

Die Gangarten der Pferde: Sind Schwingungsmechanismen entscheidend?

Teil I: Pendelschwingungen der Beine bestimmen den Schritt

H. Witte, C. Lesch, H. Preuschhof und C. Loitsch

Abteilung für Funktionelle Morphologie der Ruhr-Universität Bochum

Einleitung

Die offensichtlich „harmonisch schwingenden“ Bewegungen der Pferde legen es nahe, eine biomechanische Analyse der Pferdelokomotion mit Methoden der Schwingungsphysik vorzunehmen. Das theoretische Verständnis der Bewegungsstrategien hat unmittelbare Konsequenzen für die Praxis: jede Störung der Gestalt und der Struktur des Bewegungsapparates spiegelt sich in Veränderungen der Funktion „Bewegung“ wider. Diagnostik und Therapie müssen beide Komponenten gleichermaßen berücksichtigen.

Energiesparmechanismen als Optimierungskriterien

Fortbewegung ist energieaufwendig – diese bekannte, in Zeiten steigender Benzinpreise schmerzliche, bei der Durchführung von Abmagerungskuren aber nützliche Tatsache hat für die Evolution der Lebewesen eine besondere Bedeutung. Die Bewohner der westlichen Wohlstandsgesellschaften übersehen gerne, daß Nahrung – und damit Energie für den Stoffwechsel – im Normalfall für Lebewesen ein knappes Gut ist, so daß das Haushalten mit Energievorräten einen bedeutenden Überlebensvorteil darstellt. Tatsächlich lassen sich viele Evolutionsprozesse als Mittel der Energieersparnis verstehen. Für Tiere, die im Gegensatz zu Pflanzen zur gezielten Lokomotion befähigt sind, entsteht ein großer Teil des Energiebedarfs durch eben diese Fortbewegung (vgl. *Cavagna, Heglund und Taylor 1977*).

Neben den Mechanismen zur Erzielung hoher Geschwindigkeiten bei spezialisierten Arten – Geparden und kleine Paarhufer liefern hierfür mit kurzzeitigen Sprintgeschwindigkeiten von mehr als 90 km/h beeindruckende Beispiele – haben die Langstreckenleistungen, mit denen viele Tiere große Entfernungen zwischen Futterplätzen und Wasserstellen bei geringem Leistungsbedarf überwinden, eine besondere biologische Bedeutung. Die wegen ihrer Ausdauer, Tragkraft und Schnelligkeit seit langer Zeit als Reit- und Lasttiere genutzten Pferde können an mehreren aufeinander-

Zusammenfassung

Die Gangarten Schritt, Trab und Galopp der Pferde lassen sich mit den einfachen physikalischen Grundprinzipien der Pendel- und der Federschwingungen biomechanisch weitgehend erklären. Unabhängig von detaillierter Kenntnis der physikalischen Formeln gibt das Verständnis dieser Konzepte dem Praktiker die Möglichkeit für diagnostische und therapeutische Maßnahmen, welche sich die Wechselwirkungen zwischen gestörter Struktur des Bewegungsapparates und daraus resultierender Störung der Bewegungsfunktion zu Nutze machen.

Die Bewegungen, Kräfte und Momente bei der Lokomotion des Pferdes sind mit Berechnungsmodellen vorhersagbar. Die Beine bewegen sich in dem Modell, das den hier vorgestellten Überlegungen zugrundeliegt, wie Pendel, während sie unter der Bodenreaktionskraft wie Federbeine eingestaucht werden. Das Kopf-Hals-Brust-Segment führt Biegeschwingungen gegenüber dem Lumbo-Sacral-Segment aus, und beide schwingen als „Schaukelpferd“ um eine gemeinsame Querachse.

In den einzelnen Grundgangarten werden diese Teilkomponenten unterschiedlich stark genutzt:

- Im Schritt bestimmen Pendelschwingungen der Beine den zeitlichen Ablauf der Bewegung. Besonders bei höheren Schrittgeschwindigkeiten übernehmen zusätzlich einzelne Beine nacheinander die Funktion von Federbeinen.
- Die schnelleren Beinbewegungen im Trab können nicht mehr als Pendelschwingungen realisiert werden, der zusätzlich erforderliche Energiebedarf für die Fortbewegung wird durch weitergehende Nutzung von elastischen Energiespeichern in den Beinen minimiert. Dabei sind bis auf die Schwebphasen zwei Beine (die fußende Diagonale) als Axialfedern aktiv und bestimmen die Frequenz der Resonanzschwingung.
- Der Galopp nutzt Elastizität in noch stärkerem Maße. Durch die geänderte zeitliche Ordnung der Bewegungen der einzelnen Beine (Fußfolge!) sind beim Bodenkontakt bis zu drei Extremitäten gleichzeitig als Federn wirksam. Zusätzlich agiert der Rumpf als Biegefeder.

Schlüsselwörter: Biomechanik, Gangarten der Pferde, Elastizität, Energiespeicherung, Pendel- und Federmechanismen

Gaits of horses: Are they ruled by oscillations?

Part I: Walk is determined by pendulum mechanisms.

For a basic understanding of the gaits of horses, the mechanical principles for the analyses of oscillations are essential. They can be used as efficient tools for diagnostic purposes. Movements, forces and moments acting during locomotion are predictable using rather simple computational models.

In the model proposed here, the extremities move like pendula. During ground contact they additionally are compressed like springs. The body segment composed of head, neck and thorax performs bending oscillations in relation to the lumbo-sacral segment.

Standard gaits make use of these components with different intensities:

- The walk is governed by resonant oscillations of the pendula formed by the extremities.
At higher velocities, spring effects in individual legs are of growing importance.
- In the trot, the movements of the legs are too fast to be explained by the mechanisms of resonant pendula. Power expenditure is minimized by temporary storage of elastic energy in the legs' „springs“. During ground contact two legs in parallel arrangement (the active diagonal) determine the resonance frequency (and thus the trot frequency).
- Gallop makes use of up to three „springs“ at the same time. In addition, energy is stored in the bended beam (or spring) of the trunk.

keywords: Biomechanics, gaits of horses, elasticity, energy storage, pendulum- and spring-mechanisms

derfolgenden Tagen Entfernungen von mehr als 100 km pro Tag zurücklegen, erreichen aber auch Spitzengeschwindigkeiten von 70 km/h, ohne in ausgeprägte Erschöpfungszustände zu geraten. Es lassen sich aber noch wesentlich höhere Leistungen dokumentieren. So legte 1892 ein „normales Dienstpferd“ die Strecke Berlin – Wien (578 km) in nur fünf Tagen zurück, was einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 116 km/Tag entspricht. 1913 benötigte ein Kavalleriehengst für 334,5 km die Zeit von 15,5 Stunden, erreichte also eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 22 km/h (vgl. *Loitsch* 1993, S. 1–2). Es drängt sich zwangsläufig die Frage auf, was Pferden diese Kombination aus hoher Sprint- und Ausdauerleistung ermöglicht.

Zyklische Lokomotion

Die meisten Wirbeltiere bewegen sich durch kontinuierliche Aneinanderreihung gleicher „Bewegungseinheiten“ oder „Bewegungszyklen“ fort. Bei der Lokomotion von Pferden wird dieses besonders deutlich: typische Bewegungseinheiten kennzeichnen die Gangarten. Wenn für einen Zyklus die Sequenz der Bodenkontakte, die Fußungsfolge, festgestellt ist, läßt sich auch der Ablauf der weiteren Bewegung vorher-sagen (vgl. *Preuschhof* 1989). Man spricht daher auch von „Zyklischer Lokomotion“. Im Gegensatz dazu ist beispielsweise das Springen eine azyklische Lokomotionsform.

Bei der zyklischen Lokomotion ergibt sich die Geschwindigkeit v aus zwei Anteilen. Der vollständige Ablauf einer Bewegungseinheit liefert den Raumgewinn s . Für diesen Vorgang ist eine bestimmte Zeit erforderlich: die Dauer der Bewegungseinheit (kurz: „Bewegungseinheitsdauer“) BED.

$$v = \frac{s}{BED}$$

Gleichung (1) mit:

v : Fortbewegungsgeschwindigkeit

s : Raumgewinn pro Bewegungszyklus = Weg

BED: Bewegungseinheitsdauer = Zeit

Theoretisch ist für jede Geschwindigkeit gemäß dieser Gleichung das Verhältnis der Raum- und der Zeitkomponenten frei wählbar. Pferde zeigen aber mit wachsender Geschwindigkeit eine immer geringer werdende BED. Diese folgt auf den ersten Blick einem hyperboloiden Kurvenverlauf (gestrichelte Linie in Abb. 1a), der asymptotisch einem Grenzwert von etwa 0,3 Sekunden zustrebt. Das entspricht einer Frequenz von etwa 3 Hz. Der Raumgewinn hingegen weist in grober Näherung eine mehr lineare Zunahme auf (gestrichelte Linie in Abb. 1b). Pferde erreichen also höhere Geschwindigkeiten überwiegend durch eine Vergrößerung der zurückgelegten Strecke s pro Zyklus (pro BED). Allein schon diese Tendenz, die Frequenz der Bewegung beizubehalten, spricht dafür, daß Resonanzmechanismen eine bedeutende Rolle für die Fortbewegung der Pferde spielen.

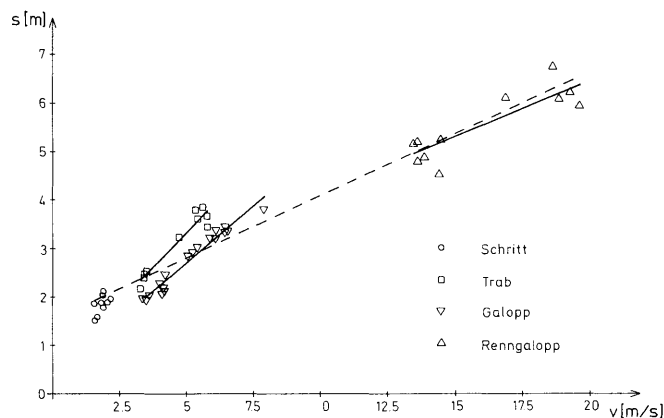
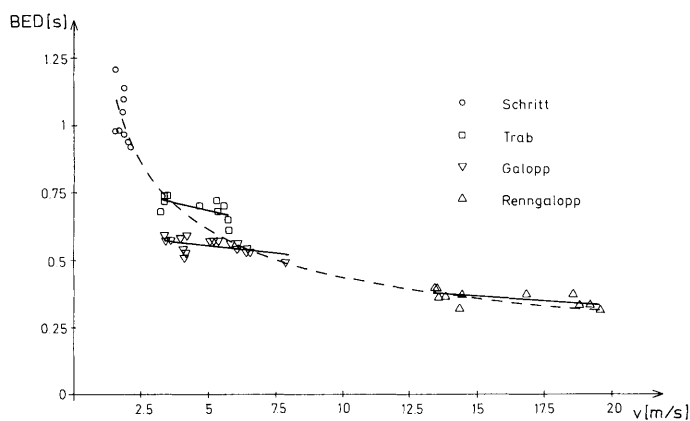


Abb. 1: Kenngrößen der Pferdegangarten als Funktion der Fortbewegungsgeschwindigkeit v :

Zyklische Lokomotion, gemäß Gleichung (1) beschrieben durch die beiden Parameter

a) BED(v): Bewegungseinheitsdauer (aus Filmaufnahmen mit 200 Bildern/s ermittelt, Details s. Teil II des Artikels), und

b) $s(v)$: Raumgewinn (berechnet aus BED(v) und v gemäß Gleichung (1)).

Die Regressionsfunktionen für den gesamten analysierten Geschwindigkeitsbereich sind gestrichelt gezeichnet. Die durchgezogenen Linien geben die Ergebnisse der abschnittswiseen Regressionsrechnung für Trab, Dressur-galopp und Canter / Renngalopp wieder.

Characteristics of the gaits of horses as functions of the velocity v :

Corresponding to equ. 1 cyclic locomotion is characterized by:

a) BED(v): duration of a locomotor cycle, taken from high speed films (frame rate 200 F/s, for details s. part II of the article), and

b) $s(v)$: distance covered per cycle (calculated as v divided by BED (v), see equ. 1).

Dashed lines: regression functions for the whole analysed range of velocities.

Solid lines: regressions for the trot, canter and gallop

Analoge Funktionen zur Gestaltung der Bewegungsabläufe sind auch für andere Lebewesen bekannt. Auch bei der bipeden Lokomotion des Menschen konnten Resonanzprozesse, also solche Schwingungen, die sich bei Vernachlässigung von Reibungsverlusten ohne äußere Einwirkungen selbst erhalten, als Ursache plausibel gemacht werden (*Mochon und McMahon* 1980a, b; *Witte et al.* 1991; *Witte*

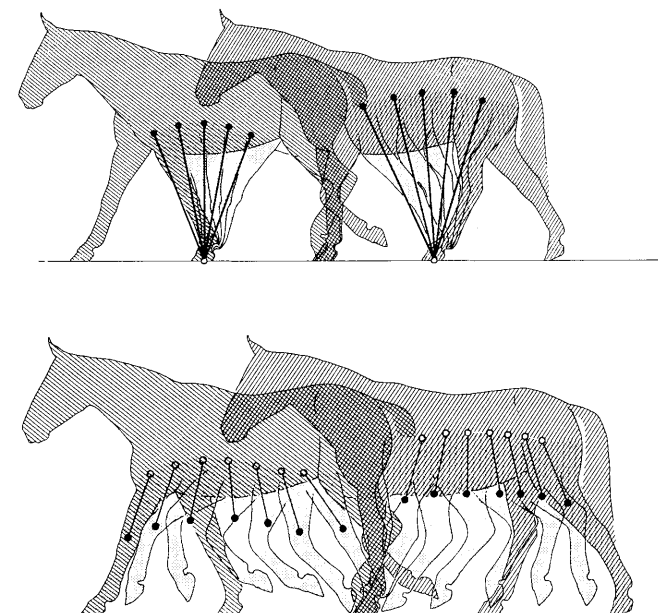


Abb. 2: Pendelmodelle der Lokomotion
 a) „Inverted Pendulum“ oder inverses Pendel: die Rumpfmassse wird mittels der Beine im Bogen über den Bodenkontaktpunkt geführt.
 b) „Äquivalentes Beinpendel“: ein hängendes, mathematisches Pendel, das die Beinmasse im Beinschwerpunkt konzentriert und um eine Aufhängung am Rumpf schwingt.
 Pendulum models of locomotion
 a) „inverted pendulum“, in which the mass is guided by the free limbs about the joint closest to the ground as a pivot, and
 b) „equivalent suspended pendulum“, that is a mathematical pendulum with a swing time equivalent to that of the real, complex physical pendulum

1992). Es ist demnach sinnvoll, zunächst die für den Menschen entwickelten Modellvorstellungen der Fortbewegung auf ihre Anwendbarkeit bei Pferden zu überprüfen.

Das Pendelprinzip

Bereits 1836 postulierten die Brüder *Weber* Pendelmechanismen als mechanisches Grundprinzip für das menschliche Gehen. In den Standphasen schwenkt der Körperschwerpunkt etwa auf einer Kreisbahn um den Fuß über den Boden (Abb. 2a, „Inverted pendulum“: entsprechend der Modellvorstellung von *Mochon* und *McMahon* 1980a, b für den Menschen), in der Schwungbeinphase bewegt sich der Schwerpunkt des Beines wie ein hängendes Pendel (Abb. 2b, *Witte* 1992). Durch Verwendung verbesserter Meß- und Berechnungsmethoden hat sich das Pendelprinzip außer für die Erklärung der Kinematik auch für die Kinetik (*Iida* und *Yamamuro* 1987, *Winter* 1990; *Margarita* et al. 1963) und funktionsmorphologischen Aspekte dieser langsamsten zyklischen Gangart des Menschen (*Witte* 1992) wie auch anderer Lebewesen (*Hildebrand* 1985) bewährt. Auf dieser Basis läßt sich sogar die

spezifische Körperform des Menschen verständlich machen (*Witte* et al. 1991; *Preuschhof* et al. 1992, 1994b).

Pendelbewegungen der Pferdeextremitäten

Obwohl für Pferde die Ergebnisse vieler Bewegungsstudien publiziert sind und für ihre langsamste, dem menschlichen Gehen entsprechende Gangart „Schritt“ ein Pendelmechanismus der Beine als das zugrundeliegende Prinzip allgemein unterstellt wird, findet sich in der Literatur kein Hinweis auf eine experimentelle Überprüfung dieser Hypothese. Die Bedeutung des Pendelprinzips im Vergleich der Gangarten Schritt, Trab und Galopp wurde daher anhand der von *Krüger* 1937, 1938, 1939 veröffentlichten „Stick figures“ und eigener Erhebungen über die Lokomotion des Pferdes für die Vorderextremität (ab dem scapulo-thorakalen Gelenk, Abb. 3 links) und die Hinterextremität (ab dem Hüftgelenk, Abb. 3 rechts) untersucht. In den Abbil-

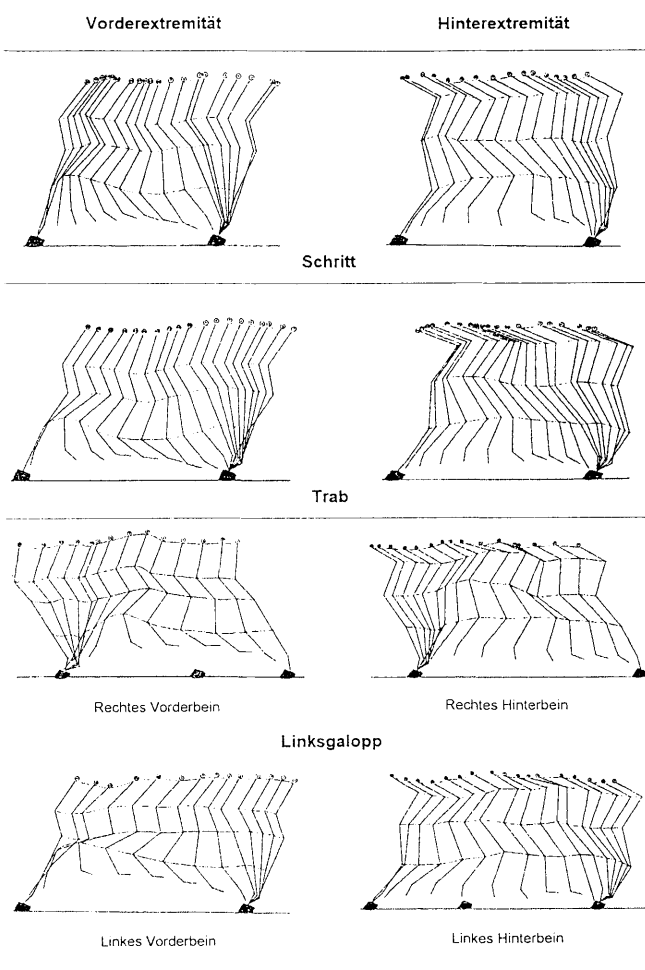


Abb. 3: Stick-figures der Pferdeextremitäten in den drei Grundgangarten.

Stick figures of the limbs of horses in the walk, trot and gallop.
 Zusammengestellt aus: *Krüger* 1937, S. 811, 812, 813
Krüger 1938, S. 550, 551, 552, 553
Krüger 1939, S. 71

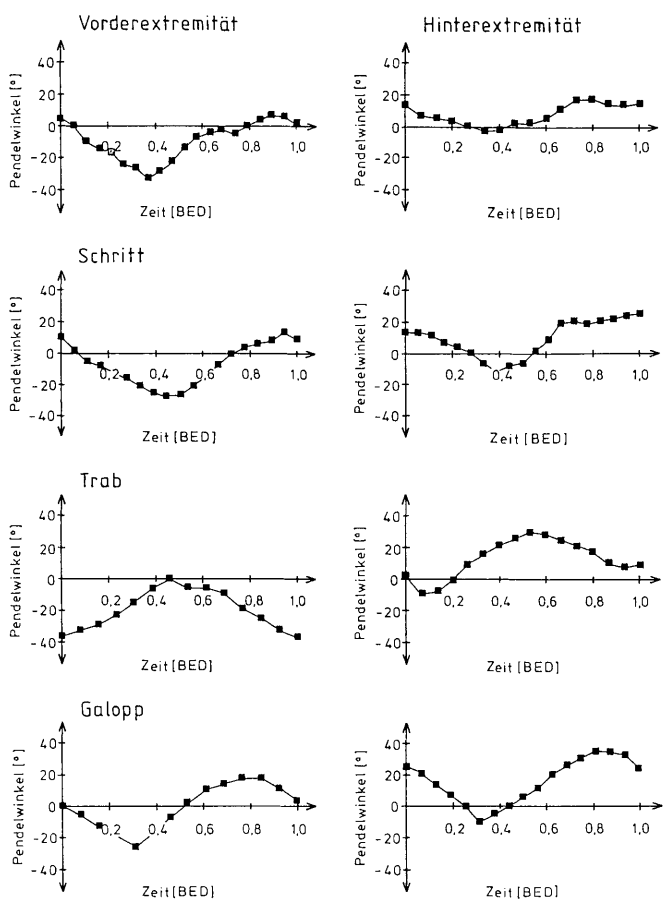


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Winkelausschläge $\alpha(t)$ der „Äquivalenten Beinpendel“
 Berechnet aus den stick figures nach Krüger (Abb. 3) und den Segmentmassen der Pferdeextremitäten gemäß Spriggins und Leach 1986.
 Werte für den Galopp kontrolliert anhand eigener Messungen (Film und Motographie).
 Anordnung der Graphen gemäß Abb. 3.
 Die Zeit ist auf die BED normiert. Positive Winkel beschreiben Beinausschläge „nach hinten“, d. h. der Beinschwerpunkt befindet sich kaudal des Aufhängepunktes.
 Angular excursions $\alpha(t)$ of the „equivalent suspended pendula“ formed by fore- and hindlimbs.
 Calculated on the basis of the stick figures given by Krüger (s. fig. 3) and the morphometric data provided by Spriggins and Leach 1986. The values for the gallop were controlled by our own film analyses and motographic records.
 The graphs are arranged as in fig. 3. Time is given as a percentage of BED(v), one cycle being equivalent to 100%. Positive values for the angles represent rearward movements of the limbs.

dungen sind für Vorder- und Hinterextremität jeweils vier Funktionsverläufe dargestellt: je einer für die symmetrischen Gangarten Schritt und Trab, je zwei für die asymmetrische Gangart Galopp. Die morphologischen Eigenschaften (hier Masse und Schwerpunktlage) der Segmente des Pferdekörpers sind vorgegeben (Werte nach Spriggins und Leach 1986). Je nach Gangart wählt das Tier durch Beugung in den Gelenken der Extremitäten aber unterschiedliche Relativlagen der Segmente. Daraus ergeben sich veränderte Bewegungen der Beinschwerpunkte bezüglich Schulter- und Hüftgelenk sowie

unterschiedliche Schwingbewegungen des „Äquivalenten Beinpendels“. Diese lassen sich im körpereigenen Koordinatensystem durch die Zeitverläufe zweier Meßgrößen beschreiben: die Winkelausschläge der Verbindungslinie proximales Gelenk-Beinschwerpunkt (Abb. 4) und die Länge dieser Strecke (Abb. 5). Das Rotationszentrum des Vorderbeins wird in dieser Berechnung als Näherung im Schultergelenk festgelegt, obwohl der tatsächliche Drehpunkt der Scapula auf der Schulterblattgräte in Höhe von 2/3 der Strecke zwischen dem Schultergelenk und dem Schulterblattknorpel liegt (Krüger 1937). Die Approximation erfolgte, da sowohl die Lage der Scapula unter der Haut nicht ausreichend genau bestimmt wer-

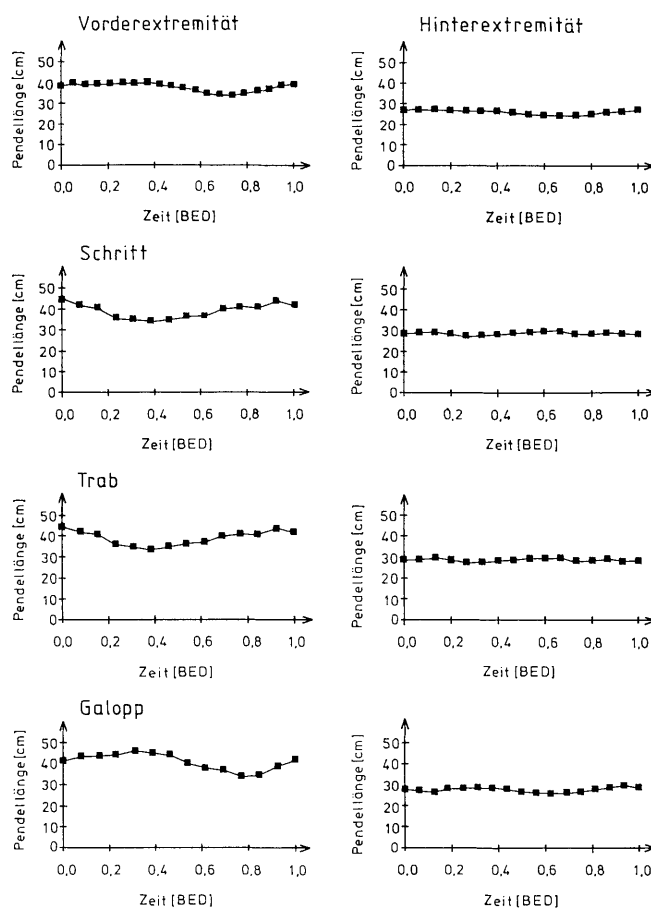


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Längen $L(t)$ der „Äquivalenten Beinpendel“
 Berechnet aus den stick figures nach Krüger (Abb. 3) und den Segmentmassen der Pferdeextremitäten gemäß Spriggins und Leach 1986.
 Werte für den Galopp kontrolliert anhand eigener Messungen (Film und Motographie).
 Anordnung der Graphen gemäß Abb. 3.
 Die Zeit ist auf die BED normiert.
 Lengths $L(t)$ of the „equivalent suspended pendula“ formed by fore- and hindlimbs.
 Calculated on the basis of the stick figures given by Krüger (s. fig. 3) and the morphometric data provided by Spriggins and Leach 1986. The values for the gallop were controlled by our own film analyses and motographic records.
 The graphs are arranged as in fig. 3. Time is given as a percentage of BED(v), one cycle being equivalent to 100%.

den konnte, als auch die Lage des Schultherschwerpunktes und die Masse der an der Bewegung beteiligten Muskelgruppen nicht verfügbar waren. Eine Kontrollrechnung mit der verfügbaren summarischen Massenangabe für Oberarm und Scapula ergibt einen vernachlässigbar geringen Einfluß auf die errechnete Pendellänge

Die Winkelbewegungen der Pferdebeine werden in allen Gangarten von jeweils einer sinusförmigen Schwingung geprägt. Die Beinpendel haben in der jeweiligen Gangart während des gesamten Bewegungszyklus etwa konstante Längen. Für die Vorderextremitäten werden in allen Gangarten Längen des Äquivalenten Beinpendels um 0,40 m gemessen, für die Hinterextremitäten ergeben sich Werte um 0,28 m. Nur im Schritt entsprechen aber die aus den ermittelten Längen L der Äquivalenten Beinpendel zu berechnenden Eigenschwingzeiten T etwa den gemessenen BED:

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{L}{g}}$$

Gleichung (2) mit:

- T Eigenschwingzeit: Dauer der resonanten Schwingung eines mathematischen Pendels
 L Länge des Äquivalenten Beinpendels
 g Erdbeschleunigung
 BED Bewegungseinheitsdauer

Vorderextremität

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{L_v}{g}} = 2 * 3,14 * \sqrt{\frac{0,40 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}}} = 1,27 \text{ sec}$$

$\cong \text{BED}_{\text{Langsamer Schritt}}$

Gleichung (3) mit:

- L_v Länge des Äquivalenten Beinpendels der Vorderextremität
 $\text{BED}_{\text{Langsamer Schritt}}$ Bewegungseinheitsdauer im Langsamen Schritt

Hinterextremität:

$$T = 2 * \pi * \sqrt{\frac{L_H}{g}} = 2 * 3,14 * \sqrt{\frac{0,28 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}}} = 1,06 \text{ sec}$$

$\cong \text{BED}_{\text{Schritt}}$

Gleichung (4) mit:

- L_H Länge des Äquivalenten Beinpendels der Hinterextremität
 $\text{BED}_{\text{Schritt}}$ Bewegungseinheitsdauer im Schritt

Die unterschiedlichen Eigenschwingzeiten der Vorder- und der Hinterextremität bedingen zwar, daß es nicht eine einzige optimale BED mit einer zugeordneten Optimalgeschwindigkeit bei Pferden gibt, führen andererseits aber dazu, daß der Bereich energetisch günstiger Geschwindigkeiten vergrößert wird: Schrittgeschwindigkeiten v zwischen 1 m/s und 2 m/s sind ohne größere energetische Nachteile frei wählbar.

Daraus folgt:

Im Schritt nutzen Pferde Pendelbewegungen ihrer Beine. Das bedeutet verringerten Energieaufwand für die Fortbewegung.

Im sehr schnellen Schritt wird die BED deutlich kürzer als den Eigenschwingzeiten des Pendels entsprechen würde. Dieses Phänomen wird im Trab und im Galopp noch ausgeprägter. Zur Nutzung der Eigenschwingungen der Beinpendel müßten diese durch Beugung der Extremität noch weiter verkürzt werden. Eine an die kurzen Bewegungszyklen im sehr schnellen Schritt, im Trab und im Galopp angepaßte Beugung der Pferdebeine läßt sich zwar in der Schwingbeinphase andeutungsweise beobachten (Abb. 3 und 4, vgl. auch *Preuschhoff et al. 1987, Loitsch 1993*), erreicht aber bei weitem nicht das Ausmaß, das erforderlich wäre, um eine energiesparende Nutzung der Eigenschwingungen zu ermöglichen. Während der Bewegungen sind weder der Anteil der bewegten Weichteilmassen noch die genauen Drehachsen exakt zu bestimmen. Pferde haben durch die Verlagerung der Muskelmassen nahe an oder sogar auf den Körperstamm (und die damit einhergehende Verkürzung der „Äquivalenten Beinpendel“) sehr gute Voraussetzungen für eine energiesparende Fortbewegung geschaffen. Wir haben daher das Modell probeweise auch mit extremen Annahmen über proximale Lagen der Segmentschwerpunkte, distale Lagen der Drehpunkte und kleine oder große mitbewegte Massen des Schulter- und Beckengürtels berechnet: die Teilmassen der Beine werden trotzdem bei höheren Geschwindigkeiten nie so stark an den Rumpf herangeführt, daß Pendelmodelle eine ausreichende Erklärung für die ausdauernde Fortbewegung des Pferdes liefern könnten. Die Beine müssen bei höherer Geschwindigkeit immer durch zusätzlichen Energieaufwand bewegt werden. Physikalisch formuliert: die Beinpendel werden mit einer von ihrer Resonanzfrequenz abweichenden Frequenz „zwangserregt“ (über vergleichbare Effekte beim laufenden Menschen und deren morphogenetische Konsequenzen siehe *Witte et al. 1991*, die Anwendung dieser Überlegungen auf große Vierfüßer siehe bei *Preuschhoff et al. 1994a, b*).

Sehr schneller Schritt, Trab und Galopp lassen sich durch resonante Pendelbewegungen der Pferdebeine nicht erklären.

Ein interessantes Phänomen konnte zusätzlich belegt werden: die Tiere stellen in allen Gangarten ihre Vorderbeine in der Mittellage nach vorne, gegen die Bewegungsrichtung, aus, während die Hinterbeine weiter nach hinten, in Bewegungsrichtung, ausgelenkt werden (Tab. 1; vgl. Abb. 3 und 4). Dieses „Strecken“ erreicht im Trab bereits fast den gleichen Umfang wie im Galopp. Der durch die Vorderbeine (Mittelstellung nach vorne, gegen die Bewegungsrichtung) induzierte „Bremsstoß“ wird mittels des vermehrten „Anschubs“ der

Hinterbeine (Mittelstellung nach hinten) kompensiert (Ausgleich der Integrale der Kraftkurven, *Witte und Lesch 1995*).

Gangart	Vorderextremität			Hinterextremität		
	Extrem kranial	Mittel	Extrem kaudal	Extrem kranial	Mittel	Extrem kaudal
Schritt	-32°	-13°	6°	-3°	7°	17°
Trab	-27°	-8,5°	10°	-12°	7°	26°
Galopp	-25°	-3,5°	18°	-10°	12,5°	35°
Galopp Gegenseite	-37°	-18,5°	0°	-9°	10,5°	30°

Tab 1: Winkelbewegungen der Pferdebeine
Bewegungen der „Äquivalenten Beinpendel“, berechnet anhand der von *Krüger 1937, 1938, 1939* publizierten „Stick figures“ unter Nutzung der morphologischen Daten aus *Springins und Leach 1986*. Positive Werte repräsentieren eine Auslenkung der Extremität nach kaudal.
Angular excursions of the „equivalent suspended pendula“ in various gaits, means and extremes of the cranial and the caudal excursions. Positive values represent rearward movements of the limbs. Corresponding to fig. 4.

Eine Vergrößerung des Raumgewinns pro Zyklus ist jedoch nur durch das Einfügen von Schwebphasen oder durch körperinternes Verschieben z. B. des Schultergelenkes (durch Translation im scapulo-thorakalen Gelenk oder durch Verlagerung der proximalen Drehachse der Vorderextremität auf den dorsalen Teil der Scapula) zu erreichen.

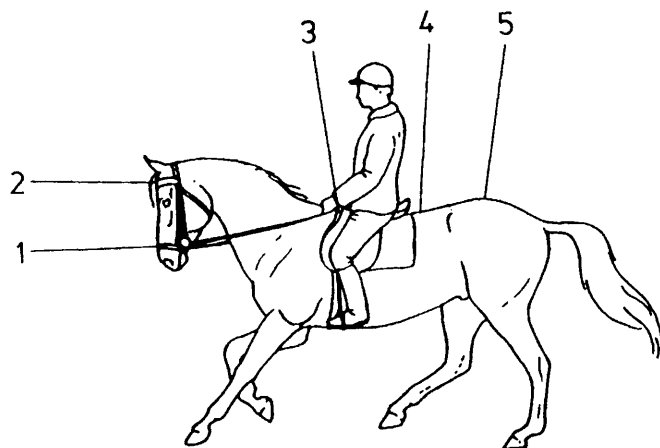


Abb. 6: Markierungen über Knochenpunkten für die Film- und Motographieanalyse zur Bestimmung der Körperstammbewegungen im Galopp (*Loitsch 1993, Abb. 13*)
1 = Nasenriemen 4 = Übergang BWS / LWS
2 = Stirnriemen 5 = Übergang LWS / Sacrum
3 = Widerrist

„Bone marks“ used in film analyses and motography to determine movements of the body stem (that is the complex of trunk, neck and head) in the gallop (*Loitsch 1993, fig. 13*).

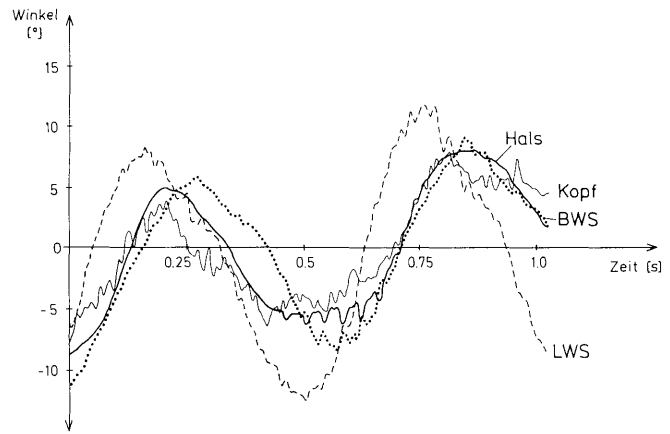


Abb. 7: Winkelbewegungen der Segmente des Körperstamms beim Galopp.
Die Werte sind auf den jeweiligen zeitlichen Mittelwert dieses Zyklus bezogen (*Loitsch 1993, Abb. 23*).
Angular excursions of the body segments in the gallop. The values are given as deviations from the average for one cycle, which thus is defined to be zero (cp. *Loitsch 1993, fig. 23*).

Pendelbewegungen des Körperstamms

Wenn auch die Beine des Pferdes in den schnellen Gangarten, besonders im Galopp, keine resonanten Pendelbewegungen ausführen, so könnte doch ein Pendelmechanismus des Körperstamms von Bedeutung sein: von diesem Vorbild ist ja offensichtlich die Erfindung des Schaukelpferdes (eines komplexen physischen Pendels) inspiriert worden. Nach Erhebungen von *Preuschhof et al. (1987)* spielt dieses Pendeln jedoch im Schritt und im Trab keine Rolle. Um zu überprüfen, ob dieses Phänomen im Galopp auftritt, wurden auf dem Fell eines Pferdes für den Körperstamm repräsentative Punkte (*Abb. 6*) markiert und ihre Bewegungen während dieser Gangart mit Hilfe von Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen (200 Bilder/s) und des Verfahrens der Motographie (Details s. *Loitsch 1993*; zu den Grenzen des Verfahrens s. *v. d. Bogert 1990*) analysiert. Es ergab sich, daß im Galopp alle Segmente des Körperstamms annähernd sinusförmige Winkelbewegungen um eine nicht definierbare Querachse des Tieres ausführen (bei Geschwindigkeiten von 5 m/s bis 7 m/s im Mittel $\pm 6^\circ$, *Abb. 7*).
Ob es sich dabei um Resonanzschwingungen handelt, konnte nicht definitiv überprüft werden: das Identifizieren von Pendelbewegungen des Körperstamms ist schwieriger als die oben beschriebene Analyse der Extremitätenbewegungen. Um die Bewegungen eines Pendels beschreiben zu können, müssen nicht nur die Bewegungen seiner Teilmassen (repräsentiert durch deren Schwerpunkte) ermittelt werden (beim Stamm des Pferdes ist dieses mehr oder minder genau möglich), sondern auch der Aufhängepunkt des Pendels, sein Widerlager, um das es hin und her schwingt, muß bekannt sein. Beim schwingenden Pferderumpf gibt es aber anders als bei den Beinen keinen offensichtlichen

Aufhängepunkt. Auf das irgendwo oberhalb des Rumpfes liegende Drehzentrum (den „virtuellen Aufhängepunkt“) muß mit mathematischen Methoden zurückgeschlossen werden (Abb. 8). Zur Ermittlung dieses in der Mechanik „Momentanpol“ genannten Punktes müssen die experimentell bestimmten Wegdaten nach einer schon fehlerbehafteten Gewichtung mit nur ungenau zu ermittelnden Massen- und Schwerpunktsdaten (Lebewesen sind keine starren Körper!) noch numerisch differenziert werden. Dieses ist rechnerisch zwar ohne Probleme durchführbar, aufgrund der Fehlerfortpflanzung sind die Ergebnisse aber kritisch zu werten. Wir beschränken daher hier die Überprüfung der Hypothese von den Pendelbewegungen des Pferderumpfes auf eine Kontrolle der zweiten bewährten Meßgröße für Pendelschwinger: der Winkelausschläge als Funktion der Zeit.

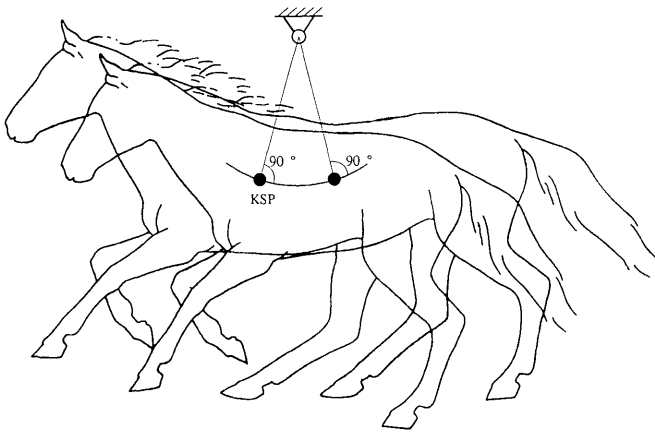


Abb. 8: Veranschaulichung des Begriffes „Momentanpol“ anhand der Bewegung des Pferderumpfes

Illustration of the „Momentanpol“, about which the horse's body stem (seen as a stiff element) rotates.

Die Hypothese, daß Pferde in ihren schnellen Gangarten Pendelschwingungen des Körperstamms als Energiesparmechanismen nutzen, kann daher mit den verfügbaren Daten nicht widerlegt werden und muß bis zum Beweis des Gegenteils weiterhin als gültig angesehen werden (vgl. *McMahon* 1977, S. 144).

Im zweiten Teil des Artikels wird über die Nutzung elastischer Mechanismen, sowohl in den Beinen als auch im Rumpf, zur Minimierung des Energiebedarfs bei schnelleren Gangarten berichtet.

Literatur

v. d. Bogert, A.J., v. Weeren, P.R. und Schamhardt, H.C. (1990): Correction for skin displacement errors in movement analysis of the horse. *J. Biomech.* 23, 97–101

Cavagna, G.A., Heglund, N.C. und Taylor, R. (1977): Mechanical work in terrestrial locomotion: two basic mechanisms for minimizing energy expenditure. *Am. J. Physiol.* 233, 243–261

Hildebrand, M. (1985): Walking and running. – In: *Hildebrand, M., Bramble, D.M., Liem, K.F. und Wake, D.B.* (Hrsg.): Functional verte-

brate morphology. Harvard University Press, Cambridge (Mass.) und London, 38–57.

Iida, H. und Yamamuro, T. (1987): Kinetic analysis of the center of gravity of the human body in normal and pathological gaits. *J. Biomech.* 20, 987–995

Krüger, W. (1937): Über den Bewegungsablauf an dem oberen Teil der Vordergliedmaße des Pferdes im Schritt, Trab und Galopp. *Tierärztliche Rundschau* 49(43), 809–826

Krüger, W. (1938): Über den Bewegungsablauf an dem oberen Teil der Hintergliedmaße des Pferdes im Schritt, Trab und Galopp. *Tierärztliche Rundschau* 34(44), 549–557

Krüger, W. (1939): Über den Bewegungsablauf am proximalen Teil der äußeren Vordergliedmaße des Pferdes beim Galopp. *Tierärztliche Rundschau* 5(45), 70–72

Loitsch, C. (1993): Kinematische Untersuchung über den Galopp von Pferden. (*Equus caballus*). Dissertation Bochum

Margaria, R., Cerretelli, P., Aghemo, P. und Sassi, G. (1963): Energy cost of running. *J. Appl. Physiol.* 18, 367–370

McMahon, T.A. (1977): Scaling quadrupedal galloping: Frequencies, stresses, and joint angles. In: *Pedley, T.J.* (Hrsg.): Scale effects in animal locomotion. Academic Press, London, 143–151

Mochon, S. und McMahon, T.A. (1980a): Ballistic walking. *J. Biomech.* 13, 49–57

Mochon, S. und McMahon, T.A. (1980b): Ballistic walking – an improved model. *Math. Biosci.* 52, 241–260

Preuschoft, H. (1989): The external forces and internal stresses in the feet of dressage and jumping horses. *Z. Säugetierk.* 54, 172–190

Preuschoft, H., Fritz, M., Hüllen-Kluge, K., Knisel, G. und Streitlein, I. (1987): Studien zu den Bewegungen von Sportpferden. Wissenschaftliche Publikation Nr. 9, FN-Verlag, Warendorf

Preuschoft, H., Lesch, C., Witte, H. und Loitsch, C. (1994a): Die biomechanischen Grundprinzipien der Gangarten, insbesondere des Galopps. In: *Knesevic, P.F.* (Hrsg.): Orthopädie bei Huf- und Klauentieren. Schattauer Verlag, Stuttgart

Preuschoft, H., Witte, H., Christian, A. und Recknagel, S. (1994a, b): Körpergestalt und Lokomotion bei großen Säugetieren. *Verh. Dtsch. Zool. Ges.* 87(2), 147–163

Preuschoft, H., Witte, H. und Demes, B. (1992): Biomechanical factors that influence overall body shape of large apes and man. In: *Matano, S., Tuttle, R.H., Ishida, H. und Goodman, M.* (Hrsg.): Topics of primatology. University of Tokyo Press, 259–289

Spriggins, E. und Leach, D. (1986): Standardised technique for determining the centre of gravity of body and limb segments of horses. *Equine Vet. J.* 18(1), 43–49

Weber, E. und Weber, W. (1836): Die Mechanik der menschlichen Gewerke. Dietrich, Göttingen

Winter, D.A. (1990): Biomechanics and motor control of human movement. John Wiley & Sons, N. Y.

Witte, H. (1992): Über mechanische Einflüsse auf die Gestalt des menschlichen Körpers. Dissertation Bochum

Witte, H. und Lesch, C. (1995): A computational model for the locomotion of horses. Im Druck

Witte, H., Preuschoft, H. und Recknagel, S. (1991): Human body proportions explained on the basis of biomechanical principles. *Z. Morph. Anthropol.* 78, 407–423

Dipl.-Ing. Dr. med. H. Witte

Cand. phys. C. Lesch

Prof. Dr. phil. nat. H. Preuschoft

Dr. rer. nat. C. Loitsch

Ruhr Universität Bochum

Abteilung für Funktionelle Morphologie

Geb. MA 0/44

D-44780 Bochum

Tel.: 02 34 – 7 00 39 70

Fax: 02 34 – 7 09 41 16