

Untersuchung der auf den Huf einwirkenden Druckkräfte und deren Beeinflussung durch verschiedene Bodenbeschaffenheiten

Michael Hüppler¹, Jenny Hagen¹, Florian Simon Häfner², Sandra Marion Geiger¹ und Daniela Mäder¹

¹ Veterinär-Anatomisches Institut der Veterinärmedizinischen Fakultät, Universität Leipzig

² Department of Research and Development, Werkman Horseshoe Factory, Groningen, Niederlande

Zusammenfassung: Erkrankungen des Hufes stellen beim Pferd eine stete Herausforderung dar. Ziel der vorliegenden Studie war die Untersuchung des Einflusses verschiedener Bodenbeschaffenheiten auf die dorsopalmare und mediolaterale Druckverteilung des Hufes. Der ausgeschnittene Huf der jeweils linken Vordergliedmaße von 25 Warmblutpferden wurde mithilfe eines folienbasierten Druckmesssystems auf unterschiedlichen Böden und im Schritt und Stand untersucht. Die hochflexiblen Sensoren wurden individuell der Hufform angepasst und mit Klebeband fixiert, nachfolgend wurden die Pferde in gerader Linie auf vier aufeinanderfolgenden Bahnen unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit (Beton, Gummi, harter Sand, weicher Sand) geführt und Daten über die vertikale Druckverteilung und den Fußungsablauf aufgezeichnet. Jeweils 6–7 stabile Schritte auf einer Bahn wurden in der darauffolgenden Auswertung der Daten zu einem Messbild gemittelt, um die dorsopalmare, sowie die mediolaterale Druckverteilung und die Wanderung des Kräfteschwerpunktes während der Stützphase zu untersuchen. Die insgesamt belastete Fläche des Hufes auf Betonboden war im Stand ($44,59 \text{ cm}^2 \pm 14,82 \text{ cm}^2$) signifikant geringer als im Schritt ($74,70 \text{ cm}^2 \pm 15,90 \text{ cm}^2$). Zudem zeigte sich im Stand die Hauptbelastung unter der Mitte des Hufes ($41,08\% \pm 16,93\%$), während im Schritt die Zehe im Vergleich etwas mehr Belastung erfuhr ($42,10\% \pm 5,57\%$). Druckspitzen im Bereich des Initialkontaktes mit dem Boden und des Abrollpunktes waren unter den Pferden unterschiedlich stark ausgeprägt. Gummiboden und harter Sand bewirkten kaum eine Änderung der dorsopalmaren Druckverteilung, der Druck der lateralen und medialen Hufhälfte glich sich zunehmend an. Auf weichem Sand verdoppelte sich die Belastungsfläche im Vergleich zu Beton und die Druckkräfte verteilten sich gleichmäßig, ohne Druckspitzen über den gesamten Huf. Die teils massiven Änderungen der Druckverteilung des Hufes auf weichem Sand verdeutlichen die wichtige Rolle unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten im Arbeitsalltag des Pferdes, aber auch in der Behandlung orthopädischer Patienten. Durch den Einsatz unterschiedlicher Böden können Strukturen und Bereiche des Hufes gezielt be- oder entlastet werden.

Schlüsselwörter: Pferd / Druckverteilung / Muster / Ganganalyse / Bodenbeschaffenheit / Fußung / Orthopädie

Examination of the pressure force distribution affecting the hoof and its influenceability by different ground properties

Diseases of the hoof are a constant challenge when working with horses. The aim of the apparent study was to examine the influence of different ground conditions on the dorsopalmar and mediolateral pressure force distribution of the hoof. Therefore, the trimmed hoof of the left forelimb of 25 warmblood horses was examined using a foil-based pressure measurement by TekScan™ on different grounds while standing and walking. The highly flexible sensors were cut to the individual shape of the hoof of each horse and fixed with tape. Thereafter, all horses were lead in a straight line on four tracks with different ground conditions (concrete, rubber, firm and deep sand) and data about the vertical pressure forces as well as the individual footing pattern were recorded. For the analysis of the data, 6–7 steady strides were averaged into one pressure image to evaluate the affecting dorsopalmar and mediolateral pressure forces and the migration of the centre of force during the stance phase. The mean loaded area of the hoof while standing on concrete ($44.59 \text{ cm}^2 \pm 14.82 \text{ cm}^2$) was significantly smaller compared to the values while walking ($74.70 \text{ cm}^2 \pm 15.90 \text{ cm}^2$). Furthermore, the main load while standing was situated beneath the middle of the hoof ($41.08\% \pm 16.93\%$), while in motion the toe was slightly more loaded ($42.10\% \pm 5.57\%$). The manifestation of pressure peaks beneath the area of initial contact with the ground and the point of break over varied distinctly between the different horses. Rubber and firm sand showed no significant changes in the dorsopalmar pressure force distribution, while the pressure affecting the lateral and medial half of the hoof progressively equalized. On deep sand, the loaded are was almost doubled compared to concrete and the pressure forces were distributed evenly across the whole solear surface of the hoof with no pressure peaks. Regarding the – in large parts – massive differences between the pressure force distribution pattern on deep sand, signify the important role of different ground properties in the everyday work of horses, but also in the treatment of orthopedical patients. By utilizing different ground conditions we can specifically relieve or load structures and areas of the hoof.

Keywords: horse / pressure force distribution / gait analysis / ground properties / footing / orthopedics

Zitation: Hüppler M., Hagen J., Häfner F. S., Geiger S. M., Mäder D. (2015) Untersuchung des auf den Huf einwirkenden Druckverteilungsmusters und dessen Beeinflussung durch verschiedene Bodenbeschaffenheiten. *Pferdeheilkunde* 31, 426-434

Korrespondenz: Michael Hüppler, Veterinär-Anatomisches Institut der Veterinärmedizinischen Fakultät, Universität Leipzig, 04103 Leipzig, An den Tierkliniken 43, E-Mail: michael-hueppler@web.de

Einleitung

Der Huf stellt das auf die dritte Zehe reduzierte Zehenorgan des Pferdes dar (König und Liebich 2015). Die Definition des Hufes umfasst damit im engeren Sinne lediglich den Hornschuh als modifizierte Epidermis. Im weiteren Sinne kann

der Huf aber auch als komplexer Zusammenschluss aus den modifizierten Anteilen der äußeren Haut – dem elastisch verformbaren Hornschuh – der speziell gestalteten Lederhaut und der teilweise nicht vorhandenen Unterhaut sowie den umschlossenen zentralen Stützteilen (Huf-, Kron- und Strahlbein) einschließlich der Hufknorpel bezeichnet werden (Budras

und Röck 1991). Die evolutionäre Reduktion der distalen Gliedmaße auf nur eine lastaufnehmende Zehe stellt hohe Anforderungen an die Funktionsfähigkeit und Belastungstoleranz des Hufes (König und Liebich 2015). Insbesondere die Vordergliedmaßen des zum schnellen Laufen fähigen Pferdes tragen ca. 60% des Gewichts, während die Hintergliedmaßen im Bewegungsprozess maßgeblich für den Vorschub sorgen (Williams 2001). Als Zehenspitzenläufer ist der Huf des Pferdes demnach massiven Belastungen ausgesetzt – bei einem durchschnittlichen Warmblutpferd von ca. 500 kg lasten ungefähr 150 kg auf jedem Vorderhuf. Rechnet man mit der in der Literatur angegebenen Last aufnehmenden, solearen Fläche des Hufes von 70 cm² lastet auf jedem cm² Hufhorn allein im Stand 2,1 kg des Körpergewichts (Williams 2001). Dabei wirkt das Körpergewicht des Tieres auf den Untergrund und wird gleichzeitig als Bodenreaktionskraft (Ground Reaction Force, GRF) an die Bodenkontaktfläche des Hufes zurückgegeben (Gustas et al. 2004). Die Interaktion zwischen Huf und Untergrund resultiert in den verschiedenen Abschnitten der Stützbeinphase in einer Steigerung der einwirkenden GRF. Insbesondere die vertikale Druckkraft ist eine der Hauptkomponenten der GRF, welche im Stand und in der Hauptstützphase auf den Huf einwirken und stark vom Gewicht des Tieres und der Bodenbeschaffenheit abhängen (Hobbs et al. 2013). Die auftretenden GRF führen zu einer elastischen Verformung der Hufkapsel, die durch ihre Architektur und Eigenschaften in der Lage ist entsprechende Kräfte zu kompensieren (Nickel 1938). Diese elastische Deformation des Hufes wird auch als Hufmechanismus bezeichnet (König und Liebich 2015). Nichts desto trotz können die GRF die Belastungstoleranz des Hufes übersteigen und zu Erkrankungen bzw. Schädigungen des Hufes und der Hufkapsel führen (Hinterhofer et al. 2000, Dyson et al. 2011). Es ist davon auszugehen, dass auf die Hornkapsel einwirkende Druckkräfte auch an die inneren Strukturen (Lederhaut, Hufrolle, Hufknorpel) weiter gegeben wird. Neben äußerlich sichtbaren Veränderungen an der Hufkapsel selbst, wie spannungsinduzierten Rissen und Hornspalten, oder Belastungsringen sowie Hämorrhagien, kann auch eine Schädigung innerer Strukturen durch zu starke Belastungen der Hornkapsel erfolgen (Bruhnke 1931). Die sensible Blutzirkulation des Hufes kann durch Überlastungen gestört werden, so dass Erkrankungen wie die Belastungsrehe oder lokale Quetschungen der Lederhaut auftreten können (Back und Clayton 2013a). Andererseits kann die Veränderung der einwirkenden GRF für das Management bereits Erkrankter Pferde von Vorteil sein (Laminitis, Podotrochlose).

Demnach spielt die Untersuchung der GRF eine große Rolle in vorangegangenen Studien (Merkens et al. 1988, 1993, Weishaupt et al. 2004, Back et al. 2007). Dabei kamen in der Vergangenheit unterschiedliche Systeme zum Einsatz. Zum einen wurden die GRF mit Hilfe von Systemen bestehend aus Kraftmessplatten erhoben oder es kamen Kraftmessschuhe zum Einsatz (Merkens et al. 1993, Weishaupt et al. 2002). Allerdings haben Druckmessplatten den Nachteil, dass sie nur stationäre Messungen zulassen und Messungen auf verschiedenen Untergründen nicht möglich sind. Zudem sind Analysen mehrerer aufeinander folgender Schritte nicht durchführbar (Savelberg et al. 1997, Back und Clayton 2013b). Diese Nachteile können zwar durch die Verwendung von Kraftmessschuhen ausgeglichen werden (Dohne et al. 1990), allerdings beeinflusst das hohe Gewicht das physiologische Gangbild und Fußungsmuster der Pferde. Zudem sind

diese Schuhe schwer an die Hufform der zu untersuchenden Tiere anzupassen (Back und Clayton 2013b). Daher bietet die Entwicklung von folienbasierten Druckmesssystemen einen enormen Fortschritt für die Untersuchung der auf die Hufkapsel einwirkenden vertikalen Druckkräfte. In der Vergangenheit wurde ein folienbasiertes Druckmesssystem (Tekscan®) zur Untersuchung der vertikalen Druckverteilung an Pferden genutzt (Reilly 2010, Lange 2011, Lange et al. 2012), welches es dank seiner hohen Flexibilität und einfachen, mobilen Anbringung erlaubt, auf unterschiedlichen Böden und unter praktischen Bedingungen Druckmessdaten zu erheben. Das Pferd kann sich über bis zu 30 m frei bewegen, ohne dass eine Störung des physiologischen Gangbildes zu erkennen ist.

Die erhobenen Daten auf festem Boden am Barhuf zeigen einen deutlichen Unterschied der mediolateralen Belastung im Stand und in der Bewegung. Zudem lässt die Verwendung verschiedener orthopädischer Beschläge, wie zum Beispiel das Eiereisen, Einflüsse auf das Druckverteilungsmuster erkennen. Eine Studie zur Überprüfung der Genauigkeit solcher Druckmesssysteme (Perino et al. 2007) ergab, dass in einigen Fällen zwar deutliche Messabweichungen in den Werten der Folienmesssysteme im Vergleich zu traditionellen Druckmessplatten auftreten können (9 bis zu 1200 N), insgesamt aber keine signifikanten Unterschiede der Ergebnisse auftreten. Ein entscheidender Faktor für die Genauigkeit und Verlässlichkeit dieser Systeme ist demnach, eine korrekte und sichere Positionierung der Sensoren an der Hufkapsel bzw. dem Hufeisen.

Neben der Verwendung von modifizierten Beschlägen (z.B. Herzeisen, Eiereisen, Breitschenkeleisen) kann das Druckverteilungsmuster auch durch die Bodenbeschaffenheit beeinflusst werden (Chateau et al. 2009). Pferde sind im Rahmen ihrer Nutzung und Haltung mit verschiedenartig beschaffenen Untergründen konfrontiert. Unterschiedliche Böden können die Belastung des Hufes und der distalen Gliedmaße auf verschiedene Weise beeinflussen (Burn et al. 2006, 2007, Gustas et al. 2007) und sich damit auch direkt auf die Leistung der Tiere auswirken (Kai et al. 1999, Ratzlaff et al. 2005, Burn et al. 2007, Thomason et al. 2008). Zudem ist das Wissen über die Einflüsse des Bodens auf die Belastung des Hufes auch von therapeutischem Interesse. Bei vielen orthopädischen Patienten empfiehlt sich während der Rekonvaleszenz-Periode das Einhalten von Boxenruhe (Scherer 2012). Die Beschaffenheit des Boxeneinstreus kann in dieser Phase von besonderer Bedeutung sein, da ein weicher, verformbarer Boden die Belastung und Druckverteilung am Huf höchst wahrscheinlich beeinflusst. Gerade bei Erkrankungen wie Hufrehe oder Podotrochlose kann die Therapie durch weiche Boxeneinstreu unterstützt werden (Scherer 2012). Ziel dieser Studie war es daher, mithilfe eines folienbasierten Druckmesssystems, den Einfluss unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten auf die Verteilung der auf die Hufkapsel einwirkenden vertikalen Druckkräfte zu erfassen und grundlegende Daten für die Zusammenarbeit zwischen Tierarzt, Hufbeschlagschmied und Besitzer für das Management des orthopädischen Patienten zu generieren.

Dabei sollten folgende Hypothesen überprüft werden:

- Auf hartem Untergrund beträgt die durchschnittliche lastaufnehmende Fläche des Hufes 70 cm².

- Die Belastungsfläche nimmt auf weichem Untergrund im Vergleich zu hartem Boden signifikant zu.
- Je weicher der Untergrund ist, desto gleichmäßiger ist die Verteilung der einwirkenden Druckkräfte, so dass Druckspitzen minimiert werden.
- Eine unterschiedliche Bodenbeschaffenheit wirkt sich signifikant auf die mediolaterale und dorsopalmar Druckverteilung aus.
- Die Verteilung der einwirkenden Druckkräfte zeigt Unterschiede beim Vergleich von Messungen im Stand und Schritt.

Material und Methoden

Tiere

Im Rahmen dieser Studie wurde jeweils der linke Vorderhuf von 25 Warmblutpferden aus einem Bestand untersucht (mittleres Alter: 8,6 (5–17) Jahre; mittlere Widerristhöhe: 1,56 m (1,40–1,72 m)). Die Pferde wurden vor allen Messungen durch einen Schmied beurteilt, sowie von zwei unabhängigen Tierärzten untersucht und für klinisch gesund befunden. Keines der Tiere wies vor den Messungen Lahmheiten oder ein abnormales Gangbild auf. Alle untersuchten Pferde zeigten außerdem eine gute Hornqualität und Hufgesundheit. 22 Pferde wiesen eine regelmäßige Hufform auf, die Ausnahme bildeten ein Tier mit einer steilen Hufwinkelung (Bockhuf) und zwei Tiere mit einem flachen Hufwinkel. Die Untersuchung der Zehenachse ergab, dass 6 der untersuchten Tiere eine gerade Ausrichtung aufwiesen, 14 Tiere zehenweit und 5 Tiere zeheneng gestellt waren.

Hufzubereitung

Um einen einheitlichen Pflegezustand der Hufe zu gewährleisten, wurden die Pferde unmittelbar vor dem Beginn der Untersuchungen ausgeschnitten. Die Zubereitung der Hufe erfolgte immer durch den gleichen zertifizierten Hufschmied und orientierte sich an der Fesselstandstheorie. Es wurde darauf geachtet, dass von dorsal und lateral betrachtet, die dorsale Hufwand entsprechend der Fesselachse ausgerichtet ist.

Druckmessungen

Alle Messungen wurden an der linken Vordergliedmaße jedes Pferdes durchgeführt. Für die Druckmessungen wurde ein

folienbasiertes Druckmesssystem der Firma TekScan™ verwendet. Die verwendeten Sensorfolien (Model #3200) haben eine Dicke von 0,15 mm, verstärkt durch 1 mm Schutzgummi. Die räumliche Auflösung beträgt vier Sensoren pro cm² und die Aufnahme Frequenz 500 Hz. Für jedes Pferd wurde ein eigener Sensor benutzt. Dieser wurde für jedes Pferd individuell passend für die unterschiedliche Hufform zugeschnitten und mithilfe von Klebeband an der Hufkapsel fixiert. Anschließend wurde der Sensor mit dem Datenabnehmer, welche durch Klettbänder lateral, auf Höhe des Fesselgelenks befestigt wurden, verbunden. Die Datenabnehmer waren ihrerseits durch Kabel mit dem Datenlogger verbunden, welcher hinter dem Widerrist mit einem Brustgurt befestigt war. Die Übertragung der Daten erfolgt kabellos an den entsprechenden Laptop. Durch die dünnen Messfolien und die kabellose Datenübertragung ist dieses System sehr schnell, einfach und sicher an den jeweiligen Hufen zu befestigen. Es wurde darauf geachtet, dass die Mitte der Sensoren mit der longitudinalen Mitte des Hufes (Linie durch die Strahlfurche, Strahlspitze, Marke an der Weißen Linie verlängert bis zur dorsalen Hufwand) übereinstimmen.

Nach einer kurzen Eingewöhnung von wenigen Metern, wurden die Pferde ohne Seitwärtsbewegungen des Kopfes auf vier direkt aufeinanderfolgenden Bahnen mit unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten im Schritt geführt. Zur Verfügung stand eine Betonbahn, die Strecke über eine Gummimatte sowie jeweils eine Bahn mit festem und tiefem Sand, welcher das maximale Einsinken des Hufes zuließ. Anschließend erfolgte eine Aufnahme über 10 s im Stand auf dem Betonboden. Alle Bahnen waren 30 m lang und die Messdauer auf einer Bahn betrug durchschnittlich 10 s. Die Konsistenz und Reproduzierbarkeit der ca. zehn aufgenommenen Schritte wurde vor Ort überprüft und bei Bedarf die Messungen wiederholt (Abbildung 1a). Demnach überstieg die gesamte Zeit der Untersuchung eines Pferdes kaum der Dauer von ein bis zwei Minuten – eine Zeitspanne bei der die Sensitivität des Sensors erhalten bleibt (Perino et al. 2007). Nach Beendigung einer Messung wurden alle Böden für den nächsten Durchlauf präpariert, um möglichst gleichmäßige Verhältnisse zu gewährleisten. Alle Messungen erfolgten unter möglichst gleichen Bedingungen.

Datenanalyse

Für die Auswertung der Daten des Druckmesssystems, wurde die zugehörige Software Hoofscan™ v.6.62 von TekScan genutzt. Die im Stand (10 s) ermittelten Werte wurden zu

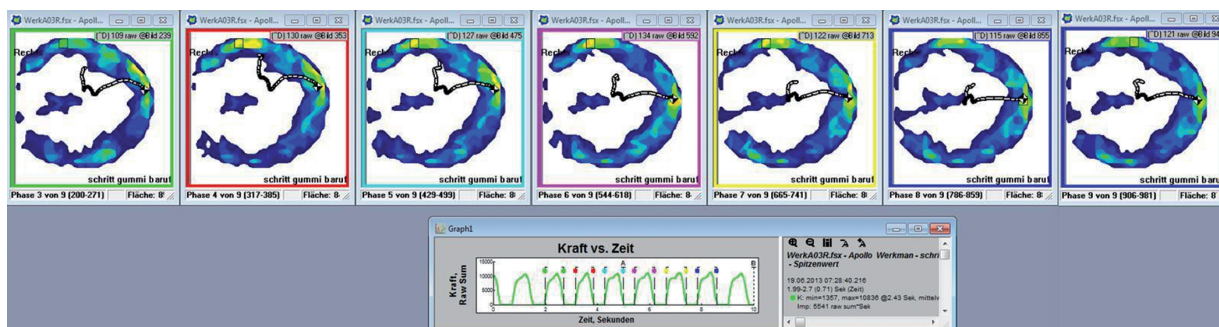


Abb. 1a Aufzeichnung sieben stabiler Schritte während einer Aufnahme auf der Gummimatte im Schritt über 10 s mit dem Tekscan®-System | Record of seven regular strides during the measurement on the rubber mat in walk over 10 s with the Tekscan® system.

einem Bild gemittelt. Zur weiteren Analyse, wurden für jede Messung im Schritt sechs bis sieben stabile Schritte ebenfalls zu einem Druckmessbild gemittelt. Dieses wurde, um eine Standardisierung der Auswertung zu gewährleisten anhand geometrischer Aspekte in verschiedene Zonen eingeteilt. Unabhängig von anatomischen Gegebenheiten wurden folgende Regionen an dem Druckmessbild definiert: Zehe ($\frac{1}{4}$), Mitte des Hufs ($\frac{1}{2}$), Trachten ($\frac{1}{4}$), lateral ($\frac{1}{2}$), medial ($\frac{1}{2}$) (Abbildung 1b). Für die entsprechenden Zonen wurde anschließend der prozentuale Anteil der einwirkenden Druckkräfte ermittelt. Daher werden in dieser Studie alle Druckmesswerte in Prozent angegeben, um das Verteilungsmuster zu charakterisieren. Anhand der Wanderung des Kräfteschwerpunktes in der Stützphase während der einzelnen Schritte, wurde zudem noch das individuelle Auffußen der Pferde charakterisiert (Abbildung 1c). Es wurde eine Einteilung in eine laterale, mediale, plane Fußung bzw. Trachten-

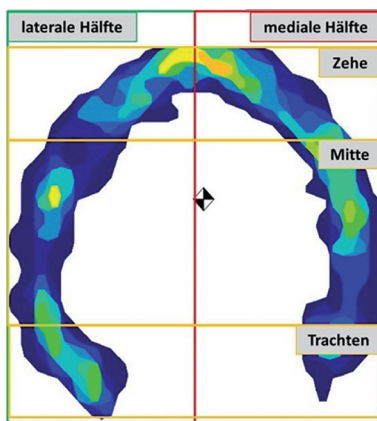


Abb. 1b Darstellung der Zonierung des gemittelten Druckmessbildes zur Evaluierung des Druckverteilungsmusters. Druckstärke farbcodiert: rot = stärkster Druck, dunkelblau = geringster Druck, dorsoplantare Druckverteilung ($\frac{1}{4}$ Zehe, $\frac{1}{2}$ Mitte des Hufes, $\frac{1}{4}$ Trachten) + mediolaterale Druckverteilung ($\frac{1}{2}$ medial, $\frac{1}{2}$ lateral)

Visualization of the zoning of the averaged pressure measurement image used for the evaluation of the pressure force distribution. Pressure forces colour coded: red = highest pressure forces, deep blue = lowest pressure forces, dorsoplantar pressure force distribution ($\frac{1}{4}$ toe, $\frac{1}{2}$ middle of the hoof, $\frac{1}{4}$ heels), mediolateral pressure force distribution pattern ($\frac{1}{2}$ medial, $\frac{1}{2}$ lateral)

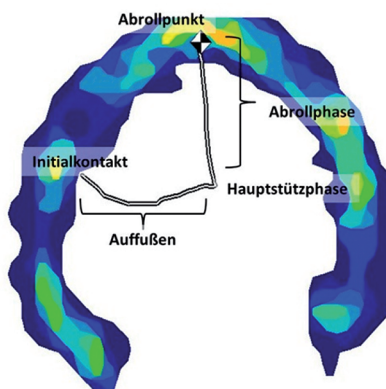


Abb. 1c Darstellung der Wanderung des Kräfteschwerpunktes während der Stützphase zur Beschreibung des Fußungsablaufes und Untersuchung der Lage des Initialkontaktes

Visualization of the migration of the center of force during the stance phase to describe the footing pattern and to examine the location of the initial contact.

und Zehenfußung vorgenommen, abhängig von der Lokalisation des Initialkontaktes des Hufes mit dem Boden zu Beginn des Auffußens.

Statistische Auswertung

Alle statistischen Auswertungen dieser Studie wurden mit dem Programm SigmaPlot™ Version 11 ausgeführt. Neben der deskriptiven Analyse der Daten, wurden die erhobenen Werte auf Normalverteilung geprüft (Shapiro-Wilk Test). Zur Berechnung der Signifikanz wurde dementsprechend der gepaarte T-Test verwendet. Die Kalkulation der Korrelationen wurde mit der Pearson Korrelation untersucht.

Ergebnisse

Die Ergebnisse aller in dieser Studie untersuchten Parameter auf den jeweiligen Böden, sind in Tabelle 1 und 2 zusammengefasst. Auf Betonboden betrug die gesamt belastete Fläche der Hufe im Stand $44,59 \pm 14,82 \text{ cm}^2$ und im Schritt $74,7 \text{ cm}^2 \pm 15,9 \text{ cm}^2$. Abgesehen von der belasteten Fläche des Hufes, wurde auch das Druckmessbild durch die Bewegung mitunter deutlich beeinflusst.

Während im Stand die Mitte des Hufes mit $41,08\% \pm 16,93\%$ die am stärksten beanspruchte Region des Hufes war, ließ sich im Schritt beobachten, dass die stärksten Druckkräfte unter der Zehe wirkten ($42,1\% \pm 5,57\%$ der Gesamtbelastung). Die Belastung der Mitte des Hufes nahm in Bewegung geringfügig ab ($40,68\% \pm 8,45\%$). Die Berechnung der Korrelationen zeigt, dass sowohl zwischen der Belastungsfläche im Stand und Schritt eine deutliche Korrelation besteht, als auch zwischen der Belastung von Zehe, Mitte des Hufes und den Trachten (Tabelle 1).

Auch in der mediolateralen Druckverteilung zeigen sich deutliche Unterschiede. Während sich im Stand ein relativ ausgeglichenes Verhältnis zwischen medialer ($45,46\% \pm 13,59\%$) und lateraler ($54,54\% \pm 13,59\%$) Hufhälfte beobachten lässt, zeigt sich in der Bewegung eine signifikante ($P = 0,025$) Zunahme der Belastung der lateralen Hufhälfte ($62,02\% \pm 8,46\%$) bzw. Abnahme der Belastung der medialen Hälfte ($37,98\% \pm 8,46\%$). Die Korrelationskoeffizienten dieser Parameter zeigen allerdings nur eine mäßige positive Korrelation zwischen Stand und Schritt ($R = 0,333$, $P = 0,1$).

Die Lokalisation der Druckspitzen zeigte auf hartem Boden abhängig vom Auffußen Unterschiede. Auf Betonboden waren deutliche Druckspitzen vorrangig in den Hufregionen, mit welchen das Pferd initialen Bodenkontakt zeigte und im Bereich des Abrollpunktes zu erkennen (Abbildung 2). Anhand der Wanderung des Kräfteschwerpunktes wurde zudem das Auffußen der Pferde evaluiert. Es zeigte sich dabei, dass 19 Tiere auf der lateralen Hufseite auffußen, 3 auf der medialen, eines der Pferde zeigte eine plane Fußung und jeweils ein Tier fußte mit den Trachten oder der Zehe auf.

Bei dem Vergleich des Druckverteilungsmusters auf den verschiedenen Böden zeigt sich Folgendes (Tabelle 2): Die Ergebnisse der Druckmessungen für den untersuchten Gummiboden und harten Sand zeigten nur geringe Veränderun-

gen im Vergleich zum Betonboden. Auf Gummi nahm die Belastungsfläche im Vergleich zu Beton um $4,5\text{ cm}^2 \pm 3,1\text{ cm}^2$ zu, die Belastung der Zehe stieg um $0,5\% \pm 3,2\%$, die der Trachten um $0,6\% \pm 2,4\%$. Im Bereich der Mitte des Hufes sank die Belastung minimal um $0,5\% \pm 3,8\%$. Die Belastung der lateralen Hufregionen sank um $4,5\% \pm 4,2\%$. Trotz der deutlichen Zunahme der Belastungsfläche auf hartem Sand von $22,4\text{ cm}^2 \pm 9,9\text{ cm}^2$ im Vergleich zu Betonboden, zeigte die dorsopalmare Druckverteilung keine entscheidenden Veränderungen. Die Belastung von Zehe, Mitte des Hufes und Trachten, blieb annähernd gleich (Zehe: $0,02\% \pm 4,4\%$, Mitte: $0,2\% \pm 5,1\%$, Trachten: $0,07\% \pm 3,8\%$). In der mediolateralen Ebene, sank die Belastung der lateralen Seite um $8,2\% \pm 6,6\%$.

Aufgrund der höheren Gesamtbelastungsfläche auf weichen Böden, welche eine gleichmäßigere Verteilung der Druckkräfte zulässt, zeigen die individuellen Druckspitzen der einzelnen Tiere eine weniger starke Ausprägung (Abbildung 3).

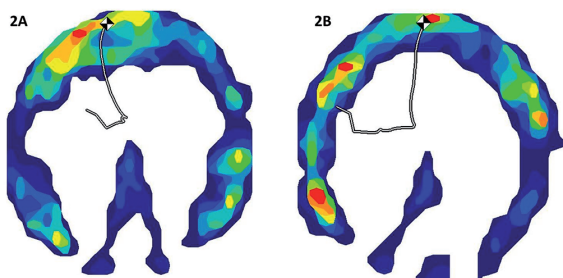


Abb. 2 Individuell unterschiedliche Ausprägung der Druckspitzen im Bereich des Initialkontaktes während des Auf Fußens und des Abrollpunktes / Individually different manifestation of pressure peaks in the area of the initial contact during landing and the point of break over.

Auf tiefem Sand konnten die deutlichsten Veränderungen der Druckmessungsparameter beobachtet werden. Die Belastungsfläche stieg hier im Vergleich zu Betonboden signifikant um $78,4\text{ cm}^2 \pm 22,0\text{ cm}^2$ an ($P < 0,001$), außerdem ließen sich sowohl in der dorsopalmaren, als auch in der mediolateralen Druckverteilung deutliche Effekte beobachten. Das Druckmessbild zeigt, dass auf diesem Boden zusätzlich die Sohlenfläche und der Strahl in die Belastung mit einbezogen werden, was eine gleichmäßigere Druckverteilung ohne Druckspitzen zur Folge hat. Während der Druck unter der Zehenregion und den Trachten signifikant abnimmt (Zehe: $16,7\% \pm 5,8\%$, Trachten: $4,8\% \pm 6,3\%$), steigt die

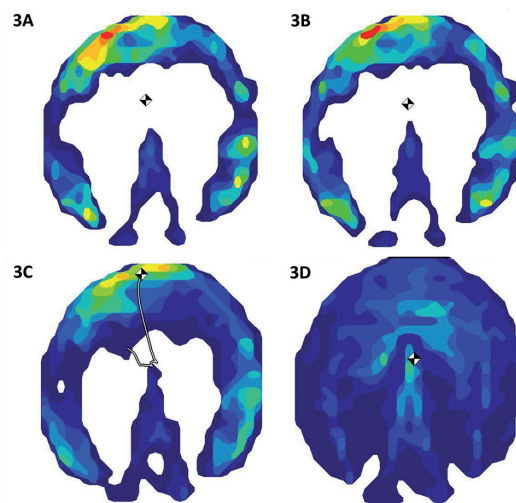


Abb. 3 Beispiel für die Änderungen des Druckmessbildes auf den unterschiedlichen untersuchten Böden. (A) Beton (B) Gummi (C) harter Sand (D) tiefer Sand | Example for the alterations of the pressure force distribution image on the different examined grounds. (A) concrete (B) rubber mat (C) firm sand (D) deep sand.

Tabelle 1 Auswertung der Druckmessdaten in Stand und Schritt auf Betonboden (Mittelwert \pm Standardabweichung). Alle P-Werte wurden für die Differenz zwischen Stand und Schritt ermittelt und als signifikant betrachtet wenn $P < 0,05$. | Evaluation of the pressure force distribution data gathered while standing and during walking on concrete (mean value \pm SD). P-values were calculated for the differences between stance and walk and considered significant if $P < 0,05$.

	Beton (Stand)	Beton (Schritt)	$P_{(\text{Stand:Schritt})}$	Korrelation (Stand:Schritt)
Belastungsfläche (cm ²)	44,59 \pm 14,82	74,70 \pm 15,90	$P < 0,001$	$R = 0,586$; $P = 0,002$
Belastung (%) Zehe	37,37 \pm 13,58	42,10 \pm 5,57	$P = 0,11$	$R = 0,644$; $P < 0,001$
Mitte des Hufes	41,08 \pm 16,93	40,68 \pm 8,45	$P = 0,944$	$R = 0,607$; $P = 0,001$
Trachten	17,78 \pm 8,81	16,36 \pm 5,79	$P = 0,499$	$R = 0,706$; $P < 0,001$
Medial	45,46 \pm 13,59	37,98 \pm 8,46	$P = 0,025$	$R = 0,333$; $P = 0,100$
Lateral	54,54 \pm 13,59	62,02 \pm 8,46	$P = 0,025$	$R = 0,333$; $P = 0,100$

Tabelle 2 Auswertung der Druckmessdaten auf den unterschiedlichen untersuchten Böden im Schritt (Mittelwert \pm Standardabweichung). Alle P-Werte wurden für die Differenz zwischen den Werten auf Betonboden und tiefem Sand ermittelt und als signifikant betrachtet wenn $P < 0,05$. | Evaluation of the pressure force distribution data on the different examined grounds (mean value \pm SD). P-values were calculated for the differences between the values of concrete and deep sand and considered significant if $P < 0,05$.

	Beton (Schritt)	Gummi (Schritt)	harter Sand (Schritt)	tiefer Sand (Schritt)	$P_{(\text{Beton:tiefer Sand})}$
Belastungsfläche (cm ²)	74,70 \pm 15,90	79,18 \pm 15,65	97,14 \pm 18,34	153,07 \pm 28,32	$P < 0,001$
Belastung (%) Zehe	42,10 \pm 5,57	42,64 \pm 5,80	42,13 \pm 5,08	25,36 \pm 4,40	$P < 0,001$
Mitte des Hufes	40,68 \pm 8,45	40,16 \pm 7,55	40,87 \pm 6,70	60,88 \pm 5,44	$P < 0,001$
Trachten	16,36 \pm 5,79	16,97 \pm 5,81	16,28 \pm 4,51	11,54 \pm 2,50	$P < 0,001$
Medial	37,98 \pm 8,46	42,46 \pm 7,05	46,16 \pm 8,02	49,38 \pm 7,81	$P < 0,001$
Lateral	62,02 \pm 8,46	57,54 \pm 7,05	53,84 \pm 8,02	50,62 \pm 7,81	$P < 0,001$

Belastung der Mitte des Hufes zu $(20,2\% \pm 9,0\%)$. Unter der lateralen Hufhälfte sinkt die Belastung signifikant um $11,4\% \pm 7,3\%$.

Diskussion

Studiendesign und Technik

Das verwendete Druckmesssystem der Firma Tekscan erwies sich für die Untersuchung der eingangs aufgeführten Hypothesen als sehr gut geeignet und praktikabel im Feld nutzbar. Das System ist ambulant vor Ort nutzbar und sehr leicht sowie schnell an das zu untersuchende Pferd anzubringen (Lange 2004). Dabei sind spätestens nach einer kurzen Eingewöhnungszeit von ein paar Schritten subjektiv keine Beeinträchtigungen des individuellen, physiologischen Gangbildes bzw. Fußungsmusters festzustellen. Nach eigenen Vorversuchen sind die Druckverteilung und das Fußungsmuster für jedes Pferd auch bei Mehrfachmessungen reproduzierbar nachzuvollziehen. Es muss lediglich eine genaue und standardisierte Fixierung der Sensoren am Huf gewährleistet sein (Perino et al. 2007, Reilly 2010). Zudem sollte das zu untersuchende Pferd mit Beginn der Messungen entspannt und gerade am lockeren Strick in gleichmäßigem Tempo geführt werden um eine regelmäßige Schrittfolge zu erhalten. Eine unmittelbare Kontrolle der Aufnahme auf Gleichmäßigkeit der Schrittfolge und des Fußungsmusters ist empfehlenswert. Sind deutliche Abweichung in der Schrittfolge, z.B. aufgrund von Straucheln oder Ablenkung des Tieres, zu erkennen, kann die Messung direkt unter gleichen Bedingungen wiederholt werden. Somit können die Daten aus mehreren aufeinanderfolgenden Schritten in die Auswertung einbezogen, und der Zufallscharakter der Messungen minimiert werden. Dies stellt einen enormen Vorteil gegenüber Kraftmessplatten basierten Systemen dar (Back und Clayton 2013a). Es ist hervorzuheben, dass die ausgewerteten Summationsbilder immer die Verteilung der einwirkenden vertikalen Druckkräfte während der gesamten Stützphase darstellen (Reilly 2010). Die Auswertung des Druckverteilungsmusters in den verschiedenen Fußungsphasen (Aufsetzen, Hauptstützphase und Abrollen) war nicht Gegenstand der aufgeführten Untersuchungen. Aufgrund der kurzen Messzeiträume war nicht mit einem Abfall der Sensitivität und Messgenauigkeit der Sensoren zu rechnen (Lange 2004). Zudem ermöglichte die flexible Beschaffenheit der Sensoren eine optimale Untersuchung auf weichem Untergrund – die Sohlenwölbung wurde auf weichem Untergrund ähnlich zu den realen Barhufbedingungen komplett ausgefüllt. Die dünnen Sensoren ließen somit die Messung der einwirkenden Druckkräfte auf weichem Boden realitätsnah zu.

Mit der Auswahl der Böden wurde eine Untersuchung von verschiedenen Untergründen angestrebt, mit denen die Pferde täglich konfrontiert werden und welche standardisiert vor den Messungen zu präparieren sind. Generell ist festzuhalten, dass die Bodenbeschaffenheit einen großen Einfluss auf die Wirkung kinetischer Effekte auf den Bewegungsapparat des Pferdes hat (Ratzlaff et al. 2005, Burn et al. 2006, 2007, Gustas et al. 2007, Kai et al. 1997). Insbesondere der Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst die vom Boden zurück gegebene Energie (GRF), den Aufprallwiderstand und die Kräfte ausgehend vom Pferd (Ratzlaff et al. 1997). Dies macht sich

insbesondere bei höheren Gangarten (Trab, Galopp) bemerkbar (Ratzlaff et al. 1997). Da in dieser Studie die Pferde mit gleichmäßiger Geschwindigkeit im Schritt auf den exakt gleichen Messstrecken unter sehr ähnlichen Bedingungen (überdachte Halle, gleiche Wetterverhältnisse,) geführt wurden, wird die Beeinflussung der Ergebnisse durch die von Ratzlaff et al. aufgeführten Fakten in dieser Studie als nicht maßgeblich angesehen.

Belastungsfläche und Druckverteilungsmuster

Der von Williams et al. dargelegte Wert von 70 cm^2 Belastungsfläche ließ sich auf Betonboden nur für die Messungen im Schritt nachvollziehen ($74,7\text{ cm}^2$). Mit $44,59\text{ cm}^2$ war die zur Lastaufnahme herangezogene Fläche des Hufes im Stand deutlich geringer. An dieser Stelle ist zu diskutieren, welche Anteile der Hufkapsel zur Lastaufnahme herangezogen werden. Nach König und Liebich (2015) werden zur Grundfläche der Hufkapsel folgende Bestandteile gezählt: Der Tragrand, welcher den entscheidenden Anteil der Fußungsfläche ausmacht und auf welchem im Wesentlichen das Körpergewicht ruht. Über die Weiße Linie wird die Hufplatte nach innen mit der konkav gewölbten Hornsohle verbunden und zwischen den Sohlenschenkeln befindet sich der Hornstrahl. Allerdings ist fest zu halten, dass die konkave Sohlenwölbung und die Größe des Strahls individuell verschieden ausgeprägt sind (Dyson et al. 2011). Somit werden Anteile der Sohle und des Strahls bei einzelnen Pferden unterschiedlich in die Belastung mit einbezogen, wodurch die individuelle Hufmorphologie maßgeblich Einfluss auf die Größe der lastaufnehmenden Fläche nimmt (Dyson et al. 2011). Bei Pferden mit einer optimalen Sohlenwölbung und einem Strahl der eventuell keinen Bodenkontakt hat, ist demnach im Stand nicht davon auszugehen, dass Werte von bis zu 70 cm^2 erreicht werden. In der Dynamik hingegen, kommt es zur Abflachung der Sohlenwölbung und zum Auseinanderweichen der Trachten (Hinterhofer et al. 2000, 2006, Dyson et al. 2013), so dass sich der Strahl absenkt und sich die Belastungsfläche deutlich vergrößert, was die dargestellten Ergebnisse belegen.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die dorsopalmare Druckverteilung (Zehe: Mitte: Trachten) im Gegensatz zur medio-lateralen Verteilung der einwirkenden Druckkräfte wenig Unterschiede zwischen der Untersuchung im Stand und im Schritt auf hartem Boden zeigt. Generell wirkt im Stand auf die Seitenwände die größte Druckbelastung ein, dicht gefolgt von der Zehe. Im Gegensatz dazu erfahren die Trachten die geringste Belastung. Es ist davon auszugehen, dass die Art der Hufzubereitung Einfluss auf Druckverteilungsmuster hat. In dieser Studie wurden alle Pferde entsprechend der Zehennachsentheorie (Gregory 2011) ausgeschnitten und auf eine plane Fußungsfläche ohne Zehenrichtung Wert gelegt. Die Ausgangssituation war demnach für alle Pferde bei allen Messungen gleich.

Im Schritt zeigte sich, dass auf die Zehe im Vergleich zum Stand etwas mehr Druckkräfte einwirkten, zudem waren deutliche Druckspitzen erkennbar. Diese Erkenntnisse sind vergleichbar mit früheren Ergebnissen anderer Gruppen (Savelberg et al. 1997, Gustas et al. 2004, Lange 2004, Weißhaupt et al. 2004), welche festhalten, dass die Zehenregion am häufigsten der stärksten Belastung unterliegt. Dies hat damit zu

zunehmend, dass die Zehe die Kraftübertragung auf den Boden in der Phase des Abstoßens während des Abrollvorgangs übernimmt (Williams 2001, Corbin 2004). Daher sind auf hartem Boden in diesem Bereich deutliche Druckspitzen zu erkennen. Der Zehenteil (Pars dorsalis) als schräg gestellte Außenwand der Hufplatte ist im Vergleich zum Seiten- und Trachtenteil des Hufes durch eine dicke und stabile Wandstärke gekennzeichnet, was hinsichtlich der Funktion der hohen Kraftübertragung auf den Boden und den entsprechend großen rückwirkenden Kräften biomechanisch sinnvoll erscheint (König und Liebich 2015). Des Weiteren nimmt im Schritt auch die Belastung der lateralen Hufhälfte im Vergleich zu den Messungen im Stand zu. Dies entspricht ebenfalls den Ergebnissen der Studie von Lange (2004), bei der festgestellt wurde, dass im Schritt der laterale Zehenquadrant und im Trab der laterale Trachtenquadrant am stärksten belastet werden, was wiederum maßgeblich durch die Fußungsart beeinflusst wird. Entsprechend anderer Studien (Corbin 2004, van Heel et al. 2005, 2006) traten mehr oder weniger unabhängig vom Körperbau weitaus häufiger laterale Fußungen als plane bzw. mediale Fußungen auf. Dies bewirkt eine stärkere Belastung der lateralen Hufhälfte im Schritt. Ferner wurde festgestellt (Corbin 2004), dass die Führung der Gliedmaße einen wesentlich entscheidenderen Einfluss auf das Fußungsmuster hat, als beispielsweise die Hufkonformation oder die Gliedmaßenstellung.

Einfluss der Bodenbeschaffenheit

Der Vergleich der Druckmesswerte im Bezug zu den Messungen auf den verschiedenen Böden zeigt eine signifikante Zunahme der Belastungsfläche je mehr ein Einsinken in den Boden möglich ist. Je tiefer der Huf in den Untergrund eindringen kann, desto mehr wird die Sohlenwölbung ausgefüllt und desto größer ist die lastaufnehmende Fläche. Zudem geht die Zunahme der Belastungsfläche mit einer gleichmäßigeren Druckverteilung einher, bis auf Sandboden keine Druckspitzen mehr erkennbar sind. Grundlegend hat die Größe der Belastungsfläche Einfluss auf die einwirkenden Druckkräfte, da vereinfacht Druck als Ergebnis einer auf eine Fläche Einwirkende Kraft definiert werden kann ($p = F_n/A$). Das bedeutet, dass sich der einwirkende Druck indirekt proportional zur Größe der belasteten Fläche verhält. Bei gleichbleibender einwirkender Kraft nimmt der Druck demnach bei zunehmender Fläche ab. Allerdings zeigt der Vergleich der Untersuchungen zwischen Betonboden, Gummimatte und hartem Sand keinen signifikanten Einfluss auf das dorsopalmare Druckverteilungsmuster. Die Belastungsverhältnisse bleiben annähernd gleich und die Zehe ist der stärksten Druckbelastung ausgesetzt. Lediglich auf weichem Sand, der das maximale Einsinken des Hufes zulässt, zeigt sich eine deutliche Steigerung der Belastung der Hufmitte, da nun das Sohlengewölbe komplett ausgefüllt ist und der gesamte Sohlenbereich sowie der Strahl mit in die Belastung einbezogen werden.

Ein deutlicher Effekt ist weiterhin auf die mediolaterale Druckverteilung erkennbar. Je mehr das Eindringen in den Boden möglich ist, desto stärker gleicht sich die Verteilung der Druckkräfte zwischen medialer und lateraler Hufhälfte an. Auf weichem Sand ist die Verteilung mit 50,62% Belastung lateral und 49,38% medial nahezu ausgeglichen. Das liegt höchstwahrscheinlich daran, dass auf weichem Boden die entsprechend des Körperbaus und der Gliedmaßenstellung stärker

belastete Hufseite vermehrt in den Boden einsinken kann. Einseitige Druckspitzen werden so deutlich minimiert.

Fazit

Es lässt sich anhand der Ergebnisse zusammenfassen, dass auf weichem Sand, stellvertretend für Untergründe, auf denen ein maximales Einsinken möglich ist, im Vergleich zu den Untersuchungen auf Betonboden weniger Druckspitzen auftreten. Insbesondere auf die Zehenregion wirken weniger Druckkräfte ein, während die Hufmitte signifikant mehr belastet wird und die mediolaterale Druckverteilung weitestgehend ausgeglichen ist. Diese Fakten unterstreichen die Bedeutung der unterschiedlichen Untergrundbeschaffenheit im Management von orthopädischen Patienten, welche von Huferkrankungen betroffenen sind (Kübber et al. 1994, Back und Clayton 2013a). Wie eingangs erwähnt empfiehlt sich insbesondere bei schmerzhaften Zuständen, wie z.B. bei der Hufrehe, hgr. Podotrochlose oder Hufgeschwüren, eine möglichst gleichmäßige Verteilung der einwirkenden Druckkräfte auf eine möglichst große Fläche. Sand- und Grasböden oder ein tiefes Polster aus Sägespänen in der Box sind bei diesen orthopädischen Patienten zur Schmerzlinderung vorzuziehen.

Tierschutzklärung

Keiner der mitwirkenden Autoren stand mit der vorliegenden Studie in einem Interessenkonflikt. Die Studie wurde vom Ethik Komitee des sächsischen Staates als Tierversuch anerkannt (Landesdirektion Sachsen, Büro Leipzig, 15-102/12).

Erklärung zum Interessenskonflikt

Die Autoren erklären, hinsichtlich der erwähnten technischen Ausstattung keinen Interessenskonflikten zu unterliegen.

Literatur

- Back W., Clayton H. (2013a) Equine Locomotion. Herausgegeben von Back W., Clayton H., Saunders- Elsevier Verlag, St. Louis, zweite Auflage, 158-161
- Back W., Clayton H. (2013b) Equine Locomotion. Herausgegeben von Back W., Clayton H., Saunders- Elsevier Verlag, St. Louis, zweite Auflage, 45-46
- Bruhnke J. (1931) Morphologische Untersuchungen des Wandhornes und der Wandlederhaut einiger pathologischer Hufe. Dtsch. Tierärztl. Wschr. 39, 433-438
- Budras K.D., Röck S. (1991) Atlas der Anatomie des Pferdes- Lehrbuch für Tierärzte und Studierende. Herausgegeben von Budras K.D., Röck S., Schlütersche Verlagsanstalt und Druckerei GmbH & Co, Hannover, 1. Auflage, 23-24
- Burn J. F. (2006) Time domain characteristics of hoof-ground interaction at the onset of stance phase. Equine Vet J 38, 657-663
- Burn J. F., Usmar S. J. (2007) Hoof landing velocity is related to track surface properties in trotting horses. Equine. Comp. Exercise Physiol. 2, 37-41
- Chateau H., Robin D., Simonelli T., Pacquet L., Pourcelot P., Falala S., Denoix J. M., Crevier-Denoix N. (2009) Design and validation of a dynamometric horseshoe for the measurement of three-dimensional ground reaction force on a moving horse. J. Biomech. 42, 336-340

- Corbin I. (2004) Kinematische Analyse des Bewegungsablaufes bei Pferden mit Gliedmaßenfehlstellungen und deren Behandlung durch Beschlagskorrekturen. Diss. Med. Vet. Hannover
- Dohne W., Werner K. H., Hertsch B., Dallmer H., Wöhrmann H. (1990) Vorstellung eines neuartigen Meßsystems zur dynamographischen Untersuchung der Bewegung des Pferde. *Pferdeheilkunde* 6, 265-271
- Dyson S. J., Tranquille C. A., Collins S. N., Parkin T. D., Murray R. C. (2011) External characteristics of the lateral aspect of the hoof differ between non-lame and lame horses. *Vet. J.* 190, 364-371
- Gregory C. (2011) *Gregory's Textbook of Farriery*. Herausgegeben von Gregory C., Heartland Horseshoeing School, Inc. Lamar, Missouri, erste Auflage, 218-229
- Gustas P., Johnston C., Roepstorff L., Drevemo S., Lanshammar H. (2004) Relationships between fore- and hindlimb ground reaction force and hoof deceleration patterns in trotting horses. *Equine Vet. J.* 36, 737-742
- Gustas P., Johnston C., Drevemo S. (2007) Ground reaction force and hoof deceleration patterns on two different surfaces at the trot. *Equine Comp. Exercise Physiol.* 3, 209-216
- Hinterhofer C., Stanek C., Haider H. (2000) The effect of flat horseshoes, raised heels and lowered heels on the biomechanics of the equine hoof assessed by finite element analysis (FEA). *J. Vet. Med. A Physiol. Pathol. Clin. Med.* 47, 73-82
- Hinterhofer C., Weibacher N., Buchner H. H. F., Peham C., Stanek C. (2006) Motion analysis of hoof wall, sole and frog under cyclic load in vitro: Deformation of the equine hoof shod with regular horse shoe, straight bar shoe and bare hoof. *Pferdeheilkunde* 22, 314-319
- Hobbs S. J., Clayton H. M. (2013) Sagittal plane ground reaction forces, centre of pressure and centre of mass in trotting horses. *Vet. J.* 198, 14-19
- Kai M., Takahashi T., Aoki O., Oki H. (1999) Influence of rough track surfaces on components of vertical forces in cantering thoroughbred horses. *Equine Vet. J.* 30 (Suppl.), 214-217
- Kübber P., Kastner J., Girtler D., Knezevic P. J. (1994) Erkenntnisse über den Einfluss der tiefen Palmarneranästhesie auf das Gangbild des lahmheitsfreien Pferdes mit Hilfe einer kinematischen Meßmethode. *Pferdeheilkunde* 10, 11-21
- Lange C. (2011) Die Überprüfung eines Hufdruckmesssystems in Kombination mit dreidimensionalen Hochfrequenzvideoaufnahmen zur Bewegungsanalyse beim Pferd. Diss. Med. Vet. Hannover
- Lange C., Kattelans A., Rohn K., Lüpke M., Brückner H. P., Stadler P. (2012) Die kinetische Untersuchung der Fußung, der Belastung des Hufes und des Abrollvorganges an den Vordergliedmaßen von Pferden im Schritt und im Trab auf dem Laufband mit dem HoofTM-System (Tekscan®). *Pferdeheilkunde* 28, 538-547
- Liebich H. G., Maierl J., König H. E. (2015) *Anatomie der Haussäugetiere – Lehrbuch und Farbatlas für Studium und Praxis*. Herausgegeben von König H.E., Liebich H.G., Schattauer GmbH, Stuttgart, 6. Auflage, 163-168
- Merkens H. W., Schamhardt H. C. (1988) The use of horse (INDEX), a method of analyzing the ground reaction force patterns of lame and normal gaited horses at the walk. *Equine Vet. J.* 25, 134-137
- Merkens H. W., Schamhardt H. C., van Osch G. J. V. M. (1993) Ground reaction force patterns of dutch warmbloods at canter. *Am. J. Vet. Res.* 54, 670-674
- Nickel R. (1938) Über den Bau der Hufhörchen und seine Bedeutung für den Mechanismus des Pferdehufes. *Habil. Med. Vet. Hannover*
- Perino V. V., Kawcak C. E., Frisbie D. D., Reiser R. F., McIlwraith C. W. (2007) The Accuracy and Precision of an Equine In-Shoe Pressure Measurement System as a Tool for Gait Analysis. *J. Equine Vet. Sci.* 27, 161-166
- Ratzlaff M. H., Hyde M. L., Hutton D. V., Rathgeber R. A., Balch O. K. (1997) Interrelationships between moisture content of the track, dynamic properties of the track and the locomotor forces exerted by galloping horses. *J. Equine Vet. Sci.* 17, 35-42
- Ratzlaff M. H., Wilson P. D., Hutton D. V., Slinker B. K. (2005) Relationships between hoof-acceleration patterns of galloping horses and dynamic properties of the track. *Am. J. Vet. Res.* 66, 589-595
- Reilly P. T. (2010) In-Shoe Force Measurements and Hoff Balance. *J. Equine Vet. Sci.* 30, 475-478
- Scherer M. (2012) Orthopädischer Beschlag bei Bewegungsstörungen. *Der Huf- Lehrbuch des Hufbeschlages*. Herausgegeben von Litzke L.F., Rau B., Enke Verlag, Stuttgart, 6. Auflage, 241-248
- Thomason J. J., Peterson M. L. (2008) Biomechanical and mechanical investigations of the hoof-track interface in racing horses. *Vet. Clin. North Am. Equine Pract.* 24, 53-77
- Van Heel M. C., Moleman M., Barneveld A., Van Weeren P. R., Back W. (2005) Changes in location of centre of pressure and hoof-unrollment pattern in relation to an 8-week shoeing interval in the horse. *Equine Vet. J.* 37, 536-540
- Van Heel M. C., Van Weeren P. R., Back W. (2005) Shoeing sound warmblood horses with a rolled toe optimises hoof-unrollment and lowers peak loading during breakover. *Equine Vet. J.* 38, 258-262
- Weishaupt M. A., Hogg H. P., Wiestner T., Denoth J., Stüssie E., Auer J. A. (2002) Instrumented Treadmill for measuring ground reaction forces in horses. *Am. J. Vet. Res.* 63, 520-527
- Weishaupt M. A., Wiestner T., Hogg H. P., Jordan P., Auer J. A. (2004) Vertical ground reaction force-time histories of sound warmblood horses trotting on a treadmill. *Vet. J.* 168, 304-311
- Williams G. E. (2001) Locomotor characteristics of horses with navicular disease. *Am. J. Vet. Res.* 62, 206-210