

Die beim Springen zwischen Pferdebein und Stangen auftretenden Kräfte

H. Preuschoft, C. Lesch, H. Witte und S. Recknagel

Abteilung für Funktionelle Morphologie
der Ruhr-Universität Bochum
Medizinische Fakultät

Einleitung

Im Sommer 1990 wurde durch eine Fernsehsendung auf RTL plus eine Diskussion um die Trainingsmethode des Barrens an Springpferden ausgelöst. In dieser Kontroverse wurde von Beginn an unterstellt, daß beim Anschlagen der Pferdebeine an die Stange hohe Kräfte auftreten, die beim Pferd zu erheblichen Schmerzen führen.

Als Reaktion auf die öffentliche Kritik hatte die Deutsche Reiterliche Vereinigung (FN) eine bestimmte Form des „aktiven“ Barrens, das „Touchieren“ mit Stangen von begrenzter Länge und beschränktem Gewicht, als unbedenklich angesehen.

Im Auftrag der FN wurden daher mit einem von uns entwickelten Meßsystem die beim „Touchieren“ wirkenden Kräfte experimentell erfaßt.

Die mechanischen Grundlagen des „Stoßvorganges“ sind durch die Überlegungen von *Denoth* und *Stüssi* (teilweise enthalten in *Lauk et al.*, 1991) bekannt.

Beim Barren handelt es sich um einen Stoßvorgang zwischen dem Pferdebein und der benutzten Stange, bei dem eine zeitveränderliche Kraft zur Wirkung kommt. Diese beschleunigt das oder die getroffenen Pferdebeine negativ, die Stange jedoch positiv. Sowohl die Pferdebeine als auch die Stange stellen in der Terminologie der Mechanik „Massen“ dar.

Wegen

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

(Newtonsche Grundgleichung mit F = Kraft, m = Masse, a = Beschleunigung, v = Geschwindigkeit)

ist die Kraft um so höher, je größer die zu beschleunigende Masse der Stange (das Gewicht) und je kleiner die Kontaktzeit zwischen Stange und Pferdebein ist.

Die Größe der Massen scheint leicht bestimmbar. Indessen sind sowohl die Beine mit dem restlichen Körper des Pferdes als auch die Stange über die Arme mit dem Körper des Ausbilders verformbar (in der Sprache der Mechanik „elastisch“) verbunden. Die Enge der Verbindung oder die Frage, welcher Einfluß vom Pferdekörper bzw. dem des Ausbilders auf die am „Stoß“ beteiligten „Stoßpartner“ aus-

Zusammenfassung

Die öffentliche Diskussion um das Thema „Barren“ schuf einen Handlungsbedarf für eine biophysikalische Analyse der mechanischen Belastungen des Pferdebeines durch die Barrstange. Die von der Deutschen Reiterlichen Vereinigung (FN) vorgeschriebene Beschränkung auf das Touchieren, das aktive Barren mit klar vorgegebenen Bewegungsabläufen, ergab eine gute Arbeitsgrundlage. Es konnte eine eindeutige Hypothese ausformuliert werden: „Die beim Barren in der vorgeschriebenen Form (in dieser Arbeit „Touchieren“ genannt) auftretenden mechanischen Belastungen lösen beim Pferd keine hohen (und deshalb schmerzhaften) Beanspruchungen aus.“ Aufgrund von unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführten Versuchen zur Überprüfung der Hypothese wurden Kräfte und Beschleunigungen gemessen bzw. errechnet: 1. zwischen den Beinen eines Pferdes und verschiedenen Barrstangen sowie zusätzlich einer Hindernisstange und 2. zwischen dem menschlichen Unterarm und einigen Barrstangen beim simulierten „Touchieren“ desselben. Die Materialeigenschaften und die Aussagekraft der erhobenen Daten wurden durch Laborversuche überprüft. Die schmerzphysiologische Bewertung der Versuchsergebnisse war Gegenstand der simultan abgewickelten Untersuchung von *Zeeb* 1991. Ergebnisse unserer Untersuchungen: es besteht eine positive Korrelation zwischen dem Gewicht der Stangen und den übertragenen Kräften. Sind die Barrstangen leichter als 0,8 [kg], liegen die Kraftwerte beim Touchieren des Pferdebeines unterhalb jener Werte, welche beim Schlag gegen den menschlichen Unterarm als schmerzhaft empfunden werden. Nimmt das Gewicht zu, steigen die Kraft- und Beschleunigungswerte deutlich an und streuen oberhalb einer Masse von 1,5 [kg] erheblich. Dieses weist auf eine ungenaue Führung und schlechte Handhabbarkeit schwerer Stangen hin. Alle für die Barrstangen ermittelten Kräfte liegen mindestens um den Faktor zwei unter den bei Kontakten mit Hindernisstangen (ohne „Reißen“) ausgetauschten Kräften.

The forces and accelerations which occur between the limbs of jumping horses and the poles or the obstacles

Public discussion about „Poling“ made necessary a biophysical analysis of the forces, acting between the legs of the horse and the pole. Based upon the rules for „correct poling“, proposed by the German FN, a hypothesis could be postulated: „Those forces, which act between the leg of the horse and the pole during correct poling, do not provoke stresses of an amount, high enough to give pain to the animal“. By this means conditions under which the experiments were confirmed are reproducible. We measured, respectively calculated forces and accelerations 1. acting among the legs of the horse and the pole (additionally we took the pole of an obstacle) and 2. those between the human forearm and the pole when simulating „poling“. Validity of data was proved by reference experiments. The aspects of pain and its physiology in the context of poling are discussed in more detail by *Zeeb* 1991, using additional data of simultaneous measurements. Results: Forces correlate positively with the weight of the pole(s). Poles having a mass of less than 0.8 [kg] lead to forces, which are below the limits of those which act between a human forearm and the pole during one painful strike of simulated poling. A remarkable increase of forces and accelerations results out of increase of weight. A pole's mass of more than 1.5 [kg] leads to forces strongly diverging from the average. In our opinion this fact shows that those poles cannot be used under satisfying control. All forces within the „pole-experiments“ are more than two times smaller than the forces we found in our measurements between leg and the heavy poles which are used to construct the obstacles.

geübt wird, ist nicht ohne weiteres zu beantworten. Ebenso ist nicht theoretisch vorhersagbar, welche Massenanteile des Pferdebeines bzw. der Stange maßgeblich hoch und welche vernachlässigbar gering beschleunigt werden. Nur ungenau vorausschätzbar ist aufgrund von Bewegungsanalysen (vgl. *Preuschoft et al.*, 1987) die Geschwin-

Tab. 1: Eigenschwingfrequenzen Ω und Abklingkonstanten k (Dämpfungsmaß) der Bambusstangen

Stange	Ω ($l=2,2$ m) [1/s]	Ω ($l=3,0$ m) [1/s]	k [1/s]
Kevlar	26	14,5	0,6
Kunststoff, leicht	24	13	0,4
Bambus, leicht	32,5 ¹	17,5 ¹	-
Bambus, schwer	36,5	19,5	2,0
Esche, leicht	19	10	0,8
Esche, schwer	24,5	13	1,0

¹ Die leichte Bambusstange ist bei den Versuchen in Neubulach längs gerissen. Ω_0 und k konnten daher nicht mehr experimentell bestimmt werden. Unter der Annahme gleichen Elastizitätsmoduls ist aber eine Abschätzung für Ω_0 aus den mit der schweren Bambusstange ermittelten Werten möglich: Ω_0 ist proportional zu \sqrt{l} . Das Flächenträgheitsmoment ist aus den Innen- und Außendurchmessern zu berechnen, die Masse ist bekannt.

digkeit eines Pferdebeines im Augenblick des Kontaktes. Über die „Dämpfung“ des Stoßes durch die Weichteile des Pferdebeines bzw. durch Nachgeben der Stange liegen noch weniger Informationen vor. Eine maßgebliche Größe hierfür könnte die Größe der Kontaktfläche darstellen. Alle diese Größen sind nur experimentell durch direkte Messung zu bestimmen.

Natürlich ist die Frage nach der Schmerzempfindung mit mechanischen Untersuchungen nicht zu beantworten. Zur Annäherung an dieses Problem wurden in Ergänzung der schmerzphysiologischen Untersuchungen (Zeeb, 1991) zwei zusätzliche Versuche unternommen:

- Schlag mit der Barrstange gegen eine Stelle des menschlichen Körpers, die von den Abmessungen und der Weichteilpolsterung den Verhältnissen am Pferdebein nahekommt. (Das menschliche Schienbein ist wegen der scharfen Vorderkante und des Fehlens einer Weichteilbedeckung nicht für einen Vergleich geeignet.) Dieser Schlag sollte mit dem gleichen Bewegungsablauf erfolgen wie beim Touchieren. Die betroffene Person kann ihren subjektiven Eindruck bei einem derartigen Versuch schlecht quantifizieren, es ist allenfalls eine Einordnung in einige wenige Kategorien von „nicht spürbar“ bis „sehr schmerzhaft“ möglich. Bei synchroner Messung der an der Barrstange auftretenden Kräfte bzw. Beschleunigungen ist so eine Grobabschätzung jener mechanischen Belastungen möglich, die zu schmerzhaften Beanspruchungen des Bewegungsapparates führen.

- Messen der Kräfte und Beschleunigungen, die beim

Anschlagen des Pferdebeines an die oberste Stange eines Hindernisses auftreten. Das Springen über bewegliche Hindernisse ist ja als Schutz vor Unfällen eingeführt worden. Offen blieb zunächst die Frage, was als „hohe“ Stoßbeanspruchung anzusehen ist. Die zweite Versuchsreihe sollte daher auch Referenzgrößen für die Beantwortung dieser Frage liefern.

Mit der Vorschrift der Reiterlichen Vereinigung war eine Hypothese im Sinne der Erkenntnistheorie gestellt:

„Die beim ‚Touchieren‘, dem Barren in der vorgeschriebenen Form, auftretenden mechanischen Belastungen lösen beim Pferd keine hohen (und deshalb schmerzhaften) Beanspruchungen aus.“

Diese Hypothese mußte nun im weiteren Verlauf verifiziert oder falsifiziert werden.

Methode

Bestimmung der beim Touchieren wirkenden Kräfte

Die Versuche wurden in der Tierklinik Neubulach an zehn erfahrenen Springpferden unter demselben Reiter durchgeführt. Das Touchieren erfolgte ebenfalls durch einen einzigen erfahrenen Ausbilder, der sich genau an die von der Reiterlichen Vereinigung vorgeschlagenen Vorschriften hielt.

Die verwendeten Stangen variierten hinsichtlich Material und Gewicht (vgl. Tab. 2, Spalte 1 und 2).

Kraft- und Beschleunigungsmessung an einem Kunststoffrohr

Um die beim Touchieren auftretenden Kräfte und Beschleunigungen direkt zu messen, wurde eine hohle Hochsprungstange aus Kevlar (Durchmesser $d = 36$ mm, Wanddicke $w = 2$ mm) gemäß Abb. 1 quer zersägt. Das „Griffende“ wurde mittels eines inliegenden Vierkantrohres aus Aluminium mit zwei in das kürzere „Touchierstück“ eingebauten Kraftaufnehmern verbunden. Diese Kraftaufnehmer messen mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen (DMS) die den Kräften proportionalen Verformungen von kleinen Biegebalken in zwei Richtungen. Zur Vermeidung von Veränderungen der Verformungseigenschaften der Kevlarstange waren diese und das Aluminiumrohr nur punktuell durch Schrauben verbunden.

Die Verschaltung der DMS-Brücken erfolgte so, daß der Einfluß der Lage des Kontaktpunktes zwischen dem Pferdebein und der Stange auf die Messung zu vernachlässigen war. Trotzdem wurde, insbesondere um Vergleichbarkeit mit den Messungen an den anderen Barrstangen zu gewähr-

Tab. 2: Meßergebnisse

63 Versuche Touchieren 11 Versuche Hindernis	Masse	Anzahl Versuche	Beschleunigung			Kraft		
			min.	mittel	max.	min.	mittel	max.
	Stangen	m [kg]	n	a [m/s ²]			F [N]	
Kevlar	1,39	17	266	1345	2271	166	294	693
Kunststoff, leicht	0,70	9	2107	2334	2399	228	253	260
Bambus, leicht	0,76	10	2176	2982	3710	245	335	417
Bambus, schwer	1,62	10	3031	3410	3906	762	858	982
Esche, leicht	1,66	3	2102	2454	2645	547	639	689
Esche, schwer	2,21	4	1215	3188	4456	420	1102	1541
Referenz (Schlag vor Arm)	0,70	10	494	1643	3030	54	178	328
Hindernisstange	16,90	11	33	330	667	1215	2003	3164

leisten, bei der Versuchsdurchführung auf eine möglichst konstante Lage dieses Kontaktpunktes geachtet. Gleichzeitig mit der Kraftmessung erfolgte eine Beschleunigungsmessung am „Touchierende“ der Stange (Abb. 2), ebenfalls in zwei Richtungen.

Beschleunigungsmessungen an verschiedenen Barrstangen

Analog zur Beschleunigungsmessung an dem Kevlarrohr wurden an fünf weiteren Barrstangen aus anderen Materialien (eine weitere Hochsprungstange [d. h. ein Rohr aus Kunststoff], zwei Bambusstangen unterschiedlicher Masse, zwei Eschenstangen unterschiedlicher Masse) die am Touchierende auftretenden Beschleunigungen in zwei Raumrichtungen gemessen. Aus den gewonnenen Werten wurden die zugehörigen Kräfte durch Vergleich mit den Meßergebnissen für das Kevlarrohr errechnet (vgl. unten).

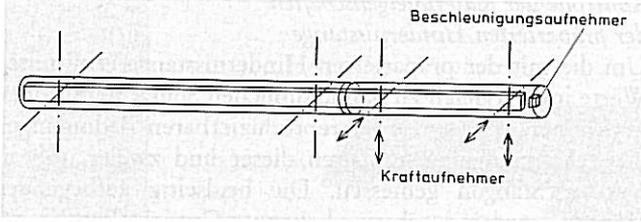


Abb. 1: Ausrüstung einer Barrstange mit 2 Kraftaufnehmern und einem Beschleunigungsaufnehmer. Das kurze (rechte) Ende der Stange ist nur über ein innen liegendes Vierkantröhr mit dem längeren (linken) Ende verbunden. Die Auslenkungen des kurzen Endes werden mittels DMS in zwei Raumrichtungen (Pfeile) gemessen.

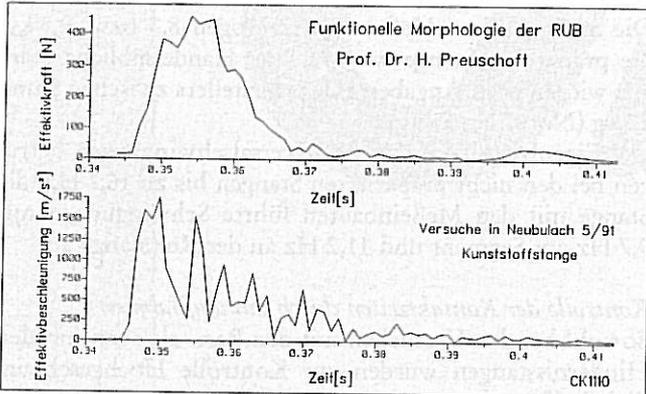


Abb. 2: Versuchsergebnis: oben: die Kräfteinwirkung auf die Barrstange im Verlauf der Zeit, unten: die Beschleunigungen der Barrstange im Verlauf der Zeit. Wir haben das absolute Maximum der Kraftkurve und den ersten Spitzenwert der Beschleunigung ausgewertet, weil der zweite und alle weiteren Werte durch die Eigenschwingungen der Stange bedingt oder überlagert sind. In beiden Fällen sind die in zwei Raumrichtungen gemessenen Werte zu einer „effektiven“ Gesamt-Kraft bzw. -Beschleunigung zusammengesetzt.

Auswertungsverfahren und Vergleichsmethoden der Meßdaten für das Touchieren

Grundüberlegung

Der Stoßvorgang beim Barren regt die Stange zu gedämpften Schwingungen an.

Für die gedämpfte Schwingung gilt:

$$x(t) = x_0 \cdot \cos(\Omega \cdot t - \varnothing) \cdot e^{-(k \cdot t)}$$

$$\varnothing(t = 0) = 0$$

Die Auslenkung $x(t)$ am Ende einer Barrstange (Befestigungspunkt der Beschleunigungsaufnehmer) ist abhängig von der Anfangsauslenkung x_0 , ändert sich periodisch gemäß einer Cosinusschwingung (Schwingfrequenz Ω und

Phasenverschiebung \varnothing , hier gleich 0) und nimmt nach einer Exponentialfunktion (mit der Abklingkonstanten k) ab. Die vereinfachte Gleichung lautet also:

$$x(t) = x_0 \cdot \cos(\Omega \cdot t) \cdot e^{-(k \cdot t)}$$

Die Geschwindigkeit des Punktes am Stangenende entspricht der ersten zeitlichen Ableitung der Auslenkung

$$x'(t) = x_0 \cdot [\cos(\Omega \cdot t) \cdot (-k) \cdot e^{-(k \cdot t)} + (-\Omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)) \cdot e^{-(k \cdot t)}]$$

$$- x_0 \cdot e^{-(k \cdot t)} \cdot (k \cdot \cos(\Omega \cdot t) + \Omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)),$$

die Beschleunigung ihrer zweiten Ableitung nach der Zeit:

$$x''(t) = -x_0 \cdot [e^{-(k \cdot t)} \cdot (-k \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega \cdot t) - \Omega^2 \cdot \cos(\Omega \cdot t))] + [(-k) \cdot e^{-(k \cdot t)} \cdot (k \cdot \cos(\Omega \cdot t) + \Omega \cdot \sin(\Omega \cdot t))] = x_0 \cdot e^{-(k \cdot t)} \cdot [(k^2 - \Omega^2) \cdot \cos(\Omega \cdot t) + 2 \cdot k \cdot \Omega \cdot \sin(\Omega \cdot t)].$$

Betrachtet man den Grenzfall sehr großer Werte der Eigenfrequenz bei geringer Dämpfung (kleine Abklingkonstante k)

$$\Omega \gg k,$$

so vereinfacht sich die Gleichung für die Beschleunigung zu $x''(t) \approx x_0 \cdot e^{-(k \cdot t)} \cdot \Omega^2 \cdot \cos(\Omega \cdot t) = \Omega^2 \cdot x(t)$,

$x(t)$ ist in diesem Fall proportional zu $x''(t)/\Omega^2$.

Es wurde daher experimentell geprüft, ob tatsächlich die Eigen-Kreisfrequenz Ω der Schwingung wesentlich größer als das Dämpfungsmaß k ist.

Unter der Annahme, daß sich die verschiedenen Stangen beim Barren wie einseitig eingespannte Biegebalken verhalten, wurde das Schwingungsverhalten der Barrstangen unter reproduzierbaren Bedingungen ermittelt (Abb. 3).

Durch eine in konstantem Abstand von der Einspannung zusätzlich angehängte Gewichtskraft $G = 100 \text{ N}$ wird eine Auslenkung x bewirkt. Nach Durchschneiden des verbindenden Fadens setzen gedämpfte Schwingungen ein. Die hierdurch bewirkten Beschleunigungen am Ende der Stangen werden gemessen.

Aus diesen Werten lassen sich Ω und k für die Gesamtlänge sowie für eine „reduzierte“ Stangenlänge berechnen.

Tatsächlich ist die Frequenz Ω wie erwartet sehr groß gegenüber der Dämpfung k . Somit ist die Annahme berechtigt, daß die Dämpfung vernachlässigt werden kann („Grenzfallannahme“).

Meßwertanalyse für das Kevlarkunststoffrohr

Die gemessenen Kräfte F und Beschleunigungen a erfüllen die Gleichung $F = m \cdot a$ nicht, solange die gesamte Masse der Stange eingesetzt wird. Da aber – wegen der elastischen Verformung – nur ein Teil der Stangenmasse von der Beschleunigung erfaßt wird, haben wir aus den Kraft- und

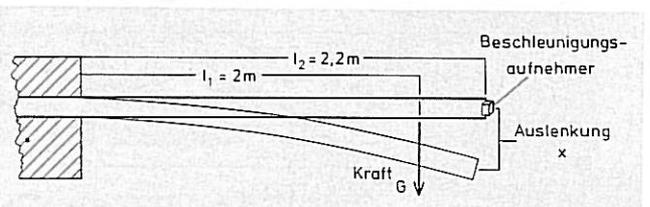


Abb. 3: Die elastische Verbiegung der auf einer Seite fest eingespannten Barrstange führt bei Einwirkung einer Kraft G zu einer Auslenkung des freien Endes. Beim Beenden der Kräfteinwirkung schnellt die Stange zurück und schwingt nach. Dieses Schwingen mit der „Eigenfrequenz“ der Stange wird mit dem Beschleunigungsaufnehmer gemessen.

Beschleunigungswerten denjenigen Massenanteil errechnet, der tatsächlich beschleunigt worden ist („reduzierte Masse“).

Es wird also angenommen, daß nur ein Teil der Stangenmasse (m_{red}) gegenüber der Reststange bewegt wird und die Reststange dieses Teilstück elastisch festhält. Ein Vergleich mit der „Federgleichung“ des einseitig eingespannten Biegebalkens zeigt die Äquivalenz der beiden Betrachtungsweisen.

Kräftegleichgewicht an der reduzierten Masse:

$$F(t) = m_{\text{red}} \cdot x''(t) = m_{\text{red}} \cdot \Omega^2 \cdot x(t)$$

$$\Omega^2 = c/m_{\text{red}} \text{ (Feder-Masse-Schwinger)}$$

$$F(t=0) = c \cdot x(t=0) = c \cdot x$$

Barrstange im Augenblick des Stoßvorganges = Einseitig eingespannter Biegebalken:

$$x = F \cdot l^3 / (3 \cdot E \cdot I)$$

$$\rightarrow F = \{(3 \cdot E \cdot I) / l^3\} \cdot x = c \cdot x$$

(„Federgleichung“ des einseitig eingespannten Biegebalkens)

Wie oben und in Tabelle 1 gezeigt, kann die Dämpfung also vernachlässigt werden.

Meßwertanalyse für die übrigen Barrstangen

Da sich die verwendeten Stangen in ihrem Schwingungsverhalten ähneln (siehe Tabelle 1), lassen sich aus dem Massenverhältnis zwischen der Kevlar- und der jeweils betrachteten Stange sowie mit der „reduzierten Masse“ die auftretenden Kräfte rechnerisch bestimmen.

Aus

$$F_{\text{Kevlar}} = m_{\text{red}} \cdot a_{\text{Kevlar}}$$

folgt

$$m_{\text{red}} = F_{\text{Kevlar}} / a_{\text{Kevlar}}$$

Die Kräfte werden aus den gemessenen Beschleunigungen berechnet:

$$F_{\text{(Stange i)}} = \{F_{\text{Kevlar}} / a_{\text{Kevlar}}\} \cdot$$

$$\{m_{\text{(Stange i)}} / m_{\text{Kevlar}}\} \cdot a_{\text{(Stange i)}}$$

Bestimmung der zwischen Pferd und Hindernisstange wirkenden Kräfte

Kraft- und Beschleunigungsmessung an der Hindernisstange

Eine handelsübliche Hindernisstange wurde im mittleren Drittel auf 1 m Länge in ihrer Längsachse gehälfet (Abb. 4). Das herausgeschnittene Segment wurde über Zweiachsen-Kraftaufnehmer wieder mit der Stange verbunden. Die elektrische Beschaltung der Kraftaufnehmer (Biegebalken mit DMS) erfolgte so, daß der Einfluß der Lage

des Auftreffpunktes des Pferdebeins auf dem 1-m-Segment zu vernachlässigen war.

Durch das Herauslösen des Segments aus der Hindernisstange wird deren Flächenträgheitsmoment auf die Hälfte reduziert. Zur Kompensation des Verlustes an Steifigkeit wurde sie auf der vom Pferd abgewandten Seite durch eine dünne Aluminiumhalbschale verstärkt. Zur Kontrolle der Kraftmessung, zur Analyse von Schwingungsvorgängen und zur Ermittlung von Laufzeiten (Totzeitgliedern) im Gesamtsystem wurde auch eine Beschleunigungsmessung an der Stange selbst (nicht am herausgeschnittenen Segment) durchgeführt. Sie erfolgte gleichzeitig mit der Kraftmessung in der Stangenmitte und in zwei Ebenen parallel zur Kraftmessung.

Kontrolle der Materialeigenschaften

der präparierten Hindernisstange

Um die mit der präparierten Hindernisstange ermittelten Werte im Vergleich zu handelsüblichen Stangen einordnen zu können, wurden unter reproduzierbaren Bedingungen die Schwingungseigenschaften dieser und zweier unbearbeiteter Stangen gemessen. Die beidseitig aufliegenden Stangen wurden durch eine bekannte Gewichtskraft in der Mitte ausgelenkt. Bei abruptem Wegfall der Auslenkkraft führten die Stangen gedämpfte Schwingungen aus, deren Frequenzen durch Messen der Beschleunigungen in der Stangenmitte bestimmt wurden.

Die Stangen ohne Meßeinbauten wogen 8,3 bzw. 9,3 kg, die präparierte Stange wog 16,9 kg. Handelsübliche Stangen wiegen nach Angaben eines Herstellers zwischen 8 und 21 kg (Norm bei 15 kg).

Die Eigenfrequenzen für Transversalschwingungen betragen bei den nicht präparierten Stangen bis zu 16,7 Hz, die Stange mit den Meßeinbauten führte Schwingungen mit 9,7 Hz am Segment und 11,2 Hz an der Reststange aus.

Kontrolle der Kontaktzeiten durch Filmaufnahmen

Sowohl bei den Versuchen mit den Barr- als auch mit den Hindernisstangen wurden zur Kontrolle Hochgeschwindigkeitsfilmaufnahmen mit 300 Bildern pro Sekunde angefertigt. Auswertbare Aufnahmen liegen von zwei „Taxierfehlern“ (d. h. Berührungen der Hindernisstangen mit den Pferdebeinen) und von 18maligem Touchieren vor.

Die Einzelbildauswertung ergab, daß der Kontakt zwischen Stange und Pferdebein von einem Bild zu dem folgenden oder zum übernächsten erfolgte. Nach dem zweiten oder (manchmal) dritten Bild war keine Veränderung der Kontaktflächen zwischen Pferdebein und Stange mehr zu erkennen. Das entspricht einer Kontaktzeit von 3 bis 6, maximal 9 Millisekunden [ms]. Den Meßkurven zufolge stiegen die Kräfte jedoch bereits innerhalb von 1 bis 2 ms auf einen ersten Spitzenwert an, und erreichten nach bis zu 9 ms das absolute Maximum. Danach oszillierten die Beschleunigungen mit hohen Frequenzen weiter, wobei häufig kein Kontakt zum Pferdebein mehr bestand.

Ermittlung der Kontaktflächen an der Hindernisstange

In den Versuchen mit der Hindernisstange wurde mit frischer, wasserlöslicher, weißer Farbe die Größe und die

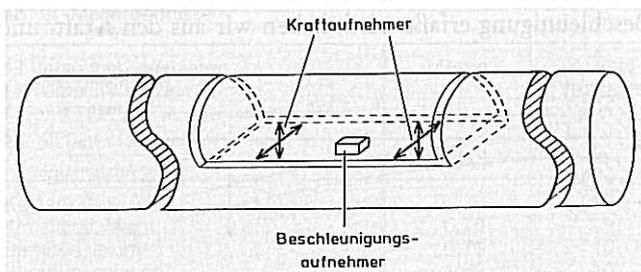


Abb. 4: Ausrüstung der Hindernisstange mit zwei Kraftaufnehmern und einem Beschleunigungsaufnehmer. Alle drei Meßgeräte messen in zwei Richtungen des Raumes: senkrecht zur Ebene des Längsschnitts (auf dem Stangenquerschnitt radial) und parallel zur Ebene des Längsschnitts (auf dem Stangenquerschnitt tangential).

Lage der Kontaktfläche zwischen Pferdebein und Stange bestimmt. Die so ermittelten Flächen lassen jedoch nur eine Aussage über die Maximalfächen zu, denn es war nicht zu kontrollieren, ob die tatsächliche Kontaktfläche im Augenblick des Stoßes nicht wesentlich kleiner war und ob zusätzliche Farbe erst im weiteren Verlauf der Bewegung abgestreift wurde.

Aus dem Quotienten von gemessener Kraft „F“ und Kontaktfläche „A“ läßt sich der zwischen Pferd und Stange aufgetretene Druck abschätzen.

$$p = F / A$$

Bei der Quotientenbildung Druck $p = \text{Kraft } F / (\text{Maximal-})$ Fläche A wurde eine gleichmäßige Druckverteilung über die gesamte Kontaktfläche angenommen. Berühren sich aber zwei konvexe Körper, wie es hier der Fall war, so ist je nach deren elastischen Eigenschaften eine Drucküberhöhung im Zentrum der Kontaktfläche festzustellen („Hertz-sche Pressung“).

Die unter der Annahme gleichmäßiger Druckverteilung berechneten Werte geben daher die Mindestdrucke beim Stoß Pferdebein – Stange wieder, die tatsächlichen Drucke liegen aller Wahrscheinlichkeit nach höher.

Ergebnisse

Beim Touchieren auftretende Kräfte

In $n = 22$ Versuchen wurden die Reaktionskräfte zwischen dem Pferdebein und der 1,39 [kg] schweren Kevlarstange und die durch sie hervorgerufenen Beschleunigung ermittelt. Es ergaben sich folgende Werte (siehe auch Abb. 5):

Beschleunigungen:	Durchschnitt	= 1.412 [m/s ²]
	Minimalwert	= 266 [m/s ²]
	Maximalwert	= 2.399 [m/s ²]
Kräfte:	Durchschnitt	= 363 [N]
	Minimalwert	= 166 [N]
	Maximalwert	= 796 [N]

Bei den Versuchen mit der Kevlarstange konnten Beschleunigungen nur bis 2.399 [m/s²] registriert werden. Daher wurden für die Bestimmung der im weiteren verwendeten Rechenfaktoren nur Datensätze mit einer geringeren

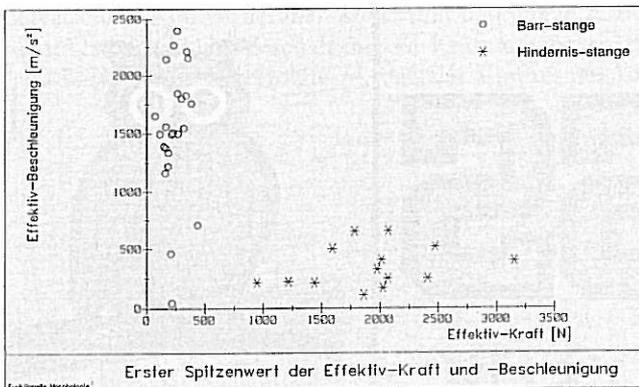


Abb. 5: Versuchsergebnis: senkrechte Achse: effektive Beschleunigungen; waagerechte Achse: effektive Kräfte, die vom Pferdebein auf die Stange ausgeübt werden. Die leichten Barrstangen werden hoch beschleunigt, ohne daß große Kräfte auftreten; die schwere Hindernisstange wird auch durch hohe Kräfte nicht sehr beschleunigt.

Beschleunigung herangezogen ($a < 2399$ [m/s²]). Für diese ergaben sich aus $n = 17$ Versuchen die Mittelwerte:

Beschleunigung = 1.345 [m/s²]

Kraft = 294 [N]

Aus diesen Daten wurde die im Methodenteil erläuterte „reduzierte Masse“ ermittelt.

Es ergab sich für m_{red} :

$$m_{\text{red}} = 0,22 \text{ [kg]}$$

Aus den für die verschiedenen Barrstangen gemessenen Beschleunigungen wurden die zugehörigen Kräfte nach

$$F_{(\text{Stange } i)} = \{F_{\text{Kevlar}} / a_{\text{Kevlar}}\}^* a_{(\text{Stange } i)}$$

$$\{m_{(\text{Stange } i)} m_{\text{Kevlar}}\}^* a_{(\text{Stange } i)}$$

bestimmt.

Es ergaben sich für die einzelnen Stangen die in Tabelle 2 dargestellten Werte.

Um die erhaltenen Zahlenwerte beurteilen zu können, wurden $n = 10$ Referenzversuche mit der leichten Kunststoffstange gegen die Unterarme von 3 Versuchspersonen durchgeführt. Hierbei wurde ein Schlag, der mit der Kraft $F = 328$ [N] allein die Ulnakante traf, von der Versuchsperson als „an der Schmerzgrenze liegend“ empfunden. Alle anderen Schläge riefen keine Schmerzempfindung hervor.

Meßergebnisse für die Hindernisstange

Durch Umbau und Gestaltung des Hindernisses sowie reiterliche Einwirkung wurden „Springfehler“ provoziert. In allen während der Versuche beobachteten Fällen erfolgte der Kontakt mit den Vorderbeinen in der ersten (Anstiegs-) Hälfte der Sprungkurve (vgl. Preuschoft et al., 1987). In dieser Phase bewegen sich die Pferdebeine etwa mit der Geschwindigkeit des Massenmittelpunktes gegenüber dem Hindernis, also mit 5 bis 7 m/s. In der zweiten oder Abstiegs-Hälfte der Sprungkurve werden die Vorder- und Hinterbeine nach vorn geschwungen und bewegen sich damit schneller als der Massenmittelpunkt des Pferdes. Bei Kontakten in der zweiten Phase sind infolgedessen höhere Kräfte zu erwarten.

Die Stange blieb bei allen gemessenen Stoßvorgängen liegen. Beim letzten der untersuchten Springfehler wurde sie aus ihren Auflagern gehoben. Die hierbei auftretenden Kräfte lagen außerhalb des bis dahin ausreichenden Meßbereichs. Eine Wiederholung der Kraftmessung beim „Reißen“ war nicht möglich (Abreißen der elektrischen Anschlüsse).

Tabelle 2 zeigt die zwischen Pferdebein und Hindernisstange gemessenen Kräfte.

Wegen der Korrelation zwischen den Stangenmassen und den auftretenden Kräften werden bei handelsüblichen Hindernisstangen

$$8/16,9 = 0,47 \text{ mal bis } 21/16,9 = 1,24 \text{ mal}$$

bei der „Normstange“ von 15 [kg]

$$15/16,9 = 0,89 \text{ mal}$$

so große Kräfte auftreten. Bei nassen Stangen, die mit Wasser vollgesogen sind, könnten die Kräfte noch höher ausfallen.

Die von uns gemessenen Kräfte liegen demnach im mittle-

ren Bereich derjenigen Kräfte, die an den im Turnierbetrieb verwendeten Stangen auftreten.

Mit dem im Methodenteil beschriebenen Verfahren wurden die maximalen Kontaktflächen abgeschätzt und die auftretenden Mindestdrucke errechnet. Aus $n = 23$ Messungen ergaben sich die Flächen und Drucke zu:

Hinderniskontakte $n = 23$

Flächen $A_{\text{mittel}} = 9,75 \text{ [cm}^2\text{]}$

$A_{\text{min}} = 3,14 \text{ [cm}^2\text{]}$

$A_{\text{max}} = 17,67 \text{ [cm}^2\text{]}$

Drucke $p_{\text{mittel}} = 2,05 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

$p_{\text{min}} = 0,69 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

$p_{\text{max}} = 10,08 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

Wie schon ausgeführt, liefert dieses Verfahren nur Schätzwerte der Mindestdrucke, da eine homogene Druckverteilung angenommen wurde.

Vergleich der ermittelten Kräfte

Ein Vergleich zwischen den bei den verschiedenen Stangen ermittelten Kräften unter Einbeziehung der Versuche am Menschen ergab eine positive Korrelation zwischen dem Gewicht der Stangen und den auftretenden Kräften (Abb. 6).

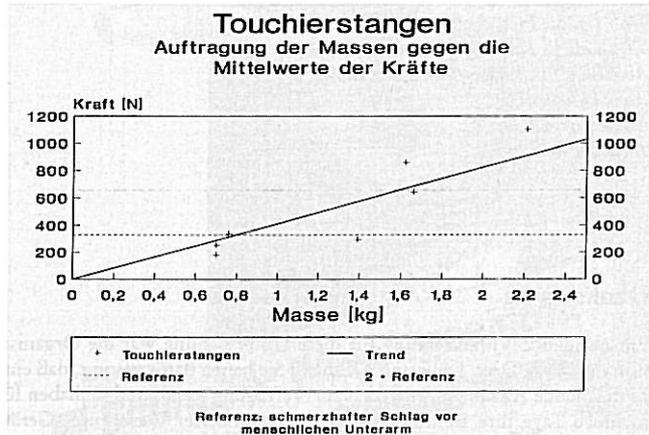


Abb. 6: Versuchsergebnis: Die Kraft, die zwischen Pferdebein und Stange wirkt, ist der Masse der Stange proportional. Außer den Meßwerten ist die Regressionsgerade eingezeichnet (dicke Linie). Die Kraft, die bei einem schmerzhaften Schlag gegen einen menschlichen Unterarm gemessen wurde, ist durch die gestrichelte Linie bezeichnet, der doppelte Wert durch die fein punktierte Linie.

Außer der Masse scheint auch die Handhabbarkeit der Barrstangen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß zu haben, obwohl (oder vielleicht gerade weil?) bei den Versuchen auf einen möglichst konstanten Bewegungsablauf „streng nach Vorschrift“ geachtet wurde. In den Abbildungen 7 und 8 werden die erhaltenen Werte für die verschiedenen Stangen miteinander verglichen, wobei in Abb. 7 die Werte der Kräfte in [N] bzw. [kp] ($1 \text{ kp} \approx 10 \text{ N}$) angegeben worden sind. Die Streuung der Werte ist erkennbar begrenzt, die Unterschiede zwischen den einzelnen Stangen sind statistisch signifikant (t-Test nach Student [Gosset]).

In der Abb. 8 werden die Kräfte als Vielfache des schmerzhaften Schlages im Referenzversuch (328 N) aufgetragen. Die durch die leichteren Stangen erzeugten Kräfte (leichte Bambus-, beide Kunststoffstangen) liegen sehr dicht bei die-

ser Größe, die übrigen deutlich darüber. Die Kräfte, die beim Anschlagen an der Hindernisstange im Mittel auftreten, sind etwa sechsmal so groß wie jene beim schmerzhaften Schlag mit der Barrstange gegen den menschlichen Unterarm.

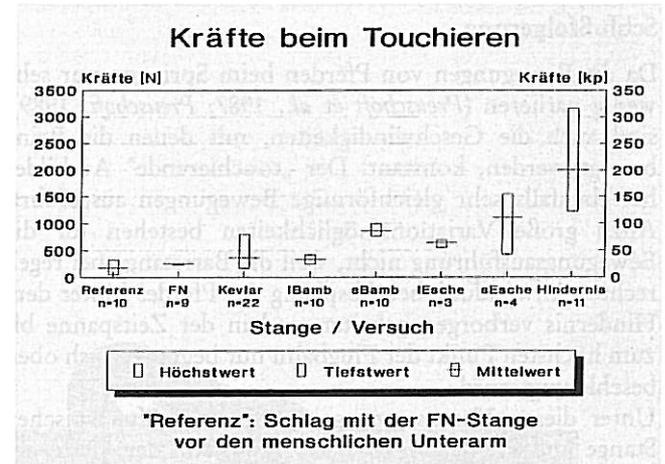


Abb. 7: Versuchsergebnis: Die bei den Kontakten mit den verschiedenen Stangen gemessenen Kräfte angegeben in Newton (N links) und in Kilopond (kp rechts). Man beachte die Streuung der Meßwerte.

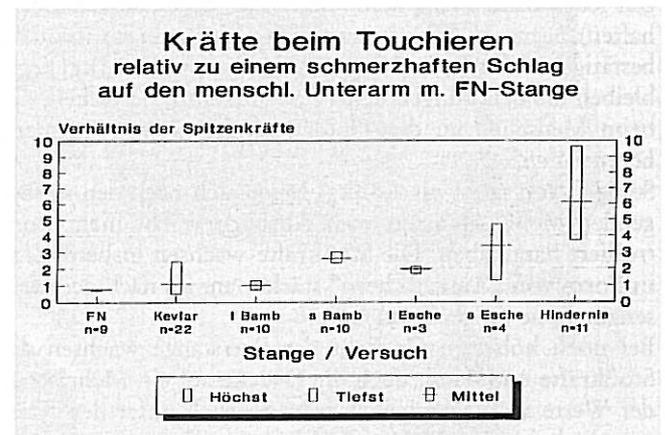


Abb. 8: Versuchsergebnis: Die bei den Kontakten mit den verschiedenen Stangen gemessenen Kräfte, angegeben in Vielfachen eines schmerzhaften Schlages auf den menschlichen Unterarm. Die Meßwerte streuen wie in Abb. 7.

Die größere Streuung der Ergebnisse für diese Stange (relative Kraftwerte von 3,7 bis 9,6) sind durch die Variabilität des Bewegungsablaufs gegenüber dem Hindernis sowie durch die infolgedessen unterschiedlichen Kontaktflächen zu erklären. Die beim ersten Stangenkontakt anfallenden (Mindest-)Drucke von $0,69 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ($6,9 \text{ [kp/cm}^2\text{]}$) bis $10,08 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ ($100,8 \text{ [kp/cm}^2\text{]}$) sind von der Kontaktstelle am Pferdebein abhängig (vgl. Methoden). Es sollte allerdings beachtet werden, daß die Drucke beim Stangenkontakt im Kernbereich (Hertzische Pressung, siehe Methodenteil) vermutlich höher liegen als der angegebene Wert. Beim Pferd wie beim Menschen treten unter physiologischen Bedingungen in Gelenken und in den Knochen sowohl in Bewegung als auch bereits in Ruhe oft höhere Werte auf (Preuschoff, 1989). Für das Aufsetzen der menschlichen Ferse beim Laufen (zweifache Erdbeschleunigung) wurden Drucke von etwa $2 \text{ [N/mm}^2\text{]}$

([20 kp/cm²]) errechnet. Das ist $\frac{1}{5}$ des oben errechneten Maximalwertes. Beim Kontakt Pferdebein-Hindernisstange erfolgt die Kräfteinleitung weder an einer für die

Übertragung von Druckkräften ausgelegten Körperstellen, noch in der physiologisch dafür vorgesehenen Richtung.

Schlussfolgerung

Da die Bewegungen von Pferden beim Springen nur sehr wenig variieren (Preuschoft et al., 1987; Preuschoft, 1989), sind auch die Geschwindigkeiten, mit denen die Beine bewegt werden, konstant. Der „touchierende“ Ausbilder hat ebenfalls sehr gleichförmige Bewegungen ausgeführt. Allzu große Variationsmöglichkeiten bestehen für die Bewegungsausführung nicht, weil die Barrstange bei regelrechter Anwendung bei Absprung des Pferdes hinter dem Hindernis verborgen gehalten und in der Zeitspanne bis zum höchsten Punkt der Flugbahn nur begrenzt nach oben beschleunigt wird.

Unter diesen Voraussetzungen sind die Kräfte zwischen Stange und Pferdebein in erster Linie von der Masse der Touchierstange abhängig. Die eingangs aufgestellte Hypothese „Die beim Touchieren, dem Barren in der vorgeschriebenen Form, auftretenden mechanischen Belastungen lösen beim Pferd keine hohen (und deshalb schmerzhaften) Beanspruchungen aus“ läßt sich demnach insofern bestätigen: Solange die Masse der Stange unter 0,8 [kg] liegt, bleiben die Belastungen beim Touchieren in Bereichen, die beim Menschen an der Unterarmkante keinen Schmerz hervorrufen.

Stangen von mehr als 1,5 [kg] lassen sich nach den vorliegenden Meßergebnissen vom Ausbilder nicht mehr kontrolliert handhaben. Die Stoßkräfte wachsen insbesondere in Form von „Ausrutschen“ stärker an, als nach der Massenzunahme zu erwarten wäre.

Bei noch höherem Gewicht der Barrstange wachsen die Stoßkräfte und damit auch die Drucke auf ein Mehrfaches der Werte an, liegen jedoch stets deutlich unter den Kräften, die beim Anschlagen an die oberste Stange eines Hindernisses auftreten.

Erfolgt der Kontakt zwischen Stange und Pferdebein in der zweiten Hälfte der Flugbahn (während die Beine vorgeschwungen werden), oder wird die Stange entgegen der Bewegungsrichtung des Pferdes geschlagen, so fallen die Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen Stange und Pferdebein höher aus, und die Stoßkräfte werden entsprechend höher. Beides ist infolgedessen zu unterlassen.

Literatur

- Auer, J., Lauk, H. D., Plocki, K. A. v. und Zeeb, K. (1990): Stellungnahme zum Thema „Barren“ (unveröffentlicht).
 Deutsche Reiterliche Vereinigung (1990): Stellungnahme vom 23. 8. 1990 in: FN-Information 8.
 Lauk, H. D., Auer, J., und Plocki, K. A. v. (1991): Zum Problem „Barren“ – Überblick: Biomechanische Berechnungen und Verhaltensbeobachtungen. Pferdeheilkunde 4, 225–235.
 Preuschoft, H. und Fritz, M. (1977): Mechanische Beanspruchungen im Bewegungsapparat von Springpferden. Fortschritte der Zoologie 24, 75–98.
 Preuschoft, H. (1985): On the quality and magnitude of mechanical stresses in the locomotor system during rapid movements. ZMA 16, 245–261.
 Preuschoft, H., Fritz, M., Hüllen-Kluge, K., Knisel, G. und Streitlein, J. (1987): Studien zu den Bewegungen von Sportpferden. NF-Verlag, Warendorf.
 Preuschoft, H. (1989): The external forces and internal stresses in the feet of dressage and jumping horses. Z. Säugetierkunde 54, 172–190.
 Zeeb, K. (1991): in Vorbereitung.

Prof. Dr. H. Preuschoft
 Medizinische Fakultät
 Abteilung für funktionelle Morphologie
 Ruhr-Universität
 Universitätsstraße 150
 4630 Bochum 1

Danksagung

Entscheidende Voraussetzung für diese Untersuchung war die Organisation durch die Dres. Lauk und v. Plocki. Sie haben dafür gesorgt, daß eine hinreichende Anzahl von Pferden zur Verfügung stand, und sie haben für mehrere Tage ihre Reithalle sowie die tausenderlei Werkzeuge, Geräte und Kleinigkeiten bereitgestellt, ohne die komplizierte Versuche nicht möglich sind. Auch Herrn Prof. Auer, Zürich, und Herrn Dr. Zeeb, Freiburg, die bei der gleichen Gelegenheit ergänzende Versuche und Beobachtungen zum gleichen Problemkreis angestellt haben, sind wir für ihre im Verlauf der Versuche immer wieder erneuten Ratschläge und ihre konstruktive Kritik sehr dankbar. Unter den nicht ganz einfachen Bedingungen ist es dem Filmteam des Instituts für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen gelungen, die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in guter Qualität zu drehen, die einen wesentlichen Teil der Studie darstellen. Die beträchtlichen Kosten für die Versuche hat die Deutsche Reiterliche Vereinigung Warendorf getragen.