

# Erfassung leistungsrelevanter Parameter mit Inertialsensoren zur Darstellung der Springbewegung von Sportpferden

Christina Fercher<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Olympiastützpunkt Westfalen Warendorf gGmbH, Germany

<sup>2</sup> Institut für Sportwissenschaft, Justus-Liebig-Universität Gießen, Germany

**Zusammenfassung:** Eine einfache und vielseitige Möglichkeit zur Objektivierung und Evaluierung der Leistung von Reiter und Pferd im Springtraining ist eines der Ziele im modernen Spitzensport. Die Darstellung leistungsrelevanter Parameter zur Beurteilung der Springleistung und der Belastungsintensität in alltäglichen Situationen ist für die Optimierung von spezifischen Trainingseinheiten und zu deren Steuerung hilfreich. Sie trägt damit zur Gesunderhaltung der vierbeinigen Athleten bei. Entsprechend dem wissenschaftlichen Forschungsstand, durch weitere theoretische Überlegungen und aus vorausgegangenen Messungen mit einem kleinen, flexiblen inertialen Messsystem, wird ein Pool an möglichen leistungsrelevanten Parametern ermittelt und auf die Darstellbarkeit in der Feldsituation am Sprung durch eine inertielle Messeinheit im Sattelgurt überprüft. Fünf unterschiedliche Pferde absolvieren hierzu zwölf Mal einen mittelschweren Steilsprung. Vergleichbare Datenverläufe ergeben sich in den Beschleunigungsdaten entlang der Sagittal- und der Longitudinalachse des Pferdes, sowie in der Winkelgeschwindigkeit um die Sagittalachse. Entlang der Sagittalachse (anterior-posterior) lassen sich maximale Beschleunigungen nach posterior während des Bodenkontakts der Vorhand und der Hinterhand im Absprung und durch die Landung festhalten. Jeweils maximale Beschleunigungen nach cranial und nach caudal durch den Bodenkontakt der Vorhand und der Hinterhand im Absprung und in der Landephase der Vorderbeine ergeben sich entlang der Longitudinalachse (cranio-caudal). In der Rotation um die Sagittalachse des Pferdes zeigen sich die rückwärtige Winkelgeschwindigkeit im Absprung, die vorwärts gerichtete Rotation im Flug und die rückwärtige Aufrichtung nach der Landung. Weitere Parameter, wie die Anlaufgeschwindigkeit, die Absprung- und Landegeschwindigkeit, die Absprung- und Landeabstandsdistanz und der jeweilige Rumpfwinkel können derzeit noch nicht aus den inertialen Daten erfasst werden. Die Ergebnisse ( $n = 60$ ) zeigen signifikant die Individualität der einzelnen Pferde für alle Parameter. Der Versuch eines standardisierten Anritts aus einer Gymnastikreihe, zur Beschränkung der Individualität in der Bewegung, wirkt sich auf die Absprungposition aus, die restliche Sprungkinematik des Rumpfes bleibt dann aber unabhängig. Die durchgeführte Untersuchung zur Prüfung der Darstellungsmöglichkeiten der intra-individuellen Rumpfkine-matik am Sprung innerhalb des Sensorkoordinatensystems ist positiv zu bewerten, auch wenn die Darstellung von Distanzen, Winkeln und Geschwindigkeiten per Integration auf Grund der fehlenden Integrationskonstante noch nicht möglich ist. Für die zusätzliche Darstellung der Springkinematik mit Bezug zum Weltkoordinatensystem sind weitere Untersuchungen zur Orientierung über die absoluten Winkelverläufe der inertialen Messeinheit im Raum, der physikalischen Eigenschaften der einzelnen Sensoren, sowie der Messgenauigkeit der gesamten inertialen Messeinheit notwendig, um langfristig ein autonomes System zu entwickeln.

**Schlüsselwörter:** Springtraining, Kinematik, Sattelgurt, Ausbildung, Leistungsdiagnostik, Inertialsensoren, Messgurt, Pferdesport

## Performance-related data capture based on inertial sensors for movement monitoring in equestrian show jumping

A cross-sectional study with five different experienced show jumping and eventing horses was undertaken to prepare a simple and versatile possibility to objectify jumping movement in training and competition in order to optimize training and health maintenance. From the state of scientific research, continuing theoretical considerations and previously performed measurements with the selected inertial sensors, a large pool of possible performance-relevant parameters is selected. Its presentability should be proofed in the next step in field trials by an inertial measurement unit embedded in a saddle belt. The horses were ridden over a single vertical fence with a height of 1.30m. For the purpose of a standardized jumping movement, a gymnastic series is prefixed in half of the trials ( $n=30$ ). The other half is approached in normal canter. A three dimensional accelerometer and a gyroscope, embedded in the saddle belt, illustrate the kinematics of the horses trunk. In three body planes, the translational and rotational movement of the horses trunk results in a consistent pattern of movement with striking points while jumping. In translation, there is a maximum dorsal acceleration of the fore limbs and of the hind limbs in take-off as well as of the fore limbs in landing in sagittal direction. In longitudinal direction, caudal and cranial maximum values of the fore limbs and the hind limbs in take-off are visible. Additionally, with the rotation, velocity around the body width axis at takeoff (dorsal), in suspension (ventral) and after landing (dorsal) are clearly detectable. The translation in the transverse direction as well as the rotation around the body length and body depth axis do not result in evaluable movement patterns. Other important parameters like the velocity of approach, take-off and landing as well as the take-off and landing distance and angle cannot be obtained from the inertial data. Comparing the results of the different horses, a main effect due to the individuality of each parameter ( $p < 0.01$ ) can be shown. In comparison to the approach in canter, approaching out of a gymnastic series of obstacles leads to a significantly higher velocity of approach ( $p < 0.05$ ), to a significantly smaller take off distance between the second hind limb and the baseline of the obstacle ( $p < 0.05$ ) and to a significantly higher minimum of angular velocity in suspension ( $p < 0.05$ ). By MANOVA, no interaction effects between the two factors "Horse" ( $p > 0.05$ ) and "Approach" ( $p > 0.05$ ) can be shown. The illustration of take-off and landing velocity, distance and angle of the horses trunks in take-off and landing as well as the approaching speed by integration of the inertial data is not possible yet. The drift of the sensors is too high. In conclusion the inertial measurement system appears to be suitable to present jumping kinematics in the field. The conducted investigation implies the possibility to compare the intra-individual kinematics of horses trunks in show jumping. Because the measurement error accumulated rapidly over measurement duration, the gyroscope data cannot be used to determine the sensor's orientation. To shorten the measurement duration, a known integration constant close to the take-off position is necessary. Further examination with a larger number of horses is necessary to evaluate and interpret the inertial parameters in relation to individual performance. Additionally, physical properties of each sensor, possibilities to determine IMUs' orientation as well as the accuracy of the whole measurement unit have to be proofed in order to create a fitting filter system for an autonomous self-tracking system. Therewith, the usage of the IMU saddle belt without an external source as well as the illustration of the kinematics in relation to the world-coordinate-system become possible. Otherwise, kinematic data in relation to the sensor-coordinate-system has to be evaluated in a further investigation with a larger number of horses in order to explain the coherence to performance and success.

**Keywords:** show jumping, exercise, inertial measurement girth, performance analysis, kinematics, equine

**Zitation:** Fercher C. (2017) Erfassung leistungsrelevanter Parameter mit Inertialsensoren zur Darstellung der Springbewegung von Sportpferden. *Pferdeheilkunde* 33, 377-385; DOI 10.21836/PEM20170408

**Korrespondenz:** Christina Fercher, Dackmarer Esch 5, 48231 Warendorf; E-Mail: c.fercher@osp-waf.de

## Einleitung

Das Pferd als Vierbeiner eignet sich auf Grund seiner anatomischen Gegebenheiten, seines natürlich veranlagten Springvermögens und seiner konditionellen und koordinativen Fähigkeiten eine individuelle Technik zur Überwindung von Hindernissen an. In der Ausbildung und im Training kann diese Springbewegung weiterentwickelt, optimiert und unter verschiedenen Bedingungen ökonomisiert werden. Durch diverse Linienführungen, verschiedene Sprungtypen und technische Anforderungen, wie Distanzen und Kombinationen, fordert ein wettkampftypischer Parcours nicht nur die Fertigkeit diese Sprungbewegung aus verschiedenen Ausgangslagen abrufen zu können, sondern auch die Fähigkeiten diese entsprechend der Parcourslänge und der Anzahl der im ermüdeten Zustand ausreichend gut ausführen zu können. Schließlich muss im Wettkampf die Ziellinie am Ende des Kurses ohne Fehler in der schnellsten Zeit passiert werden. Dabei entscheidet oft nur der Bruchteil einer Sekunde oder Präzision über Sieg oder Niederlage. Neben der Leistungsoptimierung ist die Gesundheit der Sportpferde ein weiterer wichtiger Aspekt. Nur gesunde Pferde können erfolgreich über Jahre eingesetzt und an den Sport gebunden werden. Nicht selten kommt es jedoch unmittelbar vor den großen internationalen Championaten der Saison zu verletzungsbedingten Ausfällen. Hochintensive und spezifische Trainingseinheiten gehen mit großen Belastungen, Verletzungsrisiken und der Gefahr von Übertrainingsprozessen einher. Ein stupides Mehr an spezifischen und intensiven Springeinheiten hilft kaum beim Feinschliff für das Quäntchen mehr im Spitzensport.

Mit der Aufzeichnung der leistungsrelevanten Parameter am Sprung wird der Versuch unternommen, langfristig Trainingsumfänge, Belastungen und Intensitäten zu dokumentieren und durch Evaluierung der Trainingsinhalte und -ziele zu einer systematischen und zielgerichteten Trainingssteuerung als Optimierung des Springtrainings weiterzuentwickeln. Ziel dieser Arbeit ist es nun die Grundlagen für ein solches „Trainings- und Analysetool“ zu schaffen und die Darstellbarkeit der leistungsrelevanten Bewegungsparameter am Sprung zu überprüfen. Die Parameter werden aus dem wissenschaftlichen Forschungsstand, biomechanischer Überlegungen und ersten Untersuchungen mit dem ausgewählten Messsystem gesammelt. Die Auswahl des Messsystems fällt auf eine inertielle Messeinheit (IMU), die eingebettet im Sattelgurt einen einfachen und vielseitigen Einsatz in der Sportpraxis und im Trainingsalltag verspricht und vor Ort vom Reiter oder Pfleger selbst zur Datenerfassung an das Pferd angebracht werden kann.

## Material und Methoden

### Pferde

Zwei Wallache und drei Stuten (7–13 Jahre; 162–171 cm Größe; 515–610 kg Gewicht) werden mit demselben Sattel-

gurt und der dort eingebetteten IMU nacheinander vorgestellt. Der Ausbildungsstand, definiert durch die Platzierungen im Wettkampf (Saison 2014), reichen von leichten (1,20 m) bis zu schweren Springprüfungen (1,40 m) und von leichten (CIC\*) bis zu schweren Vielseitigkeitsprüfungen (CCI\*\*\*). Tabelle 1 beschreibt in der ersten Zeile die einzelnen Eigenschaften der Pferde. Für die Untersuchung wird ein mittelschwerer Steilsprung mit einer Höhe von 1,30 m und einer 15 cm entfernten Stange als Absprunghilfe ausgewählt, um allen fünf Pferden die erfolgreiche Absolvierung der gestellten Aufgabe zu erleichtern. Form und Farbe der Sprünge, sowie die Reithalle als Untersuchungsort ist den Pferden aus dem Training bekannt. Im Rahmen der Aufbauphase für die kommende Turniersaison 2015 wird die Untersuchung in eine gewöhnliche Trainingseinheit integriert. Das Aufwärmen der Pferde und die Gestaltung der Pausen werden zeitlich und inhaltlich vom Reiter des jeweiligen Pferdes entsprechend angepasst. Die Reiter-Pferd-Kombinationen sind sich über mehrere Wochen des Trainings vertraut. Das Aufwärmen beschränkte sich bei allen Pferden auf ein lockeres dressurmäßiges Lösen im Schritt, Trab und Galopp, sowie bei Bedarf ein paar kleineren Sprüngen. Theoretisch ist es möglich, dass sich die Bewegung des Reiters im Sattel über den Gurt auf die Daten überträgt. Um dieses Phänomen ausschließen zu können, werden zwei unterschiedliche Reiter mit ihren Pferden für die Durchführung ausgewählt. Die Wahrscheinlichkeit einer Fehlinterpretation einer individuellen Bewegung des Reiters über alle Versuche ist gering.

### Methodik

Das ausgewählte Messsystem (Four Sense; Münster) beinhaltet je drei Beschleunigungssensoren (400 Hz), Gyroskope (200 Hz interpoliert) und Magnetfeldsensoren (50 Hz), die mit ihrer orthogonalen Anordnung als IMU dreidimensional (3D) aufzeichnen. Mit einem Gewicht von 5 g und einer Größe von 60 × 18 × 6 mm wird die Bewegung des Pferdes nicht gestört. Ein kleiner Akku (LIPO AE803466 1900 mA) mit einem Gewicht von 37 g ermöglicht eine Datenaufzeichnung von 8 h. Die Anbringung erfolgt über einen Sattelgurt, der wie gewohnt mit dem Sattel an das Pferd angelegt werden kann. Die fixe und stabile Messposition durch den Sattelgurt am caudalen Teil des Brustbeins liegt in unmittelbarer Nähe zum Körperschwerpunkt des Pferdes (vgl. *Barrey* und *Galloux*, 1997) und zeichnet in dieser Position die 3D-Kinematik der Bewegung des Pferderumpfes, dem größten Masseanteil der Reiter-Pferd-Kombination, auf. Jedes Pferd absolviert das Messobjekt 12 Mal, wobei die Hälfte der Versuche aus einer Gymnastikreihe heraus erfolgt. Die Reihe wird im Wechsel aus einer links und einer rechts Wendung im Trab angeritten. Sie besteht aus einer vorgelegten Stange (Abstand: 2,20 m) und einem „In-Out“ (Abstand: 2,80 m). Mit drei Galopp-sprüngen (Abstand: 12,80 m) geht es anschließend auf gerader Linie zum beschriebenen Messobjekt. Ziel dieser Art des Anlaufes ist eine Standardisierung der Absprunghöhe und

der daraus resultierenden Sprungbewegung, um eine Möglichkeit für Vergleiche zwischen den Pferden zu schaffen. In der anderen Hälfte der Versuche erfolgt der Anritt des einzelnen Hindernisses wettkampftypisch aus dem Galopp. Für einen möglichen Vergleich der Springbewegungen aus einem Rechts- bzw. Linksgalopp wird auch hier das Hindernis im Wechsel aus dem entsprechenden Galopp angeritten.

Ergänzend wird eine Videokamera in 10 m Abstand orthogonal zur Bewegungsrichtung aufgestellt. Um die Bildmitte auf den Absprung zu legen, wird die Kameraposition 2 m in Richtung Anlauf vor das Hindernis verlegt. Die Höhe des Stativs liegt bei 1,50 m. Mit einer Auflösung von 1920 × 1080 Pixel werden 50 Halbbilder aufgezeichnet. Die Kalibrierung des Kamerabildes wird mit Hilfe einer 2 m langen Latte aus Holz, mit je 10 cm breiten, schwarzen und weißen Feldern, zu Beginn der Versuchsdurchführung horizontal und vertikal aufgenommen. Mit den Videoaufnahmen wird die Bewegung digitalisiert und die Zuordnung, sowie Interpretation der inertialen Daten ermöglicht. Die Synchronisierung findet vor jedem Springversuch durch ein zeitgleiches, sichtbares Signal in beiden Messsystemen statt. Mit der Software Humotion Data Logger 3.3.670 (Four Sense) werden die Daten in präkalibrierter Form in der entsprechenden Einheit exportiert und als csv-Datei in der Software Dartfish (Version 6) visuell über die mpeg-Video dateien gelegt.

Die Statistik der Untersuchung wird mit SPSS (Statistical Package for the Social Sciences; Version 23 Advanced) durchgeführt. Alle Parameter werden deskriptiv mit Mittelwert und Standardabweichung pro Pferd und im Gesamten aufgeführt. Die Varianzhomogenität (Levene-Test;  $p > 0,05$ ) und die Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test;  $p > 0,05$ ) werden als Voraussetzungen für weitere Analysen ebenfalls in SPSS berechnet. Der Faktor „Anritt“, als der Einfluss der beiden Arten des Anreitens aus der Reihe oder aus dem Galopp, und der Faktor „Pferd“, als der Einfluss des einzelnen Pferdes, werden gemeinsam durch eine multivariate Varianzanalyse (MANOVA) untersucht. Es treten dabei mit  $p > 0,05$  keine Interaktionseffekte auf, so dass der Einfluss jeweils durch eine einfaktorische Varianzanalyse (ANOVA) der Faktoren „Anritt“ und „Pferd“ untersucht werden kann. Mit Hilfe des Least Significant Difference Test (LSD) nach Fisher werden dann im Anschluss die Unterschiede zwischen den einzelnen Pferden bestimmt. Zusätzlich wird für das biomechanische Verständnis der Korrelationskoeffizienten  $r$  nach Pearson ( $r > \pm 0,5$ ;

$p < 0,001$ ) zwischen den einzelnen leistungsrelevanten Bewegungsparametern berechnet.

## Ergebnisse

Zur Veranschaulichung skizziert Abbildung 1 (modifiziert nach FN, 2012) die Bewegung von Reiter und Pferd am Sprung. Die hinzugefügte Phasenbezeichnung entspricht der Terminologie von Clayton (1989) und unterteilt die Springbewegung in die Phasen Anlauf („approach“), Absprung („take-off“), Flug („suspension“), Landung („landing“) und Weitergaloppieren („move off“). Ein Galoppsprung ist dabei durch die zyklischen Bodenkontakte der vier Hufe (Fußfolge) definiert und beginnt mit dem ersten Bodenkontakt durch einen der beiden Hinterhufe. Je nach dem welches der Beinpaare weiter nach vorne greift, wird der Galopp in einen Rechts- bzw. Linksgalopp unterschieden. Für die einheitliche Bezeichnung der Bewegungsereignisse und der Parameter werden die Abkürzungen „...“, A3, A2, A1“ für die aufeinanderfolgenden Galoppsprünge im Anlauf zum Hindernis, „TO“ für den Absprung der Hinterhand (HH), „Air“ für die Flugphase, „LA“ für das versetzte Landen der Vorhand (VH) und entsprechend „MO1, MO2, MO3, ...“ für die Galoppsprünge beim anschließenden Weitergaloppieren nach dem Hindernis verwendet.

### Die leistungsrelevanten Bewegungsparameter

Den leistungsrelevanten Parametern der einzelnen Bewegungsphasen liegt eine eingehende Literaturrecherche zu Grunde (Fercher 2017). Aus verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten zur Biomechanik der Springbewegung von Pferden ergeben sich Parameter, die grundsätzlich in Zusammenhang mit Leistung und Erfolg am Sprung gebracht werden können. Leach et al. (1984), Clayton und Barlow (1989, 1991), Devel und Park (1991), Colborne et al. (1995) sowie Lütteken (2001) und Powers (2002) stellten bereits zahlreiche Indikatoren im Bereich des Anlaufs und Absprungs für erfolgreiches Springen fest: die Anlaufgeschwindigkeit ( $V_A$ ), die Ausgangsposition am Ende des Anlaufs vor dem Absprung der HH mit den Komponenten Absprungdistanz zur Sprungbasis ( $d_{HH1}$  &  $d_{HH2}$ ) und dem Absprungwinkel ( $\beta_{TO}$ ). Zusätzlich ist nach Leach et al. (1984), Merkens et al. (1991), Schamhardt et al. (1993) sowie Barrey

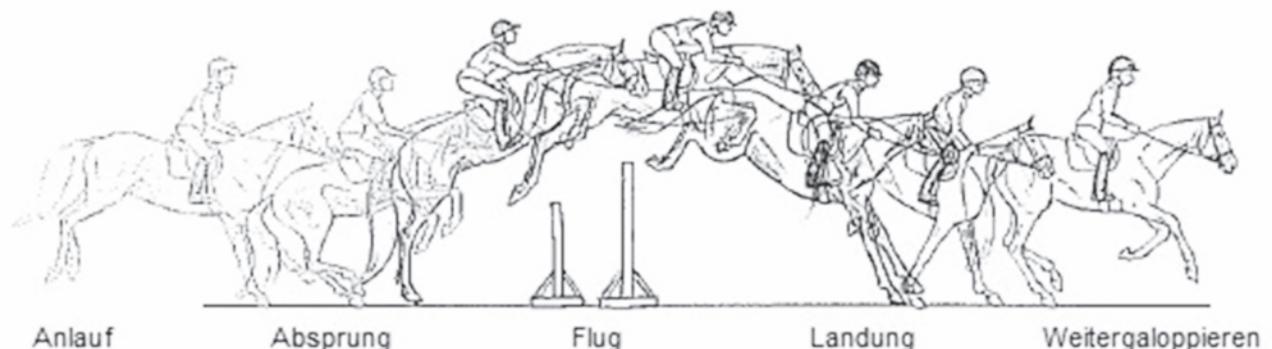


Abb. 1 Die Phasen der Bewegung am Sprung | *The phases of movement of jumping*

und Galloux (1997) die Beschleunigung aus der HH ein wichtiges Kriterium für die erfolgreiche Überwindung eines Hindernisses. Die Landung sollte durch die hohe Belastung im Hinblick auf Prävention und Gesunderhaltung ebenfalls untersucht werden (Merkens et al. 1991, Schamhardt et al. 1993, Barrey und Galloux 1997, Meershoek et al. (2001a), Meershoek et al. 2001b). Dabei könnte die Landedistanz der Vorderbeine ( $d_{VH1}$  &  $d_{VH2}$ ), der Landewinkel ( $\beta_{LA}$ ) und die vertikale und horizontale Landegeschwindigkeit ( $V_{LAx}$  &  $V_{LAy}$ ) erfasst werden. Beim Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Arbeiten wird deutlich, wie schwierig der Bezug zum Begriff Leistung und zur Bewertung dieser über ein „fehlerfrei“ hinaus ist. Die Frage nach einer optimalen oder guten Springbewegung, mit einer ökonomischen Kraftnutzung und geringer Belastung der körperlichen Strukturen, kann nur für jedes Pferd individuell beantwortet werden. Aus diesem Gedanken resultiert der Wunsch nach einer Darstellung aller leistungsrelevanten Bewegungsparametern, um das Wissen über biomechanische Prozesse, individuelle Springstile und individuelle Erfolgsrezepte generieren zu können.

Erste Untersuchungen mit dem ausgewählten Messsystem führen ebenfalls zu möglichen leistungsrelevanten Erkenntnissen. Dabei werden grundsätzlich die drei Bewegungsrichtungen anterior-posterior (AP), cranial-caudal (CC) und medial-lateral (ML), die annähernd den anatomischen Körperachsen des Pferdes entsprechen, unterschieden. In den translatorischen Beschleunigungsdaten entlang der Sagittal- (AP) und Longitudinalachse (CC) des Pferdes und der Winkelgeschwindigkeit um die Sagittalachse des Pferdes zeigen sich bei allen ausgewerteten Versuchen vergleichbare Datenverläufe mit markanten Ereignissen, die im Zusammenhang mit der Sprungdynamik und Kinetik stehen können. Die Abbildungen 2a–c stellen typische Datenverläufe in den drei beschriebenen Bewegungsrichtungen dar. Der Tiefpunkt  $t_0$  (AP) vor A1 wird zur zeitlichen Synchronisation der Datensätze genutzt. Zusätzlich sind die Auffälligkeiten in jeder Bewegungsrichtung entsprechend beschriftet. Entlang der Sagittalachse (Abb. 2a) ergeben sich maximale Beschleunigungswerte nach posterior zum Zeitpunkt des Bodenkontakts der VH ( $a_{APVHmax}$ ), der HH ( $a_{APHHmax}$ ) und der Landung ( $a_{APLamax}$ ). Entlang der Longitudinalachse (Abb. 2b) ergibt sich im letzten Galoppsprung durch den Bodenkontakt der VH ein nach vorne (cranial) gerichtetes Maximum ( $a_{CCVHmax1}$ ) und ein maximal nach hinten (caudal) gerichtetes Minimum ( $a_{CCVHmin}$ ) mit einem anschließenden nach vorne gerichteten Maximum ( $a_{CCVHmax2}$ ). Durch den Abdruck der HH entsteht ein nach caudal gerichtetes Minimum ( $a_{CCHHmin}$ ) und ein nach cranial gerichtetes Maximum ( $a_{CCHHmax}$ ). Mit der Landung der VH zeigen sich je zwei nach caudal und zwei nach cranial gerichtete Extrempunkte im Wechsel ( $a_{CCLAmax1}$ ,  $a_{CCLAmax2}$ ,  $a_{CCLAmin1}$ ,  $a_{CCLAmin2}$ ). In den Winkelgeschwindigkeitsdaten der Gyroskope um die Sagittalachse des Pferdes (Abb. 2c) zeigt sich eine nach hinten gerichtete Rotation des Pferderumpfes nach dem Bodenkontakt der VH ( $\omega_{TOmax}$ ) und eine nach vorne gerichtete Rotation während des Flugs ( $\omega_{AIRmin}$ ). Mit der Landung der VH kommt es zu einer weiteren rückwärtigen Rotation ( $\omega_{Lamax}$ ). Entlang der Transversalachse (ML) des Pferdes, sowie um die Longitudinal- und Transversalachse ergeben sich keine vergleichbaren Datenverläufe.

Mit den bereits dargestellten inertialen Parametern lassen sich theoretisch Absprung- und Landegeschwindigkeit nach posterior und cranial, sowie der sagittale Absprung und Landewinkel

durch Integration berechnen. Besteht die Möglichkeit der Erfassung von vertikaler und horizontaler Absprung- bzw. Landegeschwindigkeit, sowie der Absprung- und Landewinkel im Bezug zum Weltkoordinatensystem, können Sprunghöhe und -weite des Rumpfes berechnet werden und Rückschlüsse auf die Flugkurve gezogen werden. Die Erfassung der Zeitstruktur der einzelnen Bewegungsabschnitte hat nicht nur für die Wettkampfanalyse, sondern auch für das Technik- und Schnellkrafttraining einen großen Mehrwert. Anhand der sagittalen Beschleunigung lässt sich die benötigte Zeit für den letzten Galoppsprung ( $t_{A1}$ ), den Absprung der HH ( $t_{TO}$ ), den Flug ( $t_{AIR}$ ), die Landung ( $t_{LA}$ ) und den ersten Galoppsprung des Weitergaloppierens ( $t_{MO1}$ ) ermitteln (Barrey und Galloux 1997), so dass sich zu diesem Zeitpunkt eine große Parametervielfalt ergibt.

### Die darstellbaren Bewegungsparameter

In den folgenden Untersuchungsergebnissen werden die Möglichkeiten zur Darstellung der beschriebenen, leistungsrelevanten Parameter mit dem ausgewählten Messsystem, der IMU im Sattelgurt, untersucht. Insgesamt sind 60 Sprünge mit dem gleichen Messsystem an einem Tag unter den gleichen Bedingungen auswertbar. Die Daten der IMU können vollständig erfasst und dargestellt werden.

In der Beschleunigung entlang der Sagittalachse beträgt  $a_{APVHmax}$  als rückwärtige Beschleunigung während des Bodenkontakts der VH,  $38,84 \pm 6,16 \text{ m/s}^2$ .  $a_{APHHmax}$  als rückwärtige Beschleunigung während des Bodenkontakts der HH, liegt mit  $33,11 \pm 7,86 \text{ m/s}^2$  etwas niedriger. In der Landung zeigt sich die rückwärtige Rumpfbeschleunigung mit  $50,48 \pm 5,02 \text{ m/s}^2$  am höchsten. Aus den Beschleunigungsdaten entlang der Longitudinalachse (CC) kann im letzten Galoppsprung ein nach cranial gerichtetes Maximum ( $a_{CCVHmax1}$ ) von  $22,06 \pm 6,81 \text{ m/s}^2$  und ein maximal nach caudal gerichtetes Maximum ( $a_{CCVHmin}$ ) mit  $-28,08 \pm 6,83 \text{ m/s}^2$  und ein weiteres nach cranial gerichtetes Maximum ( $a_{CCVHmax2}$ ) von  $14,43 \pm 5,42 \text{ m/s}^2$  beobachtet werden. Durch den Absprung der HH entsteht im Anschluss nach caudal ( $a_{CCHHmin}$ ) mit  $-24,29 \pm 5,5 \text{ m/s}^2$  und nach cranial ( $a_{CCHHmax}$ ) mit  $18,92 \pm 6,54 \text{ m/s}^2$ . Im Bereich der Landung können zwei nach cranial und zwei nach caudal gerichtete Beschleunigungsspitzen ( $a_{CCLAmax1}$ ,  $a_{CCLAmax2}$ ,  $a_{CCLAmin1}$ ,  $a_{CCLAmin2}$ ) beobachtet werden. Mit  $34,42 \pm 11,12 \text{ m/s}^2$  und  $26,61 \pm 12,25 \text{ m/s}^2$ , sowie  $-17,37 \pm 15,89 \text{ m/s}^2$  und  $-28,71 \pm 10,82 \text{ m/s}^2$  sind deutliche Unterschiede vorhanden. Um die Sagittalachse des Pferdes zeigt sich die Winkelgeschwindigkeit als Aufrichtung nach posterior durch den Bodenkontakt der VH vor dem Absprung der HH ( $\omega_{TOmax}$ ) im Maximum mit  $4,91 \pm 0,53 \text{ rad/s}$ .  $\omega_{AIRmin}$ , innerhalb der ersten Hälfte der Flugphase, beträgt  $-3,15 \pm 0,31 \text{ rad/s}$  und beschreibt die Rotation nach anterior. Nach der Landung kommt es zu einer weiteren Rotation nach posterior ( $\omega_{Lamax}$ ) mit  $4,48 \pm 0,53 \text{ rad/s}$ . Berechnungen von Geschwindigkeiten und Winkel durch Integration der Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsdaten bringen keine verwertbaren Ergebnisse. Die Dauer der einzelnen Phasen kann durch die Tiefpunkte im Datenverlauf der sagittalen Rumpfbeschleunigung bestimmt werden (Barrey und Galloux 1997). Zwischen A1 und TO ist allerdings kein eindeutiger Tiefpunkt zu ermitteln, weshalb die beiden Phasen gemeinsam dargestellt werden. A1 mit TO zeigt sich mit einer Dauer von  $0,71 \pm 0,05 \text{ s}$ . Die

Flugzeit beträgt  $0,45 \pm 0,06$ s. Die Landung der Vorderbeine dauert durchschnittlich  $0,25 \pm 0,04$ s. Gesamt ergibt sich damit eine Sprungdauer, gemessen beginnend mit A1 bis nach der Landung der VH, von  $1,41 \pm 0,06$ s. Die Dauer von MO1 ist an einem einzeln Steilsprung nicht relevant.

Aus dem Videomaterial können die Anlaufgeschwindigkeit ( $v_A$ ) und die Absprungdistanz der HH ( $d_{HH1}$  &  $d_{HH2}$ ) sowie der Absprungwinkel des Rumpfes ( $\beta_{TO}$ ) bestimmt werden.  $v_A$ , gemessen an der Brust des Pferdes von 7 m bis 3 m vor dem Hindernis, liegt bei  $4,9 \pm 0,5$ m/s.  $d_{HH1}$  und  $d_{HH2}$ , gemessen von der Hufspitze bis zur Grundlinie des Hindernisses, liegt

bei  $207 \pm 21,1$  cm für HH1 und bei  $193 \pm 20,7$  cm für HH2. Damit ergibt sich eine durchschnittliche Schrittlänge von  $14,3 \pm 11,7$ cm, wobei sich Pferd 5 mit 3,6cm deutlich von den anderen Pferden (18,3cm; 19,3cm; 17,3cm; 12,9cm) unterscheidet.  $\beta_{TO}$ , gemessen durch die Winkelveränderung der Verbindungslinie vom Buggelenk bis zum Sitzbeinhöcker in Ruhe und im Absprung, zeigt sich mit  $29,4 \pm 2,2^\circ$ .

Tabelle 1 stellt alle Beschleunigungs-, Winkelgeschwindigkeits-, Zeit- und Videoergebnisse im Überblick dar. Dabei wird für jedes Bewegungsparameter sowohl der Mittelwert der Versuche pro Pferd (n=12) mit der entsprechenden Standardabwei-

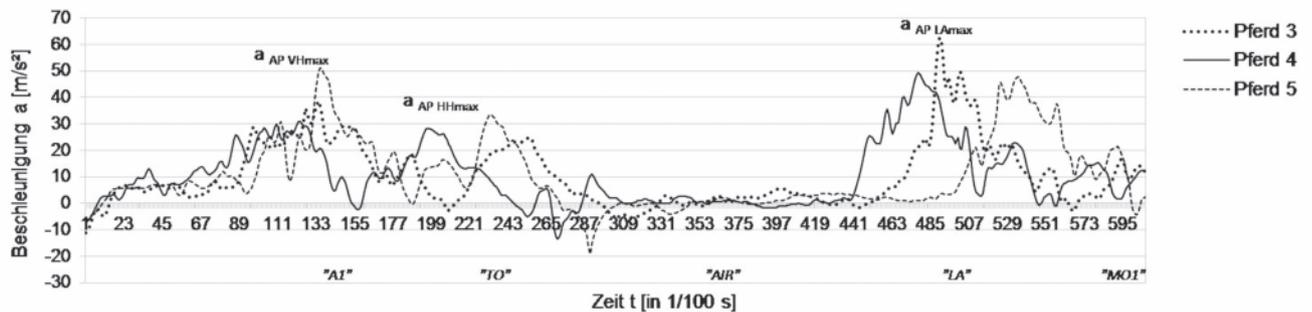


Abb. 2a Beschleunigung des Pferderumpfs entlang der Sagittalachse | Acceleration of horses trunk in anterior and posterior direction

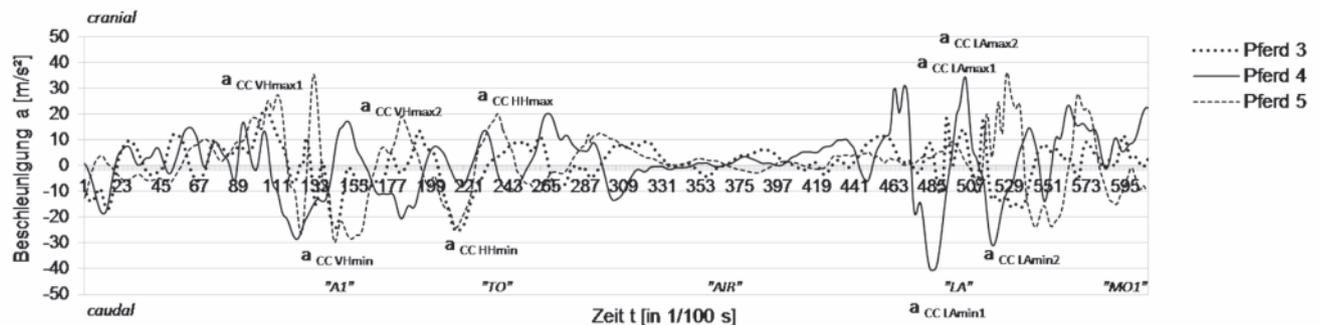


Abb. 2b Beschleunigung des Pferderumpfs entlang der Longitudinalachse | Acceleration of horses trunk in cranial and caudal direction

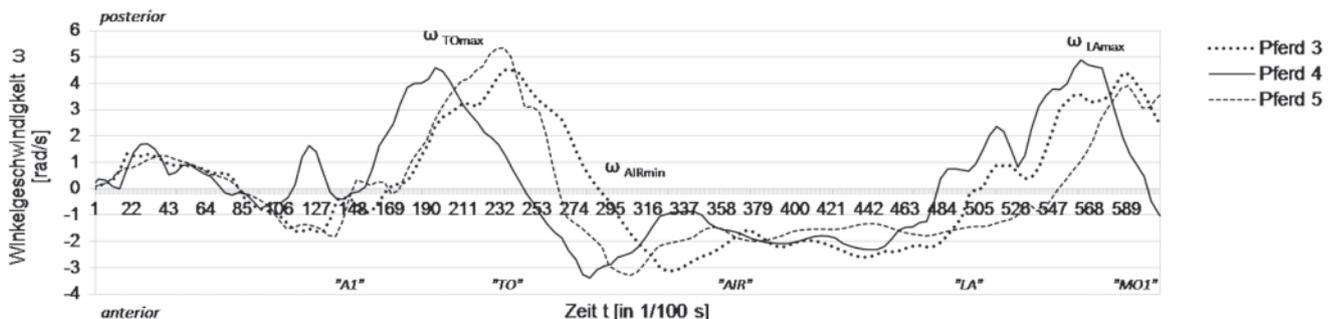


Abb. 2c Winkelgeschwindigkeit des Pferderumpfs um die Körperbreitenachse | Angular velocity of horses trunk around the body width axis

chung, als auch der Gesamtmittelwert ( $n = 60$ ) mit der Standardabweichung aller Versuche, angegeben. Zusätzlich sind für die Vollständigkeit die nicht erfassten Parameter hinzugefügt.

#### Der Korrelationskoeffizient $r$ zwischen den Bewegungsparametern

Um erste biomechanische Zusammenhänge in den Bewegungsphasen bestimmen zu können, wird der Korrelationskoeffizienten  $r$  nach Pearson für die Bewegungsparameter

hinweg berechnet ( $r > \pm 0,5$ ;  $p < 0,001$ ). Der Bodenkontakt der VH mit der Beschleunigung entgegen der Bewegungsrichtung ( $a_{CCVHmin}$ ) korreliert im Betrag positiv mit der Distanz der HH ( $d_{HH1} r = -0,638$ ;  $d_{HH2} r = -0,654$ ). Die beiden Distanzen zueinander korrelieren mit  $r = 0,843$ . Neben der Auswirkung auf die Absprungdistanz der HH, wirkt sich die negative Beschleunigung durch die VH ( $a_{CCVHmin}$ ) auch auf den anschließenden Absprung der HH aus. Mit  $r = -0,531$  korreliert  $a_{CCVHmin}$  im Betrag positiv mit der Beschleunigung nach cranial ( $a_{CCHHmax}$ ) und mit  $r = -0,540$  auf die Beschleunigung nach posterior ( $a_{APHHmax}$ ). Die aus dem Bodenkontakt der VH

**Tab. 1** Kinematischen Ergebnisse der fünf untersuchten Pferde mit ihren Eigenschaften | *Kinematic results of five investigated horses and its characteristics*

	Pferd 1 10-j. Stute Gewicht 580 kg Größe 171 cm M**	Pferd 2 10-j. Wallach Gewicht 610 kg Größe 170 cm M*	Pferd 3 12-j. Wallach Gewicht 515 kg Größe 162 cm M** & CCI***	Pferd 4 7-j. Stute Gewicht 608 kg Größe 170 cm L & CIC*	Pferd 5 13-j. Stute Gewicht 605 kg Größe 171 cm S*	Gesamt (n=60)
$v_A$ [m/s]	4,7±0,7 <sup>a</sup>	5,1±0,4 <sup>b</sup>	4,9±0,5 <sup>ab</sup>	4,6±0,4 <sup>a</sup>	5,1±0,3 <sup>b</sup>	4,9±0,5
$a_{APVHmax}$ [m/s <sup>2</sup> ]	37,44±3,64 <sup>a</sup>	41,20±3,51 <sup>b</sup>	36,47±3,24 <sup>a</sup>	32,91±3,89 <sup>c</sup>	46,21±6,33 <sup>d</sup>	38,84±6,16
$a_{CCVHmax}$ [m/s <sup>2</sup> ]	14,49±3,33 <sup>a</sup>	26,62±4,89 <sup>b</sup>	19,63±3,62 <sup>a</sup>	16,77±3,79 <sup>a</sup>	30,15±4,09 <sup>b</sup>	22,06±6,81
$a_{CCVHmin}$ [m/s <sup>2</sup> ]	-27,56±6,02 <sup>a</sup>	-33,88±3,86 <sup>b</sup>	-18,32±3,93 <sup>c</sup>	-28,89±2,51 <sup>ad</sup>	-31,74±4,56 <sup>bd</sup>	-28,08±6,83
$\omega_{TOmax}$ [rad/s]	5,26±0,44 <sup>ab</sup>	5,41±0,29 <sup>b</sup>	4,60±0,30 <sup>c</sup>	4,24±0,23 <sup>d</sup>	5,02±0,22 <sup>a</sup>	4,91±0,53
$d_{HH1}$ [cm]	199,6±16,8 <sup>a</sup>	223,67±14,4 <sup>b</sup>	181,3±14,1 <sup>c</sup>	224,5±13,9 <sup>b</sup>	206,8±9,5 <sup>a</sup>	207,0±21,1
$d_{HH2}$ [cm]	181,3±14,9 <sup>a</sup>	204,2±9,1 <sup>b</sup>	163,9±4,8 <sup>c</sup>	211,6±12,2 <sup>a</sup>	204,1±10,2 <sup>a</sup>	193,0±20,7
$\beta_{TO}$ [°]	29,6±1,6 <sup>a</sup>	27,7±1,4 <sup>b</sup>	30,7±1,2 <sup>ac</sup>	31,2±1,1 <sup>c</sup>	28,4±1,2 <sup>ab</sup>	29,4±2,2
$a_{APHHmax}$ [m/s <sup>2</sup> ]	32,31±3,79 <sup>a</sup>	44,02±3,51 <sup>b</sup>	25,35±2,21 <sup>c</sup>	28,83±3,52 <sup>c</sup>	35,02±1,48 <sup>a</sup>	33,11±7,86
$a_{CCHHmin}$ [m/s <sup>2</sup> ]	-22,52±4,18 <sup>a</sup>	-30,33±4,32 <sup>b</sup>	-20,49±2,98 <sup>a</sup>	-20,36±3,43 <sup>a</sup>	-27,74±4,12 <sup>b</sup>	-24,29±5,50
$a_{CCHHmax}$ [m/s <sup>2</sup> ]	24,51±5,84 <sup>a</sup>	18,60±5,04 <sup>b</sup>	11,81±2,09 <sup>c</sup>	19,49±3,82 <sup>b</sup>	24,46±3,77 <sup>ab</sup>	18,92±6,54
$v_{TOx}/v_{TOAP}$ [m/s]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$v_{TOy}/v_{TOCC}$ [m/s]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$t_{A1\&TO}$ [s]	0,72±0,02 <sup>a</sup>	0,70±0,03 <sup>b</sup>	0,76±0,03 <sup>c</sup>	0,65±0,02 <sup>d</sup>	0,74±0,02 <sup>ac</sup>	0,71±0,05
$t_{AIR}$ [s]	0,48±0,04 <sup>a</sup>	0,46±0,03 <sup>ab</sup>	0,36±0,04 <sup>c</sup>	0,44±0,04 <sup>b</sup>	0,48±0,04 <sup>a</sup>	0,45±0,06
$\omega_{AIRmin}$ [rad/s]	-3,11±0,29 <sup>a</sup>	-2,82±0,24 <sup>b</sup>	-2,04±0,23 <sup>a</sup>	-3,30±0,19 <sup>a</sup>	-3,27±0,34 <sup>a</sup>	-3,15±0,31
$v_{Lax}/v_{LAAP}$ [m/s]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$v_{Lay}/v_{LACC}$ [m/s]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$\beta_{LA}$ [°]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
$a_{APLAmx}$ [m/s <sup>2</sup> ]	48,89±5,15 <sup>a</sup>	48,98±5,74 <sup>a</sup>	52,73±4,81 <sup>b</sup>	53,89±4,20 <sup>b</sup>	47,93±2,13 <sup>a</sup>	50,48±5,02
$a_{CCLAmax1}$ [m/s <sup>2</sup> ]	28,89±10,95 <sup>a</sup>	46,84±10,02 <sup>b</sup>	26,42±6,78 <sup>a</sup>	33,27±9,10 <sup>ac</sup>	36,67±5,99 <sup>c</sup>	34,42±11,12
$a_{CCLAmax2}$ [m/s <sup>2</sup> ]	13,97±6,23 <sup>a</sup>	35,60±7,43 <sup>b</sup>	16,20±7,33 <sup>b</sup>	32,34±9,49 <sup>c</sup>	34,92±8,69 <sup>b</sup>	26,61±12,25
$a_{CCLAmin1}$ [m/s <sup>2</sup> ]	-19,57±19,97 <sup>a</sup>	-42,73±10,90 <sup>b</sup>	-6,51±1,97 <sup>c</sup>	-3,78±5,13 <sup>c</sup>	-6,71±2,58 <sup>c</sup>	-17,37±15,89
$a_{CCLAmin2}$ [m/s <sup>2</sup> ]	-14,58±13,27 <sup>a</sup>	-34,34±7,49 <sup>b</sup>	-29,76±7,32 <sup>b</sup>	-39,77±6,75 <sup>c</sup>	-27,43±5,09 <sup>b</sup>	-28,71±10,82
$\omega_{LAmx}$ [rad/s]	4,11±0,60 <sup>a</sup>	5,17±0,35 <sup>b</sup>	4,28±0,23 <sup>ac</sup>	4,33±0,34 <sup>ac</sup>	4,40±0,33 <sup>c</sup>	4,48±0,53
$t_{LA}$ [s]	0,29±0,03 <sup>a</sup>	0,25±0,02 <sup>bc</sup>	0,26±0,02 <sup>b</sup>	0,23±0,05 <sup>cd</sup>	0,22±0,02 <sup>d</sup>	0,25±0,04
$t_{Jump}$ [s]	1,50±0,02 <sup>a</sup>	1,42±0,03 <sup>b</sup>	1,38±0,02 <sup>c</sup>	1,33±0,03 <sup>d</sup>	1,44±0,03 <sup>e</sup>	1,41±0,06

<sup>a b c d e</sup> signifikante Unterschiede zwischen den Pferden nach Fisher's LSD ( $\alpha=0,05$ ), Geschwindigkeiten (v) in m/s, Beschleunigungen (a) in m/s<sup>2</sup>, Winkelgeschwindigkeiten ( $\omega$ ) in rad/s, Distanzen (d) in cm, Winkel ( $\beta$ ) in ° und Zeiten (t) in s angegeben.

resultierenden Rotationsgeschwindigkeit des Rumpfes nach posterior ( $\omega_{TOmax}$ ) beeinflusst ebenfalls den Absprung der HH. Mit  $r = -0,545$  gibt es einen im Betrag positiven Zusammenhang zur caudalen maximalen Beschleunigung aus der HH ( $a_{CCHHmin}$ ) und mit  $r = 0,623$  einen weiteren zu  $a_{APHHmax}$  von  $\omega_{TOmax}$ . Diese beiden entgegen der Bewegungsrichtung wirkenden maximalen Beschleunigungen ( $a_{CCHHmin}$  und  $a_{APHHmax}$ ) korrelieren untereinander mit  $r = -0,757$  ebenfalls signifikant.  $\omega_{AIRmin}$  wirkt sich signifikant auf die Landung aus. Das erste caudale Maximum ( $a_{CCLAmin1}$ ) korreliert mit  $\omega_{AIRmin}$  ( $r = -0,560$ ). Die restliche Landung bleibt unbeeinflusst, wobei die Parameter Landedistanz und -geschwindigkeit in dieser Arbeit nicht erfasst wurden. Auf der Basis der Flugkurve sind Zusammenhänge denkbar.

#### Der Vergleich des Links- und Rechtsgalopps

Auf der Basis der Videodaten ergeben sich verschiedene Beobachtungen, die gegen einen Vergleich des Springverhaltens aus dem Links- bzw. Rechtsgalopp sprechen. Die Reihe ( $n = 30$ ) wird aus dem Trab im Wechsel aus einer Links- und aus einer Rechtswendung angeritten. Bei 53% der Versuche entwickeln die Pferde in der Gymnastikreihe den Galopp aus der jeweiligen Wendung (bei 50% aus der Linkswendung und bei 50% aus der Rechtswendung). In 47% der Versuche entwickeln die Pferde den jeweils anderen Galopp (50% aus der Linkswendung und 50% aus der Rechtswendung) in der Gymnastikreihe. Beide Hinterhufe werden anschließend zum Absprung aus der Reihe heraus zu 50% in der entsprechenden Fußfolge des in der Reihe entwickelten Galopps aufgesetzt (60% davon im Linksgalopp und 40% davon im Rechtsgalopp). Bei den anderen 50% werden die Hinterbeine entgegen der Reihenfolge des entwickelten Galopps platziert (40% davon im Linksgalopp, 60% im Rechtsgalopp). Im Anritt aus dem Galopp ( $n = 30$ ) wählt der Reiter, je nachdem aus welcher Wendung der Anritt erfolgt, vorab mit seiner Hilfengebung den passenden Galopp. Dabei wechseln die Pferde bei 16% der Versuche vor dem Absprung den Galopp (40% im Rechtsgalopp und 60% im Linksgalopp). Bei 84% der Versuche halten die Pferde die Fußfolge des Galopps aus der Wendung ein (48% im Rechtsgalopp und 52% im Linksgalopp). Im Absprung platzieren dann die Pferde nur bei 23% der Versuche auch die beiden Hinterhufe in der Reihenfolge des Galopps aus A1 (davon 71% im Linksgalopp und 29% im Rechtsgalopp). 77% wechseln noch einmal unmittelbar vor dem Absprung die Fußfolge der Hinterbeine (52% im Linksgalopp, 48% im Rechtsgalopp). Sowohl der Wechsel des Galopps vor dem Absprung als auch der Wechsel beim Absprung der beiden Hinterbeine kann bei allen fünf Pferden beobachtet werden. Ein Vergleich des Springverhaltens aus dem Links- bzw. Rechtsgalopp wird aus diesem Grund nicht weiterverfolgt.

#### Der Einfluss des Anreitens und der Pferde

Die multivariate Varianzanalyse (MANOVA) mit den beiden Faktoren „Pferd“ und „Anritt“ zeigt keine Interaktionseffekte (Pillai-Spur;  $p > 0,05$ ) bei allen erfassten Bewegungsparametern und ermöglicht damit eine univariate Varianzanalyse (ANOVA). Der Faktor „Pferd“ zeigt sich mit  $p < 0,001$  signifikant bei allen Bewegungsparameter. Beim Vergleich der

Mittelwerte nach Fisher's LSD zeigt sich der eingangs beschriebene individuelle Bezug zur Springleistung sehr deutlich. Die Ergebnisse sind Tabelle 1 zu entnehmen. Die allgemeine, optimale Springleistung kann zu diesem Zeitpunkt nicht genau definiert werden, sondern muss maßgeschneidert für jeden der vierbeinigen Sportler auf der Basis intraindividuell erhaltener Untersuchungen erfolgen. Durch den Anlauf aus der Gymnastikreihe wird versucht, die Anlaufgeschwindigkeit und die Absprungposition, sowie die Springbewegung zu standardisieren.  $v_A$  zeigt sich mit durchschnittlich  $5,2 \pm 0,2$  m/s aus der Reihe signifikant ( $p > 0,05$ ) höher als aus dem Galopp mit  $4,5 \pm 0,5$  m/s. Mit  $210 \pm 18,8$  cm für  $d_{HH1}$  und  $196,5 \pm 18,6$  cm für  $d_{HH2}$  aus der Reihe heraus und  $204,5 \pm 23,2$  cm für  $d_{HH1}$  und  $189,4 \pm 22,4$  für  $d_{HH2}$  aus dem Galopp zeigt sich  $d_{HH2}$  aus dem Galopp signifikant dichter ( $p < 0,05$ ) an der Sprungbasis.  $\beta_{TO}$  unterscheidet sich mit  $29,4 \pm 2,0^\circ$  aus der Reihe und  $29,3 \pm 2,4^\circ$  aus dem Galopp nicht signifikant ( $p < 0,05$ ). Auf die Messdaten der IMU wirkt sich der Anlauf dagegen lediglich auf  $\omega_{AIRmin}$  aus. Aus dem natürlichen Galopp sind es  $-3,02 \pm 1,25$  rad/s, während aus der Reihe heraus der Wert mit  $-3,06 \pm 0,25$  rad/s signifikant höher ( $p < 0,05$ ) liegt. Alle anderen inertialen Ergebnisse und temporalen Phasenparameter bleiben mit  $p > 0,05$  vom Anritt unbeeinflusst. Standardisierte Testaufbauten in Form von Gymnastikreihen wirken sich demnach, zwar auf die Anlaufgeschwindigkeit und Absprungdistanz aus, standardisieren den weiteren Ablauf der Springbewegung aber nicht.

#### Diskussion

Viele der Bewegungsparameter werden in der Literatur einzeln erhoben, isoliert betrachtet oder in Zusammenhang mit nur einer Komponente, wie bspw. der Sprunghöhe oder -weite, gebracht. Die Frage nach einem guten oder schlechten Sprung, unabhängig der Tatsache, dass es zu keinem Fehler gekommen ist, kann zu diesem Zeitpunkt nicht ausreichend genau beantwortet werden. Der Bezug der einzelnen kinematischen Parameter der Springbewegung zur Springökonomie im Kontext des Gesundheitsmanagements ist ebenfalls schwierig zu treffen. Primär sind im Spitzensport vor allem intraindividuelle Erhebungen und Vergleiche der Parameter zu verschiedenen Zeitpunkten an verschiedenen Hindernissen nötig, um individuelle Springstile verstehen und optimieren zu können. Zusätzlich ist für die allgemeine Parameterbewertung die Untersuchung einer homogenen Gruppe von Springpferden auf höchstem Niveau hilfreich, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten der „Besten“ erfassen, (Spitzen-) Leistung an sich beschreiben und daraus allgemeine Grundsätze ableiten zu können. In einer großen Datenbasis ist es durchaus denkbar, verschiedene Springstile oder -typen durch Gruppierungen zu erhalten oder Eigenschaften und Ausprägungen mit spezifischen biomechanischen Aufgaben erklären zu können. In engem Kontakt mit den Reitern und Trainern kann die Erfahrung mit dem jeweiligen Sportpferd und die subjektive Wahrnehmung über die Bewegung mit in die Analyse der Leistung einfließen. Mit dieser ganzheitlichen Datenbasis bietet sich eine erneute Korrelationsuntersuchung an, um die Prinzipien im Absprung und deren Auswirkungen auf die Landung verstehen zu können.

Bevor sich dieser Frage angenähert werden kann, muss eine zuverlässige Möglichkeit zur objektiven Erfassung und Dar-

stellung der leistungsrelevanten Bewegungsparameter geschaffen werden. Bekannte und bewährte Methoden zur biomechanischen Bewegungsanalyse, wie bspw. Kraftmessplatten oder Motion Capture Systemen, sind zeitlich sehr aufwendig und, u.a. durch die Platzierung der Kraftmessplatte, durch ein begrenztes Messvolumen, auf Grund von Lichtverhältnissen und durch die Befestigung der Marker, nur unter bestimmten Voraussetzungen, ortsgebunden und an einzelnen Sprüngen durchführbar. Die Datenerfassung beschränkt sich damit auf wenige Messungen im Jahr. Wettkampfanalysen sind durch das internationale Reglement und den Gegebenheiten auf den Turnierplätzen nicht umsetzbar. Die einfache Handhabung der IMU im Sattelgurt ermöglicht einen vielseitigen Einsatz im Feld der Sportpraxis. Dabei ist die Aufzeichnung des Trainings im Heimatstall ebenso möglich wie die Analyse von Wettkämpfen auf der ganzen Welt. Mit dieser Untersuchung wird deutlich, dass ein Teil der als leistungsrelevant bezeichneten Parameter durch die Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsdaten direkt dargestellt werden können. Weitere Parameter, wie Frequenzen der Galoppsprünge im Anlauf oder in Kombinationen und Distanzen, sind ohne Weiteres durchführbar.

*Barrey und Galloux (1997)* haben ebenfalls die maximalen, sagittalen Beschleunigungen des Pferderumpfes an verschiedenen Steilsprüngen (1,15–1,30m Höhe) untersucht. Die gemessenen Werte liegen deutlich unter den vorgestellten Ergebnissen in dieser Arbeit, dass sich durch das Subtrahieren der Erdbeschleunigung mit  $9,81 \text{ m/s}^2$  zu Beginn in Ruhe aus dieser Achse erklären lässt und sich im Rahmen der Flugkurve in der Abbildung bestätigt. Ruht das Pferd, wirkt die Erdbeschleunigung nahezu lotrecht und kann entsprechend herausgerechnet werden. Richtet sich das Pferd vor dem Absprung auf, verteilt sich die wirkende Erdbeschleunigung anteilig und die Korrektur verfälscht die relativen sagittalen Daten deutlich. Für die Zielstellung im Spitzen- und Hochleistungssport genügt diese Methode nicht. Entweder muss eine korrekte Eliminierung der Erdbeschleunigung ermöglicht werden oder die wirkende Erdbeschleunigung, die sich auf das Pferd und dessen Bewegung auswirkt, bleibt in den Beschleunigungsdaten enthalten. *Barrey und Galloux (1997)* haben auch das Verhältnis der Beschleunigungsspitze aus VH zur HH mit  $2,0$  für gute Springpferde bzw. Springversuche resümiert. Mit  $1,2 \pm 0,3$  im Durchschnitt der hier durchgeführten Versuche kann die Annahmen bestätigt werden. Dennoch bleibt die Einordnung und Bedeutung des Verhältnisses unklar. Die Autoren beschreiben die lokale Nähe der Sensoren zur VH als Grund. Grundsätzlich liegen den beiden Beschleunigungsstößen unterschiedliche biomechanische Aufgaben zu Grunde, die für die Unterschiede in den Werten verantwortlich sein könnten. Nach dem versetzten Abdruck der VH kann in den Video- und Sensordaten die Aufrichtung als Rotation des Pferderumpfes um die Sagittalachse in die Absprungposition beobachtet werden. Die HH befördert dann durch den beiden kräftigen Abdruck das Pferd über das Hindernis. Die Richtung der beiden Impulse unterscheidet sich dabei zwangsläufig sehr stark, die durch das sagittale Verhältnis aber beschränkt in einer Richtung miteinander in Verbindung gesetzt werden. Entlang der Longitudinalachse ergeben sich Verhältnisse von  $a_{CCVH\max1}$  zu  $a_{CCHH\max}$  von  $1,24 \pm 0,53$  und von  $a_{CCVH\max2}$  zur  $a_{CCHH\max}$  von  $0,79 \pm 0,33$ . Vergleichbare Ergebnisse sind nicht vorhanden. Die Bewegung der VH in A1 ist dennoch eine wichtige Komponente für den Absprung.

Ohne diese Rotation würde die Ausgangsposition nicht eingenommen werden können und der Impuls aus der HH hätte keine Richtung.

Durch mathematische Integration der Winkelgeschwindigkeit können sagittale Winkel im Absprung- und Landebereich und auch Absprung- und Landegeschwindigkeiten in den verschiedenen Körperachsen des Pferdes berechnet werden. Durch die Integration der Beschleunigungswerte ergeben sich Rückschlüsse auf die sagittalen und longitudinalen Geschwindigkeiten im Anlauf, im Absprung und in der Landung. Zu bedenken bleibt, dass ein Vergleich der einzelnen Werte immer relativ zur Lage des Sensors bzw. der Position des Rumpfes steht. Um vergleichbare Parameter wie Absprung- und Landewinkel oder vertikale und horizontale Absprung- und Landegeschwindigkeiten im Weltkoordinatensystem zu erhalten, müssen die Daten aus dem Sensorkoordinatensystem transformiert werden. Mit Hilfe der absoluten Winkel (*Pfau et al. 2005*) kann die Lage der IMU im Raum bestimmt werden und durch eine Rotationsmatrix in das Weltkoordinatensystem gedreht werden (*Sabatini 2011*). Mit der bekannten Lage im Raum ist es zusätzlich möglich die lotrecht wirkende Erdbeschleunigung aus den Daten zu eliminieren. Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich in diesem Zusammenhang mit dem Grundrauschen der Sensoren der IMU. Für die Winkelbestimmung ist die Integration der drei Datenverläufe der Gyroskope grundsätzlich denkbar. Die bekannte Position im Raum findet zum Zeitpunkt der Synchronisation vor jedem Versuch statt und beschreibt die in Abhängigkeit der abdominalen Rumpfkonstruktion die individuelle Nulllage (Offset) mit dem Ruhen des Pferdes. Durch die Integration der Winkelveränderungen kommt es jedoch durch das Aufsummieren des Rauschens (Driften) zu unrealistischen und nicht verwertbaren Ergebnissen für die absoluten Winkel. Eine bekannte Position (Integrationskonstante) unmittelbar vor der Absprungposition ermöglicht eine deutliche Verkürzung des Integrationsintervalls, die derzeit auf Grund des Driftens nur über eine externe Quelle ausfindig gemacht werden kann. *Pfau et al. (2005)* nutzten in ihrer Untersuchung zur Validität von IMU in der Ganganalyse auf dem Laufband eine „stride-by-stride“ Mittelwertkorrektur über mehrere Zyklen in einer Gangart. Im Bereich Springen könnte so die Integrationskonstante in A2 bestimmt werden. A1 unterscheidet sich von den restlichen Galoppsprüngen deutlich (*Clayton und Barlow 1991, Falaturi et al. 2002, Lütteken 2001*). Damit wäre A2 der zum Absprung am nächsten platzierte zyklische Galoppsprung zur Bestimmung der Integrationskonstante.

Die unabhängige Bestimmung von vertikaler und horizontaler Absprung- bzw. Landegeschwindigkeit und dem Absprung- und Landewinkel der Pferde im Weltkoordinatensystem führt zu weiteren Berechnung von Sprunghöhe und -weite und dadurch zu weiteren Rückschlüssen auf die Leistung und Belastung der Pferde am Sprung. Zusätzlich sind Informationen im Weltkoordinatensystem besser für Vergleiche zwischen den Pferden geeignet. Weitere Filtermöglichkeiten und Ansätze der Sensorfusion sollten auf ihre Möglichkeiten und Grenzen untersucht werden, um langfristig ein autonomes IMU-Sattelgurt-System („self-tracking“) entwickeln zu können. Neben dem Rauschen der einzelnen Sensoren kann in einer Validierungsstudie auch die Trägheit der Messung des Systems in der schnellkräftigen Absprungbewegung im Bezug zu den zeitlichen Bodenkontakten untersucht werden. Zusätzlich kann

ein mögliches Schwingen der Technik durch die Platzierung im Sattelgurt überprüft werden. Die Messgenauigkeit der Datenverläufe der einzelnen Sensoren und die Orthogonalität der Achsen würden ebenfalls aufgedeckt werden. Auf Grund der Ergebnisse und des bisherigen Einsatzes sollte zusammenfassend der Versuch unternommen werden. Die Zielvorstellung eines autonomen Messsystems zur vollständigen Darstellung der sensororientierten Daten, sowie der Bezug zum Weltkoordinatensystem ist wünschenswert. Anderenfalls muss die Bedeutung der relativen Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitsdaten, sowie die Möglichkeiten der Integration dieser zu Geschwindigkeits- und Winkeldaten zu bestimmten Bewegungsereignissen im Sensorkoordinatensystem in Zusammenhang gebracht werden, so dass das System ohne Bezug zum Weltkoordinatensystem optimal intraindividuell nutzbar gemacht werden kann. Auch wenn die ganzheitliche Analyse nicht voll gegeben ist, könnte ein technisches Hilfsmittel zu individuellen Trainingsdokumentation im Springen erarbeitet werden.

## Referenzen

- Barrey E., Galloux P.* (1997) Analysis of the equine jumping technique by accelerometry. *Equine Vet. J. Suppl.* 23, 45-49. DOI: 10.1111/j.2042-3306.1997.tb05052.x
- Clayton H. M.* (1989) Terminology for the Description of Equine Jumping Kinematics. *J. Equine Vet. Sci.* 9, 341-348. DOI 10.1016/S0737-0806(89)80073-5
- Clayton H. M., Barlow D. A.* (1989) The Effect of Fence Height and Width on the Limb Placements of Show Jumping Horses. *J. Equine Vet. Sci.* 9, 179-85. DOI 10.1016/S0737-0806(89)80046-2
- Clayton H. M., Barlow D. A.* (1991) Stride characteristics of four Grand Prix jumping horses. *Equine Exerc. Physiol.* 3, 151-157
- Colborne G. R., Clayton H. M., Lanovaz J.* (1995) Factors that influence vertical velocity during take off over a water jump. *Equine Vet J* 18, 138-40. DOI 10.1111/j.2042-3306.1995.tb04906.x
- Deutsche Reiterliche Vereinigung (2012) Richtlinien für Reiten und Fahren (1. Band): Grundausbildung für Reiter und Pferd. Warendorf: FN Verlag. ISBN-13: 978-3885427216
- Deuel N., Park J.* (1991) Kinematic analysis of jumping sequences of Olympic show jumping horses. *Equine Exerc. Physiol.* 3, 158-166
- Fercher C.* (2017) The Biomechanics of Movement of Horses engaged in jumping over different obstacles in competition and training. *J. Equine Vet. Sci.* 49, 69-80. DOI 10.1016/j.jevs.2016.10.002
- Leach D. H., Ormrod K., Clayton H. M.* (1984) Stride characteristics of horses competing in Grand Prix Jumping. *Am. J. Vet. Res.* 45, 888-892
- Lütteken K.* (2001) Vergleichende videogestützte 2D-Bewegungsanalyse von Reiter-Pferd-Kombinationen der Weltelite im Springreiten. Köln: DSHS
- Meershoek L. S., Schamhardt H. C., Roepstorff L., Johnston C.* (2001a) Forelimb tendon loading during jump landings and the influence of fence height. *Equine Vet. J. Suppl.* 33, 6-10. DOI 10.1111/j.2042-3306.2001.tb05349.x
- Meershoek L. S., Roepstorff L., Schamhardt H. C., Johnston C., Bobbert M. F.* (2001b) Joint moments in the distal forelimbs of jumping horses during landing. *Equine Vet. J.* 33, 410-415. DOI 10.2746/042516401776249570
- Merkens H. W., Schamhardt H. C., van Osch G. J. V. M., van den Bogert A. J.* (1991) Ground Reaction Force Analysis of Dutch Warmblood Horses at Canter and Jumping. *Equine Exerc. Physiol.* 3, 128-135
- Pfau T., Witte T. H., Wilson A. M.* (2005) A method for deriving displacement data during cyclical movement using an inertial sensor. *J. Experim. Biol.* 208, 2503-2514. Doi: 10.1242/jeb.01658
- Powers P. N. R.* (2002) The take off kinematics of jumping horses in a puissance competition. In: ISBS Publications 2002 Cáceres-Extremadura-Spain, 152-155
- Sabatini A. M.* (2011). Estimating Three-Dimensional Orientation of Human Body Parts by Inertial/Magnetic Sensing. *Sensors* 11, 1489-1525. DOI 10.3390/s110201489
- Schamhardt H. C., Merckens H. W., Vogel V., Willekens W.* (1993) External loads of the limbs of jumping horses at the take-off and landing. *Am. J. Vet. Res.* 54, 675-680