physiologische Hufbein soll parallel zur Dorsalwand des Hornschuhs liegen und in einem Winkel je nach Literatur von 3-10° (1, 9, 14) zur Sohle verlaufen. Die Hufbeinspitze soll weiter distal als die Hufbeinäste zu liegen kommen (1).

In Bewegung wird bezüglich des Hufgelenks vor allem auf die Fußung geachtet, also mit welchem Teil der Sohle der Huf zuerst aufkommt. Wenn man von vorne auf das Pferd sieht, sollte es mittig fußen und weder medial noch lateral zuerst aufkommen. Physiologisch sollen Pferde eine plane bzw. geringgradige (ggr.) Trachtenfußung zeigen. Dies gilt nicht für Pferde, die bereits bei der Adspektion in Ruhe mit einer zehenweiten oder -engen Gliedmaßenstellung aufgefallen sind. Für diese Pferde ist es nicht möglich plan und mittig zu fußen (9).

In mehreren Studien wurde herausgefunden, dass die Mehrheit der Pferde sowohl im Schritt (66 %) als auch im Trab (55 % bzw. 63 % je nach Literatur) jedoch nicht plan fußen, sondern mit dem lateralen Hufaspekt der Vorderhufe zuerst am Boden aufkommen (15, 16).

Das Pferd ist mit gewissen physiologischen Mechanismen ausgestattet, um sich an verschiedene Untergründe anzupassen. So führt eine asymmetrische Fußung zur Verengung der Gelenkspalten im Huf- und Krongelenk an jener Seite, an der der Huf angehoben ist, sowie eine Rotation der Zehe weg von der angehobenen Seite. Diese Mechanismen können aber die Gelenksflächen sowie die periartikulären Bänder schädigen (6, 2). Dies könnte auch ein Grund dafür sein, warum Pferde mit Lahmheit aus den Zehengelenken an der Longe oft stärker lahm sind. Durch die asymmetrische Fußung und Rotation auf der Kreisbewegung treten Schmerzen verstärkt auf. Außerdem klappt der Gelenkspalt des Hufgelenks an der gegenüberliegenden Seite der verengten Seite vermehrt auf und das Seitenband kann geschädigt werden (6).

1.2. Imbalancen des Hufgelenks und assoziierte Krankheiten

Durch fehlerhafte Konformation und Balance des Hufes können chronische Lahmheiten bei Sport- und Freizeitpferden entstehen (1). Bei Pferden mit Lahmheit aus den Zehengelenken lässt sich bei der Adspektion oft ein unausbalancierter Huf erkennen (5, 9). Imbalancen werden während der orthopädischen Untersuchung sowohl im Stand der Ruhe als auch in Bewegung untersucht. Von lateral achtet man auf die Huf-Fessel-Achse und von palmar oder dorsal auf die mediolaterale Balance, bzw. auf die Hufachse auf Rotationsebene bezogen (zehenweit, zeheneng) (11). Es wird beschrieben, dass 72,8 % der Pferde mit Vorhandlahmheit eine gebrochene Huf-Fessel-Achse zeigen (17).

Mediolaterale Imbalance des Hufes wird häufig beobachtet und als Grund für Poor Performance und Lahmheit beschrieben (14, 18). Unter mediolateraler Imbalance versteht man einen asymmetrischen Huf, bei welchem bei Adspektion von vorne oder hinten ungleich hohe Seitenwände auffallen, die in unterschiedlichen Winkeln zum Boden verlaufen (7). Meistens ist es die laterale Hufwand, die zu lange ist. Dies ist laut einer Studie von Ronchetti et al. (7) der dominanten Hand der HufschmiedInnen und deren Körperposition während der Hufbearbeitung geschuldet. Es wird beschrieben, dass rechtshändige HufschmiedInnen eine korrektere mediolaterale Balance am rechten Vorderhuf erlangen können, während linkshändige HufschmiedInnen den linken Vorderhuf besser bearbeiten können.

Eine korrekte mediolaterale Balance ist erforderlich für die gleichmäßige Verteilung der auf den Huf wirkenden Kräfte. Alleine durch die Adspektion des Hornschuhs kann noch keine

genaue Aussage über eine mediolaterale (Im)Balance des Hufbeins und des Hufgelenks getätigt werden (19).

Die asymmetrische Belastung aufgrund mediolateraler Imbalance wirkt sich nicht nur am Huf und im Hufgelenk aus, sondern führt bei der geläufigeren mediolateralen Imbalance bei der der laterale Hufaspekt höher ist, zu einer generellen lateralen Überbelastung der gesamten distalen Gliedmaße (4, 5).

Klinisch kann sich die vermehrte Druckbelastung auf einer Seite des Hufes durch Kompression der Futterringe oder Deformationen des Hufes zeigen (20). Durch eine lang bestehende Imbalance, welche zu immenser Überbelastung an einer Stelle der Hufkapsel führt, kann das Horn an einer Stelle weniger schnell wachsen bzw. sich verformen und zu einer Minderbelastung eines anderen Areals führen (21).

Einige Pathologien sind auf fehlerhafte Balance des Hufes und Hufgelenks zurückzuführen.

Ungleich hohe Ballen sind oft eine Folge von mediolateraler Imbalance, bei der der mediale oder laterale Ballen stärker belastet wird. Außerdem können minderwertige Hufbearbeitung und ein unausbalancierter Huf prädisponierend für das Auftreten einer Hufknorpelverknöcherung sein (22). Bei einem asymmetrischen Huf mit abnormaler Winkelung der Hufwände kann es durch die dadurch entstehende Spannung an den Wänden zur Bildung von Hornspalten kommen (23). Zu lange Seitenwände sowie ungleich hohe Ballen und Trachten wirken prädisponierend für das Auftreten von Hornspalten. Häufiger treten diese an der medialen als an der lateralen Seitenwand auf (24).

Osteoarthritis, oder auch Degenerative Joint Disease (DJD) genannt, betrifft sehr oft das Hufgelenk und wird oft auf asymmetrische Belastung zurückgeführt. DJD im Hufgelenk zeigt sich klinisch in vermehrter Gelenksfüllung und Schmerzen bei Beugung (25, 26). Weiters lässt sich eine verminderte Viskosität der Synovia und eine meist bilaterale Lahmheit, die stärker auf hartem Boden zu sehen ist, feststellen (27). DJD äußert sich nicht nur in degenerativem Knorpelabbau, sondern auch in begleitenden Veränderungen an subchondralem Knochen, Gelenkscapsel und externen Stabilisatoren wie Sehnen und Bänder mit begleitender Synovitis. Die betroffenen Pferde leiden an Schmerzen und Dysfunktion des erkrankten Gelenks (28, 29). Im Röntgen zeigen sich oft eine Verdickung und Verdichtung des subchondralen Knochens, subchondrale Osteolyse, periartikuläre Knochenzubildungen und Verengungen des Gelenkspalts (30). Osteophyten und Enthesiophyten sind an der distalen Gelenksfläche des Kronbeins oder dem *Processus Extensorius* des Hufbeins erkennbar (27).

1.3. Radiologische Diagnostik von Imbalancen im Hufgelenk

Das Anfertigen von Röntgenstudien gilt als eines der wichtigsten diagnostischen Mittel, um Informationen über den Pferdehuf zu sammeln (8). HufschmiedInnen und HufbearbeiterInnen brauchen Röntgenstudien der Zehe, um korrektive Hufbearbeitung genau vornehmen und sich orientieren zu können. Richtige Hufbearbeitung und korrekter Beschlag haben meist einen bedeutenden Einfluss auf den Bewegungsablauf des Pferdes und Therapie von Lahmheiten (9–11).

Um qualitativ hochwertige Röntgenstudien anzufertigen, müssen die Hufe gut vorbereitet werden. Eisen sollten abgenommen, Hufe ausgekratzt und evtl. der Strahl ausgeschnitten werden. Über die Verwendung von Knetmasse in den Strahlfurchen ist man sich in der Fachliteratur nicht einig. Der Vorteil ist die Vermeidung von Luftartefakten (20, 31). Jedoch sind die darunterliegenden Strukturen aufgrund der Überlagerung im Röntgenbild weniger detailreich zu sehen (32). Beide Vorderextremitäten sollten auf gleich hohe Holzblöcke gestellt und auf gerade Belastung der Gliedmaßen muss geachtet werden (31, 32). Die Technik, eine Vordergliedmaße aufzuheben, während die andere geröntgt wird, sollte nicht durchgeführt werden. Durch die einseitige Belastung der geröntgten Gliedmaße verändert sich die Winkelung im Hufgelenk und die Bilder werden verfälscht. Auf der seitlichen Aufnahme bedingt das einseitige Beinaufheben eine vermehrte Flexion im Hufgelenk der belasteten Gliedmaße. Auf der dorsopalmaren Aufnahme verkleinert sich der laterale Gelenkspalt des Hufgelenks und somit wird die Messung der mediolateralen Imbalance verfälscht (33). Der Metakarpus soll im rechten Winkel zum Holzblock stehen. Dies ist besonders wichtig, da beschrieben ist, dass schon eine ggr. Abduktion der Gliedmaße zu einer Veränderung der Winkelung in den Zehengelenken führt. Der laterale Aspekt des Gelenkspalts klappt bei Abduktion der Gliedmaße auf und der mediale wird komprimiert. Dies führt zu einer Verfälschung bei der Beurteilung der dorsopalmaren Röntgenstudien (34).

Röntgenstudien des Hufgelenks sollten in mindestens zwei Strahlenrichtungen aufgenommen werden. Die seitliche (lateromediale, LM) und die dorsopalmare (DP) Aufnahme stellen das Grundbilderpaar dar. Bei der LM-Aufnahme wird der Zentralstrahl von lateral mittig zwischen Zehenspitze und Trachten etwa einen Zentimeter unterhalb des Kronsaums gerichtet. Bei der LM-Aufnahme soll sich die Hornkapsel als homogene weichteildichte Struktur darstellen. Die Dorsalwand soll mit der Fessel in einer Linie verlaufen und die dorsale Hufwand soll parallel zur dorsalen Kontur des Hufbeins verlaufen (1, 35). Der Winkel zwischen der *Facies solearis* des Hufbeins und dem Boden soll 5-10° betragen und die Hufbeinspitze tiefer als die

Hufbeinäste liegen (1). Für die DP-Aufnahme wird der Zentralstrahl von dorsal mittig auf den Kronsaum gerichtet. Die Sohlenfläche soll medial sowie lateral den gleichen Abstand zum Boden haben und der Gelenkspalt des Hufgelenks soll parallel zu dem des Kronbeins verlaufen (31, 36).

Weiters können zwei oblique Aufnahmen dorsolateral-palmaromedial oblique (DLPMO) und dorsomedial-palmarolateral oblique (DMPLO) sowie eine Oxspringaufnahme angefertigt werden. Für die Oxspringaufnahme wird der Huf in den Oxspringblock positioniert. Der Zentralstrahl geht von dorsoproximal nach palmarodistal durch den Huf und ist mittig auf den Kronsaum gerichtet (31).

Der Vollständigkeit halber muss noch erwähnt werden, dass man eine Morgan-Aufnahme sowie eine High-Coronary-Aufnahme anfertigen kann. Bei der Morgan-Aufnahme (auch Skyline-Aufnahme genannt) steht das Pferd mit einer Gliedmaße auf der Röntgenkassette. Dieses Bein muss etwas weiter kaudal als die kontralaterale Gliedmaße platziert werden, damit der Zentralstrahl von palmaroproximal nach palmarodistal zwischen den beiden Ballen in Richtung Strahlbein gerichtet werden kann. Auch bei der High-Coronary-Aufnahme wird die geröntgte Gliedmaße des Pferdes auf eine Röntgenkassette platziert, für diese soll die Gliedmaße jedoch nicht rückständig, sondern auf Höhe der kontralateralen Gliedmaße gestellt werden. Der Zentralstrahl wird von dorsoproximal in einem Winkel von 65° in Richtung palmarodistal gerichtet (31).

2. Material und Methode

2.1. Herstellung der Beispielbilder

Bei der Überlegung, eine passende Formel für den dreidimensionalen Winkel des Hufbeins zum Boden anzuwenden, wurden zuallererst Beispielfotos von einem mazerierten Hufbeinpräparat hergestellt. Dieses Hufbeinpräparat hatte die maximalen Maße von 77 mm Länge, 88 mm Breite und 49 mm Höhe. Die Beispielfotos wurden analog zur standardisierten Röntgenuntersuchung der Zehe aufgenommen. Das Hufbein wurde auf eine angehobene 20 x 30 cm große Platte gestellt und bei jedem Beispiel von der Seite (entsprechend einer LM-Aufnahme einer Röntgenstudie) und von vorne (entsprechend einer DP-Aufnahme einer Röntgenstudie) fotografiert. Das Hufbein wurde immer an der gleichen Stelle, welche mit zwei Hilfspunkten an der Platte markiert wurde, an den Rand der Platte gelegt. Links im Bild wurde als lateral bzw. dorsal und rechts im Bild als medial und palmar definiert. Außerdem wurde ein Bild angefertigt, an welchem die Platte horizontal gelegt wurde und das Hufbein von oben (*Planum Cutaneum* zeigt Richtung Kamera) fotografiert wurde. Diese Aufnahme soll die Oxspringaufnahme einer Röntgenstudie darstellen und zur späteren Berechnung der Dimensionen des Hufbeins dienen.

Alle Fotos wurden mit einem Smartphone (I Phone X), welches in ein Stativ platziert wurde, im immer gleichen Abstand (14,5 cm) zur vordersten Hufbeinkante aufgenommen.

Um eine dreidimensionale Winkelung des Hufbeins zum Boden darzustellen, wurde die Platte an unterschiedlichen Stellen angehoben. Die Erhöhung wurde für die Beispiele jeweils an den Ecken der Platte vorgenommen, um die dreidimensionale Kippung zu erzeugen.

2.2. Überlegungen und Herleiten der Formel für den errechneten 3D Winkel

Grundsätzlich kann man bei Standardaufnahmen der Zehe zwei Winkel bezüglich der Lage des Hufbeins zum Boden messen. Auf der dorsopalmaren Aufnahme kann man die mediolaterale Imbalance messen und auf der seitlichen Aufnahme kann man die dorsopalmare Imbalance messen. Genaue Beschreibungen der Messmethoden folgen weiter unten.

Da die Annahme besteht, dass Hufbeine weder nur in der sagittalen noch ausschließlich in der transversalen Ebene verkippt sind, sondern fast bei jedem Pferd eine Kombination beider Lageveränderungen vorkommt, wurde überlegt, wie man die beiden gegebenen Winkel in Relation setzen kann, um den maximalen Winkel in der obliquen Ebene auszurechnen. Hierfür

wurde in dieser Arbeit das mathematische System der Drehmatrix oder Rotationsmatrix angewandt (37).

In einer Drehmatrix werden Rotationen eines Körpers im euklidischen Raum durch Multiplikation von Vektoren errechnet. Die Rotation im dreidimensionalen Raum erfolgt in dem kartesischen Koordinatensystem (x-, y- und z-Achse). Im Bezug auf unsere Fragestellung kann also unser Objekt, das Hufbein, der Einfachheit hier als annähernd halbkreisförmige Scheibe (entspricht der Sohlenfläche des Hufbeins), zuerst um den ersten Winkel α (α wurde als Winkel der mediolateralen Imbalance definiert) und dann um den Winkel β (β ist der Winkel der dorsopalmaren Imbalance) gedreht werden.



Abbildung 1: Beispielbild der Winkelmessung alpha (Messung der lateromedialen Imbalance) auf der dorsopalmaren Aufnahme, α = negativ, weil lateral hoch

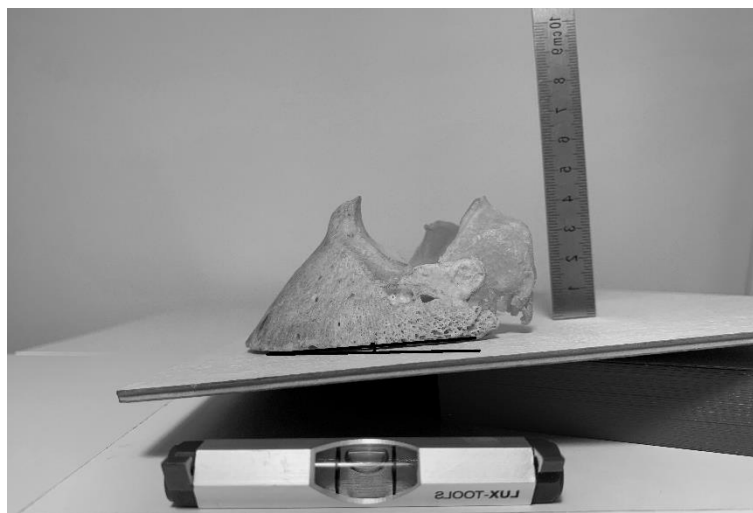


Abbildung 2: Beispielbild der Winkelmessung beta (Messung der dorsopalmaren Imbalance) auf der lateromedialen Aufnahme, β = positiv, weil Hufspitze tief

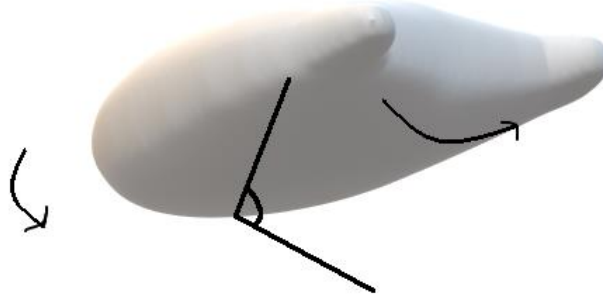


Abbildung 3: 3D Modell der verkippten Sohlenfläche eines Hufbeins, eingezeichnet ist der dreidimensionale Winkel γ , welcher sich zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Hufbeins in der obliquen Ebene befindet

Für diese Überlegung wurde das Hufbein in das kartesische Koordinatensystem gelegt, dessen Mitte sich im Mittelpunkt der Gelenksfläche befand.

Die sagittale Achse des Hufbeins wurde als x-Achse definiert. Eine Rotation um die x-Achse erfolgt nach lateral oder medial und beschreibt somit die mediolaterale Imbalance (= Winkel α). Mediolaterale Imbalancen im Hufgelenk, bei der der mediale Aspekt des Hufgelenks höher zu liegen kommt, werden in dieser Formel als positive Winkel definiert, mediolaterale Imbalancen, bei der der laterale Aspekt des Hufbeins höher zu liegen kommt, als negative Winkel definiert.

Die transversale Achse wurde als y-Achse definiert. Eine Rotation um die y-Achse erfolgt nach dorsal oder palmar und beschreibt somit die dorsopalmar Imbalance (Winkel β). Dorsopalmar Imbalancen im Hufgelenk werden als positive Winkel definiert, wenn die Hufbeinspitze weiter distal als die Hufbeinäste zu liegen kommt. Der Winkel β ist negativ, wenn die Hufbeinäste weiter distal als die Hufbeinspitze liegen.

Die z-Achse beschreibt die Rotation um die vertikale Ebene, kann bei der Überlegung, mediolaterale und dorsopalmar Imbalancen in Relation zu setzen, jedoch vernachlässigt werden.

Um die beiden Rotationen zu kombinieren, müssen die Matrize der Drehung um die x-Achse mit der Matrize der Drehung um die y-Achse multipliziert werden.

Drehung um die x-Achse (α = mediolaterale Imbalance):

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Drehung um die y-Achse (β = dorsopalmare Imbalance):

$$R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}$$

Multiplikation der beiden Matrizen:

$$R_x(\alpha) \times R_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ \sin \alpha \times \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \times \cos \beta \\ -\cos \alpha \times \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \times \cos \beta \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix}$$

Der Vektor R ist der resultierende Vektor der beiden Rotationen. Um diesen zu erhalten, muss man die Ergebnisse der Matrize wie folgt subtrahieren.

$$R = \begin{pmatrix} h - f \\ c - g \\ d - b \end{pmatrix}$$

$$R = \begin{pmatrix} R(x) \\ R(y) \\ R(z) \end{pmatrix}$$

Um den resultierenden Winkel γ , also den gesuchten dreidimensionalen Winkel aus dem resultierenden Vektor R, zu errechnen, muss folgende Formel aus der mathematischen Standardliteratur angewandt werden (37):

$$|R| = 2 \times \sin \gamma$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{|R|}{2} \right)$$

Alternativ kann auch folgende Formel verwendet werden:

$$|\gamma| = \cos^{-1} \left(\frac{\text{Tr}(R) - 1}{2} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \beta + \cos \alpha + \cos \alpha \cos \beta - 1}{2} \right)$$

Beide Formeln sind Standardformeln aus der Mathematik und können für diese Fragestellung angewandt werden. Bis zu einer Rotation von 60° werden die gleichen Ergebnisse erzielt. Bei Winkeln größer als 60° berechnet man mit der ersten Formel den Komplementärwinkel (37). Da aber für die Fragestellung der Winkelung des Hufbeins nicht mit so großen Winkeln gerechnet wird, ist diese Feststellung unproblematisch. Der Einfachheit halber wurde in dieser Arbeit mit der ersten Formel $\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{|R|}{2}\right)$ gerechnet.

Um die genaue Richtung des errechneten Vektors und 3D Winkels zu erhalten, müssten noch weitere unterschiedliche Berechnungen für sowohl das rechte als auch das linke Vorderbein durchgeführt werden. Da dies in der Praxis aber wenig Nutzen hat, hat man sich hier auf die Richtungsbezeichnung innerhalb vier Quadranten beschränkt. Hierfür muss auf die Vorzeichen der gemessenen Winkel α und β bzw. der errechneten Koordinaten $R_{(x)}$ und $R_{(y)}$ geachtet werden. Dadurch ergeben sich vier Kombinationen, in welche der 3D Winkel gerichtet sein kann (siehe Tab. 1).

Tabelle 1: Richtungsbezeichnungen des resultierenden 3D Winkels

medialer Hufbeinaspekt höher als lateraler Hufbeinspitze tiefer als Hufbeinäste	$\alpha = \text{positiv (+)}$ $\beta = \text{positiv (+)}$	tiefster Punkt des Hufbeins bzw. Kippung nach dorsolateral (DL)
medialer Hufbeinaspekt höher als lateraler Hufbeinäste tiefer als Hufbeinspitze	$\alpha = \text{positiv (+)}$ $\beta = \text{negativ (-)}$	tiefster Punkt des Hufbeins bzw. Kippung nach palmarolateral (PL)
lateralen Hufbeinaspekt höher als medialer Hufbeinspitze tiefer als Hufbeinäste	$\alpha = \text{negativ (-)}$ $\beta = \text{positiv (+)}$	tiefster Punkt des Hufbeins bzw. Kippung nach dorsomedial (DM)
lateralen Hufbeinaspekt höher als medialer Hufbeinäste tiefer als Hufbeinspitze	$\alpha = \text{negativ (-)}$ $\beta = \text{negativ (-)}$	tiefster Punkt des Hufbeins bzw. Kippung nach palmaromedial (PM)

Anschließend wurde berechnet, wie groß der Abstand zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins war. Da man die breiteste Stelle des dargestellten Hufbeins messen kann und

den 3D Winkel durch die vorangegangenen Berechnungen gegeben hat, kann man mithilfe des Systems des rechtwinkligen Dreiecks den maximalen Abstand A in Millimetern ausrechnen.

d = Durchmesser des Hufbeins in mm (gemessen an der breitesten Stelle der Oxspring- oder High-Corony-Aufnahme in lateromedialer Ebene)

γ = 3D Winkel in °

A = maximaler Abstand in mm

$$\tan \gamma = \frac{A}{d}$$

$$A = d \times \tan \gamma$$

2.3. Auswahl der Röntgenbilder

Um die Formel nicht nur an den Beispielfotos, sondern auch an Röntgenstudien anzuwenden, wurden die folgenden Messungen und Berechnungen an Röntgenstudien von Patienten, vorgestellt an der Pferdeklīnik der Veterinärmedizinischen Universität Wien zwischen dem 01.01.2020 und 01.10.2022 angewandt. Vermessen wurden Röntgenstudien von zehn Patienten, von denen eine lateromediale, eine dorsopalmare, eine Oxspring- oder High Coronary- sowie beide schrägen Aufnahmen der Zehe vorlagen. Es wurden ausschließlich Großpferde ausgewählt. Islandpferde, Quarter Horses, Araber und Ponys wurden von den Messungen ausgeschlossen. Der Vorstellungsgrund wurde nicht berücksichtigt. Lagen von einem Patienten Röntgenstudien beider Zehen vor, wurde nur die Studie von einer Vorderextremität verwendet und nicht beide. Die Röntgenstudien wurden von der Abteilung für Bildgebende Diagnostik für Kleintiere und Pferde der Veterinärmedizinischen Universität Wien zur Verfügung gestellt und mittels JiveX Dicom Viewer vermessen.

2.4. Messungen an Beispielfotos eines knöchernen Hufbeinpräparats und Röntgenstudien von Patienten

Um später den 3D Winkel berechnen zu können, musste zuerst die mediolaterale und dorsopalmare Imbalance an den Beispielfotos sowie den Röntgenstudien gemessen werden. Hierzu wurde das Programm JiveX Dicom Viewer verwendet. Für alle zehn Patienten wurden der Winkel der mediolateralen Imbalance (Winkel α) und der Winkel der dorsopalmaren Imbalance (Winkel β) mit dem Tool „offene Winkelmessung“ gemessen. Mit dem Tool „offene Winkelmessung“ konnten zwei gerade Linien unabhängig voneinander gezeichnet werden und das Programm rechnete den Winkel aus, den diese beiden Linien einschlossen.

Um später von Winkelgraden wieder auf Millimeter umrechnen zu können, musste die Dimension des dargestellten Hufbeins ausgemessen werden. Gemessen wurde die breiteste Stelle d in lateromedialer Ebene des dargestellten Hufbeins auf der Oxspring- oder High-Corony-Aufnahme. Eine Gerade d wurde von medialem bis lateralem *Margo solearis* gezogen unter Beachtung, dass diese parallel zur Gelenksfläche gezogen wurde. Mit Hilfe des Tools „Distanzmessung“ und des Maßstabs, welcher auf jedem Beispielfoto des mazerierten Hufbeins mitfotografiert wurde, konnten auf den Beispielfotos Pixel auf mm-Maße umgerechnet werden.

2.5. Qualitätskontrolle mittels Messungen an obliquen Aufnahmen

Um zu überprüfen, ob die Formel sowie die Messmethoden zu einem richtigen Ergebnis führen, wurden Vergleichsmessungen an den beiden obliquen Aufnahmen DMPLO und DLPMO durchgeführt. Bei jedem Patienten wurden bei beiden schrägen Aufnahmen sowohl der Winkel zwischen herausprojiziertem Hufbeinast und Boden als auch der Abstand des herausprojizierten Hufbeinastes und der Spitze zum Boden gemessen.

Die Winkelmessung erfolgte mithilfe des Tools „Offene Winkelmessung“. Eine Gerade wurde entlang des dargestellten Hufbeinastes und die andere horizontal gezogen (siehe Abb.4).

Für die Messung des Abstandes zwischen dargestellter Hufbeinspitze und Hufbeinast zum Boden wurde das Tool „Distanzmessung“ verwendet. Eine Linie wurde horizontal gezeichnet und zwei Linien im rechten Winkel zu dieser, einmal bis zur Hufbeinspitze und einmal bis zum herausprojizierten Hufbeinast, gezogen (siehe Abb.5).



Abbildung 4: Beispielbild der Winkelmessung des herausprojizierten Hufbeinasts zum Boden auf der DMPLO Aufnahme der rechten VE von Pferd 1



Abbildung 5: Beispielbild der Distanzmessung zwischen dargestellter Hufbeinastspitze und Hufbeinästen zum Boden auf der DMPLO Aufnahme der rechten VE von Pferd 1

Aus den Messergebnissen der Distanzmessung zwischen Hufbeinast und Hufbeinastspitze zum Boden wurde die Differenz gerechnet. So wurde analog für das DMPLO Röntgenbild die Differenz zwischen lateraler Hufbeinastspitze und medialem Hufbeinast zum Boden gemessen. Auf dem DLPMO Röntgenbild wurde die Differenz zwischen medialer Hufbeinastspitze und lateralem Hufbeinast zum Boden gemessen. Diese Rechenergebnisse der Differenz auf den obliquen Aufnahmen wurden als Kontrolle der Rechenergebnisse des maximalen Abstandes A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins, welcher mit der Formel gerechnet wurde, verwendet. Jene Pferde, welche laut Ergebnis ihren tiefsten Punkt dorsomedial oder palmarolateral hatten, wurden mit den Messergebnissen der DLPMO Aufnahme verglichen. Die Ergebnisse jener Pferde, welche ihren tiefsten Punkt dorsolateral oder palmaromedial hatten, wurden mit den Messergebnissen der DMPLO Aufnahme verglichen.

2.6. Statistik

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm IBM® SPSS® Statistics Version 27 und Excel (Microsoft 365). Median, Minimum und Maximum wurden für jeden Parameter erstellt. Gruppenvergleiche sowie Korrelationen wurden mit nicht-parametrischen Tests durchgeführt. Für die Gruppenvergleiche für unabhängige Stichproben wurde der Friedman-Test und der Wilcoxon-Test verwendet, bei einer Gruppe wurde die Bonferroni-Korrektur angewandt. Zur Korrelationsbestimmung wurde die Berechnung der Pearson-Korrelation verwendet. Korrelationen wurden dann als signifikant angesehen, wenn der P-Wert unter 0.050 lag, und als hoch signifikant, wenn der P-Wert unter 0.010 lag.

2.7. Erste Messungen

Die ersten Messungen wurden zuerst an den Beispielfotos und dann an den Röntgenstudien durchgeführt.

Für die Messung der mediolateralen Imbalance wurde analog zum standardisierten Messverfahren bei Röntgenstudien das „dorsopalmare Foto“ bzw. das dorsopalmare Röntgenbild hergenommen. Verwendet wurde das Tool „Offene Winkelmessung“. Eine Gerade a wurde durch die breiteste Stelle des Hufbeins und die zweite horizontal (entlang der unteren Platte an dem Beispielfotos bzw. entlang des Holzblocks an den Röntgenbildern) gezogen (siehe Abb. 6). Der resultierende Winkel α beschrieb somit die mediolaterale Imbalance in Winkelgraden nach lateral oder medial.

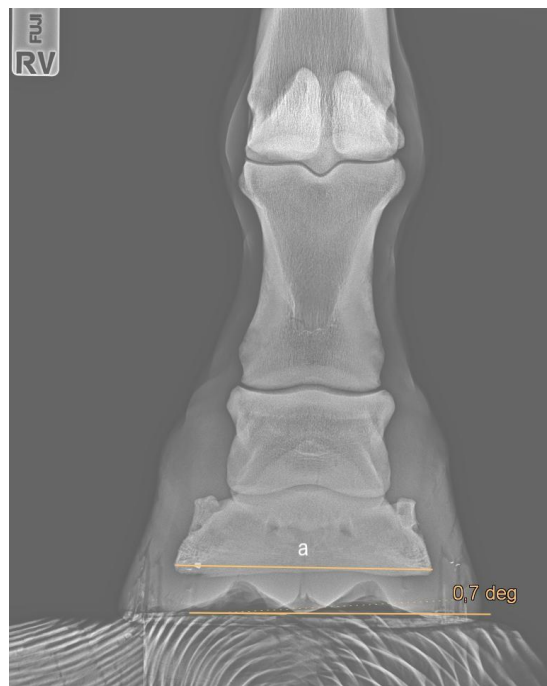


Abbildung 6: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels α (lateromediale Imbalance) auf der DP-Aufnahme der rechten VE von Pferd 8, Messmethode eins, α = neg. weil lateral hoch

Für die Messung der dorsopalmaren Imbalance β wurde das seitliche Foto bzw. Röntgenbild vermessen und ebenfalls das Tool „Offene Winkelmessung“ verwendet. An dem Beispielmmodell des mazerierten Hufbeins wurde die erste Linie horizontal und die zweite Linie b vom tiefsten Punkt der Hufbeinspitze bis zum palmaren Ende des Hufbeinasts, welcher vorne im Foto zu sehen ist, gezogen. Bei der Vermessung der Röntgenstudien wurde die erste Linie b von der Hufbeinspitze bis zum palmaren und distalen Ende des Hufbeinasts gezogen und die zweite horizontal (entlang des Holzblocks) (siehe Abb. 7). Der Winkel, den die zwei Linien einschließen (= *Margo solearis* zum Boden), beschreibt die dorsopalmare Imbalance in Winkelgraden nach dorsal oder palmar.



Abbildung 7: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels β (dorsopalmare Imbalance) auf der LM-Aufnahme der rechten VE von Pferd 9, Messmethode eins, β = pos. weil Hufbeinspitze tief

Die Röntgenstudien aller zehn Patienten wurden vermessen und der 3D Winkel sowie der maximale Abstand A ausgerechnet. Die Ergebnisse wurden in eine Excel-Liste übertragen.

Tabelle 2: Mess- und Rechenergebnisse der ersten Messung

α = Winkelmessung der mediolateralen Imbalance gemessen auf der DP-Röntgenaufnahme, positiv wenn med. hoch, negativ wenn lat. hoch; β = Winkelmessung der dorsopalmaren Imbalance gemessen auf der LM-Röntgenaufnahme, positiv wenn dorsal tief, negativ wenn palmar tief; γ = errechneter 3D Winkel; **A** = errechneter maximaler Abstand zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins; **tiefster Punkt:** Richtung in welcher das Hufbein den tiefsten Punkt aufweist; **Validierungsstandard:** gemessene Differenz von tiefstem und höchstem Punkt auf den obliquen Aufnahmen DMPLO und DLPMO, es wurde jener Wert je Zeile verwendet, welcher mit der Richtung der Kippung des Hufbeins verglichen werden kann; **Differenz Validierungsstandard – A in mm:** Differenz zwischen dem Validierungsstandard und den Rechenergebnissen des maximalen Abstandes A

Pferd	α in °	β in °	γ in °	A in mm	tiefster Punkt	Validierungsstd. in mm	Differenz Validierungsstd. – A in mm
1	-1,4	6,5	6,6	11,3	DM	11,4	0,1
2	-3,5	1,5	3,8	6,9	DM	9,7	2,8
3	-1,8	-2,5	3,1	5,5	PM	8,6	3,1
4	-0,5	3,9	3,9	6,3	DM	6,1	-0,2
5	-4,2	-3,6	5,5	10,4	PM	5,5	-4,9
6	-5	1,1	5,1	8,9	DM	14,1	5,2
7	-1,2	0,5	1,3	2,4	DM	4,5	2,1
8	-0,7	2	2,1	3,6	DM	2,9	-0,7
9	-1,8	3,6	4,0	6,7	DM	7,2	0,5
10	-3,1	-1,6	3,5	6,2	PM	2,7	-3,5

Die Ergebnisse der ersten Messungen zeigten bei sechs von zehn Pferden (Pferd 2, 3, 5, 6, 7 und 10) eine Differenz zwischen dem errechneten maximalen Abstand A und dem gemessenen Abstand auf den obliquen Aufnahmen, welche den Validierungsstandard darstellen, die größer als ± 2 mm war.

Außerdem fiel bei der Durchführung der Messungen auf, dass bei mehrmaliger Wiederholung der Messung des Winkels α des gleichen Pferdes deutlich unterschiedliche Ergebnisse ($> 1,5^\circ$) erzielt wurden.

Bei der Durchführung sowie Evaluierung der ersten Messmethode sind einige Ungenauigkeiten und Fehlerquellen aufgefallen.

Für die Messung der mediolateralen Imbalance α wurde bei der ersten Methode die Gerade a durch die breiteste Stelle des Hufbeins gezogen. Da sich die breiteste Stelle aber sehr weit distal befindet, repräsentiert das nicht unbedingt die mediolaterale Imbalance in Gelenksnähe. Außerdem war die Reproduzierbarkeit dieser Messung wie oben bereits erwähnt nicht möglich.

Die Problematik der Messmethode für den dorsopalmaren Winkel β bestand darin, dass wenn das Hufbein eine große mediolaterale Imbalance aufweist, man mit dieser Messmethode nur die Winkelung des weiter distal gelegenen Hufbeinasts misst. Dieser ist nicht repräsentativ für die generelle dorsopalmare Imbalance des gesamten Hufbeins zum Boden.

Aufgrund der mangelnden Reproduzierbarkeit sowie zu hoher Ungenauigkeit der Ergebnisse (60 % der Pferde wiesen eine größere Abweichung als ± 2 mm zum Validierungsstandard auf) wurde die Messmethode adaptiert.

2.8. Adaption der Methode - zweite Messungen

Im Rahmen der zweiten Messungen wurde für die Winkelmessung der mediolateralen Imbalance α die Gerade a nicht mehr an der breitesten Stelle des dargestellten Hufbeins gezeichnet, sondern die Gerade a_2 wurde als Verbindungslinie der beiden Anschnitte des *Arcus terminalis* gezogen. Es wurde jeweils der Mittelpunkt der beiden Blutgefäßbögen gesucht und durch diese beiden die erste Linie gezogen, die zweite horizontal (siehe Abb. 8).

Bei der Messung der dorsopalmaren Imbalance β auf dem seitlichen Röntgenbild wurde die Messlinie b_2 in der Mitte der beiden Hufbeinäste gezogen und die zweite horizontal (siehe Abb. 9). Außerdem wurde stets die mediolaterale Imbalance zuerst vermessen, um abzuschätzen, ob die Hufbeinäste weit auseinanderliegen, wenn es auf den Röntgenaufnahmen nicht gut erkennbar war. Es wurde wieder mit dem Tool „Offene Winkelmessung“ gearbeitet.

Alle zehn Patienten wurden vermessen und der 3D Winkel sowie der maximale Abstand A ausgerechnet. Die Ergebnisse wurden in eine Excel-Liste übertragen.



Abbildung 8: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels α (lateromediale Imbalance) auf der DP-Aufnahme der linken VE von Pferd 4, Messmethode zwei, α = neg. weil lateral hoch



Abbildung 9: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels β (dorsopalmar Imbalance) auf der LM-Aufnahme der rechten VE von Pferd 6, Messmethode zwei, β = pos. weil Hufbeinspitze tief

Die Mess- und Rechenergebnisse der zweiten Messung sind in der folgenden Tabelle aufgelistet (siehe Tab. 3).

Tabelle 3: Mess- und Rechenergebnisse der zweiten Messung

α = Winkelmessung der mediolateralen Imbalance gemessen auf der DP-Röntgenaufnahme, positiv wenn med. hoch, negativ wenn lat. hoch; β = Winkelmessung der dorsopalmaren Imbalance gemessen auf der LM-Röntgenaufnahme, positiv wenn dorsal tief, negativ wenn palmar tief; γ = errechneter 3D Winkel; **A** = errechneter maximaler Abstand zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins; **tiefster Punkt:** Richtung in welcher das Hufbein den tiefsten Punkt aufweist; **Validierungsstandard:** gemessene Differenz von tiefstem und höchstem Punkt auf den obliquen Aufnahmen DMPLO und DLPMO, es wurde jener Wert je Zeile verwendet, welcher mit der Richtung der Kippung des Hufbeins verglichen werden kann; **Differenz Validierungsstandard – A in mm:** Differenz zwischen dem Validierungsstandard und den Rechenergebnissen des maximalen Abstandes A

Pferd	α in °	β in °	γ in °	A in mm	tiefster Punkt	Validierungsstd. in mm	Differenz Validierungsstd. – A in mm
1	-2,4	6,1	6,6	11,1	DM	11,4	0,3
2	-4,2	1,5	4,5	8,1	DM	9,7	1,6
3	-3,3	-1,4	3,6	6,4	PM	8,6	2,2
4	-0,6	4,7	4,7	7,7	DM	6,1	-1,6
5	-3,1	-0,7	3,2	5,9	PM	5,5	-0,4
6	-6	5,2	7,9	13,8	DM	14,1	0,3
7	-1,8	2,8	3,3	6,3	DM	4,5	-1,8
8	-1,7	2,3	2,9	4,9	DM	2,9	-2,0
9	-0,9	3,4	3,5	5,8	DM	7,2	1,4
10	-5,2	-0,4	5,2	9,2	PM	2,7	-6,5

Bei drei von zehn Pferden (Pferd 3, 8 und 10) betrug die Differenz zwischen dem errechneten maximalen Abstand A und dem gemessenen Abstand auf den obliquen Aufnahmen, welche den Validierungsstandard darstellen, größer gleich ± 2 mm.

Auch bei dieser Messmethode war die Reproduzierbarkeit bei wiederholten Messungen des gleichen Patienten sowohl bei der Messung des Winkels α aber vor allem bei der Messung des Winkels β nicht zufriedenstellend.

Bei der Messung der mediolateralen Imbalance auf der DP-Aufnahme in der Verbindungslinie der beiden Gefäßlöcher war das Problem, dass meist einer der beiden am Röntgenbild nicht exakt abgrenzbar war. Dies ist der Verkippung des Hufbeins geschuldet und führte zu Ungenauigkeiten bei der Messung und schlechter Reproduzierbarkeit.

Auch auf der seitlichen Aufnahme war das Problem, dass die beiden Hufbeinäste nicht gut voneinander abgrenzbar waren und keine eindeutigen Linien definiert werden konnten. Dies ergab unterschiedliche Ergebnisse bei wiederholten Messungen.

Die Ergebnisse der zweiten Messungen zeigen, dass 30 % der vermessenen Pferde eine Abweichung von über 2 mm im Vergleich zum Validierungsstandard zeigen. Dies ist eine Verbesserung zur ersten Messmethode um 50 %.

2.9. Adaption der Methode - dritte Messungen

Für die Messung der mediolateralen Imbalance α auf dem DP-Röntgenbild wurde wieder das Tool „Offene Winkelmessung“ verwendet. Diesmal wurde die Gerade a_3 zwischen den beiden distalsten Punkten der Gelenksfläche des Hufgelenks und die zweite horizontal gezogen (siehe Abb. 10).

Außerdem wurde mit dem Tool „Distanzmessung“ auf der DP-Aufnahme sowohl der Abstand des medialen als auch lateralen Hufbeinasts zum Boden gemessen. Dafür wurde zuerst eine Horizontale entlang des Holzblocks und die Messlinien im rechten Winkel zu dieser gezogen. Die Messlinie L verbindet die Horizontale mit dem lateralen Hufbeinast und die Messlinie M mit dem medialen Hufbeinast (siehe Abb. 11). Später konnte durch die Differenz der beiden Messlinien die Differenz der Höhe des medialen zum lateralen Hufbeinast gerechnet werden.



Abbildung 10: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels α (lateromediale Imbalance) auf der DP-Aufnahme der rechten VE von Pferd 8, Messmethode drei, α =neg., weil lateral hoch



Abbildung 11: Beispielbild der Distanzmessung zwischen lateralem L und medialem M Hufbeinast zum Boden auf der DP-Aufnahme der rechten VE von Pferd 8

Die Dimensionen des Hufbeins wurden mithilfe des Tools „Distanzmessung“ gemessen. Auf der Oxspring- oder High-Coronary-Aufnahme wurde zunächst die maximale lateromediale Distanz d gemessen, welche sich parallel zur Gelenksebene befindet. Anschließend wurde ausgehend vom Mittelpunkt dieser Linie eine Gerade t bis zur Hufbeinspitze gezogen und damit die Distanz in dorsopalmarer Ebene gemessen (siehe Abb. 12).

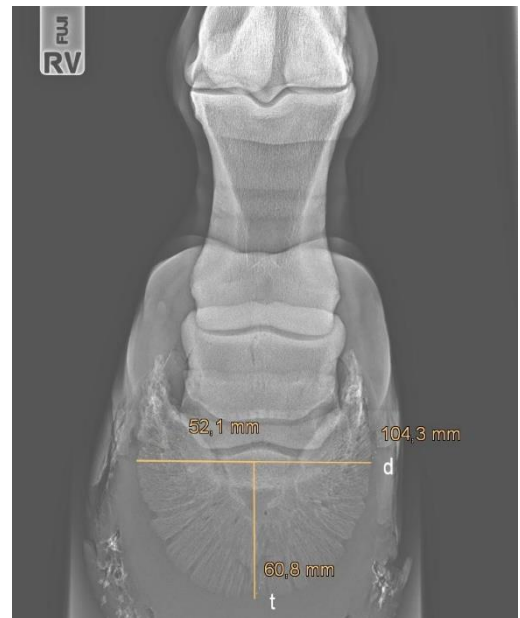


Abbildung 12. Beispielbild der Distanzmessung der lateromedialen Distanz d und dorsopalmaren Distanz t auf einer Oxspringaufnahme der rechten VE von Pferd 2

Um den dorsopalmaren Winkel β möglichst genau zu messen, wurden bei der dritten Messmethode drei Schritte eingebaut. Als erstes wurde auf der LM-Aufnahme die Distanz t , vorher gemessen auf der Oxspring- oder High-Corony-Aufnahme, ausgehend von der Hufbeinspitze entlang des *Margo solearis* mit dem Tool „Distanzmessung“ eingezeichnet. Anschließend wurde von diesem Punkt die halbe Strecke der Differenz der Höhe der beiden Hufbeinäste $((L - M) / 2)$, vorher gemessen auf der DP-Aufnahme, im rechten Winkel mit dem Tool „Distanzmessung“ eingezeichnet. Dieser Punkt wurde gewählt, da er sich auf breiter Stelle des Hufbeins befindet und die Hufbeinäste dadurch möglichst genau, durch die vorhergegangenen Messungen, differenziert sind. Abschließend kann dann von diesem Punkt aus der Winkel β mit dem Tool „offene Winkelmessung“ gemessen werden. Die erste Linie b_3 wird von dem resultierenden Punkt von Schritt eins und zwei zur Hufbeinspitze gezogen und die zweite horizontal (siehe Abb. 13).

Außerdem wurde die Distanz der Hufbeinspitze und die der Hufbeinäste zum Boden vermessen. Mit dem Tool „Distanzmessung“ wurde zuerst eine Linie horizontal entlang des Holzblocks gezogen. Die Messlinien wurden dann im rechten Winkel zu dieser bis zum distalen Ende der Hufbeinspitze (Messlinie S) und der Hufbeinäste (Messlinie P) gezeichnet (siehe Abb. 14). Alle zehn Patienten wurden vermessen und der 3D Winkel sowie der maximale Abstand A ausgerechnet. Die Ergebnisse wurden in eine Excel-Liste übertragen.

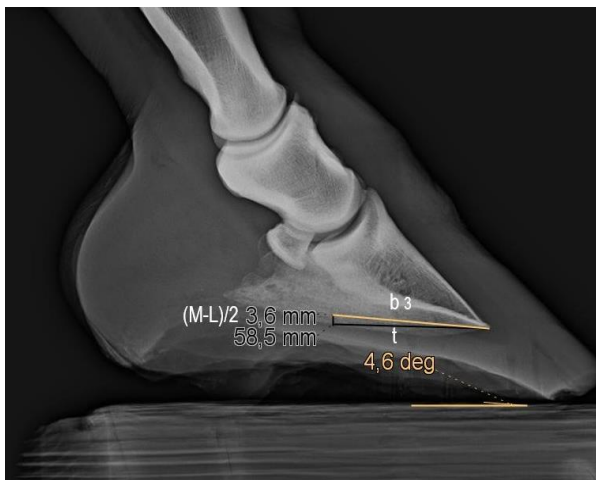


Abbildung 13: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels β (dorsopalmare Imbalance) auf der LM-Aufnahme der rechten VE von Pferd 1, $\beta = \text{pos.}$, weil Hufbeinspitze tief, $t =$ dorsopalmare Distanz, $M =$ Distanz vom medialen Hufbeinast bis zum Boden, $L =$ Distanz vom lateralen Hufbeinast zum Boden

Abbildung 14: Beispielbild der Distanzmessung zwischen Hufbeinspitze S und Hufbeinästen P zum Boden auf der seitl.-Aufnahme der rechten VE von Pferd 1

Tabelle 4: Mess- und Rechenergebnisse der dritten Messung

α = Winkelmessung der mediolateralen Imbalance gemessen auf der DP-Röntgenaufnahme, positiv wenn med. hoch, negativ wenn lat. hoch; β = Winkelmessung der dorsopalmaren Imbalance gemessen auf der LM-Röntgenaufnahme, positiv wenn dorsal tief, negativ wenn palmar tief; γ =errechneter 3D Winkel; **A**= errechneter maximaler Abstand zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins; **tiefster Punkt**: Richtung in welcher das Hufbein den tiefsten Punkt aufweist; **Validierungsstandard**: gemessene Differenz von tiefstem und höchstem Punkt auf den obliquen Aufnahmen DMPLO und DLPMO, es wurde jener Wert je Zeile verwendet, welcher mit der Richtung der Kippung des Hufbeins verglichen werden kann; **Differenz Validierungsstandard – A in mm**: Differenz zwischen dem Validierungsstandard und den Rechenergebnissen des maximalen Abstandes A

Pferd	α in °	β in °	γ in °	A in mm	tiefster Punkt	Validierungsstd. in mm	Differenz Validierungsstd. – A in mm
1	-2,3	4,6	5,1	8,7	DM	11,4	2,7
2	-4,9	2,0	5,3	9,7	DM	9,7	0,0
3	-4,6	-2,1	5,1	9,0	PM	8,6	-0,4
4	-1	4,2	4,3	7,0	DM	6,1	-0,9
5	-4,0	1,1	4,1	7,8	DM	8,8	1,0
6	-7,6	4,0	8,6	14,9	DM	14,1	-0,8
7	-1,6	2,4	2,9	5,4	DM	4,5	-0,9
8	-1,1	-0,7	1,3	2,2	PM	2,7	0,5
9	-1,2	4,6	4,8	7,9	DM	7,2	-0,7
10	-3,7	0,3	3,7	6,5	DM	7,2	0,7

Die Ergebnisse der dritten Messung zeigen nur eines der zehn Pferde (Pferd 1) mit einer größeren Abweichung zwischen dem maximalen Abstand A und dem Validierungsstandard als ± 2 mm. Bei allen anderen ergab sich eine Abweichung von ≤ 1 mm.

Bei Patient 5, 8 und 10 ergaben sich Unterschiede bezüglich der Richtung des tiefsten Punktes im Vergleich zu den ersten und zweiten Messungen und Berechnungen.

Die Messung des Winkels α nach der dritten Messmethode hat den Vorteil, dass die Gelenksfläche immer gut dargestellt ist und sich die Messung im proximalen Bereich befindet und somit sehr gut repräsentativ für eine Messung auf Gelenkshöhe ist. Die Messung des Winkels β ist durch die Einführung der drei Schritte bei Wiederholung der Messungen gut reproduzierbar.

3. Ergebnisse

Unter den zehn gemessenen Pferden waren sieben Warmblüter (70 %), ein Traber (10 %), ein Haflinger (10 %) und eines fiel unter die Kategorie sonstige Pferde (10 %). Bei neun der zehn Patienten wurde die rechte Vorderextremität (90 %), bei einem die linke Vorderextremität (10 %) gemessen.

Die Ergebnisse der gemessenen Winkel α und β , der 3D-Winkel γ und der maximale Abstand A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins werden in der folgenden Tabelle mit Median, Minimum und Maximum aufgeführt (siehe Tab. 5).

Tabelle 5: Messergebnisse der Winkel α und β in $^\circ$, Rechenergebnisse des 3D-Winkels γ in $^\circ$ und des maximalen Abstandes A in mm für alle drei Messmethoden

α = negativ (-) wenn lateral hoch, α = positiv wenn medial hoch; β = negativ (-) wenn Hufbeinspitze höher als Hufbeinäste, β = positiv wenn Hufbeinspitze tiefer als Hufbeinäste

	Messmethode	Median	Minimum	Maximum
Winkel α in $^\circ$ mediolat. Imbalance gemessen auf der DP-Aufnahme	1	-1,80	-5,00	-0,50
	2	-2,75	-6,00	-0,60
	3	-3,00	-7,60	-1,00
Winkel β in $^\circ$ dorsopalmare Imbalance gemessen auf der LM-Aufnahme	1	1,30	-3,60	6,50
	2	2,55	-1,40	6,10
	3	2,20	-2,10	4,60
3D-Winkel γ in $^\circ$	1	3,87	1,30	6,65
	2	4,02	2,86	7,94
	3	4,54	1,30	8,59
max. Abstand A in mm zwischen tiefstem und höchstem Pkt. des Hufbeins	1	6,51	2,44	11,30
	2	7,01	4,93	13,80
	3	7,83	2,24	14,95

Die Gruppenvergleiche der verschiedenen Parameter aller drei Messmethoden wiesen für keinen der Parameter einen statistisch signifikanten Unterschied (Signifikanz > 0.05) auf. Der Gruppenvergleich für den Parameter $R(x)$ war laut Friedman-Test statistisch signifikant (Signifikanz=0,049) unterschiedlich, wurde aber mit der anschließenden Bonferoni-Korrektur als nicht-signifikant erklärt.

Alle zehn Patienten wiesen, egal in welcher Messmethode, einen negativen Winkel α auf. Das heißt, dass der laterale Hufbeinaspekt höher als der mediale lag. Die Winkelmessungen des Winkels α wiesen für Messmethode eins eine statistisch signifikante (Pearson Korrelationskoeffizient = - 0.703, $P = 0.023$) und für Messmethode drei eine hohe statistisch signifikante (Pearson Korrelationskoeffizient = - 0.779, $P = 0.008$) negative Korrelation zum Validierungsstandard M_3 (aus den Messungen der obliquen Aufnahmen) auf. Die Winkelmessung α der Messmethode zwei wies keinen statistischen Zusammenhang mit dem Validierungsstandard auf. Auch zwischen der Winkelmessung α M_1 und der Differenz zwischen der Distanz des lateralen und medialen Hufbeinaspekts zum Boden, gemessen auf der DP-Aufnahme, bestand eine hohe signifikante negative Korrelation (Pearson Korrelationskoeffizient = -0.859, $P = 0.001$). Für die Winkelmessungen α M_2 und M_3 war der negative Zusammenhang mit der Differenz der Distanz zwischen lateralem und medialem Hufbeinaspekt zum Boden weniger statistisch signifikant (Pearson Korrelationskoeffizient = - 0.714, $P = 0.02$ bzw. für M_3 Pearson Korrelationskoeffizient = -0.707, $P = 0.022$).

Bei den Messungen des Winkels β ergaben sich für die einzelnen Patienten und Messmethoden teilweise Unterschiede bezüglich der Richtung. Bei Patient 5, 8 und 10 unterschieden sich die Messungen folgendermaßen: für Patienten 5 und 10 wurden bei Messmethode eins und zwei negative und bei Messmethode drei positive Winkel β gemessen. Für Patient 8 wurde bei Messmethode eins und zwei positive und bei Messmethode drei ein negativer Winkel β gemessen. Die Korrelation zwischen β M_1 und M_2 zur Messung der Distanz des palmaren Hufbeinaspekts P zum Boden (gemessen auf der seitlichen Aufnahme) war hoch signifikant (Pearson Korrelationskoeffizient = 0.816, $P = 0.04$ bzw. für M_2 Pearson Korrelationskoeffizient = 0.812; $P = 0.004$). Die negative Korrelation zwischen β M_3 und dem Abstand des palmaren Hufbeins P zum Boden war weniger signifikant (Pearson Korrelationskoeffizient = -0.700, $P = 0.025$).

Für die Berechnungen des 3D-Winkels γ ergaben sich, unabhängig mit welcher Messmethode vorgegangen wurde, immer größere Ergebnisse als die Einzelwinkel α oder β . Der Großteil der vermessenen Patienten wies den tiefsten Punkt des Hufbeins dorsomedial auf. Bei den

Messmethoden eins und zwei waren das bei 70 % und bei Messmethode drei war das bei 80 % der Fall. Die restlichen Patienten hatten ihren tiefsten Punkt palmaromedial. Ein Ergebnis mit dem tiefsten Punkt dorsolateral oder palmarolateral kam bei diesen zehn Patienten nicht vor. Für alle drei Messmethoden bestand ein hoher signifikanter Zusammenhang zwischen der Winkelberechnung γ und dem Validierungsstandard M_3 (M_1 : Pearson Korrelationskoeffizient = 0.773, $P = 0.009$; M_2 : Pearson Korrelationskoeffizient = 0.793; $P = 0.006$; M_3 : Pearson Korrelationskoeffizient = 0.934; $P = 0.00008$).

Der Median der maximalen lateromedialen Distanz d der Darstellung der Hufbeine betrug 99,95 mm und 59,8 mm war der Median der maximalen dorsopalmaren Distanz t des dargestellten Hufbeins. Die Ergebnisse der gemessenen maximalen lateromedialen Distanz d korrelierten statistisch signifikant mit den Ergebnissen der Messungen der maximalen dorsopalmaren Distanz t (Pearson Korrelationskoeffizient = 0.648, $P = 0.029$).

Außerdem muss noch erwähnt werden, dass die chronologischen Nummern der Messungen mit den gemessenen Werten der Distanz von dorsolateral zum Boden, gemessen auf der DMPLO-Aufnahme (Pearson Korrelationskoeffizient = -0.655, $P = 0.040$), und der Distanz von palmar zum Boden P , gemessen auf der seitlichen-Aufnahme (Pearson Korrelationskoeffizient = -0.648, $P = 0.043$), negativ statistisch signifikant korrelieren.

In der folgenden Tabelle (siehe Tab. 6) sind die Mess- und Rechenergebnisse der dritten Messmethode aufgelistet. Anhand dieser ist die Auswirkung der unterschiedlichen Dimensionen des Hufbeins auf die Ergebnisse des 3D Winkels γ und dem maximalen Abstand A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins ersichtlich. Auf die Größe des 3D Winkels haben die Dimensionen des Hufbeins keinen Einfluss (siehe Formel). Jedoch ist der maximale Abstand A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins umso größer, je größer die lateromediale Dimension d des dargestellten Hufbeins ist.

Tabelle 6: Mess- und Rechenergebnisse der dritten Messung inklusive der Dimensionen des Hufbeins

d: lateromediale Distanz in mm des dargestellten Hufbeins, gemessen auf der Oxspring- oder High-Corony-Aufnahme; **t:** dorsopalmare Distanz in mm des dargestellten Hufbeins, gemessen auf der Oxspring- oder High-Corony-Aufnahme; **α :** Winkel der mediolateralen Imbalance, gemessen auf der DP-Aufnahme in $^{\circ}$; **M:** Distanz zwischen medialem Hufbeinast und Boden in mm, gemessen auf der DP-Aufnahme; **L:** Distanz zwischen lateralem Hufbeinast und Boden in mm, gemessen auf der DP-Aufnahme; **β :** Winkel der dorsopalmaren Imbalance, gemessen auf der LM-Aufnahme in $^{\circ}$; **S:** Distanz zwischen Hufbeinspitze und Boden in mm, gemessen auf der LM-Aufnahme; **P:** Distanz zwischen Hufbeinästen und Boden in mm, gemessen auf der LM-Aufnahme; **A:** berechneter maximaler Abstand A zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Hufbeins in mm; **γ :** berechneter 3D Winkel in $^{\circ}$; **tiefster Punkt.:** Richtung in der das Hufbein seinen tiefsten Punkt aufweist, DM: tiefster Punkt dorsomedial, PM: tiefster Punkt palmaromedial

Pfd.	d in mm	t in mm	α in $^{\circ}$	M in mm	L in mm	β in $^{\circ}$	S in mm	P in mm	A in mm	γ in $^{\circ}$	tiefster Pkt.
1	96,9	58,6	-2,3	23,7	30,6	4,6	27,0	37,5	8,7	5,1	DM
2	104,3	60,8	-4,9	22,2	30,0	2,0	26,4	23,7	9,7	5,3	DM
3	101,6	72,7	-4,6	14,8	15,6	-2,1	21,7	17,7	9,0	5,1	PM
4	92,3	50,6	-1,0	22,9	23,4	4,2	19,5	26,8	7,0	4,3	DM
5	107,1	65,3	-4,0	19,5	28,0	1,1	21,3	16,5	7,8	4,1	DM
6	99,0	66,0	-7,6	28,9	38,2	4,0	22,3	26,2	14,9	8,6	DM
7	107,5	69,1	-1,6	23,3	25,1	2,4	15,9	16,8	5,4	2,9	DM
8	98,6	46,6	-1,1	15,3	16,5	-0,7	16,4	17,8	2,2	1,3	PM
9	95,0	50,9	-1,2	18,3	20,4	4,6	27,6	21,9	7,9	4,8	DM
10	100,9	58,8	-3,7	13,5	18,9	0,3	16,8	13,2	6,5	3,7	DM

3.1. Vergleich der Ergebnisse des maximalen Abstandes A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins mit der Qualitätskontrolle aus den obliquen Aufnahmen

Die Rechenergebnisse des maximalen Abstandes A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins wurden mit den Messergebnissen der Distanz zwischen der herausprojizierten Hufbeinspitze und Hufbeinast auf den obliquen Aufnahmen verglichen. Da sich die Ergebnisse der einzelnen Messmethoden wie schon erwähnt bei drei Patienten uneinig bezüglich der Richtung des 3D-Winkels und demnach dem tiefsten Punkt des Hufbeins waren, mussten die Ergebnisse teilweise mit dem Messergebnis der anderen obliquen Aufnahme verglichen werden. So mussten Ergebnisse mit dem tiefsten Punkt dorsomedial mit der gemessenen Differenz von dorsomedial nach palmarolateral auf der DLPMO-Aufnahme verglichen werden. Ergebnisse mit dem tiefsten Punkt palmaromedial wurden mit der gemessenen Differenz auf der DMPLO-Aufnahme verglichen. So ergab sich für jede Messmethode ein anderer Validierungsstandard aus den Ergebnissen der obliquen Aufnahmen, weil teilweise die andere oblique Aufnahme verwendet wurde. In der Statistik wurden die einzelnen Messmethoden jedoch nur mit dem Validierungsstandard der Messmethode drei verglichen. Eine Übersicht zu den Rechenergebnissen des Abstandes A im Vergleich zu dem gemessenen Validierungsstandard kann in der nachstehenden Tabelle nachgelesen werden (siehe Tab. 7).

Tabelle 7: Ergebnisvergleich des maximalen Abstandes A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins in mm mit der gemessenen Differenz zwischen tiefstem Punkt der Hufbeinspitze und Hufbeinast auf den obliquen Aufnahmen in mm

A M₁ maximaler Abstand Messmethode 1, **A M₂** maximaler Abstand Messmethode 2, **A M₃** maximaler Abstand Messmethode 3, **Diff auf DLPMO** gemessene Differenz auf der dorsolateral-palmaromedialen oblique Aufnahme zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins **Diff auf DMPLO** gemessene Differenz auf der dorsomedial-palmarolateraler oblique Aufnahme zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins; **DM** tiefster Punkt des Hufbeins dorsomedial, **PM** tiefster Punkt des Hufbeins palmaromedial; hellgrau schattiert sind jene Werte, die mit der Differenz aus der DLPMO-Aufnahme verglichen werden müssen; weiß hinterlegt jene, die mit der Differenz aus der DMPLO-Aufnahme verglichen werden müssen

Pferd	A M ₁ in mm	A M ₂ in mm	A M ₃ in mm	Diff auf DLPMO in mm	Diff auf DMPLO in mm
1	11,3 _{DM}	11,1 _{DM}	8,7 _{DM}	11,4	9,7
2	6,9 _{DM}	8,1 _{DM}	9,7 _{DM}	9,7	2,1
3	5,5 _{PM}	6,4 _{PM}	9,0 _{PM}	0,7	8,6
4	6,3 _{DM}	7,7 _{DM}	7,0 _{DM}	6,1	6,1
5	10,4 _{PM}	5,9 _{PM}	7,8 _{DM}	8,8	5,5
6	8,9 _{DM}	13,8 _{DM}	14,9 _{DM}	14,1	3,3
7	2,4 _{DM}	6,3 _{DM}	5,4 _{DM}	4,5	2,5
8	3,6 _{DM}	4,9 _{DM}	2,2 _{PM}	2,9	2,7
9	6,7 _{DM}	5,8 _{DM}	7,9 _{DM}	7,5	4,5
10	6,2 _{PM}	9,2 _{PM}	6,5 _{DM}	7,2	2,7

Für alle drei Messmethoden bestand eine hohe signifikante Korrelation zwischen dem maximalen Abstand A und dem Validierungsstandard M_3 (siehe Tab. 8):

Tabelle 8: Korrelation zwischen dem Validierungsstandard der dritten Messmethode und den Ergebnissen der Berechnungen des maximalen Abstandes A zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Hufbeins in mm (n=10)

Validierungsstandard M_3 zu	Korrelationskoeffizient nach Pearson	Signifikanz
A M_1	0,778	0,008
A M_2	0,815	0,004
A M_3	0,941	0,00004

3.2. Ergebnisse bezüglich der obliquen Aufnahmen

Die Differenz der herausprojizierten Hufbeinspitze und des Hufbeinasts auf der DLPMO-Aufnahme korrelierte statistisch hoch signifikant mit dem Validierungsstandard M_3 (Pearson Korrelationskoeffizient = 0,78, P = 0.08). Außerdem korrelierte die gemessene Differenz zwischen herausprojizierter Hufbeinspitze und Hufbeinast auf der DLPMO-Aufnahme mit der gemessenen Differenz der beiden Hufbeinäste zum Boden, gemessen auf der DP-Aufnahme (Pearson Korrelationskoeffizient = 0,853, P = 0.02). Die gemessene Differenz zwischen herausprojizierter Hufbeinspitze und Hufbeinast auf der DMPLO-Aufnahme korrelierte jedoch weder mit dem Validierungsstandard M_3 noch mit der Differenz des medialen und lateralen Hufbeinasts zum Boden, gemessen auf der DP-Aufnahme.

Die gemessene Differenz zwischen herausprojizierter Hufbeinspitze und Hufbeinast zum Boden auf der DMPLO-Aufnahme korrelierte statistisch hoch signifikant mit der gemessenen Differenz zwischen Hufbeinspitze und Hufbeinästen zum Boden, gemessen auf der lateromedialen Aufnahme (Pearson Korrelationskoeffizient = 0,782, P = 0.08).

Der gemessene Winkel auf der DMPLO-Aufnahme, welcher den Winkel zwischen herausprojiziertem Hufbeinast und Boden einschließt, korrelierte statistisch hoch signifikant mit dem berechneten 3D-Winkel γ und dem maximalen Abstand A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins der ersten Messmethode (Pearson Korrelationskoeffizient = 0,909, P = 0.0003 bzw. Pearson Korrelationskoeffizient = 0,906, P = 0.0003).

Nur der berechnete 3D-Winkel und maximale Abstand A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins der zweiten Messmethode korrelierte statistisch hoch signifikant mit der gemessenen Differenz zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins auf der DLPMO-Aufnahme (Pearson Korrelationskoeffizient = 0,776, P = 0.008 bzw. Pearson Korrelationskoeffizient = 0,79, P = 0.007) und der gemessenen Differenz von palmarolateral zum Boden, gemessen auf der DLPMO-Aufnahme (Pearson Korrelationskoeffizient = 0,775, P = 0.008 bzw. Pearson Korrelationskoeffizient = 0,796, P = 0.006).

Außerdem korrelierte die gemessene Distanz von palmaromedial zum Boden, gemessen auf der DMPLO-Aufnahme, statistisch hoch signifikant mit der Winkelmessung β und demnach der Vektorkoordinate $R_{(y)}$ der zweiten Messmethode (Pearson Korrelationskoeffizient = 0,877, P = 0.001 bzw. Pearson Korrelationskoeffizient = 0,877, P = 0.002).

4. Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Formel, mit welcher die dorsopalmare Imbalance mit der mediolateralen Imbalance kombiniert und somit der dreidimensionale Winkel des Hufbeins zum Boden berechnet werden kann, an zehn Röntgenstudien von Patienten angewandt und Messungen wurden durchgeführt. Um möglichst genaue Messergebnisse zu erzielen, wurden die Messmethoden zweimal adaptiert und wiederholt.

Alle vermessenen Pferde zeigten - egal mit welcher Messmethode - einen negativen Winkel α auf den dorsopalmaren Röntgenaufnahmen. Das bedeutet, dass der laterale Hufbeinaspekt höher lag als der mediale. Dies deckt sich mit Messungen aus der Literatur, welche zeigen, dass der Großteil an Pferden diese Art der mediolateralen Imbalance aufweisen; also der laterale Hufbeinaspekt des Öfteren höher zu liegen kommt als der mediale (5, 26). Die negative Korrelation zwischen der Winkelmessung α M_3 und dem Validierungsstandard M_3 war statistisch hoch signifikant. Die negative Korrelation zwischen Winkelmessung α M_1 und dem Validierungsstandard M_3 war weniger statistisch signifikant und die Winkelmessung α M_2 korrelierte gar nicht mit dem Validierungsstandard M_3 . Dies könnte einerseits dadurch bedingt sein, dass die Messmethoden eins und zwei nicht mit ihrem eigenen Validierungsstandard aus den obliquen Aufnahmen verglichen wurden, sondern mit jenem der Messmethode drei, aber könnte auch bedeuten, dass die Messungen, vor allem die der Messmethode zwei, wenig akkurat waren, wie auch die Abweichung zwischen den Ergebnissen des maximalen Abstandes A und den Messergebnissen aus den obliquen Aufnahmen bei sechs von zehn Pferden bei der ersten Messung bzw. drei von zehn Pferden bei der zweiten Messung von über 2 mm zeigt. Wie schon weiter oben erwähnt, war die Messung in der Verbindungslinie der beiden Gefäßbögen (Messmethode zwei) relativ ungenau durchzuführen und durch die Kippung des Hufbeins oft nicht eindeutig nachzuvollziehen. Wenn man die Ergebnisse der Winkelmessung der mediolateralen Imbalance der drei verschiedenen Messmethoden mit den Messungen der Differenz von lateralem und medialem Hufbeinaspekt zum Boden (gemessen auf der DP-Aufnahme) vergleicht, ist ersichtlich, dass die Korrelation dieser für die Messmethode eins am größten ist. Dies könnte bedeuten, dass die Winkelmessung α mit der ersten Messmethode (Messung an der breitesten Stelle des Hufbeins) zu den genauesten Ergebnissen geführt hat.

In der Literatur wird ein dorsopalmarer Winkel β zum Boden (engl. Palmar Angle) von 3 bis 10° als physiologisch beschrieben (1, 9, 14). Fünf von zehn in dieser Arbeit untersuchten Pferde unterschritten diese Angabe und wiesen einen kleineren dorsopalmaren Winkel auf.

Die Korrelation zwischen der Distanz P des palmaren Hufbeinaspekts zum Boden, gemessen auf der lateromedialen Röntgenaufnahme, zu der Winkelmessung β der ersten und zweiten Messmethode war hoch signifikant; zur Winkelmessung βM_3 weniger signifikant. Außerdem wurde bei drei Pferden, je nachdem welche Messmethode verwendet wurde, ein Unterschied in der Richtung des Winkels gemessen. Die Richtung der Ergebnisse der Messmethode drei unterschieden sich von der Richtung der Ergebnisse der Messmethoden eins und zwei. Obwohl für die Messung der dorsopalmaren Imbalance mittels Messmethode drei versucht wurde, möglichst genau vorzugehen, scheint diese trotzdem die fehlerhafteste zu sein. Wie man auf Abbildung 13 erkennen kann, wurde der Winkel durch die vorhergehenden Schritte eins und zwei eher von der Mitte des Hufbeins an bis zur Hufbeinspitze gemessen und nicht bis zu den *Processus Palmares*. Doch obwohl versucht wurde, durch diese Art der Messung die Hufbeinäste genau auseinander zu differenzieren und in der Mitte dieser beiden zu messen, dürfte dies eine Fehlerquelle darstellen. Würde man nämlich die Linie der Winkelmessung (b_3) nach palmar hinaus verlängern, so verläuft diese oft hoch proximal, weit über den Hufbeinästen hinaus und kann somit nicht wirklich akkurat sein. Dass für die Statistik dennoch der Validierungsstandard der Messmethode drei hergenommen wurde (unterscheidet sich zum Validierungsstandard M_1 und M_2 bei drei Pferden, wo die andere oblique Aufnahme als Kontrolle hergenommen wurde, aufgrund der unterschiedlichen Vorzeichen), muss in Anbetracht dessen, dass die Winkelmessung βM_3 wohl nicht die genaueste war, kritisch gesehen werden. Andererseits spricht dies für die Genauigkeit der Messmethoden eins und zwei, da sie, obwohl sie mit dem Validierungsstandard der dritten Messmethode verglichen wurden, trotzdem hoch signifikant korrelierten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass für die Messung der mediolateralen Imbalance aufgrund dieser Ergebnisse die Messmethoden eins oder drei hergenommen werden sollten. Für die Messung der dorsopalmaren Imbalance sollte Messmethode eins oder zwei verwendet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Rechenergebnisse des maximalen Abstandes A zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Hufbeins mit den Messergebnissen der obliquen Aufnahmen verglichen. Oblique Aufnahmen der Zehe werden in der Pferdemedizin angewandt, um zum Beispiel DJD im Hufgelenk oder Hufbeinastfrakturen darzustellen (38, 31). Da die Messmethoden und die Anwendung der Formel in dieser Arbeit auch kontrolliert werden mussten, wurden hierfür die obliquen Aufnahmen verwendet. Somit stellt sich aber die Frage, warum überhaupt so viele Messungen und anschließende Berechnungen durchgeführt

werden müssen, um einen dreidimensionalen Winkel und ein Ergebnis in Millimetern zu erhalten, wenn man durch reine Messung der obliquen Aufnahmen schneller zu einem Ergebnis kommen könnte. Das Ergebnis des maximalen Abstandes A, welches durch die Formel errechnet wurde, war bei allen zehn Patienten (zumindest mit der dritten Messmethode) sehr ähnlich wie das Messergebnis der Distanz zwischen Hufbeinspitze und Hufbeinast auf der DLPMO- oder DMPLO-Aufnahme. Somit kann man durch Messungen an den obliquen Aufnahmen zwar den maximalen Abstand zwischen tiefstem und höchstem Punkt messen, jedoch nicht die Richtung erfahren, in welche das Hufbein gekippt ist; also ob der tiefste Punkt dorsomedial, dorsolateral, palmaromedial oder palmarolateral liegt. Außerdem kann man durch reines Messen der obliquen Aufnahmen nicht unterscheiden, welche der beiden für dieses Pferd relevant ist; also ob die Distanz auf der DLPMO- oder auf der DMPLO-Aufnahme das relevante Ergebnis zeigen. Davor muss nämlich schon bekannt sein, in welche Richtung das Hufbein gekippt ist und dadurch kann die richtige Aufnahme hergenommen werden. Ein weiteres Problem ist, dass der gerechnete 3D-Winkel in der obliquen Ebene aufgrund der Multiplikation der Matrizen sein Maximum nicht genau bei 45° hat, also genau dorsomedial, dorsolateral, palmaromedial oder palmarolateral, sondern kann auch irgendwo dazwischen liegen. Somit ist eventuell auf den obliquen Aufnahmen nicht immer der maximale Abstand zwischen höchstem und tiefstem Punkt sichtbar und deshalb stimmen die Werte nicht immer überein. Außerdem sind die schrägen Aufnahmen oft nicht komplett akkurat, also in einem Winkel von 45° und 135° aufgenommen. Dadurch verändert sich die Winkelung der *Facies solearis* zum Boden, sowie der Abstand der Hufbeinspitze und des herausprojizierten Hufbeinasts zum Boden. So kann also nicht unterschieden werden, ob die Rechenergebnisse mithilfe der Formel oder die Messergebnisse der obliquen Aufnahmen korrekter sind. Somit stellt die Überprüfung durch die obliquen Aufnahmen keine sichere Validierung dieser neuen Berechnung des dreidimensionalen Winkels dar und weitere Überprüfungen sollten folgen.

Als limitierender Faktor dieser Arbeit muss angemerkt werden, dass bei den verwendeten Röntgenstudien kein genormtes Objekt (z.B. genau 10 mm lang) mitgeröntgt wurde. Dies wäre hilfreich gewesen, um Messungen danach näher zu den realer Millimeter Dimensionen umrechnen zu können. Da bei der Anfertigung von Röntgenstudien der Abstand zwischen Pferdebein und Platte nicht einheitlich ist, ergibt sich ein etwas anderer Vergrößerungsfaktor bei einem unterschiedlichen Abstand zur Platte. Dies bedeutet auch, dass die Messergebnisse von einem Röntgenbild nicht ohne nicht genau quantifizierbaren Fehler auf ein anderes

Röntgenbild übertragen werden können. Dieser Fehler war z.B. bei der Messung der dorsopalmaren Imbalance der Messmethode drei relevant, für welche die Strecke t aus der Oxspring- oder High-Corony-Aufnahme auf das seitliche Röntgenbild übertragen wurde.

Die Fragestellung dieser Arbeit war eine Messmethode hervorzubringen, mithilfe welcher TierärztInnen und HufschmiedInnen die dorsopalmar und mediolaterale Imbalance zuverlässig messen und damit den maximalen Winkel zwischen Hufbein und Boden berechnen können. Diese Fragestellung konnte mit Hilfe der Studienergebnisse klar beantwortet werden. Durch die Berechnung des 3D Winkels kann eingeschätzt werden, wie stark und in welche Richtung das Hufbein zum Boden verkippt ist.

Ein beschlagener Huf nutzt sich im Vergleich zum unbeschlagenen Huf während einer Beschlagsperiode ungleichmäßiger ab und Imbalancen entstehen. Während sich beim beschlagenen Huf die Trachten durch den Hufmechanismus deutlich mehr abnutzen als die Zehe, wird der unbeschlagene Huf gleichmäßig abgenutzt und behält seine Form. Der dorsale Hufwinkel wird im Laufe der Beschlagsperiode um ca. $3,5^\circ$ flacher und das Hornwachstum führt zu vermehrter Extension des Hufgelenks (15, 39, 19).

Eine korrektive Hufbearbeitung dient als wichtige Therapieform bei asymmetrischen Hufen und es wird beschrieben, dass durch korrekte Hufbearbeitung und Beschlag einige Lahmheiten verhindert bzw. therapiert werden können (11, 18). Um Imbalancen zu korrigieren, muss der Huf bearbeitet und die zu langen Wände gekürzt bzw. Keile zur Unterstützung verwendet werden (40). Das Kürzen der Zehe bei der Hufbearbeitung bedingt eine Verkürzung der dorsalen Hufwand um ungefähr 1 cm. Das entspricht ungefähr 10 % und führt zu einer Lageveränderung des Hufbeins im Bezug zur Hornkapsel. Der Abstand zwischen Hufbein und Sohle sowie zwischen Hufbein und Hufspitze wird um ungefähr 0,7 cm verkleinert (19). Bei Verwendung eines palmaren Keils wurde beobachtet, dass in Bewegung die maximale Flexion im Hufgelenk verringert und verzögert eintritt und auch die maximale Extension des Hufgelenks verringert wird (41, 42).

Bei einem Patienten mit nach palmar gebrochener Zehenachse findet man eine lang angewachsene Zehe und untergeschobene Trachten vor. Es wird empfohlen, die Zehe zu kürzen und das Pferd wenn möglich barhuf gehen zu lassen, um gesundes Hornwachstum zu beschleunigen. Um sofort eine gerade Huf-Fessel-Achse herzustellen, kann ein palmarer Keil verwendet werden. Dieser hilft jedoch nicht bei der Regeneration und Bildung von gesundem Trachtenhorn. Alternativ könnte man mit Platten und Silikonpolster beschlagen, um mit dem

Strahl, Tragrand und palmaren Sohlenkörper wieder Bodenkontakt herzustellen. Dies bewirkt zwar keine sofortige gerade Huf-Fessel-Achse, aber hilft der Heilung der beschädigten untergeschobenen Trachten (21).

Bei mediolateraler Imbalance sollte in weniger chronischen Fällen durch das Kürzen der zu langen, oft lateralen Wand die Inkongruenz im Hufgelenk verringert und die Krafteinwirkung auf den Huf wieder symmetrisch und ausbalanciert erfolgen (5, 43). Sollte dies nicht ausreichen, kann man durch Verwendung eines Eisens, an welchem ein Schenkel dicker als der andere ist, eine Imbalance ausgleichen. Auch möglich ist die Verwendung eines Keils oder eines Komposits, um die zu kurze Wand zu verlängern (21).

Aufbauend auf diese Grundlagen der therapeutischen Hufbearbeitung und Beschlagskunde, könnte nun durch die Berechnung des dreidimensionalen Winkels eine noch gezieltere Hufkorrektur erfolgen. Da man durch die Ergebnisse weiß, in welcher Richtung das Hufbein seinen tiefsten Punkt hat: dorsomedial, dorsolateral, palmaromedial oder palmarolateral, und wie groß der Abstand zwischen tiefster und höchster Stelle ist, könnte man durch Kürzen der Wand bzw. Anbringen eines Keils an der richtigen Stelle versuchen, den Huf und vor allem das Hufbein wieder in Balance zu bringen.

Weiters wäre es interessant, diese Formel an mehreren Patienten anzuwenden, HufschmiedInnen nach den gerechneten Ergebnissen korrigieren zu lassen und erneut zu röntgen und zu messen.

5. Literaturverzeichnis

1. Colles CM. Interpreting radiographs 1: the foot. *Equine Veterinary Journal* 1983; 15(4):297–303.
2. Clayton HM. Biomechanics of the Distal Interphalangeal Joint. *Journal of Equine Veterinary Science* 2010; 30(8):401–5.
3. Viitanen MJ, Wilson AM, McGuigan HR, Rogers KD, May SA. Effect of foot balance on the intra-articular pressure in the distal interphalangeal joint in vitro. *Equine Veterinary Journal* 2003; 35(2):184–9.
4. Caudron I, Grulke S, Farnir F, Aupaix R, Serteyn D. Radiographic assessment of equine interphalangeal joints asymmetry: articular impact of phalangeal rotations (Part I). *Journal of Veterinary Medicine Series A* 1998; 45(6-7):319–25.
5. Caudron I, Miesen M, Grulke S, Vanschepdael P, Serteyn D. Clinical and radiological assessment of corrective trimming in lame horses. *Journal of Equine Veterinary Science* 1997; 17(7):375–9.
6. Chateau H, Degueurce C, Jerbi H, Crevier-Denoix N, Pourcelot P, Audigié F et al. Three-dimensional kinematics of the equine interphalangeal joints: articular impact of asymmetric bearing. *Veterinary Research* 2002; 33(4):371–82.
7. Ronchetti A, Day P, Weller R. Mediolateral hoof balance in relation to the handedness of apprentice farriers. *Veterinary Record* 2011; 168(2):48.
8. Burd MA, Craig JJ, Craig MF. The palmar metric: A novel radiographic assessment of the equine distal phalanx. *Open Veterinary Journal* 2014; 2(4):78–81.
9. Trotter GW. Hoof balance in equine lameness. *Journal of Equine Veterinary Science* 2004; 24(12):494–5.
10. O'Grady SE, Poupard DA. Physiological horseshoeing: an overview. *Equine Veterinary Education* 2001; 13(6):330–4.
11. Eliashar E. An evidence-based assessment of the biomechanical effects of the common shoeing and farriery techniques. *Veterinary Clinics: Equine Practice* 2007; 23(2):425–42.
12. Parks A. Form and function of the equine digit. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 2003; 19(2):285–307.

13. Gerard MP. Anatomy and Physiology of the Equine Foot. *Vet Clin North Am Equine Pract* 2021; 37(3):529–48.
14. Balch O, White K, Butler D. Factors involved in the balancing of equine hooves. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 1991; 198(11):1980–9.
15. van Heel MCV, Barneveld A, van Weeren PR, Back W. Dynamic pressure measurements for the detailed study of hoof balance: the effect of trimming. *Equine Veterinary Journal* 2004; 36(8):778–82.
16. Wilson A, Agass R, Vaux S, Sherlock E, Day P, Pfau T et al. Foot placement of the equine forelimb: Relationship between foot conformation, foot placement and movement asymmetry. *Equine Veterinary Journal* 2016; 48(1):90–6.
17. Page BT, Hagen TL. Breakover of the hoof and its effect on structures and forces within the foot. *Journal of Equine Veterinary Science* 2002; 22(6):258–64.
18. O'Grady SE, Poupard DA. Proper physiologic horseshoeing. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 2003; 19(2):333–51.
19. 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. *The Veterinary Journal* 2006; 172(1):58–66.
20. Eggleston RB. Value of Quality Foot Radiographs and Their Impact on Practical Farriery: In-Depth: The Foot From Every Angle. *AAEP Proceedings* 2012; 58:164–75.
21. Parks AH. Therapeutic Farriery. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 2012; 28(2):333–50.
22. Reeves MJ, Yovich JV, Turner AS. Miscellaneous Conditions of the Equine Foot. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 1989; 5(1):221–42.
23. Hinterhofer C, Stanek C, Haider H. Finite element analysis (FEA) as a model to predict effects of farriery on the equine hoof. *Equine Veterinary Journal* 2001; (33):58–62.
24. Fürst AE, Lischer CJ. Foot. In: Auer JA, Stick JA, Hrsg. *Equine Surgery*. 4. Auflage. St. Louis, Missouri: Elsevier/Saunders; 2012: 1264–1299.
25. Rose RJ. The diagnosis and treatment of arthritis in horses. *New Zealand Veterinary Journal* 1983; 31(1-2):13–5.

26. Dyson SJ. Lameness due to pain associated with the distal interphalangeal joint: 45 cases. *Equine Veterinary Journal* 1991; 23(2):128–35.
27. McIlwraith CW, Goodman NL. Conditions of the Interphalangeal Joints. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 1989; 5(1):161–78.
28. McIlwraith CW, Vachon A. Review of pathogenesis and treatment of degenerative joint disease. *Equine Veterinary Journal* 1988; (6):3–11.
29. Frisbie DD. Synovial Joint Biology and Pathobiology. In: Auer JA, Stick JA, Hrsg. *Equine Surgery*. 4. Auflage. St. Louis, Missouri: Elsevier/Saunders; 2012: 1096–1114.
30. Wulster KB. Diagnosis of Skeletal Injury in the Sport Horse. *Veterinary Clinics: Equine Practice* 2018; 34(2):193–213.
31. Kold S, Butler J. Radiography of the horse 2. Foot and Pastern. *In Practice* 2003; 25(4):208–16.
32. Redden RF. Radiographic imaging of the equine foot. *Veterinary Clinics: Equine Practice* 2003; 19(2):379-92
33. Joostens Z, Evrard L, Busoni V. Unipodal stance influences radiographic evaluation of foot balance in horses. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 2019; 60(3):273–9.
34. Contino EK, Barrett MF, Werpy NM. Effect of limb positioning on the radiographic appearance of the distal and proximal interphalangeal joint spaces of the forelimbs of horses during evaluation of dorsopalmar radiographs. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 2014; 244(10):1186–90.
35. Park RD. Radiographic examination of the equine foot. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 1989; 5(1):47–66.
36. Bras R, Morrison S. Mechanical Principles of the Equine Foot. *Veterinary Clinics: Equine Practice* 2021; 37(3):581–618.
37. Arens T, Hettlich F, Karpfinger C, Kockelkorn U, Lichtenegger K, Stachel H. *Mathematik*. 4. Auflage. Berlin: Springer Spektrum; 2018.
38. Šterc J, Crháčková T. Oblique views in radiographic examination of discrete changes in selected diseases of the digit in the horse. *Acta Veterinaria Brno* 2005:243–8.

39. Moleman M, van Heel MCV, van Weeren PR, Back W. Hoof growth between two shoeing sessions leads to a substantial increase of the moment about the distal, but not the proximal, interphalangeal joint. *Equine Veterinary Journal* 2006; 38(2):170–4.
40. Wilson AM, Seelig TJ, Shield RA, Silverman BW. The effect of foot imbalance on point of force application in the horse. *Equine Veterinary Journal* 1998; 30(6):540–5.
41. Chateau H, Degueurce C, Denoix JM. Effects of 6 degree elevation of the heels on 3D kinematics of the distal portion of the forelimb in the walking horse. *Equine Veterinary Journal* 2004; 36(8):649–54.
42. Chateau H, Degueurce C, Denoix JM. Three-dimensional kinematics of the distal forelimb in horses trotting on a treadmill and effects of elevation of heel and toe. *Equine Veterinary Journal* 2006; 38(2):164–9.
43. Caudron I, Grulke S, Farnir F, Vanschepdael P, Serteyn D. In-shoe foot force sensor to assess hoof balance determined by radiographic method in ponies trotting on a treadmill. *Veterinary Quarterly* 1998; 20(4):131–5.

6. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1: Beispielbild der Winkelmessung alpha (Messung der lateromedialen Imbalance) auf der dorsopalmaren Aufnahme, α = negativ, weil lateral hoch	8
Abbildung 2: Beispielbild der Winkelmessung beta (Messung der dorsopalmaren Imbalance) auf der lateromedialen Aufnahme, β = positiv, weil Hufspitze tief.....	8
Abbildung 3: 3D Modell der verkippten Sohlenfläche eines Hufbeins, eingezeichnet ist der dreidimensionale Winkel γ , welcher sich zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Hufbeins in der obliquen Ebene befindet	9
Abbildung 4: Beispielbild der Winkelmessung des herausprojizierten Hufbeinasts zum Boden auf der DMPLO Aufnahme der rechten VE von Pferd 1	14
Abbildung 5: Beispielbild der Distanzmessung zwischen dargestellten Hufbeinspitze und Hufbeinästen zum Boden auf der DMPLO Aufnahme der rechten VE von Pferd 1.....	14
Abbildung 6: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels α (lateromediale Imbalance) auf der DP-Aufnahme der rechten VE von Pferd 8, Messmethode eins, α = neg. weil lateral hoch	15
Abbildung 7: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels β (dorsopalmare Imbalance) auf der LM-Aufnahme der rechten VE von Pferd 9, Messmethode eins, β = pos. weil Hufbeinspitze tief.....	16
Abbildung 8: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels α (lateromediale Imbalance) auf der DP-Aufnahme der linken VE von Pferd 4, Messmethode zwei, α = neg. weil lateral hoch	19
Abbildung 9: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels β (dorsopalmare Imbalance) auf der LM-Aufnahme der rechten VE von Pferd 6, Messmethode zwei, β = pos. weil Hufbeinspitze tief.....	19
Abbildung 10: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels α (lateromediale Imbalance) auf der DP-Aufnahme der rechten VE von Pferd 8, Messmethode drei, α =neg., weil lateral hoch	22
Abbildung 11: Beispielbild der Distanzmessung zwischen lateralem L und medialem M Hufbeinast zum Boden auf der DP-Aufnahme der rechten VE von Pferd 8	22

Abbildung 12. Beispielbild der Distanzmessung der lateromedialen Distanz d und dorsopalmaren Distanz t auf einer Oxspringaufnahme der rechten VE von Pferd 2 22

Abbildung 13: Beispielbild der Winkelmessung des Winkels β (dorsopalmare Imbalance) auf der LM-Aufnahme der rechten VE von Pferd 1, $\beta = \text{pos.}$, weil Hufbeinspitze tief, $t =$ dorsopalmare Distanz, $M =$ Distanz von medialem Hufbeinast bis zum Boden, $L =$ Distanz vom lateralen Hufbeinast zum Boden..... 23

Abbildung 14: Beispielbild der Distanzmessung zwischen Hufbeinspitze S und Hufbeinästen P zum Boden auf der seitl-Aufnahme der rechten VE von Pferd 1 23

Tabelle 1: Richtungsbezeichnungen des resultierenden 3D Winkels.....	11
Tabelle 2: Mess- und Rechenergebnisse der ersten Messung.....	17
Tabelle 3: Mess- und Rechenergebnisse der zweiten Messung.....	20
Tabelle 4: Mess- und Rechenergebnisse der dritten Messung.....	24
Tabelle 5: Messergebnisse der Winkel α und β in $^\circ$, Rechenergebnisse des 3D-Winkels γ in $^\circ$ und des maximalen Abstandes A in mm für alle drei Messmethoden.....	26
Tabelle 6: Mess- und Rechenergebnisse der dritten Messung inklusive der Dimensionen des Hufbeins.....	29
Tabelle 7: Ergebnisvergleich des maximalen Abstandes A zwischen tiefstem und höchstem Punkt des Hufbeins in mm mit der gemessenen Differenz zwischen tiefstem Punkt der Hufbeinspitze und Hufbeinast auf den obliquen Aufnahmen in mm.....	31
Tabelle 8: Korrelation zwischen dem Validierungsstandard der dritten Messmethode und den Ergebnissen der Berechnungen des maximalen Abstandes A zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Hufbeins in mm (n=10).....	32