

Zur Biomechanik der Zehengelenke beim Pferd

D. Girtler

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

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Kurzbeitrag für eine Fortbildungsveranstaltung werden Zitate zusammengefasst, welche sich mit der Biomechanik der Zehengelenke des Pferdes aus anatomischer, bewegungsanalytischer und klinischer Sicht befassen. Der Winkelumfang von Huf- und Fesselgelenk in verschiedenen Gangarten wird beschrieben, des weiteren wird die Beugung und Streckung dieser Gelenke während der Bewegung auf dem Laufband abgehandelt, besonders wird auf die maximale Hyperextension im Fesselgelenk eingegangen. Im Vordergrund steht die Funktion des Fesseltrageapparates und der Beugesehnen beim Pferd im Stande der Ruhe und in der Bewegung. Das Zusammenspiel der Sehnen und Bänder an der Vorder- und Hinterextremität während des Stützens, Stemmens, Abhebens und Vorschwingens wird abgehandelt. Die unterschiedliche Zugbeanspruchung der Sehnen beim Reit- und Zugpferd wird beschrieben. Der Einfluss der Trachtenanhebung mit Keilen auf den Winkel des Huf- und Fesselgelenkes und auf den Sehnenapparat wird erklärt.

Schlüsselwörter: Pferd, Hufgelenk, Fesselgelenk, Hyperextension, Gelenkwinkel, Beugesehnen, Fesselträger, Tendinitis, Trachtenanhebung

Biomechanics of the digit in the horse

In the present paper various anatomical, clinical and locomotor aspects of the biomechanics of the distal limb in the horse are summarized. The range of movement of coffin and fetlock joint are described for the different gaits. Furthermore aspects of flexion and extension of these joints during treadmill locomotion with special emphasis on the hyperextension of the fetlock joint are discussed. Primary interest has the function of the suspensory apparatus of the fetlock and the flexor apparatus of the digit during standing and moving. The co-ordination of the tendons and ligaments in fore and hind limb during support, acceleration, lifting and protraction of the limb are described. The various amounts of loading in riding or draught horses are compared. The influence of elevation of the heels using wedges on the kinematics of coffin and fetlock joint as well as tendon apparatus are explained.

Keywords: coffin joint, fetlock joint, hyperextension, joint angle, flexor tendons, suspensory ligament, tendonitis, heel elevation

Das Pferd ist ein Lauftier. Die enge Beziehung zwischen Körperbau und Bewegungsverhalten kommt bei dem Zehenspitzen-gänger Pferd in der langen und schräg aufgerichteten Zehe und in dem langen und senkrecht gestellten Mittelfuß zum Ausdruck. Der Fuß des Pferdes hat wenig Masse, es finden sich hier nur noch Sehnen und Bänder, die dazugehörigen Muskeln enden oberhalb von Karpal- und Tarsalgelenk. Die drei Zehenknochen und das Rohrbein bilden das Skelett, die entsprechenden Gelenke sind speziell für diese Aufgabe konstruiert.

Huf- und Krongelenk

Das Huf- und Krongelenk sind unvollständige Wechselgelenke, die neben der Bewegung in der Sagittalebene nur passive Seitwärts- und Torsionsbewegungen zum Ausgleich von Bodenunebenheiten zulassen. Torsion: (Krongelenk max. 4 Grad, Hufgelenk vorne bis 15 Grad, hinten bis 18 Grad). Da die Kollateralbänder von Huf- und Krongelenk nicht in Richtung der Zehenachse verlaufen, sondern schräg von dorsal nach volar, wirken diese einer Beugung entgegen (Mosimann, 1958). Bei stehender Extremität bildet die Zehenachse, von der Seite betrachtet, mit dem Boden einen Winkel von ca. 50 Grad vorne und ca. 60 Grad hinten (Schmaltz, 1905).

Da Huf- und Krongelenk, bedingt durch das kurze Kronbein, topisch sehr nahe beisammen sind, wird bei kinematischen Messungen in der Regel der gemeinsame Bewegungsumfang

erfasst, auch wenn von Hufgelenk gesprochen wird. Dieser Bewegungsumfang hängt von der Gangart und von der Ganggeschwindigkeit ab. So ergibt eine Untersuchung bei 10 Warmblutpferden im Schritt auf dem Laufband bei einer individuell angepassten Geschwindigkeit von 6–8 km/h für das Huf-/Krongelenk der Vorderextremität einen Winkelumfang von ca. 42 Grad (Girtler und Peham, 2000).

Für eine Gruppe von 24 jungen Warmblutpferden bei Bewegung auf dem Laufband bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s. im Trab geben Back *et al.* (1995a,b) einen Winkelumfang des Hufgelenkes für die Vorderextremität von ca. 51 Grad und für die Hinterextremität von ca. 49 Grad an.

Fesselgelenk

Das Fesselgelenk ist ein reines Wechselgelenk mit außerordentlich großem Bewegungsumfang. Die Ausbildung der Kollateralbänder ist den funktionellen Erfordernissen dahingehend angepasst, dass eine längere, schwächere und oberflächliche Schicht in Richtung der Zehenachse verläuft, während eine kürzere, stärkere und tiefe Schicht von der Bandgrube des Rohrbeines radiär an das Fesselbein zieht, wobei der Verlauf senkrecht und nach hinten gerichtet ist (Mosimann, 1958). Es nimmt unter allen Gelenken an der Extremität eine Sonderstellung ein, zumal der dorsale Streckwinkel kleiner ist als der volare Beugewinkel. Diese Extension kommt allerdings nur unter passiver

Belastung zustande. Das Körpergewicht bedingt beim stehenden Pferd den Standwinkel von ca. 140 Grad/vorne bis 150 Grad/hinten (*Schmaltz, 1906*). In der Bewegung kommt es durch die kinetische Energie zu einer größeren Belastung in der Stützbeinphase und somit zu einem wesentlich kleineren Streckwinkel (maximale Hyperextension). Je nach Gangart schwankt diese maximale Streckung beträchtlich (siehe unten). Beim Liegen stellt sich im Fesselgelenk der Ruhewinkel ein, das Pferd ist nicht imstande, durch willkürlichen Zug der Zehenstrecker die Zehe zu überstrecken.

Der Winkelumfang des Fesselgelenkes wird von *Back et al. (1996)* für eine Gruppe von Pferden bei Bewegung auf dem Laufband im Schritt bei einer Geschwindigkeit von 1,6 m/s. für die Vorderextremität mit ca. 60 Grad, für die Hinterextremität mit ca. 72 Grad angegeben. Im Trab beträgt der Winkelumfang bei einer Geschwindigkeit von 4 m/s. vorne ca. 81 Grad, hinten ca. 85 Grad (*Back et al., 1996*), die maximale Hyperextension im Fesselgelenk beträgt bei diesen Pferden, vom Standwinkel gemessen, vorne 23,6 Grad, hinten 25,1 Grad (*Back et al., 1995a, b*). Bei der Bewegung von 7 m/s. im Kanter geben *Back et al. (1997)* für die führende Extremität den Winkelumfang vorne mit ca. 88 Grad und hinten mit ca. 98 Grad an.

Walter (1926) gibt beim Galopp für die äußere Vorderextremität beim Durchtreten einen palmar gemessenen maximalen Fesselgelenkwinkel von 260 Grad an, während die innere (führende) Vorderextremität einen maximalen palmar gemessenen Fesselgelenkwinkel von 243 Grad erreicht. Dies zeigt auch, dass die Hauptarbeit beim Galopp den Extremitäten zukommt, die sich in der Haupt-/Mitteldiagonale befinden.

Je nach Ruhezustand oder Bewegungsphase unterliegen die Sehnen und Bänder im Bereich der Zehe, des Mittelfußes und des Unterarmes bzw. des Unterschenkels unterschiedlichen Belastungen. Es sind dies in erster Linie der Fesseltrageapparat (M. interosseus medius, distale Gleichbeinbänder, Sehnenstrang des M. interosseus vom betreffenden Gleichbein zur Strecksehne), die oberflächliche und tiefe Beugesehne mit den Unterstützungsbändern und die Strecksehnen.

Beim Stehen bewirkt der Druck der Körperlast eine Senkung des Fesselgelenkes nach unten und rückwärts. Der Überstreckung im Fesselgelenk und der Beugung im Huf- und Krongelenk wirkt der Sehnenstrang des M. interosseus, der von den Gleichbeinen zur Strecksehne zieht, entgegen; es kommt zur Feststellung der Zehengelenke. Bei der spitzgewinkelten Zehenstellung, der weichen Fesselung sowie dem Huf der bärenfüßigen Stellung besteht neben der stärkeren Beugung im Hufgelenk eine stärkere Hyperextension im Fesselgelenk.

An der Vorderextremität wird durch das Unterstützungsband der oberflächlichen Beugesehne (Ansatz am Radius) und der tiefen Beugesehne (Ansatz am Karpus) der Sehnenzug jeweils direkt auf den Knochen übertragen und dadurch das Einknicken und Ermüden während des Stehens verhindert. Zusätzlich wird das Karpalgelenk neben den Unterstützungsbändern durch die sehnig durchsetzten M. flexor et M. extensor carpi ulnaris und durch den Bizepssehnenzug festgestellt. Der Sehnenapparat ist gleichmäßig angespannt, die Gelenke sind ohne Muskelkontraktion ruhig gestellt.

An der Hinterextremität hat die oberflächliche Beugesehne kein Unterstützungsband, sie ist am Fersenbeinhöcker angeheftet und

bewerkstelligt bei festgestelltem Kniegelenk die Feststellung des Fesselgelenkes und des Sprunggelenkes. Unterstützt wird sie durch den Fersensehnenstrang und durch die Tatsache, dass das Sprunggelenk ein Schnappgelenk ist. Zudem bewirken der sehnige M. fibularis tertius und der sehnige M. flexor digitalis pedis superf. eine gegenseitige Abhängigkeit von Knie- und Sprunggelenk. Jede Beugung des Kniegelenkes bewirkt eine Anspannung des M. fibularis tertius, die Folge ist die Beugung des Sprunggelenkes. Jede Streckung des Kniegelenkes bewirkt Anspannung des M. flexor digitalis pedis superf., die Folge ist die Streckung des Sprunggelenkes und vice versa (*Ellenberger und Baum, 1932*). Allerdings beugt und streckt sich das Sprunggelenk stets schneller als das Kniegelenk und bewegt sich um einen um 20 Grad größeren Winkel als das Kniegelenk. Dies erklärt sich dadurch, dass die beiden Sehnenzüge am Kniegelenk näher der Gelenkachse inserieren als am Sprunggelenk (*Krüger, 1938*).

Lokomotion

Die Lokomotion beruht auf abwechselnder Verkürzung und Verlängerung der Gliedmaßen durch die Beugung und Streckung aller Extremitätengelenke. Sowohl in der Stützbeinphase als auch in der Hangbeinphase erfolgen jeweils eine Beugung und eine Streckung. In der Stützbeinphase wird das Fesselgelenk durch die kinetische Energie noch weiter abgesenkt, es kommt, je nach Gangart und Bewegungsphase, zu einer vermehrten Belastung des Sehnenapparates.

Die Stützbeinphase besteht aus dem Stützen und dem Stemmen. Im Moment des Stützens beginnt sich das Fesselgelenk zu überstrecken und erreicht kurz vor der Mitte der Stützbeinphase seinen kleinsten Winkel (maximale Hyperextension), zugleich erfährt das Huf-/Krongelenk durch die spitze/horizontale Fesselstellung eine maximale Beugung. Durch die dorsalen Sehnenstränge des M. interosseus medius wird ein zu starkes Durchtreten verhindert. Kurz nach Bodenkontakt beim Empfangen der Last wird das Karpalgelenk durch die Strecksehnen, M. extensor carpi radialis und Bizepssehne in Streckstellung festgestellt. Der Winkel des Karpalgelenkes beträgt während der Stützbeinphase 180 Grad (*Krüger, 1937*). Der M. flexor digitalis pedis superf. unterstützt die Streckung des Sprunggelenkes durch Druck von hinten. Durch gleichzeitige Kontraktion der Zehenbeuger wird die Sohlenfläche des Hufes bodenwärts gezogen, es kommt zum Anpressen der Hufsohle an den Boden.

Am tiefsten Punkt des „Durchtretens“ erfolgt der Übergang des Stützens in das Stemmen. Die durch Muskelkontraktion angespannte tiefe Beugesehne hält den Huf am Boden fest und richtet, durch Druck von hinten auf das Fesselgelenk, das Fesselbein auf. Dies geht einerseits mit einer zunehmenden Beugung im Fesselgelenk einher, andererseits kommt es gleichzeitig zu einer zunehmenden Streckung im Huf-/Krongelenk. Das Ende der Stützbeinphase ist durch eine weiter fortschreitende Beugung im Fesselgelenk gekennzeichnet und durch eine im Rahmen des Abhebens der Trachten abrupt einsetzende schnelle Beugung im Huf-/Krongelenk.

Die Hangbeinphase besteht aus dem Abheben und dem Vorschwingen. Das Abheben wird durch die Beugung der Zehen-

gelenke und des Karpal-/Tarsalgelenkes eingeleitet, die Trachten werden angehoben, „die Extremität wird kürzer“ (vorne: M. flexor carpi ulnaris, M. flexor carpi radialis, M. flexor digitalis superf., M. flexor digitalis prof.; hinten: M. flexor digitalis pedis prof., M. tibialis anterior, M. fibularis tertius, M. flexor digitalis pedis superf.). Während des Vorschwingens erfahren das Fesselgelenk sowie das Huf-/Krongelenk mehrere kleine Beugungen und Streckungen. In der zweiten Hälfte der Hangbeinphase setzt die Streckung des Fessel- und Karpal-/Tarsalgelenkes ein (vorne: M. extensor carpi radialis, M. extensor digitalis comm., M. extensor digitalis lat.; hinten: M. extensor digitalis pedis longus, M. tibialis ant.), um die Extremität für die nächste Stützbeinphase vorzubereiten, „die Extremität wird länger“.

Eine kinematische Untersuchung des Vorführbogens bei Pferden mit unterschiedlichem Dorsalwandwinkel des Hufes zeigte, dass der Huf, unabhängig davon, ob er regelmäßig, spitz- oder stumpfgewinkelt ist, an der Vorderextremität stets ein Bahnkurve beschreibt, bei welcher der höchste Punkt stets im ersten Drittel erreicht wird. Der Vorführbogen des Hinterhufes wies infolge einer deutlich ausgeprägten Einsattelung einen Verlauf mit 2 Höhepunkten auf. Unabhängig vom Dorsalwandwinkel des Hufes lag der höchste Punkt des Vorführbogens bei 84% der untersuchten Pferde im ersten Drittel (Girtler et al., 1995).

Mehrbelastung der Beugesehnen

Die Mehrbelastung der Beugesehnen führt zur Tendinitis. Die Zugbeanspruchung der Sehnen erfolgt bei Reit- und Zugpferd zu verschiedenen Momenten in der Stützbeinphase.

Beim Reitpferd erkranken in erster Linie an der Vorderextremität der M. interosseus medius und die Sehne des M. flexor digitalis superf.. Die größte Zugbeanspruchung dieser Sehnen erfolgt bei voller Lastaufnahme während des Stützens, „das Fesselgelenk tritt durch“, gleichzeitig beugt sich das Hufgelenk. Während der Hyperextension sind der M. interosseus medius, die unteren Gleichbeinbänder, der dorsale Schenkel des M. interosseus medius, die oberflächliche Beugesehne und deren Unterstützungsband angespannt, des weiteren kommt die Funktion der Kollateralbänder der Zehngelenke als Beugungshemmer zur Geltung (Mosimann, 1958). Die tiefe Beugesehne und deren Unterstützungsband sind von allzu starker Zugwirkung ausgeschlossen. Die Muskeln der oberflächlichen Beugesehne und der tiefen Beugesehne kontrahieren sich sodann in der ersten Hälfte der Stützbeinphase, um die Sehnenanspannung zu verstärken (Korsgaard, 1982). Durch diese aktive Anspannung der Beuger wird der Fesseltrageapparat unterstützt. Buchner et al. (1996) zeigten, dass die tiefe Beugesehne und vor allem deren Unterstützungsband am Ende der Stützbeinphase die maximale Deh-

nung erfahren, wobei es zu einem simultanen Überstrecken von Huf- und Fesselgelenk kommt.

Beim schweren Zugpferd erkrankt in erster Linie an der Vorderextremität die Sehne des *M. flexor digitalis prof.*. Es liegen hier in der Stützbeinphase spezielle Verhältnisse vor. Einerseits wird durch die aktive Anspannung der Beuger das Durchtreten verringert, andererseits werden durch den starken Zug der Beugesehen das Huf- und Krongelenk dahingehend gebeugt, dass sich die Hufspitze „gewissermaßen in den Boden einzukrallen sucht“ (Schmaltz, 1928). Dadurch werden die als Beugungshemmer wirkenden Kollateralbänder der distalen Zehengelenke angespannt, während der Fesseltrageapparat mit Ausnahme des dorsalen Schenkels des *M. interosseus medius* und die Unterstütbänder der Beugesehen weitgehend entlastet bleiben (Mosimann, 1958). Im Moment des Stemmens ist durch die starke Streckung des Hufgelenkes der Moment der stärksten Zugbeanspruchung der tiefen Beugesehne und deren Unterstütbänder gegeben, während die oberfl. Beugesehne und der *M. interosseus medius* infolge der nur geringen Überstreckung des Fesselgelenkes entspannt sind (Krüger, 1941).

Kinematische Untersuchungen bei Pferden im Trab belegen die vermehrte Flexion des Hufgelenkes durch die Verwendung von Keileisen (Willemen et al., 1999). Des weiteren berichteten Clayton et al. (2000), dass ein Keileisen von 6 Grad am Vorderhuf einerseits keinen Einfluss auf den Winkel des Fesselgelenkes ausübt, andererseits keine Besserung bei der experimentell erzeugten Tendinitis der oberflächlichen Beugesehne bewirkt. Die durch Keileisen bedingte Entlastung der tiefen Beugesehne sowie deren Unterstütbänder und die Anspannung der dorsalen Sehnenstränge des *M. interosseus medius* wurden von Jansen et al. (1993, 1995) beschrieben.

Eine kinematische Untersuchung über den Einfluss der Anhebung der Hufspitze oder der Trachten auf den Winkel des Huf- und Fesselgelenkes bei Bewegung des Pferdes auf dem Laufband im Schritt zeigte, dass sich der kleinste palmare Huf-/Krongelenkwinkel (Übergang vom Stützen in das Stemmen) insgesamt um 16 Grad änderte, während sich der kleinste dorsale Fesselgelenkwinkel (Hyperextension) insgesamt um 4 Grad änderte. Der Effekt der Anhebung der Trachten mit Keilen blieb größtenteils auf das Hufgelenk beschränkt und hatte nur unwesentlichen Einfluss auf das Fesselgelenk im Sinne einer Verstärkung der Hyperextension (Girtler und Peham, 2000).

Literatur

- Back, W., Schamhardt H.C. und Savelberg H.H.C.M. (1995a): How the horse moves: significance of graphical representations of equine forelimb kinematics. *Equine Vet J.* 27, 31–38.
- Back, W., Schamhardt, H.C. und Savelberg, H.H.C.M. (1995b): How the horse moves: significance of graphical representations of equine hindlimb kinematics. *Equine Vet J.* 27, 39–45.
- Back, W., Schamhardt, H.C und 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., Schamhardt H.C. und Barneveld, A. (1997): Kinematic comparison of the leading and trailing limb at the canter. *Equine Vet. J.* 23 (Suppl.), 80–83.
- Buchner, H.H.F., Savelberg, H.H.C.M., Schamhardt, H.C. und Barneveld, A. (1996): Limb movement adaptations in horses with experimentally induced fore- or hindlimb lameness. *Equine Vet. J.* 28, 63–70.
- Clayton, H.M., Willemen, M.A., Lanovaz, J.L. und Schamhardt, H.C. (2000): Effects of a heel wedge in horses with superficial digital flexor tendinitis. *Vet. Comp. Orthop. Traumatol.* 13, 1–8.
- Ellenberger, W. und Baum, H. (1932): Handbuch der vergleichenden Anatomie der Haustiere. Berlin, Springer Verlag, 17. Auflage, Seite 253 bis 255 und 323.
- Girtler, D., Kübber, P., Kastner, J., Peham, Ch. 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, Ch. (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.
- Jansen, M.O., Buiten, A. Van, Bogert, A.J. Van Den und Schamhardt, H.C. (1993): Strain of the musculus interosseus medius and its rami extensorii in the horses, deduced from in vivo kinematics. *Acta Anat.* 147, 118–124.
- Jansen, M.O., Schamhardt, H.C., Hartmann, W. und Barneveld, A. (1995): In vivo tendon forces in the equine forelimb related to failure forces and the influence of a heel wedge at the trot. In: Jansen, M.O.: Tendon strain, force and function in equine locomotion. PhD Thesis, Univ. Utrecht, Seite 77–94.
- Korsgaard, E. (1982): Muscle function in the forelimb of the horse. An electromyographical and kinesiological study. Thesis, Kopenhagen.
- Krüger, W. (1937): Über den Bewegungsablauf an dem oberen Teil der Vordergliedmaße des Pferdes im Schritt, Trab und Galopp. *Tierärztl. Rundsch.* 43, 809–816.
- Krüger, W. (1938): Über den Bewegungsablauf an dem oberen Teil der Hintergliedmaße des Pferdes im Schritt, Trab und Galopp. *Tierärztl. Rundsch.* 44, 549–557.
- Krüger, W. (1941): Die schwere Zugarbeit und ihre Auswirkungen auf die Sehnen der Vordergliedmaße des Pferdes. *Dtsch. Tierärztl. Wschr.* 49, 203–208.
- Mosimann, W. (1958): Über die Bewegungsmöglichkeiten in den Zehengelenken des Pferdes. *Schweiz. Arch. Tierheilk.* 100, 7–14.
- Schmaltz, R. (1905): Anatomische Notizen, IV. Warum stehen die Zehen des Pferdes schräg? *Berl. Tierärztl. Wschr.* 33, 569–572.
- Schmaltz, R. (1906): Anatomische Notizen, V. Konstruktion und Größe der Standwinkel an den Beinen des Pferdes. *Berl. Tierärztl. Wschr.* 14, 257–261.
- Schmaltz, R. (1928): Anatomie des Pferdes. 2. Aufl., Schötz, Berlin.
- Walter, K. (1926): Der Bewegungsablauf an den freien Gliedmaßen des Pferdes im Schritt, Trab und Galopp. *Arch. f. wiss. u. prakt. Tierheilkunde* 53, 316–347.
- 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.

Univ. Prof. Dr. Dietrich Girtler

Veterinärplatz 1
A-1210 Wien

Tel.: +43 01 25077/5501
Fax : +43 01 25077/5590