

Gewebedopplerechokardiographische Untersuchung der Myokardfunktion und kardialen Ermüdung (cardiac fatigue) beim Vielseitigkeitspferd

Charlotte Frenzel¹, Katharina C. Jensen² und Heidrun Gehlen¹

¹ Klinik für Pferde, allgemeine Chirurgie und Radiologie, Fachbereich Veterinärmedizin, Freie Universität Berlin

² Institut für Veterinär-Epidemiologie und Biometrie, Fachbereich Veterinärmedizin, Freie Universität Berlin

Zusammenfassung: In der Humanmedizin wurde bereits festgestellt, dass es nach intensiver Belastung zu einem „cardiac fatigue“ kommen kann. Eine diastolische Dysfunktion wurde bereits bei Distanzpferden nach Belastung beobachtet. Bei Vielseitigkeitspferden gibt es bisher keine Erkenntnisse zur Myokardfunktion nach der Geländebelastung. Die Absicht der Studie war es, mithilfe von Pulsed-wave Tissue Doppler Imaging (PW-TDI) die Myokardfunktion eines Vielseitigkeitspferdes nach intensiver Belastung und im Laufe der Turniersaison zu beurteilen. Dafür wurden 19 Warmblüter mit einem Durchschnittsalter von elf Jahren untersucht. Es wurden wiederholte echokardiographische Untersuchungen mittels Gewebedoppler (PW-TDI) im Laufe einer Turniersaison (März bis September) durchgeführt. Die kurze Achse des linken Ventrikels wurde auf Höhe der Chordae tendinae von der rechten Seite dargestellt. Das Hauptaugenmerk lag auf der linksventrikulären freien Wand. Dabei wurde jeweils eine echokardiographische Untersuchung am Morgen vor der Geländebelastung, 30 Minuten danach und 24 Stunden später durchgeführt. Insgesamt waren 191 von 201 Gewebedopplermessungen (PW-TDI) auswertbar. Nach 30 Minuten zeigten die diastolischen und systolischen Variablen signifikante Unterschiede zu den Messwerten vor der Belastung. Die maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit war signifikant reduziert. Die maximale systolische Myokardgeschwindigkeit hingegen war hoch signifikant erhöht. 24 Stunden später konnte bei fast allen Parametern eine Regeneration beobachtet werden. Im Laufe der Saison wurde bei der maximalen frühdiaastolischen Myokardgeschwindigkeit eine signifikante Zunahme beobachtet. Bei den systolischen Parametern wurde ebenfalls eine signifikante Zunahme festgestellt. Nach der Belastung zeigte sich eine reduzierte diastolische Funktion, die anhand der diastolischen Variablen ersichtlich wurde. Dies kann durch veränderte Volumenverhältnisse nach Belastung verursacht sein. Es kann jedoch auch auf Anzeichen einer reduzierten diastolischen Funktion hindeuten. Die systolischen Parameter wiesen auf keine kardiale Ermüdung hin. Eine ausreichende Erholung nach 24 Stunden war größtenteils gegeben. Die Veränderungen der Parameter im Laufe der Saison wurden bereits in der Humanmedizin bei trainierten Athleten beobachtet und lassen auf einen Trainingseffekt schließen.

Schlüsselwörter: PW-TDI, Myokardgeschwindigkeit, Belastung, Training

Tissue Doppler examination of myocardial function and cardiac fatigue in the eventing horse

In human medicine it has already been observed that “cardiac fatigue” can occur after high intensity exercise. Diastolic dysfunction has already been detected in endurance horses after exercise. In eventing horses there is currently no information about myocardial function after cross-country exercise. The intent of the study was to use Pulsed-wave Tissue Doppler Imaging (PW-TDI) to assess myocardial function in eventing horses after intense exercise and over the competition season. For this purpose, 19 warmblood horses with an average age of eleven years were examined. Repeated echocardiographic examinations using PW-TDI were performed during one tournament season (March to September). The first echocardiographic examination was performed during the winter break before the season. Attention was paid to the cardiovascular system. Pathological findings such as heart valve insufficiency were excluded. The short axis of the left ventricle was visualized from the right side at the level of the chordae tendinae. The main focus was on the left ventricular free wall. An echocardiographic examination was carried out in the morning before the exercise, 30 minutes afterwards and 24 hours later. The influence of the individual factors on the measured values of the PW-TDI, for example the time of the examination and the month in which the examination took place, was then tested using mixed linear models. A total of 191 of 201 PW-TDI measurements were evaluable. After 30 minutes, diastolic and systolic variables showed significant differences from pre-exercise measurements. The maximum early diastolic myocardial velocity was significantly reduced. The maximum systolic myocardial velocity, however, was increased highly significant. The ratio of maximum early diastolic and late diastolic myocardial velocity was reduced highly significant after 30 minutes as well. 24 hours later, normalisation could be observed for almost all parameters. The maximum early diastolic myocardial velocity was still reduced highly significant after 24 hours. Over the season a significant increase in peak early diastolic myocardial velocity was observed. Significant increases were also observed in the systolic parameters. After exercise a reduced diastolic function was evident from diastolic parameters. On the one hand, this can be a result of changed blood volume as well as changed pre- and afterload after exercise, but it can also indicate signs of reduced diastolic function. For a definitive statement more information about hydration status and blood volume would have been necessary. The unchanged systolic parameters did not indicate cardiac fatigue. The increased plasma catecholamine concentration after exercise could be the reason for the increased systolic myocardial velocity. Return to baseline after 24 hours was mostly achieved. The maximum early diastolic myocardial velocity was still reduced so this could point out that the diastolic function wasn't completely recovered. The changes in the diastolic and systolic parameters over the season have already been observed in human trained athletes and suggest a training effect. In summary, it can be concluded that pulsed-wave tissue Doppler imaging (PW-TDI) has proven to be a suitable but also complex procedure in performance diagnostics for eventing horses. However, further studies are needed to be carried out to obtain further reference values.

Keywords: PW-TDI, myocardial velocity, exercise, eventing, training

Zitation: Frenzel C, Jensen KC, Gehlen H (2024) Gewebedopplerechokardiographische Untersuchung der Myokardfunktion und kardialen Ermüdung (cardiac fatigue) beim Vielseitigkeitspferd. *Pferdehilk Equine Med* 40, 440–448; DOI 10.21836/PEM20240502

Korrespondenz: Prof. Heidrun Gehlen, Freie Universität Berlin, Klinik für Pferde, Oertzenweg 19 b, 14163 Berlin; gehlen.heidrun@vetmed.fu-berlin.de

Eingereicht: 7. April 2024 | **Angenommen:** 7. Juni 2024

Einleitung

In der Humanmedizin wurden bereits Anzeichen einer Herzmuskelermüdung, ein sogenanntes „Exercise induced cardiac fatigue“ (EICF), nach intensiven Belastungen festgestellt^[1,2]. In einer Studie mit Distanzpferden wurde eine diastolische Dysfunktion nach Belastung beobachtet. Die diastolischen Parameter des Gewebedopplers (PW-TDI) waren signifikant reduziert^[3]. Lange Ausdauerbelastungen, die mehr als sechs Stunden andauerten, führten ebenfalls zu systolischen Dysfunktionen nach dem Rennen^[4].

Der Herzmuskel unterliegt Veränderungen durch intensives Training^[5]. Zu den morphologischen Veränderungen des Athletenherzens zählen die Vergrößerung der linken Herzkammer, größeres Auswurfvolumen und eine niedrigere Ruheherzfrequenz^[6,7,8].

Die Gewebedoppler-Echokardiographie (PW-TDI) macht es möglich, regionale und globale Myokardgeschwindigkeiten zu bestimmen und Bewegungsstörungen des Myokards frühzeitig zu identifizieren^[9]. Die Winkelabhängigkeit dieses Verfahrens muss daher jedoch berücksichtigt werden^[10,11]. Neben geschwindigkeitsbasierten Messungen werden auch Zeitintervalle berücksichtigt^[12].

Durch Training kommt es zu einer Anpassung des kardiovaskulären Systems und wie bereits erwähnt zu Veränderungen des Myokards hinsichtlich Morphologie und Funktionalität. In der Humanmedizin konnte die verbesserte Funktion des Myokards bereits beim Athletenherz mittels Gewebedoppler (PW-TDI) bestätigt werden. Der Quotient aus maximaler frühdiastolischer und spätdiastolischer Myokardgeschwindigkeit (Em/Am) hat sich daher durch Training erhöht^[13]. Als Grund hierfür kann die trainingsbedingte Zunahme des Parasympathikus und die Abnahme des Sympathikus mit gleichzeitiger Abnahme der Herzfrequenz gelten^[14,15]. Die diastolische und systolische Funktion des Herzens ist beim trainierten Menschen im Vergleich zum untrainierten verbessert^[13,16].

Unter EICF wird die akute Reduktion der systolischen und/oder der diastolischen Funktion des linken Ventrikels nach Belastung verstanden. Die Dauer der Belastung muss bei der Beurteilung berücksichtigt werden, da im Humansport beobachtet wurde, dass diastolische Dysfunktionen bereits nach einer Stunde auftreten können, wohingegen systolische Dysfunktionen erst nach sechs Stunden Belastung auftreten^[4,7].

Das Ziel dieser Studie war es, anhand von Gewebedopplermessungen (PW-TDI) die veränderte Funktion des Myokards nach einer Geländebelastung beim Vielseitigkeitspferd zu beurteilen. Es sollte geprüft werden, ob dieses Verfahren einen Mehrwert für die Leistungsdiagnostik von Vielseitigkeitspferden bringt und somit der frühzeitigen Erkennung von Leistungs-

suffizienzen dienen kann. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass direkt nach der Belastung Anzeichen einer kardialen Ermüdung echokardiographisch sichtbar werden und nach 24 Stunden eine kardiale Erholung zu erkennen ist. Außerdem wird behauptet, dass sich im Laufe einer Turniersaison eine kardiale Ermüdung offenbart.

Material und Methoden

Probanden

In dieser Studie wurden insgesamt 19 Vielseitigkeitspferde mehrmals innerhalb eines Jahres untersucht (Tabelle 1). Bei den Pferden handelte es sich um Warmblüter, die bereits auf internationalem Niveau im Vielseitigkeitssport vorgestellt wurden. Im Winter vor der Turniersaison wurden die Pferde einer klinischen Untersuchung sowie einer allgemeinen und speziellen echokardiographischen Untersuchung unterzogen. Die Pferde zeigten keine pathologischen Auffälligkeiten. Bei jedem Pferd erfolgte die spezielle echokardiographische Untersuchung vor der Geländebelastung, 30 Minuten nach der Geländebelastung sowie nach 24 Stunden und dies mehrmals im Verlauf der Turniersaison.

Klinische und echokardiographische Voruntersuchung

Bei der allgemeinen und speziellen klinischen Untersuchung vor der Turniersaison wurde u.a. eine allgemeine echokardiographische Untersuchung im B-Mode und M-Mode nach vorgegebenem Muster^[9,17,18] durchgeführt. Die allgemeine echokardiographische Untersuchung diente der Beurteilung des Herzens. Mittels Farbdoppler wurden bedeutsame Klap-peninsuffizienzen ausgeschlossen.

Die spezielle echokardiographische Untersuchung erfolgte mittels Gewebedoppler (PW-TDI) in Ruhe. Von der rechten Seite wurde der linke Ventrikel im Querschnitt auf Höhe der Chordae tendinae, in der sogenannten kurzen Achse, dargestellt. Die Eindringtiefe betrug 28 cm und die Bildbreite wurde so weit reduziert, dass das Myokard noch komplett erfasst werden konnte. Hauptaugenmerk lag auf der linksventrikulären freien Wand, das Messtor (sample volume) wurde mittig positioniert.

Die echokardiographischen Untersuchungen wurden mit dem portablen Ultraschallgerät „Vivid i“ des Herstellers GE Medical Systems mit einem 3s Schallkopf und gleichzeitiger EKG-Aufzeichnung erstellt. Die Frequenz betrug 1,7/3,4 Megahertz. Es wurde auf eine Bildrate von mind. 50 Bildern/sek geachtet. Während der Ultraschalluntersuchung wurde gleichzeitig ein Elektrokardiogramm aufgenommen und somit die Herzfrequenz bestimmt. Anschließend wurden die Aufzeichnungen

mit der EchoPAC Software (Version 110.1.1) von GE Healthcare offline ausgewertet.

Spezielle echokardiographische Untersuchung während der Saison

Während der Saison wurde ausschließlich die spezielle echokardiographische Gewebedoppleruntersuchung durchgeführt. Die Pferde wurden zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr wiederholt untersucht (Frühjahr, Sommer und Herbst; Tabelle 2). Je nach Anwesenheit der Pferde auf den für diese Studie ausgewählten Turnieren, wurden die Pferde auf zwei bis sechs Veranstaltungen untersucht. Die Untersuchungen erfolgten hauptsächlich auf Vielseitigkeitsturnieren mit unterschiedlichen Schwereklassen (Concours Complet Internationale (CCI) ** bis ****) und teilweise bei hochintensiven Trainingsritten. Die jüngeren Pferde wurden im Gegensatz zu den älteren Pferden auf niedrigerem Niveau vorgestellt und ebenfalls untersucht. Ein Untersuchungszyklus setzte sich aus einer Ruheuntersuchung am Morgen vor der Geländebelastung, 30 Minuten danach sowie 24 Stunden später zusammen.

Offlineauswertung der Gewebedopplermessungen (PW-TDI)

Bei der Offlineauswertung der Gewebedopplermessungen (PW-TDI) wurden mithilfe des EKG maximale diastolische

und systolische Myokardgeschwindigkeiten sowie Zeitintervalle bestimmt. Es wurden folgende Werte ermittelt^[12]: Zu den systolischen Parametern zählten die isovolumetrische Kontraktion (S1), die maximale systolische Myokardgeschwindigkeit (Sm), die Prä-Ejektionsperiode (PEP), die isovolumetrische Kontraktionsdauer (IVCT), die Ejektionszeit (ET) und der Quotient aus Prä-Ejektionsperiode und Ejektionszeit (PEP/ET). Als Index der systolischen und diastolischen Funktion diente der Index der myokardialen Leistungsfähigkeit (IMP) ($IMP = (IVCT + IVRT)/ET$). Zu den Variablen der diastolischen Funktion dienten die isovolumetrische Relaxation (E1), die isovolumetrische Relaxationsdauer (IVRT), die maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (Em), die maximale spätdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (Am) für die Funktion des linken Vorhofs sowie der Quotient aus maximaler früh- und spätdiaastolischer Myokardgeschwindigkeit (Em/Am).

Die Geschwindigkeit der isovolumetrischen Relaxation (E1), die isovolumetrische Relaxationszeit (IVRT), die isovolumetrische Kontraktion (S1) und die isovolumetrische Kontraktionsdauer (IVCT) gelten als schwierig zu messen^[19, 20] und wurden deshalb nicht bei der Auswertung in dieser Studie berücksichtigt.

In der linksventrikulären freien Wand hatten die systolischen Geschwindigkeiten ein positives Vorzeichen und die diastolischen ein negatives Vorzeichen.

Tab. 1 Daten der Probanden. | Data of the participants.

Pferd	Alter	Größe (cm)	Gewicht (kg)	Geschlecht	Rasse	Schwereklasse	Anzahl der Untersuchungszyklen
1	2012	172	610	Stute	PZHK	1,2	4
2	2013	168	500	Stute	DSP	2,3	3
3	2010	173	651	Wallach	HANN	1,2,4	6
4	2014	167	500	Stute	OS	2	4
5	2007	165	480	Stute	HANN	2,4	2
6	2011	166	500	Wallach	HANN	1,2	4
7	2015	167	551	Stute	HOLST	3	3
8	2007	170	620	Wallach	HANN	2,3,4	3
9	2010	168	510	Stute	HANN	1,2	5
10	2013	168	600	Wallach	HANN	1,2,4	5
11	2010	167	520	Stute	SF	1,2,4	5
12	2010	168	580	Wallach	ISH	1,2,4	4
13	2007	165	550	Stute	RHEIN	1,2	2
14	2015	168	600	Stute	HANN	2	1
15	2015	170	585	Stute	HANN	3	2
16	2008	170	600	Wallach	HOLST	2	2
17	2012	176	650	Wallach	ISH	2,4	2
18	2008	170	580	Wallach	HANN	2,4	2
19	2011	167	580	Wallach	HOLST	2,4	2

DSP= Deutsches Sportpferd; ISH= Irisches Sportpferd; HANN= Hannoveraner; HOLST= Holsteiner; OS= Oldenburger Sportpferd; PZHK= Polnischer Zuchtverband; SF= Selle Francais; Schwereklasse 1= CCI 4*; Schwereklasse 2= CCI 3*; Schwereklasse 3= CCI 2*; Schwereklasse 4= Galopptraining | DSP= German Sport Horse; ISH= Irish Sport Horse; HANN= Hanoverian; HOLST= Holsteiner; OS= Oldenburg Sport Horse; PZHK= Polish Breeders' Association; SF= Selle Francais; Severity Class 1= CCI 4*; Severity Class 2= CCI 3*; Severity Class 3= CCI 2*; Severity Class 4= Canter Training

Es wurden jeweils drei Messungen durchgeführt und daraus der Mittelwert errechnet.

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte über das Programm IBM SPSS Statistics mit der Version 29. Zuerst wurde die Verteilung der relevanten Parameter deskriptiv mittels Boxplots dargestellt und die relevanten Lagemaße berechnet. Die Normalverteilung der Daten wurde mittels Kolmogorov-Smirnov-Tests geprüft. Anschließend wurde mit gemischten linearen Modellen der Einfluss der einzelnen Faktoren auf die Messwerte des Gewebedopplers (PW-TDI) geprüft. Das Pferd und der Veranstaltungsort wurden dabei als zufällige Faktoren berücksichtigt und es konnte somit über die sogenannte Schätzung von Kovarianzparametern der Anteil an Streuung, der auf diese Faktoren zurückzuführen ist, abgeschätzt werden. Zu den Einflussgrößen (feste Effekte) in den gemischten Modellen wurden der Zeitpunkt der Untersuchung und der Monat, in dem die Untersuchung stattgefunden hat, berücksichtigt. In einer Gesamtberechnung wurde der Einfluss der Temperatur und der Schwereklasse mitberücksichtigt. Für den paarweisen Vergleich wurde eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Die Residuen der Modelle wurden grafisch auf Normalverteilung geprüft.

Es wurden folgende Signifikanzstufen festgelegt: $p \leq 0,001$ = hoch signifikant (***) , $p \leq 0,01$ = signifikant (**), $p \leq 0,05$ = schwach signifikant (*), $p > 0,05$ = nicht signifikant (n.s.).

Ergebnisse

Bei den Studienprobanden handelte es sich um 19 herzgesunde Vielseitigkeitspferde mit einem Durchschnittsalter von 11 Jahren (7–15 Jahre), einem Durchschnittsgewicht von 567 kg (480–651 kg) und einer Durchschnittsgröße von 169 cm (165–176 cm). Insgesamt waren es 10 Stuten und 9 Wallache. Es wurden 15 Untersuchungszyklen (23,4%) in einer CCI****-Prüfung durchgeführt. 31 Untersuchungszyklen (48,4%) wurden während einer CCI***-Prüfung und zehn Untersuchungszyklen (15,6%) während einer CCI**-Prüfung vorgenommen. Acht Untersuchungszyklen (12,5%) fanden während eines intensiven Galopptrainings auf der heimischen Trainingsstrecke statt. Die älteren Pferde wurden in den höheren Schwereklassen untersucht. Die Durchschnittstemperatur betrug 20°C (13–29°C) und die Durchschnittstrecke betrug 3583 m (2550–5300 m), welche mit einem Durchschnittstempo von 524 m/min (401–550 m/min) zurückgelegt wurde.

Klinische und echokardiographische Voruntersuchung

Bei der klinischen allgemeinen und speziellen Untersuchung zeigte kein Pferd Auffälligkeiten.

Es lagen keine Dimensionsveränderungen vor und es konnten keine pathologischen Klappeninsuffizienzen mittels Farbdoppler dargestellt werden. Nur geringgradige Regurgitationen lagen vor.

Tab. 2 Übersicht über die Veranstaltungen. | Overview of the events.

Veranstaltung	Monat	Ort	Anzahl Pferde	Schwereklasse	Prüfungsformat	Strecke (m)	Tempo (m/min)
1	3	a	12	2	kurz	3401	550
2	4	f	5	2	kurz	3425	550
	4	f	1	3	kurz	3000	520
3	4	a	2	3	kurz	3000	520
4	5	b	1	3	lang	3787	520
			7	1	kurz	3705	570
5	6	a	3	1	kurz	3772	570
6	6	d	1	4	Training	2132	401
7	6	a	2	2	kurz	3364	550
			3	2	lang	4455	550
8	7	d	2	3	kurz	2661	520
			6	2	kurz	3538	550
9	8	d	1	4	Training	4012	500
			1	4	Training	4717	500
10	8	c	5	1	kurz	3580	570
			3	2	kurz	3470	550
			1	3	kurz	3087	520
11	9	g	2	4	Training	4700	500
			2	4	Training	5300	500
12	9	d	1	4	Training	/	500
13	9	e	1	3	kurz	2550	500

a= Luhmühlen; b= Marbach; c= Strzegom; d= Sahrendorf; e= Mechtersen; f= Radolfzell; g= Warendorf; Schwereklasse 1= CCI 4*; Schwereklasse 2= CCI 3*; Schwereklasse 3= CCI 2*; Schwereklasse 4= Training | a= Luhmühlen; b= Marbach; c= Strzegom; d= Sahrendorf; e= Mechtersen; f= Radolfzell; g= Warendorf; Severity class 1= CCI 4*; Severity class 2= CCI 3*; Severity class 3= CCI 2*; Severity class 4= Training

Durch die spezielle echokardiographische Untersuchung konnten die Ruhewerte mit dem Gewebedoppler ermittelt werden, die mit den Referenzwerten aus anderen Studien übereinstimmen^[12].

Spezielle echokardiographische Untersuchung während der Saison

Von 201 Gewebedopplermessungen waren 191 Messungen gelungen und konnten ausgewertet werden. Die restlichen Messungen waren qualitativ nicht ausreichend. Tabelle 3 zeigt die Mittelwerte der Variablen der linksventrikulären freien Wand zu den verschiedenen Zeitpunkten. Die Durchschnittsherzfrequenz vor der Belastung lag bei 32 Schlägen/min, nach 30 Minuten bei 47 Schlägen/min und nach 24 Stunden bei 34 Schlägen/min.

Einfluss der Untersuchungszeitpunkte an den Untersuchungstagen auf die echokardiographischen Messparameter

Die maximale systolische Myokardgeschwindigkeit (S_m) zeigte sich nach 30 Minuten hoch signifikant höher im Vergleich zum Messwert vor der Belastung. Der 24-Stunden-Wert war nicht signifikant erhöht.

Bei der Ejektionszeit (ET) konnte eine hoch signifikante Abnahme nach 30 Minuten, sowie eine signifikante Abnahme nach 24 Stunden beobachtet werden (Abb. 1).

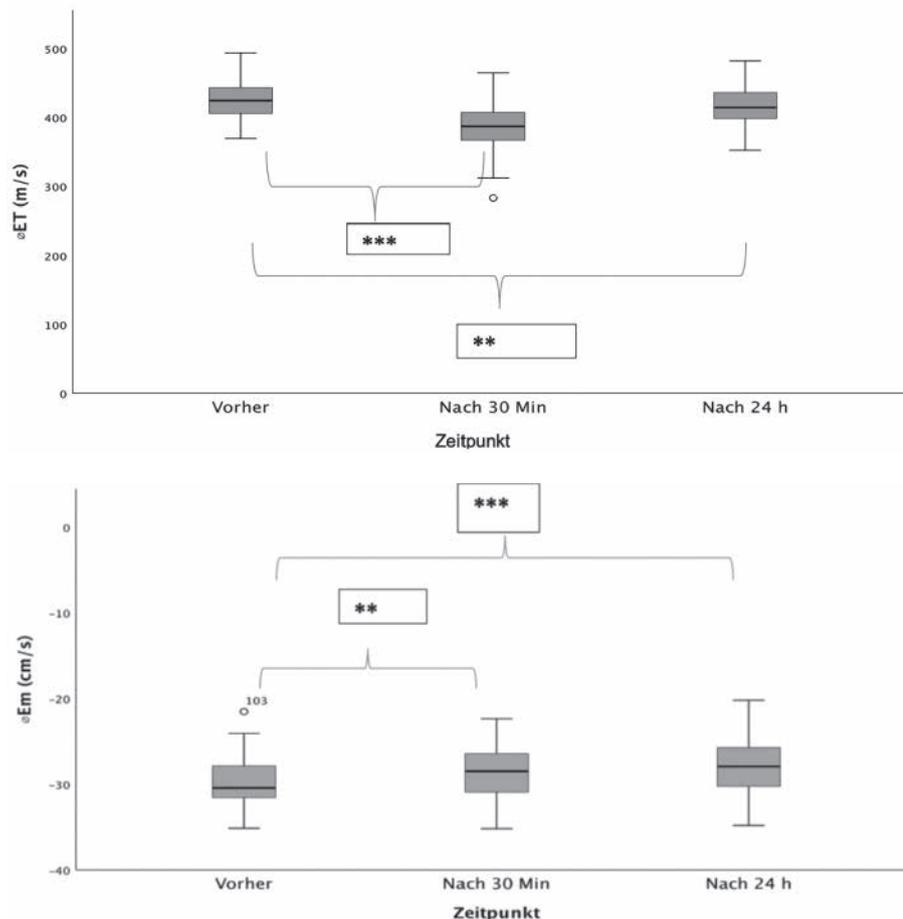


Abb. 1 Boxplots der Ejektionszeit (ET) (m/s) der linken freien Wand vor der Belastung nach 30 Minuten und 24 Stunden später. ET: Ejektionszeit; **: signifikant; ***: hoch signifikant. | Boxplots of the ejection time (ET) (m/s) of the left free wall before strain after 30 minutes and 24 hours later. ET: ejection time; **: significant; ***: highly significant.

Abb. 2 Boxplots der maximalen frühdiastolischen Geschwindigkeit (Em)(cm/s) der linken freien Wand vor der Belastung, nach 30 Minuten und 24 Stunden später. | Boxplots of the maximum early diastolic velocity (Em)(cm/s) of the left free wall before exercise, after 30 minutes and 24 hours later.

Die Prä-Ejektionsperiode (PEP) zeigte einen hoch signifikanten Abfall nach 30 Minuten. Der 24-Stundenwert war erneut nicht signifikant. Der Quotient PEP/ET zeigte eine geringgradige Zunahme nach 30 Minuten und ebenfalls nach 24 Stunden, welche jedoch nicht signifikant war.

Der Index der myokardialen Leistungsfähigkeit (IMP) war nach 30 Minuten hoch signifikant größer. 24 Stunden später war keine signifikante Veränderung zum Messwert vor dem Gelände.

Bei der maximalen frühdiastolischen Myokardgeschwindigkeit (E_m) konnte eine signifikante Abnahme 30 Minuten nach der Belastung beobachtet werden. 24 Stunden später war dies hoch signifikant niedriger als vor der Belastung (Abbildung 2). Die maximale spätdiastolische Myokardgeschwindigkeit (A_m) erwies sich als hoch signifikant höher 30 Minuten nach der Belastung. 24 Stunden später war kein signifikanter Unterschied feststellbar.

30 Minuten nach der Belastung stellte sich der Quotient aus maximaler frühdiastolischer und spätdiastolischer Myokardfunktion (E_m/A_m) als hoch signifikant niedriger dar. Am nächsten Tag, 24 Stunden später, war kein signifikanter Unterschied zu vor der Belastung zu beobachten.

Bei der Berücksichtigung der verschiedenen Schwereklassen konnte kein signifikanter Einfluss auf die Ergebnisse beobachtet werden. Ausschließlich bei der Betrachtung der maximalen frühdiastolischen Myokardgeschwindigkeit (E_m) stellte sich die Temperatur als schwach signifikant dar.

Die individuelle Berücksichtigung des Pferdes bei der Auswertung der echokardiographischen Parameter hatte einen besonderen Stellenwert, da jedes Pferd Einfluss auf die Messungen genommen hat. Da die sonographischen Messwerte bis zu 50% abhängig vom individuellen Pferd waren, war es notwendig, das Pferd als zufälligen Einflussfaktor zu berücksichtigen. Der Veranstaltungsort beeinflusste mit nur einem geringen Anteil (1–26%) das Messergebnis.

Einfluss der Untersuchungen im Jahresverlauf auf die echokardiographischen Messparameter

Im Laufe der Turniersaison konnte bei der maximalen systolischen Myokardgeschwindigkeit (Sm) eine schwach signifikante Zunahme im Monat September zu März beobachtet werden. Die Ejektionszeit (ET) zeigte im Laufe der Monate eine Zunahme, welche jedoch nicht signifikant war.

Eine signifikante Abnahme konnte bei der Prä-Ejektionsperiode (PEP) in den Monaten Mai und August im Vergleich zu März entdeckt werden. Im Juli war die Abnahme schwach signifikant.

Der Quotient PEP/ET zeigte im Monat Mai eine schwach signifikante Abnahme und im Monat August eine signifikante Reduzierung im Vergleich zum März.

Der Index für myokardiale Leistungsfähigkeit (IMP) war in den Monaten Mai, Juni und August signifikant reduziert im Vergleich zum Monat März.

Im Laufe der Monate hat sich bei den diastolischen Variablen ausschließlich die maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (Em) signifikant verändert. Im Monat Juli kam es zu einem signifikanten Anstieg der Messwerte, im Monat August kam es zu einem hochsignifikanten Anstieg und der

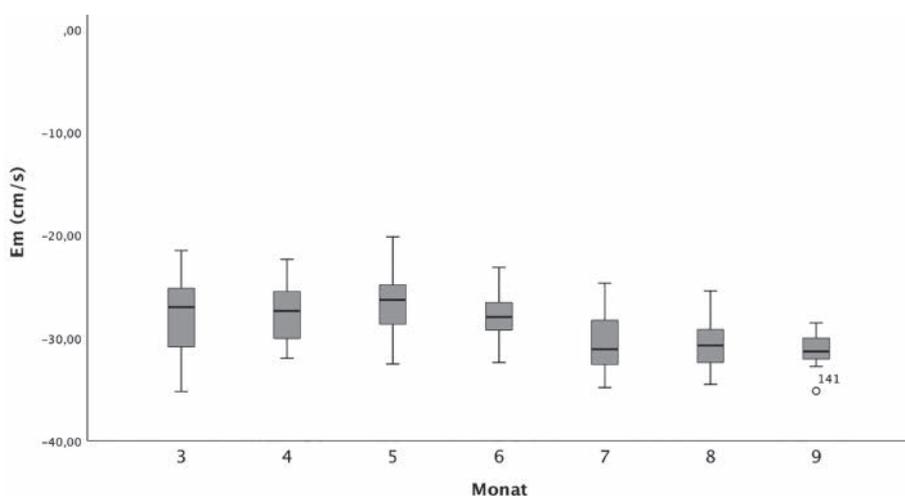


Abb. 3 Boxplots der maximalen frühdiaastolischen Myokardgeschwindigkeit (Em) (cm/s) im Verlauf der Saison zu verschiedenen Monaten. | *Boxplots of the maximum early diastolic myocardial velocity (Em) (cm/s) over the course of the season at different months.*

Tab. 3 Mittelwerte der Variablen der linksventrikulären freien Wand zu verschiedenen Zeitpunkten. | *Mean values of left ventricular free wall variables at different time points.*

	Vorher		SD	Nach 30 min		SD	Nach 24 h		SD
Variablen der systolischen linksventrikulären Funktion									
Sm (cm/s)	10,69	±	1	11,87	±	1,54	10,6	±	1,26
ET (m/s)	426,49	±	29,9	386,95	±	36,5	415,35	±	29,7
PEP (ms)	119,41	±	11,6	111,57	±	11,3	118,99	±	10,4
PEP/ET(-)	0,28	±	0,04	0,29	±	0,04	0,29	±	0,0
Index der systolischen und diastolischen Funktion									
IMP (-)	0,38	±	0,07	0,43	±	0,1	0,39	±	0,08
Variablen der diastolischen linksventrikulären Funktion									
Am (cm/s)	-9,63	±	1,89	-11,12	±	2,98	-9,16	±	2,06
Em (cm/s)	-29,77	±	2,65	-28,47	±	3,23	-28,01	±	3,47
Em/Am (-)	3,21	±	0,68	2,74	±	0,83	3,2	±	0,74

Am: maximale spätdiaastolische Myokardgeschwindigkeit; Em: maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit; Em/Am: Ratio maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit und maximale spätdiaastolische Myokardgeschwindigkeit; ET: Ejektionszeit; IMP: Index of myocardial performance; PEP: Prä-Ejektionsperiode; PEP/ET: Ratio Prä-Ejektionsperiode und Ejektionszeit; Sm: maximale systolische Myokardgeschwindigkeit; SD: Standardabweichung | *Am: maximum late diastolic myocardial velocity; Em: maximum early diastolic myocardial velocity; Em/Am: Ratio maximum early diastolic myocardial velocity and maximum late diastolic myocardial velocity; ET: ejection time; IMP: index of myocardial performance; PEP: pre-ejection period; PEP/ET: ratio pre-ejection period and ejection time; Sm: maximum systolic myocardial velocity; SD: standard deviation*

Monat September war im Vergleich zum März signifikant höher (Abbildung 3).

Diskussion

Das Ziel dieser Studie war es, mithilfe des PW-TDI, die systolische und diastolische Myokardfunktion beim Vielseitigkeitspferd nach der Geländebelastung und die Erholung des Myokards nach 24 Stunden zu beurteilen. Außerdem sollten die Veränderungen der Funktion des Myokards über eine Saison hinweg analysiert werden. Da es sich bei dieser Studie um eine Feldstudie handelt, waren nicht alle Bedingungen bei den Untersuchungen identisch. Die Zeiträume wurden jedoch immer gleichmäßig eingehalten, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Beim Vergleich mit anderen Studien muss berücksichtigt werden, dass häufig längere Distanzen absolviert wurden und die Untersuchungen direkt nach der Belastung stattgefunden haben und nicht wie in dieser Studie nach 30 Minuten.

Einfluss der Untersuchungszeitpunkte an den Untersuchungstagen auf die echokardiographischen Messparameter

Die maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (Em) spiegelt die passive diastolische Füllung wieder, wohingegen die maximale spätdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (Am) eine Reaktion des Ventrikels auf die Vorhofkontraktion in der Diastole darstellt^[21]. Die in dieser Studie signifikant reduzierte Em nach Belastung kann durch eine reduzierte Vorlast und ein reduziertes zentrales Blutvolumen begründet werden, wodurch es zu einem geringeren venösen Rückstrom kommt^[3]. Da die Em reduziert sein kann, ohne dass das Blutvolumen reduziert ist, spricht es dafür, dass eine reduzierte Em nicht ausschließlich durch eine reduzierte Vorlast bedingt ist, sondern eine diastolische Dysfunktion bedeuten könnte^[20]. Im Gegensatz zu dieser Studie wurden beim Pferd erhöhte Myokardgeschwindigkeiten in der frühen Diastole jedoch direkt nach Belastungen bei hoher Herzfrequenz beobachtet^[19,20]. In dieser Studie war die Durchschnittsherzfrequenz nach 30 Minuten bereits deutlich reduziert. Da in dieser Studie keine Untersuchungen bezüglich des Blutvolumens gemacht wurden, lässt sich allein aufgrund der PW-TDI Messungen sagen, dass nach der Belastung die Myokardgeschwindigkeiten in der frühen Diastole reduziert waren. Die weiterhin reduzierte Em nach 24 Stunden könnte für eine nicht ausreichende Erholung sprechen.

Die Zunahme von Am nach der Belastung gilt als ein Ausgleich für die reduzierte Em und somit eine Reaktion auf die veränderte frühdiaastolische Funktion^[22,23]. Eine erhöhte Am wurde beim Pferd bereits bei moderat höheren Herzfrequenzen (40–45/min) beobachtet und als Zeichen für eine erhöhte Vorhofkontraktion bzw. Pumpfunktion gesehen^[24]. In der Humanmedizin konnte eine Reduktion des Quotienten Em/Am nach der Belastung die reduzierte diastolische linksventrikuläre Funktion verdeutlichen. Dies kann ebenfalls durch die veränderte Vorlast bedingt sein^[22] oder aber auch durch intrinsische Veränderungen der Relaxation^[7].

Der Anstieg der maximalen systolischen Myokardgeschwindigkeit (Sm) nach der Belastung kann durch die erhöhte Kontraktilität bedingt sein^[23] und somit für eine erhöhte linksventrikuläre systolische Funktion sprechen^[19]. Die erhöhte Kontraktilität kann durch vermehrte Plasmakatecholamin-Konzentration nach der Belastung hervorgerufen werden^[24]. Für eine systolische Dysfunktion waren die Belastungseinheiten zu kurz, da dies erst nach mehr als sechs Stunden Belastung auftritt^[4]. Die reduzierte Ejektionszeit (ET) kann einerseits durch die erhöhte Herzfrequenz und dadurch kürzere Auswurfperiode bedingt sein^[19], andererseits könnte auch die erhöhte Kontraktilität und Nachlast ein Grund dafür sein^[25]. Nach 24 Stunden war die ET weiterhin signifikant reduziert. Da die Pferde zu dem Messzeitpunkt in Ruhe untersucht wurden, ist die Zunahme der Herzfrequenz als Grund für die reduzierte ET unwahrscheinlich. Es lässt eine unzureichende Erholung vermuten. Die zunehmende Kontraktilität erklärt ebenfalls die reduzierte Prä-Ejektionsperiode (PEP) nach der Belastung^[25]. Die Zunahme des Quotienten aus PEP/ET kann ebenfalls durch die erhöhte Herzfrequenz und reduzierte Vorlast erklärt werden^[26].

Der erhöhte Index für myokardiale Leistungsfähigkeit (IMP) kann für eine reduzierte linksventrikuläre Funktion stehen^[27], kann aber auch durch Veränderungen von Vor- und Nachlast beeinflusst werden^[27,28]. In diesem Fall kann der Anstieg des IMP nach Belastung die reduzierte diastolische Funktion des Myokards bestätigen, jedoch muss der Einfluss von veränderter Vor- und Nachlast ebenfalls berücksichtigt werden. Es lässt sich diskutieren, ob die Ergebnisse dieser Studie bereits für Anzeichen eines „EICF“ sprechen, da der Einfluss von Volumenveränderungen nicht ermittelt wurde und die Veränderungen der Variablen durch diese beeinflusst werden können. Eine ausreichende Erholung war, außer bei Em und ET, gegeben.

Einfluss der Untersuchungen im Jahresverlauf auf die echokardiographischen Messparameter

Die Pferde wurden zu verschiedenen Zeitpunkten im Laufe der Saison vorgestellt und untersucht. Bei den Variablen der diastolischen Funktion zeigte die maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (Em) eine hoch signifikante Zunahme im Laufe der Saison, insbesondere in den Monaten Juli, August und September. Der Grund für die Zunahme der diastolischen Funktion lässt sich diskutieren. In der Humanmedizin ist es bekannt, dass die diastolische Funktion beim trainierten Athleten zunimmt^[8,29]. Somit kann behauptet werden, dass es in Hinblick auf die diastolische Funktion in dieser Studie zu einem Trainingseffekt im Jahresverlauf gekommen ist. Die Zunahme des Quotienten Em/Am kann in der Humanmedizin durch die geringere Abhängigkeit eines trainierten Herzens auf den Beitrag des Vorhofes für die globale diastolische Füllung erklärt werden und zeigt somit ebenfalls den verbesserten Trainingszustand^[14]. Für die systolischen Variablen, wie zum Beispiel die maximale systolische Myokardgeschwindigkeit (Sm), konnte auch eine Zunahme im Laufe der Saison beobachtet werden. Die weiteren systolischen Variablen (Ejektionszeit (ET), Prä-Ejektionsperiode (PEP), PEP/ET) zeigten ebenfalls Veränderungen, die auf eine verbesserte Funktion des Myokards schließen lassen. In einer weiteren Studie mit Pferden

wurde genau wie in dieser Studie herausgefunden, dass der Quotient PEP/ET mit vermehrtem Training abgenommen hat^[25]. Der IMP zeigte in einer humanmedizinischen Studie eine Reduzierung im Laufe der Saison, was für eine verbesserte linksventrikuläre Funktion spricht^[27].

Aus den Ergebnissen dieser Studie lässt sich schließen, dass es zu einer Verbesserung der diastolischen und systolischen Myokardfunktion im Laufe der Saison gekommen ist. Es liegt nahe, dass sich der Trainingszustand der Pferde über die Saison hinweg verbessert hat.

Um genauere Aussagen zu den Ergebnissen dieser Studie zu treffen, wären Informationen zu Blutparametern und Volumenveränderungen hilfreich. Die Auswahl der Pferde rührt daher, dass es nur eine geringe Anzahl an CCI****-Pferden in Deutschland gibt und somit weitere Pferde aus niedrigeren Schwereklassen für die Studie verwendet werden mussten. Die zusätzlichen Untersuchungen bei intensiven Trainingsritten waren nötig, um die bereits auf Turnieren untersuchten Studienpferde im Laufe der Saison weiterhin zu betreuen. Es konnten keine Unterschiede der Ergebnisse zwischen den Messungen auf Turnieren und Trainingsritten festgestellt werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass der Gewebedoppler (PW-TDI) ein geeignetes, jedoch auch aufwändiges Verfahren zur Leistungsdiagnostik im Vielseitigkeitssport ist. Es müssen weitere Studien zu diesem Thema durchgeführt werden, um zusätzliche Referenzwerte zu erhalten. Die Hypothese, dass es direkt nach der Belastung Zeichen einer kardialen Ermüdung gibt, kann zum Teil für die diastolischen Variablen bestätigt werden. Um eine eindeutige Aussage treffen zu können, müssten jedoch die Volumenveränderungen ebenfalls berücksichtigt werden. Nach 24 Stunden ist größtenteils eine Erholung gegeben. Im Laufe der Saison wird keine kardiale Ermüdung beobachtet, es kann ein Trainingseffekt vermutet werden.

Abkürzungen

- Am = maximale spätdiastolische Myokardgeschwindigkeit
- CCI = Concours Complete Internationale
- EICF = Exercise induced cardiac fatigue
- Em = maximale frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit
- ET = Ejektionszeit
- PEP = Prä-Ejektionsperiode
- PEP/ET = Quotient aus Prä-Ejektionsperiode und Ejektionszeit
- PW-TDI = pulsed-wave tissue Doppler Imaging
- Sm = maximale systolische Myokardgeschwindigkeit

Erklärung zum Tierschutz

Für die Studie wurde beim Lageso ein Tierversuchsantrag beantragt (Aktenzeichen 81–02.04.40.2022.VG006).

Erklärung zum Interessenkonflikt

Im Rahmen dieser Arbeit bestehen keine Interessenskonflikte durch Zuwendungen Dritter.

Literatur

- 1 Shave R, Dawson E, Whyte G, George K, Gaze D, Collinson P (2004) Altered cardiac function and minimal cardiac damage during prolonged exercise. *Med Sci Sports Exercise* 36, 1098–10103, DOI 10.1249/01.mss.0000131958.18154.1e
- 2 Charton M, Kervio G, Matelot D, Lachard T, Galli E, Donal E, Carré F, Le Douairon Lahaye S, Schnell F (2021) Exercise-induced cardiac fatigue in soldiers assessed by echocardiography. *Front Cardiovasc Med* 8, 785869, DOI 10.3389/fcvm.2021.785869
- 3 Flethøj M, Schwarzwald CC, Haugaard MM, Carstensen H, Kanters JK, Olsen LH, Buhl R (2016) Left Ventricular Function After Prolonged Exercise in Equine Endurance Athletes. *J Vet Intern Med* 30, 1260–1269, DOI 10.1111/jvim.13982
- 4 Amory H, Votion D-M, Fraipont A, Goachte AG, Robert C, Farnir F, Van Erck E (2010) Altered systolic left ventricular function in horses completing a long distance endurance race. *Equine Vet J* 42 (s38), 216–219, DOI 10.1111/j.2042-3306.2010.00253.x
- 5 de Solis CN (2019) Cardiovascular response to exercise and training, exercise testing in horses. *Vet Clin North Am Equine Pract* 35, 159–173, DOI 10.1016/j.cveq.2018.11.003
- 6 Huston TP, Puffer JC, Rodney WM (1985) The athletic heart syndrome. *New Engl J Med*. 313, 24–32, DOI 0.1056/NEJM198507043130106
- 7 Middleton N, Shave R, George K, Whyte G, Hart E, Atkinson G (2006) Left ventricular function immediately following prolonged exercise: A meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* 38, 681–687, DOI 10.1249/01.mss.0000210203.10200.12
- 8 Bachl N, Löllgen H, Tschan H, Wackerhage H, Wessner B (2018) Molekulare Sport- und Leistungsphysiologie. Springer. DOI 10.1007/978-3-7091-1591-6
- 9 Gehlen H (2010) Pferdekardiologie. Schlütersche Hannover, 1. Auflage, 44–72
- 10 Voigt J-U (2007) Gewebedoppler und regionale Funktionsanalyse. Praxis der Echokardiographie. Frank A. Flachskampf. 2. Auflage, Georg Thieme Verlag Stuttgart, 57–99
- 11 Schwarzwald CC (2019) Equine Echocardiography. Clinical Cardiology. Schwarzwald CC, Mitchell KJ. Elsevier. Volume 35, 1, 43–64
- 12 Schwarzwald CC, Schober KE, Bonagura JD (2009a) Methods and reliability of tissue Doppler imaging for assessment of left ventricular radial wall motion in horses. *J Vet Intern Med* 23, 643–652, DOI 10.2460/ajvr.68.7.735
- 13 Pavlik G, Major Z, Csajági E, Jeserich M, Kneffel Z (2013) The athlete's heart Part II Influencing factors on the athlete's heart: Types of sports and age. *Acta Physiol Hung* 100, 1–27, DOI 10.1556/APhysiol.100.2013.1.1
- 14 Santoro A, Alvino F, Antonelli G, Caputo M, Padeletti M, Lisi M, Mondillo S (2014) Endurance and strength athlete's heart: analysis of myocardial deformation by speckle tracking echocardiography. *J Cardiovasc Ultras* 22, 196–204, DOI 10.4250/jcu.2014.22.4.1
- 15 Paulsen W, Boughner DR, Ko P, Cunningham DA, Persaud JA (1981) Left ventricular function in marathon runners: echocardiographic assessment. *J Appl Physiol* 51, 881–886, DOI 10.1152/jappl.1981.51.4.881
- 16 Simsek Z, Gundogdu F, Alpaydin S, Gerek Z, Ercis S, Sen I, Akgün M, Karakelleoglu S (2011) Analysis of athletes' heart by tissue Doppler and strain/strain rate imaging. *Int J Cardiovasc Imaging* 27, 105–111, DOI 10.1007/s10554-010-9669-1
- 17 Long KJ, Bonagura JD, Darke PGG (1992) Standardised imaging technique for guided M-mode and Doppler echocardiography in the horse. *Equine Vet J* 24, 226–235, DOI 10.1111/j.2042-3306.1992.tb02820.x
- 18 Stadler P, Robine F (1996) B-mode echocardiographic measurement of heart dimensions in warm blooded horses without heart disease. *Pferdeheilk Equine Med* 12, 35–43, DOI 10.21836/PEM19960106

- 19 Schefer KD, Bitschnau C, Weishaupt MA, Schwarzwald CC (2010) Quantitative Analysis of Stress Echocardiograms in Healthy Horses with 2-Dimensional (2D) Echocardiography, Anatomical M-Mode, Tissue Doppler Imaging, and 2D Speckle Tracking. *J Vet Intern Med* 24, 918–931, DOI 10.1111/j.1939-1676.2010.0542.x
- 20 Koenig TR, Mitchell KJ, Schwarzwald CC (2017) Echocardiographic Assessment of Left Ventricular Function in Healthy Horses and in Horses with Heart Disease Using Pulsed-Wave Tissue Doppler Imaging. *J Vet Intern Med* 31, 556–567, DOI 10.1111/jvim.14641
- 21 Gehlen H, Iversen C, Stadler P (2009a) Grundlagen der Gewebedopplerechokardiographie beim Pferd. *Pferdeheilk Equine Med* 25, 4–10, DOI 10.21836/PEM20090101
- 22 Oxborough D, Birch K, Shave R, George K. (2010) “Exercise-Induced Cardiac Fatigue”—A Review of the Echocardiographic Literature. *Echocardiography* 27, 1130–1140, DOI 10.1111/j.1540-8175.2010.01251.x
- 23 Hopster-Iversen C, Gehlen H, Stadler P (2014) Use of Tissue Doppler Imaging in horses exercise stress echocardiography with Tissue Doppler Imaging in healthy horses and horses with cardiac disease. *Pferdeheilk Equine Med* 30, 444–454, DOI 10.21836/PEM20140409
- 24 Dufourni A, Buschmann E, Vernemmen I, Van Steenkiste G, van Loon G, Declodt A (2024) Effect of physiological and pharmacological stress on heart rate, blood pressure, and echocardiographic measurements in healthy Warmblood horses. *J Vet Intern Med* 38, 398–410, DOI 10.1111/jvim.16967
- 25 Vitiello D, Palacin F, Poinsard L, Kirsch M, Jouini S, Billat V (2021) Marathon-Induced Cardiac Fatigue: A Review over the Last Decade for the Preservation of the Athletes’ Health. *Int J Environm Res Public Health* 18, 8676, DOI 10.3390/ijerph18168676
- 26 Kriz NG, Hodgson DR, Rose RJ (2000) Changes in cardiac dimensions and indices of cardiac function during deconditioning in horses. *Am J Vet Res* 61, 1553–1560, DOI 10.2460/ajvr.2000.61.1553
- 27 Gruber K, Lang C (2018) Untersuchungen zu möglichen Zusammenhängen zwischen Trainingszustand, Herzfrequenz und Energiebedarf bei Pferden. *Studies about the relation between training condition, heart rate and energy requirement in horses. Züchtungskunde* 90, 179–194
- 28 Cannesson M, Jacques D, Pinsky MR, Gorcsan III J (2006) Effects of modulation of left ventricular contractile state and loading conditions on tissue Doppler myocardial performance index. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 290, H1952–H9, DOI 10.1152/ajpheart.01090.2005
- 29 Douglas PS, O’Toole ML, Hiller WD, Hackney K, Reichel N (1987) Cardiac fatigue after prolonged exercise. *Circulation* 76, 1206–1213, DOI 10.1161/01.cir.76.6.1206
- 30 Krieg A, Scharhag J, Kindermann W, Urhausen A (2007) Cardiac tissue Doppler imaging in sports medicine. *Sports Med* 37, 15–30, DOI 10.2165/00007256-200737010-00002