

Zur Biomechanik der Hintergliedmaße beim Pferd - Einfluss der Anhebung der Trachten auf das Sprunggelenk

Dietrich Girtler, Christian Peham und Christian Kicker

Klinik für Orthopädie bei Huf- und Klautentieren, Veterinärmedizinische Universität Wien

Zusammenfassung

Nach allgemeinen Bemerkungen zur Biomechanik der Hinterextremität wird im Speziellen auf das Sprunggelenk eingegangen. Es sollte untersucht werden, ob die Anhebung der Trachten am Hinterhuf einen Einfluss auf den Winkel des Sprunggelenkes in der Stützbeinphase ausübt. Bei 6 Pferden wurde mit einer kinematischen Messmethode der Bewegungswinkel des Sprunggelenkes auf dem Laufband im Trab untersucht. Die Messungen erfolgten sowohl ohne Keil als auch bei einer Erhöhung der Trachten durch Holzkeile von 8 und 16 Grad. Durch die Keile kam es jeweils zu einer signifikanten Zunahme der Beugung des Sprunggelenkes. Die stärkste Beugung trat jeweils bei 20% und bei 30% der Bewegungszyklusdauer auf.

Schlüsselwörter: Biomechanik, Kinematik, Pferd, Sprunggelenk, Gelenkwinkel, Trachtenanhebung, Hufkeile, Hufbeschlagnagel

Biomechanics of the hind limb in the horse - influence of elevation of the heels on the tarsal joint

After general introductory notes on the biomechanics of the hind limb, the paper focuses on the tarsal joint. It was checked whether elevation of the heels influenced the joint angle during the stance phase. Six horses were examined with a kinematic measuring system trotting on the treadmill. Measurements of the tarsal joint angle were taken without a wedge elevating the heels and with wedges of 8 and 16 degrees, respectively. The tarsal joint angle was significantly more flexed after application of the different wedges, the most significant alteration of the joint angle occurring at 20 % and 30 % of the stride duration.

Keywords: biomechanics, kinematic, horse, tarsal joint, joint angle, heel elevation, heel wedge, horse shoeing

Einleitung

Der Antrieb zur Fortbewegung geht von den Hintergliedmaßen aus. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, müssen diese anders konstruiert sein als die Vorderextremitäten. Die Hinterextremitäten an sich sind länger, die Hebelarme sind länger, die Bemuskulung ist stärker, das Streckvermögen ist größer. Das Hüftgelenk stellt, im Gegensatz zum Schulterblatt, eine festere Verbindung mit dem Rumpf dar und ermöglicht eine leichte Übertragung der Kraft von den Extremitäten auf den Rumpf. Da die Schwerpunktsachse der Gliedmaße nahe dem Drehpunkt des Hüftgelenkes liegt, sind kaum Kräfte erforderlich, das statische Gleichgewicht aufrecht zu erhalten. Beim Stehen wird die Hinterextremität durch die Spannung von Muskeln und Sehnen festgestellt, die einzelnen Gelenke nehmen einen bestimmten Winkel (Standwinkel) ein.

In der Bewegung kann die Extremität mit einem Pendel verglichen werden, wobei sich der Drehpunkt im Hüftgelenk befindet. Die einzelnen Gelenke werden in der ersten Hälfte der Stützbeinphase durch Aufnahme der Last gebeugt (Stützen), um sich in der zweiten Hälfte zu strecken (Stemmen, Vorschieben des Rumpfes); in der ersten Hälfte der Hangbeinphase erfolgt sodann die Beugung dieser Gelenke (Abheben), um sich in der zweiten Hälfte wieder zu strecken (Vorschwingen). Eine Ausnahme stellt das Fesselgelenk dar, wel-

ches während der ganzen Stützbeinphase mehr oder weniger gestreckt ist (maximale Hyperextension in der Mitte der Stützbeinphase).

Der M. quadriceps femoris mit der Patella ist Streck- und Feststeller des Kniegelenkes in der Stützbeinphase und führt die freie Extremität nach vorne. Die wichtigste Rolle bei der Streckung und Feststellung des Kniegelenkes spielen die drei Hinterbackenmuskeln (M. biceps femoris, M. semitendinosus, M. semimembranosus). Sie werden als „engines“ des Pferdes angesehen und erfüllen zwei verschiedene Aufgaben. In der Stützbeinphase wird das Kniegelenk durch jene Anteile, die cranial des Drehpunktes ansetzen, gestreckt, um den Rumpf nach vorne zu schieben. In der Hangbeinphase bewirken die distal ansetzenden Anteile eine Beugung des Kniegelenkes (Schamhardt et al. 1991).

In der Bewegung wirken die Sehnen wie elastische Federn. Die gespeicherte Energie wird während der zweiten Hälfte der Stützbeinphase frei; es kommt zum Abstoßen der Extremität und zur Beugung der Gelenke in der ersten Hälfte der Hangbeinphase.

Der Vorführbogen des Hinterhufes weist einen Verlauf mit unterschiedlichen Höhepunkten im ersten und im dritten Drittel des Bewegungszyklus auf. Die deutlich ausgeprägte Ein-

sattelung steht im Zusammenhang mit der Rotation des Beckens um eine sagittale Achse in Richtung des Hangbeines. Der Vorführbogen der Vorderextremität erreicht seinen höchsten Punkt immer im ersten Drittel des Bewegungszyklus (Girtler et al. 1995). Der Umfang der Winkeländerung der einzelnen Gelenke in der Bewegung (Bewegungswinkel) hängt von der Gangart und von der Ganggeschwindigkeit ab.

Sprunggelenk

Im Unterschied zum Karpalgelenk, welches in der Stützbeinphase einen gestreckten Winkel einnimmt (ca. 180°), bildet das Tarsalgelenk einen nach vorne offenen Winkel (ca. 150°). Das Talokruralgelenk ist ein vollkommenes und federndes Wechselgelenk (Schnappgelenk). Die Bewegungen des Sprung- und Kniegelenkes sind über den sehnigen M. fibularis tertius und über den sehnigen M. flexor digitalis pedis superficialis gekoppelt, es besteht eine wechselseitige Abhängigkeit. Diese beiden sehnigen Muskeln mit ihrer passiven Funktion bilden die Spannsägekonstruktion (Kainer 1989; van Weeren et al. 1990).

Die oberflächliche Beugesehne hat eine Zwischenanheftung am Fersenbeinhöcker; sie überbrückt Kniegelenk, Sprunggelenk, Fesselgelenk und Krongelenk (die oberflächliche Beugesehne hat kein Unterstützungsband). Die Beugung des Sprunggelenkes erfolgt direkt durch den aktiven Muskelzug des M. tibialis cranialis sowie indirekt bei gebeugtem Kniegelenk durch die passive Zugwirkung des M. fibularis tertius.

Die Streckung des Sprunggelenkes erfolgt direkt durch aktiven Muskelzug des M. gastrocnemius, des M. popliteus, des M. biceps femoris und des M. semitendinosus sowie indirekt bei gestrecktem Kniegelenk durch den passiven Zug des M. flexor digitalis pedis superficialis (Ellenberger und Baum 1932).

Während des passiven Stehens ist der M. fibularis tertius nicht belastet. Schamhardt et al. (1985) stellten fest, dass die experimentelle Durchtrennung des M. fibularis tertius keinen Einfluss auf die Funktion der wechselseitigen Abhängigkeit hat, Wentink (1978) beschreibt eine geringgradige Überstreckung des Sprunggelenkes am Ende der Stützbeinphase und weniger Beugung in der Hangbeinphase. Dieses Ergebnis deckt sich mit der eigenen klinischen Erfahrung bei der Beurteilung von Pferden nach Ruptur des M. fibularis tertius.

Der Bewegungsumfang (Winkelbereich zwischen maximaler Beugung und Streckung) des Sprunggelenkes wird von Back et al. (1996) aufgrund von kinematischen Messungen für eine Gruppe von Pferden bei Bewegung auf dem Laufband im Schritt bei einer Geschwindigkeit von 1.6m/s mit ca. 36° angegeben. Im Trab beträgt der Winkelumfang bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s ca. 55°. Bei Bewegung im Trab kommt es in der ersten Hälfte der Stützbeinphase zu einer Beugung von ca. 8°, um gegen Ende der Stützbeinphase eine maximale Streckung von ca. 6° zu erfahren. Der Winkelbereich in der Stützbeinphase beträgt somit ca. 14°. Eine Erklärung dafür, dass sich das Sprunggelenk stets schneller beugt und streckt als das Kniegelenk und sich dabei um einen größeren Winkel bewegt, sieht Krüger (1938) darin, dass die Sehnenzüge der Spannsägekonstruktion am Kniegelenk näher der Gelenkachse inserieren als am Sprunggelenk.

Einfluss der Anhebung der Trachten auf das Sprunggelenk

Spatbeschlag

Bei der degenerativen Erkrankung der drei distalen Abteilungen des Tarsalgelenkes (Spat) fußt das Pferd auf der Hufspitze. Es versucht auf diese Weise, sich dem Schmerz zu entziehen, der beim „Durchtreten“ infolge der Streckung des Sprunggelenkes in der Stützbeinphase auftritt. Der Huf wird durch das Anwachsen der Trachten stumpfer. Um die Fußung zu erleichtern, wird der Spatbeschlag angeraten. Stashak (1989) empfiehlt ein Hufeisen mit Schenkeln, die zur Bodenfläche hin umgebogen sind und nach vorne keilförmig auslaufen. Dietz et al. (1999) empfehlen ein Hufeisen mit Zehenrichtung und erhöhten Schenkeln.

Fragestellung

Kinematische Untersuchungen an der Vorderextremität beleuchten zwar die vermehrte Flexion des Hufgelenkes bei Anhebung der Trachten mit Hilfe von Keileisen (Willemsen et al. 1999) oder mit Hilfe von Holzkeilen (Girtler und Peham 2000), allerdings wird auch berichtet, dass diese Erhöhung keinen Einfluss auf den Winkel des Fesselgelenkes ausübt (Clayton et al. 2000). Entsprechende kinematische Studien an der Hinterextremität konnten in der zugänglichen Literatur nicht gefunden werden. Es interessiert die Fragestellung, ob die Anhebung der Trachten am Hinterhuf überhaupt einen Einfluss auf den Winkel des Sprunggelenkes in der Stützbeinphase ausübt. Die klinische Erfahrung zeigt, dass der Spatbeschlag dem Pferd die Fußung erleichtert.

Material und Methode

Für die Untersuchung wurden 6 Pferde der Veterinärmedizinischen Universität herangezogen. Beim Vorführen waren sämtliche Pferde lahmheitsfrei. Die Untersuchung wurde auf dem Laufband MUSTANG 2200 der Fa. Kagra AG (Fahrwangen/Schweiz) bei horizontalen Bodenverhältnissen durchgeführt. Um ein konstantes Bewegungsmuster zu erreichen, mussten die Pferde an das Laufband gewöhnt werden. Zum Einsatz kam das EXPERTVISION SYSTEM der Motion Analysis Corporation (Santa Rosa, Ca, USA) mit 6 Kameras (Messfrequenz 120 Hz). Für jedes Pferd wurde vor der ersten Messung die individuelle rhythmische Trabgeschwindigkeit bestimmt, diese Geschwindigkeit wurde dann bei den folgenden Messungen beibehalten.

Es wurden 4 Hartholzkeile verwendet; jeder Keil hatte einen Steigungswinkel von 8°, war 14 cm lang und 2 cm hoch. An jedem Hinterhuf wurden jeweils zwei 8° Keile mit Selbstklebeband unter Hochstellung der Trachten befestigt, nachdem diese beiden Keile zuvor durch 3 Holzschrauben zu einem Doppelkeil von 16° fixiert worden waren. Die rechte Hinterextremität wurde mit sphärischen Reflektoren (Durchmesser 2.5 cm) dorsal am Rohrbein oberhalb des Fesselgelenkes und unterhalb des Tarsalgelenkes sowie kranial am Unterschenkel oberhalb des Tarsalgelenkes und unterhalb des Kniegelenkes markiert.

Im speziellen wurde der dorsale Winkelbereich des Sprunggelenkes (Beugewinkel) während der Stützbeinphase im Trab untersucht (siehe Abb. 1).

Pro Pferd erfolgten 3 Messungen. Die Messdauer pro Messung betrug 30 Sekunden, während dieser Zeit wurden mindestens 20 Bewegungszyklen aufgezeichnet. Die erste Messung erfolgte mit dem Doppelkeil (16 °); die zweite Messung erfolgte mit dem einfachen Keil (8 °), die dritte Messung erfolgte ohne Keil. Mit dieser Versuchsanordnung war es möglich, alle Messungen durchzuführen, ohne die Markierungspunkte zu verändern, sodass die erhaltenen Winkelwerte zwar relativ, deren Unterschiede aber absolut sind.

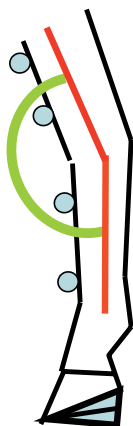


Abb 1 Schematische Darstellung der freien Hinterextremität mit den reflektierenden Messstellen am Rohrbein und Unterschenkel und den beiden Keilen von jeweils 8°; aus den durch die Verbindung der Kugelmittelpunkte entstandenen Vektoren wurde der Beugewinkel des Sprunggelenkes berechnet.
Simplified line drawing of the free hind limb with reflecting measurement points on the cannon and shin bones also showing the two wedges of 8 degrees each; the flexion angle of the tarsal joint was calculated with the help of vectors resulting from connecting the centres of the reflecting spheroids.

Die Daten wurden mittels Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung geprüft. Die Unterschiede in den Ergebnissen der einzelnen Pferde, gemessen mit Doppelkeil, einfachem Keil und ohne Keil wurden statistisch mit Hilfe einer einfaktorischen Varianzanalyse und des Zweistichproben t-Tests bei abhängigen Stichproben (Paarvergleichstest) bei 15% , bei 20%, bei 30 % und bei 40% der Dauer des Bewegungszyklus untersucht (die Stützbeinphase macht ca. 40% der Dauer des Bewegungszyklus aus). Als signifikant wurden Werte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $p < 0.01$ angesehen.

Ergebnisse

Bei Bewegung des Pferdes ohne Keil und bei zunehmender Erhöhung der Trachten mit einfachem Keil (8°) und mit Doppelkeil (16°) kam es zu Beginn der Stützbeinphase jeweils zu einer Abnahme der Streckung bzw. zu einer Zunahme der Beugung des Sprunggelenkes (Verkleinerung des dorsalen Winkels). Die stärkste Beugung während der Stützbeinphase tritt jeweils bei 20 % der Dauer des Bewegungszyklus auf, dies entspricht der Mitte der Stützbeinphase.

BWZ-Dauer [%]	15 %	20 %	30 %	40 %
Winkel Sprungg. [°] Ohne Keil	141° (s = 2)	140° (s = 2)	144° (s = 2)	155° (s = 2)
Winkel Sprungg. [°] Einfacher Keil	139° (s = 4)	136° (s = 3)	140° (s = 4)	154° (s = 3)
Winkel Sprungg. [°] Doppelter Keil	138° (s = 4)	133° (s = 4)	137° (s = 3)	153° (s = 3)

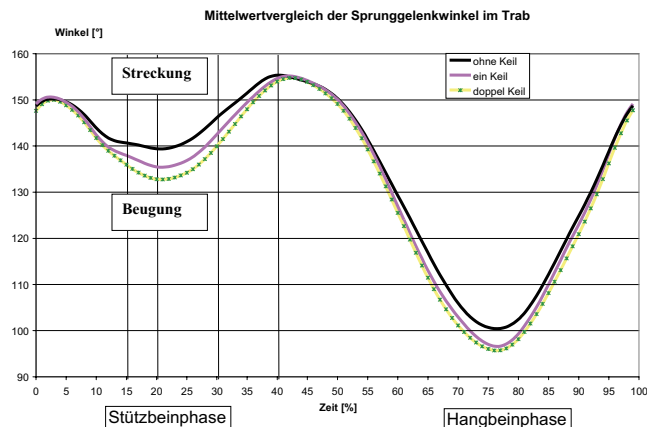


Abb. 2 Verlauf der Mittelwerte des dorsalen Sprunggelenkwinkels von 6 Pferden während des Bewegungszyklus auf dem Laufband im Trab (individuelle angepasste Geschwindigkeit).
Mean of the flexion angle of the tarsal joint of six horses during the stance phase and the swing phase on the treadmill at the trot (individually adjusted velocity).

Abbildung 2 zeigt den Verlauf des Mittelwertes des Beugewinkels des Sprunggelenkes von 6 Pferden während des Bewegungszyklus im Trab auf dem Laufband (3.5-3.8m/s). Der Sprunggelenkwinkel war bei 20% und bei 30 % des Bewegungszyklus jeweils statistisch signifikant ($p < 0.01$) unterschiedlich. Tabelle 1 gibt die einzelnen Winkelwerte des Sprunggelenkes an, die bei Messung ohne Keil, mit einfachem Keil und mit Doppelkeil jeweils bei 15%, 20%, 30% und 40% der Bewegungszyklusdauer auftraten.

Diskussion

Aufgrund dieser Messung kann gesagt werden, dass die Erhöhung der Trachten einen Einfluss auf die Winkeländerung des Sprunggelenkes in der Stützbeinphase ausübt. Das Sprunggelenk kann sich während der Stützbeinphase nicht so stark strecken.

Durch die Anhebung der Trachten kommt es (im Unterschied zur Vorderextremität) zu einem weniger starken Durchtreten im Fesselgelenk, das steiler stehende Fesselbein bildet mit dem Rohrbein einen stumpferen Winkel, d.h., die Hyperextension nimmt ab.

Dieser Effekt der Trachtenanhebung überträgt sich weiters vom Fesselgelenk auf das Sprunggelenk, das sich während der Stützbeinphase beim „Durchtreten“ nicht so stark strecken kann bzw. im Krankheitsfall nicht so stark strecken muss. In Abb. 2 sieht man deutlich die zunehmende Beugung des Sprunggelenkes in der Stützbeinphase mit zunehmender Anhebung der Trachten.

Die Verhältnisse scheinen an der Hinterextremität anders zu sein als an der Vorderextremität. Wie Messungen an der Vorderextremität zeigen, beschränkt sich dort der Effekt der Trachtenanhebung auf das Huf- und Krongelenk (Clayton et al. 2000; Girtler und Peham 2000). Eine Erklärung ist, daß

Tab. 1 Winkel des Sprunggelenkes (Beugewinkel) jeweils ohne Keil, mit einfachem Keil (8°) und mit Doppelkeil (16°) bei 15%, 20%, 30% und 40% der Dauer des Bewegungszyklus.
Angle of the tarsal joint (flexion angle) without elevating the heels, with single wedge (8 degrees) and double wedge (16 degrees) at 15%, 20%, 30% and 40% of stride duration.

das während der Stützbeinphase durchgestreckte Karpalgelenk die „Hebung“ des Fesselgelenkes nicht zulässt, während das nach vorne offene Sprunggelenk mit Hilfe der Spannsäugekonstruktion „flexibel“ ist. Dies deckt sich mit der Meinung von Back (2001), dass Sprung- und Kniegelenk in der Stützbeinphase als Dämpfer wirken, zusammen mit dem Fesselgelenk, während an der Vorderextremität hauptsächlich dem Fesselgelenk die Stoßbrechung zukommt.

Auch wenn sich die Zehengelenke der Hinterextremität in der Morphologie nur unwesentlich von denen der Vorderextremität unterscheiden, so scheinen sie in der Funktion jedoch unterschiedlich zu sein.

Literatur

- Back W., Schamhardt H.C., Savelberg H.H.C.M. et al. (1995a): How the horse moves: significance of graphical representations of equine forelimb kinematics. *Equine Vet. J.* 27, 31-38
- Back W., Schamhardt H.C., Savelberg H.H.C.M. et al. (1995b): How the horse moves: significance of graphical representations of equine hindlimb kinematics. *Equine Vet. J.* 27, 39-45
- Back W., Schamhardt H.C., Barneveld A. (1996): Are kinematics of the walk related to the locomotion of a warmblood horse at the trot? *Vet. Quart.* 18, 79-84
- Back W. (2001): Intra-limb Coordination: the Forelimb and the Hindlimb. In: Back W. und Clayton H.M.: *Equine Locomotion*, W.B. Saunders, London, Edingburgh, New York, p. 95-133
- Clayton, H.M., Willemen, M.A., Lanovaz, J.L., Schamhardt, H.C. (2000): Effects of a heel wedge in horses with superficial digital flexor tendinitis. *Vet.Comp. Orthop.Traumatol.* 13, 1-8.
- Dietz O. und D. Moor A. (1999). Krankheiten am Sprunggelenk. In: Dietz O. und Huskamp B.: *Handbuch Pferde - Praxis*. Enke, 2. Aufl., Stuttgart, S. 843-859
- Ellenberger W. und Baum H. (1932): *Handbuch der vergleichenden Anatomie der Haustiere*, Berlin, Springer Verlag, 17. Aufl., S. 307-338
- Girtler D., Kübber P., Kastner J., Peham C. und Scheidl M. (1995): Kinematische Untersuchung des Vorführbogens bei Pferden mit unterschiedlichem Dorsalwandwinkel des Hufes, Wien. *Tierärztl. Mschr.* 82, 145-151
- Girtler D. und Peham C. (2000): Der Einfluß der Anhebung der Hufspitze oder der Trachten auf den Winkel des Huf- und Fesselgelenkes beim Pferd; kinematische Untersuchung auf dem Laufband im Schritt. Wien. *Tierärztl. Mschr.* 87, 247-252
- Krüger W. (1938): Über den Bewegungsablauf an dem oberen Teil der Hintergliedmaße des Pferdes im Schritt, Trab und Galopp. *Tierärztl. Rdsch.* 44, 549-557
- Schamhardt H.C., Hartmann W. und Janssen M. O. (1991): Biomechanics of the pelvic limb of the horse. *Swiss vet* 8, 35-37
- Schamhardt H.C., Hartmann W. und Lammertink J.L.M.A. (1985): In vivo bone strain in the equine tibia before and after transection of the peroneus tertius muscle. *Res. Vet. Sci.* 39, 139-144
- Stashak T.S. (1989): Hufkorrektur und orthopädischer Beschlag. In: Stashak T.S.: *Adam`s Lahmheiten bei Pferden*, 4. Aufl., Schaper, Hannover, 813-833
- Van Weeren P.R., van den Bogert A.J., Barneveld A., Hartmann W. und Kersjes A.W. (1990): The role of the reciprocal apparatus in the hind limb of the horse investigated by a modified CODA-3 opto-electronic kinematic analysis system. *Equine Vet. J.* 9 (Suppl.), 95-100
- Wentink G.H. (1978): An experimental study on the role of the reciprocal tendinous apparatus of the horse at walk. *Anat.Embryol.* 154, 143-151
- Willemen M.A., Savelberg H.H.C.M. und Barneveld A. (1999): The effect of orthopaedic shoeing on the force exerted by the deep digital flexor tendon on the navicular bone in horses. *Equine Vet. J.* 31, 25-30

A. Univ. Prof. Dr. Dietrich Girtler
Klinik für Orthopädie der Huf- und Klauentiere
Veterinärmedizinische Universität
Veterinärplatz 1
A - 1210 Wien
dietrich.girtler@vu.wien.ac.at