

**Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Tierärztlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität
München**

**Studie zur kinetischen Ganganalyse
und Entwicklung der Körpergewichtsverteilung
des heranwachsenden Hundes**

von Sandra Ulrike Mall

aus Böblingen

München 2022

**Aus dem Zentrum für Klinische Tiermedizin der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München**

Lehrstuhl für Chirurgie der Kleintiere

**Arbeit angefertigt unter der Leitung von:
Univ.-Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg**

**Mitbetreuung durch:
Dr. Stephanie Steigmeier-Raith**

**Gedruckt mit Genehmigung der Tierärztlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München**

Dekan: Univ.-Prof. Dr. Reinhard K. Straubinger, Ph.D.

Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. Andrea Meyer-Lindenberg

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Johann Maierl

Tag der Promotion: 30. Juli 2022

Meiner kleinen Louisa
und unseren vierbeinigen Familienmitgliedern

INHALTSVERZEICHNIS

I.	EINLEITUNG	7
II.	LITERATURÜBERSICHT	8
1.	Die Instrumentierte Ganganalyse in der Tiermedizin	8
1.1.	Statik des Hundes	8
1.2.	Der Hund in Bewegung.....	9
1.3.	Kinetik.....	9
2.	Relevante Forschung der instrumentierten Ganganalyse	11
2.1.	Der adulte Hund	11
2.1.1.	Variabilität von Parametern der kinetischen Ganganalyse	11
2.1.2.	Einfluss von Körpergewicht und Körpergröße auf Parameter der kinetischen Ganganalyse	12
2.1.3.	Einfluss der Geschwindigkeit auf Parameter der kinetischen Ganganalyse.....	14
2.1.4.	Einfluss der Dominanz der Vordergliedmaße auf die Parameter der kinetischen Ganganalyse	15
2.2.	Der Hund im Wachstum.....	18
III.	PUBLIKATION	25
IV.	DISKUSSION	35
V.	ZUSAMMENFASSUNG	41
VI.	SUMMARY	43
VII.	LITERATURVERZEICHNIS	45
VIII.	DANKSAGUNG	51

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AUCi	Area Under The Curve With Respect To Increase
BRK	Bodenreaktionskraft/-kräfte
BWD	Body Weight Distribution
FBI	Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
PL	Pelvic Limb
PVF	Peak Vertical Force
PW	Postnatale Woche
ST	Stance Time
TOO	Time Of Occurence
TL	Thoracic Limb
VI	Vertikaler Impuls

I. EINLEITUNG

Die kinetische Ganganalyse ist eine etablierte Methode um das Gangbild des gesunden, ausgewachsenen Hundes zu bewerten. Die bestehende Literatur umfasst Studien zu Hunden verschiedener Rassen, aufgenommen in unterschiedlichen Gangarten wie dem Schritt und dem Trab (Budsberg et al. 1987, Besancon et al. 2004, Bockstahler et al. 2007, Gillette und Angle 2008, Lequang 2009).

Zusätzlich zur Beurteilung des gesunden Hundes wird die kinetische Ganganalyse verwendet, um eine für das menschliche Auge geringfügige Lahmheit und deren zugrundeliegende orthopädische Erkrankungen frühzeitig erkennen und bewerten zu können (Decamp 1997, Brebner et al. 2006, Voss et al. 2007). Sie ist eine etablierte Methode im Rahmen von postoperativen Verlaufskontrollen nach chirurgischen Eingriffen (Voss et al. 2008, Druen et al. 2012).

Die Körpergewichtsverteilung auf alle vier Gliedmaßen ist abhängig von der Gangart und der Rasse und damit dem Exterieur des Hundes (Budsberg et al. 1987, Voss et al. 2011). Sie dient der Hilfestellung bei der Detektion von orthopädischen Erkrankungen und wurde für den gesunden, erwachsenen Hund ausführlich beschrieben (Voss et al. 2007, Kim et al. 2011).

Zurzeit existieren nur wenige Studien zum kinetischen Gangbild und der Entwicklung der Körpergewichtsverteilung des Hundes im Wachstum (Barthélémy et al. 2011, Bertram et al. 2000, Biknevicus et al. 1997, Helmsmüller et al. 2014). Daraus leitet sich die zentrale Zielstellung der vorliegenden Dissertation ab: Die Erhebung und Analyse kinetischer Parameter sowie die Untersuchung der Entwicklung der Körpergewichtsverteilung für den Hund im Wachstum. Untersucht wurden zwei Hunderassen, jeweils in der Gangart Schritt und Trab, zu sechs Messzeitpunkten innerhalb der ersten 18 Lebensmonate. Folgende Fragestellungen wurden in der vorliegenden Studie untersucht:

1. Sind kinetische Parameter sowie die Körpergewichtsverteilung bei Hunden im Wachstum mit denen ausgewachsener Hunde vergleichbar?
2. Wie lassen sich etwaige Unterschiede charakterisieren und ab welchem Alter kann ein juveniler Hund ganganalytisch mit einem adulten Hund verglichen werden?

II. LITERATURÜBERSICHT

1. Die Instrumentierte Ganganalyse in der Tiermedizin

Mit dem Fortschreiten der technischen Möglichkeiten im letzten Drittel des 21. Jahrhunderts wurde die rein adspektorische Beurteilung des Gangbildes um die Instrumentierte Ganganalyse erweitert. Die Wissenschaft der Biomechanik machte es möglich, durch elektronische, optische und mechanische Verfahren messbare Faktoren der Bewegung von Tieren zu erheben und zu vergleichen (Budsberg et al. 1987). Diese messbaren Faktoren lassen sich in verschiedene Bereiche innerhalb der Biomechanik unterteilen: in der Ganganalyse ist die Nomenklatur der Statik, Kinetik und Kinematik etabliert (Off und Matis 1997, Brebner et al. 2006).

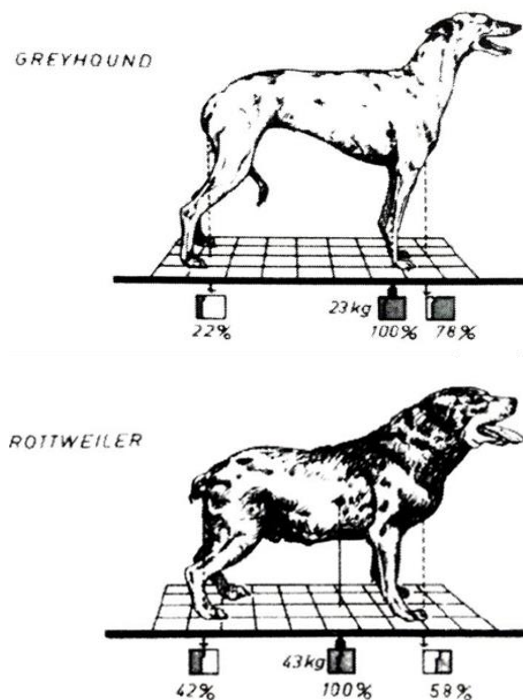


Abbildung 1: Körpergewichtsverteilung auf Vorder- und Hintergliedmaßen sowie Lage des Körperschwerpunktes im Stand bei Greyhound und Rottweiler (nach Larche 1962)

1.1. Statik des Hundes

In der Statik befinden sich die auf einen Körper wirkenden Kräfte im Gleichgewicht, der Körper ruht ohne Bewegung. Die Körpergewichtsverteilung (Body Weight Distribution, BWD) zwischen Vorder- und Hintergliedmaßen, und

der Körperschwerpunkt des gesunden Hundes im Stand, sind abhängig von der Rasse und damit dem Exterieur des Hundes. Rassen mit einem tiefen Brustkorb wie etwa der Greyhound, Barsoi, Whippet und Boxer tragen 67 bis 78% des Körpergewichtes mit den Vordergliedmaßen (Larche 1962). Hunde mit einem kompakten, stämmigen Körperbau wie etwa der Rottweiler, Schäferhund, Pudel und Deutsch Drahthaar tragen 58 bis 60% des Körpergewichtes mit den Vordergliedmaßen (vgl. Abb. 1). Die Verteilung des Körpergewichtes erfolgt zu gleichen Teilen zwischen der rechten und der linken Körperhälfte (Budsberg et al. 1987).

1.2. Der Hund in Bewegung

Durch das Zusammenspiel des Kraftaufwands der Muskeln und der in den Sehnen elastisch gespeicherten Energie kommt es zu einer Beschleunigung des Körpers und damit zu einer Bewegung. Die Streckung der Hintergliedmaßen verursacht eine Verlagerung des Körperschwerpunktes nach kranial und initiiert damit den Beginn der Vorwärtsbewegung (Roy 1971). Die Vorwärtsbewegung wird aufrechterhalten durch eine für jede Gangart charakteristische Abfolge von Schritten. Ein Schritt besteht aus einer Stand- und einer Schwungphase. In der 4-taktigen Gangart Schritt befinden sich drei Gliedmaßen gleichzeitig in der Standphase während eine Gliedmaße im Schwung nach vorne geführt wird. In der 2-taktigen Gangart Trab befinden sich die jeweils diagonalen Gliedmaßen gleichzeitig in der Stand- und Schwungphase (Seiferle & Freewein 2004). Die Dauer von Stand- und Schwungphase ist abhängig von der gelaufenen Geschwindigkeit. Im Vergleich zur Gangart Schritt verkürzen sich im Trab sowohl die Stand- als auch Schwungphase, wobei die Standphase im Verhältnis zur Schwungphase stärker verkürzt wird (Colborne et al. 2006). Die Standphasendauer ist im Schritt auf den Vordergliedmaßen etwa 1,5fach so lang wie auf den Hintergliedmaßen. Im Trab nähern sich die Standphasendauer der Vorder- und Hintergliedmaßen an (Leach et al. 1977).

1.3. Kinetik

Die kinetische Ganganalyse umfasst die Messung der Kräfte, die während der Bewegung eines Tieres entstehen. Piezoelektrische Kraftmessplatten erlauben die Unterscheidung gemessener Bodenreaktionskräfte (BRK) bezüglich ihrer Richtung: medio-lateral, kranio-kaudal und vertikal (Abb. 2).

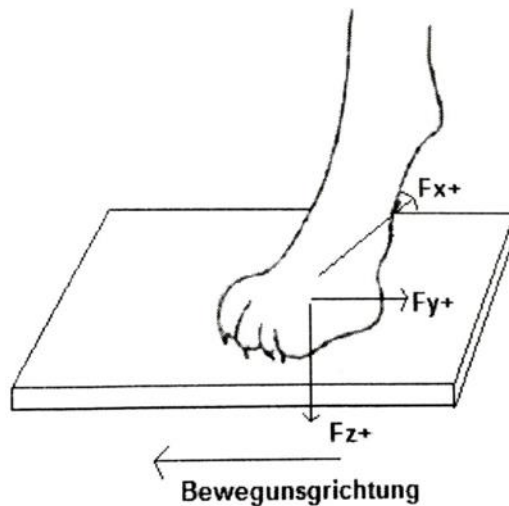


Abbildung 2: Bodenreaktionskräfte auf der Piezoelektrischen Kraftmessplatte. F_x = medio-lateral, F_y = kranio-kaudal, F_z = vertikal (nach Budsberg et al. 1987)

Bei der Verwendung von vier Kraftmessplatten können die BRK für jede Gliedmaße separat bestimmt werden. Folgende BRK und davon abgeleitete zeitliche Variablen haben sich in der Ganganalyse aufgrund ihrer Konstanz und Reproduzierbarkeit bewährt (McLaughlin und Roush 1994, Rumph et al. 1994, Voss et al. 2011). Der maximale Wert der vertikalen BRK wird vertikale Spitzenkraft genannt (Peak Vertical Force, PVF) und in Prozent des Körpergewichtes angegeben. Der vertikale Impuls (VI) ist das Integral der Kraft über die Dauer der Standphase und wird in Prozent des Körpergewichtes pro Sekunde angegeben. Die Dauer der Standphase eines Schrittes (Stance Time, ST) wird in Prozent des Gesamtschrittes angegeben. Der Zeitpunkt innerhalb der Standphase eines Schrittes, an dem PVF erreicht wird (Time Of Occurrence, TOO), wird ebenfalls in Prozent des Gesamtschrittes angegeben. Anhand von PVF-Werten kann die BWD in Prozent des Körpergewichtes für jede einzelne Gliedmaße errechnet werden:

$$\text{BWD}\% = 100 \times (\text{PVF einer Gliedmaße} / \text{Summe des PVF aller Gliedmaßen})$$

2. Relevante Forschung der instrumentierten Ganganalyse

2.1. Der adulte Hund

Im Folgenden wird ein Überblick zur Studienlage über die Einflussfaktoren auf kinetische Parameter der instrumentierten Ganganalyse beim adulten, gesunden Hund gegeben.

2.1.1. Variabilität von Parametern der kinetischen Ganganalyse

Verschiedene Faktoren wie Körpergewicht, Körperbau und Geschwindigkeit beeinflussen kinetische Parameter der Ganganalyse (McLaughlin und Roush 1994, Roush und McLaughlin 1994, Voss et al. 2010).

Um die Varianz der Parameter zu senken, werden BRK standardmäßig auf das Körpergewicht normalisiert und die Geschwindigkeit sowie die horizontale Beschleunigung kleinschrittig eingestellt und kontrolliert (Budsberg et al. 1987, Riggs et al. 1993, Voss et al. 2007). Die Gewöhnung an das Laufen auf dem instrumentierten Laufband sowie intraindividuelle Faktoren haben ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf die Variabilität der Ganganalyse Parameter (Rumph et al. 1994, Rumph et al. 1999, Pietsch et al. 2021).

Voss et al. (2010) untersuchten den Einfluss von Körpergewicht, Körpergröße und Geschwindigkeit auf die Parameter PVF, VI und ST von Hunden verschiedener Rassen in der Gangart Trab, gemessen auf stationären Kraftmessplatten. Basierend auf der Theorie der Dynamic Similarity wurden die zeitabhängigen Variablen VI und ST zusätzlich zum Körpergewicht auf die Körpergröße normalisiert. Die Theorie der Dynamic Similarity beschreibt, dass sich Tiere in dynamisch vergleichbarer Weise bewegen, wenn sie sich in einer Geschwindigkeit bewegen, die proportional zu den Quadratwurzeln ihrer Beinlängen sind (Alexander 1984, Krotscheck et al. 2014). In der praktischen Anwendung der Theorie der Dynamic Similarity können Werte für Hunde unterschiedlicher Größe verglichen werden. Im Kontext der Theorie der Dynamic Similarity und deren praktischer Anwendung wird zudem die Geschwindigkeit auf die Körpergröße normalisiert. Diese relative, dimensionslose Zahl ist auch als Froude Number oder relative Geschwindigkeit bekannt. Sie erlaubt den Vergleich kinetischer Parameter von Hunden, die bei gleicher relativer Geschwindigkeit gelaufen sind. Die Autoren beschrieben eine starke positive Korrelation der Parameter PVF, VI und ST mit der Körpergröße und

dem Körpergewicht. Die Normalisierung der Parameter auf das Körpergewicht schwächte die Korrelation mit der Körpergröße ab, allerdings verlief die Korrelation für die VI-Werte und die Körpergröße positiv und wurde für die PVF-Werte und die Körpergröße negativ. Die Normalisierung der VI- und ST-Werte auf die Körpergröße eliminierte die meisten Einflüsse der Körpergröße auf die Parameter. Eine geringe Abhängigkeit der vollständig normalisierten Parameter von der Körpergröße blieb bestehen, die Autoren führten diesen Umstand auf die Unterschiede in der relativen Geschwindigkeit zwischen Hunden unterschiedlicher Körpergröße zurück.

2.1.2. Einfluss von Körpergewicht und Körpergröße auf Parameter der kinetischen Ganganalyse

Budsberg et al. (1987) untersuchten die Zusammenhänge zwischen Körpergröße und Körpergewicht und deren Einfluss auf die BRK verschiedener Hunderassen in der Gangart Schritt, gemessen auf stationären Kraftmessplatten. Mit steigender Körpergröße und Körpergewicht sanken PVF-Werte während VI- und ST-Werte anstiegen. Somit hatten größere, schwerere Hunde im Vergleich geringere PVF- und höhere VI- und ST-Werte als kleinere, leichtere Hunde.

Mölsä et al. (2010) verglichen die BRK zwischen Labrador Retrievern und Rottweilern in der Gangart Trab, gemessen auf stationären Kraftmessplatten. Die Hunde beider Rassen liefen bei gleicher absoluter Geschwindigkeit. Aufgrund der unterschiedlichen Körpergröße unterschied sich allerdings die relative gelaufene Geschwindigkeit. Die relative Geschwindigkeit ist abhängig von der Gliedmaßenlänge und beschreibt die Geschwindigkeit der Gliedmaßen. Weil größere Hunde weniger Schritte benötigen, um die gleiche absolute Geschwindigkeit zu erreichen, ist die relative Geschwindigkeit der Gliedmaßen von kleinen Hunden höher. Die größeren und schwereren Rottweiler zeigten signifikant niedrigere PVF- und signifikant höhere VI-Werte im Vergleich mit den Labrador Retrievern. Die Rottweiler zeigten zudem höhere ST- und TOO-Werte als Labrador Retriever. Analog zu der Studie von Budsberg et al. (1987) wurden die signifikanten Rasseunterschiede nach Normalisierung der Werte auf das Körpergewicht und insbesondere nach Normalisierung auf die Körpergröße nicht mehr gezeigt. Somit konnte erneut ein signifikanter Einfluss von Körpergröße und Körpergewicht auf die BRK aufgezeigt werden. Die Autoren kamen darum zu dem Schluss, dass unterschiedliche Körperformen und Körpergrößen die

Vergleichbarkeit von BRK von Hunden unterschiedlicher Rassen erschweren.

Kim et al. (2011) verglichen PVF, VI, ST, Schwunghasendauer, Kadenz sowie BWD jeweils einer Gruppe kleiner Hunde (<10kg) mit denen einer Gruppe großer Hunde (>25kg) in der Gangart Schritt, gemessen auf stationären Kraftmessplatten. Die auf das Körpergewicht normalisierten PVF- und BWD-Werte waren für beide Gruppen vergleichbar. Die kleinen Hunde hatten signifikant niedrigere VI-, ST- und Schwunghasendauer-Werte im Vergleich zu den großen Hunden. Die Kadenz der kleineren Hunde war im Vergleich zu den großen Hunden signifikant höher. Mit steigendem Körpergewicht stiegen bei den kleinen Hunden die ST- und Schwunghasendauer-Werte an, kleine Hunde zeigten somit eine signifikant positive Korrelation zwischen Körpergewicht und ST sowie Schwunghasendauer. Kim et al. (2011) zeigten außerdem eine negative Korrelation zwischen PVF und Körpergewicht für große Hunde.

Bertram et al. (2000) verglichen die BRK von Hunden der Rassen Labrador Retriever und Greyhound in der Gangart Trab, gemessen auf einem instrumentierten Laufband mit vier darunterliegenden, separaten Kraftmessplatten. Die bei gleicher relativer Geschwindigkeit gemessenen Werte wurden sowohl vor als auch nach Normalisierung auf die Körpergröße miteinander verglichen. Bei gleicher absoluter Geschwindigkeit machten die kleineren Labrador Retriever kürzere, schnellere Schritte während die größeren Greyhounds, größere und langsamere Schritte benötigten. Nach Normalisierung auf die Körpergröße wurden nur geringfügige, nicht signifikante Unterschiede zwischen den Rassen gezeigt.

Voss et al. (2011) untersuchten den Einfluss von Hunderasse und Körperform auf die BRK. Hunde der Rassen Barsoi, Berner Sennenhund, Deutsche Dogge, Labrador Retriever, Landseer, Rhodesian Ridgeback und Rottweiler wurden im Trab über stationären Kraftmessplatten geführt. Die Werte für PVF, VI und ST wurden auf Basis der Dynamic Similarity Theorie sowohl auf die Körpergröße als auch auf das Körpergewicht normalisiert. Es wurden signifikante Unterschiede zwischen den Rassen gezeigt. Insbesondere der Barsoi hatte deutlich niedrigerer VI-Werte für die Vordergliedmaßen und deutlich höhere PVF-Werte für die Hintergliedmaßen. Die Autoren führten diesen Umstand auf den beim Barsoi im Vergleich zu den weiteren Rassen weiter kaudal liegenden Körperschwerpunkt zurück. Sie kamen zu dem Schluss, dass die BRK zwischen Hunderassen mit unterschiedlicher Körperform auch nach vollständiger Normalisierung nicht

miteinander vergleichbar sind.

Lequang et al. (2009) verglichen PVF, ST, und VI der Rassen Labrador Retriever und Beagle in der Gangart Schritt, gemessen auf mobilen Druckmessplatten und ermittelten das Verhältnis der Werte zwischen Vorder- und Hintergliedmaßen. Bei gleicher Geschwindigkeit zeigten die Beagle eine höhere Kadenz. Die Beagle zeigten zudem signifikant niedrigere PVF- und höhere ST-Werte auf den Vordergliedmaßen im Vergleich zu den Labrador Retrievern. Diese Unterschiede im Verhältnis zwischen den Vorder- und Hintergliedmaßen wurden von der Körpergröße und Rasse beeinflusst. Die Autoren empfahlen deshalb, das im Rahmen von zukünftigen Studien weitere rassespezifische Referenzwerte erhoben werden sollten. Die Autoren stellten außerdem fest, dass die Labrador Retriever ruhiger und gleichmäßiger liefen und das Handling während der Ganganalyse somit leichter war als bei den Beagle. Auch die Auswertung der Daten der Labrador Retriever erschien schneller und leichter. Außerdem fanden sie eine höhere Varianz in den Parametern der kleineren Hunde.

2.1.3. Einfluss der Geschwindigkeit auf Parameter der kinetischen Ganganalyse

Riggs et al. (1993) untersuchten den Einfluss der Geschwindigkeit auf die BRK von Greyhounds in verschiedenen Gangarten, gemessen auf stationären Kraftmessplatten. Mit steigender Geschwindigkeit stieg PVF signifikant an, während VI mit steigender Geschwindigkeit signifikant sank.

Roush und McLaughlin (1994) untersuchten den Einfluss von ST und Geschwindigkeit auf die BRK von Greyhounds in der Gangart Schritt, gemessen auf stationären Kraftmessplatten. Die ST zeigten eine stärkere Korrelation mit Änderungen von PVF und VI im Vergleich zur Geschwindigkeit. Mit sinkenden ST-Werten stiegen die PVF-Werte signifikant an. Mit steigender Geschwindigkeit stiegen die PVF-Werte an.

McLaughlin und Roush (1994) untersuchten den Einfluss von ST und Geschwindigkeit auf die BRK von Greyhounds in der Gangart Trab, gemessen auf stationären Kraftmessplatten. Im Vergleich der Gangarten zeigten sich in den Studien ähnliche Ergebnisse: Für die Geschwindigkeit konnte eine negative Korrelation mit der ST und eine positive Korrelation mit der PVF gezeigt werden. Für die ST- und die PVF-Werte konnte ebenfalls eine negative Korrelation gezeigt

werden. Für die VI konnte eine negative Korrelation mit der Geschwindigkeit und eine positive Korrelation mit der ST gezeigt werden.

Voss et al. (2007) untersuchten die Zuverlässigkeit von kinetischen Ganganalysen im Schritt und im Trab bei der Erkennung einer Lahmheit. Die BRK gesunder Hunde und von Hunden mit einer geringgradigen Lahmheit der Hintergliedmaßen wurden im Schritt und im Trab auf stationären Kraftmessplatten gemessen. Die Autoren formulierten die Schlussfolgerung, dass zur Erkennung einer geringgradigen Lahmheit der Hintergliedmaßen die im Trab gemessenen Werte sensitiver und genauer waren im Vergleich zu den im Schritt gemessenen Werten.

2.1.4. Einfluss der Dominanz der Vordergliedmaße auf die Parameter der kinetischen Ganganalyse

Die Verteilung des Körpergewichtes zwischen Vorder- und Hintergliedmaßen während der Bewegung des Hundes ist in der Literatur mehrfach beschrieben. Da der Hund relativ betrachtet mehr Gewicht auf den Vordergliedmaßen trägt, sind die PVF-, VI-, ST- und BWD-Werte der Vordergliedmaßen im Vergleich zu denen der Hintergliedmaßen höher (Hutton et al. 1969, Roy 1971, Mölsä et al. 2010, Raith 2010, Layer 2012, Fuchs et al. 2014).

Hutton et al. (1969) untersuchten fünf Hunde in der Gangart Schritt auf einer stationären Dehnungsmessplatte. Zwei der Hunde waren Beagle, zwei Mischlinge hatten einen Labrador-ähnlichen Körperbau und ein weiterer Hund wurde in der Größenordnung zwischen Labrador und Beagle eingestuft. Die erhobenen Parameter umfassten PVF, ST und BWD. Die PVF-Werte der Vordergliedmaßen betragen das 1,1fache des Körpergewichtes, während die PVF-Werte der Hintergliedmaßen nur das 0,8fache des Körpergewichtes erreichten. Die ST-Werte der Vordergliedmaßen betragen das 1,5fache der ST-Werte der Hintergliedmaßen. Die Beagles hatten niedrigere ST-Werte als die Labradore. Die Autoren beschrieben eine Abhängigkeit der ST-Werte von der Geschwindigkeit und der Gliedmaßenlänge. Da sich alle Hunde in derselben Geschwindigkeit bewegten, veranschaulichten die Autoren die Abhängigkeit der ST-Werte von der Gliedmaßenlänge; die kurzbeinigen Beagles zeigten niedrigere ST-Werte als die langbeinigen Labradormischlinge. Das Verhältnis der ST-Werte der Vorder- und Hintergliedmaße variierte unter den untersuchten Hunden zwischen Werten von 1,6 bis 1,33. Diese Variabilität führten die Autoren auf eine leicht unterschiedliche

Lage des Körperschwerpunktes der untersuchten Hunde zurück.

Raith (2010) untersuchte gesunde Schäferhunde in der Gangart Schritt auf einem instrumentierten Laufband mit eingebauten, stationären Kraftmessplatten. Die erhobenen Parameter umfassten PVF, VI, ST, TOO und BWD. Die Werte für PVF, VI und BWD waren auf den Vordergliedmaßen stets höher als auf den Hintergliedmaßen. Raith (2010) zeigte keinen Unterschied in den Werten der ST und TOO zwischen Vorder- und Hintergliedmaßen.

Layer (2012) untersuchte gesunde Labrador Retriever und Dackel in der Gangart Schritt auf einem instrumentierten Laufband mit eingebauten, stationären Kraftmessplatten. Die erhobenen Parameter umfassten PVF, VI, und BWD. Die Werte für PVF, VI und BWD der Vordergliedmaßen überstiegen stets die Werte der Hintergliedmaßen. Der Dackel zeigte im Vergleich zum Labrador Retriever geringere Werte der ST sowohl auf den Vorder- als auch auf den Hintergliedmaßen. Das Verhältnis von den vorderen- zu hinteren ST-Werten lag beim Dackel bei 1,16 und beim Labrador Retriever bei 1,09. Die Werte für den VI waren somit beim Dackel ebenfalls geringer als beim Labrador Retriever. Die Werte für VI der Hintergliedmaßen waren beim Dackel signifikant niedriger als die der Labrador Retriever. Im Vergleich zeigte der Dackel höhere BWD-Werte auf den Vordergliedmaßen als der Labrador Retriever.

Vergleichswerte aus zitierten Studien für die Parameter PVF und VI befinden sich in Tabelle 1 und Tabelle 2.

Tabelle 1: PVF- und VI- Mittelwerte in der Gangart Schritt aus zitierten Vergleichsstudien.

		PVF (%KGW)		VI (%KGWs)	
		TL	PL	TL	PL
Bockstahler et al. (2007)	Mischlinge großer Rassen	63,5	39,4	30,2	18,25
Raith (2010)	Deutscher Schäferhund	55,95	38,55	28,23	19,98
Layer (2012)	Labrador Retriever	58,07	41,93	17,26	11,04
Layer (2012)	Dackel	60,99	39,01	15,74	7,97

PVF = Vertikale Spitzenkraft in Prozent des Körpergewichtes (KGW), VI = Vertikaler Impuls in Prozent des Körpergewichtes pro Sekunde, TL = Thoracic Limb, PL = Pelvic Limb, gemessen unter Verwendung eines instrumentierten Laufbandes.

Tabelle 2: PVF- und VI- Mittelwerte in der Gangart Trab aus zitierten Vergleichsstudien.

		PVF (%KGW)		VI (%KGWs)	
		TL	PL	TL	PL
Rumph et al. (1994)	Hunde großer Rassen	106,7	65,1	17,2	9,3
Kapatkin et al. (2007)	Hunde großer Rassen	107,8-108,3	70,9-71,5	17,4-17,5	10,1-10,2
Mölsa et al. (2009)	Rottweiler	117	71,9	17,2	9,3
Mölsa et al. (2009)	Labrador Retriever	125,3	72,5	15,7	8,3
Nordquist et al. (2011)	Labrador Retriever	104,4	74,5	16,8	10,5
Fuchs et al. (2014)*	Beagle	100,8	66,9	14,4	8,25

*Vertikale Spitzenkraft (PVF) in Prozent des Körpergewichtes (KGW), Vertikaler Impuls (VI) in Prozent des Körpergewichtes pro Sekunde, TL = Thoracic Limb, PL = Pelvic Limb, *gemessen unter Verwendung eines instrumentierten Laufbandes, sonst gemessen unter Verwendung stationärer Kraftmessplatten.*

2.2. Der Hund im Wachstum

Die Arbeit von Górska et al. (1978) lieferte Hintergründe zur motorischen Entwicklung von juvenilen Hunden. Anhand von elektrischer Stimulation verschiedener Regionen des motorischen Cortex an narkotisierten, adulten Hunden wurden den verschiedenen Gehirnarealen das Auslösen spezifischer Bewegungsmuster zugeordnet. Im Verlauf der Studie wurden juvenile Hunde im Alter von wenigen Lebenstagen bis hin zum vollendeten dritten Lebensmonat untersucht. Die Ergebnisse der juvenilen Hunde unterschieden sich von denen adulter Hunde und veränderten sich mit steigendem Lebensalter. Die Autoren

differenzierten zwei Entwicklungsphasen: Phase eins, vom ersten Lebenstag bis zur vollendeten dritten Lebenswoche; Phase zwei, von der vierten Lebenswoche bis zum vollendeten dritten Lebensmonat. Während der ersten Phase löste die elektrische Stimulation fast ausschließlich bilaterale Bewegungen der Gliedmaßen aus. Außerdem löste die Stimulation verschiedener Areale des motorischen Cortex eine gleichzeitige Bewegung der Vorder- und Hintergliedmaßen aus. Somit bestand keine Differenzierung zwischen rechter und linker Körperhälfte sowie Vorder- und Hintergliedmaßen im motorischen Cortex. Der Bewegungsumfang der Hintergliedmaßen beschränkte sich auf die Retraktion der Oberschenkel. Der Bewegungsumfang der Vordergliedmaßen war etwas vielfältiger als der Bewegungsumfang der Hintergliedmaßen, wobei Bewegungen des Schultergelenkes überwogen. Somit konnten keine für den adulten Hund typischen Bewegungsmuster ausgelöst werden. Die Bewegungen waren selten tonisch, stattdessen waren sie häufig ruckartig, phasisch oder klonisch. Außerdem waren die Antworten auf die Stimuli unbeständig, die wiederholte Stimulation desselben Punktes löste bei erneuter Stimulation unterschiedliche Bewegungen aus. Mit Beginn der vierten Lebenswoche traten erstmalig Bewegungsmuster adulter Tiere auf und entwickelten sich fortwährend über den Zeitraum der zweiten Entwicklungsphase. Die somatotopische Organisation und die kontralaterale Präsentation der Gliedmaßen im motorischen Cortex entwickelten sich. Somit konnten kontralaterale Bewegungen getrennt nach Hinter- und Vordergliedmaßen ausgelöst werden. Außerdem erweiterte sich das Bewegungsmuster der Gliedmaßen um Bewegungen der distalen Gelenke. Die Bewegungen wurden tonischer und reagierten stabiler auf wiederholte Stimulation an denselben Punkten. Gegen Ende des dritten Lebensmonats ähnelten die Antworten auf die Stimulation des motorischen Cortex der juvenilen Hunde denen adulter Hunde.

Zusätzlich untersuchten Górska et al. (1978) die Reflexe juveniler Hunde und stellten eine Verhaltensstudie zur Bewegung juveniler Hunde ins Verhältnis zu den Ergebnissen der elektrischen Stimulation des motorischen Cortex. Wie bereits andere Autoren zuvor (James 1952a, James 1952b, Fox 1963, Fox 1964) beschrieben Górska et al. (1978) die vierte Lebenswoche als entscheidenden Zeitpunkt in der motorischen Entwicklung des Hundes im Wachstum. Zu diesem Zeitpunkt wurden die für Jungtiere typischen Reflexe, wie der Such-, Schnauz-, und Nackenreflex und der gekreuzte Streckreflex, nach und nach durch Reflexe die auch

beim adulten Hund vorhanden sind ersetzt, wie die Haltungs- und Stellreflexe. Für ihre Verhaltensstudie teilten Górska et al. (1978) die Hunde in vier Gruppen ein; zur 2., 3., 4. und 6. Lebenswoche. Die Hunde wurden trainiert, um selbstständig Futter mit Hilfe ihrer Pfoten aus unterschiedlichen Behältern, wie Vertiefungen und Röhren, zu holen. Die Gruppe der zwei Wochen alten Hunde war in der Lage, mit der gleichen Anzahl an Versuchen das Futter aus den Behältern zu holen wie die sechs Wochen alten Hunde. Allerdings waren die zwei Wochen alten Hunde weniger geschickt in der Bewegung ihrer Vorderpfoten und brauchten eine höhere Anzahl an Bewegungen (30% bis 80%) pro Versuch als die drei, vier und sechs Wochen alten Hunde. Darin sahen die Autoren ihre Ergebnisse der elektrischen Stimulation des motorischen Cortex bestätigt, dass die Entwicklung des motorischen Cortex bis zum Ende des dritten Lebensmonates andauert.

Die Entwicklung kinetischer Parameter beim Hund im Wachstum wurden bisher in der Literatur nur wenig beschrieben. Zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Dissertation sind der Autorin nur vier Studien zur Kinetik des Hundes im Wachstum bekannt. Um einen vollständigen Überblick über die Studienlage zur Kinetik des Hundes im Wachstum zu ermöglichen, wurden die Studien von Barthélémy et al. (2011) und Bertram et al. (2000) im Folgenden kurz zusammengefasst, obwohl sowohl die Messmethoden als auch die erhobenen Parameter mit denen der vorliegenden Studie nicht vergleichbar waren.

Barthélémy et al. (2011) untersuchten sechs gesunde Golden Retriever und 12 Golden Retriever mit Muskeldystrophie im Alter von zwei bis neun Lebensmonaten á zwei Messzeitpunkten pro Monat. Das Ziel der Studie war es, die Ganganomalien bei Golden Retrievern mit Muskeldystrophie während des Wachstums und des Krankheitsverlaufs mit Hilfe einer kostengünstigen und flexibel einsetzbaren ambulanten Ganganalysemethode (3-Achsen-Beschleunigungssensor) zu analysieren, um dadurch die Auswirkungen von therapeutischen Maßnahmen im Krankheitsverlauf messen und bewerten zu können. Den untersuchten Hunden wurde jeweils ein Gurt mit einem 3-Achsen-Beschleunigungssensor in der Nähe des Körperschwerpunkts unter dem Brustbein angelegt. Es wurden die Beschleunigungen während verschiedener Bewegungsabläufe in den Achsen vertikal, kranio-kaudal sowie medio-lateral aufgezeichnet. Zudem wurde die jeweils gelaufene Geschwindigkeit ermittelt. Aus den erhobenen Daten wurden die Schrittfrequenz, die Schrittlänge, die Regelmäßigkeit der Schritte, die

Gesamtleistung der Beschleunigungen, die relativen Komponenten der Leistung der Beschleunigungen bezüglich der drei Achsen sowie der relative Kraft-Index berechnet. Für die gesunden Hunde der Kontrollgruppe konnte kein Alterseffekt auf die Schrittlänge festgestellt werden, wenn für die Widerristhöhe kontrolliert wurde. Mit steigendem Alter nahm die Geschwindigkeit ab, was vermutlich mit der Abnahme der Schrittfrequenz zusammenhing; zudem nahm der medio-laterale Anteil der Leistung der Beschleunigungen ab. Für die Gesamtleistung der Beschleunigungen, den kranio-kaudalen und den vertikalen Anteil der Leistung der Beschleunigungen, den Kraft-Index und die Regelmäßigkeit der Schritte konnten keine bedeutenden Effekte während des Wachstums festgestellt werden.

Bertram et al. (2000) untersuchten die Trabbewegungen von acht gesunden, fünf Monate alte Greyhounds und fünf gesunden Labrador Retrievern im Alter zwischen sechs und 18 Monaten. Das Ziel der Studie war es, mögliche Unterschiede im Trabverhalten der Rassen auf die Körpergröße und -form beziehungsweise auf die spezifische Art und Weise der Bewegung zurückzuführen. Zur Erhebung der kinetischen Parameter wurden die Hunde über vier Kraftmessplatten, die stationär im Boden angebracht waren, geführt. Dadurch konnten pro Trabmessung jeweils zwei Messwerte pro Hund für jede Vorder- bezüglich Hintergliedmaße erfasst werden. Die Greyhounds absolvierten 47 und die Labrador Retriever 42 Trabmessungen. Aus den erhobenen Daten wurden als kinetische Parameter die Schrittlänge, die ST, die PVF sowie die relative Phase zwischen dem Aufsetzen der Hintergliedmaßen bis zum Aufsetzen der Vordergliedmaßen errechnet. Zudem wurde die relative Geschwindigkeit berechnet. In beiden Rassen konnten für die Vordergliedmaßen im Vergleich zu den Hintergliedmaßen höhere Werte für die PVF sowie für die ST gezeigt werden. Die Greyhounds zeigten im Vergleich zu den Labrador Retrievern unabhängig von der gelaufenen Geschwindigkeit längere absolute Schrittphasen sowie Schrittlängen. Zudem konnten für die Greyhounds im Vergleich zu den Labrador Retrievern höhere Werte für die PVF bezüglich der Hintergliedmaßen und niedrigere Werte für die ST bezüglich der Vordergliedmaßen gezeigt werden.

Die Studie von Biknevicius et al. (1997) wurde nur als Abstract im Rahmen von Conference Proceedings und nicht als peer-reviewed Zeitschriftenartikel veröffentlicht. Biknevicius et al. (1997) untersuchten anhand von stationären Kraftmessplatten nicht weiter spezifizierte Haushunde im Alter zwischen vier und

15 Lebenswochen in der Gangart Schritt auf mögliche Effekte zunehmender Körpergröße auf die BRK. PVF wurde auf das Körpergewicht normalisiert, um für eine durchschnittliche Körpergewichtszunahme von 2,1 bis 7,3 kg zu adjustieren. PVF der Vordergliedmaßen war stets höher als PVF der Hintergliedmaßen. PVF der Hintergliedmaßen stieg mit steigendem Alter und Körpergewicht signifikant an, während PVF der Vordergliedmaßen durchschnittlich unverändert blieb. Damit beschrieben Biknevicius et al. (1997) eine mit steigendem Körpergewicht relative Abnahme des Anteils der Vordergliedmaßen an der BWD. Diese Beobachtung steht im Kontrast zu den Ergebnissen von Studien zum adulten Hund, hier wurde die BWD nicht von Veränderungen des Körpergewichtes, sondern vielmehr von der Körperform beeinflusst (Budsberg et al. 1987, Bertram et al. 2000, Kim et al. 2011).

Helmsmüller et al. (2014) untersuchten Beagles im Alter von neun bis 51 Lebenswochen auf eine Veränderung der BWD während des Wachstums. Die Parameter PVF, VI, ST und TOO wurden im Trab auf einem instrumentierten Laufband mit darunter platzierten Kraftmessplatten getrennt nach Vorder- und Hintergliedmaßen erhoben. Wie auch beim adulten Hund zeigten die Hunde im Wachstum während des gesamten Untersuchungszeitraumes für die Vordergliedmaßen im Vergleich zu den Hintergliedmaßen signifikant höhere Werte für PVF und VI und trugen somit den größeren Anteil des Körpergewichtes mit den Vordergliedmaßen. Für die PVF- und VI-Werte wurde ein signifikanter Unterschied über den Zeitverlauf gezeigt; die Werte stiegen auf den Vordergliedmaßen an und sanken auf den Hintergliedmaßen. Dieser Anstieg zeigte sich sowohl beim PVF der Vordergliedmaßen, von 59% in der 9. Lebenswoche auf 63% in der 51. Lebenswoche, als auch beim VI der Vordergliedmaßen, von 62% in der 9. Lebenswoche auf 67% in der 51. Lebenswoche. Somit verlagerte sich das Körpergewicht über den Zeitverlauf vermehrt auf die Vordergliedmaßen. Diese Beobachtung steht im Kontrast zu den Ergebnissen von Biknevicius et al. (1997).

Das Verhältnis der ST der Vordergliedmaßen im Vergleich zu den ST der Hintergliedmaßen stieg über die Zeit signifikant an. Es zeigten sich im Verhältnis längere ST auf den Vordergliedmaßen.

Die TOO der Vordergliedmaßen blieb unverändert während die TOO der Hintergliedmaßen signifikant anstieg; somit wurde PVF auf den Hintergliedmaßen beim juvenilen Hund früher erreicht.

Zusätzlich zu den kinetischen Parametern untersuchten Helmsmüller et al. (2014) die Winkelung der Vorder- und Hintergliedmaßen. Hierzu wurden Marker auf dem Margo dorsalis scapula und dem Os metacarpale V, sowie dem Trochanter major femoris und dem Os metatarsale V befestigt. Ein durchschnittlicher Gliedmaßenwinkel bezüglich der Standphase wurde zwischen dem Winkel beim Aufsetzen der Gliedmaßen auf die Kraftmessplatte und dem Winkel beim Abheben der Gliedmaßen von der Kraftmessplatte errechnet. Der Winkel beim Aufsetzen der Vorder- und Hintergliedmaßen nahm signifikant ab, während der Winkel beim Abheben der Vorder- und Hintergliedmaßen konstant blieb. Damit nahmen die durchschnittlichen Gliedmaßenwinkel für die Vorder- und Hintergliedmaßen über den Zeitverlauf zu, was auf eine vermehrte Retraktion der Vorder- und Hintergliedmaßen während der Standphase zurückzuführen ist. Die Vordergliedmaßen waren zu allen Zeitpunkten im Vergleich zu den Hintergliedmaßen mehr protrahiert.

Des Weiteren wurden Proportionsänderungen während des Wachstum untersucht. Gemessen wurde das Körpergewicht, die Kopf-, Körper- und Gliedmaßensegmentlängen, der Körperumfang und die Widerrist- und Kruppenhöhe. Die Form des Körperstammes änderte sich mit steigendem Alter von zylindrisch zu konisch. Als mögliche Ursache diskutierten Helmsmüller et al. (2014) die Veränderung der Masseanteile der inneren Organe während des Wachstums. Die Ermittlung des posturalen Index (Widerrist- oder Kruppenhöhe dividiert durch die Summe der Gliedmaßensegmentlängen) ergab eine vermehrte Streckung der Vorder- und Hintergliedmaßen mit steigendem Alter, wobei diese Entwicklung für die Hintergliedmaßen im Vergleich zu den Vordergliedmaßen relativ ausgeprägter war.

Helmsmüller et al. (2014) diskutierten drei mögliche Ursachen für die beschriebene Verlagerung des Körpergewichts nach kranial: (1) die im Vergleich zu den Vordergliedmaßen relativ vermehrt gestreckten Hintergliedmaßen, (2) die im Vergleich zu den Hintergliedmaßen vermehrt retrahierten Vordergliedmaßen und (3) die Veränderung der Form des Körperstammes von zylindrisch zu konisch.

Vergleichswerte aus der Studie von Helmsmüller et al. (2014) für die Parameter PVF, VI und ST befinden sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: PVF-, VI- und ST-Mittelwerte für den Beagle im Wachstum gemessen in der Gangart Trab, Auszug aus der zitierten Vergleichsstudie Helmsmüller et al. (2014).

PW	PVF (%KGW)		VI (%KGWs)		ST (s)	
	TL	PL	TL	PL	TL	PL
11	101,0	69,9	12,1	7,2	0,20	0,19
13	107,1	69,7	12,8	7,5	0,22	0,20
19	114,1	70,7	13,9	8,3	0,23	0,22
22	118,0	73,2	14,4	8,3	0,23	0,21
26	124,1	73,7	14,1	7,3	0,22	0,19
30	127,4	75,0	14,1	7,3	0,22	0,19
43	125,9	71,9	14,2	6,9	0,22	0,18
51	124,4	73,3	13,5	6,8	0,21	0,18

PW = Postnatale Woche, TL = Thoracic Limb, PL = Pelvic Limb, PVF = Vertikale Spitzenkraft in Prozent des Körpergewichtes (KGW), VI = Vertikaler Impuls in Prozent des Körpergewichtes pro Sekunde, ST = Stance Time in Sekunden gemessen unter Verwendung eines instrumentierten Laufbandes.

III. PUBLIKATION

Der Originalartikel „Growing Beagles and Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever mixed breeds show a forelimb-dominated gait and a cranial shift in weight support over time during a kinetic gait analysis “ wurde am 31. Mai 2022 im Fachjournal „American Journal of Veterinary Research“ online veröffentlicht.

Growing Beagles and Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever mixed breeds show a forelimb-dominated gait and a cranial shift in weight support over time during a kinetic gait analysis

Sandra U. Mall¹; Stephanie Steigmeier-Raith, Dr Med Vet¹; Sven Reese, Dr Med Vet²; Andrea Meyer-Lindenberg, Dr Med Vet^{1*}

¹Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, Ludwig-Maximilians-Universität München, 80539 Munich, Germany

²Department of Veterinary Sciences, Ludwig-Maximilians-Universität München, 80539 Munich, Germany

*Corresponding author: Dr. Meyer-Lindenberg (Andrea.Meyer-Lindenberg@chir.vetmed.uni-muenchen.de)

<https://doi.org/10.2460/ajvr.20.10.0190>

OBJECTIVE

To collect kinetic gait reference data of dogs of 2 breeds in their growth period during walking and trotting gait, to describe their development, and to investigate the weight support pattern over time.

ANIMALS

8 Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever mixed breeds and 4 Beagles.

PROCEDURES

Ground reaction force variables (GRFs), peak vertical force and vertical impulse, and temporal variables (TVs) derived therefrom; time of occurrence; and stance times were collected. Body weight distribution (BWD) was evaluated. Six measurements, each containing 1 trial in walking and 1 trial in trotting gait, were taken at age 10, 17, 26, 34, 52, and 78 weeks. The study period started July 17, 2013 and lasted until October 7, 2015. Area under the curve with respect to increase was applied. The difference of area under the curve with respect to increase values between breeds and gaits was analyzed using either the *t* test or the Mann-Whitney test. Generalized mixed linear models were applied.

RESULTS

Significant differences in gait and breed comparisons were found. Growing dogs showed a forelimb-dominated gait. The development of GRF and TV values over the study period were described.

CLINICAL RELEVANCE

Reference values for GRFs, TVs, and BWDs in growing dogs were given. A cranial shift in weight support over time was found during trotting gait. Smaller, younger dogs walked and trotted more inconsistently.

Kinetic gait analysis is a well-established method to evaluate the gait cycle of adult healthy dogs as well as to detect and assess lameness and to evaluate treatments of various orthopedic diseases in dogs.¹⁻³ Ground reaction forces (GRFs), such as peak vertical force (PVF) and vertical impulse (VI), and temporal variables (TVs), such as stance time (ST) and time of occurrence (TOO), measured with a force platform gait analysis, are well described for healthy adult dogs of various breeds and mixed breeds during walking and trotting gait.^{4,5}

Ground reaction forces depend on body mass, body conformation, and traveling speed.^{1,6-8} Furthermore, variances in GRFs and TVs are affected by gait trial repetition and individual intraday variability.⁹ Standard procedures to reduce variance are normalizing the GRFs to the body weight (BW) and using narrow speed ranges with controlled acceleration.⁶

Significant correlations have been reported between GRFs and TVs with limb length. Smaller dogs take shorter, faster steps whereas larger dogs take fewer, bigger steps at the same absolute speed.^{10,11} Some authors recommend normalizing speed to the distance from the ground to the margo dorsalis scapulae, hereinafter referred to as withers height (WH), to reduce variance resulting from individual body conformations.¹² Taking into account those limitations in comparability of GRFs and TVs in a heterogeneous dog group, GRFs and TVs for adult dogs are described as follows. With greater velocities, PVF increases whereas VI and ST decreases.⁶ Higher ST values produce higher TOO values—meaning, time to PVF occurs later during walking than during trotting velocities.⁴ The correlation of BW to GRFs and TVs is described differently. Some authors stated that without normalizing GRFs and TVs to the WH, larger,



heavier dogs showed lower PVF values, higher VI values, and longer ST than smaller, lighter dogs.^{1,4} Conversely, other authors described smaller GRFs and TVs for small dogs than for large dogs, except for PVF and body weight distribution (BWD).¹¹ They reported a negative correlation between PVF and BW in large dogs but not in small dogs. The BW or size of the dogs did not affect the BWD.

Dogs are a forelimb-dominated species and carry about 60% of their BW on the thoracic limbs and 40% on the pelvic limbs.^{1,5,13} Therefore, the PVF, VI, and BWD values of the thoracic limb are higher than those of the pelvic limb. Slight differences in BWD between dogs of different breeds have been reported.^{10,14,15} Studies on adult dogs of different breeds have shown that the ST is greater in the thoracic limb than in the pelvic limb, although the differences between the thoracic and the pelvic limb were not statistically significant.^{4,14-18}

However, very little is known about the development of kinetic gait parameters during dogs' growth period. To the best of our knowledge, there have been only 2 studies evaluating kinetic and kinematic parameters of the gait cycle in growing dogs.^{13,19} One study¹³ investigated the change of the weight support pattern in Beagles from 9 to 51 postnatal weeks by determining the PVF, VI, ST, and TOO during trotting but not during walking gait. The PVF of the thoracic limb increased from 59% at postnatal week 9 to 63% at postnatal week 51, and the VI of the thoracic limb increased from 62% at postnatal week 9 to 67% at postnatal week 51, showing that the thoracic limb carried an increasing portion of the body as a dog grows. As in adult dogs, the thoracic limb carried more weight than the pelvic limb at all times. The ratio between the ST of the thoracic and the pelvic limbs increased over time with an increasing ST of the thoracic limb. The TOO did not change in the thoracic limb but increased in the pelvic limb with age, indicating that PVF occurred later during stance when the dogs grew older. The other study¹⁹ analyzed GRFs and TVs from domestic dogs between age 4 and 15 postnatal weeks with a mean body mass increase of 2.1 to 7.3 kg, measured with force plate analysis during walking gait. The PVF of the thoracic limb was always greater than the PVF of the pelvic limb. In contrast to Helmsmüller et al,¹³ the authors described an increase of PVF of the pelvic limb whereas PVF of the thoracic limb remained the same.

Basic research is important for the interpretation of kinetic parameters of growing dogs. The aim of this explorative study was to collect reference values for healthy, growing dogs during walking and trotting gait. The basic data collected aims to help evaluate data of future kinetic studies in terms of the assessment of both a normal and an abnormal gait in growing dogs. The Beagle and Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever (FBI) breeds were picked to collect data of a medium-size breed and a large breed, and to compare results between the 2 breeds. To be able to offer a greater variety of basic kinetic data, and to explore differences between gaits, results were collected in walking and trotting gait.

Materials and Methods

Animals

Twelve young and healthy dogs, 8 FBIs and 4 Beagles, owned by the Chair of Animal Nutrition and Dietetics, Department of Veterinary Sciences, Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany, were recruited for the study. The study period started July 17, 2013 and lasted until October 7, 2015. Each dog was measured 6 times, starting at age 10 weeks, followed by measurements at age 17, 26, 34, 52, and 78 weeks. Time intervals were set closer during their first 6 months of living because the main growth of the dogs occurs during this period.²⁰ Each measurement consisted of a physical examination; measurements of WH, croup height, vertebral column length, and BW; and a gait analysis. Each gait analysis consisted of 2 trials: 1 at a walking gait and 1 at a trotting gait.

Before every gait analysis, the first author examined all dogs clinically, neurologically, and orthopedically. Dogs were excluded if they showed any signs of illness or failed to habituate to the gait analysis. At every study day, WH was measured at the margo dorsalis scapulae, croup height at the crista iliaca, and vertebra column length from the first vertebra thoracica to the apex ossis sacri; all measurements were in meters. The dog's BW in kilograms was measured with the same digital scale, operating in 100-g steps.

The study was approved by the Animal Care and Use Committee of the Centre for Clinical Veterinary Medicine, Faculty of Veterinary Medicine, Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany (protocol no. 14-09-08-13).

Gait analysis

Force plate analysis was performed at the gait analysis laboratory of the Clinic for Small Animal Surgery and Reproduction, Ludwig-Maximilians-Universität München, Germany. The dogs walked and trotted on a horizontal treadmill embedded in a platform with 2 separate belts and 4 integrated piezoelectric force plates, 2 underneath each belt. The GRF of all 4 limbs were sampled separately at 1,000 Hz. Speed was controlled by software (Simi Reality Motion Systems GmbH) in steps of 0.02 m/s. The force platform was connected to a data acquisition system and a computer with gait analysis software (Vicon MX 3+, Vicon Motion Systems Ltd.).

The first author personally guided the dogs on the treadmill for all measurements. The dogs were allowed to habituate to walking and trotting on the treadmill. Forward motion toward the guiding veterinarian was encouraged by positive reinforcement. Each gait analysis measurement consisted of 2 trials: 1 at a walking gait and 1 at a trotting gait. Each trial was limited to a maximum duration of 2 minutes. Between trials, the dogs had time to rest and recover. The dogs had access to water and food during data collection. Together with a qualified observer, each trial was evaluated to confirm foot strikes and gait. Walking and trotting gait had to be evaluated anew at every measurement because of increasing size and BW. To ensure a consistent and even movement

forward, speed also had to be adapted to the 2 different breeds and depended on the individual stage of development of each dog.

In-house software (QuadruPedLocomotion, in-house software of Ludwig-Maximilians Universität München) was used to evaluate valid steps. By reviewing the vertical force curves, touchdown and liftoff events were determined manually. A valid step required each limb hitting the correct force plate without additional footfalls. The force threshold was set at the lowest possible value, depending on BW. All valid steps were selected for further analysis and exported to computer software (Microsoft Excel version 12, Microsoft Corp).

The following parameters were used in different equations to normalize GRFs to the dog's BW: PVF was expressed as percentage BW (% BW), VI was expressed as % BW per second; BW was expressed in kilograms; and gravitational acceleration (g) was expressed in 9.81 m/s^2 :

$$\text{PVF}(\% \text{BW}) = \text{GRF}/(\text{BW} \times g)$$

$$\text{VI}(\% \text{BW}/\text{s}) = \text{VI}/(\text{BW} \times g)$$

ST and TOO were expressed as a percentage of the total step. To evaluate the weight support pattern, BWD was calculated for each limb with the following equation:

$$\text{BWD} (\% \text{BW}) = 100 \times (\text{PVF of 1 limb} / \text{Total PVF of all limbs})$$

To account for the increasing WH as well as for the increasing speed over the series of measurements, dog speed was normalized to body size with the following equation:

$$\text{Froude number} = V/(g \times \text{WH})^{1/2}$$

where V represents absolute speed (measured in meters per second), g is gravitational acceleration (measured in 9.81 m/s^2), and WH is expressed in meters. The Froude number is a dimensionless value and allows comparing GRFs exerted by dogs running at the same Froude number based on the hypothesis of dynamic similarity^{2,21}. The hypothesis predicts that animals of different sizes will use the same gait when travelling with equal Froude numbers.²²

Data were collected separately for each limb. For each variable, the mean results for the right and left pelvic limbs and the mean results for the right and left thoracic limbs for each dog were used in the analyses.

Statistical analysis

Area under the curve (AUC) analysis is a standard method used in studies to compare data from serial measurements and to account for physiologic development over time.²³ We chose to apply AUC analysis for 2 reasons: to account for the aim of this study to record the development of kinetic parameters over time and for the correct handling of serial measurement data. AUC is defined as the sum of all the trapezoids and triangles delimited by the time-versus-variables values curve and is calculated mathematically as the integral of the curve.²³ There

are 2 different ways to calculate the AUC: AUC with respect to ground (AUCg) and AUC with respect to increase (AUCi). AUCg involves the total area under the curve, whereas AUCi is calculated with reference to the first value. In contrast to AUCg, AUCi uses the first value as a reference for calculation and ignores the distance from zero, thereby emphasizing the development of variable values over time.²⁴ In our study, AUCi analysis was applied.

The AUCi mean values of GRF and TV variables were compared between breeds (FBI/Beagle) and between gaits (walking/trotting). The dependent-interval scaled variables PVF and VI, and the dependent-ratio scaled variables ST, TOO, and BWD, were applied to both breed and gait comparisons. The Shapiro-Wilk test was applied to all variables to check for normal distribution. Data with confirmed normal distribution were tested for significance by use of the t test and non-normal distributed data by use of the Mann-Whitney test.

Generalized mixed linear models were applied with the GRFs and TVs as dependent variables; age in weeks (tested in pairs against week 78) and breed were fixed effects, and dog identification number was a random effect. Age in weeks was tested against week 78 because at this age the dogs produced GRF and TV values similar to adult dogs. These analyses were applied separately to the GRF and TV parameters measured in walking and trotting gaits.

The GRF and TV values over time were compiled, and each marker indicates the average across subjects (**Figures 1–5**). The figures visualized the development of GRF and TV values over time and between breeds and gaits.

The calculated Froude numbers were analyzed further either by applying the Friedman test concerning non-normal distributed data or by applying a one-way ANOVA followed by a Tukey post hoc test concerning normal distributed data. Box plots of Froude number values over time of breeds and gaits were compiled (**Supplementary Figure S1–S2**).

All analyses were conducted using computer software (IBM SPSS statistics version 28.0, IBM; MedCalc statistical software version 18.11, MedCalc Software Ltd; RStudio version 2021.09.0+351, RStudio, PBC). Data were reported, as mean \pm SD. Values of $P < 0.05$ were considered significant.

Results

Animals

Initially, 11 FBIs and 14 Beagles were identified for possible inclusion. Data of 3 FBIs and 10 Beagles could not be included in the AUCi analysis because they could not participate in all 6 scheduled trials. Dropout reasons varied from health issues to dogs who repeatedly refused to walk on the treadmill or dogs who were rehomed to private owners during the study time. To be able to include a litter of 3 FBIs, born in April 2013, their first measurement was performed at age 14 weeks. They were grouped with postnatal week 10. All following measurements of these 3 FBIs were taken at the exact age of 17, 26,

34, 52, and 78 postnatal weeks. Data for the remaining FBIs (n = 8) and Beagles (n = 4) were analyzed further. The FBI group consisted of 4 sexually intact males and 4 sexually intact females; the Beagle group contained 3 sexually intact males and 1 sexually intact female.

Mean values of kinetic parameters were compiled (Table 1). Mean values of WH, BW, and speed were compiled (Supplementary Table S1). Detailed results and P values of AUCi analyses were compiled (Supplementary Tables S2-S5); only significant values of P are reported in the Results section. The PVF, VI, ST, TOO, and BWD values over time were compiled (Figures 1-5), and each marker indicates the

average across subjects. Significant P values of the generalized mixed linear models are reported in the Results section.

Results of AUCi analyses of GRF and TV variables

The mean PVF of the pelvic limbs was significantly greater for the FBI group when walking compared with trotting (P < 0.001). The mean PVF of the pelvic limbs when walking was significantly greater for the FBI group compared with the Beagle group (P = .028). The mean PVF of the pelvic limbs when trotting was significantly greater for the Beagle

Table 1—Mean ± SD peak vertical force (PVF), vertical impulse, stance time, time of occurrence of the PVF, and body weight distribution determined on the basis of thoracic limb versus pelvic limb for 8 Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever crossbreed dogs and 4 Beagles when evaluated at walking and trotting gaits at age 10, 17, 26, 34, 52, and 78 weeks between July 17, 2013 and October 7, 2015.

Variable	Group	Limb	Age (weeks)					
			10	17	26	34	52	78
PVF walk (% BW)	Beagle	TL	62.51 ± 9.77	61.49 ± 3.90	66.74 ± 4.21	64.96 ± 5.60	67.17 ± 4.45	62.00 ± 1.94
		PL	45.13 ± 6.88	44.06 ± 10.97	44.53 ± 2.59	49.86 ± 2.37	44.21 ± 4.61	50.63 ± 3.45
	FBI	TL	59.94 ± 4.31	64.88 ± 7.20	68.46 ± 7.90	65.69 ± 7.09	69.43 ± 10.6	67.01 ± 6.09
		PL	41.34 ± 1.35	42.73 ± 7.40	50.98 ± 5.47	48.33 ± 5.22	50.67 ± 3.89	49.65 ± 3.08
PVF trot (% BW)	Beagle	TL	75.54 ± 4.36	86.17 ± 9.52	93.36 ± 4.89	84.84 ± 6.86	93.42 ± 8.79	90.80 ± 4.33
		PL	55.41 ± 1.19	58.71 ± 2.62	62.30 ± 2.45	62.85 ± 3.28	62.19 ± 4.37	63.06 ± 2.11
	FBI	TL	86.39 ± 10.47	91.35 ± 9.25	97.97 ± 7.54	94.18 ± 5.40	93.51 ± 10.74	98.06 ± 4.46
		PL	65.51 ± 3.53	62.39 ± 7.53	67.70 ± 6.06	63.58 ± 3.71	63.44 ± 7.55	64.90 ± 2.67
VI walk (% BWs)	Beagle	TL	17.61 ± 1.31	18.55 ± 1.69	19.13 ± 0.95	18.06 ± 1.18	20.40 ± 2.22	17.83 ± 2.16
		PL	10.48 ± 1.23	10.97 ± 1.49	10.52 ± 1.58	11.93 ± 0.30	10.46 ± 1.49	11.54 ± 0.90
	FBI	TL	17.65 ± 2.53	16.68 ± 4.72	16.82 ± 1.91	17.22 ± 1.96	18.77 ± 1.54	18.49 ± 2.54
		PL	10.21 ± 0.74	8.77 ± 1.56	9.51 ± 1.18	8.71 ± 1.18	10.48 ± 0.76	10.63 ± 1.01
VI trot (% BWs)	Beagle	TL	12.55 ± 3.49	14.36 ± 1.14	13.66 ± 1.57	13.08 ± 1.74	14.89 ± 1.81	14.30 ± 1.46
		PL	5.80 ± 1.63	7.85 ± 0.75	6.51 ± 0.54	7.62 ± 1.72	8.27 ± 0.47	7.84 ± 1.71
	FBI	TL	17.65 ± 2.53	14.10 ± 0.86	15.00 ± 1.95	14.84 ± 1.76	16.39 ± 1.41	15.96 ± 1.28
		PL	6.93 ± 0.88	7.47 ± 1.12	7.66 ± 0.83	7.13 ± 0.91	8.22 ± 1.44	7.77 ± 0.98
ST walk (% step)	Beagle	TL	64.53 ± 2.50	66.44 ± 2.71	65.88 ± 2.64	65.06 ± 2.05	67.88 ± 4.93	64.94 ± 4.19
		PL	59.56 ± 1.55	64.13 ± 3.60	63.50 ± 3.69	64.94 ± 0.82	63.19 ± 3.59	63.63 ± 2.84
	FBI	TL	63.88 ± 5.37	60.42 ± 8.89	60.48 ± 2.64	61.30 ± 2.46	64.06 ± 3.64	64.02 ± 3.00
		PL	61.41 ± 1.94	58.73 ± 4.35	57.09 ± 3.93	56.41 ± 4.53	60.75 ± 3.73	61.55 ± 3.14
ST trot (% step)	Beagle	TL	51.17 ± 8.19	54.31 ± 2.56	50.19 ± 2.56	51.69 ± 4.34	52.94 ± 3.27	52.56 ± 4.39
		PL	39.42 ± 6.48	47.50 ± 3.19	40.88 ± 2.36	44.81 ± 5.89	48.13 ± 2.31	45.81 ± 6.07
	FBI	TL	49.57 ± 3.03	53.18 ± 4.54	52.33 ± 5.32	53.23 ± 3.56	56.00 ± 3.39	54.20 ± 3.05
		PL	41.96 ± 2.46	45.88 ± 4.95	44.03 ± 4.45	43.39 ± 3.00	47.28 ± 6.38	45.29 ± 4.04
TOO walk (% step)	Beagle	TL	16.67 ± 1.25	16.81 ± 1.57	15.79 ± 0.97	16.66 ± 1.49	17.75 ± 2.25	16.00 ± 1.92
		PL	12.65 ± 2.12	13.01 ± 1.43	12.67 ± 1.48	13.64 ± 0.83	12.76 ± 1.09	13.12 ± 1.61
	FBI	TL	19.55 ± 3.81	19.32 ± 3.25	17.82 ± 2.85	18.52 ± 2.03	22.58 ± 3.45	21.50 ± 2.25
		PL	12.65 ± 1.07	11.55 ± 1.52	12.21 ± 1.77	11.82 ± 1.60	14.65 ± 4.03	14.24 ± 2.71
TOO trot (% step)	Beagle	TL	17.90 ± 3.47	20.25 ± 0.51	20.14 ± 1.70	20.32 ± 2.22	20.77 ± 1.89	20.66 ± 2.02
		PL	18.08 ± 0.81	18.28 ± 2.61	16.57 ± 0.72	16.96 ± 1.91	18.50 ± 1.04	17.17 ± 1.95
	FBI	TL	19.59 ± 1.81	19.13 ± 1.28	21.64 ± 2.10	21.78 ± 1.74	22.97 ± 2.01	23.60 ± 1.44
		PL	16.00 ± 1.51	16.07 ± 2.56	18.50 ± 2.23	18.05 ± 1.74	18.34 ± 2.85	19.34 ± 1.80
BWD walk (% BW)	Beagle	TL	58.05 ± 1.58	58.23 ± 3.61	59.94 ± 3.01	56.50 ± 3.01	60.32 ± 2.87	55.08 ± 0.65
		PL	41.95 ± 1.58	41.77 ± 3.01	40.06 ± 2.87	43.50 ± 2.68	39.68 ± 3.97	44.92 ± 2.43
	FBI	TL	59.11 ± 2.31	60.42 ± 5.64	57.30 ± 1.89	57.62 ± 2.28	57.37 ± 2.46	57.37 ± 2.92
		PL	40.89 ± 2.31	39.58 ± 5.65	42.70 ± 1.89	42.38 ± 2.28	42.63 ± 2.46	42.63 ± 2.92
BWD trot (% BW)	Beagle	TL	55.72 ± 3.61	59.32 ± 3.01	59.96 ± 0.66	57.38 ± 1.97	59.95 ± 2.96	58.99 ± 1.37
		PL	44.28 ± 3.61	40.68 ± 3.01	40.04 ± 0.65	42.62 ± 1.93	40.05 ± 2.97	41.01 ± 1.38
	FBI	TL	56.70 ± 3.09	59.47 ± 1.98	59.16 ± 1.15	59.69 ± 1.24	59.57 ± 1.25	60.16 ± 1.36
		PL	43.30 ± 3.09	40.53 ± 1.98	40.84 ± 1.15	40.31 ± 1.24	40.43 ± 1.25	39.84 ± 1.36

Results for PVF and BWD are expressed as percentage of body weight (% BW). Results for VI are expressed as percentage of body weight per second (% BWs). Results for ST and TOO are expressed as percentage of the total step (% step). BWD determined on the basis of TL versus PL.

BWD = Body weight distribution. FBI = Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever. PL = Pelvic limb. PVF = Peak vertical force. ST = Stance time. TL = Thoracic limb. TOO = Time of occurrence of the PVF. VI = Vertical impulse.

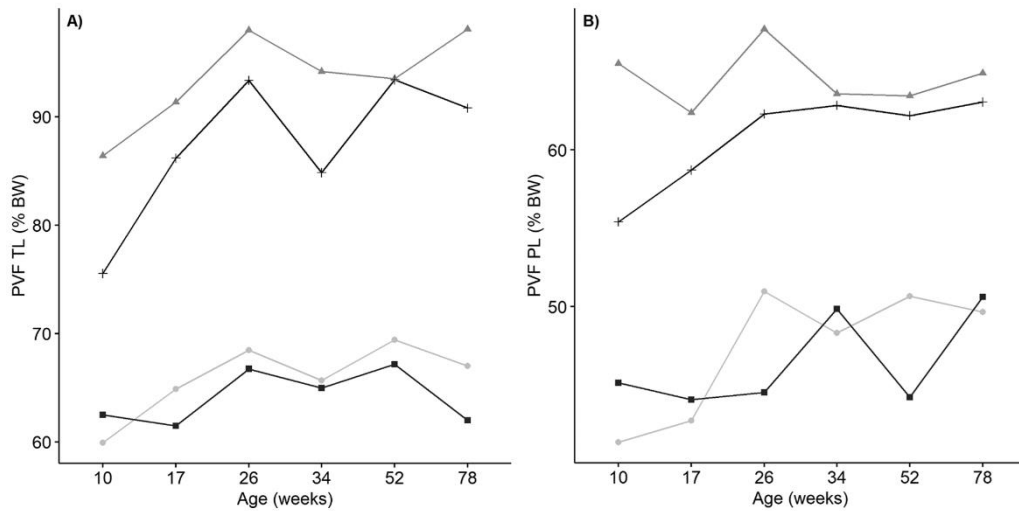


Figure 1—Mean peak vertical force (PVF) of thoracic limbs (TLs; A) and pelvic limbs (PLs; B) for 8 Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever (FBI) crossbreed dogs and 4 Beagles when evaluated at walking and trotting gaits at age 10, 17, 26, 34, 52, and 78 weeks between July 17, 2013 and October 7, 2015. The black lines connected by squares or plus signs represent results for the Beagle group at a walking or trotting gait, respectively. The gray lines connected by circles or triangles represent results for the FBI group at a walking or trotting gait, respectively. Results for PVF are expressed as percentage of body weight (% BW).

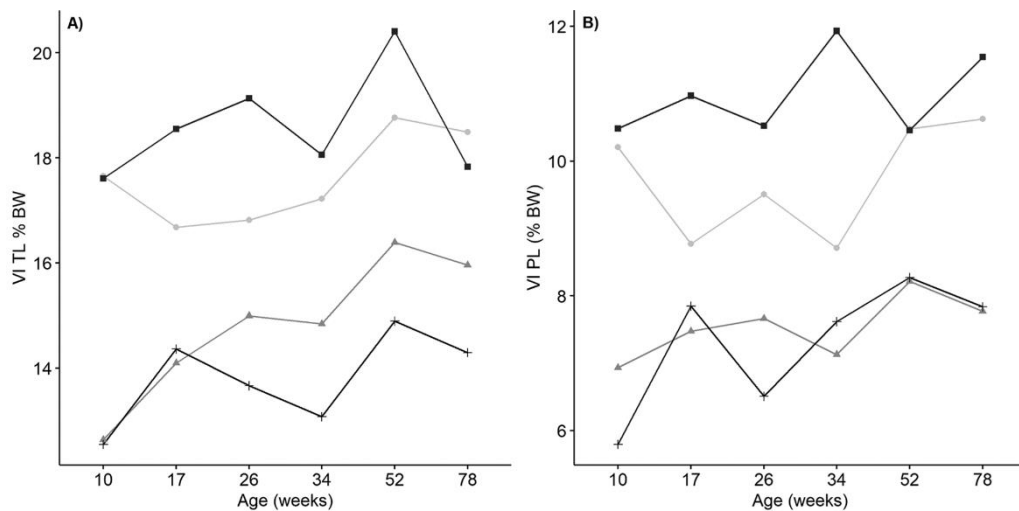


Figure 2—Mean vertical impulse (VI) of thoracic limbs (TL; A) and pelvic limbs (PL; B) for the dogs described in Figure 1 at each week evaluated. Results for VI are expressed as percentage of body weight per second (%BWs).

group compared with the FBI group ($P = .011$). There were no significant findings in all other comparisons. At all ages, in both breeds and at both velocities, the PVF of the thoracic limbs was greater than the PVF of the pelvic limbs.

The mean VI of the thoracic limbs was significantly greater for the FBI group when trotting compared with walking ($P = .029$). The mean VI of the

pelvic limbs was significantly greater for the FBI group when trotting compared with walking ($P = .018$). There were no significant findings in all other comparisons. At all ages, in both breeds and both velocities, the VI of the thoracic limbs was greater than the VI of the pelvic limbs.

The mean ST of the thoracic limbs was significantly longer for the FBI group when totting

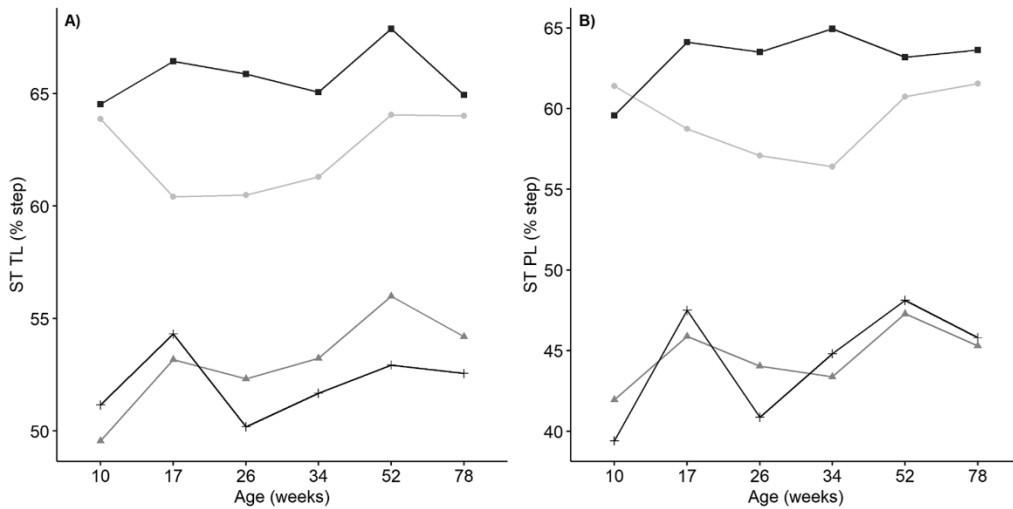


Figure 3—Mean stance times (ST) of thoracic limbs (TL; A) and pelvic limbs (PL; B) for the dogs described in Figure 1 at each week evaluated. Results for ST are expressed in percentage of the total step (% step).

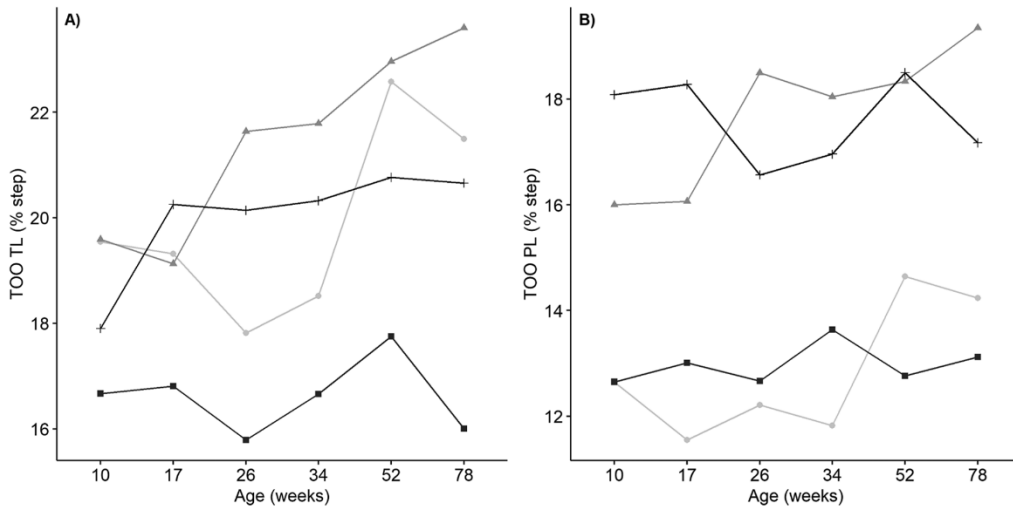


Figure 4—Mean time of occurrence (TOO) of thoracic limbs (TL; A) and pelvic limbs (PL; B) for the dogs described in Figure 1 at each week evaluated. Results for TOO are expressed in percentage of the total step (% step).

compared with walking ($P = .021$). The mean ST of the pelvic limbs was significantly longer for the FBI group when trotting compared with walking ($P = .004$). The mean ST of the pelvic limbs when walking was significantly longer for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .004$). There were no significant findings in all other comparisons. At all ages, in both breeds and both velocities, the ST of the thoracic limbs was longer than the ST of the pelvic limbs.

The mean TOO of the pelvic limbs when walking was significantly higher for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .004$). There were no significant findings in all other comparisons. At all ages, in both breeds and both velocities, the TOO of the thoracic limbs was higher than the TOO of the pelvic limbs.

The mean BWD of the thoracic limbs was significantly higher for the FBI group when trotting compared with walking ($P = .009$). There were no significant findings in all other comparisons. At all ages,

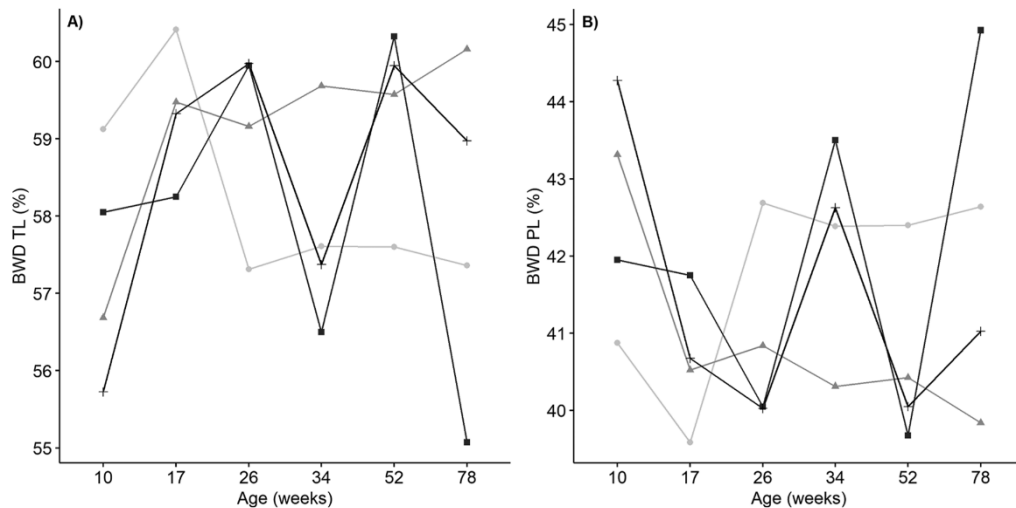


Figure 5—Mean body weight distribution (BWD) of thoracic limbs (TL; A) and pelvic limbs (PL; B) for the dogs described in Figure 1 at each week evaluated. Results for BWD are expressed in % BW.

in both breeds and both velocities, the BWD of the thoracic limbs was higher than the BWD of the pelvic limbs.

Results of generalized mixed linear model analyses for GRF and TV variables

The PVF of the thoracic limb when trotting was significantly less in postnatal week 10 compared with postnatal week 78 ($P = .001$). The PVF of the thoracic limb when trotting was significantly greater for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .001$). The PVF of the pelvic limb when walking was significantly less in postnatal week 10 ($P = .000$) and postnatal week 17 ($P = .006$) compared with postnatal week 78. The PVF of the pelvic limb when trotting was significantly greater for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .010$).

The VI of the thoracic limb when trotting was significantly less in postnatal week 10 ($P = .005$) and postnatal week 17 ($P = .035$) compared with postnatal week 78. The VI of the pelvic limb when walking was significantly less in postnatal week 17 compared with postnatal week 78 ($P = .024$). The VI of the pelvic limb when walking was significantly less for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .008$). The VI of the pelvic limb when trotting was significantly less in postnatal week 10, compared with postnatal week 78 ($P = .032$).

The ST of the thoracic limb when walking was significantly shorter for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .001$). The ST of the pelvic limb when walking was significantly shorter for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .022$). The ST of the pelvic limb when trotting was significantly shorter in postnatal week 10 compared with postnatal week 78 ($P = .039$).

The TOO of the thoracic limb when walking was significantly less in postnatal week 26 compared with postnatal week 78 ($P = .025$). The TOO of the thoracic limb when walking was significantly greater for the FBI group compared with the Beagle group ($P = .000$). The TOO of the thoracic limb when trotting was significantly less in postnatal week 10 ($P = .001$) and postnatal week 17 ($P = .000$) compared with postnatal week 78. The TOO of the pelvic limb when trotting was significantly less in postnatal week 10 compared with postnatal week 78 ($P = .028$).

The BWD of the thoracic limb when trotting was significantly less in postnatal week 10 compared with postnatal week 78 ($P = .007$).

Results for the Froude number

A significant difference between postnatal week 10 and all other postnatal weeks was noted in the Beagles' walking gait and the Beagles' trotting gait (Supplementary Figure S1). A significant difference between postnatal week 10 and all other postnatal weeks was noted in the FBIs' walking gait. In addition, postnatal week 17 differed significantly from postnatal weeks 26, 52 and 78. A significant difference between postnatal weeks 10 and 17, respectively, to all other postnatal weeks was noted in the FBIs' trotting gait (Supplementary Figure S2).

Discussion

The main objective of our study was to collect kinetic reference data of growing dogs of the Beagle and FBI breeds during walking and trotting gaits. Our results for the Beagle group at a trotting gait were consistent with findings from a previous study.¹³ Slight deviations in GRFs and TVs can be a result of physiologic and intraday variations.²⁵ In addition,

regarding findings in trotting gait, our data showed similar results in walking gait. To our knowledge, our study was the only one to have presented GRF and TV results of the FBIs during growth periods (ie, at age 10, 17, 26, 34, 52, and 78 weeks).

The results of this study showed a significant cranial shift in weight support over time for the Beagles and the FBIs in trotting gait. Our results suggested no significant cranial shift in weight support over time in walking gait. The underlying process to a cranial shift in weight support should be taken into consideration. As in a previous study,¹³ a cranial shift has been discussed for 3 possible reasons. Their observation was a more erect pelvic limb than a thoracic limb. Less protraction of the thoracic limb, together with a negative allometry of abdominal organs, leads to a cranial shift in weight support. Further insight into the underlying processes might be gained by the collection and interpretation of kinematic data of growing dogs.

We observed that our dogs walked and trotted more inconsistently at a younger age. It was more difficult to extract a valid sequence of steps during the first measurements at postnatal week 10 than during later measurements. To be able to interpret these findings in relation to clinical relevance, important factors of postnatal dog motor development need to be discussed. A previous study²⁶ showed that the process of maturation of the motor cortex lasts approximately 3 months. It stated that starting from the 4th postnatal week, somatotopic organization and contralateral representation of the thoracic and pelvic limbs are beginning to develop. Thereby, the repertoire of movements becomes enriched, involving movements of distal joints. A previous study¹³ on growing dogs reported equal conclusions about greater gait variance in younger dogs. The greater gait variance in young dogs should be taken into account when interpreting kinetic data from dogs younger than 3 months. This may be helpful for future studies with a similar aim to inform their study design and to reflect their expectations on the performance of young dogs during gait analysis.

The calculated Froude number revealed significant differences between postnatal week 10 and all following measurement points in both breeds. This indicated that the absolute speed during walking and trotting was faster when the dogs grew older. GRFs and TVs depend on the absolute speed exerted during kinetic gait analysis.^{6,7} Adult dogs produce higher PVF values and lower VI, ST, and TOO values at a faster traveling speed.^{4,6} This might lead to the conclusion that an increase of PVF over time might only be caused by an absolute faster traveling speed at later measurement points during our study period. However, the development of GRFs and TVs over time in our study differed from the expected influence speed has on these variables. The growing dogs in our study showed higher PVF values and higher VI, ST, and TOO values over time. These findings are consistent with findings of a previous study on growing dogs.¹³ This indicated that the development of the GRF and TV values described in our study was not only affected by faster traveling speed at later

measurements points during our study, but may also be part of the physiologic development of growing dogs. An ongoing development of the motor cortex and a likewise increasing ability to coordinate limb movement at a faster traveling speed might serve as explanation for the significant difference found in the Froude number. The Froude number does not account for a changing angulation of the joints or muscular usage, which might be another possible explanation for the found difference.

The results of our study concerning the PVF, VI, and BWD of the thoracic limb being higher than those of the pelvic limb in both breeds and both velocities indicated that growing dogs showed a forelimb-dominated gait from postnatal weeks 10 to 78. These findings were in accordance with findings in the literature for adult dogs.^{1,5}

In addition to the collection of GRF and TV variables, our study compared data between FBI and Beagle dogs. The significant findings in breed comparison should be interpreted critically. Some authors⁵ recommended normalizing all GRFs and TVs to WHs to be able to compare force plate data of different breeds. This procedure was not applied in our study, because the change in body conformation was one of the crucial factors that had to be taken into account. Regarding BWD, no differences in absolute mean values between Beagle and FBI dogs were found at postnatal week 78. Other studies stated that the Beagles' center of gravity lies farther cranially than in the Labrador Retriever; authors reported that adult Beagles carry ~60% of their BW on their thoracic limbs versus the ~58% of Labrador Retrievers.^{14,15} Another previous study²⁷ stated that Beagles are fully grown regarding body height at about 1 year, whereas they did not reach their expected adult BW until the end of the study period at postnatal week 60. This statement corresponded well with the findings in our study and might explain the different outcome in BWD. Regarding GRFs, the PVF of the thoracic limb was greater in FBIs than in Beagles. Regarding TVs, Beagles had longer STs in comparison to FBIs. These findings corresponded well with those of a previous study²⁸ that compared GRFs and TVs measured on a pressure mat between adult Beagle and Retriever dogs at a walk.

Our study had several limitations. The number of included dogs was limited to puppies born at the Institute of Animal Physiology, Physiological Chemistry and Animal Nutrition during a time period of 12 months. Because of the small sample size of this explorative study, the results of the significance tests should be considered carefully. Spikes found in the Froude number in the Beagle group can possibly be explained by the small group size of 4 (Figures 1–5). The dogs did not walk and trot as consistently during their first measurements as they did when they grew older. Therefore, the selection of consecutive valid steps was more difficult during the first measurement than later on during the study.

Overall, our study was able to show a forelimb-dominated gait and a cranial shift in weight support in growing dogs during trotting gait. Found

differences between the 2 investigated breeds corresponded well with findings of adult dogs and is mostly a result of different body sizes.^{14,15,28} Our study gave reference values for Beagle and FBI dogs during their growth period and may be helpful in the assessment of a normal versus an abnormal gait of growing dogs. Future research containing a larger number of investigated dogs as well as dogs of other breeds is needed to collect a wider selection of reference values for growing dogs. The summary of the results of this study suggested that medium-size dogs at age 10 weeks and large dogs between post-natal weeks 10 and 17 show a greater gait variance and more inconsistency in the sequence of steps. A likely explanation might be the ongoing development of the motor cortex. This information might be helpful for agencies, handlers, and owners to reflect their expectations on the performance of young dogs and to adapt their training accordingly.

Acknowledgments

No external funding was used in this study. The authors declare that there were no conflicts of interest. The authors thank Dr. Dobenecker of the Chair of Animal Nutrition and Dietetics, Department of Veterinary Sciences for providing her Beagle and FBI dogs.

References

- Budsberg SC, Verstraete MC, Soutas-Little RW. Force plate analysis of the walking gait in healthy dogs. *Am J Vet Res.* 1987;48(6):915-918.
- DeCamp CE. Kinetic and kinematic gait analysis and the assessment of lameness in the dog. *Vet Clin North Am Small Anim Pract.* 1997;27(4):825-840. doi: 10.1016/S0195-5616(97)50082-9
- Gillette RL, Angle TC. Recent developments in canine locomotor analysis: a review. *Vet J.* 2008;178(2):165-176. doi: 10.1016/j.tvjl.2008.01.009
- Mölsä SH, Hielm-Björkman AK, Laitinen-Vapaavuori OM. Force platform analysis in clinically healthy Rottweilers: comparison with Labrador Retrievers. *Vet Surg.* 2010;39(6):701-707. doi: 10.1111/j.1532-950X.2010.00651.x
- Voss K, Wiestner T, Galeandro L, Hässig M, Montavon PM. Effect of dog breed and body conformation on vertical ground reaction forces, impulses, and stance times. *Vet Comp Orthop Traumatol.* 2011;24(2):106-112. doi: 10.3415/VCOT-10-06-0098
- Riggs CM, DeCamp CE, Soutas-Little RW, Braden TD, Richter MA. Effects of subject velocity on force plate-measured ground reaction forces in healthy greyhounds at the trot. *Am J Vet Res.* 1993;54(9):1523-1526.
- Roush JK, McLaughlin RM, Jr. Effects of subject stance time and velocity on ground reaction forces in clinically normal greyhounds at the walk. *Am J Vet Res.* 1994;55(12):1672-1676.
- Jevens DJ, Hauptman JG, Decamp CE, Budsberg SC, Soutaslittle RW. Contributions to variance in force-plate analysis of gait in dogs. *Am J Vet Res.* 1993;54(4):612-615.
- Nordquist B, Fischer J, Kim SY, et al. Effects of trial repetition, limb side, intraday and inter-week variation on vertical and craniocaudal ground reaction forces in clinically normal Labrador Retrievers. *Vet Comp Orthop Traumatol.* 2011;24(6):435-444. doi: 10.3415/VCOT-11-01-0015
- Bertram JE, Lee DV, Case HN, Todhunter RJ. Comparison of the trotting gaits of Labrador Retrievers and Greyhounds. *Am J Vet Res.* 2000;61(7):832-838. doi: 10.2460/ajvr.2000.61.832
- Kim J, Kazmierczak KA, Breur GJ. Comparison of temporospatial and kinetic variables of walking in small and large dogs on a pressure-sensing walkway. *Am J Vet Res.* 2011;72(9):1171-1177. doi: 10.2460/ajvr.72.9.1171
- Voss K, Galeandro L, Wiestner T, Haessig M, Montavon PM. Relationships of body weight, body size, subject velocity, and vertical ground reaction forces in trotting dogs. *Vet Sur.* 2010;39(7):863-869. doi: 10.1111/j.1532-950X.2010.00729.x
- Helmsmüller D, Anders A, Nolte I, Schilling N. Ontogenetic change of the weight support pattern in growing dogs. *J Exp Zool A Ecol Genet Physiol.* 2014;321(5):254-264. doi: 10.1002/jez.1856
- Layer AF. *Ganganalytische Untersuchung der Rückenbewegung von gesunden Hunden der Rassen Dackel und Labrador Retriever.* PhD dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München; 2012.
- Fuchs A, Goldner B, Nolte I, Schilling N. Ground reaction force adaptations to tripedal locomotion in dogs. *Vet J.* 2014;201(3):307-315. doi: 10.1016/j.tvjl.2014.05.012
- Hutton WC, Freeman MA, Swanson SA. The forces exerted by the pads of the walking dog. *J Small Anim Pract.* 1969;10(2):71-77. doi: 10.1111/j.1748-5827.1969.tb04022.x
- Leach D, Sumner-Smith G, Dagg AI. Diagnosis of lameness in dogs: a preliminary study. *Can Vet J.* 1977;18(3):58-63.
- Raith AK. *Das ganganalytische Profil des Deutschen Schäferhundes: Eine Reevaluierung.* PhD dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität München; 2010.
- Biknevicius AR HR, Dankosi E. Effects of ontogeny on locomotor kinetics. *J Morph.* 1997;232(3):235.
- Hawthorne AJ, Booles D, Nugent PA, et al. Body-weight changes during growth in puppies of different breeds. *J Nutr.* 2004;134(8):2027S-2030S. doi: 10.1093/jn/134.8.2027S
- Krotscheck U, Todhunter RJ, Nelson SA, Sutter NB, Mohammed HO. Precision and accuracy of ground reaction force normalization in a heterogeneous population of dogs. *Vet Surg.* 2014;43(4):437-445. doi: 10.1111/j.1532-950X.2014.12176.x
- Alexander RM. The gaits of bipedal and quadrupedal animals. *Int J Robot Res.* 1984;3(2):52.
- Matthews J, Altman D, Campbell M, Royston P. Analysis of serial measurements in medical research. *BMJ.* 1990;300:230-235. doi: 10.1136/bmj.300.6719.230
- Pruessner JC, Kirschbaum C, Meinlschmid G, et al. Two formulas for computation of the area under the curve represent measures of total hormone concentration versus time-dependent change. *Psychoneuroendocrinology.* 2003;28(7):916-931. doi: 10.1016/s0306-4530(02)00108-7
- Rumph PF, Steiss JE, West MS. Interday variation in vertical ground reaction force in clinically normal Greyhounds at the trot. *Am J Vet Res.* 1999;60(6):679-683.
- Górska T, Czarkowska J. Motor cortex development in the dog: some cortical stimulation and behavioral data. *Neuroscience.* 1978;3(1):129-131.
- Helmsmüller D, Wefstaedt P, Nolte I, Schilling N. Ontogenetic allometry of the Beagle. *BMC Vet Res.* 2013;9(1):203. doi: 10.1186/1746-6148-9-203
- LeQuang T, Maitre P, Colin A, Roger T, Viguier E. *Gait analysis for sound dogs at a walk by using a pressure walkway.* In: Toi VV, Khoa TQD, eds. *Third International Conference on the Development of Biomedical Engineering in Vietnam.* Springer; 2010:62-66.

Supplementary Materials

Supplementary materials are posted online at the journal website: avmajournals.avma.org

IV. DISKUSSION

Die kinetische Ganganalyse ist eine etablierte Methode, um einerseits das Gangbild des gesunden, erwachsenen Hundes zu evaluieren und um Lahmheiten zu diagnostizieren sowie als Verlaufskontrolle nach orthopädischen Eingriffen (Budsberg et al. 1987, Besancon et al. 2004, Voss et al. 2008, Druen et al. 2012). Der Hund im Wachstum wurde bisher nur in vier Studien bezüglich kinetischer Parameter untersucht (Biknevicius et al. 1997, Bertram et al. 2000, Helmsmüller et al. 2014, Barthélémy et al. 2011). Diese Studien verwendeten zum Teil sehr unterschiedliche methodische Ansätze der Datenerhebung und -analyse. Beispielsweise wurden instrumentierte Laufbänder mit implementierten Kraftmessplatten, stationäre Kraftmessplatten im Laborboden als auch 3-Achsen-Beschleunigungssensoren zur Datenerhebung verwendet. Zudem zeigen sich deutliche Unterschiede bezüglich der zeitlichen Abfolge der Messzeitpunkte, des Umfangs der durchgeführten Erhebungen pro Messzeitpunkt und untersuchtem Hund sowie in den untersuchten Hunderassen und den jeweiligen Lebensmonaten der Probanden. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Studienlage zu den kinetischen Parametern des Hundes im Wachstum sehr heterogen ist und die publizierte Literatur nur eingeschränkt mit denen im Rahmen dieser Dissertation erzielten Erkenntnisse zu vergleichen sind.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden Referenzwerte für den Hund im Wachstum anhand der mittelgroßen Rasse Beagle und der großen Rasse Foxhound-Boxer-Ingelheim Labrador Retriever (FBI) erhoben, die Entwicklung verschiedener kinetischer Parameter über die Zeit sowie in Abhängigkeit von den Gangarten Schritt und Trab beschrieben und analysiert.

Die PVF-, VI-, ST-, TOO- und BWD-Werte der Vordergliedmaßen waren stets höher als die der Hintergliedmaßen. Somit wurde bestätigt, dass auch Hunde im Wachstum während des gesamten Untersuchungszeitraumes einen größeren Anteil des Körpergewichtes auf den Vordergliedmaßen tragen. Zahlreiche kinetische Studien beschrieben die Dominanz der Vordergliedmaßen beim adulten Hund (Hutton et al. 1969, Roy 1971, Budsberg et al. 1987, Mölsä et al. 2010, Raith 2010, Voss et al. 2011, Layer 2012, Fuchs et al. 2014). In den erwähnten Studien zu Hunden im Wachstum wurden vergleichbare Ergebnissen beschrieben (Biknevicius et al. 1997, Bertram et al. 2000, Barthélémy et al. 2011, Helmsmüller et al. 2014).

Über den Untersuchungszeitraum konnte für beide Rassen eine signifikante Steigerung des von den Vordergliedmaßen getragenen Gewichtes im Trab gezeigt werden. Die Ergebnisse der Studie von Helmsmüller et al. (2014) wurden somit bestätigt und um eine weitere Hunderasse ergänzt. Helmsmüller et al. (2014) diskutierten drei mögliche Ursachen für eine Gewichtsverlagerung. Die Auswertung der morphometrischen Daten der Studie von Helmsmüller et al. (2014) ergab über die Zeit vermehrt gestreckte Hintergliedmaßen im Vergleich zu den Vordergliedmaßen. Außerdem wurden die Vordergliedmaßen weniger protrahiert und der Körperstamm änderte sich von zylindrisch zu konisch. Im Schritt konnte in der vorliegenden Studie im Vergleich zu den Ergebnissen von Helmsmüller et al. (2014) keine Gewichtsverlagerung nach kranial nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu wurde für die Gangart Schritt ein signifikanter Anstieg von PVF-Werten der Hintergliedmaßen über die Zeit gezeigt. Dieses Ergebnis stimmt mit der Untersuchung von Hunden im Wachstum im Schritt von Biknevičius et al. (1997) überein. Bertram et al. (2000) beschrieben im Vergleich höhere PVF-Werte der Hintergliedmaßen für langbeinige Greyhounds als für kompaktere Labrador Retriever. Somit bilden die im Vergleich über den Studienzeitraum länger werdenden Gliedmaßen der Hunde im Wachstum in der vorliegenden Studie und der Studie von Biknevičius et al. (1997), sowie die im Vergleich mit Labrador Retrievern längeren Gliedmaßen der Greyhounds einen möglichen Erklärungsansatz für den Anstieg der PVF-Werte der Hintergliedmaßen. Die von Helmsmüller et al. (2014) beschriebene vermehrte Streckung der Hintergliedmaßen über den Studienzeitraum bietet wiederum einen Erklärungsansatz für den Unterschied zwischen den PVF-Werten der Vordergliedmaßen zu den PVF-Werten der Hintergliedmaßen.

Für die Lebenswoche 78 wurden in der vorliegenden Studie sowohl für die Beagles als auch für die FBIs BRK- und davon abgeleitete zeitliche Variablen-Werte erhoben, die mit denen von adulten Hunden vergleichbar waren (Bertram et al. 2000, Besancon et al. 2004, Mölsä et al. 2010, Fuchs et al. 2014). Die untersuchten Hunde erreichten zudem eine vergleichbare Körpergröße, aber ein noch nicht vergleichbares Gewicht in Bezug auf den Rassestandard adulter Beagles. Helmsmüller et al. (2014) kamen zu einem vergleichbaren Ergebnis, die Beagles waren zum Ende des Untersuchungszeitraumes in Lebenswoche 60 in Hinsicht auf die Körpergröße ausgewachsen, ihr erwartetes adult-Körpergewicht hatten sie

jedoch noch nicht erreicht.

Neben der Erhebung von Referenzwerten für Hunde einer mittelgroßen und einer großen Rasse wurden zudem die kinetischen Parameter zwischen den Rassen verglichen. In der Literatur wurden die Vergleichbarkeit von BRK zwischen Rassen mit unterschiedlichen Körperformen mehrfach kritisch diskutiert und Empfehlungen für rassespezifische Referenzwert-Datenbanken ausgesprochen (Budsberg et al. 1987, Bertram et al. 2000, Lequang 2009, Mölsä et al. 2010, Kim et al. 2011). Um BRK unterschiedlicher Rassen vergleichen zu können, empfahlen Voss et al. (2011) eine Normalisierung der BRK auf die Körpergröße. Dieses Verfahren wurde in der vorliegenden Studie nicht angewendet, da die Veränderung des Körperbaues als wichtiger Parameter in der Beschreibung der Entwicklung der BRK erhalten bleiben musste. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkung in der Vergleichbarkeit zwischen den Rassen sollten die signifikanten Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden.

Der Vergleich der BRK zwischen den Rassen zeigte signifikant geringere ST-Werte für die Vordergliedmaßen im Schritt bezüglich der FBI Gruppe versus der Beagle Gruppe. Die Werte für PVF und TOO der Vordergliedmaßen waren im Trab in der FBI Gruppe signifikant höher als in der Beagle Gruppe. In den Studien von Budsberg et al. (1987) und Mölsä et al. (2010) wurden jeweils Hunde großer Rassen miteinander verglichen. Beide Studien kamen zu gegenteiligen Ergebnissen im Vergleich zur vorliegenden Studie; sie zeigten eine negative Korrelation zwischen Körpergröße und Gewicht mit PVF-Werten und eine positive Korrelation mit VI-, ST- und TOO-Werten. In der Studie von Lequang et al. (2009) wurden Beagles und Labrador Retriever untersucht und diese kamen zu vergleichbaren Ergebnissen wie die vorliegende Studie bezüglich PVF und ST bei adulten Beagles und Labrador Retrievern im Schritt; Beagles hatten signifikant niedrigere PVF- und höhere ST-Werte für die Vordergliedmaßen im Vergleich zu Labrador Retrievern. Kim et al. (2011) verglichen eine Gruppe kleiner Hunde (<10kg) mit einer Gruppe großer Hunde (>25kg) und kamen zu ähnlichen Ergebnissen wie Lequang et al. (2009) und die vorliegende Studie; die kleineren Hunde wiesen signifikant niedrigere VI-, ST- und Schwungphasendauer-Werte im Vergleich zu den größeren Hunden auf. Für die kleinen Hunde konnte eine signifikant positive Korrelation zwischen ST und Schwungphasendauer mit dem Körpergewicht gezeigt werden. Für große Hunde bestätigten Lequang et al. (2009) die von Budsberg et al. (1987) und Mölsä et al.

(2010) gefundene negative Korrelation zwischen PVF und dem Körpergewicht. Alle genannten Studien zeigten bei gleicher Geschwindigkeit eine höhere Kadenz bei kleineren Hunden im Vergleich zu größeren Hunden. Bei der Interpretation von Vergleichen von BRK und den davon abgeleiteten zeitlichen Variablen zwischen Hunderassen sollte somit insbesondere der absolute Unterschied in Körpergröße und Körpergewicht zwischen den Rassen in Betracht gezogen werden.

Studien zu adulten Hunden zeigten eine vermehrt kranial liegende BWD für Beagles (ca. 60% auf den Vordergliedmaßen) im Vergleich zu Labrador Retrievern (ca. 58% auf den Vordergliedmaßen) in der Gangart Trab (Layer 2012, Fuchs et al. 2014). In der vorliegenden Studie wurden keine signifikanten Unterschiede für die BWD zwischen den Beagles ($58.99\% \pm 1.37$) und den FBIs ($60.16\% \pm 1.36$) in Lebenswoche 78 gezeigt. Die BWD ist abhängig von der exakten Lage des Körperschwerpunktes des Hundes und der Körperschwerpunkt des Hundes ist wiederum abhängig vom Körperbau und damit der Hunderasse (Budsberg et al. 1987, Larche 1962, Roy 1971). Zu beachten gilt in diesem Zusammenhang, dass der FBI ein Mischling aus Labrador Retriever und zwei weiteren Rassen (Foxhound und Boxer) mit einem tiefen Brustkorb ist. Somit weist der FBI unter Umständen einen leicht vom Labrador Retriever abweichenden Körperbau auf. Lee et al. (1999) beschrieben, dass Hunde häufig beschleunigende und verlangsamende Komponenten innerhalb eines Schrittes mischen, was einen deutlichen Einfluss auf die Verteilung der PVF zwischen den Vorder- und Hintergliedmaßen zur Folge hat und somit einen weiteren möglichen Erklärungsansatz für Differenzen in der BWD liefert.

Die Analyse der Froude Number ergab einen signifikanten Unterschied zwischen der gelaufenen Geschwindigkeit in Lebenswoche 10 zu allen folgenden Untersuchungszeitpunkten. Die absolute gelaufene Geschwindigkeit war somit in Lebenswoche 10 signifikant geringer als zu den späteren Untersuchungszeitpunkten. Aufgrund der steigenden Körpergröße musste die für den jeweiligen Hund adäquate Geschwindigkeit zu jedem Untersuchungszeitpunkt neu bestimmt werden. Die Autorin der vorliegenden Studie richtete sich dabei grob nach den in vorangegangenen Studien beschriebenen Geschwindigkeiten in Schritt und Trab und passte die Geschwindigkeit kleinschrittig an die individuellen Bedürfnisse der Hunde an. Der Studie von Górska et al. (1978) zufolge dauert die Entwicklung des motorischen Cortex des juvenilen Hundes bis zum vollendeten

dritten Lebensmonat und war somit zum ersten Untersuchungszeitpunkt möglicherweise noch nicht vollständig abgeschlossen. Die Entwicklung des motorischen Kortex könnte somit ein entscheidender Faktor für die Fähigkeit des Hundes sein, die Gliedmaßen bei höheren Geschwindigkeiten zu koordinieren.

Vorangegangene Studien beschrieben einen bedeutenden Einfluss der Geschwindigkeit auf die BRK (Roush und McLaughlin 1994). Adulte Hunde erreichten bei höherer gelaufener Geschwindigkeit höhere PVF-Werte und geringere VI-, ST- und TOO-Werte (Riggs et al. 1993, Roush und McLaughlin 1994, Mölsä et al. 2010). Aufgrund dieser Zusammenhänge beim adulten Hund liegt die Annahme nahe, dass die in der vorliegenden Studie berichtete Erhöhung von PVF über die Zeit vor allem durch eine Erhöhung der gelaufenen Geschwindigkeit verursacht wurde. Gegensätzlich zum adulten Hund stiegen in der vorliegenden Studie zusätzlich zu den PVF-Werten auch die Werte für VI, ST und TOO. Helmsmüller et al. (2014) berichteten ebenfalls steigende Werte für VI, ST und TOO beim Beagle im Wachstum. Somit lässt sich argumentieren, dass die Veränderungen der BRK in der vorliegenden Studie nicht voranging durch eine Steigerung der Geschwindigkeit bedingt wurde, sondern deren ontogenetische Entwicklung abzubilden scheint.

Im Rahmen der vorliegenden Studie zum Hund im Wachstum sind verschiedene Limitationen zu berücksichtigen. Als eine wesentliche Limitation der vorliegenden Studie ist die geringe Probandenzahl anzusehen. Für die angewendete statistische Methode der Analyse der Area Under the Curve waren jeweils vollständige Datenerhebungen der einzelnen Hunde an allen sechs Untersuchungszeitpunkten notwendig. Von den ursprünglich im Studiendesign vorgesehenen 14 Beagles und 11 FBIs konnten aufgrund dessen nur die Daten von vier Beagles und acht FBIs, für die vollständige Datensätze vorlagen, zur weiteren statistischen Auswertung verwendet werden. Die Gründe für das temporäre oder endgültige Ausscheiden aus der Studie variierten von gesundheitlichen Ursachen, über Vermittlung der Hunde an Privatpersonen bis hin zur Verweigerung des Laufens auf dem instrumentierten Laufband. Insbesondere die signifikanten Ergebnisse der Beagles sollten aufgrund der niedrigen Probandenzahl mit Vorsicht betrachtet werden. Das Handling der Hunde auf dem instrumentierten Laufband konnte nicht zu allen Messzeitpunkten einheitlich durchgeführt werden: je jünger und kleiner die Hunde waren, desto schwieriger war das Handling. Das traf insbesondere auf die Beagles und die

Untersuchung in Lebenswoche 10 zu. Das Ziel beim Führen der Hunde auf dem Laufband war es, eine möglichst große Anzahl an aufeinanderfolgenden, gültigen Schritten pro Hund zu erreichen. Ein Schritt galt dann als gültig, wenn der Fuß des Hundes auf der jeweils passenden der vier Kraftmessplatten aufsetzte. Diese Unregelmäßigkeit im Gangbild der juvenilen und kleinen Hunde erschwerte die Auswahl gültiger Schritte, was sich wiederum auf die anschließende Auswertung der gewonnenen Daten auswirkte und was als möglicher Einflussfaktor für die Datenqualität zu betrachten ist. Helmsmüller et al. (2014) berichteten ebenfalls eine höhere Varianz im Gangbild insbesondere von Hunden im Wachstum. Die Studie von Górska et al. (1978) zur Entwicklung des motorischen Cortex des juvenilen Hundes bietet einen möglichen Erklärungsansatz für die Unregelmäßigkeit im Gangbild. Lequang et al. (2009) beschrieben eine höhere Varianz für die kinetischen Parameter bei adulten Beagles im Vergleich zu Labrador Retrievern, die Datenerhebung und Auswertung war mit den kleineren Beagles schwieriger und langwieriger. Weitere mögliche Faktoren für die höhere Varianz der Werte in der vorliegenden Studie könnten somit die absolute Körpergröße der Hunde oder das Temperament der Beagles sein. Um einen Wurf von drei FBIs in die Auswertung mit einzubeziehen, wurde deren erste Untersuchung im Alter von 14 anstatt 10 Lebenswochen durchgeführt. Alle weiteren Untersuchungen fanden exakt zu den im Studiendesign definierten Zeitpunkten statt.

Sowohl Hunde mittelgroßer Rassen als auch die Gangart Schritt sind in der Literatur zur kinetischen Ganganalyse deutlich seltener beschrieben als große Rassen und die Gangart Trab (DeCamp et al. 1993, Riggs et al. 1993, Rumpf et al. 1999, Bertram et al. 2000, Colborne et al. 2006, Mölsä et al. 2010). Die vorliegende Studie kann in diesem Kontext durch die Erhebung, Beschreibung und Analyse der umfangreichen Referenzwerte als ein Beitrag zur Erweiterung der Grundlagenforschung im Fachgebiet der Ganganalyse des Hundes angesehen werden. Weitere Ganganalysen zum Hund im Wachstum, sowohl im Schritt als auch für mittelgroße Rassen, sollten in zukünftigen Studien adressiert werden, um die in der vorliegenden Studie beschriebenen Erkenntnisse zu bestätigen und die Datenlage um weitere Referenzwerte zu vergrößern.

V. ZUSAMMENFASSUNG

Der adulte, gesunde Hund wurde in der Literatur der instrumentierten Ganganalyse bereits ausführlich beschrieben. Zum Hund im Wachstum wurden bisher nur wenige Studien veröffentlicht. Die Ziele der vorliegenden Arbeit waren die Beschreibung der Entwicklung der kinetischen Parameter beim gesunden Hund im Wachstum. Die erhobenen Daten sollten für künftige Studien den Zugang zu Referenzwerten für den Hund im Wachstum ermöglichen.

Acht Foxhound-Boxer-Ingelheim-Labrador Retriever (FBI), und vier Beagles wurden sechs Mal im Alter zwischen 10 und 78 postnatalen Wochen (PW) jeweils in den Gangarten Schritt und Trab untersucht. Folgende kinetische Parameter wurden erhoben: Vertikale Spitzenkraft (Peak Vertikal Force, PVF), Vertikaler Impuls (VI), Standphasendauer (Stance Time, ST), Time Of Occurrence (TOO) und Körpergewichtsverteilung (Bodyweight Distribution, BWD). Die Daten wurden zu Vorder- (Thoracic Limb, TL) und Hintergliedmaßen (Pelvic Limb, PL) zusammengefasst. Die dimensionslose Froude Number wurde errechnet.

In der vorliegenden Studie wurden kinetische Referenzwerte für Hunde im Wachstum der Rassen Beagle und FBI in den Gangarten Schritt und Trab erhoben.

Alle kinetischen Parameter waren zu allen Untersuchungszeitpunkten für beide Rassen und in beiden Geschwindigkeiten auf den TL höher als auf den PL.

Die Ergebnisse in der Gangart Schritt: PVF PL war in PW 10 und 17 signifikant geringer als in PW 78; VI PL war in PW 17 signifikant geringer als in PW 78; TOO TL war in PW 26 signifikant geringer als in PW 78; VI PL, ST TL, ST PL waren beim FBI signifikant geringer als beim Beagle; TOO TL war beim FBI signifikant höher als beim Beagle.

Die Ergebnisse in der Gangart Trab: PVF TL, VI PL, ST PL, und TOO PL waren in PW 10 signifikant geringer als in PW 78; VI TL und TOO TL waren in PW 10 und 17 signifikant geringer als in PW 78; BWD TL war in PW 10 signifikant geringer als in PW 78; PVF TL und PVF PL waren beim FBI signifikant höher im Vergleich zum Beagle.

Für den Beagle bezüglich beider Gangarten wurde ein signifikanter Unterschied in der Froude Number zwischen PW 10 und allen folgenden PWs gezeigt. Für den FBI bezüglich der Gangart Schritt wurde ein signifikanter Unterschied in der

Froude Number zwischen PW 10 und allen folgenden PWs, sowie in der Gangart Trab zwischen PW 10 und 17 und allen folgenden PWs gezeigt.

Eine maßgebliche Limitation der vorliegenden Studie war die geringe Probandenzahl. Zukünftige Studien mit höherer Probandenzahl und weiteren Hunderassen sind notwendig, um eine größere Bandbreite kinetischer Referenzwerte für den Hund im Wachstum zu ermöglichen.

VI. SUMMARY

The adult, healthy dog has been described in detail in the literature of the computer-assisted gait analysis. Only a few studies in respect to the growing dog have been published. The objectives of the present study were to describe the development of kinetic parameters in the healthy growing dog. The collected data provided future studies access to reference values for the growing dog.

Eight Foxhound-Boxer-Ingelheim-Labrador Retrievers (FBI), and four Beagles were examined six times between 10 and 78 postnatal weeks (PW), each at walking and trotting gait. The following kinetic parameters were collected: Peak Vertical Force (PVF), Vertical Impulse (VI), Stance Phase Duration (Stance Time, ST), Time Of Occurrence (TOO), and Bodyweight Distribution (BWD). Data were summarized to thoracic limb (TL) and pelvic limb (PL). The dimensionless Froude Number was calculated.

The present study collected kinetic reference values for growing dogs of the breeds Beagle and FBI in the walking and trotting gait during their growth period.

During the study period, all kinetic parameters were higher on the TL than on the PL for both breeds and at both velocities.

Results concerning walking gait: PVF PL was significantly lower in PW 10 and 17 than in PW 78; VI PL was significantly lower in PW 17 than in PW 78; TOO TL was significantly lower in PW 26 than in PW 78; VI PL, ST TL, ST PL were significantly lower in the FBI group than in the Beagle group; TOO TL was significantly higher in the FBI group than in the Beagle group.

Results concerning trotting gait: PVF TL, VI PL, ST PL, and TOO PL were significantly lower in PW 10 than in PW 78; VI TL and TOO TL were significantly lower in PW 10 and 17 than in PW 78; BWD TL was significantly lower in PW 10 than in PW 78; PVF TL and PVF PL were significantly higher in the FBI group compared to the Beagle group.

For the Beagles, regarding both gaits, a significant difference in the Froude Number was reported between PW 10 and all subsequent PWs. For the FBIs, a significant difference in Froude Number was reported between PW 10 and all following PWs regarding walking gait, and between PW 10 and 17 and all following PWs regarding

trotting gait.

A significant limitation of the present study was the small number of subjects. Future studies with higher numbers of subjects and additional breeds of dogs are needed to provide a wider range of kinetic reference values for the growing dog.

VII. LITERATURVERZEICHNIS

Alexander RM

The Gaits of Bipedal and Quadrupedal Animals.

J Rob Res 1984; 3: 49-59.

Barthélémy I, Barrey E, Aguilar P, Uriarte A, Le Chevoir M, Thibaud JL, Voit T, Blot S, Hogrel JY

Longitudinal ambulatory measurements of gait abnormality in dystrophin-deficient dogs.

BMC Musculoskelet Disord 2011; 12: 75.

Bertram JE, Lee DV, Case HN, Todhunter RJ

Comparison of the trotting gaits of Labrador Retrievers and Greyhounds.

Am J Vet Res 2000; 61: 832-838.

Besancon MF, Conzemius MG, Evans RB, Ritter MJ

Distribution of vertical forces in the pads of Greyhounds and Labrador Retrievers during walking.

Am J Vet Res 2004; 65: 1497-1501.

Biknevičius AR, Heinrich RE, Dankosi E

Effects of ontogeny on locomotor kinetics.

J Morphol 1997; 232: 235.

Bockstahler BA, Skalicky M, Peham C, Muller M, Lorinson D

Reliability of ground reaction forces measured on a treadmill system in healthy dogs.

Vet J 2007; 173: 373-378.

Brebner NS, Moens NMM, Runciman JR

Evaluation of a treadmill with integrated force plates for kinetic gait analysis of sound and lame dogs at a trot.

Vet Comp Orthop Traumatol 2006; 19: 205-212.

Budsberg SC, Verstraete MC, Soutas-Little RW

Force plate analysis of the walking gait in healthy dogs.

Am J Vet Res 1987; 48: 915-918.

Colborne GR, Walker AM, Tattersall AJ, Fuller CJ

Effect of trotting velocity on work patterns of the hind limbs of Greyhounds.

Am J Vet Res 2006; 67: 1293-1298.

DeCamp CE

Kinetic and kinematic gait analysis and the assessment of lameness in the dog.

Vet Clin N Am 1997; 27: 825-840.

Druen S, Boddeker J, Meyer-Lindenberg A, Fehr M, Nolte I, Wefstaedt P

Computer-based gait analysis of dogs: Evaluation of kinetic and kinematic parameters after cemented and cementless total hip replacement.

Vet Comp Orthop Traumatol 2012; 25: 375-384.

Fox M. W.

The development and clinical significance of muscle tone and posture in the neonate dog.

Am J Vet Res 1963; 24: 1232-1239.

Fox M. W.

The ontogeny of behaviour and neurologic responses in the dog.

Anim Behav 1964; 12: 301-311.

Fuchs A, Goldner B, Nolte I, Schilling N

Ground reaction force adaptations to tripedal locomotion in dogs.

Vet J 2014; 201: 307-315.

Gillette RL, Angle TC

Recent developments in canine locomotor analysis: A review.

Vet J 2008; 178: 165-176.

Górska T, Czarkowska J.

Motor cortex development in the dog. Some cortical stimulation and behavioral data.

Neuroscience 1978; 3: 129-131.

Helmsmüller D, Anders A, Nolte I, Schilling N.

Ontogenetic change of the weight support pattern in growing dogs.

J. Exp. Zool. A: Ecol. Integr. Physiol. 2014; 321: 254-264.

Hutton WC, Freeman MA, Swanson SA

The forces exerted by the pads of the walking dog.

J Small Anim Pract 1969; 10: 71-77.

James, W.T. (1952a)

Observations in behavior of new-born puppies: I. Method of measurement and types of behavior involved.

J Genet Psychol 1952; 80: 65-73.

James, W.T. (1952b)

Observations in behavior of new-born puppies: II. Summary of movements involved in group orientation.

J Comp Physiol Psychol 1952; 45: 329-335.

Kim J, Kazmierczak KA, Breur GJ

Comparison of temporospatial and kinetic variables of walking in small and large dogs on a pressure-sensing walkway.

Am J Vet Res 2011; 72: 1171-1177.

Krotscheck U, Todhunter RJ, Nelson SA, Sutter NB, Mohammed HO

Precision and accuracy of ground reaction force normalization in a heterogeneous population of dogs.

Vet Surg 2014; 43: 437-445.

Larche WD

Der Einfluss mechanischer und funktioneller Faktoren auf das Angehen des Hundes.

Diss. med. vet. 1962. JLU Gießen.

Layer AF

Ganganalytische Untersuchung der Rückenbewegung von gesunden Hunden der Rassen Dackel und Labrador Retriever.

Diss. med. vet. 2012. LMU München.

Leach D, Sumner-Smith G, Dagg AI

Diagnosis of lameness in dogs: a preliminary study.

CNVJA 1977; 18: 58-63.

Lee DV, Bertram JE, Todhunter RJ

Acceleration and balance in trotting dogs.

J Exp Biol 1999; 202: 3565-3573.

Lequang T, Maitre, P., Roger, and Eric Viguier

Is a Pressure Walkway System Able to Highlight a Lameness in Dog?

J Amin Vet Adv; 2009: 1936-1944.

McLaughlin RM, Jr., Roush JK

Effects of subject stance time and velocity on ground reaction forces in clinically normal greyhounds at the trot.

Am J Vet Res 1994; 55: 1666-1671.

Mölsä SH, Hielm-Björkman AK, Laitinen-Vapaavuori OM

Force Platform Analysis in Clinically Healthy Rottweilers: Comparison with Labrador Retrievers.

Vet Surg 2010; 39: 701-707.

Off W, Matis U

Gait analysis in dogs.

Tierärztl Prax 1997; 25: 8-14.

Pietsch S, Steigmeier-Raith S, Reese S, Meyer-Lindenberg A

Reliability of range-of-motion measurements of healthy dogs examined while walking on a treadmill.

Am J Vet Res 2021; 82: 897-902.

Raith AK

Das ganganalytische Profil des Deutschen Schäferhundes - Eine Reevaluierung.

Diss. med. vet. 2010. LMU München.

Riggs CM, DeCamp CE, Soutas-Little RW, Braden TD, Richter MA

Effects of subject velocity on force plate-measured ground reaction forces in healthy greyhounds at the trot

Am J Vet Res 1993; 54: 1523-1526.

Roush JK, McLaughlin RM, Jr

Effects of subject stance time and velocity on ground reaction forces in clinically normal greyhounds at the walk. Am J Vet Res 1994; 55: 1672-1676.

Roy WE

Examination of the canine locomotor system.

Vet Clin North Am 1971; 1: 53-70.

Rumph PF, Lander JE, Kincaid SA, Baird DK, Kammermann JR, Visco DM

Ground reaction force profiles from force platform gait analyses of clinically normal mesomorphic dogs at the trot.

Am J Vet Res 1994; 55: 756-761.

Rumph PF, Steiss JE, West MS

Interday variation in vertical ground reaction force in clinically normal Greyhounds at the trot.

Am J Vet Res 1999; 60: 679-683.

Seiferle E, Frewein J

Aktiver Bewegungsapparat, Muskelsystem.

In: Frewein J, Wille K-H and Wilkens H: Lehrbuch der Anatomie der Haussäugetiere, Band I Bewegungsapparat

Stuttgart: Parey; 2004

Voss K, Imhof J, Kaestner S, Montavon PM

Force plate gait analysis at the walk and trot in dogs with low-grade hindlimb lameness.

Vet Comp Orthop Traumatol 2007; 20: 299-304.

Voss K, Damur DM, Guerrero T, Haessig M, Montavon PM

Force plate gait analysis to assess limb function after tibial tuberosity advancement in dogs with cranial cruciate ligament disease.

Vet Comp Orthop Traumatol 2008; 21: 243-249.

Voss K, Galeandro L, Wiestner T, Haessig M, Montavon PM

Relationships of Body Weight, Body Size, Subject Velocity, and Vertical Ground Reaction Forces in Trotting Dogs. Veterinary Surgery 2010; 39: 863-869.

Voss K, Wiestner T, Galeandro L, Hässig M, Montavon PM

Effect of dog breed and body conformation on vertical ground reaction forces, impulses, and stance times

Vet Comp Orthop Traumatol 2011; 24: 106-112.

VIII. DANKSAGUNG

Herzlichen Dank an Frau Prof. Dr. med. vet. Meyer-Lindenberg für die Überlassung dieses spannenden Themas, das Vertrauen und die Unterstützung während der gesamten Promotionszeit.

Ein besonderes Dankeschön an Steffi für deine Geduld, dein ganzes Wissen und die langjährige Betreuung über alle Grenzen hinweg.

Ein riesiger Dank gilt auch Herrn PD Dr. med. vet. Reese für die Ideengebung und den statistischen Feinschliff.

Vielen Dank an Frau Dr. med. vet. Dobenecker und den Lehrstuhl für Tierernährung und Diätetik für die Bereitstellung der FBI und Beagle Hunde und ein ganz besonderes Dankeschön an das Team der Außenstelle Oberwiesenfeld für die tatkräftige Unterstützung.

Ein großer Dank gilt auch dem Team der Chirurgischen und Gynäkologischen Kleintierklinik für die Unterstützung am Laufband.

Beste Mama, beste Omi, beste Freundin, du bist alles in einer Person. Du bist immer für mich da, ich kann dir nie genug danken.

Und Christoph mein Motivator, mein schärfster Kritiker, mein Lektor, mein wissenschaftliches Vorbild, mein Ehemann. Du hältst mir immer den Rücken frei. Danke, dass du an meiner Seite bist.