

Bewegungsanalyse bei Springpferden mit Hilfe der Computerkinematographie

P.H. Falaturi¹, E.F. Reininger² und H. Preuschoff¹

¹ Ruhr-Universität-Bochum, Abteilung für Funktionelle Morphologie; ² LMU-München, Tierärztliche Fakultät, Chirurgie, Pferdeabteilung

Zusammenfassung

Mit Hilfe der Computerkinematographie wurden mehr als 300 Sprünge von 5 verschiedenen Springpferden vermessen und analysiert. Während des Anlaufes nahm die Bewegungsfrequenz zu, der letzte Galoppzyklus vor dem Sprung war deutlich verkürzt und ging zum Teil ohne zwischengeschaltete Flugphase in den Sprung über. Der Absprung erfolgte nur scheinbar beidfüßig. Das innere Bein wurde kurz vor dem äußeren aufgesetzt und erfuhr deutlich höhere Beschleunigungen. Es gab individuen-spezifische Abweichungen von diesen Regeln. Die größten Beschleunigungsspitzen traten an den Hinterbeinen auf. Dort waren sie beim Aufsetzen zum Absprung und bei dem Aufsetzen zur Landung besonders hoch. Die Beschleunigungsspitzen an den Vorderbeinen waren geringer. Die höchsten Werte gab es hier bei dem Aufsetzen zur Landung und in dem folgenden Galoppzyklus, der stark verkürzt war und auf das Landen der Vorderbeine ohne Flugphase folgte. Die Reihenfolge, in der die Vorderbeine zur Landung aufsetzten entschied, ob das Pferd im Innen- oder Außengalopp weiter lief. Drei der getesteten Pferde landeten grundsätzlich im „Rechtsgalopp“, wechselten „auf der linken Hand“ aber nach drei bis vier Galoppzyklen in den „Linksgalopp“. Zwischen dem gerittenen und reiterlosen Pferd gab es grundsätzliche Unterschiede. Der kontrollierende Einfluss des Reiters auf die Pferdebewegung konnte nachgewiesen werden. Über die Bedeutung der Belastungen und möglicher Überlastungen wird diskutiert.

Schlüsselwörter: Pferd, Bewegungsanalyse, Springsport, Computerkinematographie, Belastungen

Gait analysis via computerkinematography

With the newly developed method of computerkinematography we analysed more than 300 jumps of 5 horses across obstacles of heights between 1.00 and 1.60 m. The accelerations were measured at the metapodia. In the run-up, the usual frequency of the gallop was increased. In the last cycle before take-off the hindlimbs often touched down before the liftoff of the forelimbs, so that the suspension phase disappeared. The take-off seems to be a bipedal phase, but in fact the trailing limb touched down shortly before the leading limb, and its acceleration was higher. There was marked individual variation, in particular in the less thoroughly trained horses. Maximum accelerations were found at the hindlimbs, especially during touchdown before the take-off, and in the touchdown after the landing. Surprisingly, the accelerations of the forelimbs were lower in nearly all cases. The highest forelimb accelerations occurred during the landing and in the following cycle. The latter was very short and fused to the former without time interval for a suspension phase. The temporal succession of the limbs determined the lead of the gallop after the landing. Three of the horses under investigation landed always on their left limbs, with the right limbs leading. When going counter-clockwise they corrected their gallop after three or four cycles. We found clear differences between jumping under the rider and free jumping, the controlling influence of the rider could thus be proved. The relation between the measured acceleration and the loads (that is, the ground-hoof-forces) is discussed.

Keywords: horse, gait analysis, jumping, computerkinematography, mechanical stresses

Einleitung

Pferde beeindrucken Menschen seit jeher durch ihre Bewegungen und durch ihre Schnelligkeit. Besonderen Eindruck macht es, wenn selbst mächtige Hindernisse übersprungen werden. Die Sprunggewalt der Pferde findet schon im Alten Testament Erwähnung, als eindrucksvolles Beispiel für die Schöpfungsmacht und Herrlichkeit (*Ijob, 39*).

In heutiger Zeit kommen praktische Erwägungen hinzu, wenn wir ganz genau wissen wollen, was beim Springen geschieht. Zum einen könnte die Technik springender Pferde nach objektiven Kriterien beurteilt und das Training darauf abgestimmt werden, die Bewegungsabläufe zu optimieren. Zum anderen stellen sich auch Fragen des Tierschutzes, die nach auftretenden Belastungen und möglichen Belastungsgrenzen suchen (*Preuschoff et al. 1991*). Der Wissenschaft standen bisher nur begrenzte Mittel zur Verfügung, die Bewegungen beim Springen zu analysieren. Weitestgehend wurde mit Bilderfassungssystemen gearbeitet (*Preuschoff et al. 1987*). Erst in neuerer Zeit sind auch Beschleunigungssensoren eingesetzt worden (*Falaturi 1998, Falaturi, Preuschoff und Bruns 1998*).

Mit der Computerkinematographie (*Falaturi 2001*) gibt es nun ein Messinstrumentarium, das es erlaubt, die Beschleunigungen der Pferdebeine, mit ihrem zeitlichen Verlauf exakt zu erfassen, sogar über dem Hindernis. Insofern schien es überfällig sich dem Springen erneut zuzuwenden.

Materialien und Methodik

Anwendung der Computerkinematographie

Die Computerkinematographie ist ein Verfahren zur Aufzeichnung und Analyse von Beschleunigungen. Dazu werden an allen vier Röhrebeinen Messaufnehmer befestigt, die die axialen Beschleunigungen (in Längsrichtung des Röhrebeinknochens) aufzeichnen. Auf diese Weise erhält man vier synchrone Beschleunigungskurven, eine für jedes Bein. Aus diesen Kurven gehen unter anderem die Zeitpunkte für Aufsetzen und Abheben sowie die Spitzenbeschleu-

nigungen beim Aufsetzen sehr genau hervor. Eine genaue Beschreibung der Methode findet sich bei *Falaturi 2001*.

Für die vorliegenden Versuche wurden die Messdaten noch in den CKG-Aufnehmern an den Röhrebeinen gespeichert. Es wurden 1000 Werte pro Sekunde und Sensor aufgezeichnet. Die CKG-Aufnehmer wogen 150 g und maßen 8,5 x 3 x 3,5 cm. Sie wurden jeweils an den äußeren Seiten der Röhrebeine sehr straff einbandagiert, um auch bei einem Anschlag an die Hindernisstange nicht zu verrutschen. Der Startpunkt der Messung konnte über eine Vorlaufzeit variabel eingestellt werden, die Speicherkapazität ließ eine Messdauer zwischen 7 und 8 Minuten zu. Eine Beeinträchtigung im Bewegungsablauf der Pferde wurde nicht beobachtet.

Versuchstiere

Es wurden 5 verschiedene Pferde vom Typ des Europäischen Reitpferdes verwendet, die überwiegend bereits Turniererfolge im Springsport oder in der Vielseitigkeit hatten. Im einzelnen:

Pferd 0: Wallach, bei der Messung 11-jährig, Deutsches Reitpferd Württemberg, ohne Turniereinsatz.

Pferd 1: Hengst, bei der Messung 9-jährig, Tschechischer Viertelblüter, erfolgreich in Springen und Vielseitigkeit bis Klasse M/A. Nach Angaben seiner Reiter hat Pferd 1 eine besonders gute Technik, ist aber sehr vorsichtig.

Pferd 2: Wallach, bei der Messung 12-jährig, Polnischer Halbblüter, erfolgreich in Vielseitigkeit bis Klasse S.

Pferd 3: Wallach, bei der Messung 11-jährig, Irischer Dreiviertelblüter, erfolgreich in Vielseitigkeit bis Klasse M/A und im Springen bis Klasse S.

Pferd 4: Wallach, bei der Messung 7-jährig, Deutsches Reitpferd Hessen, teilgenommen an Springen bis Klasse L/M. Pferd 4 wurde ausgewählt, weil es auch ohne Reiter und ohne ersichtliche Not über Hindernisse sprang, sofern sie verfügbar waren.

Versuchsdurchführung

Die Pferde wurden vor den Messungen für etwa 15 Minuten geritten. Dabei wurden bereits niedrige Sprünge absolviert. Nach dem Aufwärmen wurden die CKG-Aufnehmer an den Röhrebeinen befestigt und das Pferd nochmals einige Runden getrabt und galoppiert. Üblicherweise war an beiden langen Seiten der Reithalle jeweils ein Hindernis aufgestellt, meist ein Steilsprung an der einen Seite und der Oxer an der gegenüber liegenden. Die Pferde wurden nun innerhalb der Messdauer von 7 Minuten 5 Runden in der einen und 5 Runden in der anderen Richtung über die Hindernisse geritten, absolvierten also in der Regel 20 Sprünge in einem Versuchsdurchlauf. Die Anzahl der Sprünge variierte im Einzelfall abhängig von Hindernishöhe und Kondition des Pferdes.

Nach jedem Versuchsdurchlauf wurden die CKG-Aufnehmer abgenommen und die Messwerte in einen PC übertragen. Vor

jeder weiteren Messreihe wurde den Pferden eine Pause von mindestens 30 Minuten gewährt.

Die Pferde 1 bis 3 wurden von einem international erfolgreichen Vielseitigkeitsreiter vorgestellt. Pferd 4 wurde von einem turniererfahrenen Springreiter geritten. Für die vorliegende Studie wurden berücksichtigt: Steilsprung 100 cm, Oxer 100cm x 100 cm, Steilsprung 120 cm, Oxer 120 cm x 120 cm und Steilsprung 140 cm. Die Messungen zur Abschätzung des Reitereinflusses wurden mit Pferd 0 durchgeführt. Dabei wurde eine zweifache Kombination aus niedrigem Steilsprung (60 cm) und Oxer (100 cm x 100 cm) ausschließlich gegen den Uhrzeigersinn – d.h. auf der linken Hand – durchritten. Es wurden 10 Sprungfolgen am reiterlosen Pferd und je 7 Sprungfolgen mit 2 Reitern aufgezeichnet. Reiter 1 war ebenfalls international erfolgreicher Vielseitigkeitsreiter, der andere war Berufsreiter und ausgebildeter Reitlehrer.

Terminologie

Auf „Reitersprache“ wurde soweit möglich verzichtet. Die eindeutige Bezeichnung der Beine in Abhängigkeit von Gangart und Bewegungsrichtung (links oder rechts herum, oder linke oder rechte Hand) ist gerade für den Galopp schwierig. Zur Erklärung: Pferde gehen im Galopp in einer leichten Längsbiegung der Wirbelsäule, bzw. der Körperlängsachse. Die hohle Seite der Biegung ist normalerweise innen, zum Mittelpunkt des gekrümmten Weges hin gerichtet. Die gewölbte Seite ist außen. Die jeweils äußeren Beine werden dann zuerst aufgesetzt, die jeweils inneren hier-nach. Problematisch wird die Bezeichnung, wenn die gewölbte Seite zum Hallenmittelpunkt gerichtet ist („Außengalopp“) oder wenn durch unterschiedliche Orientierung der Hinter- und Vorderbeine keine Längsbiegung im Rumpf vorliegt („Kreuzgalopp“). Die im Angelsächsischen übliche Bezeichnung „leading = führendes“ und „trailing = folgendes“ Bein wäre hier irreführend, da sich die Begriffe auf die räumliche Anordnung der Beine beziehen, in dieser Arbeit aber nur von der zeitlichen Abfolge die Rede ist. Zeitlich wird das „folgende“ Bein zuerst aufgesetzt. Wenn von „innerem“ und „äußerem“ Bein die Rede ist, so ist innen liegend und außen liegend gemeint. Der Bezug ist immer die Bewegungsrichtung, nicht die Biegung der Körperachse oder die Fußfolge.

Ergebnisse

Der Anlauf

Der Anlauf zum Sprung erfolgte im Galopp. Dabei gallopierten die Pferde üblicherweise im Linksgalopp bei dem Durchlaufen der Halle gegen den Uhrzeigersinn und im Rechtsgalopp, wenn die Halle mit dem Uhrzeigersinn durchlaufen wurde (Abbildung 1).

Vereinzelt wurden Galoppsprünge im Kreuzgalopp („rotary gallop“) beobachtet. In einem Fall kam es vor dem Absprung zu einem Zwischenschritt mit dem rechten Hinterbein (Pferd 4, 140 cm, links herum, Sprung 4).

Die Dauer der Galoppsprünge wurde beim Anlaufen zunehmend kürzer. Der dritte Galoppsprung vor dem Hindernissprung

maß im Mittel noch knapp 0,6 Sekunden. Seine Variationsbreite war geringer, als bei den übrigen Galoppsprüngen. Der fol-

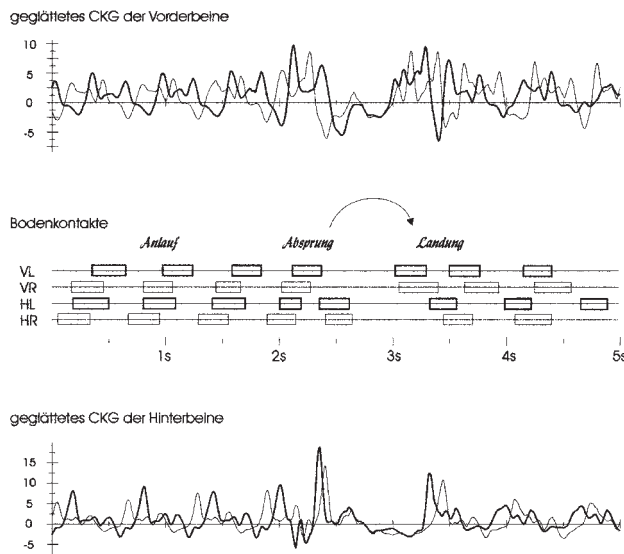


Abb. 1: Geglättete CKGs für einen Sprung über 140 cm. Zwischen den CKGs für die Vorderbeine (oben) und denen für die Hinterbeine (unten) sind die Bodenkontakte der einzelnen Hufe verzeichnet. Alle Kurven liegen über der selben Zeitachse von 5 Sekunden. Dargestellt ist Pferd 1, links herum.

Smoothed CKG-curves of a jump across an obstacle of 1.4 m height. The top track shows the smoothed CKG of the forelimbs, the bottom track that of the hindlimbs. In between them the ground contacts are plotted on the same time-scale. Accelerations are given in multiples of gravity (G).

gende Galoppsprung war um gut 3/100 Sekunden, das sind 5%, verkürzt. Der Galoppsprung unmittelbar vor dem Hindernissprung dauerte nur 0,4 Sekunden. Seine Variationsbreite war größer als bei allen anderen gemessenen Galoppsprüngen. Das gilt für alle gemessenen Höhen in gleicher Weise (Tabelle 1, Abbildung 2).

Die Beschleunigungen an den Metapodien beim Aufsetzen waren im Anlauf zum Sprung gegenüber den Beschleunigungen im „Arbeitsgalopp“ um das Zweifache erhöht. Die Beschleunigungsspitzen lagen meist zwischen 15 und 22 G an den Hinterbeinen und zwischen 8 und 15 G an den Vorderbeinen. Die Beschleunigungen an den inneren Beinen waren im Anlauf meist höher als an den äußeren. Das wird besonders bei den Spitzenwerten aus den geglätteten Kurven deutlich. Im letzten Galoppsprung vor dem Hindernissprung wurden regelmäßig höhere Beschleunigungen an den äußeren Beinen, besonders an den Hinterbeinen gemessen. Abbildung 1 zeigt anhand der CKGs und den daraus abgeleiteten Bodenkontakten die zum Teil verkürzte Belastungsdauer des inneren Hinterbeines im letzten Galoppsprung vor dem Absprung exemplarisch. Üblicherweise gab es zwischen dem letzten vollständigen Galoppzyklus (Aufsetzen äußeres Hinterbein, Aufsetzen inneres Hinterbein und äußeres Vorderbein, Aufsetzen inneres Vorderbein) und dem scheinbar beidfüßigen Aufsetzen zum Absprung keine Flugphase, wie sonst zwischen den Galoppsprüngen üblich. Das heißt, beim

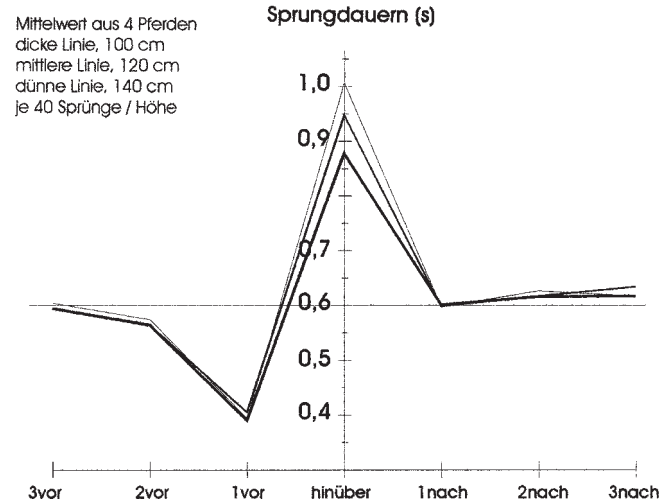


Abb. 2: Durchschnittliche Galoppsprungdauern in Anlauf, Hindernissprung und Auslauf. Die Kurven stellen Mittelwerte aus jeweils 40 Sprüngen dar. An- und Auslauf waren gleich lang, unabhängig von der Hindernishöhe. Nur die Sprungdauer über dem Hindernis war länger, je höher das Hindernis war.

Average durations of gallop cycles in the run-up, jump, and landing run. Each curve contains the mean of 40 trials. The height of the obstacle did not affect the run-up, nor the landing run. Alone the time needed for crossing the obstacle depended from its height.

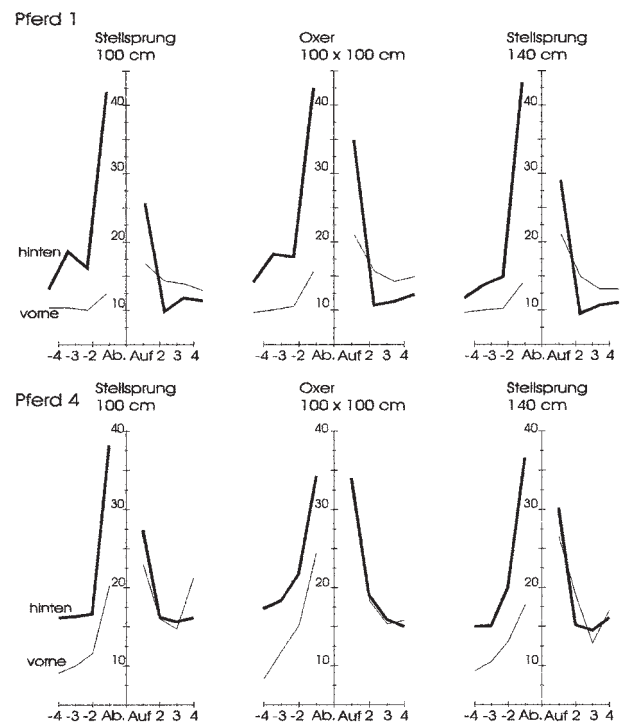


Abb. 3: Beschleunigungsspitzen an den Hinterbeinen (dicke Linie) und den Vorderbeinen (dünne Linie) beim Sprung über Hindernisse verschiedener Höhe. Dargestellt sind Pferd 1 (obere Systeme) und Pferd 4 (untere Systeme). Die Zahlen numerieren das Aufsetzen der Beine vor und nach dem Sprung. Die Beschleunigungen sind in Erdbeschleunigung (G) angegeben. Zu den Unterschieden zwischen den Pferden siehe Text.

Accelerations of the hindlimbs (thick lines) and the forelimbs (thin lines) in two horses crossing obstacles of different heights. Accelerations are given in multiples of gravity (G).

Aufsetzen der Hinterbeine zum Absprung war noch mindestens ein Vorderbein am Boden.

Individuenspezifische Unterschiede bestehen im Anlauf. Pferd 1 näherte sich dem Hindernis nahezu gleichmäßig. Bei dem Galoppsprung vor dem Hindernis waren die Beschleunigungswerte oft niedriger als bei dem vorausgegangenem Galoppsprung. Bei Pferd 4 wurden die Beschleunigungen beim Anlaufen kontinuierlich höher (Abbildung 3).

Bei Hindernishöhen zwischen 100 cm und 140 cm wurden keine grundsätzlichen Unterschiede im Anlauf festgestellt.

Der Absprung

Beim Aufsetzen zum Absprung wurden an den Hinterbeinen die größten Beschleunigungsspitzen gemessen. Sie betragen im Durchschnitt mehr als 40 G und in Einzelfällen sogar bis zu 80 G. Die Streubreite der Spitzen ist in den ungeglätteten Kurven zu hoch, um eine Höhenabhängigkeit belegen zu können. Für das letzte Aufsetzen der Vorderbeine wurde eine mittlere Beschleunigung von nur 18 bis 25 G gemessen.

Üblicherweise waren die Werte beim letzten Aufsetzen der Vorderbeine am inneren Bein höher als am äußeren. Eine Ausnahme bildete Pferd 4, bei dem unabhängig von der Bewegungsrichtung (links oder rechts herum) die Beschleunigungen am rechten Vorderbein höher waren als am linken.

Die gemittelten Spitzenwerte aus den geglätteten Kurven zeigen am Beispiel von Pferd 1 sowohl für die Vorder- als auch für die Hinterbeine mit zunehmender Hindernishöhe wachsende Beschleunigungsspitzen (Tabelle 2). In dieser Tabelle sind die Sprünge links und rechts herum sowie die beiden Vorder- und Hinterbeine jeweils zusammengefasst.

Das Aufsetzen zum Absprung erfolgte für beide Hinterbeine nahezu zeitgleich (Abbildung 1). Dabei wurde dasjenige Bein um durchschnittlich 4/100 Sekunden früher belastet, das auch zum Absprung stärker beschleunigt wurde.

Auch hier gab es individuenspezifische Unterschiede. Bei Pferd 1 war dies immer das innere, also im normalen Galoppzyklus später aufgesetzte Hinterbein. Bei Pferd 4 wurde unabhängig von der Bewegungsrichtung das linke Bein früher belastet und stärker beschleunigt. Dabei war die Differenz zwischen linkem und rechtem Hinterbein größer, wenn das linke Hinterbein innen lag, das Pferd sich also im Linksgalopp und gegen den Uhrzeigersinn dem Hindernis näherte.

Der Flug

Die für die Überquerung des Hindernisses benötigte Zeit war deutlich länger als ein Galoppsprung. Die Sprungdauer wuchs mit steigender Hindernishöhe an. Sie betrug im Mittel 0,88 Sekunden über 100 cm, 0,95 Sekunden über 120 cm und 1,00 Sekunden über 140 cm. Bei den Oxern waren die Sprungdauern ähnlich hoch wie bei dem 20 cm höheren Steilsprung.

Zwischen den Pferden gab es erhebliche Unterschiede von mehr als 0,1 Sekunden. Bei den Pferden 3 und 4 dauerte das Überqueren des Hindernisses deutlich länger als bei den Pferden 1 und 2.

Die Beschleunigungskurven während des Fluges wurden für diese Studie nicht weiter berücksichtigt. Deutlich zu sehen ist in den Kurven die mehr oder weniger gut ausgeprägte Parallelführung der Vorder- und Hinterbeine und, sofern geschehen, das Anschlagen einzelner Extremitäten an die Hindernisstangen.

Die Landung

Die Landung nach dem Sprung setzt sich aus mehreren Galoppzyklen zusammen. Sie beginnt mit dem Aufsetzen der Vorderbeine (Galoppsprung über das Hindernis) und schließt noch mindestens einen weiteren kompletten Galoppzyklus ein.

Tab. 1: Zyklusdauern der drei Galoppsprünge vor dem Hindernis, des Sprunges und der drei Galoppsprünge nach dem Hindernis für vier Pferde und drei Höhen. Die Mittelwerte sind in Abbildung 2 visualisiert.

The duration of the cycles before, during and after jumping, in dependence upon the height of the obstacle and the horse. These values correspond to those plotted in Figure 2.

Sprungdauern (s)	3 vor	2 vor	1 vor	hinüber	1 nach	2 nach	3 nach
100 cm							
Pferd 1	0,589	0,593	0,401	0,828	0,622	0,639	0,678
Pferd 2	0,618	0,575	0,357	0,841	0,643	0,659	0,637
Pferd 3	0,604	0,560	0,428	0,896	0,575	0,604	0,616
Pferd 4	0,563	0,529	0,378	0,943	0,564	0,562	0,537
Mittelwert	0,594	0,564	0,391	0,877	0,601	0,616	0,617
120 cm							
Pferd 1	0,621	0,601	0,390	0,894	0,655	0,655	0,683
Pferd 2	0,601	0,578	0,364	0,882	0,656	0,662	0,642
Pferd 3	0,598	0,571	0,406	1,009	0,521	0,585	0,643
Pferd 4	0,552	0,505	0,465	0,999	0,560	0,567	0,568
Mittelwert	0,593	0,564	0,406	0,946	0,598	0,617	0,634
140 cm							
Pferd 1	0,628	0,620	0,397	0,943	0,657	0,677	0,675
Pferd 2	0,600	0,580	0,365	0,947	0,674	0,640	0,610
Pferd 3	0,618	0,602	0,409	1,064	0,481	0,592	0,592
Pferd 4	0,568	0,494	0,404	1,060	0,577	0,593	0,592
Mittelwert	0,604	0,574	0,394	1,004	0,597	0,626	0,617

Das Aufsetzen der Vorderbeine und der folgende Zyklus können von der Fußfolge eine Fortsetzung des „Innengalopps“ sein. Bei den Pferden 1, 2 und 3 war das beim Springen im Rechtsgalopp immer der Fall.

Das Aufsetzen der Vorderbeine kann jedoch auch einen Wechsel des Galopps einleiten, also mit dem inneren Bein beginnen. Bei den Pferden 1, 2 und 3 war das beim Springen im Linksgalopp meistens der Fall. Bei dem erst wenig ausgebildeten Pferd 4 war in der Fußfolge (ausgenommen des in 3.2 Erwähnten) kein klares System zu erkennen.

Zwischen dem ersten Aufsetzen der Vorderbeine und dem ersten Galoppzyklus nach dem Hindernis gab es keine Flugphase. Das heißt, es war noch mindestens ein Vorderbein am Boden wenn das erste Hinterbein aufsetzte. Die Reihenfolge in der die Hinterbeine aufsetzten entsprach der Reihenfolge der Vorderbeine. Zum Teil blieb die Flugphase auch nach dem ersten Galoppsprung noch aus. In einem solchen Fall stellte das Pferd zunächst 10 Bodenkontakte her, bevor nach der Landung erstmals wieder eine Flugphase auftrat.

Die ersten beiden Fußungen der Vorderbeine folgten immer ungewöhnlich schnell aufeinander (siehe Abbildung 1). Zwischen dem ersten Aufsetzen der beiden Vorderbeine und ihrem neuerlichen Aufsetzen vergingen zum Teil weniger als 0,3 Sekunden. Das ist nicht einmal die Hälfte der mittleren Zyklusdauer.

Die Bremsbeschleunigungen an den Röhreinen waren für das erste Aufsetzen der Vorderbeine sowie für den folgenden Galoppzyklus erhöht. Dabei blieben die Beschleunigungen an den Hinterbeinen deutlich geringer als bei dem Absprung. Die Beschleunigung an den Vorderbeinen war bei dem ersten Aufsetzen nur wenig höher als bei dem letzten Aufsetzen vor dem Hindernis. Bei dem schnell folgenden zweiten Aufsetzen erreichte sie wieder die gleiche Höhe wie vor dem Hindernis. In Einzelfällen wurden Beschleunigungen bis zu 45 G an den Vorder- und bis zu 80 G an den Hinterbeinen gemessen. Die durchschnitt-

Tab. 2: Beschleunigungsspitzen aus den geglätteten Kurven für das Aufsetzen, gemessen an den Röhreinen. Dargestellt sind Mittelwerte von Pferd 1 für das Fußten zum Absprung und für die Landung und für 5 verschiedene Hindernisse. Mittelwerte für linkes und rechtes Bein und für beide Richtungen

Peak accelerations of the smoothed curves, representing the touchdown before the jump and the touchdown at landing, measured at the metapodials. The means are calculated for leading and trailing limbs

Beschleunigungswerte, geglättet (G)		hinten		vorne	
		Steilsprung	Oxer	Steilsprung	Oxer
100 cm	Absprung	13,99	14,61	7,23	7,69
	Landung	10,98	11,69	6,90	7,17
120 cm	Absprung	14,64	15,50	7,71	7,84
	Landung	11,59	12,73	6,81	7,99
140 cm	Absprung	15,39		7,77	
	Landung	11,52		6,89	

lichen Beschleunigungen an den Hinterbeinen blieben deutlich geringer als beim Absprung.

Bei den Pferden 1, 2 und 3 waren die Bremsbeschleunigungen an dem rechten Vorderbein durchschnittlich höher als an dem linken, sie landeten, unabhängig von der Laufrichtung, meist im Rechtsgalopp (s.o.). Bei Pferd 4 waren sie an dem äußeren Vorderbein meist höher als an dem inneren. Allgemein war die Beschleunigung an dem zuerst aufgesetzt aufgesetzten Vorderbein geringer als an dem danach fußenden Vorderbein.

Auch im Verhältnis der Beschleunigungsspitzen an Vorder- und Hinterbeinen gab es individuenspezifische Unterschiede. Während bei Pferd 1 die Landebeschleunigung hinten deutlich höher war als vorne, wurde bei Pferd 4 kein Unterschied gefunden (Abb. 3). Eine Abhängigkeit der Landebeschleunigungen von der Hindernishöhe konnte hier nicht herausgearbeitet werden (vgl. Tab. 2).

Der Auslauf

Die Galoppsprünge nach der Landung werden hier als Auslauf bezeichnet. Die durchschnittliche Zyklusdauer lag bei dem zweiten und dritten Zyklus nach der Landung wieder über 0,6 Sekunden, also höher als im Anlauf (Abbildung 2, Tabelle 1).

Die der Landung folgenden Galoppsprünge wurden üblicherweise mit der Fußfolge durchlaufen, die durch die Landung vorgegeben war. Sofern das Pferd im „Außengalopp“ landete, wechselte es in unseren Experimenten nach drei oder vier Galoppsprüngen wieder in den Innengalopp. Entsprechend finden sich sowohl bei den Zyklusdauern als auch bei den Beschleunigungen im vierten Fußten nach dem Hindernis besonders große Streubreiten. Die mittleren Beschleunigungen wachsen bei einem Galoppwechsel nochmals an.

In den geglätteten Kurven (Abbildung 1) fällt auf, dass die „Zacke“, die das Aufsetzen der Hinterbeine markiert, während des Auslaufens deutlich breiter ist als während des Anlaufens.

Reitereinfluss

Bei dem Durchlaufen einer Sprungkombination aus Cavaletti, Steilsprung (60 cm), und Oxer (100 cm x 100 cm) wurden mit und ohne Reiter deutliche Unterschiede festgestellt.

Die Zeitdauer vom Absprung zum Steilsprung bis zum ersten Galoppsprung nach dem Oxer war bei dem reiterlosen Pferd mit 2,40 Sekunden am geringsten. Unter Reiter 1 war diese Zeitspanne um durchschnittlich 4%, unter Reiter 2 um durchschnittlich 8 % erhöht.

Bei dem reiterlosen Pferd traten die höchsten Beschleunigungen der Vorder- wie auch der Hinterbeine bei dem letzten Fußten vor dem Steilsprung, also beim Einsprung in die Kombination, auf.

Bei dem gerittenen Pferd traten die höchsten Beschleunigungen an den Hinterbeinen vor dem Absprung zum Oxer, dem höheren Hindernis dieser Kombination, auf. Den zweithöchsten Beschleunigungswert an den Hinterbeinen gab es unter beiden Reitern bei der Landung nach dem Oxer. Die höchsten Beschleunigungen an den Vorderbeinen wurden unter beiden Reitern während der Landung nach dem Steilsprung gemessen.

Diskussion

Bewegungsablauf und Sprungtechnik

Sehr stark vereinfacht läßt sich das Überqueren eines Hindernisses als Aufeinanderfolge mehrerer Galoppsprünge vorstellen. Galoppsprung vor dem Hindernis (Aufsetzen äußeres Hinterbein, Aufsetzen inneres Hinterbein und äußeres Vorderbein, Aufsetzen inneres Vorderbein), Sprung über das Hindernis (Aufsetzen der Hinterbeine, Flug, Aufsetzen der Vorderbeine) und Galoppsprung nach dem Hindernis (Aufsetzen äußeres Hinterbein, Aufsetzen inneres Hinterbein und äußeres Vorderbein, Aufsetzen inneres Vorderbein); Bei genauerer Betrachtung fallen jedoch grundlegende Unterschiede auf. Das sind die zum Teil ausbleibenden Schwebephassen zwischen den Galoppsprüngen sowie eine zusätzliche Schwebphase in gestreckter Stellung in dem Sprung über dem Hindernis. Weiterer Unterschied zwischen einem normalen Galoppsprung und dem Sprung ist das nahezu zeitgleiche Aufsetzen beider Hinterbeine, wobei bei den drei ausgebildeten Pferden das innere Hinterbein kurz vor dem äußeren aufsetzte und stärkere Beschleunigungen erfuhr. Es liegt nahe, dass jeweils das innere Hinterbein als Sprungbein fungierte. Bei dem wenig trainierten Pferd 4 war es nicht das innere, sondern immer das linke Hinterbein, das zum beidfüßigen Abstoßen etwas früher aufgesetzt und stärker beschleunigt wurde. Hier liegt es nahe, dass das stärkere Bein als Sprungbein gewählt wurde.

Die Galoppsprünge vor und nach dem Hindernis waren beim Galoppieren im Uhrzeigersinn jeweils im Rechtsgalopp (Pferde 1 bis 3). Das Aufsetzen der Vorderbeine nach dem Sprung erfolgte in der gleichen Reihenfolge. Nur bei dem wenig trainierten Pferd 4 kam es zu häufigen Wechseln in der Reihenfolge, mit der die Beine aufgesetzt wurden. Das gilt sowohl für den An- als auch für den Auslauf.

Bei dem Galoppieren gegen den Uhrzeigersinn liefen die Pferde 1 bis 3 im Linksgalopp an wechselten aber durch die Reihenfolge, in der die Vorderbeine landeten, in den „Außengalopp“. Erst nach drei bis vier Galoppsprüngen fielen sie wieder in den Linksgalopp zurück. Inwieweit dieser Befund durch mangelnde Ausbildung, Überlastung oder sonstige Faktoren bedingt wird, ist noch unklar. Er könnte auch Ausdruck der sogenannten „natürlichen Schiefe“ sein, die auch in CKG-Messungen klar zutage tritt (Falaturi 2001). Gegebenenfalls könnte eine Untersuchung an einer Gruppe höchstqualifizierter Springpferde hier Aufschluss geben.

Offensichtlich wurde auch, dass die Galoppzyklen vor und nach dem Sprung eine funktionale Einheit mit diesem bilden und aus dem Rahmen des zyklisch wiederkehrenden Bewegungsmusters im Galopp fallen. Für den Galoppsprung vor dem Hindernis gilt das vor allen wegen der ausbleibenden Flugphase (durch Preuschoff et al. (1987) wurde eine Flugphase an dieser Stelle beobachtet), wegen den erhöhten Beschleunigungswerten und wegen der deutlich verkürzten Zyklusdauer. Auffällig war zudem, dass sich schon hier die Hinterbeine anders verhielten, insofern als ihre Stützdauern verkürzt waren (vgl. Abbildung 1) und die höheren Beschleunigungen am äußeren Hinterbein auftraten. Um den Massemittelpunkt des Pferdes vor dem Hindernissprung zu beschleunigen, können also offensichtlich auch

die vorangehenden Galoppsprünge genutzt werden. Zu dem gleichen Ergebnis kamen Preuschoff et al. (1987) und Preuschoff (1989) hat den wesentlichen Einfluss des Abstoßens mit den Vorderbeinen vor dem Sprung bestätigt. Der letzte und deutlich verkürzte Galoppsprung vor dem Hindernis war in seiner Zyklusdauer sehr variabel. Das legt den Verdacht nahe, dass das (gerittene?) Pferd vor allem diesen letzten Galoppsprung nutzt, um eine für den Absprung geeignete Position zu wählen.

Eine Besonderheit bei diesem letzten Galoppsprung vor dem Hindernissprung wurde bei Pferd 1 beobachtet. Die Beschleunigung an den Hinterbeinen sank gegenüber dem vorherigen Zyklus ab (Abbildung 3). Möglicherweise gibt es hier einen Zusammenhang zu der Einschätzung seiner Reiter, dass es sich um ein „vorsichtiges“ Pferd handelt.

Auch der Galoppsprung nach dem Hindernis hat keine Flugphase, ist verkürzt und die Beschleunigungen sind erhöht. In Einzelfällen folgte sogar noch ein zweiter Galoppzyklus ohne Flugphase. Preuschoff et al. (1987) wiesen nach, dass es mehrerer Zyklen bedarf, bis nach der Landung aus dem Sprung der Massemittelpunkt des Pferdes wieder auf seine ursprüngliche Höhe angehoben ist. Für das Fußende der Hinterhufe nach dem Sprung errechnete Preuschoff (1989) einen deutlich erhöhten Kraftaustausch mit dem Untergrund, Marquis (1999) hat ebenfalls deutlich höhere Bodenkräfte als im Galopp gemessen. Das Abfangen der Körpermasse aus dem Sprung geschieht also offenbar über mehrere Zyklen unter Einbeziehung aller Extremitäten.

Die Dauer des Sprunges ist gegenüber einem Galoppsprung verlängert. Das ist insofern verständlich, da die Flugbahn über dem Hindernis deutlich länger und höher ist als die Bewegungsbahn in einem Galoppsprung ist (Abb. 3 a-f in Preuschoff et al. 1987). Entsprechend nimmt auch die Sprungdauer mit wachsender Größe des Hindernisses zu. Unterschiede zwischen den Pferden können mehrere Ursachen haben. Je größer die Geschwindigkeit ist, mit der ein Pferd das Hindernis überquert, um so kürzer wird die Flugdauer. Ein weiterer Erklärungsversuch für individuen-spezifische Unterschiede wären hier unterschiedlich knapp gewählte Flugbahnen über das Hindernis. Dagegen spricht, dass die Unterschiede zwischen den Pferden mit wachsender Hindernishöhe nicht kleiner, sondern zum Teil sogar größer werden.

In der Tat ist die Sprungdauer über dem Hindernis bei den beiden Pferden besonders groß, bei denen die Galoppsprungdauer vor und nach dem Hindernis besonders kurz ist. Bei den beiden Pferden, bei denen die Galoppsprungdauer vor und nach dem Hindernis über dem Durchschnittswert liegt, ist die Sprungdauer über dem Hindernis geringer.

Besondere Beachtung verdient die Einförmigkeit, mit der sich die Dauer der Galoppsprünge vor und nach dem Hindernis verändert. Eine Abhängigkeit von der Hindernishöhe war zu vermuten (Preuschoff et al. 1987), konnte für die Messungen aber widerlegt werden.

Der Einfluss des Reiters auf das Sprungverhalten wurde in „Reitereinfluss“ dokumentiert. Das reiterlose Pferd rannte in hohem Tempo auf die Kombination zu und sprang mit maximaler Beschleunigung über den ersten, kleinen Sprung dieser Kombination, um dann mit deutlich niedrigeren Beschleunigungen

den eigentlichen Sprung dieser Kombination zu überwinden. Das entspricht dem Erfahrungswissen von Reitern, dass Pferde beim Freispringen oft ungestüm in eine Kombination hineingehen und dann Schwierigkeiten haben, sich durch die nicht mehr „passenden“ Abstände zwischen den Sprüngen zu mogeln. Von dem Reiter wurde das Pferd anscheinend gezielt auf den größeren Sprung dieser Kombination hin geritten. Vor und nach diesem Sprung wurden die größten Beschleunigungen an den Hinterbeinen gemessen. Das Verhältnis der Beschleunigungen an den verschiedenen Sprüngen war bei beiden Reitern verblüffend ähnlich. Die hier aufgebaute Kombination hatte den Reitern jedoch auch kaum etwas abverlangt. Es ist durchaus vorstellbar, das auch in der Einflussnahme des Reiters Unterschiede gemessen werden können.

Belastungsanalyse

Beschleunigungen an den Extremitäten können allgemein als Indikator für Belastungen verwendet werden. Indessen müssen zur Umrechnung von Beschleunigungen in Kräfte die Massen berücksichtigt werden, welche jeweils der Beschleunigung unterliegen. Eine kurzfristig wirksame Beschleunigungsspitze von 60 G (wie sie hier gemessen wurde) erfasst nur die Masse des Beines, vom Huf bis zum Ellbogengelenk oder Kniegelenk. Diese sogenannte „freie“, nicht in den Rumpf integrierte Gliedmaße enthält grob abgeschätzt maximal 4% der Gesamtmasse des Pferdes (Daten aus *Plagenhoef (1979)* und *Spriggings und Leach (1986)*). Auch wenn wir das Nachschwingen der Weichteile gegenüber dem Skelett ebenso vernachlässigen wie die Dämpfung in den Gelenken – beides ist aus Untersuchungen am Menschen bekannt (*Gruber (1987)*, *Recknagel (1995)*) – kommen nur Kräfte in Höhe von 4% des Gesamtgewichtes von 600 kg, d.h. maximal 24 kg mal 60 G = 14.400 N zur Wirkung. Auch das Abheben der Hufe nach der Standphase erfolgt immerhin mit Beschleunigungen von etwa 30 G, d.h. mit Kräften in Höhe von 7.700 N.

Die Gesamtmasse des Pferdes unterliegt keinen derart hohen Beschleunigungen. *Preuschoff (1989)* ermittelte aus Filmaufnahmen und Messungen am Sattel die Beschleunigungen für den Massemittelpunkt des Pferdes. Bei mittleren Hindernishöhen fand er Beschleunigungen von 2,5 G für den Absprung, von 4 G für die Landung der Vorderbeine und von 2,5 G für die Landung der Hinterbeine. Das bedeutet für einen großen, kräftigen Warmblüter von 600 kg Gewicht bei der Landung eine Belastung von: 600 kg mal 4 G = 2.400 kp (24.000 N) auf beiden Vorderbeinen zusammen. Von den Hinterbeinen müssen bei der Landung, ebenso wie beim Absprung 600 kg mal 2,5 G = 15.000 N aufgenommen werden. Diese Kräfte kommen jeweils während der Standphase der Gliedmassen zur Wirkung, also unmittelbar nach den Aufprallbeschleunigungen, die hier gemessen worden sind. Die ersten zu diesem Problem verfügbaren Messdaten stammen von *Marquis (1999)*. Er hat die Bodenkräfte mit Druckmessschuhen bestimmt. Bei der Landung eines etwa 550 kg schweren Pferd nach einem Sprung von 110 cm Höhe (Gewicht- und Höhenangabe mündlich mitgeteilt) betragen die Druckkräfte unter den Vorderhufen 10.000 N und 12.000 N. Unter den Hinterhufen waren es 7.500 N und 10.000 N.

Eine besondere Belastung für die Vorderbeine könnten die zwei sehr schnell aufeinander folgenden (d.h. weniger als 0,3 s, s.o.) Fußstöße nach der Landung darstellen. Es muss zumindest bedacht werden, dass nach der Komprimierung von elastischen Dämpfungselementen eine gewisse Zeit notwendig ist, um die Ausgangsform wiederherzustellen.

Über die Relevanz der dargestellten Belastungen für die Entstehung von Gelenk- oder Sehnenschäden ist mit der Bestimmung der Zahlenwerte nichts ausgesagt. Es war auch nicht Ziel dieser Studie, Grenzwerte für zumutbare Belastungen zu suchen. Die Quantifizierung wird aber dann aufschlussreich, wenn sich Zusammenhänge zwischen Verwendung des Pferdes, Intensität der Nutzung und orthopädischen Schäden offenbaren.

Bedenkt man nun, dass sich die Stützkräfte auf harten und weichem Boden kaum unterscheiden, ja auf weichem Boden sogar etwas höher sind (*Marquis 1999*), liegt es nahe mögliche Schadeinwirkungen in den Aufprallkräften und -beschleunigungen zu suchen. *Falaturi (2001)* hat gezeigt, dass es gerade die Aufprallbeschleunigungen sind, die auf hartem Untergrund und in der schnellen Bewegung stark anwachsen.

Literatur

- Falaturi, P.* (1998): Kenngrößen und Regeln der vierbeinigen Fortbewegung am Beispiel des Pferdes, Edition Schürer 3-9803497-3-X, Kirchheim.
- Falaturi, P.* (2001): Computerkinematographie (CKG) als geeignetes Verfahren zur objektiven Bewegungsanalyse – Beschreibung und Ergebnisse. - *Pferdeheilkunde* 17,1, 30–41.
- Falaturi, P., Preuschoff, H. und Bruns, E.* (1998): Spring mechanism in the fetlock of the horse, 49th EAAP meeting Warsaw, Session H6.3 N°146, 320.
- Gruber, K.* (1987): Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Kräfte im Knie- und Hüftgelenk bei sportlichen Bewegungsabläufen mit hohen Beschleunigungen. Dissertation Tübingen.
- Marquis, H.* (1999): Messvorrichtung zur Lahmheitsdiagnostik und Bewegungsanalyse bei Pferden. Dissertation München.
- Plagenhoef, S.* (1979): Dynamics of human and animal motion. In: *M.E. Morbeck, H. Preuschoff & N. Gomberg* (eds), Environment, behavior, and morphology: dynamic interactions in primates. G. Fischer, New York, 227–296.
- Preuschoff, H.* (1989): The external forces and internal stresses in the feet of dressage and jumping horses. - *Zeitschrift für Säugetierkunde* 54, 172–190.
- Preuschoff, H., Falaturi, P. und Lesch, C.* (1995): Grenzen der Einwirkung des Reiters auf das Pferd. *Tierärztliche Umschau* 50, 511–521.
- Preuschoff, H., Fritz, M., Hüllen-Kluge, K. und Streitlein, I.* (1987): Studien zu den Bewegungen von Sportpferden, Wissenschaftliche Publikation Bd.9, FN-Verlag, Warendorf.
- Preuschoff, H., Lesch, C., Witte, H. und Recknagel, S.* (1991): Beim Springen zwischen Pferdebein und Stangen auftretende Kräfte. *Pferdeheilkunde* 7, 355–362.
- Recknagel, S.* (1995): Untersuchung der mechanischen Schwingungsübertragung an der oberen und der unteren Extremität des Menschen. *Fortschritt-Berichte VDI 17(123)*, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Spriggings, E. und Leach, D.* (1986): Standardised technique for determining the centre of gravity of body and limb segments of horses. - *Equine vet. Journal* 18, 43–49.

Danksagung

Die vorliegende Studie wurde durch die Firma Marquis Tiermedizin-technik ermöglicht. Hierfür unser bester Dank.

Dr. sc. agr. Dipl.-Biol. Parvis H. Falaturi

Am Blumenberg 2
34305 Niedenstein