

# Einfluss des Alters auf die mit PW- und Farbgewebedoppler gemessenen Myokardgeschwindigkeiten bei juvenilen Warmblutpferden

Heidrun Gehlen und Henrike Luise Lagershausen

Klinik für Pferde, Allg. Chirurgie und Radiologie des Fachbereichs Veterinärmedizin der Freien Universität Berlin

**Zusammenfassung:** In der hier vorliegenden Studie wurden erstmals Fohlen und Jungpferde der deutschen Warmblutrassen gewebedopplerechokardiographisch untersucht. Ziel der Arbeit war es einerseits zu ermitteln in welchen Normbereichen sich die Gewebedopplerparameter befinden und andererseits den Einfluss des Alters und des Wachstums der Pferde auf die Entwicklung dieser echokardiografischen Untersuchungsparameter zu beleuchten. Als weitere mögliche Einflussvariablen wurden das Gewicht, die Größe und das Geschlecht sowie die Herzfrequenz überprüft. Insgesamt wurden in dieser Studie 57 Warmblutpferde im Alter von zwei Wochen bis drei Jahren untersucht, welche in vier Altersgruppen eingeteilt wurden (Fohlen, Jährlinge, Zweijährige, Dreijährige). Nach einer standardmäßigen B- und M-Mode-Untersuchung wurden jeweils drei konsekutive Herzzyklen aus der kurzen Achse im Farbgewebedopplermodus sowie auch im Spektralgewebedopplermodus aufgezeichnet. Hieraus wurden die systolischen, die frühdiastolischen und die spätdiastolischen Myokardgeschwindigkeiten in der linken freien Ventrikelwand, im Interventrikularseptum und der rechten freien Ventrikelwand sowie die isovolumetrische Kontraktion in der linken freien Ventrikelwand ermittelt. Die Herzfrequenz der Fohlen war signifikant höher als die der anderen drei Gruppen ( $p = 0,000$ ). Im Farbgewebedoppler stiegen die frühdiastolische sowie die spätdiastolische Myokardgeschwindigkeit der linken freien Ventrikelwand von den Fohlen bis hin zu den dreijährigen Pferden an. Im Interventrikularseptum wiesen die systolische und die frühdiastolische Welle eine ansteigende Tendenz auf. In der rechten Ventrikelwand stieg lediglich die frühdiastolische Welle leicht an. Den größten Einfluss auf die Ausprägung der Myokardgeschwindigkeiten zeigten die Herzfrequenz und die Größe. Auch bei den Spektralgewebedopplerparametern erhöhten sich die frühdiastolische und die spätdiastolische Welle der linken freien Wand von den Fohlen bis hin zu den jungen adulten Pferden. Weiterhin hatte die frühdiastolische Welle der rechten Wand eine ansteigende Tendenz. Die Herzfrequenz und das Gewicht zeigten den größten Einfluss auf die mit dem Spektralgewebedoppler gemessenen Parameter. Schlussendlich sprechen die Ergebnisse dafür, dass das Wachstum der Pferde insgesamt einen großen Einfluss auf die Ausprägung der Parameter hat und somit auch das Alter.

**Schlüsselwörter:** Pferd, Alterungsprozess, Myokard, Gewebedoppler, Kardiologie

---

## Evaluation of age-dependending changes on myocardial velocity using pulsed wave and colour tissue Doppler imaging in juvenile warmblood horses

Young German warmblood horses from foals to three-year-olds were examined by tissue Doppler echocardiography for the first time. The aim of this study was to evaluate the influence of age and growth on the development of echocardiographic parameters in order to establish reference values for different age groups. Besides age, weight, height, and sex as well as heart rate were tested as possible variables of influence. A total number of 57 warmblood horses from the age of two weeks to three years was examined, which was divided into 4 age groups (foals, yearlings, two-year-olds and three-year-olds). After the standard 2DE- and M-mode echocardiographic examination, three consecutive heart cycles in the short axis view were stored in Colour Tissue Doppler mode and Spectral Tissue Doppler mode, respectively. Out of these data, the systolic, early-diastolic and late-diastolic myocardial velocities in the left free ventricular wall, the interventricular septum and the right ventricular wall as well as the isovolumetric contraction in the left free ventricular wall were determined. The heart rate of the foals was significantly higher than the heart frequency of the other groups ( $P = 0.000$ ). The early-diastolic and late-diastolic myocardial velocities in the left free ventricular wall measured by Colour Tissue Doppler increased from foals to three-year-olds. In the interventricular septum the systolic and early-diastolic myocardial velocity showed a tendency to increase. In the right ventricular wall, only the early-diastolic myocardial velocity slightly increased. Heart frequency and height had major impact on the development of the myocardial velocities. Similarly, the early-diastolic and late-diastolic myocardial velocity measured by Spectral Tissue Doppler increased from foals to the young adult horses as detected with Colour Tissue Doppler. Furthermore, the early-diastolic myocardial velocity in the right ventricular wall showed the tendency to increase. Heart rate and weight had major impact on these parameters measured by spectral tissue Doppler. Eventually, our results indicate that the growth of the horse overall has a great impact on the parameter value and consequently age also has a notable impact.

**Keywords:** horse, aging, myocard, tissue Doppler, cardiology

---

**Zitation:** Gehlen H., Lagershausen H. L. (2017) Einfluss des Alters auf die mit PW- und Farbgewebedoppler gemessenen Myokardgeschwindigkeiten bei juvenilen Warmblutpferden. *Pferdeheilkunde* 33, 336-348; DOI 10.21836/PEM20170403

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

## Einleitung

Die Ermittlung von Myokardgeschwindigkeiten mit dem Gewebedoppler wird in der Humanmedizin mittlerweile routinemäßig eingesetzt, da zahlreiche Studien den Nutzen dieser Methode

herausstellen konnten (Derumeaux et al. 2001, Abraham et al. 2007, Zhang et al. 2008). Auch bei gesunden und herzkranken Neonaten und Kindern wurde die Gewebedopplerechokardiografie bereits in einigen Studien angewendet (Rychik und Tian 1996, Harada et al. 2000; Kapusta et al. 2000, McMa-

hon et al. 2004, Boettler et al. 2005, Pham et al. 2005, Notomi et al. 2006, Rumeau et al. 2007, Pena et al. 2009, Marcus et al. 2012, Negrine et al. 2012). Zum Einfluss von Wachstum und Herzentwicklung auf die mit dem Gewebedoppler gemessenen Myokardgeschwindigkeiten bei gesunden Neonaten oder Kindern gibt es bisher jedoch nur wenige Studien (Mori et al. 2000, Swaminathan et al. 2003, Eidem et al. 2004, Notomi et al. 2006, Lorch et al. 2008). Eidem et al. untersuchten 325 gesunde Kinder vom Neonatalalter bis hin zum jungen Erwachsenen. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass das Alter einen großen positiven Einfluss auf Parameter der Herzgröße, wie beispielsweise die linksventrikulären systolischen und enddiastolische Diameter, linksventrikuläre hintere und septale Wanddicke sowie die Masse des linken Ventrikels hat. Bei den Myokardgeschwindigkeiten wurden die größten Unterschiede und Veränderungen dabei innerhalb des ersten Lebensjahres festgestellt (Eidem et al. 2004). Die niedrigsten systolischen und frühdiastolischen Geschwindigkeiten am lateralen Mitralanulus, am basalen Septum und am lateralen Trikuspidalanulus konnten bei Neonaten und Säuglingen erfasst werden. Mit fortschreitender Entwicklung wurde in allen genannten Segmenten ein signifikanter Anstieg der myokardialen Geschwindigkeiten festgestellt (Harada et al. 2000, Eidem et al. 2004, Lorch et al. 2008). Andere Autoren wiesen einen Anstieg von septalen und lateralen systolischen sowie frühdiastolischen Geschwindigkeiten von der Geburt bis zum 5. Lebensjahr nach (Lorch et al. 2008). Eine signifikante Veränderung der spätdiastolischen Myokardgeschwindigkeit konnte in den meisten Studien jedoch nicht detektiert werden (Harada et al. 2000, Eidem et al. 2004, Lorch et al. 2008). Da vor allem im ersten Lebensjahr aufgrund des Herzwachstums die Parameter der Herzgröße – allen voran der linksventrikuläre enddiastolische Diameter und die linksventrikuläre Masse – stark ansteigen und diese Parameter eng mit den Myokardgeschwindigkeiten korrelieren, liegt laut Eidem et al. (2004) die Vermutung nahe, dass vor allem das Herzwachstum einen Einfluss auf die Gewebedopplergeschwindigkeiten ausübt und weniger das Alter der Probanden (Eidem et al. 2004). Auch Notomi et al. konnten einen Anstieg der systolischen und frühen diastolischen Maximalgeschwindigkeiten zwischen Kindern im Säuglingsalter bis hin zum 7. Lebensjahr feststellen. Sie untersuchten die basalen Geschwindigkeiten der lateralen Wand und des Septums aus dem apikalen Vierkammerblick sowie die mittig im Ventrikel gemessenen Geschwindigkeiten der anterioren und posterioren Wand aus der kurzen Achse bei insgesamt 25 Kindern (Notomi et al. 2006). Im Gegensatz dazu wurde in einer anderen Studie bei 151 Kindern von ein bis 18 Jahren keine lineare Korrelation von Alter und den meisten Myokardgeschwindigkeiten festgestellt. In den Ergebnissen zeigten lediglich die spätdiastolischen Geschwindigkeiten am lateralen Mitral- und Trikuspidalanulus eine negative lineare Korrelation mit dem Alter (Swaminathan et al. 2003). Ähnliche Ergebnisse ergab eine Studie bei vier bis 18-jährigen Kindern (Kapusta et al. 2000). Keine der gemessenen Geschwindigkeitsparameter zeigte eine praktisch relevante Korrelation mit dem Alter der Probanden. Dagegen wiesen andere Studien nach, dass eine signifikante Korrelation zwischen dem Alter der Kinder und den systolischen sowie den frühdiastolischen Geschwindigkeiten am lateralen Mitral- und Trikuspidalanulus bestehen (Harada et al. 2000, Mori et al. 2000, Eidem et al. 2004).

In der Kleintiermedizin wird der Gewebedoppler ebenfalls seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt. Mittlerweile haben sich

bereits zahlreiche Studien damit befasst, den Nutzen des Gewebedopplers beim Hund und bei der Katze zu evaluieren (Chetboul et al. 2004, Chetboul et al. 2006, Koffas et al. 2006, Javornik 2007, MacDonald et al. 2007, Chetboul 2010). Chetboul et al. fanden heraus, dass mit Hilfe der Gewebedopplerechokardiographie schon Veränderungen der myokardialen Funktion festzustellen sind, während mit der herkömmlichen Echokardiographie noch keine Befunde detektierbar sind.

In der Pferdemedizin ist der Gewebedoppler als echokardiographisches Instrument noch nicht bis in den Praxisalltag vorgedrungen. Mehrere Forschungsgruppen haben aber bereits den Nutzen und die Anwendbarkeit der Gewebedopplerechokardiographie beim Pferd aufgezeigt (Sepulveda et al. 2005, Schwarzwald et al. 2009a, Decloedt et al. 2013). Es wurden mögliche Einsatzgebiete des Gewebedopplers in der Pferdemedizin getestet, mit dem Ergebnis, dass sich die Geschwindigkeitsprofile von Pferden mit kardiologischen Erkrankungen eindeutig von denen gesunder Pferde unterscheiden und die Technik sensitiver zur Beurteilung der Myokardfunktion ist, als die B- und M-mode Technik (Spieker 2006, Iversen 2008, Klaus 2009). Untersuchungen zu wachstumsabhängigen Veränderungen sind mit diesen echokardiographischen Techniken bisher nicht durchgeführt worden.

## Material und Methoden

### Pferde

In dieser Studie wurden 57 Warmblutpferde verschiedener Rassen (Oldenburger, Hannoveraner, Westfalen und Holsteiner) untersucht. Es handelte sich dabei um 33 Hengste und 24 Stuten. Das Alter der Pferde erstreckt sich vom zwei Wochen alten Fohlen bis hin zum dreijährigen Jungpferd (Abb. 1). Das Durchschnittsalter betrug  $14,6 \pm 13$  Monate. Die Pferde hatten im Durchschnitt ein Gewicht von  $312,6 \pm 144$  kg (84 bis 620 kg) und einen Größendurchschnitt von  $144 \pm 20$  cm (112 bis 175 cm). Die Pferde wurden von mehreren Züchtern für die Studie zur Verfügung gestellt. Die Haltung war in allen Ställen ähnlich. Sie bekamen täglichen Weidegang und wurden nach dem Absetzen von der Mutter in kleineren Gruppen mit Altersgenossen zusammen gehalten. Da vor allem die Warmblutpferde in so jungem Alter oft sehr wild und schwer ruhig zu halten sind, wurden nur Pferde für die Studie verwendet, welche das Handling und die Berüh-

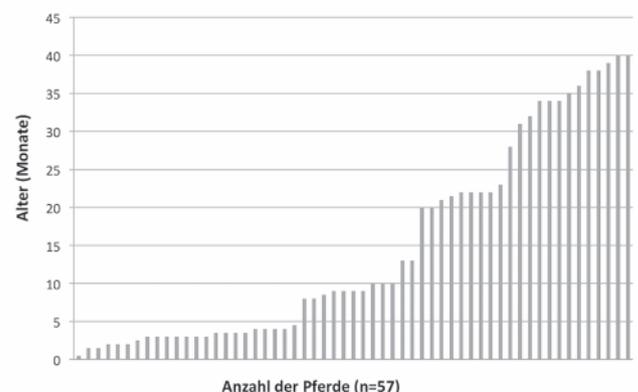


Abb. 1 Altersverteilung der untersuchten Pferde | Age distribution of the examined horses.

rungen vom Menschen bereits gewohnt waren. Zeigten die Pferde während der echokardiographischen Untersuchung ein sehr nervöses Verhalten, wurden sie von der Studie ausgeschlossen. Weiterhin kamen auch Pferde, die in der allgemeinen Untersuchung auffällig waren oder vorberichtlich an Vorerkrankungen litten sowie Tiere, die zum Zeitpunkt der Untersuchung unter Medikation standen, als Probanden für diese Studie nicht in Frage.

### *Klinische Untersuchung*

Es wurde bei jedem Pferd eine vollständige klinische Untersuchung durchgeführt. Alle Pferde wurden in die folgenden Altersgruppen eingeteilt: Fohlen, Jährlinge, Zweijährige, Dreijährige. Es wurden für die Größe, das Gewicht und die Herzfrequenz die Mittelwerte bestimmt.

### *EKG*

Zu Beginn der echokardiographischen Untersuchung wurden Elektroden zur Ableitung eines Standard-Ruhe-EKGs angebracht. Dabei kam die modifizierte Herzbasis-Herzspitzen-Brustwandableitung zum Einsatz.

### *Echokardiographie*

Die echokardiographischen Untersuchungen wurden mit dem Vivid i (GE Medical Systems, Ver. 10.2.0.b.110) und mit einer 3S-RS Sonde (Frequenz von 1,7/3,2MHz) durchgeführt. Die Auswertung des Datenmaterials erfolgte mit der Software Echopac Version 110.1.1.

### *B- und M-Mode*

Bei allen Pferden wurden eine echokardiographische Standarduntersuchung im B- und M-Mode sowie eine Untersuchung der Herzklappen mit dem Farbdoppler durchgeführt. Eine Herzgesundheit war Voraussetzung zur Teilnahme an der Studie.

### *Farb- und Spektralgewebedoppler*

Die Untersuchungen mit der Farb- und der Spektralgewebedopplertechnik wurden in der rechten kaudalen kurzen Achse (RKDKA = Querschnitt) durchgeführt und es wurde dabei strikt die Ebene direkt unterhalb des Mitralklappenansatzes eingehalten. Für beide Gewebedopplerapplikationen wurde in den drei Lokalisationen linksventrikuläre Wand (LW), Interventrikularseptum (IVS) und rechtsventrikuläre Wand (RW) gemessen. In jeder einzelnen Lokalisation wurden die maximale systolische Kontraktion (S-Welle), die maximale frühdiaastolische Relaxation (E-Welle) und die spätdiaastolische maximale (Vorhof-) Kontraktion (A-Welle) bestimmt. Jeder einzelne Messwert wurde dreimal aus drei aufeinander folgenden Herzzyklen bestimmt. Bei den Fohlen war die Eindringtiefe standardmäßig auf 20 cm eingestellt, bei allen anderen Jungpferden wurde das Herz herausvergrößert, damit immer eine Bildrate von mindestens 60 bps (Bilder pro Sekunde) erreicht wurde. Es wurden Cineloops mit mindestens drei Herzzyklen im Farbge-

webedopplermodus gespeichert. Das Pferd durfte sich während dieser Zeit nicht bewegen und die Schnittebene musste präzise beibehalten werden. Zur Absicherung wurden immer zwei Loops aufgezeichnet. Herzzyklen nach Sinuspause oder nach einem atrioventrikulären Block 2. Grades wurden nicht zur Analyse herangezogen.

Mit dem Spektralgewebedoppler (PW-TDI) wurden die Messungen direkt während der Ultraschalluntersuchung durchgeführt. Für die Aufzeichnung der Spektralgewebedopplerkurve wurde eine ROI mittig in dem zu untersuchenden Myokardareal (möglichst senkrecht zum Schallstrahl) positioniert. In den beiden freien Wänden wurde die ROI endokardnah positioniert, während sie im Interventrikularseptum mittig ausgerichtet wurde. Auch hier wurde die genannte Ebene unterhalb der Mitralklappe während der Aufzeichnung eingehalten. Die Größe der ROI wurde der Größe des Myokards an den verschiedenen Messpositionen angepasst. Jeweils mindestens drei Kurven aus aufeinanderfolgenden Herzzyklen wurden aufgezeichnet.

Für den Farbgewebedoppler und für den Spektralgewebedoppler wurden die gleichen Messwerte erhoben. Die Kurvenidentifikation war in Abhängigkeit vom Messpunkt nicht immer auf Anhub eindeutig, sodass es zeitlicher Marker bedurfte um eine Zuordnung der Ereignisse treffen zu können. Bei Pferden, bei denen die Zeitmarker nicht eindeutig gesetzt werden konnten, wurde zur Kurvenidentifikation die Methode nach Lind et al. (2002) angewandt. Die Datenanalyse der Farbgewebedoppleruntersuchung erfolgte im Nachhinein „Offline“ mit der Software Echopac Version 110.1.1.

### *Statistik*

Zur statistischen Analyse der Daten und zur Erstellung der Boxplot-Diagramme wurde das Statistikprogramm IBM SPSS Statistics 21 verwendet. Zur Berechnung der Regressionsanalysen wurde das Softwarepaket NCSS Version 9 zur Hilfe genommen. Alle erhobenen Parameter aus den Gewebedoppler-Untersuchungen wurden einer deskriptiven Datenanalyse unterzogen. Der Mittelwert und die Standardabweichung wurden ermittelt. Die Probanden wurden hierfür in vier Altersgruppen eingeteilt: Fohlen, Jährlinge, Zweijährige und Dreijährige. Die Gruppen wurden mit Hilfe einer Post-Hoc-Analyse mittels Einzelgruppenvergleich nach Scheffé auf signifikante Unterschiede untereinander untersucht. Die Ergebnisse wurden mit Hilfe von Boxplots dargestellt und die signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen mit Schweifklammern markiert. Die erhobenen Parameter wurden auf folgende Einflüsse hin untersucht: Alter, Gewicht, Größe, Geschlecht, Herzfrequenz. Es wurden sowohl univariable als auch multivariable lineare Regressionsmodelle gerechnet. Für das multivariable Modell bezog das Programm automatisch die vier einflussreichsten der fünf genannten möglichen Einflussfaktoren in die Regressionsanalyse ein. Die Ergebnisse wurden tabellarisch zusammengefasst und auf Grundlage des p-Wertes und des korrigierten  $r^2$  ausgewertet. Jeder aufgenommene Parameter wurde in drei konsekutiven Herzzyklen gemessen. Ziel war es, daraus den Mittelwert zu bilden, welcher dann für die Auswertung genutzt wurde. Zur Beschreibung der Variabilität innerhalb der drei aufeinanderfolgenden Messungen des gleichen

Parameters, wurde der Variationskoeffizient herangezogen. Ein Einfluss galt als signifikant, wenn  $p \leq 0,05$ .

## Ergebnisse

### Ergebnisse der Allgemeinuntersuchung

Das Allgemeinbefinden der Pferde war ungestört. Keines der Pferde zeigte klinische Abweichungen von der Norm. Es handelte sich um 33 Hengste und 24 Stuten. Das Alter der Pferde erstreckt sich vom zwei Wochen alten Fohlen bis hin zum dreijährigen Jungpferd. Das Durchschnittsalter betrug  $14,6 \pm 13$  Monate. Die Pferde hatten im Durchschnitt ein Gewicht von  $312,6 \pm 144$  kg (84 bis 620 kg) und einen Größendurchschnitt von  $144 \pm 20$  cm (112 bis 175 cm). Alle Pferde wurden in die folgenden vier Altersgruppen eingeteilt: Fohlen, Jährlinge, Zweijährige, Dreijährige. Insgesamt gingen 23 Fohlen (Gruppe 1), 12 Jährlinge (Gruppe 2), 10 zweijährige (Gruppe 3) und 12 dreijährige Pferde (Gruppe 4) in die Datenauswertung ein.

### Ergebnisse des EKG

Das Standard-Ruhe-EKG der untersuchten Pferde ergab einen regelmäßigen Rhythmus mit gleichmäßig wiederkehrenden P-QRS-T Komplexen.

### B- und M-Mode

Die Mittelwerte aller im B-Mode gemessenen Parameter stiegen von den Fohlen bis zur ältesten Altersgruppe der Dreijährigen kontinuierlich an und lagen in dem bereits von anderen Autoren beschriebenen Normwertbereich (Rovira und Munoz 2009, Collins et al. 2010, Matur und Gür 2011, Gehlen und Lagershausen 2017)).

### Ergebnisse der Gewebedopplerechokardiographie

In der linksventrikulären freien Wand zeigte sich ein typischer Wellenverlauf, der mit beiden Messmethoden (PW- und Farbgewebedoppler) gleichermaßen darstellbar war. Hier konnte

bereits durch den Abgleich mit dem EKG eine Zuordnung der Kurvenverläufe erfolgen. Weiterhin waren auch die Kurvenverläufe in der rechtsventrikulären Wand meist schon eindeutig durch den Abgleich mit dem EKG zu deuten und wurden durch die Abgleich von Klappenöffnung und -schluss bestätigt. Insbesondere im Interventrikularseptum zeigten die Kurvenverläufe ein weniger homogenes Bild, sodass die Bestimmung der Öffnung bzw. des Schlusses von Mitral- und Aortenklappe einen wichtigen Stellenwert für eine eindeutige Kurvenidentifikation einnahmen. Die Bestimmung der isovolämischen Kontraktion (IVC) sowie der isovolämischen Relaxation (IVR) waren in der linken Herzwand im PW-TDI eindeutig möglich, im TVI konnten diese beiden Ereignisse nicht immer sicher bestimmt werden.

### Ergebnisse der Farbgewebedopplerechokardiographie

Die Ergebnisse der Farbgewebedopplermessungen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die systolische Myokardgeschwindigkeit (S) der linken Ventrikelwand unterschied sich zwischen den verschiedenen Pferdegruppen nicht signifikant. Die frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit (E) in der linken freien Ventrikelwand der zweijährigen ( $p = 0,005$ ) sowie der dreijährigen Pferde ( $p = 0,005$ ) war signifikant höher als die der Fohlen (Abb. 2). Die Tendenz der Werte war von Gruppe 1 bis Gruppe 3 ansteigend. Zwischen Gruppe 3 und Gruppe 4 gab es so gut wie keinen Unterschied.

In der linken freien Ventrikelwand bestand ein signifikanter Unterschied in der spätdiastolischen Myokardgeschwindigkeit (A) zwischen den Fohlen und den dreijährigen Pferden sowie zwischen den Jährlingen und den Dreijährigen. Während die Mittelwerte der Gruppen 1 bis 3 relativ gleich waren, lag der Mittelwert der dreijährigen Pferde höher und unterschied sich signifikant von den Fohlen ( $p = 0,016$ ) und von den Jährlingen ( $p = 0,049$ ; Abb. 3).

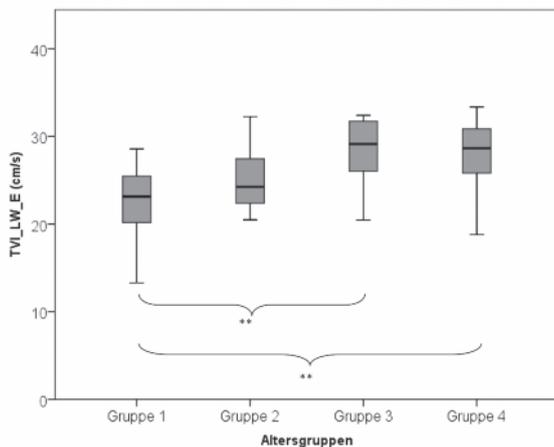
Im Interventrikularseptum war die systolische Myokardgeschwindigkeit (S) bei den Fohlen signifikant kleiner als bei den Dreijährigen ( $p = 0,030$ ). Die frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit (E) der Fohlen im Interventrikularseptum war signifikant niedriger als bei den Zwei- ( $p = 0,005$ ) sowie bei den Dreijährigen ( $p = 0,010$ ). Von Gruppe 1 zu Gruppe 4

**Tab. 1** Ergebnisse der Farbgewebedoppleruntersuchungen (cm/s), Mittelwerte und Standardabweichung, unterteilt nach Altersgruppen. | Results of colour Tissue Doppler Imaging (cm/s), mean values and standard deviations, divided into age groups.

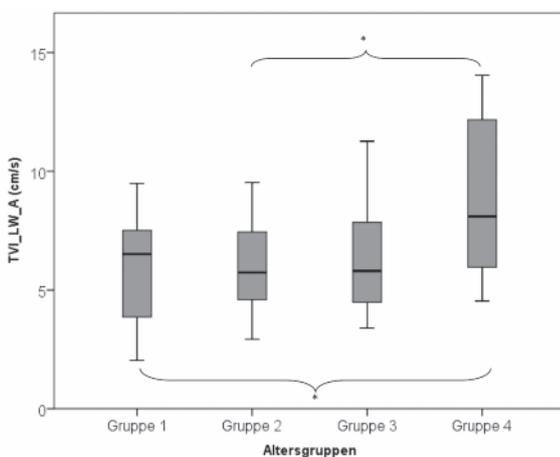
Parameter	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
	Fohlen	Jährlinge	Zweijährige	Dreijährige
TVI_LW_S	$9,4 \pm 1,7$	$8,4 \pm 1,7$	$8,7 \pm 1,4$	$9,9 \pm 1,3$
TVI_LW_E	$22,8 \pm 3,9$	$25,1 \pm 3,6$	$28,3 \pm 3,8$	$27,9 \pm 4,1$
TVI_LW_A	$5,9 \pm 2,2$	$5,9 \pm 2,0$	$6,5 \pm 2,7$	$8,9 \pm 3,5$
TVI_LW_IVC	$4,2 \pm 2,0$	$4,5 \pm 1,5$	$5,0 \pm 2,2$	$5,0 \pm 1,8$
TVI_IVS_S	$2,8 \pm 1,2$	$2,8 \pm 0,8$	$3,2 \pm 1,1$	$4,2 \pm 1,2$
TVI_IVS_E	$9,6 \pm 2,1$	$10,2 \pm 1,5$	$12,5 \pm 2,3$	$12,2 \pm 1,8$
TVI_IVS_A	$3,2 \pm 1,5$	$2,0 \pm 1,4$	$2,0 \pm 1,2$	$3,5 \pm 4,0$
TVI_RW_S	$3,7 \pm 1,6$	$2,5 \pm 0,9$	$4,6 \pm 1,7$	$3,8 \pm 1,3$
TVI_RW_E	$4,1 \pm 2,0$	$4,7 \pm 2,1$	$8,7 \pm 3,4$	$6,0 \pm 1,7$
TVI_RW_A	$2,3 \pm 1,8$	$1,8 \pm 1,2$	$3,9 \pm 2,2$	$2,4 \pm 0,8$

waren die Mittelwerte der systolischen (S), sowie der frühdiastolischen (E) Welle tendenziell ansteigend. Die spätdiastolische Welle (A) der Gruppen unterschied sich untereinander nicht signifikant.

In der rechten freien Ventrikelwand wies die systolische Myokardgeschwindigkeit (S) einen signifikanten Unterschied zwischen den Jährlingen und den Zweijährigen auf ( $p = 0,019$ ). Die systolische Myokardgeschwindigkeit der Jährlinge war hierbei signifikant niedriger als bei den zweijährigen Pferden, jedoch war insgesamt keine einheitliche Tendenz der Werte von den Fohlen zu den dreijährigen Pferden erkennbar. Die frühdiastolische Welle (E) der rechten Ventrikelwand von den Zweijährigen zeigte den größten Mittelwert aller Gruppen und unterschied sich signifikant von den Jährlingen ( $p = 0,002$ ) und hoch signifikant von der frühdiastolischen Welle (E) der Fohlen



**Abb. 2** Zusammenhang zwischen der mit dem Farbgewebedoppler gemessenen frühdiastolischen Myokardgeschwindigkeit der linken freien Ventrikelwand (TVI\_LW\_E) und der Altersgruppe, signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen. | *Correlations of early diastolic myocardial velocity of the left ventricular free wall (TVI\_LW\_E) measured by colour Tissue Doppler Imaging and age groups, significant differences between groups marked.*



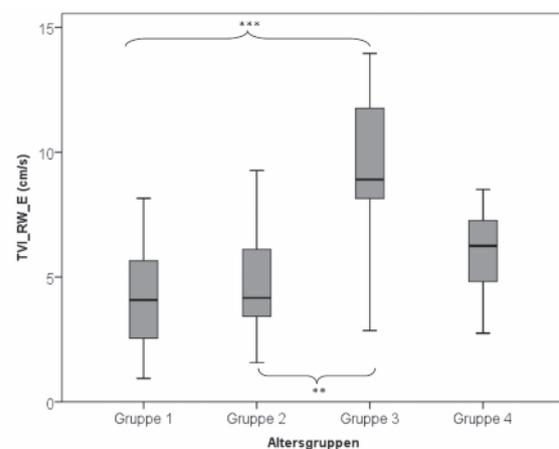
**Abb. 3** Zusammenhang zwischen der mit dem Farbgewebedoppler gemessenen spätdiastolischen Welle der linken freien Ventrikelwand (TVI\_LW\_A) und der Altersgruppe der Pferde, signifikanter Unterschied zwischen Gruppe 1, Gruppe 2 und Gruppe 4 (Gruppe 1 = Fohlen, Gruppe 2 = Jährlinge, Gruppe 3 = 2-jährige, Gruppe 4 = 3-jährige). | *Correlations of late diastolic myocardial velocity of the left ventricular free wall (TVI\_LW\_A) measured by colour Tissue Doppler Imaging and age groups, significant difference between groups 1, 2 and 4.*

( $p = 0,000$ ). Die Gruppe 3 stach mit dem höchsten Mittelwert heraus. Die Gesamttendenz der frühdiastolischen (E) Welle der rechten Ventrikelwand war optisch ansteigend (Abb. 4).

Im Hinblick auf die spätdiastolische Relaxationsgeschwindigkeit (A) der rechten Ventrikelwand wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Jährlingen und den zweijährigen Pferden nachgewiesen ( $p = 0,029$ ), wobei die Gruppe 3 im Vergleich zu den drei anderen Gruppen hier einen höheren Mittelwert aufzeigte. Die Mittelwerte der drei anderen Gruppen waren relativ gleich und eine Tendenz somit nicht erkennbar. Die Spannweite der gemessenen Parameter bei den verschiedenen Pferden in den Gewebedoppleruntersuchungen war deutlich größer als in den B- und M-Mode-Untersuchungen.

Univariable Einflüsse auf die Farbgewebedopplergeschwindigkeiten

Das Alter zeigte in der univariablen Analyse einen signifikanten positiven Einfluss auf die Hälfte der Farbgewebedopplerparameter. In allen drei Messlokalisationen wurde die frühdiastolische Welle (E) durch das Alter beeinflusst. Die mit dem Alter der Pferde steigende Tendenz der spätdiastolischen Welle (A) in der linken freien Ventrikelwand ist grafisch erkennbar. Auf die Hälfte der zehn Farbgewebedopplerparameter hatte auch das Gewicht einen signifikanten positiven Einfluss. Auch hier war der Einfluss auf die frühdiastolische Welle (E) in den drei Lokalisationen signifikant. Die Größe der Pferde hatte einen signifikanten positiven Einfluss auf mehr als die Hälfte der gemessenen Farbgewebedoppler-Parameter und zeigte somit in der Einzelbetrachtung den größten Einfluss. Wie auch das Alter und das Gewicht, hatte auch die Größe in allen drei Messlokalisationen einen signifikanten positiven Einfluss auf die frühdiastolische Welle (E). Das Geschlecht hatte nur punktuell einen signifikanten positiven Einfluss auf die spätdiastolische Welle (A) der linken freien Ventrikelwand sowie auf die frühdiastolische Welle (E) des Interventrikularseptums. Das korrigierte  $r^2$  war hier auf-



**Abb. 4** Zusammenhang zwischen der mit dem Farbgewebedoppler gemessenen frühdiastolischen Myokardgeschwindigkeit der rechten Wand (TVI\_RW\_E) und der Altersgruppe der Pferde, signifikanter Unterschied zwischen Gruppe 1, 2 und Gruppe 3 (Gruppe 1 = Fohlen, Gruppe 2 = Jährlinge, Gruppe 3 = 2-jährige, Gruppe 4 = 3-jährige). | *Correlations of early diastolic myocardial velocity of the right ventricular free wall (TVI\_RW\_E) measured by colour Tissue Doppler Imaging and age groups, significant difference between groups 2 and 3.*

fallend niedrig. Nur einige wenige der Farbgewebedopplerdaten wurden signifikant durch die Herzfrequenz beeinflusst. Auch hier ist anzumerken, dass in allen drei gemessenen Lokalisationen jeweils die frühdiastolische Welle (E) signifikant durch die Herzfrequenz beeinflusst wurde. Der Einfluss war hier negativ.

#### Multivariable Einflüsse auf die Farbgewebedopplergeschwindigkeiten

In der multivariablen Analyse hatte das Alter keinen signifikanten Einfluss auf die Farbgewebedopplergeschwindigkeiten. Einen signifikanten positiven Einfluss auf die meisten Farbgewebedopplerparameter hatten die Größe und die Herzfrequenz. Das Gewicht sowie auch das Geschlecht zeigten nur vereinzelt signifikante Einflüsse auf die Ausprägung der gemessenen Parameter. Zu betonen ist, dass die Herzfrequenz auf die systolischen (S) und spätdiastolischen (A) Myokardgeschwindigkeiten aller drei Lokalisationen einen signifikanten positiven Einfluss hatte, jedoch die frühdiastolische Welle (E) nicht signifikant von der Herzfrequenz beeinflusst wurde (Tab.2). Das korrigierte  $r^2$  bewegte sich zwischen 0,03 und 0,4.

#### Ergebnisse der Spektralgewebedopplerechokardiographie

Betrachtete man die Mittelwerte aus der Spektralgewebedoppleruntersuchung, fiel auf, dass weniger signifikante Unter-

schiede zwischen den Gruppen gefunden wurden als bei der Farbgewebedoppleruntersuchung (Tab. 3). Die Post-Hoc-Analyse mittels Einzelgruppenvergleich nach Scheffé ergab, dass sich die Gruppen in der systolischen Myokardgeschwindigkeit (S) der linken freien Ventrikelwand nicht signifikant voneinander unterschieden. Die frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit (E) der linken freien Ventrikelwand war bei den Fohlen am niedrigsten ausgeprägt und war signifikant kleiner als die frühdiastolischen Wellen (E) der Zweijährigen ( $p = 0,011$ ) und der Dreijährigen ( $p = 0,012$ ; Abb. 5). Es wurde weiterhin nachgewiesen, dass die spätdiastolischen Myokardgeschwindigkeit (A) in der linken freien Ventrikelwand bei den Fohlen signifikant niedriger war als bei den dreijährigen Pferden ( $p = 0,022$ ). Insgesamt war die Tendenz der mit dem Spektralgewebedoppler gemessenen frühdiastolischen und spätdiastolischen Myokardgeschwindigkeit in der linken freien Ventrikelwand optisch ansteigend.

Im Interventrikularseptum unterschieden sich die Myokardgeschwindigkeiten der vier Altersgruppen nicht signifikant voneinander. In der rechten freien Ventrikelwand zeigte sich die systolische Myokardgeschwindigkeit (S) der Jährlinge signifikant niedriger als die der zweijährigen Pferde ( $p = 0,033$ ). Insgesamt war jedoch keine nennenswerte Tendenz zu erkennen. Die frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit (E) der Fohlen in der rechten freien Ventrikelwand war signifikant niedriger als die der zweijährigen Pferde ( $p = 0,010$ , Abb. 6). Dieser Unterschied war sehr signifikant und die Tendenz der Werte

**Tab. 2** Multivariable Einflüsse auf die Farbgewebedopplergeschwindigkeiten, p-Werte, korrigiertes  $r^2$ , signifikante Einflüsse hervorgehoben. | *Multivariable influence on colour TDI velocities, p-values, corrected  $r^2$ , significant influences marked.*

Parameter	Alter	Gewicht	Größe	HR	Geschlecht	R <sup>2</sup> korr.
TVI_LW_S	0,7614	0,6166	0,0598	<0,001	n.u.	0,1966
TVI_LW_E	0,6143	n.u.	0,0186	0,7799	0,7130	0,3430
TVI_LW_A	0,4080	n.u.	0,1016	0,0271	0,0573	0,2625
TVI_LW_IVC	0,3329	n.u.	0,1263	0,7971	0,6843	0,0265
TVI_IVS_S	0,0788	0,1877	0,0123	<0,001	n.u.	0,3955
TVI_IVS_E	0,5528	0,5114	0,5126	n.u.	0,2034	0,3293
TVI_IVS_A	0,0693	0,0552	0,0199	0,0015	n.u.	0,1807
TVI_RW_S	0,3163	0,0424	n.u.	0,0059	0,0151	0,1558
TVI_RW_E	0,1159	0,0172	n.u.	0,5161	0,6112	0,1790
TVI_RW_A	n.u.	0,8956	0,4154	0,0397	0,5458	0,0245

**Tab. 3** Ergebnisse der Spektralgewebedoppleruntersuchungen (cm/sec), Mittelwerte und Standardabweichung, unterteilt nach Altersgruppen | *Results of spectral TDI (cm/s), mean values and standard deviations, divided into age groups.*

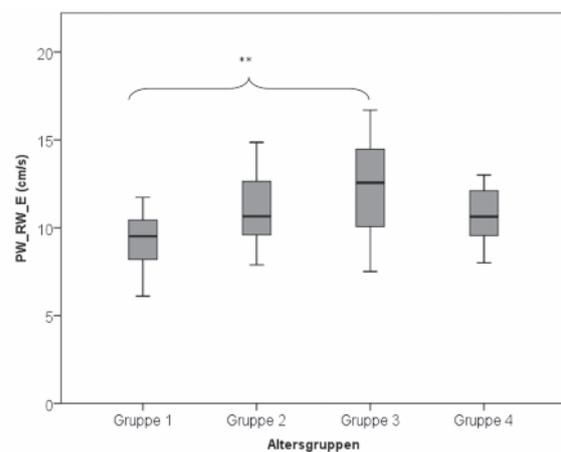
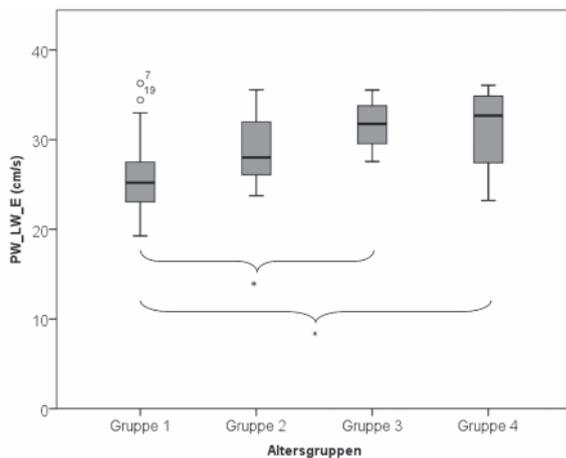
Parameter	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4
	Fohlen	Jährlinge	Zweijährige	Dreijährige
PW_LW_S	12,2 ± 1,7	10,9 ± 1,9	10,5 ± 1,2	12,1 ± 1,5
PW_LW_E	25,9 ± 4,6	28,8 ± 3,9	31,5 ± 2,7	31,1 ± 4,4
PW_LW_A	9,1 ± 1,4	9,3 ± 1,7	8,9 ± 2,3	11,9 ± 3,9
PW_LW_IVC	8,8 ± 3,7	9,7 ± 2,6	8,5 ± 3,4	9,6 ± 2,3
PW_IVS_S	6,7 ± 1,9	5,1 ± 0,8	5,2 ± 0,9	6,0 ± 1,5
PW_IVS_E	13,2 ± 3,3	14,4 ± 3,8	14,0 ± 2,5	16,0 ± 3,1
PW_IVS_A	5,7 ± 1,6	5,3 ± 2,6	3,7 ± 1,9	6,6 ± 3,3
PW_RW_S	8,6 ± 1,4	7,8 ± 0,8	9,4 ± 1,4	8,7 ± 0,9
PW_RW_E	9,3 ± 1,7	10,9 ± 2,1	12,4 ± 3,1	10,7 ± 1,6
PW_RW_A	6,3 ± 1,2	6,9 ± 0,9	7,7 ± 2,1	7,1 ± 1,4

insgesamt bis zur Gruppe der Zweijährigen ansteigend. Die älteste Gruppe fiel in ihrem Durchschnittswert wieder leicht ab. Der Abfall des Durchschnittswertes war dennoch nicht signifikant. Bei der spätdiastolischen Myokardgeschwindigkeit (A) gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier Altersgruppen.

#### Univariable Einflüsse auf die Spektralgewebedopplerparameter

In der univariablen Analyse der Spektralgewebedopplerparameter hatte das Alter einen signifikanten, positiven Einfluss sowohl auf die frühdiastolische Welle (E) und die spätdiastolische Welle (A) der linken freien Ventrikelwand als auch auf die frühdiastolische Welle (E) des Interventrikularseptums. Das Gewicht der untersuchten Pferde hatte einen signifikanten, positiven Einfluss auf die Hälfte der Spektralgewebedopplerparameter. Erneut waren in allen Lokalisationen die frühdiastolischen Wellen (E) signifikant beeinflusst. Je größer das Gewicht der Probanden, desto höher waren diese Parameter ausgeprägt. Graphisch ist eine steigende Tendenz der Werte mit steigendem Gewicht erkennbar. Die Größe der Pferde hatte auf

mehr als die Hälfte der erhobenen Spektralgewebedopplerparameter einen signifikanten Einfluss. In der linken sowie in der rechten freien Ventrikelwand wurden jeweils die frühdiastolische (E) und die spätdiastolische (A) Welle signifikant positiv durch die Größe der Pferde beeinflusst. Im Interventrikularseptum wurden hingegen die systolische (S) und die frühdiastolische (E) Myokardgeschwindigkeit signifikant positiv durch die Größe der untersuchten Pferde beeinflusst. Das Geschlecht hatte auf keinen der erhobenen Spektralgewebedopplerparameter einen signifikanten Einfluss. Die Herzfrequenz der untersuchten Pferde hatte nur auf wenige Parameter der Spektralgewebedoppleruntersuchung einen signifikanten Einfluss. Lediglich die systolische (S) und die frühdiastolische (E) Welle der linken freien Ventrikelwand sowie die systolische Welle (S) des Interventrikularseptums waren signifikant durch die Herzfrequenz beeinflusst. Die systolischen (S) Wellen der linken freien Ventrikelwand und des Interventrikularseptums wurden dabei positiv, die frühdiastolische Welle (E) der linken freien Ventrikelwand negativ beeinflusst. Je höher die Herzfrequenz, desto höher war die systolische Welle (S) ausgeprägt. Bei der frühdiastolischen Welle (E) der linken freien Ventrikelwand hingegen sank die Höhe der Welle mit steigender Herzfrequenz.



**Abb. 5** Frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit der linken freien Ventrikelwand (PW\_LW\_E), gemessen mit dem Spektralgewebedoppler, in Abhängigkeit von der Altersklasse der Pferde, signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen (Gruppe 1 = Fohlen, Gruppe 2 = Jährlinge, Gruppe 3 = 2-jährige, Gruppe 4 = 3-jährige). | *Correlations of early diastolic myocardial velocity of the left ventricular free wall (PW\_LW\_E) measured by spectral Tissue Doppler Imaging and age groups, significant differences between groups marked.*

**Abb. 6** Mit dem Spektralgewebedoppler gemessene frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit der rechten Wand (PW\_RW\_E) in Abhängigkeit von der Altersklasse, signifikanter Unterschied zwischen den Fohlen (Gruppe 1) und zweijährigen Pferden (Gruppe 3). | *Correlations of early diastolic myocardial velocity of the right ventricular free wall (PW\_RW\_E) measured by spectral Tissue Doppler Imaging and age groups, significant difference between foals and 2-year-olds.*

**Tab. 4** Multivariable Einflüsse auf die Farbgewebedopplerparameter, p-Werte, korrigiertes  $r^2$ , signifikante Einflüsse hervorgehoben. | *Multivariable influence on colour TDI parameters, p-values, corrected  $r^2$ , significant influences marked.*

Variable	Alter	Gewicht	Größe	HR	Geschlecht	$R^2$ korr.
PW_LW_S	0,4443	n.u.	0,4340	0,0024	0,3783	0,1449
PW_LW_E	n.u.	0,7090	0,2412	0,4468	0,1633	0,3212
PW_LW_A	0,4101	n.u.	0,1426	0,0239	0,2700	0,1830
PW_LW_IVC	0,3874	0,7072	0,7287	n.u.	0,6106	0,0000
PW_IVS_S	0,1079	0,4121	n.u.	0,0041	0,0719	0,2723
PW_IVS_E	0,1787	0,0442	n.u.	0,4455	0,3274	0,1525
PW_IVS_A	0,4529	0,1499	0,0176	0,0135	n.u.	0,0987
PW_RW_S	0,2096	0,0344	n.u.	0,0215	0,3889	0,0852
PW_RW_E	0,0057	0,0011	n.u.	0,4589	0,1962	0,2384
PW_RW_A	0,0699	0,3661	0,1315	0,0157	n.u.	0,2309

## Multivariable Einflüsse auf die Spektralgewebedopplerparameter

In der multivariablen Analyse hatte die Herzfrequenz auf die meisten Parameter einen signifikanten positiven Einfluss. Lediglich die frühdiastolischen Wellen (E) in allen drei Lokalisationen wurden nicht signifikant durch die Herzfrequenz beeinflusst. Das Alter hatte nur punktuell einen negativen, signifikanten Einfluss und die Größe nur einen positiven, signifikanten Einfluss auf jeweils einen Parameter. Das Gewicht hatte auf drei Parameter einen signifikanten, positiven Einfluss (Tab. 4). Das korrigierte  $r^2$  war inhomogen und erstreckte sich von 0 bis 0,32.

## Diskussion

Wie bereits bei anderen echokardiografischen Studien bei Pferden (Gehlen et al. 2005, Schefer et al. 2010, Michutta 2011) bestand auch das Probandengut dieser Studie aus deutschen Warmblütern. In der hier vorliegenden Studie handelte es sich hingegen ausschließlich um Pferde der Rassen Oldenburger, Hannoveraner, Westfalen und Holsteiner, also aus Pferden der bekanntesten deutschen Warmblutrassen. Grund für diese Fokussierung war, dass diese Pferde sich konstitutionell sehr ähnlich sind. Das Besondere an dieser Studie stellt die Alterszusammensetzung der Probanden dar. Bisher wurden lediglich Vollblutfohlen (Collins et al. 2010, Matur und Gür 2011, Slack et al. 2012), spanische Fohlen (Rovira und Munoz 2009) sowie Ponyfohlen (Lombard et al. 1984) echokardiografisch untersucht. Die bisher durchgeführten Studien an jungen Pferden untersuchten zudem meistens nur Fohlen im Verlauf bis zum 4. Monat post partum (Collins et al. 2010) und bis zu einem Alter von drei Monaten (Lombard et al. 1984). Lediglich Matur et al. untersuchten eine größere Gruppe von Vollblutfohlen wiederholt echokardiografisch bis zu einem Alter von zwei Jahren (Matur und Gür 2011). In der Studie von Rovira et al. wurden Fohlen im Alter von drei Wochen bis zum Jährlingsalter untersucht (Rovira und Munoz 2009). Keine der aufgeführten Studien befasste sich jedoch mit Pferden vom Fohlenalter bis hin zum dreijährigen Pferd. Durch die bisher durchgeführten echokardiografischen Studien an Fohlen und im Wachstum befindlichen Pferden wird deutlich, dass noch nie zuvor Pferde der Warmblutrassen als Fohlen oder Jungpferde echokardiografisch untersucht wurden. Die besondere Bedeutung des hier untersuchten Probandenguts wird weiterhin dadurch deutlich, dass weder Fohlen der Warmblutrassen noch Fohlen anderer Rassen jemals mittels der Gewebedopplerechokardiographie untersucht wurden. Allein in einer anderen Studie wurden im Wachstum befindliche zweijährige Vollblüter mittels der Gewebedopplerechokardiographie untersucht (Sepulveda et al. 2005). Auf Grund ihres hohen Temperaments sind junge Warmblüter keine einfach zu untersuchenden Probanden. Es gestaltete sich teilweise sehr schwierig, die jungen Pferde und Fohlen für den gesamten Zeitraum der Untersuchung ruhig zu halten. Für Folgestudien wäre es deshalb empfehlenswert, die Probanden zu sedieren, auch wenn dies wiederum Einfluss auf die Myokardbewegungen nimmt (Gehlen und Nagel 2014). Der Einfluss einer Sedierung mit Romifidin auf die Myokardgeschwindigkeiten adulter Pferde wurde bereits validiert (Gehlen und Nagel 2014). Die Sedierung der jungen Patienten könnte eine Möglichkeit sein, die Bildqualität sowie auch die Sicherheit für den Untersucher, die

Helfer und die Gerätschaften zu erhöhen und somit auch die Vergleichbarkeit zu verbessern.

Die Gewebedopplerechokardiographie stellt eine moderne und sensible Methode dar, um die Ventrikelfunktion und die Integrität des Myokards in der Humanmedizin (McMahon et al. 2004, Knebel et al. 2009) sowie auch inzwischen in der Veterinärmedizin (Chetboul et al. 2004, Sepulveda et al. 2005, Chetboul et al. 2006, Decloedt et al. 2013) zu untersuchen und zu beurteilen. In der eigenen Studie sollte der Fokus auf die Erforschung der Praktikabilität und Durchführbarkeit der Methoden bei Fohlen und jungen, noch im Wachstum befindlichen Warmblutpferden untersucht sowie der Einfluss von Alter und Wachstum auf die Ausprägung der Parameter evaluiert werden. Unter anderem weil das Pferd im Gegensatz zum Kleintier (Wagner 2005, Killich 2006) eine relativ niedrige Ruheherzfrequenz hat, bereitete die Identifizierung der systolischen (S), der frühdiastolischen (E) und der spätdiastolischen (A) Myokardgeschwindigkeiten in der hier vorliegenden Studie keine Schwierigkeiten. Diese drei Wellenpeaks konnten auch in vorherigen Untersuchungen beim Pferd einfach identifiziert werden (Schwarzwald et al. 2009a, Decloedt et al. 2013). Die Identifizierung der isovolumetrischen Wellenpeaks (isovolumetrische Kontraktion und Relaxation) bereitete hingegen teilweise Schwierigkeiten. Auch andere Autoren berichteten bereits von Problemen bei der genauen Identifizierung dieser beiden Parameter (Schwarzwald et al. 2009a, Decloedt et al. 2013). Meistens konnte die isovolumetrische Relaxation nicht sicher bestimmt werden (Nagel 2012, Neukirch 2012). In der hier vorliegenden Studie wurde aus den genannten Gründen nur die sicher identifizierbare isovolumetrische Kontraktion der linken freien Ventrikelwand in die Auswertungen mit einbezogen. Das Setzen von Zeitmarkern war in der eigenen Studie vor allem bei den Fohlen nicht möglich, da die für den humanmedizinischen Gebrauch ausgelegten Gerätschaften häufig die Herzfrequenz doppelt zählten, sprich während eines Herzzyklus jeweils zweimal Aortenklappenschluss und -öffnung anzeigten. Dies hätte zu einer fehlerhaften Auswertung geführt. Da jedoch die Wellenpeaks auch ohne Zeitmarker gut zu identifizieren waren, wurde hier auf Grund der beschriebenen Komplikationen auf das Setzen von Zeitmarkern verzichtet. Wie bereits in zahlreichen Studien nachgewiesen wurde (Sepulveda et al. 2005, Schwarzwald et al. 2009a), waren auch in der hier vorliegenden Arbeit die Ergebnisse aus der Farbgewebedoppler- und der Spektralgewebedoppleruntersuchung nicht gegeneinander austauschbar. Ursache hierfür war, dass die vom Spektralgewebedoppler gemessenen Parameter höhere Werte annahmen als die vom Farbgewebedoppler ermittelten mittleren Myokardgeschwindigkeiten.

Die Streuung der mit Hilfe des Gewebedopplers gemessenen Parameter war deutlich höher als die Streuung der B- und M-Mode-Ergebnisse. Folglich gestaltet es sich schwierig, Normwerte für die Myokardgeschwindigkeiten festzulegen. Auch in der Kleintiermedizin beim Hund (Killich 2006) sowie in der Humanmedizin durch Studien an Kindern wurde festgestellt, dass sich der Normalbereich der Myokardgeschwindigkeiten über einen relativ weiten Rahmen erstreckt (Kapusta et al. 2000). Zur Erstellung verlässlicher Gewebedoppler-Normwerte bei Warmblutfohlen und präadulten Warmblütern sind weitere Studien nötig, die eine größere Kohortenzahl pro Gruppe beinhalten. Dennoch stellen die

hier vorliegenden Ergebnisse einen ersten Schritt zur Normwerterstellung von Myokardgeschwindigkeiten bei Fohlen und jungen Warmblutpferden dar. Wie bereits in Untersuchungen aus der Humanmedizin bei Kindern belegt (*Rychik und Tian 1996, Harada et al. 2000, Kapusta et al. 2000, Mori et al. 2000*), erwies sich auch in der hier vorliegenden Studie die frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit (E) als die schnellste in allen drei Lokalisationen und die frühdiastolische Welle (E) der linken freien Ventrikelwand als die schnellste detektierte Myokardgeschwindigkeitswelle insgesamt. Die mittels der beiden Methoden (Farb- und Spektralgewebedoppler) gemessenen frühdiastolischen Wellen (E) zeigten in der hier vorliegenden Studie von den Fohlen bis hin zu den dreijährigen Pferden in allen drei untersuchten Lokalisationen eine ansteigende Tendenz. Zu diesem Ergebnis kamen auch Wissenschaftler, welche Studien mit Kindern durchführten (*Harada et al. 2000, Mori et al. 2000, Eidem et al. 2004, Notomi et al. 2006*). Eine mögliche Erklärung für den bereits bei Kindern festgestellten und auch in der hier vorliegenden Studie beim Fohlen bestätigten Anstieg der frühdiastolischen Myokardgeschwindigkeiten (E) mit steigendem Alter könnte sein, dass das neonatale Myokard auf Grund von ultrastrukturellen Unterschieden zum erwachsenen Myokard (*Marijanowski et al. 1994*) weniger elastisch ist und sich weniger durch aktive Spannung bewegt als das adulte Myokard (*Romero et al. 1972*). Eine Studie an kleinen Nagetieren konnte feststellen, dass eine erhöhte Proteinsynthese in der frühen postnatalen Periode zu Veränderungen in der Genexpression der Myosinisoformen führt. Dabei kommt es zu einem Austausch der langsamen  $\beta$ -Myosin Heavy Chains zu den schnelleren  $\gamma$ -Formen (*Hudlicka und Brown 1996*). Ähnliche Vorgänge könnten auch beim Pferdeherzen die ansteigende Tendenz der frühdiastolischen Myokardgeschwindigkeiten erklären. Weiterhin stellten die oben genannten Autoren fest, dass es mit dem Älterwerden der Kinder auch zu einem Anstieg der systolischen Myokardgeschwindigkeiten (S) in den verschiedenen Lokalisationen kommt (*Harada et al. 2000, Mori et al. 2000, Eidem et al. 2004, Notomi et al. 2006, Lorch et al. 2008*). Diese Ergebnisse aus der Humanmedizin waren in der hier vorliegenden Studie jedoch nicht eindeutig nachvollziehbar. Bei der hier durchgeführten Untersuchung an Fohlen und jungen Warmblütern war in der linken sowie auch in der rechten Ventrikelwand kein eindeutiger Trend der systolischen Myokardgeschwindigkeit (S) zu erkennen. Lediglich in der Farbgewebedopplermessung zeigte die systolische Welle (S) im Interventrikularseptum einen geringgradigen Aufwärtstrend der Myokardgeschwindigkeit vom Fohlen bis zu den dreijährigen Pferden. Dieser war jedoch nicht signifikant.

In humanmedizinischen Publikationen konnte keine Veränderung der spätdiastolischen Myokardgeschwindigkeit (A) mit steigendem Alter der Kinder festgestellt werden (*Harada et al. 2000, Mori et al. 2000, Eidem et al. 2004, Notomi et al. 2006, Lorch et al. 2008*). Auch bei den untersuchten Fohlen und Jungpferden in der hier vorliegenden Arbeit wurden keine signifikanten Veränderungen oder Trends der spätdiastolischen Welle (A) der linken freien Ventrikelwand festgestellt. Lediglich die mittels des Farbgewebedopplers ermittelte spätdiastolische Welle (A) der linken freien Ventrikelwand stieg von den Fohlen bis hin zu den dreijährigen Pferden geringgradig, aber nicht signifikant an. Beim Vergleich der Studien muss darauf hingewiesen werden, dass in den Humanstudien ausschließlich

Untersuchungen mittels des Spektralgewebedopplers durchgeführt wurden. Teilweise stachen in unserer Arbeit die Ergebnisse der Gruppe 3 (Zweijährige) mit dem höchsten Mittelwert heraus (wie beispielsweise die mit dem Farbgewebedoppler gemessene frühdiastolische Myokardgeschwindigkeit (E) in der rechten Wand). Da anhand der Boxplots deutlich wird, dass die Spannweite der Werte hier größer war als bei den anderen Gruppen, ist dieses Herausstechen aber eher auf Fehler in der Datenaquirierung zurückzuführen als auf ein besonderes Verhalten dieses Parameters in der Gruppe der Zweijährigen.

#### *Einfluss von Alter, Gewicht, Größe und Geschlecht auf die echokardiographischen Untersuchungsparameter*

In der multivariablen Analyse zeigten das Gewicht, die Größe und die Herzfrequenz signifikante positive Einflüsse auf die Ausprägung der Farbgewebedopplerparameter. Ähnliche Ergebnisse lieferte auch die multivariable Analyse der Spektralgewebedopplerparameter. Insgesamt überwog der Einfluss der Herzfrequenz in der multivariablen Analyse. Aus diesem Grund gestaltet es sich schwierig eine endgültige Aussage zu treffen. Die Ergebnisse dieser wissenschaftlichen Untersuchung deuten jedoch darauf hin, dass alle mit dem Wachstum in Verbindung stehenden Faktoren (Alter, Gewicht, Größe) einen Einfluss auf die Ausprägung der Gewebedopplerparameter haben. Da diese Einflussfaktoren eng miteinander verknüpft sind, gelingt es nicht, den einzelnen Einfluss jedes Faktors herauszustellen. Eine Studie an gesunden Kindern kam zu dem Schluss, dass eher das Herzwachstum als das Alter einen Einfluss auf die Myokardgeschwindigkeiten hat (*Eidem et al. 2004*). Dieser Einflussfaktor wurde in der hier vorliegenden Untersuchung nicht extra als einzelne Variable mit in die Analyse einbezogen. Allerdings konnte bereits eindeutig belegt werden, dass die Größe des Herzens signifikant durch die Größe und das Gewicht des Pferdes beeinflusst wird (*Rovira et al. 2009, Al-Haidar et al. 2013*). Da Pferde mit zunehmendem Alter wachsen und auch an Gewicht zunehmen, hat das Alter automatisch auch einen Einfluss auf die Herzgröße. Der Aspekt der Herzgröße ist somit über die Einflussfaktoren Alter, Gewicht und Größe in die Analyse einbezogen. Nagel et al. konnten in Ihrer Studie keinen Einfluss von Größe und Gewicht auf die Ausprägung der Parameter feststellen (*Nagel 2012*). Allerdings wurden an dieser Stelle ausschließlich adulte Pferde untersucht. Zu Gewebedopplerparametern gibt es in diesem Zusammenhang bisher keine Untersuchungen bei Pferden. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie weisen deutlich darauf hin, dass vor allem das Gewicht, aber auch die Größe der Pferde, unter den hier untersuchten Einflussfaktoren mit den größten Einfluss auf die Ausprägung der Gewebedoppleruntersuchungen haben. Auch hier ist es kaum möglich die Einflussvariablen Gewicht und Größe vom Alter der Tiere und deren Herzfrequenz zu trennen.

Das Geschlecht hatte dagegen so gut wie keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Gewebedoppleruntersuchungen. Diese Feststellung wurde übereinstimmend mit den Ergebnissen unserer Studie bereits in vorherigen Studien beim Menschen gemacht (*Eidem et al. 2004, Boettler et al. 2005*). In einer Studie an Kindern wurde ebenfalls kein Unterschied der Myokardgeschwindigkeiten zwischen den Geschlechtern festgestellt (*Ayabakan und Özkutlu 2004*). Auch *Kapusta et al. (2000)* kamen zu dem Ergebnis, dass das Geschlecht keinen praktisch

relevanten Einfluss auf die Myokardgeschwindigkeiten beim Menschen hat. In allen im Rahmen unserer Studie durchgeführten Analysen gab es, wenn überhaupt, nur vereinzelte signifikante Einflüsse auf die Ausprägung der Parameter durch das Geschlecht der Probanden. Die Zusammensetzung unseres Patientenguts bedingte die ungleiche Verteilung der Geschlechter in der Gruppe der Fohlen. So hielten sich zwar die männlichen und weiblichen Tiere innerhalb der Altersgruppen 2 bis 4 ungefähr die Waage, aber in der Fohlengruppe waren deutlich mehr Hengst- als Stutfohlen vertreten. Dazu kommt, dass nicht alle Fohlen oder Jungpferde innerhalb der Gruppen genau gleich alt waren, so dass der wahre Einfluss des Geschlechts auf die in dieser Studie gemessenen Parameter in weiteren Studien mit einer balancierten Geschlechterverteilung erörtert werden muss. Mit den Ergebnissen dieser Studie lässt sich zum Einfluss des Geschlechts auf die Ausprägung der Parameter keine verlässliche Aussage treffen, weil es auf Grund der nicht balancierten Geschlechterverteilung zu zufälligen Einflüssen durch das Geschlecht gekommen sein könnte.

#### *Einfluss der Herzfrequenz auf die echokardiographischen Untersuchungsparameter*

Die Veränderungen der Herzfrequenz vom Fohlen, welche zum Teil Herzfrequenzen von über 90 Schlägen pro Minute zeigten, bis hin zum dreijährigen Jungpferd waren in dieser Studie signifikant. Je älter die Pferde, desto niedriger waren die Herzfrequenzen. Diese Ergebnisse stimmen mit Beobachtungen aus der Humanmedizin überein (Mori et al. 2000, Ayabakan und Özkutlu 2004, Boettler et al. 2005, Notomi et al. 2006). In der hier vorliegenden Studie wurde ein großer Teil der Gewebedopplerparameter signifikant von der Herzfrequenz beeinflusst. Zu derselben Schlussfolgerung kamen auch andere Autoren aus der Veterinärmedizin (Iversen 2008) sowie der Humanmedizin (Ayabakan und Özkutlu 2004, Nikitin und Witte 2004, Boettler et al. 2005). Da zwischen der Herzfrequenz und dem Alter der Pferde ein enger Zusammenhang besteht, ist es sehr schwer, den individuellen Effekt des einzelnen Faktors herauszuarbeiten. Die Effekte der beiden Einflussvariablen scheinen ähnlich zu sein und sich zu überlappen (Ayabakan und Özkutlu 2004).

Die Herzfrequenz demonstrierte in der hier vorliegenden Untersuchung einen signifikanten Einfluss auf die Gewebedopplerparameter. Dies konnte auch in Studien aus der Humanmedizin belegt werden (Nikitin und Witte 2004). Nikitin et al. stellten in Ihrer humanmedizinischen Studie fest, dass die Herzfrequenz einen signifikanten Einfluss auf das Farbgewebedopplerprofil hatte. Sie kamen unter anderem zu dem Ergebnis, dass bei vorliegender Tachykardie die E- und A-Wellen eine Verschmelzungstendenz zeigten (Nikitin und Witte 2004). Dies konnte in der hier vorliegenden Erhebung jedoch nicht bestätigt werden, da die Wellen Peaks zu jedem Zeitpunkt deutlich voneinander abgrenzbar waren. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass erhöhte Herzfrequenzen bei den hier untersuchten Pferden immer noch deutlich unterhalb der Herzfrequenz eines Menschen mit einer Tachykardie lagen. Eine andere Studie aus der Humanmedizin stellte fest, dass eher die Herzfrequenz einen größeren Einfluss auf die Myokardgeschwindigkeiten der Kinder ausübt als das Alter der Probanden (Ayabakan und Özkutlu 2004). Kontrovers dazu kommen Mori et al. (2000) zu der Aussage, dass die Herzfre-

quenz bei der Interpretation der systolischen Myokardgeschwindigkeiten vernachlässigbar ist, wenn man das Alter in Betracht zieht. Laut Mori et al. stellt es den wichtigeren Einflussfaktor dar (Mori et al. 2000).

In der hier vorliegenden Studie bestand in der multivariablen Analyse in allen Lokalisationen eine Korrelation der spätdiastolischen Welle (A) mit der Herzfrequenz, sowohl in der Farb- als auch in der Spektralgewebedoppleruntersuchung. Zu diesem Ergebnis kamen auch Harada et al. (Harada et al. 2000). Auch Mori et al. stimmen in diesem Punkt mit den Resultaten unserer Studie überein (Mori et al. 2000). Die systolische Welle (S) wurde in der multivariablen Analyse ebenfalls in allen untersuchten Regionen signifikant von der Herzfrequenz beeinflusst. Im Gegensatz zu der univariablen Analyse zeigte sich in der multivariablen Analyse, dass in der Spektralgewebedoppler- sowie in der Farbgewebedoppleruntersuchung die frühdiaastolischen Myokardgeschwindigkeiten (E) in allen drei gemessenen Lokalisationen nicht signifikant durch die Herzfrequenz beeinflusst wurden. Somit kann die frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (E) auch beim Pferd bzw. beim Fohlen als ein robuster Parameter der linksventrikulären Funktion angesehen werden. Zu diesem Schluss kamen auch Autoren von Studien an Kindern, die ebenfalls die frühdiaastolische Myokardgeschwindigkeit (E) auf Grund ihrer Robustheit gegenüber einer Tachykardie als verlässlichen Parameter für die linksventrikuläre diastolische Funktion bei Kindern ansehen (Mori et al. 2000). Konträr zu der hier vorliegenden Studie und auch zu den genannten Autoren, stellten sich dagegen die Ergebnisse von Kapusta et al. dar. In Ihrer Studie an gesunden Kindern indizierte sich keine praktisch relevante Korrelation der Myokardgeschwindigkeiten mit der Herzfrequenz (Kapusta et al. 2000).

Auf Grund der Tatsache, dass sich in unserer Erhebung sowie auch in vorherigen Studien am Fohlen (Lombard et al. 1984, Rovira und Munoz 2009, Collins et al. 2010, Matur und Gür 2011) die Herzfrequenz der Tiere von der Gruppe der Fohlen bis hin zur Gruppe der dreijährigen Pferde physiologischerweise deutlich erniedrigte und die Herzfrequenz aus diesem Grund eng mit dem Alter, der Größe und dem Gewicht der Pferde verknüpft ist, fällt es schwer zu ermitteln, ob wirklich die Herzfrequenz der ausschlaggebende Faktor für eine Erhöhung oder Erniedrigung der Werte ist. Um dies herauszufinden muss in weiterführenden Forschungsarbeiten untersucht werden, ob und wie sich die Gewebedopplerparameter verhalten, wenn man Fohlen gleichen Alters mit unterschiedlichen Herzfrequenzen vergleicht. Aufgrund der genannten Erkenntnisse, muss der Einsatz des Gewebedopplers bei Fohlen und jungen Pferden kritisch betrachtet werden, da die Herzfrequenzen in diesem Alter deutlich höher sind als die Normalherzfrequenz eines erwachsenen Pferdes. Dazu kommt, dass sich die jungen Pferde häufiger erschrecken und noch mehr Schwierigkeiten haben, bei einer Herzultraschalluntersuchung ruhig zu bleiben, sodass es zu schnellen Herzfrequenzschwankungen innerhalb von Sekunden kommt. Das führt vor allem bei den Fohlen zu Problemen. Auch in dieser Studie musste – trotz einer ruhigen und entspannten Umgebung – wiederholt während der Untersuchung abgewartet werden, bis sich die Pferde wieder beruhigt hatten, was zu einer verlängerten Untersuchungszeit führte.

Vor dem Hintergrund des deutlichen Einflusses der Herzfrequenz gestaltet sich auch die Erstellung von verlässlichen

Normwerten bei Pferden dieser Altersgruppen sehr schwierig. Die frühdiastolische Relaxationsgeschwindigkeit (E) war die einzige Myokardwelle, die in der multivariablen Analyse in allen Lokalisationen weder bei der Farbgewebedoppler- noch bei der Spektralgewebedoppleruntersuchung signifikant von der Herzfrequenz beeinflusst wurde. Die frühdiastolischen Parameter könnten somit auf Grund ihrer in dieser Studie gezeigten Robustheit gegenüber den Herzfrequenzschwankungen einen Ansatzpunkt für eine bessere Vergleichbarkeit in der klinischen Diagnostik bieten. Hierfür sind weitere Studien nötig.

Alles in allem muss aber der große Einfluss der Herzfrequenz sowie deren Schwankung innerhalb einer Untersuchung unbedingt bei der Interpretation der Gewebedopplermessungen berücksichtigt werden. Die Vergleichbarkeit der Werte und die Betrachtung im Hinblick auf Pathologien werden dadurch deutlich erschwert. In weiteren Studien muss untersucht werden, ob und wie eine Sedierung die Parameter bei Fohlen und jungen Pferden beeinflusst, da dies eine gute Möglichkeit darstellt, Fohlen und auch junge, unerfahrene Pferde für die Zeit der Herzultraschalluntersuchung etwas ruhigzustellen und somit die Herzfrequenzschwankungen zu minimieren. Bisher wurde nur der Einfluss von Romifidin auf die Myokardfunktion ausgewachsener Pferde untersucht (Gehlen und Nagel 2014).

## Schlussbetrachtung

Insgesamt bieten die Resultate dieser Studie erstmals Informationen darüber, in welchen Bereichen sich die echokardiographischen Untersuchungsparameter beim Pferd vom Fohlen bis hin zum Jungpferd befinden. Weiterhin wurde offensichtlich, dass vor allem vom Fohlen bis zum einjährigen Pferd die größten Unterschiede auftraten. Abschließend ist festzuhalten, dass das Wachstum insgesamt einen großen Einfluss auf die Gewebedopplerparameter hat und somit auch das Alter ein wichtiger Einflussfaktor ist. Die in dieser Studie beobachtete Erhöhung der systolischen und frühdiastolischen myokardialen Geschwindigkeiten war weitestgehend vergleichbar mit den Ergebnissen aktueller Studien aus der Humanmedizin. Die im Laufe des Wachstums ansteigenden Myokardgeschwindigkeiten könnten auf die intrazellulären und morphologischen Veränderungen innerhalb des Myokards zurückzuführen sein. Bei der Interpretation der gemessenen Parameter sollte stets der große Einfluss der Herzfrequenz auf die Ausprägung der Werte beachtet werden.

## Literatur

Abraham T. P., Dimaano V. L., Liang H. Y. (2007) Role of tissue Doppler and strain echocardiography in current clinical practice. *Circulation* 116, 2597-2609, DOI 10.1161/circulationaha.106.647172  
 Al-Haidar A., Leroux A., Borde L., Deleuze S., Cerri S., Sandersen C., Amory H., Farnir F. (2013) Relationship Between Echocardiographic Measurements and Body Size in Horses. *J. Equine Vet. Sci.* 33, 107-114; DOI10.1016/j.jevs.2012.05.063  
 Ayabakan C., Özkutlu S. (2004) Left ventricular myocardial velocities in healthy children: quantitative assessment by tissue Doppler echocardiography and relation to the characteristics of filling of the left ventricle. *Cardiology in the Young* 14, 156-163. doi:10.1017/S1047951104002070

Basu S., Frank L. H., Fenton K. E., Sable C. A., Levy R. J., Berger J. T. (2012) Two-dimensional speckle tracking imaging detects impaired myocardial performance in children with septic shock, not recognized by conventional echocardiography. *Pediatric Critical Care Medicine* 13, 259-264; DOI 10.1097/PCC.0b013e3182288445  
 Boettler P., Hartmann M., Watzl K., Maroula E., Schulte-Moenting J., Knirsch W., Dittrich S., Kececioglu D. (2005) Heart Rate Effects on Strain and Strain Rate in Healthy Children. *Journal of the American Society of Echocardiography* 18, 1121-1130. DOI10.1016/j.echo.2005.08.014  
 Chetboul V. (2010) Tissue Doppler imaging in the diagnosis of cardiac diseases. Geneva, World Small Animal Veterinary Association  
 Chetboul V., Athanassiadis N., Carlos C., Nicolle A.P., Tissier R., Pouchelon J. L., Concordet D., Lefebvre H. P. (2004) Quantification, repeatability, and reproducibility of feline radial and longitudinal left ventricular velocities by tissue Doppler imaging. *Am. J. Vet. Res.* 65, 566-572  
 Chetboul V., Blot S., Sampedrano C. C., Thibaud J.L., Granger N., Tissier R., Bruneval P., Gaschen F., Gouni V., Nicolle A. P., Pouchelon J. L. (2006) Tissue Doppler imaging for detection of radial and longitudinal myocardial dysfunction in a family of cats affected by dystrophin-deficient hypertrophic muscular dystrophy. *Journal of Veterinary Internal Medicine* 20, 640-647  
 Chetboul V., Escriou C., Tessier D., Richard V., Pouchelon J. L., Thibault H., Lallemand F., Thuillez C., Blot S., Derumeaux G. (2004) Tissue Doppler imaging detects early asymptomatic myocardial abnormalities in a dog model of Duchenne's cardiomyopathy. *European heart journal* 25, 1934-1939; DOI 10.1016/j.ehj.2004.09.007  
 Chetboul V., Sampedrano C. C., Gouni V., Nicolle A. P., Pouchelon J. L. (2006) Two-dimensional color tissue Doppler imaging detects myocardial dysfunction before occurrence of hypertrophy in a young Maine Coon cat. *Vet. Radiol. Ultrasound* 47, 295-300; DOI 10.1111/j.1740-8261.2006.00143.x  
 Collins N. M., Palmer L., Marr C. M. (2010) Two-dimensional and M-mode echocardiographic findings in healthy Thoroughbred foals. *Aust. Vet. J.* 88, 428-433; DOI10.1111/j.1751-0813.2010.00641.x  
 Declodt A., Verheyen T., Sys S., De Clercq D., van Loon G. (2013) Evaluation of tissue Doppler imaging for regional quantification of radial left ventricular wall motion in healthy horses. *Am. J. Vet. Res.* 74, 53-61; DOI 10.2460/ajvr.74.1.53  
 Derumeaux G., Loufoua J., Pontier G., Cribier A., Ovize M. (2001) Tissue Doppler imaging differentiates transmural from nontransmural acute myocardial infarction after reperfusion therapy. *Circulation* 103, 589-596  
 Eidem B. W., McMahon C. J., Cohen R. R., Wu J., Finkelshteyn I., Kovalchin J.P., Ayres N. A., Bezold L. I., O'Brian Smith E., Pignatelli R. H. (2004) Impact of cardiac growth on Doppler tissue imaging velocities: a study in healthy children. *J. Am.n Soc. Echocardiogr.* 17, 212-221. 10.1016/j.echo.2003.12.005  
 Gehlen H., Marnette S., Rohn K., Stadler P. (2005) Echocardiographic analysis of segmental left ventricular wall motion at rest and after exercise in horses with and without heart disease. *J. Equine Vet. Sc.* 25, 468-479; DOI 10.1016/j.jevs.2005.09.013  
 Gehlen H., Nagel D. (2014) Myocardial function of horses Under Sedation with Romifidine Using Two-Dimensional Speckle Tracking. *J. Equine Vet. Sci.* 34, 656-661, DOI 10.1016/j.jevs.2013.12.006  
 Gehlen H., Lagershausen H. L. (2017) Einfluss des Alters auf echokardiographische B- und M-Mode-Variablen bei juvenilen Warmblutpferden. *Pferdeheilkunde* 33, 231-241; DOI 10.21836/PEM 20170303  
 Harada K., Orino T., Yasuoka K., Tamura M., Takada G. (2000). Tissue doppler imaging of left and right ventricles in normal children. *Tohoku J. Experim. Med.* 191, 21-29  
 Hudlicka O., Brown M. D. (1996) Postnatal Growth of the Heart and Its Blood Vessels. *J. Vasc. Res.* 33, 266-287  
 Iversen C. C. (2008). Gewebedopplerechokardiographie bei Warmblutpferden in Ruhe und nach Belastung. Diss. Med. Vet. Hannover  
 Javornik A. (2007) Tissue velocity, strain and strain rate bei Hunden mit Mitralklappenendokardiose. Diss. Med. Vet. München

- Kapusta L., Thijssen J. M., Cuypers M. H., Peer P. G., Daniels O. (2000) Assessment of myocardial velocities in healthy children using tissue Doppler imaging. *Ultras. Med Biol* 26, 229-237
- Killich M. (2006) Tissue Doppler Imaging: Erstellung von Referenzwerten für Tissue Velocity Imaging, Strain und Strain Rate beim Hund. Diss. Med. Vet. München
- Klaus C. S. (2009) Gewebedoppler-Echokardiographie (GDE) beim Pferd: Schnittebenen der myokardialen Wandbewegungsanalyse. Diss. Med. Vet. Berlin
- Knebel F., Schimke I., Schroeckh S., Peters H., Eddicks S., Schattke S., Brechtel L., Lock J., Wernecke K. D., Dreger H., Grubitz S., Schmidt J., Baumann G., Borges A. C. (2009) Myocardial function in older male amateur marathon runners: assessment by tissue Doppler echocardiography, speckle tracking, and cardiac biomarkers. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 22, 803-809; DOI 10.1016/j.echo.2009.04.009
- Koffas H., Dukes-McEwan J., Corcoran B. M., Moran C. M., French A., Sboros V., Simpson K., McDicken W. N. (2006) Pulsed tissue Doppler imaging in normal cats and cats with hypertrophic cardiomyopathy. *J. Vet. Int. Med.* 20, 65-77; DOI [http://dx.doi.org/10.1892/0891-6640\(2006\)20\[65:PTDIIN\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1892/0891-6640(2006)20[65:PTDIIN]2.0.CO;2)
- Lind B., Nowak J., Dorph J., van der Linden J., Brodin L. A. (2002) Analysis of Temporal Requirements for Myocardial Tissue Velocity Imaging. *Europ. Heart J. Cardiovas. Imag.* 3, 214-219; DOI 10.1053/euje.3.3.214
- Lombard C. W., Evans M., Martin L., Tehrani J. O. Y. (1984) Blood pressure, electrocardiogram and echocardiogram measurements in the growing pony foal. *Equine Vet. J.* 16, 342-347; DOI 10.1111/j.2042-3306.1984.tb01939.x
- Lorch S. M., Ludomirsky A., Singh G. K. (2008) Maturation and growth-related changes in left ventricular longitudinal strain and strain rate measured by two-dimensional speckle tracking echocardiography in healthy pediatric population. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 21, 1207-1215; DOI 10.1016/j.echo.2008.08.011
- MacDonald K. A., Kittleson M. D., Kass P. H., Meurs K. M. (2007) Tissue doppler imaging in Maine Coon cats with a mutation of myosin binding protein C with or without hypertrophy. *J. Vet. Int. Med.* 21, 232-237; DOI 10.1892/0891-6640(2007)21.0.CO;2
- Marcus K. A., Janousek J., Barends M. E., Weijers G., de Korte C. L., Kapusta L. (2012) Synchronicity of systolic deformation in healthy pediatric and young adult subjects: a two-dimensional strain echocardiography study. *Am. J. Physiol. Heart Circulat. Physiol.* 302, H196-205; DOI 10.1152/ajpheart.00740.2011
- Marijjanowski M. M. H., van der Loos C. M., Mohrschlatt M. F., Bekker A. E. (1994) The neonatal heart has a relatively high content of total collagen and type I collagen, a condition that may explain the less compliant state. *J. Am. Coll. Cardiol.* 23, 1204-1208; DOI 10.1016/0735-1097(94)90612-2
- Matur E., Gür N. E. (2011) M-Mod Echocardiographic Investigation of Cardiac Dimensions and Function Indices in Growing Thoroughbred Foals Reared in Turkey. *Kafkas Univ. Vet. Fak. Derg.* 17, 409-416
- McMahon C. J., Nagueh S. F., Pignatelli R. H., Denfield S. W., Dreyer W. J., Price J. F., Clunie S., Bezold L. I., Hays A.L., Towbin J. A., Eidem B. W. (2004). Characterization of Left Ventricular Diastolic Function by Tissue Doppler Imaging and Clinical Status in Children With Hypertrophic Cardiomyopathy. *Circulation* 109, 1756-1762. DOI 10.1161/01.cir.0000124723.16433.31
- Michutta J.-I. (2011) Einflüsse von Geräteeinstellungen auf myokardiale Geschwindigkeitsprofile in der Gewebedopplerechokardiographie beim Pferd. Diss. Med. Vet. Berlin
- Mori K., Hayabuchi Y., Kuroda Y., Nii M., Manabe T. (2000) Left ventricular wall motion velocities in healthy children measured by pulsed wave Doppler tissue echocardiography: normal values and relation to age and heart rate. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 13, 1002-1011
- Nagel D. (2012) Die Auswirkungen des  $\alpha$ -2-Adrenozeptor-Agonisten Romifidin auf die Myokardfunktion des Pferdes, gemessen mit der Gewebedopplerechokardiographie und dem 2D Speckle Tracking. Diss. Med. Vet. München
- Negrine R. J., Chikermane A., Wright J. G., Ewer A. K. (2012) Assessment of myocardial function in neonates using tissue Doppler imaging. *Archives of disease in childhood. Fet. Neonat. Ed.* 97, 304-306; DOI 10.1136/adc.2009.175109
- Neukirch S. (2012) Gewebedopplerechokardiographische Untersuchung der Wirkung des  $\alpha$ -Sympathomimetikums Clenbuterol auf den Herzmuskel gesunder und an RAO erkrankter Pferde. Diss. Med. Vet. Berlin
- Nikitin N.P., Witte K. K. (2004) Application of tissue Doppler imaging in cardiology. *Cardiology* 101, 170-184; DOI 10.1159/000076694
- Notomi Y., Srinath G., Shiota T., Martin-Miklovic M. G., Beachler L., Howell K., Oryszak S. J., Deserranno D. G., Freed A. D., Greenberg N. L., Younoszai A., Thomas J. D. (2006) Maturation and Adaptive Modulation of Left Ventricular Torsional Biomechanics: Doppler Tissue Imaging Observation From Infancy to Adulthood. *Circulation* 113, 2534-2541; DOI 10.1161/circulationaha.105.537639
- Pena J. L., da Silva M. G., Faria S. C., Salemi V. M., Mady C., Baltabaeva A., Sutherland G. R. (2009) Quantification of regional left and right ventricular deformation indices in healthy neonates by using strain rate and strain imaging. *J. Am. Soc. Echocardiogr.* 22, 369-375; DOI 10.1016/j.echo.2008.12.007
- Pham P. P., Balaji S., Shen I., Ungerleider R., Li X., Sahn D. J. (2005) Impact of Conventional Versus Biventricular Pacing on Hemodynamics and Tissue Doppler Imaging Indexes of Resynchronization Postoperatively in Children With Congenital Heart Disease. *J. Am. Coll. Cardiol.* 46, 2284-2289; DOI 10.1016/j.jacc.2005.08.036
- Romero T., Covell J., Friedman W. (1972) A comparison of pressure-volume relations of the fetal, newborn, and adult heart. *Am. J. Physiol.*, Vol. 222, 1285-1290
- Rovira S., Munoz A. (2009) Two-dimensional- and M-mode echocardiographic measurements and indices of cardiac function in Spanish colts and fillies of different age. *J. Vet. Med. Sci.* 71, 957-964
- Rovira S., Muñoz A., Rodilla V. (2009) Allometric scaling of echocardiographic measurements in healthy Spanish foals with different body weight. *Res. Vet. Sci.* 86, 325-331, DOI 10.1016/j.rvsc.2008.08.001
- Rumeau P., Acar P., Paranon S., Bassil R., Cournot M., Dulac Y., Guitton J., Latcu G. (2007) [Evaluation of left ventricular diastolic function in children by doppler tissue imaging]. *Arch. Malad. Coeur Vaiss.* 100, 405-410
- Rychik J., Tian Z.-Y. (1996) Quantitative assessment of myocardial tissue velocities in normal children with Doppler tissue imaging. *Am. J. Cardiol.* 77, 1254-1257; DOI 10.1016/S0002-9149(96)00178-6
- Schefer K. D., Bitschnau C., Weishaupt M. A., Schwarzwald C. C. (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. Int. Med.* 24, 918-931; DOI 10.1111/j.1939-1676.2010.0542.x
- Schwarzwald C. C., Schober K. E., Bonagura J. D. (2009a) Methods and reliability of tissue Doppler imaging for assessment of left ventricular radial wall motion in horses. *J. Vet. Int. Med.* 23, 643-652; DOI 10.1111/j.1939-1676.2009.0287.x
- Sepulveda M. F., Perkins J. D., Bowen I. M., Marr C. M. (2005) Demonstration of regional differences in equine ventricular myocardial velocity in normal 2-year-old Thoroughbreds with Doppler tissue imaging. *Equine Vet. J.* 37, 222-226
- Slack J., Durando M. M., Belcher C. N., Collins N., Palmer L., Ousey J., Birks E. K., Marr C. M. (2012) Intraoperator, intraobserver and interoperator variability of echocardiographic measurements in healthy foals. *Equine Vet. J. Supplement* 41, 69-75
- Spieker E. P. (2006) Gewebe-Doppler-Echokardiografie beim Pferd: Eine Pilotstudie. Diss. Med. Vet. Berlin
- Swaminathan S., Ferrer P.L., Wolff G. S., Gomez-Marin O., Rusconi P. G. (2003) Usefulness of tissue Doppler echocardiography for evaluating ventricular function in children without heart disease. *Am. J. Cardiol.* 91, 570-574
- Wagner T. (2005) Tissue-Doppler-Imaging (TDI): Erstellung von Referenzwerten für Tissue Velocity, Strain und Strain Rate bei der Katze. Diss. Med. Vet. München
- Zhang Q., Yip G. W., Yu C. M. (2008) Approaching regional left atrial function by tissue Doppler velocity and strain imaging. *Europace: Europ. Pac. Arrhythm. Card. Electrophysiol.* 10 Suppl 3, 62-69; DOI 10.1093/europace/eun237