

DENNIS GLUDING

PRÄVALENZ, KLASSIFIZIERUNG UND  
ERBLICHKEIT VERSCHIEDENER TYPEN VON  
LUMBOSAKRALEN ÜBERGANGSWIRBELN BEIM  
DEUTSCHEN SCHÄFERHUND



Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Grades eines  
Dr. med. vet.  
beim Fachbereich Veterinärmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen



*édition scientifique*   
VVB LAUFERSWEILER VERLAG

**Das Werk ist in allen seinen Teilen urheberrechtlich geschützt.**

**Die rechtliche Verantwortung für den gesamten Inhalt dieses Buches liegt ausschließlich bei dem Autoren dieses Werkes.**

Jede Verwertung ist ohne schriftliche Zustimmung der Autoren oder des Verlages unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in und Verarbeitung durch elektronische Systeme.

1. Auflage 2019

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the Authors or the Publisher.

1<sup>st</sup> Edition 2019

© 2019 by VVB LAUFERSWEILER VERLAG, Giessen  
Printed in Germany



*édition scientifique*  
**VVB LAUFERSWEILER VERLAG**

STAUFENBERGRING 15, 35396 GIESSEN, GERMANY  
Tel: 0641-5599888 Fax: 0641-5599890  
email: [redaktion@doktorverlag.de](mailto:redaktion@doktorverlag.de)

[www.doktorverlag.de](http://www.doktorverlag.de)

Aus dem Klinikum Veterinärmedizin  
Klinik für Kleintiere – Chirurgie  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Betreuer: Prof. Dr. Dr. h. c. Martin Kramer

**Prävalenz, Klassifizierung und Erbllichkeit verschiedener Typen von  
lumbosakralen Übergangswirbeln beim Deutschen Schäferhund**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Grades eines

Dr. med. vet.

beim Fachbereich Veterinärmedizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

eingereicht von

**Dennis Gluding**

Tierarzt aus Neunkirchen/Saar

Gießen 2019

Mit Genehmigung des Fachbereichs Veterinärmedizin  
der Justus-Liebig-Universität Gießen

Dekan: Prof. Dr. Dr. h. c. Martin Kramer

Gutachter: Prof. Dr. Dr. h. c. Martin Kramer

Prof. Dr. Sabine Wenisch

Tag der Disputation: 16.07.2019

***gewidmet  
meiner Familie***

# 1 INHALTSVERZEICHNIS

1	INHALTSVERZEICHNIS .....	I
2	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	IV
3	TABELLENVERZEICHNIS .....	VI
4	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VIII
5	EINLEITUNG.....	1
6	LITERATURÜBERSICHT .....	3
6.1	Entwicklung der Wirbelsäule .....	3
6.2	Anatomie des lumbosakralen Überganges .....	5
6.2.1	Knöchernen Strukturen .....	5
6.2.2	Verbindungen der Knochen.....	9
6.2.3	Kaudale neuronale Strukturen.....	10
6.3	Biomechanik des lumbosakralen Überganges.....	12
6.4	Lumbosakrale Übergangswirbel (LÜW) .....	14
6.4.1	Definition und Klassifikation.....	14
6.4.2	Entstehungshypothesen der LÜW .....	16
6.4.3	Klinische Relevanz.....	17
6.4.4	Vorstudien über lumbosakrale Übergangswirbel .....	23
6.5	Nachweis von LÜW .....	25
6.5.1	HD-Röntgen .....	26
6.5.2	Röntgenmerkmale von LÜW .....	27
6.5.3	Weiterführende Diagnostik beim Cauda equina Syndrom (CES).....	30
6.6	Genetische Grundlagen zu LÜW .....	33
6.7	Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden .....	34
6.8	Zucht.....	35
7	EIGENE UNTERSUCHUNGEN.....	39
7.1	Material und Methoden.....	39
7.1.1	Detaillierte morphologische Röntgenstudie (Studienteil A) .....	39

---

7.1.2	Screening-Studie (Studienteil B) .....	52
7.1.3	Statistische Auswertung und genetisch-statistische Analysen .....	53
8	ERGEBNISSE - DESKRIPTIVE STATISTIK.....	57
8.1	Ergebnisse des Studienteiles A.....	57
8.1.1	Morphologische Untersuchungsparameter .....	57
8.1.2	Klassifikation des LÜW-Typs.....	61
8.2	Ergebnisse des Studienteiles B.....	63
8.2.1	Klassifikation des LÜW-Typs.....	63
8.3	Vergleich der LÜW-Klassifikation beider Studienteile .....	65
8.4	Deskriptive Statistik der Nachkommenanalyse (Väter-Statistik).....	67
8.4.1	LÜW in der Nachkommenanalyse .....	67
8.4.2	Morphologische Untersuchungsparameter bei Nachkommen.....	68
9	ERGEBNISSE - GENETISCH-STATISTISCHE ANALYSEN.....	72
9.1	Lumbosakrale Übergangswirbel .....	72
9.1.1	Voranalysen .....	72
9.1.2	Genetische Parameterschätzungen .....	74
9.2	Morphologische Untersuchungsparameter .....	78
9.2.1	Voranalysen .....	78
9.2.2	Genetische Parameterschätzungen .....	81
10	DISKUSSION .....	84
10.1	Ziel der Studie.....	84
10.2	Röntgenaufnahmen als Grundlage für Screeningverfahren .....	85
10.3	Computertomographie im Rahmen eines Screeningverfahrens.....	86
10.4	Datenerhebung .....	87
10.5	Praktikabilität unterschiedlicher Klassifikationsverfahren von LÜW .....	88
10.6	Deskriptive Ergebnisse des Studienteiles A .....	88
10.7	Deskriptive Ergebnisse des Studienteiles B .....	93
10.8	Erkenntnisse aus der väterlichen Nachkommenstatistik .....	94
10.9	Ergebnisse der genetisch-statistischen Analysen.....	95

---

10.10	Einschränkungen der genetisch-statistischen Untersuchungen .....	97
10.11	Genetische Untersuchungen zur Hüftgelenkdysplasie .....	98
10.12	Ableitungen für die Zucht gegen LÜW .....	100
11	ZUSAMMENFASSUNG .....	102
12	SUMMARY .....	108
13	LITERATURVERZEICHNIS .....	113
14	ANHANG .....	127
15	DANKSAGUNG .....	137
16	ERKLÄRUNG .....	138

## 2 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

<i>Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anatomie des sechsten Lendenwirbels eines Hundes – Kraniale Aufsicht.....</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 2: Schematische Darstellung der Anatomie des sechsten und siebten Lendenwirbels eines Hundes – Kraniolaterale Aufsicht .....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 3 (A - C): Schematische Darstellungen der Anatomie des Kreuzbeines eines Hundes in verschiedenen Aufsichten.....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 4: Schematische Darstellung der Anatomie des lumbosakralen Überganges eines Hundes mit Darstellung der Cauda equina im Sagittalschnitt.....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 5: Mögliche Lokalisationen von Übergangswirbeln .....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 6: Magnetresonanztomographie der kaudalen Lendenwirbelsäule und des Kreuzbeines eines DSH mit Cauda equina Syndrom.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 7 (A, B): Lagerung eines DSH zur Durchführung einer Röntgenaufnahme des Beckens im ventrodorsalen Strahlengang.....</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 8 (A, B): Lagerung eines DSH zur Durchführung einer Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges im laterolateralen Strahlengang.....</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 9 (A - C): Dreidimensionale CT-Rekonstruktion eines lumbosakralen Übergangswirbels Typ III.....</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 10: Röntgenaufnahme des Beckens im ventrodorsalen Strahlengang in Position 1 mit gestreckten Hintergliedmaßen.....</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 11: Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges im laterolateralen Strahlengang.....</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 12: Röntgenaufnahme des Beckens im ventrodorsalen Strahlengang in Position 2 mit abduzierten Hintergliedmaßen .....</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 13: Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges zur Beurteilung der Dornfortsatztrennung im laterolateralen Strahlengang.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 14: Röntgenaufnahme mit geringgradigen morphologischen Veränderungen der Seitenteile .....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 15: Röntgenaufnahme mit mittel- bis hochgradigen morphologischen Veränderungen der Seitenteile .....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 16: Röntgenaufnahme mit angedeuteter Trennung der Wirbelkörper.....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 17: Röntgenaufnahme mit vollständiger Trennung der Wirbelkörper.....</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 18: Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ 0 im ventrodorsalen Strahlengang</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 19: Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ 0 im laterolateralen Strahlengang.</i>	<i>49</i>

<i>Abbildung 20: Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ I im ventrodorsalen Strahlengang.</i>	50
<i>Abbildung 21: Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ I im laterolateralen Strahlengang..</i>	50
<i>Abbildung 22: Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ II im ventrodorsalen Strahlengang</i>	51
<i>Abbildung 23: Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ III im ventrodorsalen Strahlengang</i>	51
<i>Abbildung 24: Relative (absolute) Häufigkeiten der verschiedenen Dornfortsatztrennungsgrade.....</i>	57
<i>Abbildung 25: Relative (absolute) Häufigkeiten der unterschiedlichen Morphologien der Seitenteile im Seitenvergleich.....</i>	58
<i>Abbildung 26: Relative (absolute) Häufigkeiten der unterschiedlichen Wirbelkörpertrennungsgrade.....</i>	60
<i>Abbildung 27: Relative (absolute) Häufigkeiten der LÜW-Typen in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie.....</i>	62
<i>Abbildung 28: Phänotypischer Trend der unterschiedlichen LÜW-Typen bei DSH der detaillierten morphologischen Röntgenstudie (Studienteil A).....</i>	62
<i>Abbildung 29: Relative (absolute) Häufigkeiten der LÜW-Typen in der Screening-Studie.....</i>	63
<i>Abbildung 30: Phänotypischer Trend der unterschiedlichen LÜW-Typen bei DSH der Screening-Studie (Studienteil B).....</i>	64
<i>Abbildung 31: Vergleich der LÜW-Klassifikation beider Studienteile.....</i>	66
<i>Abbildung 32: Häufigkeiten verschiedener LÜW-Typen bei Nachkommen 22 Vatertiere.....</i>	67
<i>Abbildung 33: Häufigkeit der unterschiedlichen Grade einer Dornfortsatztrennung bei Nachkommen.....</i>	69
<i>Abbildung 34: Häufigkeit der unterschiedlichen Morphologiegrade der Seitenteile bei Nachkommen.....</i>	70
<i>Abbildung 35: Häufigkeit der unterschiedlichen Grade einer Wirbelkörpertrennung bei Nachkommen.....</i>	71
<i>Abbildung 36: Geschlechtsabhängige Verteilung der LÜW-Typen im Studienteil A....</i>	73
<i>Abbildung 37: Geschlechtsabhängige Verteilung der LÜW-Typen im Studienteil B....</i>	74
<i>Abbildung 38 (A, B): Röntgenaufnahmen des lumbosakralen Überganges eines DSH in zwei orthogonalen Röntgenebenen, bei dem eine ausschließliche Beurteilung der ventrodorsalen Aufnahme zu einer falsch-negativen LÜW-Klassifikation geführt hätte</i>	90

### 3 TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle 1: Prävalenz von lumbosakralen Übergangswirbeln innerhalb einer nicht weiter nach Rassen differenzierten Hundepopulation und bei Deutschen Schäferhunden entsprechend ausgewählter Studien verschiedener Autoren .....</i>	25
<i>Tabelle 2: Beurteilung des Trennungsgrades der Dornfortsätze .....</i>	43
<i>Tabelle 3: Beurteilung der Morphologie der Seitenteile mit Seitenbezug .....</i>	45
<i>Tabelle 4: Beurteilung des Trennungsgrades der Wirbelkörper .....</i>	46
<i>Tabelle 5: Klassifikation der LÜW nach FLÜCKIGER et al. (2009) in geringgradig modifizierter Form .....</i>	51
<i>Tabelle 6: Schemata möglicher Variationen der anatomischen Gegebenheiten am lumbosakralen Übergang nach JULIER-FRANZ (2006).....</i>	52
<i>Tabelle 7: Übersicht über die dokumentierten Röntgenbefunde und die daraus abgeleiteten Merkmale für die Trennung im Bereich der Dornfortsätze und Wirbelkörper.....</i>	56
<i>Tabelle 8: Übersicht über die dokumentierten Röntgenbefunde und die daraus abgeleiteten Merkmale für Veränderungen im Bereich der Seitenteile.....</i>	56
<i>Tabelle 9: Beurteilung des Dornfortsatztrennungsgrades in Abhängigkeit vom Alter ..</i>	58
<i>Tabelle 10: Häufigkeiten der unterschiedlichen Ausprägungsgrade der Morphologie der Seitenteile im Seitenvergleich.....</i>	59
<i>Tabelle 11: Häufigkeiten der Merkmalskombinationen Wirbelkörpertrennung und Dornfortsatztrennung.....</i>	60
<i>Tabelle 12: Kennzahlen der Beschreibung der Morphologie des lumbosakralen Überganges im Geschlechtervergleich.....</i>	61
<i>Tabelle 13: Vergleich der LÜW-Klassifikation beider Studienteile.....</i>	65
<i>Tabelle 14: LÜW-Verteilung in der Nachkommenanalyse.....</i>	68
<i>Tabelle 15: Verteilung der DSH nach Röntgenjahr zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil A .....</i>	72
<i>Tabelle 16: Alters- und Geschlechtsverteilung der DSH zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil A .....</i>	72
<i>Tabelle 17: Alters- und Geschlechtsverteilung der DSH zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil B .....</i>	73
<i>Tabelle 18: Verteilung der DSH nach Röntgenjahr zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil B .....</i>	74

---

<i>Tabelle 19: Heritabilitäten und additiv-genetische Korrelationen für LÜW aus Schätzläufen im Ein- und Mehrmerkmalsansatz auf Datenbasis des Studienteiles A.</i>	76
<i>Tabelle 20: Heritabilitäten und additiv-genetische Korrelationen für LÜW aus Schätzläufen im Ein- und Mehrmerkmalsansatz auf Datenbasis des Studienteiles B.</i>	78
<i>Tabelle 21: Verteilung der erfassten spezifischen Röntgenbefunde im Bereich des lumbosakralen Überganges insgesamt und nach Geschlecht mit absoluten und relativen Häufigkeiten.</i>	79
<i>Tabelle 22: Verteilung der aus den erfassten Röntgenbefunden abgeleiteten Merkmale mit Mittelwert, Standardabweichung und Spannweiten.</i>	80
<i>Tabelle 23: Heritabilitätsschätzwerte für die morphologischen Untersuchungsparameter des Studienteiles A.</i>	81
<i>Tabelle 24: Additiv-genetische Korrelationen der morphologischen Untersuchungsparameter des Studienteiles A.</i>	82
<i>Tabelle 25: Pearson Korrelationskoeffizienten und Spearman Rangkorrelationen zwischen Zuchtwerten der morphologischen Untersuchungsparameter des Studienteiles A.</i>	83

## 4 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

3D	Dreidimensional
8LW	Achter Lendenwirbel
a	Additiv-genetischer Effekt
Abb.	Abbildung
b	Bivariat
BINe	Binär einfach
BINr	Binär restriktiv
BLUP	Best Linear Unbiased Prediction
BVA	British Veterinary Association
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Circa
CES	Cauda equina Syndrom
CT	Computertomographie
DBIN	Differenziert binär
DD	Degenerative Diskopathie
Dipl.	Diplomate
DKAT	Differenziert kategorisch
DLSS	Degenerative lumbosakrale Stenose
DSH	Deutscher Schäferhund
e. g.	Exempli gratia
e. V.	Eingetragener Verein
ECVDI	European College of Veterinary Diagnostic Imaging
ED	Ellbogendysplasie
FCI	Fédération Cynologique Internationale
GebS	Geburtssaison
GISID	Generic illness severity index for dogs
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GRSK	Gesellschaft für Röntgendiagnostik genetisch beeinflusster Skeletterkrankungen bei Kleintieren e. V.
h <sup>2</sup>	Heritabilität
HD	Hüftgelenkdysplasie
HWS	Halswirbelsäule

---

i. e.	Id est
JLU	Justus-Liebig-Universität
KAT	Kategorisch
L	Links
L1 – L7	Erster bis siebter Lendenwirbel
LTV	Lumbosacral transitional vertebra
LÜW	Lumbosakraler Übergangswirbel
LWS	Lendenwirbelsäule
M.	Musculus
Max	Maximum
Min	Minimum
MRT	Magnetresonanztomographie
Mw	Mittelwert
n. e.	Nicht ermittelbar
NRö	Untersuchungsart
OFA	Orthopedic Foundation for Animals
PEST	Parameter estimation for any model
pos.	Positiv
R	Rechts
REML	Restricted Maximum Likelihood
Resp.	Respektive
$r_g$	Additiv-genetische Korrelation
RöAlt	Röntgenaltersklasse
RöJ	Röntgenjahr
ROM	Range of motion
RöV	Röntgenverordnung
S1 – S3	Erster bis dritter Sakralwirbel
SAS	Statistical Analysis System
SE	Standardfehler
ST	Seitenteile
Std	Standardabweichung
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SÜW	Sakrokokzygealer Übergangswirbel
SV	Verein für Deutsche Schäferhunde (SV) e. V.
t	Trivariat
Tab.	Tabelle

---

TrDF	Dornfortsatztrennung
TrWK	Wirbelkörpertrennung
u	Univariat
u. a.	Unter anderem
VCE	Variance Component Estimation
VDH	Verband für das Deutsche Hundewesen
vit	Vereinigte Informationssysteme Tierhaltung
w. V.	Wirtschaftlicher Verein
WI	Welfare impact
x	Verpaart mit
z. B.	Zum Beispiel



## 5 EINLEITUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation, Klassifikation und im Besonderen die genetisch-statistische Aufarbeitung der Vererbung lumbosakraler Übergangswirbel (LÜW) beim Deutschen Schäferhund (DSH) anhand standardisierter Röntgenbilder. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse sollen konkrete Empfehlungen zur Verhinderung lumbosakraler Übergangswirbel gegeben werden, da sie zu negativen gesundheitlichen Folgen führen können.

Übergangswirbel sind Wirbel, die am Übergang zweier Wirbelsäulenabschnitte liegen und anatomische Eigenschaften beider Abschnitte aufweisen (MORGAN 1968; LARSEN 1977). In dieser Arbeit stehen die an der Grenze der Lendenwirbelsäule (LWS) zum Kreuzbein (*Os sacrum*) lokalisierten lumbosakralen Übergangswirbel im Fokus. Sie treten in unterschiedlichen Varianten auf.

LÜW stellen kongenitale Abweichungen des lumbosakralen Überganges dar (MORGAN 1968, 1999b), die sowohl für neurologische als auch gegebenenfalls orthopädische Erkrankungen prädisponieren. Hunde mit LÜW haben ein erhöhtes Risiko am Cauda equina Syndrom (CES) zu erkranken (LANG et al. 1992; MORGAN et al. 1993; DAMUR-DJURIC et al. 2006; FLÜCKIGER et al. 2006). Zusätzlich wird für bestimmte Formen von LÜW eine Beteiligung bei der Entwicklung und dem Voranschreiten einer Coxarthrose im Rahmen der Hüftgelenkdysplasie (HD) beschrieben (LARSEN 1977; ZIEGLER 1989; MORGAN 1999b). Es gibt deshalb in der Literatur Empfehlungen, Hunde mit ausgeprägten Formen von LÜW aus der Zucht auszuschließen (MORGAN et al. 1993; LAPPALAINEN et al. 2012; TELLHELM et al. 2015).

Die Entwicklung eines CES bzw. einer Coxarthrose wird insbesondere von dem Ausmaß der abweichenden Wirbelanatomie des LÜW beeinflusst. LÜW, bei denen lediglich eine Isolation des Dornfortsatzes des ersten Sakralwirbels von dem des folgenden Sakralwirbels vorliegt, wird keine klinische Relevanz für das betroffene Einzeltier beigemessen. Populationsgenetisch kann diesem Typ jedoch eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zukommen. Es muss untersucht werden, ob Hunde dieses Typs Nachkommen mit stärkeren morphologischen Abweichungen der Wirbelanatomie hervorbringen können, welche eine Entwicklung eines CES bzw. einer Coxarthrose wahrscheinlicher machen. In diesem Fall wäre der Ausschluss der von diesem Typ betroffenen Hunde von der Zucht die zu empfehlende Konsequenz.

Screeningverfahren, die diese einfachen Typen von Übergangswirbeln nicht berücksichtigen, wären außerdem von zweifelhafter Effizienz.

DSH weisen im Vergleich zu anderen Hunderassen generell eine höhere Prävalenz an LÜW auf (LARSEN 1977; WINKLER 1985; ZIEGLER 1989; MORGAN 1999b; DAMUR-DJURIC et al. 2006; ONDREKA 2009; FIALOVÁ et al. 2014). Die hohe Prävalenz von LÜW beim DSH sowie das Zusammenspiel der hohen Nachzuchtzahlen mit den potenziellen klinischen Konsequenzen bildet die Grundlage dieser Studie zur genetisch-statistischen Aufarbeitung der Vererbung der unterschiedlichen Typen von LÜW untereinander. Laut der Welpenstatistik vom „Verband für das Deutsche Hundewesen“ (VDH) bilden DSH mit 9.766 Welpen im Jahr 2017 den mit Abstand höchsten Nachkommensanteil reinrassiger Hunde in Deutschland (12,9 % aller im VDH gelisteter Rassewelpen).

Die Beurteilung der Präsenz eines LÜW erfolgt auf Basis einer standardisierten, reproduzierbaren Röntgenuntersuchung des lumbosakralen Überganges im Rahmen des Screenings auf Hüftgelenkdysplasie.

## 6 LITERATURÜBERSICHT

### 6.1 Entwicklung der Wirbelsäule

Während der Keimblattbildung entstehen Primitivbildungen, die als Proliferationszentrum unter anderem für die Formation der *Chorda dorsalis* dienen (SCHNORR und KRESSIN 2011). Durch Zellbewegung im Ektoderm entsteht im hinteren Bereich der Keimscheibe der Primitivstreifen. Dieser verdickt sich nach vorne zum Primitivknoten, aus dem sich der sogenannte Kopffortsatz entwickelt. Der Kopffortsatz nimmt punktuell Kontakt zum Entoderm auf. Räumlich vor diesem Kontaktpunkt liegt die Prächordalplatte, aus welcher sich der vordere Teil der *Chorda dorsalis* entwickelt. Der hintere Abschnitt der *Chorda dorsalis* entsteht aus dem Kopffortsatz. So entsteht ein solider Zellstab im späteren Rückenbereich. Dieser stellt das erste Stützelement des Embryos dar (SINOWATZ 1991; SCHNORR und KRESSIN 2011).

Ausgehend vom paraxialen Mesoderm kommt es durch Zellwanderungen zur Bildung von blockförmigen Zellansammlungen, den Urwirbeln (Somiten). Ihr ventromedialer Bereich wird als Sklerotom bezeichnet. Dieses dient als Proliferationszone für das Mesenchym des Achsenskeletts. Seine Zellen bilden die Segmente der eigentlichen Wirbelsäule (SCHNORR und KRESSIN 2011). Durch die perichordale Einwanderung mesenchymaler Zellen bildet sich ein die *Chorda dorsalis* ummantelndes, lockeres, nicht segmentiertes Blastem. Ausgehend von den aus der Aorta entspringenden Intersegmentalarterien, kommt es zur angedeuteten Gliederung in sekundäre Sklerotome. Durch Zellverlagerungen kommt es zur Bildung eines Intersegmentalspaltes. Die Sklerotome weisen nun eine kraniale zellärmere und eine kaudale zeldichtere Hälfte auf. Durch Fusion des kaudalen mit dem kranialen Abschnitts des folgenden Sklerotoms wird jeweils die Anlage eines Wirbelkörpers gebildet (SINOWATZ 1991; SCHNORR und KRESSIN 2011).

Die primitiven Bogenanlagen bilden den Ursprung für die Entwicklung der Wirbelbögen. Auswandernde Zellen aus der kranialen Hälfte eines Sklerotoms umwachsen die Wirbelkörperanlage. Sie nähern sich über dem Neuralrohr aneinander an und verschmelzen schließlich in der Mittellinie zu den Wirbelbögen. Ventrolaterale Bereiche der Bogenanlage differenzieren sich im Lendenbereich zu den Querfortsätzen der Wirbel (SINOWATZ 1991).

Die *Chorda dorsalis* unterliegt einer vollständigen Rückbildung in dem Bereich, wo sie von Wirbelkörpern umgeben wird. Reste bleiben als gallertige *Nuclei pulposi*

Bestandteil der Zwischenwirbelscheiben (*Disci intervertebrales*) (SINOWATZ 1991; SCHNORR und KRESSIN 2011).

Gegen Ende der Embryonalphase entsteht in den mesenchymalen Wirbelanlagen Knorpelgewebe. Dies geschieht zunächst in den Wirbelkörpern. Initial treten paarige Knorpelherde auf, welche sich aber schnell zu einem Knorpelstück vereinen. Dem folgt die Knorpelbildung in den Bogenanlagen, welche Kontakt zum Wirbelkörper aufnehmen. Nach dorsal wachsend, umgeben sie bald das Medullarrohr. Anfangs doppelt ausgebildete Dornfortsätze entstehen aus den Knorpelzentren der Wirbelbögen (SCHNORR und KRESSIN 2011).

Die endgültigen Wirbel entstehen durch enchondrale Ossifikation. Sie weisen drei primäre Ossifikationszentren auf (WINKLER 1985; SINOWATZ 1991; DAMUR-DJURIC et al. 2006; SCHNORR und KRESSIN 2011). Davon liegt eines zentral im Wirbelkörper und die zwei anderen bilateral an der Basis der Wirbelbögen. Zusätzlich weisen die ersten beiden Sakralwirbel zwei weitere symmetrisch angelegte Ossifikationszentren auf, welche die ventralen Anteile der Kreuzbeinflügel bilden (WINKLER 1985; BREIT und KÜNZEL 2001). Diese treten bei Hunden mittelgroßer und kleiner Rassen nur gelegentlich auf, bei den sogenannten „Toy-Rassen“ nie (BREIT und KÜNZEL 2001). Die Verknöcherung breitet sich von diesen ausgehend in alle Richtungen aus. Wirbelkörper und Wirbelbogen sind zum Zeitpunkt der Geburt noch getrennt. Von den zusätzlichen akzessorischen Ossifikationszentren der Wirbel geht die Verknöcherung der kranialen und kaudalen Flächen der Wirbelkörper aus. Es bilden sich die scheibenförmigen Epiphysen. Die Kreuzbeinwirbel werden einzeln angelegt. Durch eine postnatale Verknöcherung der Zwischenwirbelscheiben entsteht das unbewegliche Kreuzbein (SINOWATZ 1991; SCHNORR und KRESSIN 2011).

## 6.2 Anatomie des lumbosakralen Überganges

### 6.2.1 Knöchernen Strukturen

Da in der vorliegenden Arbeit lediglich die Wirbelsäulenabschnitte der Lendenwirbelsäule (*Pars lumbalis/LWS*) und des Kreuzbeines (*Os sacrum*) weitergehende Beachtung finden werden, wird im Folgenden ausschließlich deren Anatomie detailliert dargestellt.

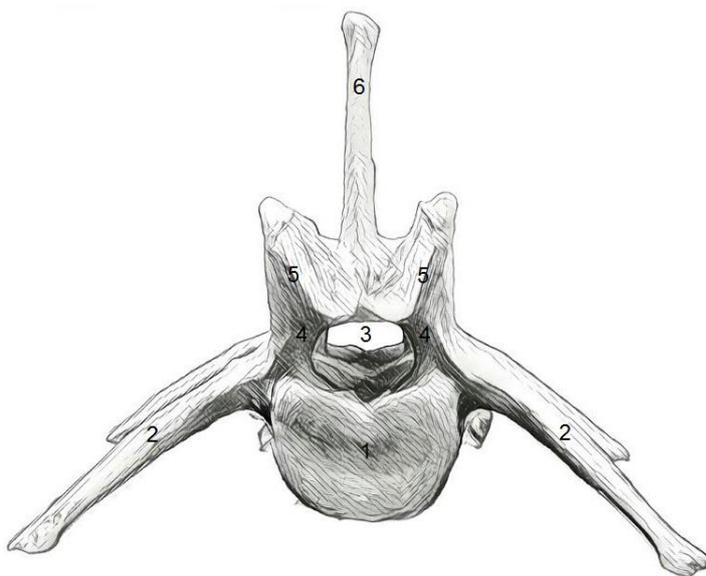
Die knöchernen Grundlage der LWS und des Kreuzbeines wird von Wirbeln (*Vertebrae*) gebildet. Die Lendenwirbelsäule des Hundes besteht grundsätzlich aus sieben Lendenwirbeln (*Vertebrae lumbales*), in seltenen Fällen lediglich aus sechs Wirbeln (L1 - L6/7) (NICKEL et al. 1984; DYCE et al. 1991).

Die Wirbel weisen entlang der Wirbelsäule den gleichen Grundaufbau auf, jedoch variiert die Anatomie zwischen den unterschiedlichen Wirbelsäulenabschnitten entsprechend ihrer vorgesehenen Funktion. Die Morphologie unterliegt zusätzlich sowohl einer rassespezifischen als auch einer individuellen Modifikation, weshalb die anatomische Beschreibung der eines Musterwirbels entspricht (BREIT und KÜNZEL 1998). Allen Lenden- und Sakralwirbeln ist gemein, dass sie aus einem Wirbelkörper (*Corpus vertebrae*), einem Wirbelbogen (*Arcus vertebrae*) und einer den örtlichen Ansprüchen angepassten Anzahl und Morphologie an Wirbelfortsätzen (*Processus vertebrae*) unterschiedlicher Ausprägung bestehen (NICKEL et al. 1984).

Die Lendenwirbel besitzen einen massiven Wirbelkörper, dessen kraniale und kaudale Endflächen (*Extremitas cranialis et Extremitas caudalis*) flach ausgebildet sind. Die Wirbellänge und -breite nehmen bis zum sechsten Lendenwirbel zu (NICKEL et al. 1984). Auf der Dorsalfläche erhebt sich der annähernd halbrunde Wirbelbogen. Dieser bildet zusammen mit dem Wirbelkörper das Wirbelloch (*Foramen vertebrale*). Die Gesamtheit der Wirbellöcher der kettenartig aneinander gereihten Wirbel bildet den Wirbelkanal oder Spinalkanal (*Canalis vertebralis*). Dieser weitet sich zur Aufnahme der lumbalen Rückenmarksschwellung (*Intumescencia lumbosacralis*) bis zum vorletzten Lendenwirbel und verjüngt sich darauffolgend nach kaudal zusehends. Entsprechend der möglichen unterschiedlichen Anzahl an Lumbalwirbeln liegt die maximale Erweiterung variabel zwischen L4 und L5 (BREIT und KUNZEL 2002). Sein Ende findet er in den ersten Schwanzwirbeln. Der Wirbelbogen wird aus den beidseits dem Wirbelkörper entspringenden Füßchen (*Pediculi arcus vertebrae*) und der dorsal gelegenen Platte (*Lamina arcus vertebrae*) gebildet. Beidseits weisen die kranialen und kaudalen Ränder des Wirbelbogens, nahe ihres Ursprungs am Wirbelkörper, halbkreisförmige Einziehungen (*Incisurae vertebrales craniales et caudales*) auf. Diese

bilden mit denen der benachbarten Wirbel ein Zwischenwirbelloch (*Foramen intervertebrale*). Die Dorsalflächen weisen zusätzlich zum Wirbelbogen eine durchgehende dorsale Bandleiste sowie zwei jeweils seitlich davon gelegene flache Längsrinnen für Blutgefäße auf. Ventral ist an den kaudal gelegenen Wirbelkörpern eine deutliche Leiste (*Crista ventralis*) in longitudinal verlaufender Richtung ausgeprägt (NICKEL et al. 1984).

Dorsomedian an den Wirbelbögen sind die Dornfortsätze (*Processus spinosi*) ausgebildet. Diese nehmen bis zum fünften bzw. sechsten Lendenwirbel an Länge zu (NICKEL et al. 1984). Sie sind nach kranial geneigt. Die beiden letzten Dornfortsätze zeigen hingegen senkrecht nach dorsal. Die Querfortsätze (*Processus transversi*), die im Falle der Lendenwirbel rudimentäre Rippen darstellen und deswegen auch *Processus costales* genannt werden, weisen nach kranioventral. Die Querfortsätze des letzten Lumbalwirbels stehen nicht im Kontakt zum Kreuzbein oder dem Darmbein (DAMUR-DJURIC et al. 2006). Die Gelenkfortsätze (*Processus articulares*) weisen flache, sagittal ausgerichtete Gelenkflächen auf. Die kranialen Gelenkfortsätze (*Processus articulares craniales*) sind an den kaudalen Lendenwirbeln mit den Zitzenfortsätzen (*Processus mamillares*) zu *Processus mamilloarticulares* fusioniert. Zusätzlich sind *Processus accessorii* mit kaudaler Ausrichtung ausgebildet (NICKEL et al. 1984) (Abb. 1, Abb. 2).



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung der Anatomie des sechsten Lendenwirbels eines Hundes – Kraniale Aufsicht (erstellt nach Vorbild eines anatomischen Knochenpräparates)

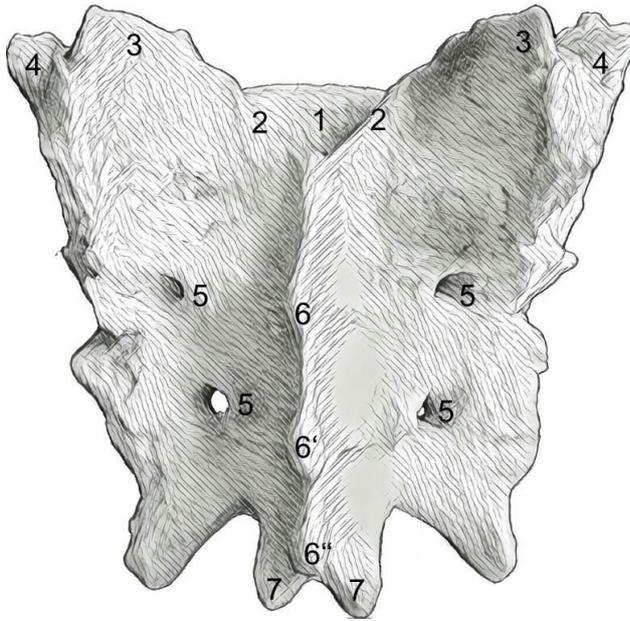
- 1 Corpus vertebrae mit Extremitas cranialis
- 2 Processus transversi
- 3 Foramen vertebrale
- 4 Arcus vertebrae
- 5 Processus articulares craniales
- 6 Processus spinosus



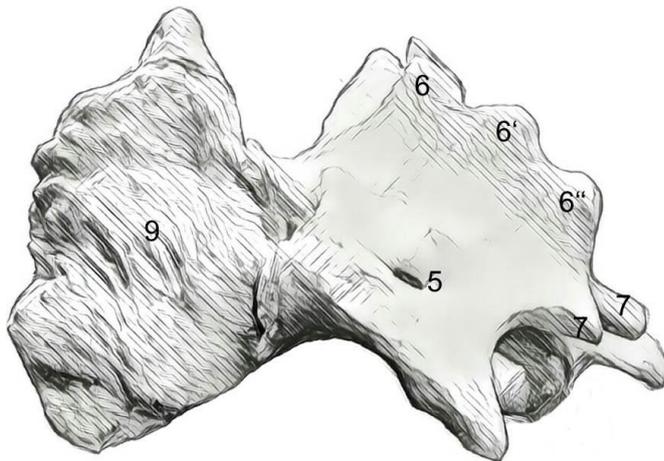
**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der Anatomie des sechsten und siebten Lendenwirbels eines Hundes – Kranio-laterale Aufsicht (erstellt nach Vorbild eines anatomischen Knochenpräparates)

- 1 Corpus vertebrae mit Extremitas cranialis
- 2 Processus transversi
- 3 Foramen vertebrale
- 4 Arcus vertebrae
- 5 Processus articulares craniales
- 6 Processus spinosi
- 7 Processus articularis caudalis
- 8 Foramen intervertebrale

Das Kreuzbein wird beim Hund aus drei Wirbeln (S1 - S3) gebildet. Diese sind im Alter von eineinhalb Jahren miteinander zum einheitlichen Sakrum verwachsen (NICKEL et al. 1984; DYCE et al. 1991; VOLLMERHAUS et al. 1994). Daraus resultiert der völlige Verlust jeglicher Beweglichkeit im Bereich des Kreuzbeines. Das Kreuzbein besitzt eine vierseitige Gestalt. Die kraniale *Basis ossis sacri* wird gebildet von der flachen und breiten *Extremitas cranialis* des S1. Ihr ventraler Rand wird als Promontorium bezeichnet. Nach kaudal verjüngt sich das Kreuzbein zum *Apex ossis sacri*. Die Ventralfläche wird als *Facies pelvina* bezeichnet. Sie weist zwei nur undeutlich ausgebildete Querlinien (*Lineae transversae*) als Zeichen der Fusion der Sakralwirbel auf. Der Wirbelkanal der LWS wird als *Canalis sacralis* fortgeführt. Dieser öffnet sich in die *Foramina sacralia dorsalia* und *ventralia*. Der *Canalis sacralis* weist im Vergleich zum letzten Lendenwirbel schon im Bereich der *Basis ossis sacri* einen wesentlich kleineren Durchmesser auf (NICKEL et al. 1984). Die Dornfortsätze sind nach kaudal geneigt und nur an ihrer Basis fusioniert. Die miteinander verschmolzenen Querfortsätze bilden die *Partes laterales*, welche im Bereich von S1 und S2 als Kreuzbeinflügel (*Alae ossis sacri*) weit nach lateral ragen und über die *Facies auriculares* mit den Darmbeinflügeln (*Alae ossis ilii*) artikulieren (NICKEL et al. 1984) (Abb. 3 (A - C)).



A – Dorsale Aufsicht

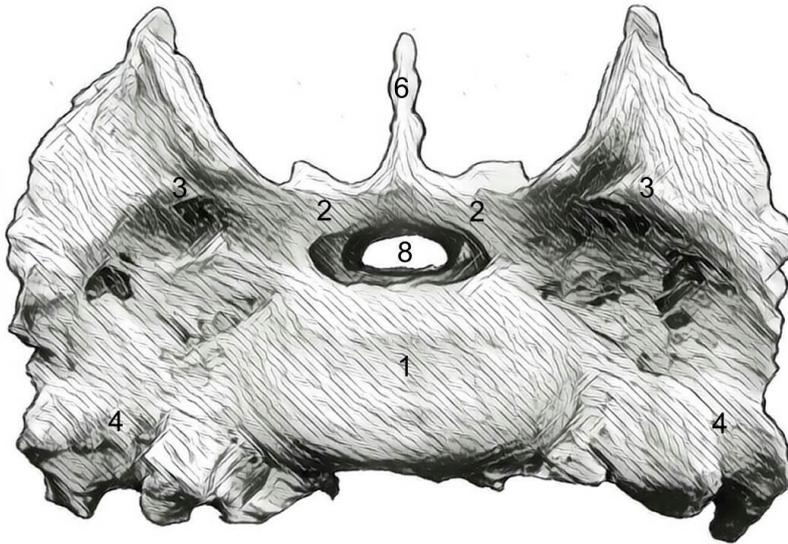


B – Laterale Aufsicht

**Abbildung 3 (A - C):** Schematische Darstellungen der Anatomie des Kreuzbeines eines Hundes in verschiedenen Aufsichten (erstellt nach Vorbild jeweils eines anatomischen Knochenpräparates) – Fortsetzung auf der nächsten Seite

3A Dorsale Aufsicht  
3B Laterale Aufsicht  
3C Kraniale Aufsicht

- 1 Extremitas cranialis des S1
- 2 Arcus vertebrae des S1
- 3 Processus articulares  
  craniales des S1
- 4 Partes laterales
- 5 Foramina sacralia dorsalia
- 6, 6', 6'' Processus spinosi
- 7 Processus articulares caudales
- 8 Canalis sacralis
- 9 Facies auricularis



C – Kraniale Aufsicht

### 6.2.2 Verbindungen der Knochen

Der die Knochen untereinander verbindende Bandapparat im Bereich der Wirbelsäule wird unterteilt in kurze und lange Bänder. Erstere verbinden benachbarte Wirbel direkt miteinander. Zu diesen werden die Zwischenbogenbänder (*Ligamenta flava*), die Zwischendornenbänder (*Ligamenta interspinalia*) und die Zwischenquerbänder (*Ligamenta intertransversaria*) gezählt.

Als lange Bänder werden das dorsale Längsband (*Ligamentum longitudinale dorsale*) und das ventrale Längsband (*Ligamentum longitudinale ventrale*) bezeichnet, welche sich beide an die Bandscheiben anheften. Zusätzlich besitzt der Hund das aus dem Nackenstrang (*Funiculus nuchae*) hervorgehende bis zum S3 reichende Dornfortsatzband (*Ligamentum supraspinale*).

Die Zwischenwirbelspalten (*Spatia intervertebralia*) benachbarter Wirbel sind spaltfrei mit Zwischenwirbelscheiben (*Disci intervertebrales*), auch Bandscheiben genannt, ausgefüllt. Im Hinblick auf die Thematik der LÜW ist zu beachten, dass auch der letzte Lumbalwirbel und das darauffolgende Kreuzbein durch eine vollständige Zwischenwirbelscheibe getrennt sind (DAMUR-DJURIC et al. 2006). Diese nimmt als Ausdruck ihrer mechanischen Belastung in der Bewegung und des hohen Bewegungsspielraums des lumbosakralen Überganges im Vergleich zu der Bandscheibe zwischen L4/5 um bis zu 58 % an Dicke zu (HOHMANN 2015). Die Bandscheiben bestehen aus dem zentralen Gallertkern (*Nucleus pulposus*) und dem diesen ummantelnden *Anulus fibrosus*. Dieser nimmt die strukturelle Verbindung mit den Endplatten der Wirbelkörper auf (NICKEL et al. 1984).

Der letzte Lendenwirbel ist über das Lenden-Kreuzbeingelenk (*Articulatio lumbosacralis*) mit dem darauffolgenden Sakrum verbunden. Diese Verbindung wird durch die Zwischenwirbelscheibe und die Facettengelenke (*Articulationes processuum articularium*) gebildet.

Das Kreuzbein hat aufgrund der Verknöcherung der Bandscheiben und der Verschmelzung der Wirbelbögen und der Dornfortsätze im Bereich ihres Ursprungs jegliche Beweglichkeit eingebüßt.

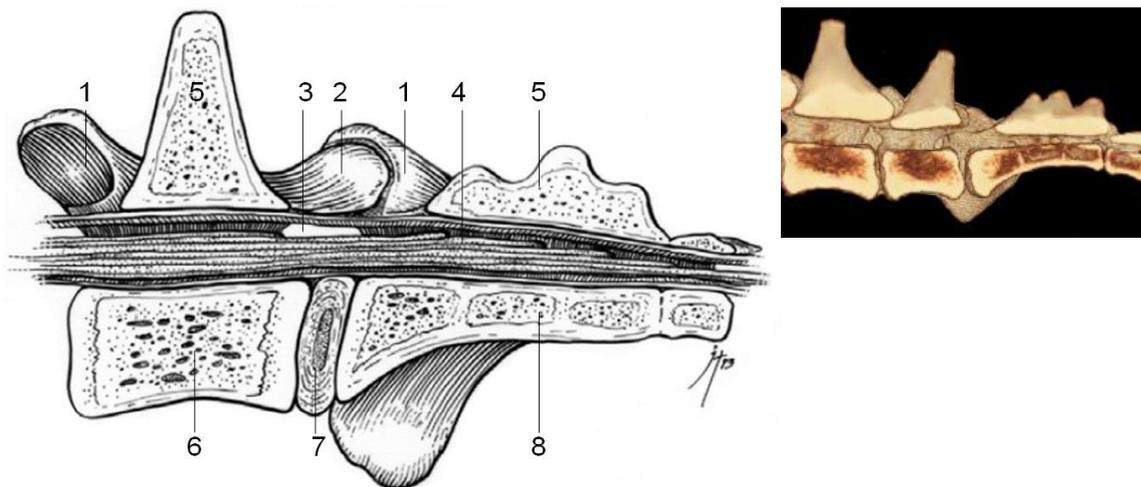
Über das Kreuzdarmbeingelenk (*Articulatio sacroiliaca*) wird die Verbindung von Beckengürtel zur Wirbelsäule geschaffen. Die sehr enge Gelenkkapsel (*Capsula articularis*) wird ergänzt durch die Gelenkbänder (*Ligamenta sacroiliaca*). In Form eines straffen Gelenkes artikulieren die *Facies auriculares* der Kreuzbein- und Darmbeinflügel miteinander.

### 6.2.3 Kaudale neuronale Strukturen

Die Wirbellöcher nehmen in ihrer Gesamtheit als Wirbelkanal das Rückenmark (*Medulla spinalis*) auf. Innerhalb dieser knöchernen Hülle wird das Rückenmark von seinen häutigen Hüllen (*Meninges spinales*) umschlossen. Die Meningen werden unterteilt in die weiche Rückenmarkshaut (*Leptomeninges spinalis*) und die harte Rückenmarkshaut (*Pachymeninges spinalis*). Erstere bildet mit ihrer inneren Schicht, der *Pia mater*, und der äußeren Schicht, der Spinnwebhaut (*Arachnoidea spinalis*), den mit Cerebrospinalflüssigkeit (*Liquor cerebrospinalis*) gefüllten Subarachnoidalraum (*Cavum leptomeningicum*). Die harte Rückenmarkshaut umschließt genannte Strukturen in Form des in sich geschlossenen Duraschlauches, welcher wiederum durch das mit lockerem Bindegewebe gefüllte *Spatium epidurale* von der Knochenhaut (*Periosteum*) des Wirbelkanals abgegrenzt wird (NICKEL et al. 1992; BUDRAS 2007).

Aufgrund der hohen Anzahl an Nervenköpern (*Perikarya*) im Ursprungsgebiet der Nerven des *Plexus lumbosacralis* ist der Umfang des kaudalen Lendenmarks makroskopisch sichtbar vermehrt. Dies wird als *Intumescencia lumbosacralis* bezeichnet. Sie verjüngt sich weiter kaudal im Bereich des fünften Lendenwirbels und bildet den Markkegel (*Conus medullaris*). Dieser läuft letztendlich ab dem siebten Lendenwirbel in einem dünnen Endfaden (*Filum terminale*) aus (BUDRAS 2007). Dessen kaudales bindegewebiges Ende ist fest mit der *Dura mater* verbunden und verwächst im Bereich des dritten bis vierten Schwanzwirbels (*Vertebrae coccygeae*) als *Filum terminale durae matris* mit dem Periost des Wirbelkanals (NICKEL et al. 1992).

In der ontogenetischen Entwicklung erfährt das Rückenmark durch die Diskrepanz der Wachstumsgeschwindigkeiten der knöchernen Strukturen der Wirbelsäule einerseits und der des Rückenmarks andererseits einen relativen räumlichen Aufstieg (*Ascensus medullae spinalis*). Zu Beginn der embryonalen Entwicklung entsprechen die räumlichen Ausdehnungen des Rückenmarks und des Wirbelkanals einander. Die Spinalnerven weisen einen transversal zum Rückenmarksverlauf weisenden Austritt durch die Zwischenwirbellöcher auf. Mit voranschreitendem Größenwachstum, insbesondere postnatal, werden die intra- und extradural verlaufenden Nervenwurzeln durch die schneller wachsenden Wirbelsäulenabschnitte mitgezogen. Das Ergebnis ist eine im Wirbelkanal verlaufende Bündelung der Spinalnerven des kaudalen Lenden- und des Sakralmarks beidseits des Markkegels und des *Filum terminale*. Diese wird aufgrund ihrer, einem Pferdeschweif gleichenden, Konformation als *Cauda equina* bezeichnet (NICKEL et al. 1992; BUDRAS 2007; LAHUNTA und GLASS 2009). Im Wirbelloch des L7 ist dies bei allen Hunden das einzige Nervengewebe (LAHUNTA und GLASS 2009) (Abb. 4).



- 1 *Processus articulares craniales des L7 und S1*
- 2 *Processus articularis caudalis des L7*
- 3 *Foramen intervertebrale*
- 4 *Fasern der Cauda equina im Canalis sacralis*
- 5 *Processus spinosi des L7 und S1 - 3*
- 6 *Corpus vertebrae*
- 7 *Discus intervertebralis mit zentralgelegenen Nucleus pulposus*
- 8 *Fusionierte Corpora vertebrae des Os sacrum*

**Abbildung 4:** Schematische Darstellung der Anatomie des lumbosakralen Überganges eines Hundes mit Darstellung der Cauda equina im Sagittalschnitt links (SHARP und WHEELER 2005) sowie eine dreidimensionale CT-Rekonstruktion des lumbosakralen Überganges eines ca. 1 Jahr alten weiblichen DSH rechts. (CT = Computertomographie, DSH = Deutscher Schäferhund)

### 6.3 Biomechanik des lumbosakralen Überganges

Zur vereinfachten Darstellung der biomechanischen Verhältnisse des Rumpfes, insbesondere der Statik, wird traditionell das Modell einer parabolischen Bogensehnenbrücke angewandt (SEIFERLE und FREWEIN 1984; MAIERL et al. 2009; FISCHER und LILJE 2011; HOHMANN 2015). Hierbei bildet das Achsenskelett zusammen mit seinen Muskeln und Bändern den dorsal konvexen, druckfesten Bogen. Die Bogenenden stehen über eine gemeinsame „Sehne“ in Verbindung. Im Modell verkörpert das Brustbein (Sternum) und insbesondere der gerade Bauchmuskel (*Musculus rectus abdominis*) diese Sehne. Weiterhin besteht eine direkte vertikale Verbindung, repräsentiert durch die Rippen (*Costae*), dem quer verlaufenden (*Musculus transversus abdominis*) und den schiefen Bauchmuskeln (*Musculus obliquus internus et externus abdominis*) und deren Aponeurosen (SEIFERLE und FREWEIN 1984; MAIERL et al. 2009; HOHMANN 2015). Bogen und Sehne stabilisieren sich dabei gegenseitig. Charakteristika des Brückenbogens sind seine Elastizität, seine Beweglichkeit, aber auch seine Tragfähigkeit (HOHMANN 2015).

Eine Beschreibung der dynamischen Vorgänge des lumbosakralen Überganges während der Bewegung lässt sich in Anbetracht der Vielzahl der beteiligten, sowohl knöchernen, ligamentösen als auch muskulären, Strukturen anhand dieses Modells jedoch nicht suffizient durchführen. Die Darstellung der physiologischen Gegebenheiten der LWS und des lumbosakralen Überganges sind komplex (BENNINGER et al. 2004; HEDIGER et al. 2009).

In der Vergangenheit wurde die LWS beim Hund als ein Wirbelsäulenabschnitt mit großer Mobilität beschrieben (NICKEL et al. 1984; DYCE et al. 1991), welcher den bei schneller Fortbewegung angewendeten Sprunggalopp mit sich abwechselnder sagittaler Beugung und Streckung ermöglicht (DYCE et al. 1991). Eine Kadaverstudie zur Beurteilung der Beweglichkeit der Wirbelsäule im Bereich von L3 bis einschließlich dem Sakrum an Wirbelsäulenpräparaten von 13 DSH mit teilweise erhaltenem Weichteilgewebe wies eine steigende Bewegungsfreiheit von kranial nach kaudal bei Extension und Flexion nach. Die hohe Beweglichkeit resultiert aus der Addition der Zwischenwirbelbewegungen der einzelnen Lendenwirbel. Während die sagittale Bewegung zwischen L3 und L4 nur ca. 2° beträgt, erhöht sich die Beweglichkeit bis auf 32° zwischen dem letzten Lendenwirbel und dem ersten Sakralwirbel. Summiert liegt eine sagittale Beweglichkeit von 56° in der LWS vor (BÜRGER und LANG 1993; FISCHER und LILJE 2011; HOHMANN 2015). Betrachtet man die gesamte Rumpfwirbelsäule, weist der lumbosakrale Übergang die höchste Beweglichkeit in vertikaler Bewegungsrichtung auf (GRADNER et al. 2007). Eine Rotationsbewegung ist

aufgrund der Anordnung der Gelenkfortsätze im Bereich der LWS nur geringgradig möglich. Verglichen mit den lumbalen Zwischenwirbelgelenken liegt zwischen L7 und S1 im Kadavermodell eine höhere Rotationsbeweglichkeit resp. geringere Steifigkeit vor (HEDIGER et al. 2009).

Detaillierte Informationen über die Kinetik im Schritt und Trab, unter anderem der Zwischenwirbelgelenke, ergeben sich in einer Studie an drei gesunden Hunden durch die Anwendung einer Kombination rekonstruierter, dreidimensionaler CT-Aufnahmen zusammen mit fluoroskopischer Kinematographie (Scientific Rotoscoping). Bestätigt werden können die abnehmende Bewegungsfreiheit der LWS von kaudal nach kranial mit der größten Beweglichkeit in den letzten beiden präsakralen Zwischenwirbelgelenken. Das festgestellte Bewegungsspektrum im Lenden-Kreuzbeingelenk aus Kadaverstudien von bis zu 37° (BENNINGER et al. 2004) kann nur zu einem Bruchteil von 3 - 4° nachvollzogen werden. Dies zeigt, dass während der Bewegung nur ein geringer Teil der maximalen Beweglichkeit genutzt wird. Als Resultat dieser Studie sollte das muskuloskeletale System stets als funktionelle Einheit betrachtet werden (WACHS et al. 2016). Dies wird ebenfalls durch die mittels Scientific Rotoscoping durchgeführte in-vivo Bewegungsanalyse bei vier DSH von KOPP (2018) bestätigt. Hier kann gezeigt werden, dass die sagittale Intervertebralbewegung der kaudalen Lendenwirbelsäule (L6 - S1) in Rotation mit nur 3 - 4° gering ausgeprägt ist. Während die sagittale Rotation des lumbosakralen Überganges (L7 - S1) schrittzyklusabhängig im Trab eine geringgradig größere Range of motion (ROM) von 5,1° zeigt, liegt sie im Schritt bei 3,6°. Zwischen L6 und L7 beträgt die ROM in der Gangart Schritt ca. 3° und im Trab ca. 3,3°. Die axiale Rotation um die Längsachse des lumbosakralen Überganges ist sowohl im Schritt als auch Trab die Bewegungsform mit der kleinsten Ausprägung mit nur ca. 3°. Eine geringgradig größere ROM besitzt beim DSH die laterale Intervertebralrotation, welche asynchron zum Schrittzyklus abläuft. Sie liegt zwischen 3,4 und 3,9°. Zusätzlich wird die intervertebrale Translationsbewegung im Bereich des lumbosakralen Überganges untersucht. Sie ist mit ca. 0,1 - 0,2 cm nur sehr gering ausgeprägt. In der Gangart Trab ist die kraniokaudale Translation von L7 mit der inversen sagittalen Bewegung von Becken und L7 gekoppelt, wodurch die Weite des lumbosakralen Zwischenwirbelspaltes zyklischen Veränderungen unterliegt (KOPP 2018).

Aus den Ergebnissen in-vivo durchgeführter Studien lässt sich schlussfolgern, dass bei Untersuchungen zur Dynamik des lumbosakralen Überganges zwischen in-vivo und Kadaverstudien unterschieden werden muss (GRADNER et al. 2007). Kadaverstudien sollten nur unter Vorbehalt als Modell auf den lebenden Organismus übertragen

werden, da sie die Verhältnisse während der Bewegung im lebenden Organismus nur sehr eingeschränkt wiedergeben können.

Während das Lenden-Kreuzbeingelenk beweglich ist, ist die Verbindung vom starren Sakrum zum Becken über das Iliosakralgelenk nahezu unbeweglich (NICKEL et al. 1984). Eine Studie zur Beweglichkeit des Iliosakralgelenkes an 20 Kadavern nicht-chondrodystrophischer Hunde nach Entfernung vom Weichteilgewebe, außer des periartikulären Bandapparates und den *Ligamenta sacrotuberalia*, weist eine Beweglichkeit von 3° bei Beugung und 4° bei Streckung nach. Es wird kein signifikanter Unterschied der Beweglichkeit zwischen den verschiedenen Geschlechtern festgestellt (GREGORY 1986). Eine in-vivo Studie mittels Computertomographie (CT) bei DSH und Greyhounds zeigt, dass die Beweglichkeit des Iliosakralgelenkes beim lebenden Hund, im Vergleich zu der von Kadavern, durch die vorhandenen Weichteilgewebe zusätzlich eingeschränkt wird (SAUNDERS et al. 2013).

GRADNER et al. (2007) untersuchen die Bewegung der Wirbelsäule von 22 klinisch unauffälligen Malinois unter Berücksichtigung radiologischer Befunde eines veränderten lumbosakralen Überganges (undifferenzierter Übergangswirbel, *Spondylosis deformans*, Subluxation und Spondylarthrose im lumbosakralen Übergang) mittels 3D-Bewegungsanalyse unter Verwendung von Hautmarkern. Dabei sind geringgradige Veränderungen der Wirbelsäulenbewegung festzustellen, jedoch kann kein direkter Zusammenhang einer spezifischen lumbosakralen Pathologie und der kinematischen Abweichung detektiert werden.

## **6.4 Lumbosakrale Übergangswirbel (LÜW)**

### **6.4.1 Definition und Klassifikation**

Übergangswirbel sind Wirbel, die an den Übergängen benachbarter Wirbelsäulenabschnitte auftreten können und anatomisch Merkmale beider Wirbelsäulenabschnitte aufweisen (STIEVE 1921; BLUMENSAAT und CLASING 1932; MORGAN 1968; LARSEN 1977; SIMOENS et al. 1983; WINKLER 1985; COUTEUR und CHILD 1989; ZIEGLER 1989; MORGAN 1999b; DAMUR-DJURIC et al. 2006; FLÜCKIGER et al. 2009; WESTWORTH und STURGES 2010). Im deutschsprachigen Raum werden diese auch als Schaltwirbel bezeichnet (FLÜCKIGER et al. 2009). Übergangswirbel sind eine kongenitale Anomalie (MORGAN 1968, 1999b). Sie können am zervikothorakalen, thorakolumbalen, lumbosakralen und sakrokokzygealen Übergang auftreten (STIEVE 1921; BLUMENSAAT und CLASING 1932; MORGAN

1968; LARSEN 1977; WINKLER 1985; ZIEGLER 1989; WESTWORTH und STURGES 2010) (Abb. 5).



**Abbildung 5:** Mögliche Lokalisationen von Übergangswirbeln hervorgehoben in einer Darstellung des Achsen skeletts eines Hundes an Übergängen benachbarter Wirbelsäulenabschnitte.

Übergangswirbel weisen insbesondere Veränderungen im Bereich der Wirbelbögen und der Querfortsätze auf. Eine Modifikation der Wirbelkörper kommt seltener vor (STIEVE 1921; MORGAN 1968; COUTEUR und CHILD 1989; DAMUR-DJURIC et al. 2006). Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf den LÜW.

Die Klassifikation der LÜW wird in der aktuellen Literatur nicht einheitlich gehandhabt. Vielmehr existieren mehrere voneinander abweichende Klassifikationsverfahren (MORGAN 1999b; DAMUR-DJURIC et al. 2006; FLÜCKIGER et al. 2009; WIGGER et al. 2009; LAPPALAINEN et al. 2012), die im Einzelnen hier nicht im Detail thematisiert werden sollen. Einige Autoren nehmen die Klassifikation anhand der Morphologie der Querfortsätze des LÜW vor. Diese können in Form ihrer physiologischen Ausprägung ohne Kontakt zum Darmbein respektive Kreuzbein oder aber auch mit partieller oder vollständiger Fusion mit diesen vorliegen (DAMUR-DJURIC et al. 2006). Diese Einteilung kann jedoch zu irrtümlichen Beurteilungen führen. Dies kann in der Studie von LAPPALAINEN et al. (2012) durch einen Befundabgleich der lumbosakralen Übergänge ein und derselben Hunde gezeigt werden, von welchen sowohl röntgenologische als auch computertomographische Untersuchungen vorliegen. Deshalb wird in dieser Arbeit eine davon unabhängige Klassifikation erfolgen. Es wird die Einteilung nach FLÜCKIGER und Mitarbeiter (2009) als Auswertungsbasis verwendet. Diese wird als „einfache Typisierung der lumbosakralen Übergangswirbel“ (FLÜCKIGER et al. 2009) von der Schweizer Dysplasiekommission zur Erfassung der LÜW vorgeschlagen und auch von der Gesellschaft für Röntgendiagnostik genetisch beeinflusster Skeletterkrankungen bei Kleintieren e. V. (GRSK) angewendet (TELLHELM et al. 2015). Sie basiert auf der Fusion der Dornfortsätze des Sakrums

und der Symmetrie der Verbindung zwischen LÜW und dem Becken (FLÜCKIGER et al. 2009).

Darüber hinausgehend wird die Präsenz eines achten Lendenwirbels (8LW) von unterschiedlichen Autoren als Übergangswirbel gewertet (VOLLMERHAUS et al. 1994; LAPPALAINEN et al. 2012).

#### **6.4.2 Entstehungshypothesen der LÜW**

Die Ursache der Entstehung von Übergangswirbeln als spinale Anomalie ist noch unbekannt (WESTWORTH und STURGES 2010). Es existieren jedoch unterschiedliche Hypothesen. Eine Theorie besagt, dass ein LÜW aus der Umwandlung eines Lumbalwirbels in einen Sakralwirbel oder vice versa entsteht. Die hierfür verwendeten Begriffe sind die Sakralisation und die Lumbalisation (MORGAN 1968; LARSEN 1977; WINKLER 1985; ZIEGLER 1989; MORGAN et al. 1993). LÜW, die durch Sakralisation entstehen, besitzen Querfortsätze, die denen der Kreuzbeinflügel ähneln und mit dem Darmbein (*Os ilium*) verbunden sein können (MORGAN 1968; WINKLER 1985; COUTEUR und CHILD 1989). Bei der Lumbalisation weist der erste Kreuzbeinwirbel eine Tendenz zur Loslösung auf, welche bis zur völligen Trennung von den übrigen Sakralwirbeln ausgeprägt sein kann (WINKLER 1985; TELLHELM et al. 2015). Darüber hinaus können diese LÜW normalerweise für Lumbalwirbel typische uni- oder bilaterale Querfortsätze ausbilden (MORGAN 1968; WINKLER 1985). Um diese Termini verwenden zu können, ist die Kenntnis über die Anzahl der präsakralen Wirbel grundlegend. Da dies auf Röntgenaufnahmen im Rahmen der standardisierten Röntgenuntersuchung auf HD nicht gewährleistet ist, wird von den Begriffen im Folgenden kein Gebrauch gemacht.

Eine andere Theorie geht davon aus, dass ein LÜW einen Intermediärwirbel darstellt, welcher Eigenschaften beider Wirbelsäulenabschnitte in seiner ontogenetischen Entwicklung annimmt. Durch Wanderung der embryologischen Extremitätenanlagen in longitudinaler Richtung können die Kontaktpunkte zwischen den Anlagen der hinteren Gliedmaßen und der Anlage der Kreuzbeinwirbel vom Physiologischen abweichen. Dadurch wird ein abweichender Wachstumsstimulus induziert (KEMPERMANN 1929). In dem Fall, dass die Kontaktpunkte nicht seitengleich vorliegen, resultiert ein asymmetrischer Wachstumsstimulus. Dies begründet das große Spektrum unterschiedlicher morphologischer Ausprägungen von LÜW (KEMPERMANN 1929; DAMUR-DJURIC et al. 2006).

### 6.4.3 Klinische Relevanz

In der Humanmedizin wird 1917 eine direkte Korrelation zwischen Kreuzschmerzen und der Präsenz eines LÜW, das sogenannte „Bertolotti Syndrom“, beschrieben (BERTOLOTTI 1917). Dieser Zusammenhang wird jedoch in späteren Studien nicht bestätigt (NACHEMSON 1975; TINI et al. 1977; ELSTER 1989; LUOMA et al. 2004). LÜW bei Hunden werden initial keine unmittelbare klinische Relevanz beigemessen (MORGAN 1968; NACHEMSON 1975; KEALY 1981). Es wird allenfalls über sekundäre Veränderungen spekuliert, die durch die Präsenz eines LÜW verursacht werden und klinische Symptome auslösen könnten (MORGAN 1968; LARSEN 1977; COUTEUR und CHILD 1989). Daran anschließende Studien zeigen, dass das Vorhandensein eines LÜW sowohl für die Entstehung als auch die Progression orthopädischer (ZIEGLER 1989) und neurologischer Erkrankungen (MORGAN et al. 1993; BENNINGER et al. 2004; LAPPALAINEN et al. 2012) prädisponierend sein kann. Der lumbosakrale Übergang weist die größte Beweglichkeit im Bereich der kaudalen Rumpfwirbelsäule bei Extension und Flexion auf (BÜRGER und LANG 1993; BENNINGER et al. 2004; FISCHER und LILJE 2011; HOHMANN 2015; WACHS et al. 2016). Hierdurch unterliegt dieser einer starken biomechanischen Beanspruchung. Durch eine Kopplung der invers ablaufenden sagittalen Bewegung von Becken und L7 mit einer kraniokaudalen Translation von L7 unterliegt die lumbosakrale Bandscheibe insbesondere im Trab einer verstärkten mechanischen Belastung (KOPP 2018). LÜW können infolge einer Veränderung der Biomechanik des lumbosakralen Überganges zu einer abnormen Beweglichkeit desselben führen (MCKEE 1993). Besteht zusätzlich eine Instabilität des Iliosakralgelenkes, kann dies für das Individuum klinisch relevante Folgen haben (MORGAN 1999b; KÜNZEL et al. 2002). Durch kumulative Mikrotraumen (LORENZ et al. 2011) kann es sekundär zur Bildung von Osteophyten an den Gelenkfortsätzen, einer *Spondylosis deformans*, einer Sklerose der Endplatten oder einer Volumenzunahme der Gelenkkapsel bzw. der *Ligamenta flava* kommen (STEFFEN et al. 2004; SHARP und WHEELER 2005; GRADNER et al. 2007). Durch die Degeneration, unter anderem des *Ligamentum flavum* und der Kapsel der Facettengelenke am lumbosakralen Übergang, kommt es zur Reduktion des maximal möglichen Winkels in Flexion (SCHMID und LANG 1993). Darüber hinaus ist eine frühzeitige Degeneration der Zwischenwirbelscheibe in diesem Bereich möglich (BENNINGER et al. 2004). Schon bei Hunden mit anatomisch normal ausgebildetem lumbosakralen Übergang sind Schädigungen der Zwischenwirbelscheibe zwischen dem letzten Lendenwirbel und dem ersten Sakralwirbel gehäuft anzutreffen (SEILER et al. 2002; BENNINGER et al. 2004; ROSSI et al. 2004; BENNINGER et al. 2006). DSH neigen zusätzlich schon im jungen Alter (< 18 Monate) dazu, signifikant mehr

degenerative Veränderungen der lumbosakralen Bandscheibe zu entwickeln als Hunde der gleichen Gewichts- und Altersklasse anderer Hunderassen (AMORT 2009; AMORT et al. 2012). Durch Verringerung der Flexibilität der gemeinsamen Zwischenwirbelscheibe von L7 und S1 kommt es als Folge einer mechanischen Belastung zur einseitigen Ausdehnung des *Anulus fibrosus* und damit zur Protrusion in Richtung des Spinalkanals. Dies wird als Hansen Typ 2 Bandscheibenvorfall bezeichnet.

All die erwähnten sekundären Veränderungen im Bereich des lumbosakralen Überganges können zu einer voranschreitenden Kompression der kaudalen neuronalen Strukturen und einer Entzündung der Nerven führen (MATTOON und KOBLIK 1993; MORGAN et al. 1993; JONES et al. 1996; SHARP und WHEELER 2005; FLÜCKIGER et al. 2009). Daraus resultiert der Krankheitskomplex der degenerativen lumbosakralen Stenose (DLSS), welcher sich im klinischen Bild eines Cauda equina Syndroms (CES) niederschlagen kann. Eine Rasseprädisposition für den DSH ist mehrfach beschrieben worden (OLIVER et al. 1978; WALLA 1986; INDRIERI 1988; FEHR und THIET 1990; WATT 1991; WHEELER 1992; TACKE et al. 1997; DANIELSSON und SJÖSTRÖM 1999; FLÜCKIGER et al. 2006; SUWANKONG et al. 2008; JANSSENS et al. 2009; MEIJ und BERGKNUT 2010). Es besteht weiterhin eine Geschlechtsdisposition für männliche Tiere (WALLA 1986; FEHR und THIET 1990; WATT 1991; TACKE et al. 1997; DANIELSSON und SJÖSTRÖM 1999; SUWANKONG et al. 2008; JANSSENS et al. 2009). Verstärkt sind Arbeits- und Sporthunde von einem CES betroffen (FEHR und THIET 1990; TACKE et al. 1997; DE RISIO et al. 2000; MOORE et al. 2001).

Die degenerative Diskopathie (DD) ist die am häufigsten festgestellte Erkrankung der Wirbelsäule des Hundes (DA COSTA und SAMII 2010). In Studien beim Menschen kann in Abhängigkeit des LÜW-Typs eine direkte Assoziation von LÜW und der Ausbildung einer DD gefunden werden. Hier unterliegt insbesondere die Bandscheibe unmittelbar oberhalb des LÜW signifikant häufiger einer Degeneration. Eine Hypermotilität und eine unphysiologische Rotation des vor dem LÜW gelegenen Wirbelsäulensegments sind nach verschiedenen Autoren die Ursache. Die Bandscheibe zwischen LÜW und Kreuzbein weist konträr signifikant weniger degenerative Veränderungen auf (CASTELLVI et al. 1984; LUOMA et al. 2004; AIHARA et al. 2005). Die Differenz resultiert aus der den lumbosakralen Übergang stabilisierenden Funktion des Darmbein-Lenden-Bandes (*Ligamentum iliolumbale*) (LUK et al. 1986; PUN et al. 1987; AIHARA et al. 2005). Dieses verläuft bilateral symmetrisch vom Querfortsatz und Wirbelkörper des fünften Lendenwirbels als oberes

Band zum Beckenkamm (*Crista iliaca*) und als unteres Band zur posterioren Grenze der *Fossa iliaca* (NEWELL 2008). Dieses Darmbein-Lenden-Band ist beim Hund nicht ausgebildet (PUN et al. 1987). Vergleichbar zu humanmedizinischen Studien finden FLÜCKIGER et al. (2006) bei Hunden mit Symptomen eines CES und ausgeprägtem LÜW ausschließlich eine Degeneration der Bandscheibe zwischen dem kaudalsten Lendenwirbel und dem LÜW. Es kann bei 87 % der Hunde mit CES und ausgeprägtem LÜW eine symmetrische Form mit bilateraler Kontaktzone zum Becken festgestellt werden. Die Autoren gehen davon aus, dass durch die Präsenz von LÜW die Zwischenwirbelscheibe kranial des LÜW einem stärkeren mechanischen Stress ausgesetzt ist, was deren frühzeitige Degeneration fördert.

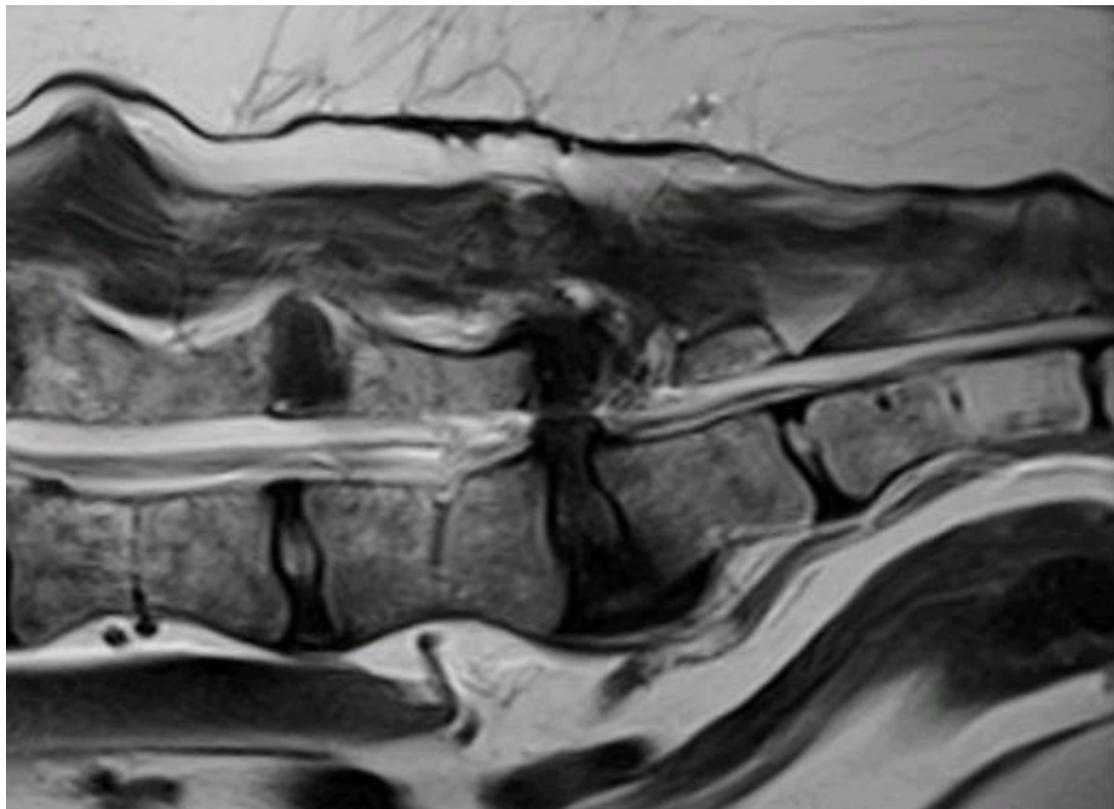
Beim Vorliegen eines CES beim Hund wird die DD mit resultierender lumbosakraler Instabilität (SCHWARZ 1991) und Hansen Typ 2 Bandscheibenvorfall am häufigsten als zugrundeliegende Ursache diagnostiziert (WATT 1991; BARTHEZ et al. 1994). Die Protrusion ist insbesondere bei operationswürdigen CES die häufigste Ursache (TACKE et al. 1997). Die Studie von STEFFEN et al. (2004) zeigt, dass asymmetrische LÜW zu einer Bandscheibenprotrusion führen können, die insbesondere unilateral ausgebildet ist. Es ist auffällig, dass alle Hunde der Studie (4 DSH und 2 Border Collies) die Protrusion auf der Seite des geringeren Kontaktes zwischen Wirbel und Darmbein aufweisen (STEFFEN et al. 2004). Die Studie von MORGAN et al. (1993) zeigt, dass LÜW in Kombination mit einer degenerativen Diskopathie und der Entwicklung eines CES eng zusammenhängen. Circa 78 % der untersuchten DSH mit LÜW und einer DD zeigen Symptome eines CES. Bei denjenigen Hunden, die nur eines der beiden Merkmale aufweisen, wird im Fall eines LÜW bei ca. 55 % der Hunde ein CES diagnostiziert, bei alleiniger DD bei ca. 57,5 % der DSH. Bei DSH, bei denen keines der Merkmale gefunden wird, liegt nur in 15 % der Fälle ein CES vor (MORGAN et al. 1993). Es soll betont werden, dass eine Degeneration der Bandscheibe nicht zwangsläufig zu klinischen Symptomen führen muss (DA COSTA und SAMII 2010).

Anamnestisch wird beim Vorliegen eines CES von Rückenschmerzen, Hinterhandschwäche, Bewegungsunlust, Schwierigkeiten beim Stehen, Treppenlaufen oder Springen und einer reduzierten Schwanzmotorik berichtet. Die klinischen Symptome und deren Ausprägung sind abhängig von den Nerven der *Cauda equina*, die komprimiert werden (TACKE et al. 1997), und vom Grad der Beeinträchtigung dieser neuronalen Strukturen (JAGGY et al. 1987; KENT 2005; MEIJ und BERGKNUT 2010). Das am häufigsten festgestellte Symptom ist Schmerzhaftigkeit im lumbosakralen Übergangsbereich (SCHWARZ 1991; WATT 1991; SISSON et al. 1992; TACKE et al. 1997; RAMIREZ III und THRALL 1998; MAYHEW et al. 2002; SCHARF

et al. 2004; KENT 2005; STEFFEN et al. 2007; SUWANKONG et al. 2008; JANSSENS et al. 2009). Weitere Symptome sind Hypo-, Areflexie, Paresen, Paralysen oder eine neurogene Muskelatrophie der Hintergliedmaßen. Zusätzlich können seltener Harn- und Kotinkontinenz bestehen (JAGGY et al. 1987; MCKEE 1993; MORGAN et al. 1993; STEFFEN et al. 2004; JANSSENS et al. 2009; ARCHER et al. 2010; MEIJ und BERGKNUT 2010; RYTZ et al. 2010; WOLFE und KUBE 2015). In der neurologischen Untersuchung können reduzierte Stellreaktionen und reduzierte Reflexe der Hintergliedmaßen, ein reduzierter Analtonus und kaudale Rückenschmerzen auffallen (MORGAN et al. 1993; BARTHEZ et al. 1994; KENT 2005; ARCHER et al. 2010). Der Patellarsehnenreflex ist meist normoreflektorisch, kann jedoch aufgrund eines Tonusverlustes der Antagonisten (*M. biceps femoris*, *M. semitendinosus*, *M. semimembranosus*) auch pseudohyperreflektorisch sein (SCHWARZ 1991; KENT 2005).

LÜW als zugrunde liegende Ursache für ein CES sind von verschiedenen Autoren divergierend bewertet worden. Dass durch Achsenrotation der Wirbelsäule ein LÜW zu einem pathologischen Gangbild führen kann, ist nach LANG und JAGGY (1989) durch eine veränderte Mechanik und weniger durch die Beeinträchtigung neuronaler Strukturen begründet. Einen engen Zusammenhang beim DSH zwischen der Entwicklung eines CES und dem Vorhandensein eines LÜW wird durch die Studie von MORGAN et al. (1993) deutlich. 38 % einer 58 DSH großen Patientengruppe mit CES weisen hier einen LÜW auf (MORGAN et al. 1993). FLÜCKIGER und Mitarbeiter (2006) können zeigen, dass das Risiko, an einem CES zu erkranken, bei Hunden mit LÜW in etwa achtfach erhöht ist. Zusätzlich wird dargestellt, dass Hunde mit ausgeprägtem LÜW ( $4,8 \pm 2,8$  Jahre) durchschnittlich 1,6 Jahre früher Symptome eines CES entwickeln als diejenigen ohne LÜW ( $6,4 \pm 3,3$ ). Die Arbeitsgruppe vermutet als Grundursache für die frühere Entwicklung eines CES eine Beschleunigung der Degeneration der Bandscheibe aufgrund eines vorliegenden lumbosakralen Übergangswirbels. Alternativ ist denkbar, dass eine dysplastische Bandscheibe, die anfällig für eine vorzeitige Degeneration ist, die Grundursache darstellt. 22,5 % der Hunde mit CES besitzen in der Studie von LEDECKÝ et al. (2007) einen LÜW. Es soll jedoch ebenfalls erwähnt werden, dass das Vorhandensein eines LÜW nicht obligat zu einer klinisch manifesten Erkrankung des betroffenen Individuums führen muss (MORGAN et al. 1993). So kann bei Hunden eine degenerative lumbosakrale Stenose oder eine andere radiologische Veränderungen im lumbosakralen Übergang vorliegen, ohne dass klinische Symptome auffällig sind (JONES und INZANA 2000; SCHARF et al. 2004; JEFFERY et al. 2014). Die in der MRT festgestellte Schwere der *Cauda*

*equina* Kompression korreliert nicht signifikant mit der klinischen Schwere der Symptome (MAYHEW et al. 2002) (Abb. 6).



**Abbildung 6:** Magnetresonanztomographie der kaudalen Lendenwirbelsäule und des Kreuzbeines eines DSH mit Cauda equina Syndrom und vorhandenem LÜW-Typ III im T2-gewichteten Sagittalschnitt im Alter von ca. 9 Jahren. Zu erkennen ist u. a. der Bandscheibenvorfall Hansen Typ 2 (Bandscheibenprotrusion) zwischen dem letzten physiologischen Lendenwirbel und dem LÜW mit Einengung des Wirbelkanals von ventral sowie die vollständige Trennung des LÜW vom ersten Sakralwirbel. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

Die Präsenz einer bilateral unterschiedlichen Verbindung des Beckens mit den Wirbeln, wie sie MORGAN (1968) bei der Präsenz eines LÜW beschreibt, kann neben neurologischer auch die Entwicklung orthopädischer Folgeerkrankungen begünstigen. Analog zur Entstehung eines CES führen LÜW als Malformation der Wirbelsäule nicht primär zur HD. Vielmehr manifestieren sich klinische Symptome erst durch die Bildung sekundärer Veränderungen (SCHAWALDER et al. 1996). Per se besitzen DSH laut SMITH et al. (2001) im Vergleich zu Rassen etwa übereinstimmender Körpermassen (Golden Retriever, Labrador Retriever und Rottweiler) eine 4,95-fach erhöhte Wahrscheinlichkeit, eine degenerative Gelenkerkrankung der Hüftgelenke zu entwickeln. Der Zusammenhang zwischen der Präsenz eines LÜW und der Entwicklung einer Coxarthrose mit oder ohne zugrunde liegender Hüftgelenkdysplasie wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Die Hüftgelenkdysplasie beim Hund ist eine multifaktorielle Erkrankung mit erblicher Komponente und entwicklungsassoziierten Abweichungen der Hüftgelenke. In der Literatur werden die Begriffe

Hüftgelenkdysplasie und Coxarthrose häufig synonym verwendet. Als wesentliches Kriterium in der Entwicklung einer HD wird eine vermehrte Lockerheit des Hüftgelenkes angesehen (LUST 1997; FLÜCKIGER et al. 2017). Unterschieden werden muss zwischen einer passiven und einer funktionellen Lockerheit. Durch mechanische Belastung während der Bewegung kommt es zur Überführung der passiven in die funktionelle Lockerheit. Der Gelenkknorpel wird unphysiologisch stark belastet und es resultieren Mikrofrakturen und Gelenkknorpelschäden, die mit einer Entzündung beteiligter Strukturen einhergehen können (SMITH et al. 2001). Die Folge ist häufig eine Coxarthrose (SMITH et al. 2001). Eine Korrelation von LÜW, besonders in ihrer asymmetrischen Ausprägung, zur Entwicklung degenerativer Veränderungen an den Hüftgelenken durch eine Alteration der mechanischen Belastung aufgrund einer Achsenrotation des Beckens ist für KÜNZEL et al. (2002) denkbar. Nach LARSEN (1977) besteht durch eine Schrägstellung der Hüfte und der damit veränderten Geometrie des Hüftgelenkes eine Prädisposition für dysplastische Veränderungen der Hüftgelenke, insbesondere auf der nach dorsal deviierten Seite. In der Studie von ZIEGLER (1989) kann bei 73 % der Hunde mit LÜW eine Coxarthrose festgestellt werden. Hierbei ist auffällig, dass bei symmetrischen LÜW, die arthrotischen Veränderungen vorwiegend bilateral (85 %) vorliegen. Bei asymmetrischen LÜW betrifft die Arthrose insbesondere die Seite, auf der der Querfortsatz des LÜW prominenter und die Iliosakralgelenksfläche länger ausgebildet ist. Die Untersuchung von MORGAN (1999) stellt bei 58 Hunden (40,6 %) mit LÜW eine Rotation oder Schiefstellung des Beckens fest. Davon zeigen 32 Hunde (22,4 % der Gesamtanzahl) eine asymmetrische Hüftgelenkdysplasie. So führt eine inkongruente und bilateral voneinander abweichende Überdachung der Femurköpfe (*Capita ossis femoris*) durch die Gelenkpfannen (*Acetabula*) zu einer Subluxation mit sekundärer Arthrosebildung, insbesondere auf der Seite mit geringerer Überdachung (MORGAN 1999b). Nach einer Studie aus dem Jahr 2015 weisen DSH mit LÜW häufiger eine Hüftgelenkdysplasie des Schweregrades E nach den Richtlinien der Fédération Cynologique Internationale (FCI) auf als diejenigen ohne LÜW (KOMSTA et al. 2015). Einer aktuellen Studie zufolge besteht eine signifikante Korrelation bezüglich asymmetrischer LÜW und einer bilateral unterschiedlichen Hüftgelenksbeurteilung. So weisen Hunde mit der Kombination eines lendenwirbelähnlichen Querfortsatzes ohne Kontakt zum *Os ilium* auf der einen und eines sakralwirbelähnlichen Querfortsatzes mit einer breiten Kontaktfläche zum *Os ilium* auf der anderen Seite einen Unterschied von einem Schweregrad entsprechend der Beurteilungskriterien der HD der FCI auf (FLÜCKIGER et al. 2017). Die Hüftgelenke von Hunden mit symmetrischen oder geringgradig asymmetrischen LÜW werden nicht signifikant unterschiedlich bewertet. Die Seite mit

dem sakralwirbelähnlichen Querfortsatz wird meist, insbesondere bezüglich eines reduzierten Norberg-Winkels und der Reduktion der Überdachung des Femurkopfes, schlechter beurteilt (FLÜCKIGER et al. 2017).

Davon abweichend, veröffentlichen andere Autoren divergierende Untersuchungsergebnisse. WINKLER (1985) erkennt, in Ausnahme der Hunderasse „Boxer“, keinen Zusammenhang zwischen der Präsenz eines LÜW und dem Hervorrufen einer HD. Jedoch ist es nach dem Autor denkbar, dass eine bestehende HD verstärkt werden könnte. Eine italienische Studie zum Auftreten der unilateralen HD beim Hund findet keine signifikante Korrelation zum Vorliegen eines LÜW. Nur 8 von 149 Hunden (5,4 %) mit unilateraler HD, von denen 7 DSH sind, weisen einen LÜW auf. 50 % der LÜW sind asymmetrisch (CITI et al. 2005). Auch die Studie von LEDECKÝ et al. (2007) weist keinen direkten Einfluss von LÜW auf die Entwicklung einer HD nach. Die Arbeitsgruppe räumt jedoch ein, dass LÜW zu einer abnormalen Rotation des Beckens mit einer reduzierten Überdachung der Femurköpfe führen kann. Nach WIGGER und Mitarbeiter (2009) ist in einer Studie mit 5.000 DSH eine Korrelation nicht sicher nachweisbar. Zwar ist eine Tendenz bei asymmetrischen LÜW bezüglich der Ausbildung einer asymmetrischen HD zu erkennen, jedoch ist eine statistische Absicherung aufgrund der geringen Anzahl betroffener Tiere in dieser Studie nicht möglich (WIGGER et al. 2009).

Das Auffinden eines vorhandenen Übergangswirbels besitzt auch im Hinblick der Planung chirurgischer Eingriffe an der Wirbelsäule eine wichtige klinische Bedeutung (HECHT und MORANDI 2008). Bei ausbleibender Detektion können Zugänge zum Operationsgebiet an der falschen Stelle erfolgen (KEALY 1981; WESTWORTH und STURGES 2010). Soll eine epidurale Injektion durchgeführt werden, ist die Kenntnis über einen vorhandenen LÜW ebenfalls von Vorteil. Durch Malformationen der Wirbel oder Fusion benachbarter Wirbel ist der Zugang über das *Spatium lumbosacrale* möglicherweise nicht möglich (LARSEN 1977).

#### **6.4.4 Vorstudien über lumbosakrale Übergangswirbel**

LÜW werden nicht selten als Zufallsbefund bei der röntgenologischen Untersuchung des lumbosakralen Überganges oder des Beckens festgestellt (TELLHELM und BRASS 1994; BREIT et al. 2003; DAMUR-DJURIC et al. 2006; THRALL 2013). Sie sind angeboren und bei Hunden in allen Altersklassen radiologisch zu finden (MORGAN 1968, 1999b). Es existiert keine Geschlechtsprädisposition (LARSEN 1977; WINKLER 1985; MORGAN 1999b; DAMUR-DJURIC et al. 2006; FLÜCKIGER et al. 2006; JULIER-FRANZ 2006; LEDECKÝ et al. 2007; ONDREKA 2009; WIGGER et al.

2009; FIALOVÁ et al. 2014; FLÜCKIGER et al. 2017). Allenfalls wird von einer geringgradigen Geschlechtsdisposition für Rüden (56 %) berichtet (ZIEGLER 1989). Es besteht zusätzlich kein Unterschied bezüglich der Prävalenz im Zusammenhang mit der Körpergröße (DAMUR-DJURIC et al. 2006).

Die Prävalenz eines LÜW beim Hund wird in der Literatur mit regional stark schwankenden Werten angegeben. Dies resultiert vermutlich zu großen Teilen aus der Anwendung unterschiedlicher Klassifikationssysteme (FIALOVÁ et al. 2014). In der Arbeit von LARSEN (1977) werden Daten einer Beurteilung des Hüftgelenksstatus und anderer radiologischer Befunde von 24.463 Hunden auf das Vorhandensein eines LÜW untersucht. Die Hunde gehören 57 unterschiedlichen Hunderassen an. Es können lediglich bei 552 Hunden (2,25 %) Übergangswirbel festgestellt werden. Larsen vermutet jedoch, dass die Prävalenz über dem Wert des Studienergebnisses liegt. Schlussgefolgert wird dies daraus, dass in der Studie auch Röntgenbilder befundet werden, bei denen der lumbosakrale Übergang zur Bewertung eines LÜW nicht auswertbar ist. Die Prävalenz beim DSH nimmt in der Studie den höchsten Wert (4,27 %) ein. MORGAN (1999) beurteilt die Aufnahmen von 5.000 Hunden einer vorselektierten Gruppe. Röntgenaufnahmen zur Beurteilung des Hüftgelenkstatus, einem möglichen Beckentrauma, Schmerzen des Bewegungsapparates im Bereich des Beckens und jene, die aufgrund einer Lahmheit der Hinterhand aufgenommen werden, werden in dieser Studie beurteilt. Aufnahmen von Hunden, die am Cauda equina Syndrom leiden, sind dagegen von der Statistik ausgeschlossen. Bei den mehr als 5.000 die Kriterien erfüllenden Hunden weisen 143 einen LÜW auf. Die Prävalenz wird mit zirka 2 bis 5 % angegeben. Die Häufigkeit betroffener DSH ist überproportional höher. BREIT et al. (2003) können in ihrer Studie auf Röntgenaufnahmen von 145 Hunden zurückgreifen, die eine genügend gute Qualität für eine Beurteilung besitzen. Insgesamt wird 25 Hunden (17,24 %) die Präsenz eines LÜW nachgewiesen. Die Studie von LEDECKÝ et al. (2007) weist das Vorhandensein eines LÜW bei 4,1 % der untersuchten Hunde nach. Die Population dieser Studie besteht aus 4 Hunderassen (DSH, Rhodesian Ridgeback, Berner Sennenhund und die als eine Rasse zusammengefassten Rassen Bayrischer Gebirgsschweißhund sowie Hannoverscher Schweißhund). Die mit 4,44 % höchste Prävalenz hat der DSH. Betrachtet man nur das Vorkommen von LÜW beim DSH, weisen laut WIGGER et al. (2009) 1.270 der 4.386 untersuchten DSH (29,0 %) einen LÜW auf. Eine weitere Studie zeigt in 78 von 1.267 Fällen (6,2 %) einen LÜW. Die Prävalenz beim DSH liegt in dieser Studie bei einem Wert von 6,8 % (ONDREKA 2009). In einer weiteren Studie aus dem Jahr 2012 liegt die Prävalenz beim DSH sogar bei 40 % (LAPPALAINEN et al. 2012). Bei den Hunden in der Studie von FIALOVÁ et al. (2014) kann aus der

Gesamtzahl von 1.878 Hunden bei 188 ein LÜW nachgewiesen werden. Die höchste Prävalenz besteht beim DSH (25,9 %). Zusammenfassend liegt die Prävalenz bei den in dieser Arbeit im Fokus liegenden DSH zwischen 4,3 und 40 %. Die unterschiedliche Größenordnung der Prävalenzen lässt sich vermutlich dadurch erklären, dass einige Studien LÜW des Typ I nicht beachten. *Tabelle 1* zeigt eine Auflistung der wichtigsten Literaturstellen.

**Tabelle 1:** Prävalenz von lumbosakralen Übergangswirbeln innerhalb einer nicht weiter nach Rassen differenzierten Hundepopulation und bei Deutschen Schäferhunden entsprechend ausgewählter Studien verschiedener Autoren. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

Jahr	Autor	Patientenzahl	LÜW	Insgesamt (%)	DSH (%)
1977	Larsen	24.463	552	2,25	4,3
1985	Winkler	12.521	969	7,7	11,1
1989	Ziegler	6.227	568	9,1	15,6
1999	Morgan	> 5.000	143	2,0 – 5,0	/
2006	Damur-Djuric et al.	4.000	138	3,5	5,7
2006	Julier-Franz	4.386	1.270	29,0	29
2007	Ledecký et al.	1.964	81	4,1	4,44
2009	Ondreka	1.267	78	6,2	6,8
2012	Lappalainen et al.	228	92	40,0	40,0
2014	Fiavolá et al.	1.878	188	10,0	25,9

## 6.5 Nachweis von LÜW

LÜW werden nicht selten als Nebenbefund bei der Beurteilung von Röntgenaufnahmen festgestellt (TELLHELM und BRASS 1994; BREIT et al. 2003; DAMUR-DJURIC et al. 2006; THRALL 2013). Gewöhnlich wird das Vorhandensein eines LÜW im Rahmen des offiziellen Screenings auf Hüftgelenkdysplasie gemäß den „Anforderungen an die Röntgenaufnahmen zur Diagnose der Hüftgelenkdysplasie“ der FCI beurteilt. Die FCI stellt Anforderungen an das Signalement der Hunde, deren Identifikation, die Aufnahme der Röntgenbilder und deren Befundung. Schließlich wird anhand der röntgenologischen Befunde entsprechend des Klassifikationsschemas zur HD ein HD-Grad festgelegt (BRASS 1993). Diese Aufnahmen stellen die am häufigsten durchgeführte Projektion zur Beurteilung der Hüftgelenke und des Beckens, und damit auch des lumbosakralen Übergangs, dar (MORGAN 1999b; BREIT et al. 2003). In den meisten Fällen ist die ventrodorsale Aufnahme zur Detektion eines LÜW ausreichend (MORGAN et al. 1999). Die Präsenz eines LÜW kann je nach Ausprägung aber auch durch die Beurteilung einer laterolateralen Röntgenaufnahme des lumbosakralen

Überganges erfolgen (MORGAN 1999b; SJÖSTRÖM 2003; LAPPALAINEN et al. 2012). Gemäß der Studie von LAPPALAINEN et al. (2012) gelingt die Diagnose eines LÜW rein durch die ventrodorsale Aufnahme in 67,4 % der Fälle, in 8,7 % durch die laterolaterale und in 16,3 % ausschließlich durch eine Kombination beider. FIAVOLÁ et al. (2014) benötigen zur Klassifikation in 67,0 % der Fälle beide Aufnahmen. Nur bei ca. einem Drittel (33,0 %) der untersuchten Hunde reicht die ventrodorsale Aufnahme zur Klassifikation aus. Durch Kombination beider Aufnahmen kann entsprechend den Ergebnissen die Sensitivität von 90 % auf 100 % gesteigert werden (LAPPALAINEN et al. 2012). Zur Anfertigung qualitativ hochwertiger Aufnahmen der Wirbelsäule, und damit auch des lumbosakralen Übergangs, ist eine optimale Lagerung grundlegend (MORGAN 1999a; HECHT und MORANDI 2008).

### 6.5.1 HD-Röntgen

Entsprechend den Vorgaben der FCI muss wenigstens eine ventrodorsale Aufnahme mit nach kaudal ausgestreckten Beinen aufgenommen werden. Zusätzlich kann eine weitere Aufnahme im ventrodorsalen Strahlengang mit abduzierten Hinterbeinen erfolgen (TELLHELM und BRASS 1989; BRASS 1993; FCI 2006). Diese Aufnahme ermöglicht eine genauere Beurteilung des lumbosakralen Zwischenwirbelspaltes (DAMUR-DJURIC et al. 2006).

Nach der sicheren Identifikation der mindestens ein Jahr alten Hunde (BRASS 1993; FCI 2006), erfolgt eine Sedation oder Allgemeinanästhesie zum Erreichen einer ausreichenden Muskelrelaxation der Hunde (FCI 2006). Der in Rückenlage auf dem Röntgentisch positionierte Hund wird, z. B. durch Verwendung von Sandsäcken, ausreichend stabilisiert. Ein röntgendichtes Seitenzeichen wird derart im Röntgenstrahl positioniert, dass die Seitenverhältnisse auf dem Röntgenbild unveränderlich markiert werden. Die Blende der Röntgenröhre wird so eingestellt und die Größe des Filmes ausgewählt, dass das gesamte Becken mit den nach kaudal ausgestreckten Hinterbeinen bis einschließlich beider Kniescheiben (*Patellae*) abgebildet wird (TELLHELM und BRASS 1989; BRASS 1993). Die Hinterbeine werden maximal nach kaudal gezogen, so dass sie parallel und möglichst plattennah gelegen sind. Die Kniegelenke werden so eingedreht, dass die Patella zentral zwischen den vesalischen Sesambeinen der jeweiligen Gliedmaße liegt (*Abb. 7 (A, B)*).



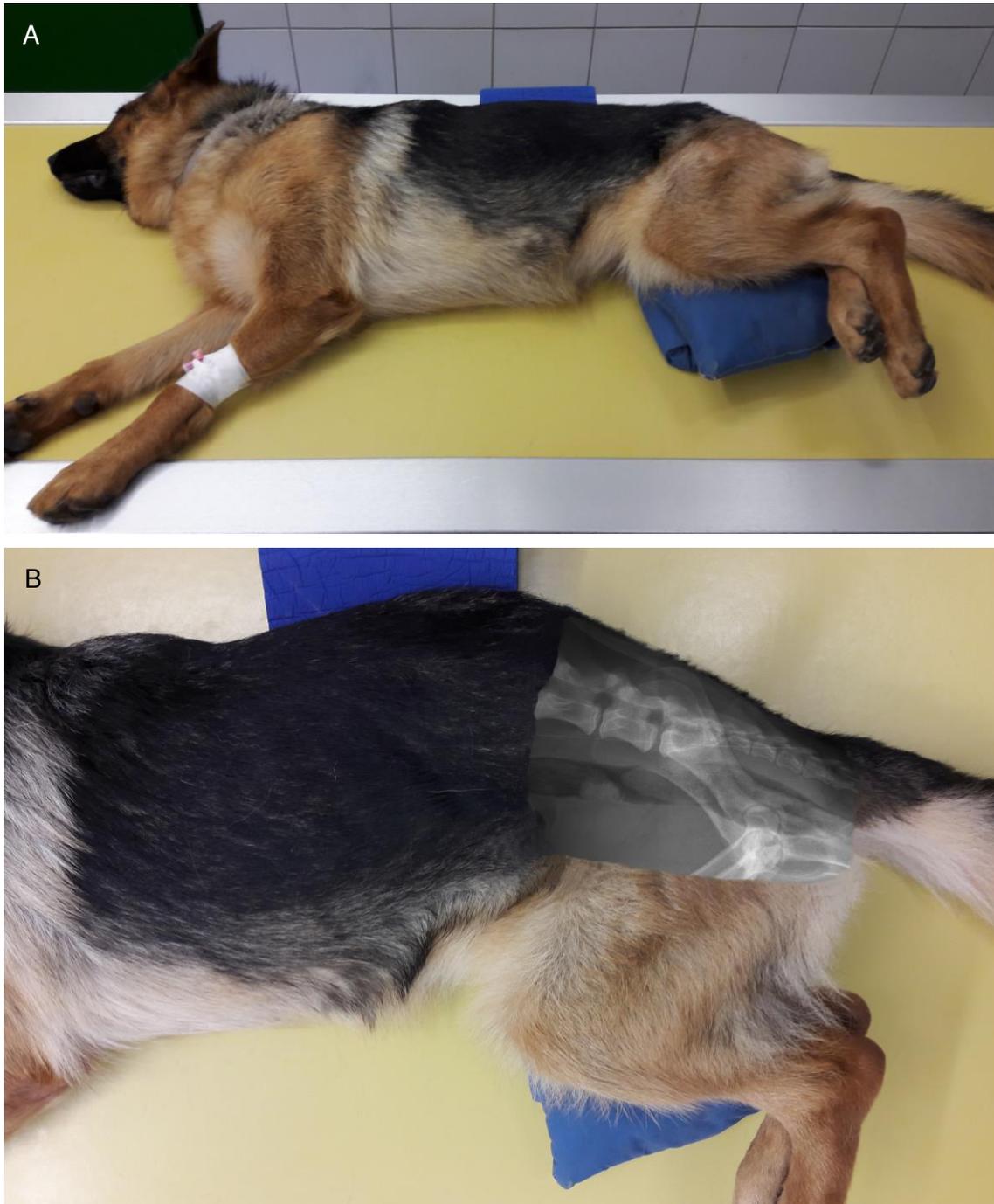
**Abbildung 7 (A, B):** Lagerung eines DSH zur Durchführung einer Röntgenaufnahme des Beckens im ventrodorsalen Strahlengang zur Diagnose einer Hüftgelenkdysplasie mit nach kaudal gezogenen Hinterbeinen. 7A: Lagerung in Rückenlage unter Verwendung einer Lagerungshilfe sowie Fixation aller Gliedmaßen mit elastischen Binden. Zur korrekten Positionierung der Hintergliedmaßen wurde ein Sandsack verwendet. 7B: Aufsicht auf den zu röntgenden Bereich mit überlagerter Darstellung knöcherner Strukturen extrahiert aus dem entstandenen Röntgenbild. (DSH = Deutscher Schäferhund)

Eine gute Lagerung in Rückenlage zeichnet sich durch auf dem Röntgenbild median gelegene Dornfortsätze aus. Zusätzlich sollen die *Foramina obturata* und die Darmbeinflügel bilateral symmetrisch in Form und Größe sein und die Beckensymphyse (*Symphysis pelvina*) in der Mittellinie liegen (TELLHELM und BRASS 1989; MORGAN 1999b). Bei der Vorbereitung der Röntgenaufnahme und der Lagerung kann es, insbesondere bei vorhandenem asymmetrischen LÜW, zu Schwierigkeiten bei der symmetrischen Lagerung der Hunde kommen (LARSEN 1977; KEALY 1981; BIERY 1989; TELLHELM und BRASS 1994; MORGAN 1999b; BREIT et al. 2003; BURK und FEENEY 2003).

### 6.5.2 Röntgenmerkmale von LÜW

Bei der Beurteilung der ventrodorsalen Aufnahmen kann unter anderem eine Isolation des Dornfortsatzes des S1 von den beiden folgenden Sakralwirbeln, wie es beim LÜW-

Typ I der Fall ist, festgestellt werden (BREIT et al. 2003; LAPPALAINEN et al. 2012). In diesem Fall liegt ein größerer Abstand zwischen dem Dornfortsatz vom ersten zum zweiten Sakralwirbel im Vergleich zum Abstand zwischen letzterem und dem dritten Sakralwirbel vor (JULIER-FRANZ 2006). Normalerweise stellen sich die Dornfortsätze des Sakrums als drei ründliche bis annähernd längliche mineraldichte Strukturen dar, die untereinander in Verbindung stehen (MORGAN 1999a; MORGAN 1999b) und einen Kamm mit Einkerbungen bilden (KEALY 1981). Die Dornfortsätze können beim Vorliegen eines LÜW trotz schräger Lagerung des Beckens zentral in der Medianen projiziert sein (TELLHELM und BRASS 1989). Im ventrodorsalen Strahlenverlauf lässt sich die Morphologie der Querfortsätze und die des Wirbelkörpers gut beschreiben. Wichtig im Hinblick auf die Klassifikation der LÜW ist dabei die Symmetrie der Querfortsätze. Darüber hinaus kann eventuell eine Loslösung des Wirbelkörpers des S1 vom übrigen Kreuzbein festgestellt werden. Auch LÜW mit Querfortsätzen, die denen der Kreuzbeinflügel ähneln, sind zu erkennen. Eventuell bestehende Verbindungen der Querfortsätze des LÜW zum Darmbein können detektiert werden. Informationen erhält man auch über die Morphologie der Verbindung zwischen Sakrum und dem Becken, dem Iliosakralgelenk, und einer eventuell vorhandenen Achsenrotation des Beckens (SJÖSTRÖM 2003). Grundsätzlich ist es jedoch auch möglich, dass ein LÜW im ventrodorsalen Strahlengang nicht zu erkennen ist (LAPPALAINEN et al. 2012). In der laterolateralen Aufnahme lassen sich insbesondere eine numerische Abweichung der Sakrumwirbel, eine Trennung der Wirbelkörper von S1 und S2 sowie die Zwischenwirbelspalten beschreiben (MORGAN 1999b; LEDECKÝ et al. 2007) (*Abb. 8 (A, B)*). Dies ist vor allem dann der Fall, wenn eine Trennung des LÜW von den restlichen Sakralwirbeln vorliegt und ein neuer Zwischenwirbelspalt entsteht (MORGAN 1999b; BREIT et al. 2003; LAPPALAINEN et al. 2012). Dieser Spalt kann auf Röntgenaufnahmen in seiner Weite variieren oder teilweise partiell fusioniert sein (MORGAN 1999b). FIAVOLÁ et al. (2014) will sogar durch ihre Studie gezeigt haben, dass eine Beurteilung des Vorhandenseins eines rudimentären Spaltes zwischen den ersten beiden Sakralwirbeln ohne die laterolaterale Röntgenaufnahme nicht möglich sei. Asymmetrien der Querfortsätze lassen sich im laterolateralen Strahlengang häufig nicht beschreiben (STEFFEN et al. 2004).



**Abbildung 8 (A, B):** Lagerung eines DSH zur Durchführung einer Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges im laterolateralen Strahlengang. Zur Einleitung der Allgemeinanästhesie wurde ein Venenverweilkatheter in die linke Vena cephalica antebrachii gelegt. 8A: Der DSH befindet sich in rechter Seitenlage. Zur parallelen Lagerung des Beckens zum Tisch wurden ein Schaumstoffkeil sowie ein Sandsack positioniert. 8B: Aufsicht auf den zu röntgenden Bereich mit partieller, überlagerter Darstellung des erhaltenen Röntgenbildes. (DSH = Deutscher Schäferhund)

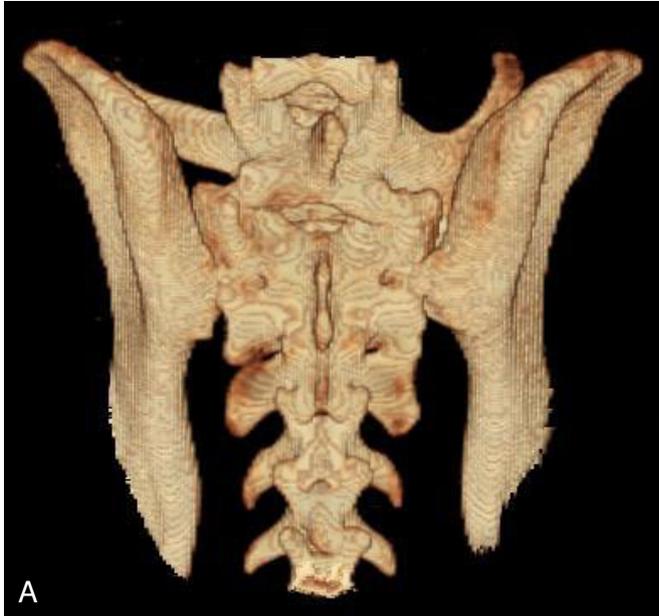
Beim Vorliegen einer reinen spinalen Malformation im Sinne eines LÜW, ohne ausgebildete Sekundärveränderungen, ist die Knochenstruktur radiologisch normalerweise unauffällig. Sowohl die Knochentrabekel, die Kortizes als auch die periostalen Oberflächen entsprechen denen eines physiologisch ausgebildeten Wirbels

(MORGAN 1999a). Röntgenaufnahmen des lumbosakralen Überganges sind aufgrund der komplexen Anatomie häufig schwierig zu interpretieren (LANG und JAGGY 1989; WATT 1991; RAMIREZ III und THRALL 1998; KENT 2005). Zusätzlich kann die Beurteilung eines LÜW in der ventrodorsalen Aufnahme durch die Überlagerung mit Exkrementen oder der Vorhaut (Präputium) beim Rüden (BREIT et al. 2003) oder im laterolateralen Strahlengang durch die Überlagerung mit den Beckenschaufeln erschwert werden (LANG und JAGGY 1989).

### **6.5.3 Weiterführende Diagnostik beim Cauda equina Syndrom (CES)**

Zur Diagnostik eines eventuell aus einem LÜW resultierenden CES kann eine weiterführende bildgebende Untersuchung des lumbosakralen Überganges mittels Myelographie, Diskographie und Epidurographie notwendig werden (MORGAN und BAILEY 1990; MORGAN 1999b; STEFFEN et al. 2004). Zu beachten ist, dass der Nachweis einer ventralen Kompression der *Cauda equina* nicht immer mittels Myelographie erbracht werden kann, da möglicherweise der Subarachnoidalraum, in den das Kontrastmittel injiziert wird, kranial der Läsion endet (LANG und JAGGY 1989; SCHWARZ 1991; RAMIREZ III und THRALL 1998; KENT 2005; MEIJ und BERGKNUT 2010). Zusätzlich kann durch eine Myelographie eine weit lateral gelegene Kompression einer Nervenwurzel möglicherweise nicht dargestellt werden (SCHWARZ 1991). Aus diesen Gründen raten unterschiedliche Autoren zur Durchführung einer Epidurographie (SCHWARZ 1991) und Diskographie (RAMIREZ III und THRALL 1998), sofern keine computergestützten bildgebenden Verfahren durchgeführt werden können. Im Vergleich dieser beiden Methoden ist die Diskographie mit 87 % diagnostischer Genauigkeit der Epidurographie, welche in 20 % der Fälle eine falsche Diagnose ergab, in der Darstellung einer Bandscheibenprotrusion überlegen (SISSON et al. 1992). Nach Etablierung der hochauflösenden Computertomographie (CT) als Schnittbildverfahren zur Darstellung lumbosakraler Erkrankungen in der Humanmedizin wird dieses Diagnostikum zur Anwendung am Hund vorgeschlagen (JONES et al. 1994). Die Computertomographie und die Magnetresonanztomographie (MRT) werden mittlerweile routinemäßig zur Diagnostik spinaler Erkrankungen eingesetzt und bieten signifikante Vorteile gegenüber Röntgen und Myelographie (DA COSTA und SAMII 2010). Entsprechend den Ergebnissen einer Studie an 57 Hunden mit Diskopathie und 13 Hunden mit CES weist die CT im Vergleich zur Myelographie eine signifikant höhere Sensitivität bezüglich der Diagnosefindung auf. Dies ist insbesondere bei lateralen Kompressionen der Fall (ZANDER 2002). Zum Nachweis einer CES im Zusammenhang mit einer DLSS sind die CT und MRT die sensitivsten Methoden (DE RISIO et al. 2001; AXLUND und HUDSON 2003). Zur Darstellung von Knochen, und

damit auch zur Klassifikation eines LÜW, ist die CT der MRT überlegen (DA COSTA und SAMII 2010), jedoch ist eine CT rein zur Darstellung eines LÜW selten indiziert (KONIN und WALZ 2010) (Abb. 9 (A - C)).



**Abbildung 9 (A - C):** Dreidimensionale CT-Rekonstruktion eines lumbosakralen Übergangswirbels Typ III eines ein Jahr alten Labrador Retriever. Zu erkennen ist die Ausbildung asymmetrischer Querfortsätze, von derer der rechte breitbasig Kontakt mit der ipsilateralen Darmbeinschaukel aufnimmt. Der linke Querfortsatz besitzt eine lendenwirbelähnliche Konformation. (CT = Computertomographie) - Fortsetzung auf der nächsten Seite

9A: dorsale Aufsicht

9B: kranioventrale Aufsicht

9C: kraniale Aufsicht





Die Durchführung einer MRT ist aufgrund ihrer höheren Bildinformationen bezüglich Weichteilgewebe und neuronaler Strukturen zur Darstellung eines CES einer CT vorzuziehen (RAMIREZ III und THRALL 1998; KENT 2005; KONIN und WALZ 2010). Nach einer Studie zum Vergleich von Histopathologie als Goldstandard und MRT lassen sich Bandscheibenveränderungen mit einer Sensitivität von 100 % sowie einer Spezifität von 79 % durch ein MRT beschreiben (SEILER et al. 2003). Eine dargestellte Protrusion in der CT oder im MRT bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass klinische Symptome auffällig sein müssen. In einer CT-Studie zur Darstellung der lumbosakralen Zwischenwirbelscheibe von 22 mittelgroßen, klinisch unauffälligen Hunden kann bei allen eine Protrusion mit mindestens 25 Prozent Diametereinengung des Wirbelkanals dargestellt werden (AXLUND und HUDSON 2003). Fraglich ist, ob dies aus der in der Studie angewandten Lagerung in Rückenlage mit variabler Streckung der Hintergliedmaßen resultiert. In einer an die Bildgebung angeschlossenen chirurgischen Exploration des lumbosakralen Überganges dieser Hunde wird keine Protrusion gefunden. Zum Zeitpunkt der Operation waren alle Hunde in Rückenlage mit gebeugten Hintergliedmaßen gelagert. Schon WALLA (1986) stellt fest, dass sich ein Hansen Typ 2 Bandscheibenvorfall in gestreckter Position deutlicher darstellt.

Eine Klassifikation von LÜW sowie die Durchnummerierung der Wirbel im lumbosakralen Übergangsbereich mittels MRT ohne vorherige Übersichtsröntgenaufnahmen sind schwierig durchzuführen. Informationen über zusätzlich vorhandene thorakolumbale Übergangswirbel sind im Vorfeld notwendig (HUGHES und SAIFUDDIN 2004; KONIN und WALZ 2010). Deshalb haben Übersichtsröntgenaufnahmen nach wie vor diagnostische Wichtigkeit und sollten, insbesondere im Hinblick auf eine Detektion von knöchernen Malformationen, vor der

Diagnostik mittels CT oder MRT durchgeführt werden (DE RISIO et al. 2000; DA COSTA und SAMII 2010; WOLFE und KUBE 2015).

## 6.6 Genetische Grundlagen zu LÜW

Vergleicht man die Prävalenzen verschiedener Hunderassen in Bezug auf das Vorkommen von LÜW, so sind deutliche rassespezifische Unterschiede auffällig. Deshalb halten unterschiedliche Arbeitsgruppen eine Vererbbarkeit für wahrscheinlich (MORGAN et al. 1999; DAMUR-DJURIC et al. 2006; FLÜCKIGER et al. 2009). MORGAN et al. (1993) vermuten eine familiäre Häufung. Der Umstand, dass manchmal alle Geschwister eines Wurfes einen LÜW besitzen, bestärkt die Vermutung einer familiären Häufung (FLÜCKIGER et al. 2009). Innerhalb einer Studie über Knochendysplasien beim Labrador Retriever werden von 14 LÜW-positiven Hunden Nachkommen auf ihren LÜW-Status hin untersucht. Dabei stellen sie LÜW innerhalb aller Würfe eines Rüden mit 4 unterschiedlichen Hündinnen sowie in den Würfen zweier Rüden mit jeweils 2 unterschiedlichen Hündinnen und zweier weiblicher Wurfgeschwister mit unterschiedlichen Rüden fest (MORGAN et al. 1999). Eine Studie von JULIER-FRANZ aus dem Jahr 2006 ermittelt für 4.119 DSH 872 Vatertiere mit einer durchschnittlichen Nachkommenzahl von 4,7. Hierbei wird eine Heritabilität des Merkmals LÜW in der Größenordnung zwischen 20 und 30 % festgestellt. Dies entspricht der Heritabilität der HD (JULIER-FRANZ 2006). Entsprechend der Studie von ONDREKA (2009) ist die Heritabilität mit > 60 % bezüglich des Merkmals LÜW sogar noch höher.

In einem Review aus dem Jahr 2010 zur Untersuchung hereditärer Erkrankungen bei Rassehunden wird davon berichtet, dass keine Informationen zum Vererbungsmodus von LÜW in der Literatur vorliegen (SUMMERS et al. 2010). Dies ist zum Zeitpunkt des Aufsetzens dieser Arbeit nach Kenntnisstand des Verfassers der Status quo.

Nach wie vor ist ungeklärt, wie sich die verschiedenen Typen der LÜW genetisch untereinander verhalten. Insbesondere muss geklärt werden, ob Hunde mit dem klinisch nicht relevanten Typ I Nachkommen mit den für das CES und möglicherweise auch die HD bzw. Coxarthrose prädisponierenden Typen II oder III hervorbringen können (TELLHELM et al. 2015).

Die Ergebnisse einer australischen Studie bei Labrador Retrievern und deren Mischlingen deuten darauf hin, dass weitere anatomische Anomalien im lumbosakralen Bereich die Inzidenz von LÜW erhöhen können. So weisen die Nachkommen von Verpaarungen von Elterntieren mit acht Lendenwirbeln und sakrokokzygealen Übergangswirbeln (SÜW) in den Kombinationen 8LW x SÜW, SÜW x SÜW, 8LW x

normal, SÜW x normal gehäuft LÜW auf. Elterntiere mit LÜW werden von der Studie ausgeschlossen. Hunde mit lediglich einer Trennung der Dornfortsätze von S1 und S2 werden nicht als LÜW bewertet (MOESER und WADE 2017).

## 6.7 Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden

Zum Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher hereditärer Erkrankungen auf die Gesundheit und das Wohlbefinden beim Hund als Individuum in einer Population entwickelten ASHER et al. (2009) den „generic illness severity index for dogs“ (GISID). Der GISID schließt vier erkrankungsspezifische Faktoren ein: Prognose, Behandlung, Komplikationen und Verhalten. Diese können jeweils entsprechend ihres Schweregrades in aufsteigender Reihenfolge von 0 bis 4 eingestuft werden. Dementsprechend nimmt der höchste GISID den Wert 16 an. Zur Einstufung hereditärer Erkrankungen wurde durch die Autoren ein Review wissenschaftlicher und tiermedizinischer Literatur durchgeführt. Jeder Erkrankung wird in ihrer geringgradigsten und schwerwiegendsten Ausprägung ein GISID zugeordnet. Die Faktoren sind wie folgt determiniert: Die „Prognose“ soll der Chronizität der Erkrankung, einer anhaltenden Beeinträchtigung oder einem gegebenenfalls tödlichen Ausgang Rechnung tragen. Der Faktor „Behandlung“ umfasst sowohl medikamentelle als auch chirurgische Therapieansätze in steigender Invasivität und möglichen Nebenwirkungen. Der Faktor „Komplikationen“ wird entsprechend der Schwere der durch die Erkrankung bedingten Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Gesundheit bewertet. Der Faktor „Verhalten“ soll das Maß der Beeinträchtigung der Lebensqualität betroffener Tiere darstellen, bei der grundlegende Verhaltensweisen durch die Erkrankung negativ beeinflusst werden. Nach SUMMERS et al. (2010) erhalten LÜW beim DSH einen GISID zwischen 8 und 14 mit den Einzelfaktoren Prognose 2 - 3, Behandlung 3 - 4, Komplikationen 2 - 4 und Verhalten 1 - 2. Verglichen mit dem GISID des CES (8 - 15) liegt er etwa auf gleicher Höhe. Der Schweregrad einer hereditären Erkrankung ergibt sich aus dem Quotient des GISID und dem Maximum des möglichen GISID:

$$\text{Schweregrad} = \frac{\text{GISID}}{\text{Maximaler GISID}}$$

Will man objektiv die epidemiologische Wirkung von LÜW beim DSH beurteilen, bezieht man zusätzlich zum GISID die Prävalenz mit ein. Dadurch erhält man den „Welfare impact“. Dies ist eine Schätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit einer das Wohlbefinden und die Gesundheit beeinträchtigenden Gefahr innerhalb einer bestimmten Population für das Individuum (COLLINS et al. 2010). Der „Welfare impact“

stellt ein wichtiges Hilfsmittel zur Setzung von Prioritäten zur Reduktion hereditärer Erkrankungen dar (COLLINS et al. 2011). Dieser errechnet sich wie folgt:

$$\text{Welfare impact (WI)} = \text{Prävalenz (\%)} \times \left( \frac{\text{GISID}}{16} \right)$$

Für LÜW ergibt sich unter Verwendung der in der Literatur angegebenen geringsten und höchsten Prävalenz und einem GISID zwischen 8 und 14 ein Welfare impact zwischen 2,2 und 35. Dies würde bedeuten, dass bei einer Prävalenz von 40 % bis zu einem Drittel der DSH-Population durch LÜW von einer schwerwiegenden Beeinträchtigung des Wohlbefindens und der Gesundheit bedroht wäre. Diese Angabe sollte sicherlich kritisch beurteilt werden, da die Prävalenz von LÜW deutlich variieren kann. Dies resultiert u. a. daraus, dass manche Studien den klinisch nicht relevanten LÜW-Typ I in die Statistik einbeziehen, unterschiedliche Klassifikationssysteme für LÜW bestehen sowie regional unterschiedlich ausgeprägte Prävalenzen vorliegen. Zur Berechnung des WI sollte nur die Prävalenz der stark von der Norm abweichenden und für neurologische und orthopädische Folgeerkrankungen prädisponierenden Typen einbezogen werden. Die festgestellten Prävalenzen, der GISID und der WI können dazu dienen zu zeigen, dass LÜW sowohl für das Individuum als auch für die gesamte Population eine Gefährdung der Gesundheit und des Wohlergehens darstellen und künftige Zuchtstrategien das Ziel einer Reduktion ihrer Inzidenz beinhalten sollten.

## 6.8 Zucht

Entsprechend den Vorgaben der FCI sollen zur Zucht ausschließlich Elterntiere eingesetzt werden, welche keine bedeutenden genetischen Defekte an ihre Nachkommen weitergeben und damit deren Gesundheit beeinträchtigen (FCI 2013).

LÜW vom Typ I, mit einer Trennung der Dornfortsätze zwischen S1 und S2 als einzige Abweichung von der normalen Anatomie, stehen im Verdacht, genetisch eine milde Form von LÜW zu sein (FLÜCKIGER et al. 2009; FLÜCKIGER et al. 2017). Sollte dies bestätigt werden können, wäre durch eine Herausnahme auch der von Typ I betroffenen Hunde aus der Zucht eine Reduktion der Inzidenz der klinisch relevanten Typen II und III gegebenenfalls möglich (LAPPALAINEN et al. 2012). Einige Autoren wissenschaftlicher Studien über LÜW empfehlen derzeit, dass aufgrund der nachgewiesenen genetischen Grundlage von LÜW und den möglichen klinischen Folgen betroffener Hunde der Zuchteinsatz von Hunden mit LÜW, insbesondere Typ II und III, eingeschränkt werden sollte (MORGAN et al. 1993; LAPPALAINEN et al. 2012; TELLHELM et al. 2015; FLÜCKIGER et al. 2017). Manche Rasseklubs folgen dieser

Empfehlung oder schließen betroffene Hunde sogar aus der Zucht aus (FLÜCKIGER et al. 2009).

Die nachgewiesene Heritabilität von LÜW im Bereich von 20 bis 30 % macht ein zuchthygienisches Eingreifen im Sinne eines Zuchtausschlusses mit dem Ziel einer Reduktion der Inzidenz möglich (JULIER-FRANZ 2006). Allgemein ist eine Heritabilität eines Merkmals zwischen 40 und 100 % als hoch einzuschätzen. Nach der Studie von ONDREKA (2009) liegt die Heritabilität mit > 60 % bezüglich des Merkmals LÜW in dieser Referenz, weswegen sogar allein ein Ausschluss von phänotypischen Merkmalsträgern aus der Zucht nutzbringend wäre.

Generell kann eine züchterische Selektion nach ausschließlicher Auswahl des Phänotyps der Elterntiere oder nach einer Beurteilung zusätzlicher Informationen über ausgeprägte Merkmale verwandter Tieren erfolgen (ROBINSON 1999). Bei konsequenter Durchsetzung einer festgelegten Zuchtstrategie in Kombination mit einem zuvor standardisiert durchgeführten Screeningverfahren auf vererbliche Erkrankungen kann die Prävalenz dieser Merkmale signifikant gesenkt werden (FARRELL et al. 2015). Dies kann zum Beispiel in einer prospektiven Studie zur HD beim DSH und Labrador Retrievern gezeigt werden. Hier wird die Selektion der Zuchttiere unter Zuhilfenahme „geschätzter Zuchtwerte“ durchgeführt. Es wird innerhalb von 5 Generationen eine Reduktion der HD von 55 auf 24 % sowie 30 auf 10 % erreicht (LEIGHTON 1997). Die Zuchtwertschätzung gibt über die Auswertung phänotypischer Merkmale verwandter Tiere genauere Informationen über den Genotyp des zur Zucht vorgesehenen Tieres (BEUING 1997). Ihre Anwendung bietet sich insbesondere für hereditäre Erkrankungen an, deren niedrige Heritabilität keinen Zucherfolg durch reine phänotypische Selektion versprechen lässt (MAIMER 2013). Die Anwendung geschätzter Zuchtwerte wird derzeit zum Beispiel durch den „UK Kennel Club“ für komplexe Vererbungsgänge empfohlen (The Kennel Club Limited 2017). Die Verwendung geschätzter Zuchtwerte kann die genetische Verbesserung bezüglich eines unerwünschten Merkmals im Vergleich zu einer rein phänotypischen Selektion beschleunigen (MÄKI et al. 2000; LEWIS et al. 2010, 2013). Ungeachtet dessen konnte eine langsame genetische Verbesserung auch nach ausschließlicher phänotypischer Selektion, z. B. bei den vererblichen Erkrankungen der HD (MÄKI et al. 2000; HOU et al. 2010; LEWIS et al. 2010, 2013) und auch der ED (MÄKI et al. 2000; BEUING et al. 2005; LEWIS et al. 2013), bei unterschiedlichen Hunderassen nachgewiesen werden.

Die Beurteilung der Merkmalsausprägungen verwandter Tiere verhindert, dass Zuchttiere, die phänotypisch frei von dem unerwünschten Merkmal sind, die genetische Information unbemerkt an die Nachkommen weitergeben können. Dieses undetektierte Weitergeben genotypischer Merkmale an die Nachkommen ist das Hauptproblem einer Zuchtstrategie, bei der ausschließlich die phänotypischen Merkmalsträger ausselektiert werden. Zusätzlich kann es durch die gehäufte Verwendung angeblich merkmalsfreier Tiere zum sogenannten „Popular-Sire-Effekt“ kommen. Hierdurch werden hereditäre Erkrankungen verbreitet und die genetische Vielfalt reduziert (LEROY 2011). Um dieses Risiko zu reduzieren, empfiehlt die FCI, dass kein Hund mehr als 5 % der Nachkommen einer Rasse in einem Zeitraum von 5 Jahren zeugen soll (FCI 2010).

Genannte Probleme einer ausschließlichen Selektion abhängig vom Phänotyp können durch die Integration von Pedigree-Informationen in die Zuchtstrategie minimiert werden. Die Verwendung von Pedigrees findet Ende des 19. Jahrhunderts Einzug in die Zucht und ist seitdem wesentlicher Bestandteil für die Selektion. Aus ihnen können unter Einhaltung der Mendelschen Regeln Schlussfolgerungen über die Weitergabe von Genen, deren Polymorphismus und Lokus gegeben werden (LEROY 2011).

Unter Berücksichtigung des Phänotyps, Genotyps und des Pedigrees könnte die Wirkung einer Zuchtstrategie zur Reduktion unerwünschter Merkmale verbessert werden. Zu dieser Hypothese gelangt auch eine Arbeitsgruppe zur Untersuchung der Patellaluxation beim „Nederlandse Kooikerhondje“. Die Selektion der Zuchttiere ausschließlich nach einer orthopädischen Untersuchung führt nach initialer Reduktion von 1994 bis 2011 nun zu einer Stagnation der Reduktion der Prävalenz der Patellaluxation (WANGDEE et al. 2014).

Um herauszufinden, wie sich die verschiedenen Typen der LÜW beim DSH untereinander vererben und wie sie demgemäß züchterisch einzuschätzen sind, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Erst wenn die Vererbung der unterschiedlichen Typen geklärt ist, können konkrete züchterische Maßnahmen zur Verringerung der Inzidenz von LÜW beim DSH definiert und Empfehlungen ausgesprochen werden, wie deren potenziell negativen gesundheitlichen Folgen effizient entgegengewirkt werden kann.

Bezüglich strikter Zuchtausschließungen sollte der Tatsache Beachtung geschenkt werden, dass zu strikte Zuchtausschlusskriterien phänotypischer Merkmalsträger zu einer Verringerung des Genpools der noch zur Zucht zu verwendenden Hunde und einer steigenden Anzahl nicht registrierter Nachzuchten führen könnten. Zusätzlich können andere, unkontrollierte Erkrankungen durch zu strikte Zuchtreglementierungen

durch einen Zufallsdrift in ihrer Inzidenz steigen (BEUING 1997), insbesondere, wenn diese durch Gen- oder Screeningtests nicht feststellbar sind (INDREBØ 2008; HEDHAMMAR und INDREBØ 2011). Ungünstigerweise ist die Rasse des DSH ohnehin jene, die im Rassevergleich für die größte Anzahl erblich bedingter Erkrankungen prädisponiert ist (ASHER et al. 2009; SUMMERS et al. 2010).

Für eine erfolgreiche Reduktion hereditärer Erkrankungen, und damit LÜW, innerhalb einer Zucht bedarf es der Kooperation von Zuchtverbänden, Züchtern, Hundebesitzern und Tierärzten (COLLINS et al. 2011; LEROY 2011).

## **7 EIGENE UNTERSUCHUNGEN**

### **7.1 Material und Methoden**

Die vorliegende Arbeit besteht aus zwei Studienteilen, in denen Röntgenaufnahmen von Hunden der Rasse „Deutscher Schäferhund“ auf das Vorliegen von LÜW untersucht wurden. Im Studienteil A erfolgte eine detaillierte morphologische Beschreibung der anatomischen Gegebenheiten des lumbosakralen Überganges der ausgewerteten Röntgenaufnahmen. Basierend auf Auswertungsdaten vom Screeningverfahren auf Hüftgelenkdysplasie und der Dokumentation lumbosakraler Erkrankungen wurde im Studienteil B die Prävalenz der verschiedenen LÜW-Typen, gemäß der derzeit u. a. von der GRSK verwendeten vereinfachten Einteilung, in der im Verein für Deutsche Schäferhunde (SV) e. V. geführten Population untersucht. Die Ergebnisse beider Studienteile dienten als Grundlage für die Schätzung populationsgenetischer Parameter, um schließlich anhand der Heritabilitäten und additiv-genetischen Korrelationen die Vererbung unterschiedlicher Typen von lumbosakralen Übergangswirbeln aufzuarbeiten.

#### **7.1.1 Detaillierte morphologische Röntgenstudie (Studienteil A)**

##### **7.1.1.1 Untersuchte Tiere**

Im Rahmen der detaillierten morphologischen Röntgenstudie (Studienteil A) wurden ausschließlich Röntgenaufnahmen von Deutschen Schäferhunden ausgewertet, welche im Zuchtbuch des SV registriert sind. Es lagen Röntgenaufnahmen von insgesamt 1.302 DSH vor. 742 Hunde (57,0 %) waren männlich, 560 (43,0 %) weiblich. Das Durchschnittsalter lag bei 17,5 Monaten. Der überwiegende Anteil der Röntgenaufnahmen stammte aus dem offiziellen Screening auf Hüftgelenkdysplasie entsprechend den Vorgaben der FCI. Ergänzt wurden diese durch Aufnahmen von inoffiziellen HD-Vorröntgen sowie Röntgenbilder aus der Identitätsprüfung häufig in der Zucht eingesetzter Rüden. Die Röntgenaufnahmen entstammten vorwiegend dem Archiv der Klinik für Kleintiere der Justus-Liebig-Universität Gießen. Die Aufnahmen wurden im Zeitraum von 2008 bis 2016 in der Abteilung für Radiologie angefertigt. Ergänzend wurden Röntgenaufnahmen hinzugezogen, die im Rahmen des Screenings auf HD dem Gutachter des SV für HD und ED zur Beurteilung digital oder als Röntgenfilme vom SV zugesandt wurden. Diese Röntgenaufnahmen wurden im gleichen Zeitraum angefertigt. Das standardisierte Untersuchungsprotokoll machte die Verwendung von Röntgenbildern unterschiedlicher Quellen möglich.

### 7.1.1.2 Identitätskontrolle

Die Angaben zur Identität der DSH umfassten Zwingername, Geschlecht, Alter zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme, Wurfdatum, Zuchtbuchnummer, Transpondernummer bzw. Tätowierung.

### 7.1.1.3 Ausgewertete Röntgenaufnahmen

Es lag von allen in die Studie einbezogenen DSH mindestens eine ventrodorsale Röntgenaufnahme des Beckens in Position 1 mit gestreckten Hintergliedmaßen vor, die entsprechend den „Anforderungen an die Röntgenaufnahmen zur Diagnose der Hüftgelenkdysplasie“ der FCI aufgenommen wurde (*Abb. 10*). Zum Erhalt zusätzlicher Informationen über die Morphologie des lumbosakralen Überganges wurde darüber hinaus die laterolaterale Aufnahme (*Abb. 11*) bzw., wenn vorliegend, zusätzlich die ventrodorsale Aufnahme des Beckens in Position 2 mit abduzierten Hintergliedmaßen beurteilt (*Abb. 12*).



**Abbildung 10:** Röntgenaufnahme des Beckens im ventrodorsalen Strahlengang in Position 1 mit gestreckten Hintergliedmaßen entsprechend den Anforderungen der FCI an die Röntgenaufnahmen zur Diagnose der Hüftgelenkdysplasie eines weiblichen ca. 1,5 Jahre alten DSH. (DSH = Deutscher Schäferhund, FCI = Fédération Cynologique Internationale)



**Abbildung 11:** Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges im laterolateralen Strahlengang eines weiblichen ca. ein Jahr und 2 Monate alten DSH. (DSH = Deutscher Schäferhund)



**Abbildung 12:** Röntgenaufnahme des Beckens im ventrodorsalen Strahlengang in Position 2 mit abduzierten Hintergliedmaßen entsprechend den Anforderungen der FCI an die Röntgenaufnahmen zur Diagnose der Hüftgelenkdysplasie eines weiblichen ca. ein Jahr alten DSH. (DSH = Deutscher Schäferhund, FCI = Fédération Cynologique Internationale)

### 7.1.1.4 Hauptuntersuchung

#### 7.1.1.4.1 Software und Gerätebeschreibung

Zur Auswertung der überwiegend vorliegenden digitalen Röntgenaufnahmen wurde die Software easyIMAGE der Firma Veterinärmedizinisches Dienstleistungszentrum GmbH verwendet. Analoge Röntgenbilder wurden an einem Röntgenfilmbetrachter mit Leuchtstoffröhren der Firma Planilux beurteilt.

#### 7.1.1.4.2 Morphologische Untersuchungsparameter

##### Trennung der Dornfortsätze

Die Dornfortsätze der Sakralwirbel bilden beim physiologisch ausgeprägten Kreuzbein eine kontinuierliche Leiste (*Abb. 3 (A - C)*). Die Dornfortsätze weisen untereinander im Bereich ihrer Basen eine Fusionszone, im Bereich ihrer Spitzen eine Einziehung (Trennung) auf (NICKEL et al. 1984). Bei der Befundung wurde zunächst die Wirbelanzahl des Sakrums bestimmt. Lag ein Sakrum aus drei fusionierten Sakralwirbeln und keine Veränderung des letzten Lendenwirbels vor, wurde der Trennungsgrad der Dornfortsätze der ersten beiden Sakralwirbel beurteilt. Bestand das Sakrum lediglich aus zwei Sakralwirbeln oder durch Fusion mit einem Schwanzwirbel aus 3 Wirbeln, so wurde die Dornfortsatztrennung des kranial des Sakrums liegenden LÜW vom kaudal folgenden Wirbel beurteilt. In beiden Fällen wurde diese Trennung als „kraniale Einziehung“ definiert. Anschließend wurde der Trennungsgrad der kaudal davon nächstgelegenen Einziehung bestimmt („kaudale Einziehung“).

Dem Grad der Trennung der zu beurteilenden Dornfortsätze entsprechend wurde ein numerischer Wert zugeordnet: 0 = keine Trennung, 1 = unvollständige Trennung, 2 = vollständige Trennung (*Tab. 2*). Bei einer vorliegenden kranialen Einziehung von weniger als einem Drittel der Gesamtdistanz der Verbindungslinie zwischen den Dornfortsatzspitzen und dem Wirbelbogendach wurde der Trennungsgrad als „keine Trennung“ (0) erfasst. Gleiches galt für den Fall, dass die kraniale Einziehung zwar mindestens ein Drittel der Gesamtdistanz der Verbindungslinie zwischen den Dornfortsatzspitzen und dem Wirbelbogendach umfasste, jedoch weniger deutlich ausgeprägt war als die kaudale Einziehung.

Eine unvollständige Trennung (1) wurde wie folgt definiert: Die kraniale Einziehung musste mindestens ein Drittel der Gesamtdistanz der Verbindungslinie zwischen den Dornfortsatzspitzen und dem Wirbelbogendach umfassen, durfte nicht vollständig bis zum Wirbelbogendach ziehen und musste deutlicher ausgeprägt sein als die kaudale Einziehung (*Abb. 13*). Eine vollständige Trennung (2) lag definitionsgemäß vor, wenn die kraniale Einziehung bis auf Höhe des Wirbelbogendaches zog. In dem Sonderfall,

bei dem die kaudale Einziehung ebenfalls bis zum Wirbelbogendach reichte, erfolgte die Dokumentation als „keine Trennung“ (0).

**Tabelle 2:** Beurteilung des Trennungsgrades der Dornfortsätze und Zuordnung eines numerischen Wertes entsprechend der jeweiligen Ausprägung. (Vergleich des Trennungsgrades der kaudalen Einziehung zur kranialen Einziehung: - = weniger deutliche Trennung,  $\approx$  = gleich deutliche Trennung, + = deutlichere Trennung)

Trennung der Dornfortsätze		
Nicht fusionierte Strecke zwischen der Verbindungslinie der Dornfortsatzspitzen und dem Wirbelbogendach		Numerischer Wert
Kraniale Einziehung	Kaudale Einziehung	
< 1/3	- / $\approx$ / +	0
$\geq$ 1/3	$\approx$ / +	
vollständig	vollständig	
$\geq$ 1/3	-	1
vollständig	-	2



**Abbildung 13:** Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges zur Beurteilung der Dornfortsatztrennung im laterolateralen Strahlengang eines etwa ein Jahr alten männlichen DSH. Hier liegt ein Kreuzbein bestehend aus drei fusionierten Sakralwirbeln und keine Veränderung des letzten Lendenwirbels vor. Eine unvollständige Trennung liegt vor, wenn die Dornfortsatztrennung (kraniale Einziehung) mindestens 1/3 der Gesamtdistanz zwischen der Hilfslinie (zwischen den Dornfortsatzspitzen von S1 und S2) und dem Wirbelbogendach umfasst, nicht vollständig ist und eine weniger deutliche kaudale Einziehung gegeben ist. (DSH = Deutscher Schäferhund, S = Sakralwirbel)

### **Morphologie der Seitenteile**

Im Hinblick auf LÜW können insbesondere morphologische Veränderungen der Wirbelbögen und der Querfortsätze, und weniger der Wirbelkörper, festgestellt werden (STIEVE 1921; MORGAN 1968; COUTEUR und CHILD 1989; DAMUR-DJURIC et al. 2006). Ob beim Vorliegen eines LÜW der anatomische Ausgangspunkt struktureller Abweichungen bei der röntgenologischen Untersuchung zuverlässig einem der genannten anatomischen Wirbelbereiche zugeordnet werden kann, wurde bis dato nicht mittels einer validen Referenzmethode verifiziert. Dies begründete den im Weiteren verwendeten Sammelbegriff „Seitenteil“ bei der Beschreibung der Morphologie des lateralen Wirbelbogenanteils und der beidseitig ausgeprägten Querfortsätze eines untersuchten Wirbels. Im Folgenden wird zwischen dem linken und rechten Seitenteil unterschieden.

Am physiologisch ausgeprägten lumbosakralen Übergang besteht zwischen den Kreuzbeinflügeln (*Alae ossis sacri*) und den Darmbeinflügeln (*Alae ossis illi*) der jeweiligen Seite eine Trennung in Form einer Einziehung (*Abb. 18*). Deutliche morphologische Veränderungen der Seitenteile des ersten Wirbels des fusionierten Sakrums (LÜW) sind weit nach kranial reichende Querfortsätze, die gegebenenfalls uni- oder bilateral ähnlich denjenigen eines Lendenwirbels ausgeprägt sind. Die unterschiedlichen Ausprägungen der Querfortsätze können eine partielle oder vollständige Fusion mit der ipsilateralen Darmbeinschaukel aufweisen oder ohne Fusionszone vorliegen. In einer weniger stark ausgeprägten Form weisen die Kreuzbeinflügel uni- oder bilateral breitbasige, kurze Ausziehungen auf. Zeigte in der Studie bei Vorliegen eines physiologisch ausgebildeten Sakrums der kranial des Kreuzbeines gelegene Wirbel (LÜW) Eigenschaften eines Sakralwirbels in Form dem Kreuzbein ähnelnder Querfortsätze, so wurde in diesem Fall dessen Morphologie und nicht die des ersten Wirbels des fusionierten Sakrums bewertet. Der Morphologie der Seitenteile wurde entsprechend dem Schweregrad der morphologischen Abweichung von der Norm ein numerischer Wert mit Seitenbezug zugeordnet (*Abb. 14, Abb. 15*). Bei beidseits von der Norm abweichender Seitenteile wurde derjenigen Seite mit der deutlicher ausgeprägten Kontaktzone zur Darmbeinsäule ein entsprechend höherer numerischer Wert zugeordnet (*Tab. 3*).

**Tabelle 3:** Beurteilung der Morphologie der Seitenteile mit Seitenbezug und Zuordnung eines numerischen Wertes entsprechend der Ausprägung.

Morphologie der Seitenteile		
morphologische Abweichung	Numerischer Wert	
	Links	Rechts
Keine	0	0
Geringgradig	1	1
Mittel- bis hochgradig	2	2



**Abbildung 14:** Röntgenaufnahme mit geringgradigen morphologischen Veränderungen der Seitenteile des LÜW-Typ I eines ein Jahr alten männlichen DSH im ventrodorsalen Strahlengang. Zu erkennen ist die bilateral symmetrisch veränderte Morphologie des LÜW mit über das normale Maß hinaus nach kranial ziehenden Seitenteilen. Entsprechend der Einteilung gemäß Tabelle 3 werden die Werte rechts = 1 und links = 1 zugeordnet. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = lumbosakraler Übergangswirbel)



**Abbildung 15:** Röntgenaufnahme mit mittel- bis hochgradigen morphologischen Veränderungen der Seitenteile des LÜW-Typ III eines etwa ein Jahr alten weiblichen DSH im ventrodorsalen Strahlengang. Zu erkennen ist die asymmetrische Morphologie der Seitenteile des LÜW. Entsprechend der Einteilung gemäß Tabelle 3 werden die Werte rechts = 2 und links = 1 zugeordnet. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = lumbosakraler Übergangswirbel)

### Trennung der Wirbelkörper

Liegt ein physiologischer lumbosakraler Übergang vor, so ist der Wirbelkörper des letzten Lendenwirbels durch eine Zwischenwirbelscheibe vollständig von der *Extremitas cranialis* des Kreuzbeines getrennt. Die Wirbelkörper der Sakralwirbel sind durch Ossifikation der Zwischenwirbelscheiben miteinander zum Kreuzbein fusioniert. Eine Abweichung von der physiologischen Anatomie ist bei Ausprägung einer partiellen Trennung der Wirbelkörper (*Abb. 16*) oder einer vollständigen Trennung der Wirbelkörper des LÜW vom kaudal folgenden Wirbel (*Abb. 17*) gegeben. Bestand das *Os sacrum* in der Studie bei den beurteilten DSH aus drei fusionierten Wirbeln, der letzte Lendenwirbel wies jedoch morphologische Eigenschaften eines Kreuzwirbels auf (LÜW), so wurde die Trennung der Wirbelkörper dieses Wirbels und des kaudal nächstfolgenden bewertet.

Hinweise auf Veränderungen lassen sich sowohl auf der ventrodorsalen als auch laterolateralen Röntgenaufnahme darstellen. In Kombination lässt sich die Trennung quantifizieren. Den möglichen Ausprägungen wurden numerische Werte zugeordnet (*Tab. 4*).

**Tabelle 4:** Beurteilung des Trennungsgrades der Wirbelkörper und Zuordnung eines numerischen Wertes entsprechend der Ausprägung.

Trennung der Wirbelkörper	
Ausprägung	Numerischer Wert
Vollständige Fusion	0
Angedeutete Wirbelkörpertrennung	1
Vollständige Trennung	2



**Abbildung 16:** Röntgenaufnahme mit angedeuteter Trennung der Wirbelkörper (weiße Pfeile) des LÜW und des folgenden Sakralwirbels im laterolateralen Strahlengang eines etwa 14 Monate alten weiblichen DSH. Entsprechend der Einteilung gemäß Tabelle 4 wird der numerische Wert 1 zugeordnet. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)



**Abbildung 17:** Röntgenaufnahme mit vollständiger Trennung der Wirbelkörper (weißer Pfeil) des LÜW und des folgenden Sakralwirbels im laterolateralen Strahlengang eines etwa ein Jahr alten weiblichen DSH. Entsprechend der Einteilung gemäß Tabelle 4 wird der numerische Wert 2 zugeordnet. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = lumbosakraler Übergangswirbel)

#### 7.1.1.4.3 Beurteilung lumbosakraler Übergangswirbel

Für die LÜW-Klassifikation wurde die Einteilung nach FLÜCKIGER et al. (2009) in geringgradig modifizierter Form angewendet. Durch eine kombinierte Auswertung sowohl der ventrodorsalen als auch der laterolateralen Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges ist es möglich, die zu beurteilenden Strukturen in ihrer räumlichen Ausprägung eingehender zu beschreiben. Dies ermöglicht auch eine exaktere Beschreibung des Fusionsgrades der sakralen Dornfortsätze. In der ventrodorsalen Röntgenaufnahme ist dessen Darstellung abhängig von der sagittalen Rotation und dem Inhalt im Kolon sowie auf der laterolateralen Aufnahme von der Lagerung und Aufnahmetechnik.

Der Klassifikation der LÜW lagen die Morphologiekriterien „Trennung der Dornfortsätze“, „Morphologie der Seitenteile“ und „Trennung der Wirbelkörper“ entsprechend ihrer zuvor festgelegten Definition zugrunde.

Der LÜW-Typ 0 stellt einen physiologischen lumbosakralen Übergang dar. Durch die Zwischenwirbelscheibe zwischen dem letzten Lendenwirbel und dem ersten Sakralwirbel liegt eine strukturelle Trennung der Wirbelsäulenabschnitte von LWS und Kreuzbein vor. Das Kreuzbein besteht aus drei fusionierten Sakralwirbeln. Die Fusion eines aus zwei Sakralwirbeln bestehenden *Os sacrum* mit dem folgenden Schwanzwirbel ist hiervon zu unterscheiden. Die Dornfortsätze des Kreuzbeines bilden durch Verwachsung, mindestens ihrer Ursprünge, eine Leiste (Abb. 19). Die Seitenteile des ersten Kreuzwirbels weisen bilateral eine deutliche Trennung zwischen dem Kreuzbeinflügel und der Darmbeinschaukel in Form einer Einziehung auf (Abb. 18). Der letzte Lendenwirbel zeigt keine morphologischen Veränderungen.



**Abbildung 18:** Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ 0 im ventrodorsalen Strahlengang eines etwa ein Jahr alten weiblichen DSH (oben). Zu erkennen ist die Fusion der Dornfortsätze (ovale weiße Konturen) der drei vollständig fusionierten Sakralwirbel. Es sind keine morphologischen Veränderungen der Seitenteile feststellbar. Zwischen Darmbeinschaukel und Kreuzbeinflügel ist bilateral eine Einziehung vorhanden (bilateral hervorgehoben durch weiße Konturen). (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

**Abbildung 19:** Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ 0 im laterolateralen Strahlengang eines etwa 1,5 Jahre alten weiblichen DSH (unten). Zu erkennen ist die Fusion aller Dornfortsätze des Sakrums. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)



Bei einem LÜW-Typ I liegt als morphologische Veränderung eine Trennung der Dornfortsätze der ersten beiden Wirbel des aus drei Wirbeln bestehenden Kreuzbeines vor, und zwar ohne Veränderung oder in Kombination mit einer geringgradigen morphologischen Veränderung der Seitenteile. L7 und S1 verhalten sich hierbei wie beim physiologisch ausgebildeten lumbosakralen Übergang (TELLHELM et al. 2015) (Abb. 20 und Abb. 21).



**Abbildung 20:** Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ I im ventrodorsalen Strahlengang eines ein Jahr alten weiblichen DSH (oben). Zu erkennen ist die deutliche Trennung der Dornfortsätze des ersten und zweiten Sakralwirbels. Zusätzlich liegen bilateral symmetrisch, geringgradig veränderte Seitenteile vor. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

**Abbildung 21:** Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ I im laterolateralen Strahlengang eines ein Jahr alten weiblichen DSH (unten). Zu erkennen ist die Trennung der Dornfortsätze des ersten und zweiten Sakralwirbels. Es liegt eine vollständige Fusion der Wirbelkörper des Sakrums vor. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)



Unabhängig vom Kriterium der Dornfortsatztrennung wurden die Morphologie der Seitenteile und das Vorhandensein einer Wirbelkörpertrennung beurteilt. Liegen mittel- bis hochgradig morphologisch veränderte Seitenteile vor, so wird der betroffene Wirbel bei symmetrisch veränderten Seitenteilen als LÜW-Typ II (Abb. 22), bei asymmetrisch veränderten Seitenteilen als LÜW-Typ III klassifiziert (Abb. 23).

Bei Ausprägung einer angedeuteten oder vollständigen Trennung der Wirbelkörper entscheidet die oben beschriebene Symmetrie der Seitenteile des betroffenen Wirbels

über den LÜW-Typ. Den LÜW-Typen wurden die in *Tabelle 5* aufgelisteten numerischen Werte zugeordnet.

**Tabelle 5:** Klassifikation der LÜW nach FLÜCKIGER et al. (2009) in geringgradig modifizierter Form und Zuordnung eines numerischen Wertes. (LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

LÜW-Klassifikation nach FLÜCKIGER et al. (2009) geringgradig modifiziert	
LÜW-Typ	Numerischer Wert
0	0
I	1
II	2
III	3



**Abbildung 22:** Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ II im ventrodorsalen Strahlengang eines ein Jahr alten männlichen DSH. Der kranial des aus zwei Wirbeln bestehenden Sakrums liegende Wirbel (LÜW) zeigt bilateral symmetrisch deutlich veränderte Seitenteile, eine Wirbelkörper- sowie eine Dornfortsatztrennung vom Sakrum. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)



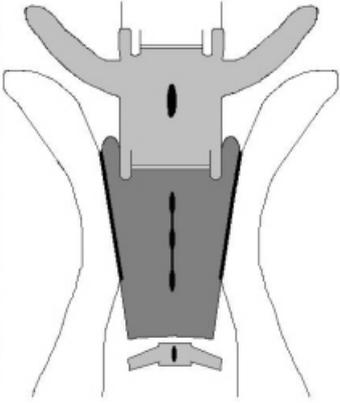
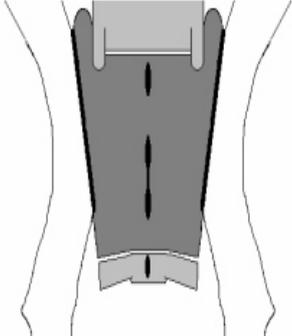
**Abbildung 23:** Röntgenaufnahme eines LÜW-Typ III im ventrodorsalen Strahlengang eines 15 Monate alten weiblichen DSH. Zu erkennen ist die asymmetrische Ausbildung der Seitenteile des LÜW sowie eine Wirbelkörper- und Dornfortsatztrennung dieses Wirbels vom Sakrum. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

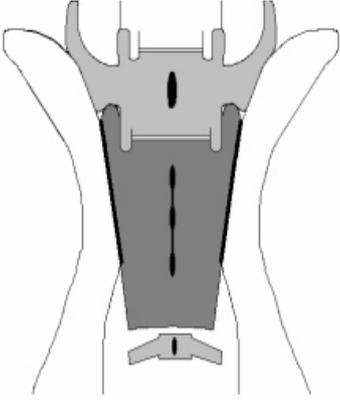
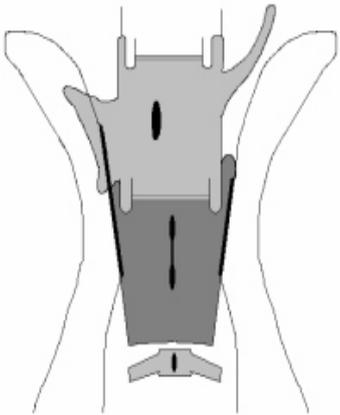
Inwieweit die Präsenz eines achten Lendenwirbels als LÜW zu werten ist, wurde in der vorliegenden Arbeit nicht eingehender thematisiert. Zur korrekten Bestimmung der Anzahl der Lendenwirbel sind Röntgenaufnahmen mit einer Abbildung der gesamten Rumpfwirbelsäule nötig. Dies war bei den ausgewerteten Röntgenaufnahmen nicht gewährleistet.

### 7.1.2 Screening-Studie (Studienteil B)

Analog zum Studienteil A wurden auch in die Screening-Studie ausschließlich DSH aus dem SV einbezogen. Es wurden die vom SV übermittelten offiziellen Untersuchungsbefunde von 27.579 DSH verarbeitet. Die DSH waren im Durchschnitt 16,0 Monate alt. 12.962 Hunde (47,0 %) waren männlich, 14.617 (53,0 %) weiblich. Die Auswertung der Röntgenbilder erfolgte gemäß der Klassifikation von lumbosakralen Übergangswirbeln entsprechend FLÜCKIGER et al. (2009) (Tab. 6). Die Grundlage für die Einteilung der lumbosakralen Übergänge in die möglichen LÜW-Typen bildeten ausschließlich Befundungen einer ventrodorsalen Röntgenaufnahme des Beckens, gleich der *Abbildung 10*.

**Tabelle 6:** Schemata möglicher Variationen der anatomischen Gegebenheiten am lumbosakralen Übergang nach JULIER-FRANZ (2006) und der zugeordneten Klassifikation der Typen lumbosakraler Übergangswirbel nach FLÜCKIGER et al. (2009). (LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel) - Fortsetzung auf der nächsten Seite

	<p><b>LÜW-Typ 0</b></p> <p>Anatomisch normal ausgebildeter lumbosakraler Übergang mit fusionierten Processus spinosi aller Sakralwirbel sowie symmetrische Processus transversi des letzten Lendenwirbels ohne Kontakt zum Becken.</p>
	<p><b>LÜW-Typ 1</b></p> <p>Os sacrum, bestehend aus drei Wirbeln. Es ist keine Fusion des ersten mit dem zweiten Processus spinosus festzustellen. Bei dem am weitesten kranial gelegenen Wirbel handelt es sich um den LÜW.</p>

	<p><b>LÜW-Typ II</b></p> <p><i>Vollständige Trennung des Kreuzbeines vom kranial davon gelegenen LÜW. Dieser besitzt symmetrische Seitenteile, welche Kontakt zum Becken aufnehmen können.</i></p>
	<p><b>LÜW-Typ III</b></p> <p><i>Vollständige Trennung des Kreuzbeines (nur 2 Wirbel) vom kranial davon gelegenen LÜW. Dieser besitzt asymmetrische Seitenteile, welche zur ipsilateralen Darmbeinsäule eine Kontaktzone unterschiedlichen Ausmaßes aufweisen können.</i></p>

Die Daten zur retrospektiven Auswertung entstammten der Datenbank des SV-Gutachters für HD und ED. Die Röntgenbilder waren entweder durch Tierärzte der Klinik für Kleintiere der Justus-Liebig-Universität Gießen oder durch externe Tierärzte im Rahmen des Screenings auf HD im Zeitraum von 2007 bis 2016 angefertigt worden. Analog zur detaillierten morphologischen Röntgenstudie lagen zu allen DSH vom SV bereitgestellte Informationen zur Identitätskontrolle vor.

### 7.1.3 Statistische Auswertung und genetisch-statistische Analysen

Die genetisch-statistische Analyse erfolgte in Kooperation mit dem Rechenzentrum Vereinigte Informationssysteme Tierhaltung w. V. (vit) in Verden, vertreten durch PD Dr. habil. Kathrin Friederike Stock.

Die individuelle Identifikation aller DSH war durch die Prüfung der unter 7.1.1.2 genannten spezifischen Identitätsparameter gewährleistet. Dies ermöglichte die Anbindung der Pedigreeinformationen und die nachfolgende genetisch-statistische Analyse unter Berücksichtigung der Verwandtschaftsverhältnisse. Datenaufbereitung, deskriptive und varianzanalytische Auswertungen wurden mittels des Statistical Analysis System (SAS), Version 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA 2009) durchgeführt. Hierbei kamen u. a. Basis-Prozeduren wie FREQ und MEANS zum Einsatz, um die Datenverteilung anhand von Kennwerten wie absoluten und

relativen Häufigkeiten, arithmetischen Mittelwerten und Standardabweichungen zu charakterisieren.

Die Modellentwicklung für die genetisch-statistische Analyse basierte auf den Ergebnissen varianzanalytischer Untersuchungen, die unter Verwendung allgemeiner linearer Modelle mittels der SAS-Prozedur GLM durchgeführt wurden. Für alle Merkmale wurde schließlich dasselbe Auswertungsmodell verwendet, das als fixe Effekte das Geschlecht ( $\text{Sex}_i$  mit  $i = 1 - 2$ ; männlich, weiblich), die Geburtssaison ( $\text{GebS}_j$  mit  $j = 1 - 4$ ; November bis Januar, Februar bis April, Mai bis Juli, August bis Oktober), das Röntgenjahr ( $\text{RöJ}_k$  mit  $k = 1 - 6$ ; bis 2011, einzelne Jahre ab 2012), die Röntgenaltersklassen ( $\text{RöAlt}_l$  mit  $l = 1 - 4$ ; bis 12 Monate, 13 - 14 Monate, 15 - 18 Monate, > 18 Monate) und die Untersuchungsart ( $\text{NRö}_m$  mit  $m = 1 - 2$ ; Anzahl Projektionen: nur ventrodorsal, ventrodorsal und laterolateral) sowie als zufällige Effekte den additiv-genetischen Effekt des Tieres ( $a_n$ ) und den Rest ( $e_{ijklmno}$ ) enthielt.

$$y_{ijklmo} = \mu + \text{Sex}_i + \text{GebS}_j + \text{RöJ}_k + \text{RöAlt}_l + \text{NRö}_m + a_n + e_{ijklmno}$$

mit  $y_{ijklmo}$  = Röntgenbefund des Tieres,

$\mu$  = Modellkonstante,

$\text{Sex}_i$  = fixer Effekt des  $i$ -ten Geschlechts ( $i = 1 - 2$ ),

$\text{GebS}_j$  = fixer Effekt der  $j$ -ten Geburtssaison ( $j = 1 - 4$ ),

$\text{RöJ}_k$  = fixer Effekt des  $k$ -ten Röntgenjahres ( $k = 1 - 6$ ),

$\text{RöAlt}_l$  = fixer Effekt des  $l$ -ten Röntgenalters ( $l = 1 - 4$ ),

$\text{NRö}_m$  = fixer Effekt der Untersuchungsart ( $m = 1 - 2$ ),

$a_n$  = zufälliger additiv-genetischer Effekt des  $n$ -ten Tieres und

$e_{ijklmno}$  = zufälliger Rest.

Die Schätzungen der genetischen Parameter (uni- und multivariat) sowie die Zuchtwertschätzung (univariat) erfolgten in linearen Tiermodellen unter Einbeziehung von mindestens vier Ahnengenerationen. Als Auswertungsgrundlage dienten dabei entweder nur die Hunde der detaillierten morphologischen Röntgenstudie (ventrodorsale und laterolaterale Röntgenaufnahmen) mit differenzierter Röntgenbefundung des lumbosakralen Überganges ( $N = 1.254$ ; Ansatz A) oder zusätzlich auch die Hunde mit LÜW-Klassifikation auf Basis der Röntgenaufnahmen der HD-Routineuntersuchung (ausschließlich ventrodorsale Röntgenaufnahmen) nach

FLÜCKIGER et al. (2009) (N = 27.579; Ansatz B). Zur Vorbereitung der Schätzung genetischer Parameter wurde die Software „Parameter estimation for any model“ (PEST) (GROENEVELD et al. 1990) verwendet. Die Schätzung genetischer Parameter erfolgte mittels „Restricted maximum likelihood“ (REML) unter Verwendung des Softwarepaketes „Variance Component Estimation“ (VCE), Version 6.0 (GROENEVELD et al. 2010). Die Ergebnisse dienten als Grundlage für die Zuchtwertschätzung nach dem Verfahren „Best Linear Unbiased Prediction“ (BLUP) mit der Software PEST (GROENEVELD et al. 1990).

Um einerseits die in früheren Studien ermittelten Heritabilitätsschätzwerte für das Merkmal LÜW zu überprüfen und andererseits die Genetik der verschiedenen LÜW-Typen differenziert zu untersuchen, kamen in den genetisch-statistischen Analysen Ein- und Mehrmerkmalsmodelle zum Einsatz. Berücksichtigt wurden hierbei die verschiedenen LÜW-Typen, wobei betroffene Hunde jeweils allen anderen oder nur denjenigen Hunden mit röntgenologisch komplett unauffälligen lumbosakralen Übergängen gegenübergestellt wurden. Weiterführende genetisch-statistische Analysen bezogen sich auf die röntgenologisch-morphologischen Kriterien, also die Veränderungen des röntgenologischen Erscheinungsbildes der Seitenteile, die Dornfortsatztrennung sowie die Wirbelkörpertrennung. Dokumentiert wurden diese in der Abstufung 0 = nicht vorhanden, 1 = vorhanden und 2 = deutlich ausgeprägt vorhanden. Vollständige Angaben zum LÜW-Typ mit Unterscheidung zwischen Hunden ohne LÜW sowie mit LÜW der Typen I, II bzw. III nach FLÜCKIGER et al. (2009) und zu allen oben genannten zu analysierenden spezifischen Befunden waren Einschlusskriterien für diese genetisch-statistische Untersuchung.

In der genetisch-statistischen Analyse (Studienteil A) wurde mit binären und kategorischen Merkmalsdefinitionen gearbeitet, um aus Vergleichen zwischen zwei- und dreistufiger Kodierung die erhaltenen Ergebnisse abzusichern. Die binär einfache Differenzierung der zu analysierenden spezifischen Befunde (ST\_BINe, TrDF\_BINe, TrWK\_BINe) erfolgte unter Verwendung der Merkmalsdefinitionen ohne Befund (0) und mit Befund (1). Die binär restriktive Merkmalsdefinition (ST\_BINr, TrDF\_BINr, TrWK\_BINr) differenzierte die untersuchten Hunde ebenfalls in zwei Gruppen, nämlich in DSH ohne oder mit weniger deutlichem Befund (0) und mit deutlich ausgeprägtem Befund (1) bezüglich des analysierten Morphologiekriteriums. Angemerkt werden muss, dass aufgrund der geringen Häufigkeit von TrWK\_BINr keine weitere Analyse dieses Merkmals erfolgte. Kategorisch (ST\_KAT, TrDF\_KAT, TrWK\_KAT) wurde unterschieden zwischen Hunden ohne Befund (0), Hunden mit weniger deutlichem Befund (1) und Hunden mit ausgeprägtem Befund (2). Auf Basis der differenzierten

Dokumentation für die Seitenteile links und rechts wurde zusätzlich binär (ST\_DBIN) unterschieden zwischen Hunden ohne Unterschiede zwischen linker und rechter Seite (0) und Hunden mit unterschiedlichem röntgenologischen Erscheinungsbild der linken und rechten Seitenteile (1). Weiterhin erfolgte eine kategorische Differenzierung (ST\_DKAT) unter Bezugnahme auf die Differenz zwischen den für linke und rechte Seitenteile dokumentierten Ausprägungsgraden, d.h. Unterscheidung zwischen Hunden ohne Unterschied (0; Kombinationen 0-0, 1-1, 2-2), Hunden mit Unterschied von einer Stufe (1; Kombinationen 0-1, 1-0, 1-2, 2-1) und Hunden mit Unterschied von zwei Stufen (2; Kombinationen 0-2, 2-0). Die möglichen Röntgenbefunde mit den abgeleiteten Merkmalen sind der *Tabelle 7* und *Tabelle 8* zu entnehmen.

**Tabelle 7:** Übersicht über die dokumentierten Röntgenbefunde und die daraus abgeleiteten Merkmale für die Trennung im Bereich der Dornfortsätze und Wirbelkörper. (BINE = binär einfach, BINr = binär restriktiv, KAT = kategorisch, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

Röntgenbefund		Abgeleitete Merkmale		
TrDF		TrDF_BINE	TrDF_BINr	TrDF_KAT
0		0	0	0
1		1	0	1
2		1	1	2
TrWK		TrWK_BINE	TrWK_BINr	TrWK_KAT
0		0	0	0
1		1	0	1
2		1	1	2

**Tabelle 8:** Übersicht über die dokumentierten Röntgenbefunde und die daraus abgeleiteten Merkmale für Veränderungen im Bereich der Seitenteile. (BINE = binär einfach, BINr = binär restriktiv, DBIN = binäre Morphologieabweichung im Vergleich L und R, DKAT = kategorische Morphologieabweichung im Vergleich L und R, KAT = kategorisch, L = links, R = rechts, ST = Seitenteile)

Röntgenbefund		Abgeleitete Merkmale				
ST_L	ST_R	ST_BINE	ST_BINr	ST_KAT	ST_DBIN	ST_DKAT
0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1
1	1	1	0	1	0	0
0	2	1	1	2	1	2
2	0	1	1	2	1	2
1	2	1	1	2	1	1
2	1	1	1	2	1	1
2	2	1	1	2	0	0

## 8 ERGEBNISSE - DESKRIPTIVE STATISTIK

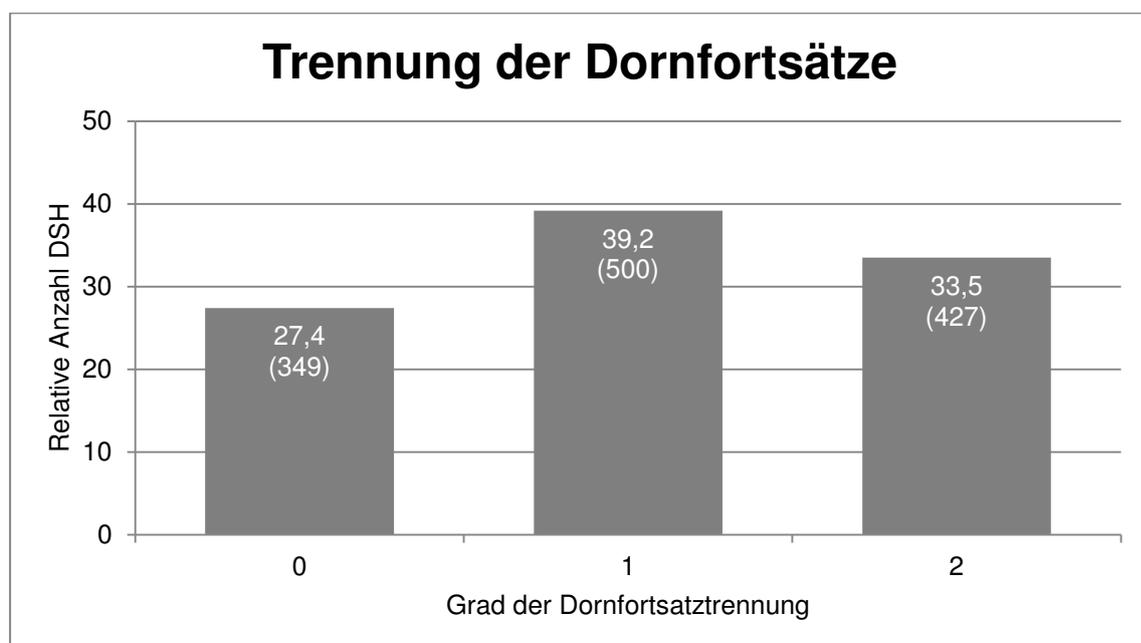
### 8.1 Ergebnisse des Studienteiles A

Auswertungsbasis für die detaillierte morphologische Röntgenstudie waren Röntgenaufnahmen von insgesamt 1.302 Deutschen Schäferhunden. Für 1.055 DSH (81,0 %) lagen digitale Röntgenaufnahmen vor. Für 247 Hunde (19,0 %) erfolgte die Auswertung anhand analoger Röntgenfilme. Die Hunde waren zum Zeitpunkt der Röntgenuntersuchung durchschnittlich 17,5 Monate (5 – 218 Monate) alt.

#### 8.1.1 Morphologische Untersuchungsparameter

##### Trennung der Dornfortsätze

Der Trennungsgrad der Dornfortsätze der ersten beiden Sakralwirbel bzw. des Dornfortsatzes des LÜW von dem des ersten normal ausgebildeten Sakralwirbels konnte bei 1.276 DSH (98,0 %) ausgewertet werden (*Abb. 24*). Bei 349 DSH (27,4 %) lag eine vollständige Fusion der Dornfortsätze und damit keine Trennung vor, während 500 DSH (39,2 %) eine unvollständige Trennung erkennen ließen. Eine vollständige Trennung der Dornfortsätze wurde für 427 der untersuchten Hunde (33,5 %) vermerkt. Bei 26 DSH (2,0 %) ließ sich der Trennungsgrad aufgrund der Röntgentechnik der laterolateralen Röntgenaufnahme und einer Überlagerung mit dem Rektuminhalt oder dem Penisknochen in der ventrodorsalen Röntgenaufnahme nicht beurteilen.



**Abbildung 24:** Relative (absolute) Häufigkeiten der verschiedenen Dornfortsatztrennungsgrade. (DSH = Deutsche Schäferhunde)

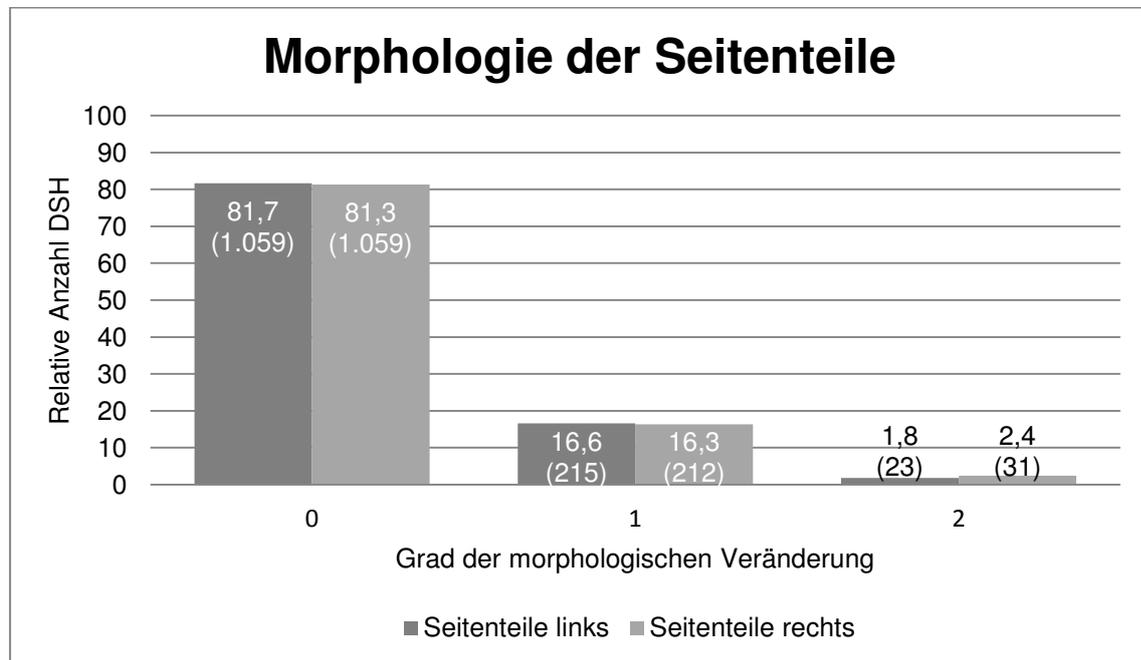
Die Betrachtung der unterschiedlichen Grade der Dornfortsatztrennung in Abhängigkeit vom Alter der DSH zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme ergab keine Hinweise auf relevante Alterseffekte (Tab. 9). Auch jung geröntgte Hunde zeigten die verschiedenen Merkmalsausprägungen in etwa derselben Frequenz wie die in einem höheren Alter geröntgten Hunde.

**Tabelle 9:** Beurteilung des Dornfortsatztrennungsgrades in Abhängigkeit vom Alter zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme von DSH im Mindestalter von 12 Monaten. (DF = Dornfortsatztrennung, DSH = Deutsche Schäferhunde)

Alter \ DF	0	1	2
< 13 Monate	88 (30,9 %)	101 (35,4 %)	96 (33,7 %)
13 - 18 Monate	139 (24,8 %)	228 (40,6 %)	194 (34,6 %)
> 18 Monate	34 (33,3 %)	38 (37,3 %)	30 (29,4 %)
	261 (27,5 %)	367 (38,7 %)	320 (33,8 %)

### Morphologie der Seitenteile

Die Morphologie der Seitenteile wurde bei den DSH zunächst einzeln beurteilt und dann deren Ausprägungen mit Seitenbezug verglichen.



**Abbildung 25:** Relative (absolute) Häufigkeiten der unterschiedlichen Morphologien der Seitenteile im Seitenvergleich. (DSH = Deutsche Schäferhunde)

Bei allen 1.302 DSH konnte die Morphologie des rechten Seitenteiles des Sakrums respektive des LÜW beurteilt werden (Abb. 25). Dabei wiesen 1.059 DSH (81,3 %) eine physiologische Ausprägung auf. Bei 212 DSH (16,3 %) war der rechte Seitenteil in

Form einer breitbasigen Ausziehung geringgradig verändert und 31 DSH (2,4 %) zeigten einen mittel- bis hochgradig veränderten Seitenteil rechtsseitig.

Der linke Seitenteil konnte bei 1.297 DSH (99,6 %) beurteilt werden (*Abb. 25*). Bei 1.059 DSH (81,7 %) erfolgte eine Befundung als anatomisch normal ausgebildeter, wohingegen bei 215 DSH (16,6 %) eine geringgradige Abweichung von der Norm und 23 DSH (1,8 %) mittel- bis hochgradige Veränderungen feststellbar waren. Bei 5 DSH (0,4 %) war die Beurteilung aufgrund einer Überlagerung mit dem Rektuminhalt nicht möglich.

Die kombinierte Bewertung der Morphologie der beiden Seitenteile des LÜW bzw. des ersten Sakralwirbels (*Tab. 10*) ergab, dass 1.026 DSH (79,1 %) eine normal ausgeprägte Anatomie aufwiesen. Symmetrisch veränderte Formen lagen bei 170 DSH (13,1 %) vor, wovon 5 (0,4 %) eine mittel- bis hochgradig veränderte Morphologie zeigten. Asymmetrische Seitenteile waren bei 101 DSH (7,8 %) festzustellen, wovon sich die rechte Seite geringgradig häufiger mittel- bis hochgradig verändert zeigte.

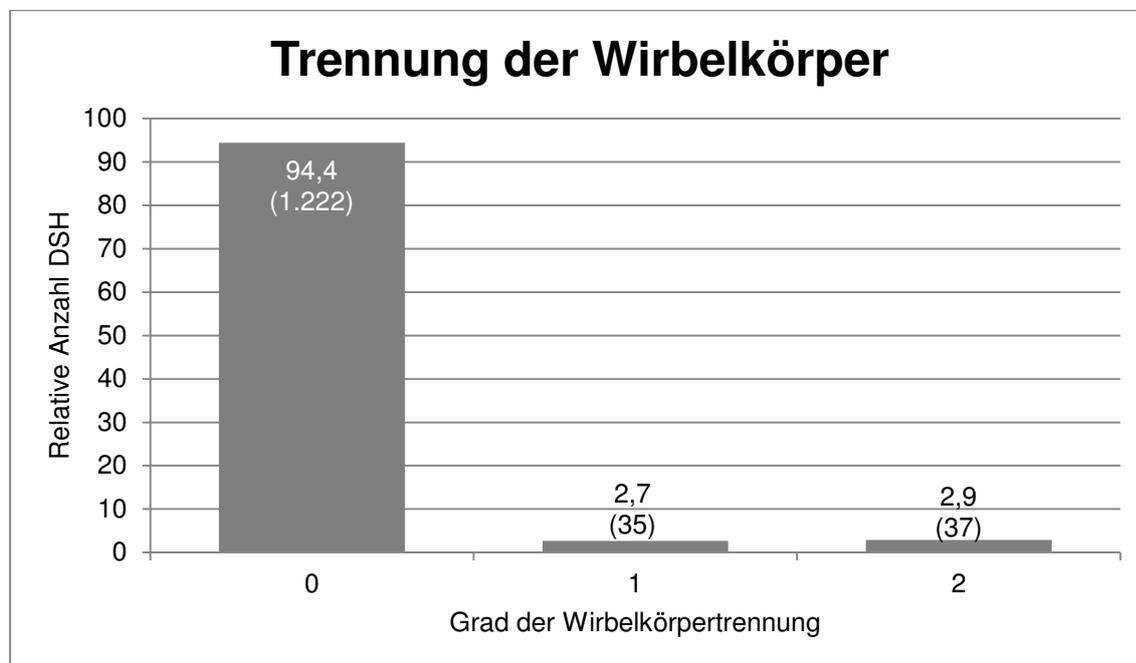
**Tabelle 10:** Häufigkeiten der unterschiedlichen Ausprägungsgrade der Morphologie der Seitenteile im Seitenvergleich bei 1.297 DSH (99,6 %). Aufgelistet in den Kreuzfeldern von oben nach unten sind: die absolute Gesamthäufigkeit der Merkmalskombination, die relative Gesamthäufigkeit der Merkmalskombination (%), die relative Häufigkeit der Merkmalsausprägung links (%) und die relative Häufigkeit der Merkmalsausprägung rechts (%). (DSH = Deutsche Schäferhunde)

		links		
		0	1	2
rechts	0	1.026	27	4
		79,1	2,1	0,3
		97,1	2,6	0,4
		96,9	12,6	17,4
1	1	30	165	14
		2,3	12,7	1,1
		14,4	79,0	6,7
		2,8	76,7	60,9
2	2	3	23	5
		0,2	1,8	0,4
		9,7	74,2	16,1
		0,3	10,7	21,7

### Trennung der Wirbelkörper

Der Grad der Wirbelkörpertrennung des LÜW vom Sakrum konnte bei 1.294 DSH (99,4 %) bestimmt werden (*Abb. 26*). Während 35 DSH (2,7 %) eine angedeutete Wirbelkörpertrennung aufwiesen, lag bei 37 DSH (2,9 %) eine vollständige Trennung vor. Die restlichen 1.222 DSH (94,4 %) zeigten eine vollständige Fusion. Die

Röntgenbilder der von den 1.302 DSH nicht eingestuften 8 DSH (0,6 %) konnten aufgrund von Überlagerungen mit Kot in der ventrodorsalen Aufnahme und eines ungenügenden Belichtungsverhältnisses in der laterolateralen Aufnahme nicht beurteilt werden.



**Abbildung 26:** Relative (absolute) Häufigkeiten der unterschiedlichen Wirbelkörpertrennungsgrade des LÜW vom Kreuzbein. (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

### Merkmalskombination von Dornfortsatz- und Wirbelkörpertrennung

Bei 1.275 DSH (97,9 %) konnten die Merkmale Dornfortsatz- sowie Wirbelkörpertrennung unter Angabe des jeweiligen Grades kombiniert beurteilt werden. Hierbei war eine Häufung des Auftretens einer vollständigen oder partiellen Trennung der Wirbelkörper bei Hunden mit einer vollständigen Trennung der Dornfortsätze festzustellen. Beim Vorliegen einer vollständigen Fusion der Dornfortsätze war umgekehrt stets eine vollständige Fusion der Wirbelkörper von LÜW und Sakrum oder respektive der ersten beiden Sakralwirbel feststellbar (Tab.11).

**Tabelle 11:** Häufigkeiten der Merkmalskombinationen Wirbelkörpertrennung und Dornfortsatztrennung für 1.275 DSH (97,9 %). (DSH = Deutsche Schäferhunde, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

TrWK \ TrDF	0	1	2
0	349 (27,4 %)	497 (39,0 %)	359 (28,2 %)
1	0 (0,0 %)	3 (0,2 %)	30 (2,4 %)
2	0 (0,0 %)	0 (0,0 %)	37 (2,9 %)

### **Morphologische Untersuchungsparameter nach Geschlecht**

Kennzahlen der Verteilung der Ausprägungsformen der untersuchten morphologischen Kriterien sind in Abhängigkeit vom Geschlecht in *Tabelle 12* dargestellt.

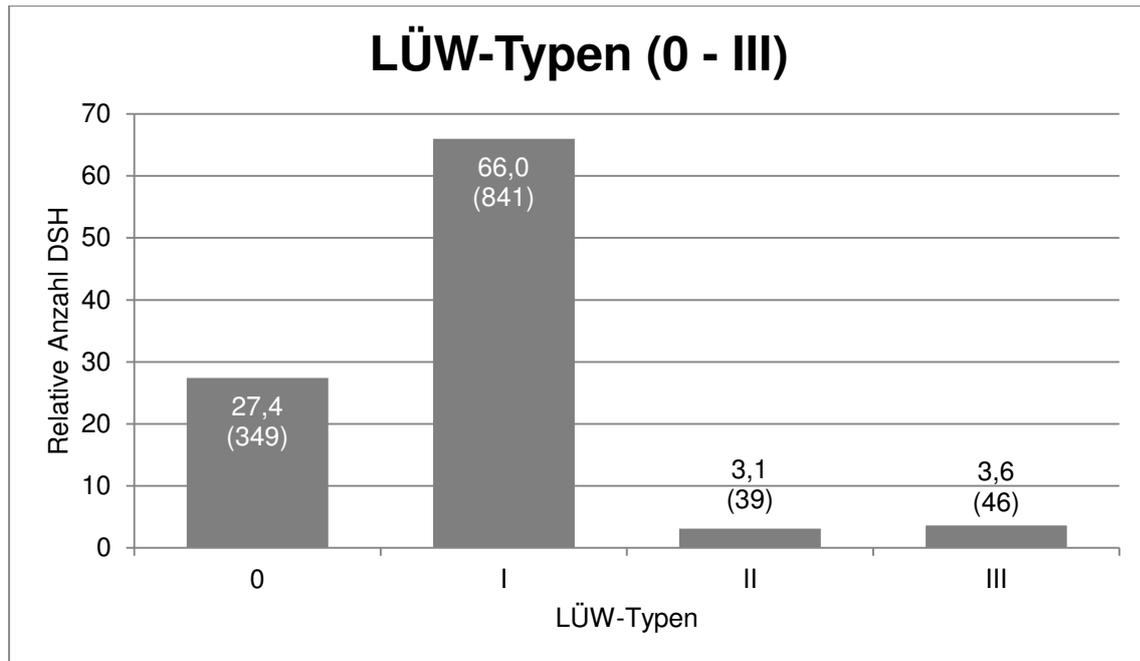
**Tabelle 12:** Kennzahlen der Beschreibung der Morphologie des lumbosakralen Überganges im Geschlechtervergleich (Max = Maximum, Min = Minimum, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

Geschlecht	Bewertetes Kriterium	Mittelwert	Standardabweichung	Min	Max
Rüden (n = 714)	ST	0,26	0,52	0,00	2,00
	TrDF	1,03	0,79	0,00	2,00
	TrWK	0,09	0,38	0,00	2,00
Hündinnen (n = 549)	ST	0,24	0,51	0,00	2,00
	TrDF	1,12	0,76	0,00	2,00
	TrWK	0,08	0,34	0,00	2,00

Die Verteilung der Kriterien zur Beschreibung der Morphologie des lumbosakralen Überganges ließ keine signifikanten Unterschiede zwischen Rüden und Hündinnen erkennen.

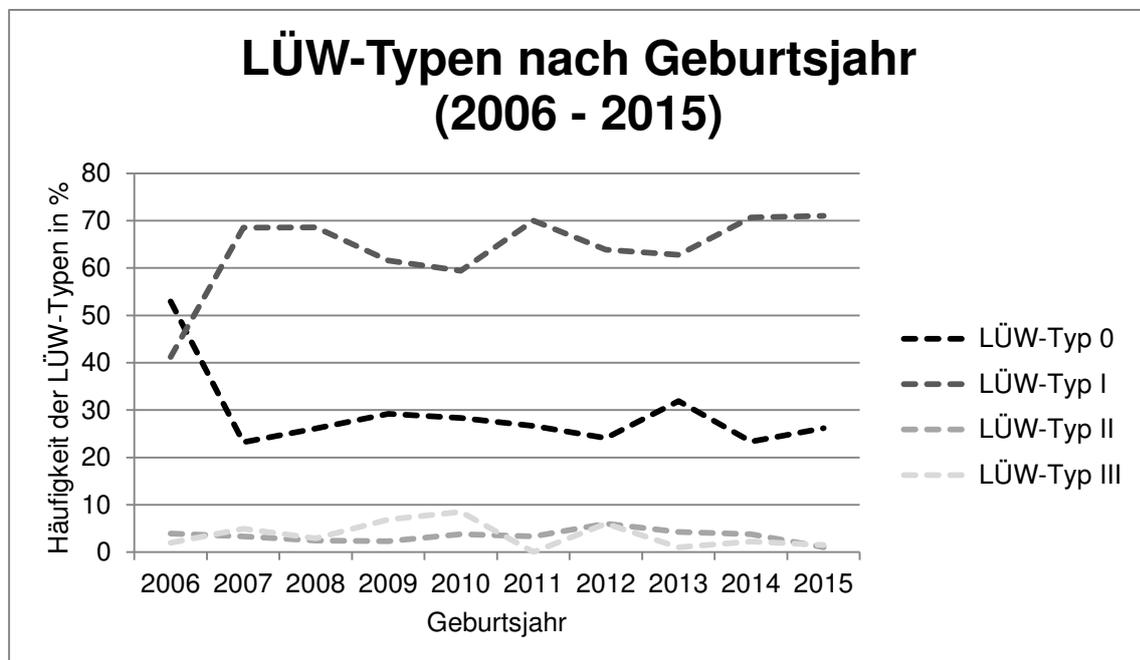
#### **8.1.2 Klassifikation des LÜW-Typs**

Durch eine kombinierte Beurteilung aller morphologischen Untersuchungsparameter des lumbosakralen Überganges konnte eine Klassifikation der LÜW bei 1.275 DSH (97,9 %) erfolgen (*Abb. 27*). Bei 349 DSH (27,4 %) wurde der lumbosakrale Übergang als anatomisch normal ausgebildet befundet, während 841 DSH (66,0 %) einen LÜW-Typ I zeigten. DSH mit den deutlicher von der Norm abweichenden LÜW-Typen II und III waren annähernd gleich häufig. Der LÜW-Typ II trat bei 39 DSH (3,1 %), der LÜW-Typ III bei 46 DSH (3,6 %) auf.



**Abbildung 27:** Relative (absolute) Häufigkeiten der LÜW-Typen in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie nach kombinierter Auswertung aller zuvor beschriebenen morphologischen Untersuchungsparameter bei 1.275 DSH (97,9 %). (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

Die *Abbildung 28* gibt anhand der Geburtsjahre der untersuchten DSH den phänotypischen Trend der unterschiedlichen LÜW-Typen wieder.

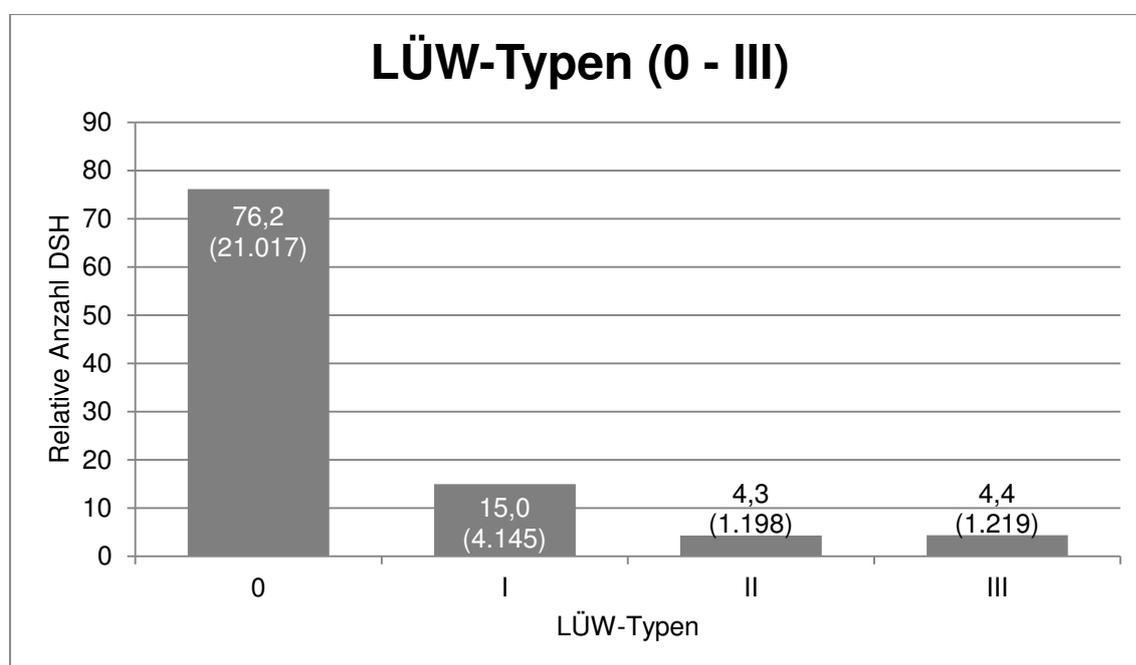


**Abbildung 28:** Phänotypischer Trend der unterschiedlichen LÜW-Typen bei DSH der detaillierten morphologischen Röntgenstudie (Studienteil A). (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

## 8.2 Ergebnisse des Studienteiles B

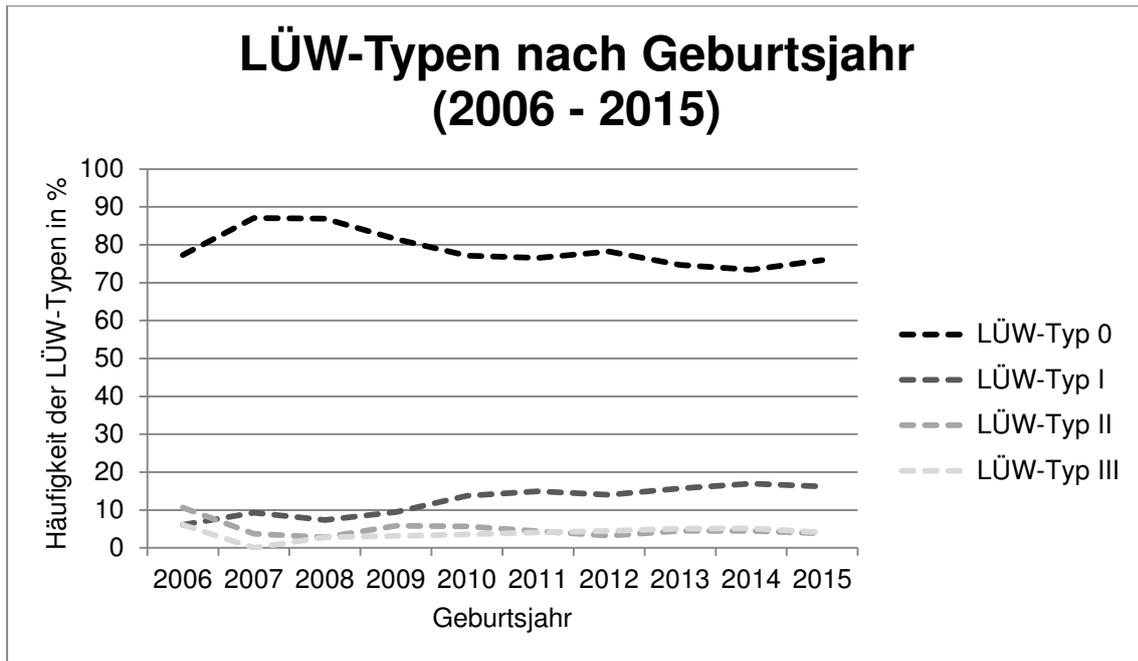
### 8.2.1 Klassifikation des LÜW-Typs

Die Auswertungsdaten der röntgenologischen Untersuchung des lumbosakralen Überganges von insgesamt 27.579 DSH erfüllten die Einschlusskriterien und konnten somit in die weitere Datenaufarbeitung einbezogen werden (Abb. 29). 21.017 dieser DSH (76,2 %) wiesen eine normale Anatomie ihrer lumbosakralen Übergänge, und demnach einen LÜW-Typ 0, auf. Lumbosakrale Übergänge des LÜW-Typ I, bei denen lediglich eine Trennung der Dornfortsätze der ersten beiden Sakralwirbel ausgeprägt ist, lagen bei 4.145 DSH (15,0 %) vor. Die LÜW der stärker von der Norm abweichenden Typen II und III wurden bei 1.198 (4,3 %) sowie 1.219 DSH (4,4 %) festgestellt.



**Abbildung 29:** Relative (absolute) Häufigkeiten der LÜW-Typen in der Screening-Studie nach Klassifikation gemäß FLÜCKIGER et al. (2009) bei 27.579 DSH. (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel)

Durch die Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Häufigkeiten der unterschiedlichen LÜW-Typen für die DSH der Geburtsjahre 2006 - 2015 ließ sich der phänotypische Trend innerhalb der untersuchten Studienpopulation nachvollziehen. Dies wird in *Abbildung 30* graphisch dargestellt. Verglichen mit dem Jahr 2007 ist die Prävalenz anatomisch normal ausgebildeter lumbosakraler Übergangswirbel bis zum Jahr 2015 um 11,1 % gesunken. Im gleichen Zeitraum war die Prävalenz des LÜW-Typ I um 6,9 % angestiegen. Die Häufigkeiten von LÜW der Typen II und III hingegen unterlagen insbesondere ab dem Jahr 2011 nur geringen Schwankungen mit Werten zwischen 3,3 und 4,5 % sowie 4,1 und 5,2 %.



**Abbildung 30:** Phänotypischer Trend der unterschiedlichen LÜW-Typen bei DSH der Screening-Studie (Studienteil B). (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel)

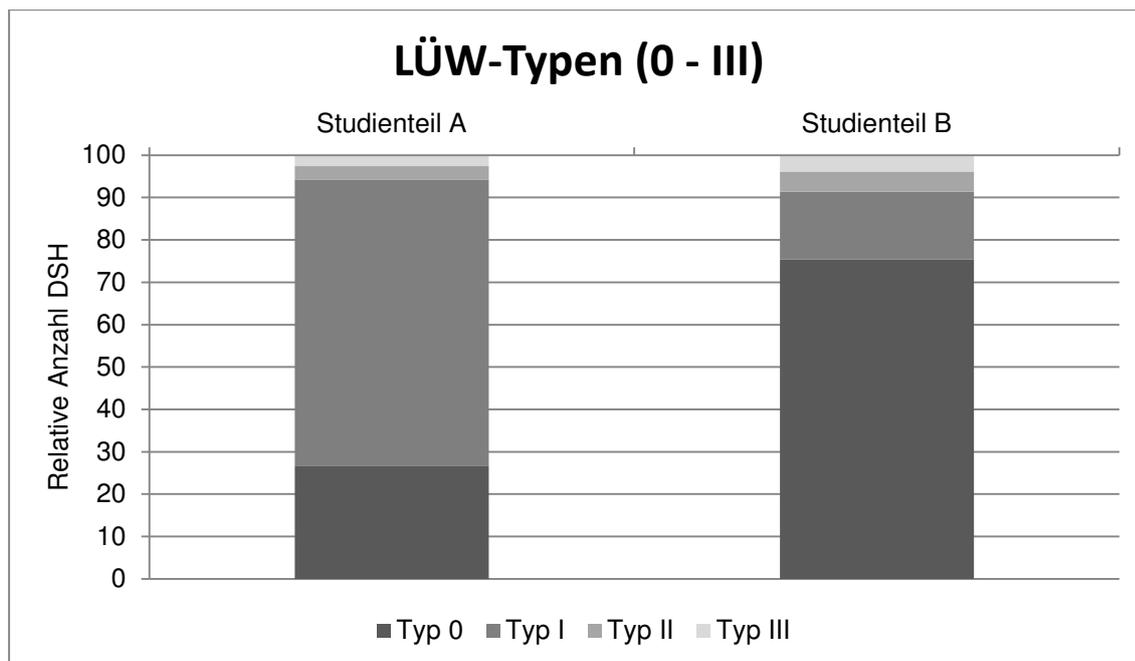
### 8.3 Vergleich der LÜW-Klassifikation beider Studienteile

Zu 619 DSH, die im Studienteil A eingehend morphologisch untersucht wurden, wurden ebenfalls die offiziellen Röntgenbefunde zum LÜW-Typ durch den SV übermittelt. Hierdurch wurde ein Vergleich der beiden angewandten Klassifikationsverfahren ermöglicht. Die Häufigkeiten der unterschiedlichen LÜW-Typen im Studienvergleich nach Anwendung der unterschiedlichen Beurteilungsverfahren sind in *Tabelle 13* und *Abbildung 31* dargestellt. Insgesamt wurden 43,5 % der untersuchten DSH in beiden Studienteilen übereinstimmend eingestuft.

**Tabelle 13:** Vergleich der LÜW-Klassifikation beider Studienteile anhand von DSH, die in beiden Studienteilen untersucht wurden. Aufgelistet in den Kreuzfeldern von oben nach unten sind: die absolute Gesamthäufigkeit des LÜW-Typs, die relative Gesamthäufigkeit des LÜW-Typs (%), die relative Häufigkeit des LÜW-Typs im Studienteil A (%) und die relative Häufigkeit des LÜW-Typs im Studienteil B (%). (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

B \ A	LÜW-Typ 0	LÜW-Typ I	LÜW-Typ II	LÜW-Typ III
LÜW-Typ 0	156 25,2 33,4 94,6	307 49,6 65,7 73,4	2 0,3 0,4 10,0	2 0,3 0,4 12,5
LÜW-Typ I	3 0,5 3,0 1,8	93 15,0 93,9 22,3	3 0,5 3,0 15,0	0 0,0 0,0 0,0
LÜW-Typ II	5 0,8 17,2 3,0	16 2,6 55,2 3,8	7 1,1 24,1 35,0	1 0,2 3,5 6,3
LÜW-Typ III	1 0,2 4,2 0,6	2 0,3 8,3 0,5	8 1,3 33,3 40,0	13 2,1 54,2 81,3

Eine starke Diskrepanz bezüglich der LÜW-Klassifikation ergab sich bei den LÜW-Typen 0 und I. Zwar lag für die Einstufung der 165 DSH mit LÜW-Typ 0 im Studienteil A eine hohe Übereinstimmung mit 94,6 % im Studienteil B vor, jedoch wurden umgekehrt nur 33,4 % der 467 DSH mit LÜW-Typ 0 in der Screening-Studie ebenfalls im Studienteil A äquivalent beurteilt. 65,7 % wurden davon abweichend in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie als LÜW-Typ I beschrieben.



**Abbildung 31:** Vergleich der LÜW-Klassifikation beider Studienteile an 619 DSH. (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel)

Für die insgesamt 418 eingeteilten LÜW-Typ I Hunde im Studienteil A stimmte die Beurteilung nur bei 22,3 % überein. Die überwiegende Anzahl abweichender Beurteilungen erfolgte mit 73,4 % in der Screening-Studie als LÜW-Typ 0. Konträr war im Fall der in der Screening-Studie als LÜW-Typ I eingeteilten 99 DSH eine hohe Übereinstimmung (93,9 %) gleich beurteilter Hunde im Studienteil A festzustellen.

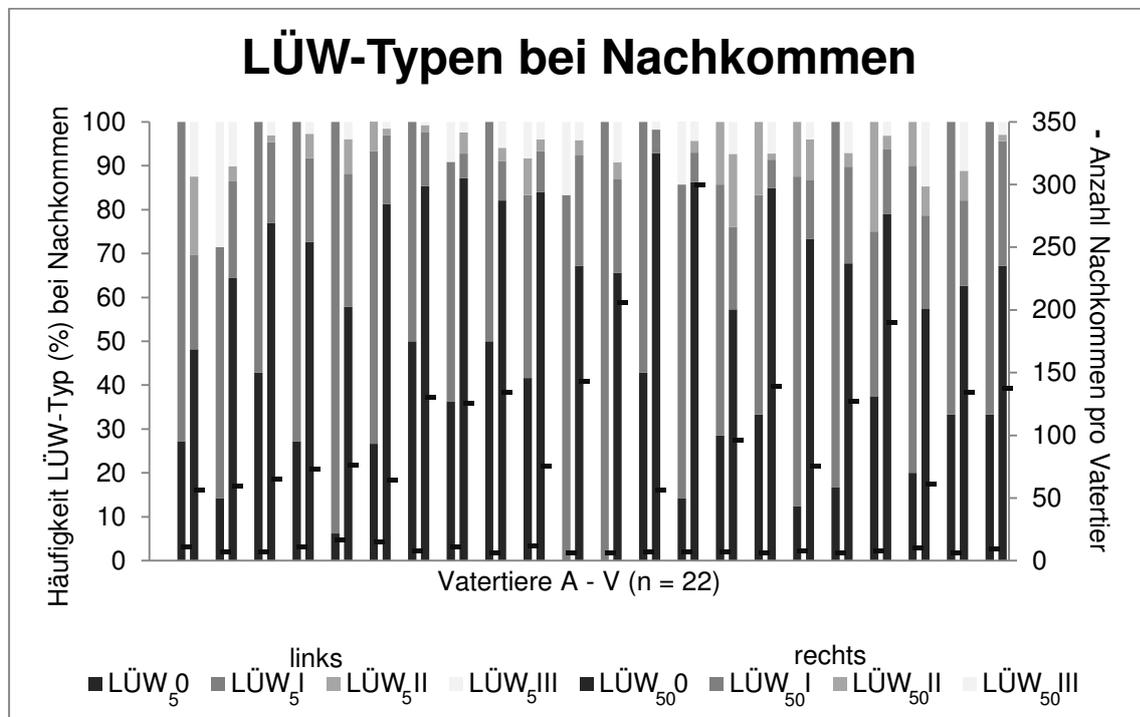
Auch bei den stark von der Norm abweichenden LÜW-Typen II und III waren teilweise deutliche Beurteilungsabweichungen ersichtlich. So wurden nur 35,0 % der als LÜW-Typ II beurteilten DSH des Studienteiles A im Studienteil B gleich eingestuft. 40,0 % der DSH wurden hingegen als LÜW-Typ III typisiert. Dies resultiert daraus, dass im Studienteil A schon geringe morphologische Abweichungen im Seitenvergleich zu einer unterschiedlichen Gradierung der Seitenteile geführt haben. Umgekehrt wurden 55,2 % der in der Screening-Studie als LÜW-Typ II befundenen DSH als LÜW-Typ I und nur 24,1 % äquivalent in beiden Studienteilen eingeteilt. Entsprechend der Definition des Studienteiles A ist es möglich, dass Hunde als LÜW-Typ I eingestuft werden, obwohl ihre Seitenteile geringgradig von der Norm abweichen. Diese DSH werden im Studienteil B als LÜW-Typ II klassifiziert.

Bei den asymmetrischen LÜW-Typ III ergaben sich für 13 DSH in beiden Studienteilen identische Beurteilungen. Dies waren 81,3 % der als Typ III eingestuften Hunde im Studienteil A und 54,2 % im Studienteil B. Die Abweichung im Studienteil B ergab sich vorwiegend durch eine Einteilung von 33,3 % der Hunde als LÜW-Typ II.

## 8.4 Deskriptive Statistik der Nachkommenanalyse (Väter-Statistik)

### 8.4.1 LÜW in der Nachkommenanalyse

Es wurden unter den DSH des Studienteiles A 567 Vatertiere gefunden. Die durchschnittliche Nachkommenzahl dieser DSH lag bei 2,2 Nachkommen pro Vatertier. Für 63 dieser Vatertiere (11,1 %) konnten fünf oder mehr Nachkommen ermittelt werden. Im übermittelten Datensatz des SV lagen für 22 dieser Rüden Daten über mindestens 50 Nachkommen mit bekanntem LÜW-Status vor. In dem folgenden Diagramm werden die Nachkommengruppen anhand ihrer LÜW-Typen entsprechend des prozentualen Anteiles an der Gesamtzahl der Nachkommen für das jeweilige Vatertier aufgeführt (Abb. 32). Zusätzlich wird die Verteilung der LÜW-Klassifikation der detaillierten morphologischen Röntgenstudie der der Screening-Studie gegenübergestellt.



**Abbildung 32:** Häufigkeiten verschiedener LÜW-Typen bei Nachkommen 22 Vatertiere mit mindestens 5 Nachkommen im Studienteil A (LÜW<sub>5</sub>-Typ) sowie mindestens 50 Nachkommen im Studienteil B (LÜW<sub>50</sub>-Typ) in Prozent. Zusätzlich wird die Gesamtzahl beurteilbarer Nachkommen pro Vatertier dargestellt. (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel)

Bei der Beurteilung des Auftretens der verschiedenen LÜW-Typen innerhalb der Nachkommengruppen fiel auf, dass bei 21 der 22 Vatertiere (95,5 %) alle LÜW-Typen vorkamen. Für einen Rüden (Vatertier M) wurden in keinem der beiden Studienteile Nachkommen mit LÜW-Typ II gefunden. Allerdings handelte es sich bei diesem Hund um denjenigen mit der geringsten Nachkommenzahl (n = 63).

Es ergaben sich nach der Auswertung der LÜW-Typen für die Nachkommen von 22 Vatertieren mit mehr als 5 Nachkommen im Studienteil A sowie mehr als 50 Nachkommen im Studienteil B die in *Tabelle 14* dargestellten Häufigkeiten der unterschiedlichen LÜW-Typen. Die weiten Spannbreiten der Anteile von den einzelnen LÜW-Typen betroffener Nachkommen, die sich in beiden Studienteilen ergaben, illustrierten die großen Unterschiede zwischen den Rüden, die sich über die Nachkommenanalyse herausarbeiten ließen. So variierte die Quote von anatomisch normalen lumbosakralen Übergängen bei Nachkommen unter den stärker eingesetzten und im Datenmaterial vertretenen Rüden im Studienteil B zwischen 50 % und 90 %. Die Anteile der insgesamt verhältnismäßig selten vorkommenden deutlicheren Veränderungen (LÜW-Typen II und III) überstiegen im Einzelfall deutlich 10 % (Maxima von 17,9 % für LÜW-Typ II und 14,8 % für LÜW-Typ III).

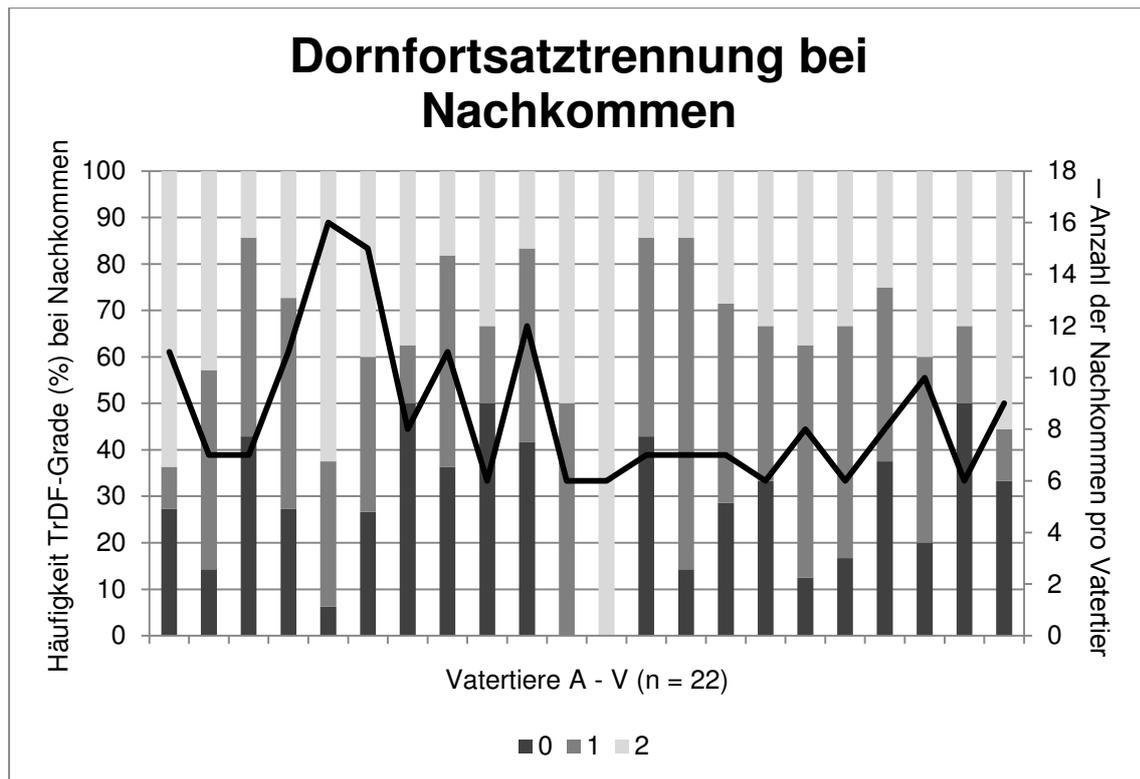
**Tabelle 14:** LÜW-Verteilung in der Nachkommenanalyse von 22 Vatertieren mit mehr als 5 Nachkommen im Studienteil A sowie mehr als 50 Nachkommen im Studienteil B mit den dazugehörigen Bandbreiten (jeweils in Prozent). (LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel)

	Studienteil A	Studienteil B
LÜW-Typ 0	26,8 (0,0 - 50,0)	74,3 (48,2 - 92,9)
LÜW-Typ I	65,8 (37,5 - 100,0)	15,9 (5,4 - 30,3)
LÜW-Typ II	4,2 (0,0 - 25,0)	4,3 (0,0 - 17,9)
LÜW-Typ III	3,2 (0,0 - 28,6)	5,5 (0,8 - 14,8)

## 8.4.2 Morphologische Untersuchungsparameter bei Nachkommen

### Trennung der Dornfortsätze bei Nachkommen

Der Grad der Dornfortsatztrennung zwischen den ersten beiden Wirbeln des fusionierten Sakrums respektive dem kranial vor dem fusionierten Sakrum liegenden LÜW und dem ersten Sakralwirbel wurde für die Nachkommen von 22 Vatertieren mit mehr als fünf Nachkommen im Studienteil A beurteilt. Insgesamt konnte für 190 Nachkommen eine Beurteilung erfolgen. Die Häufigkeit der verschiedenen Grade einer Dornfortsatztrennung wird für die Nachkommen eines Vatertieres prozentual an der Gesamtnachkommenzahl des jeweiligen Vatertieres dargestellt. Das Ergebnis ist der *Abbildung 33* zu entnehmen.

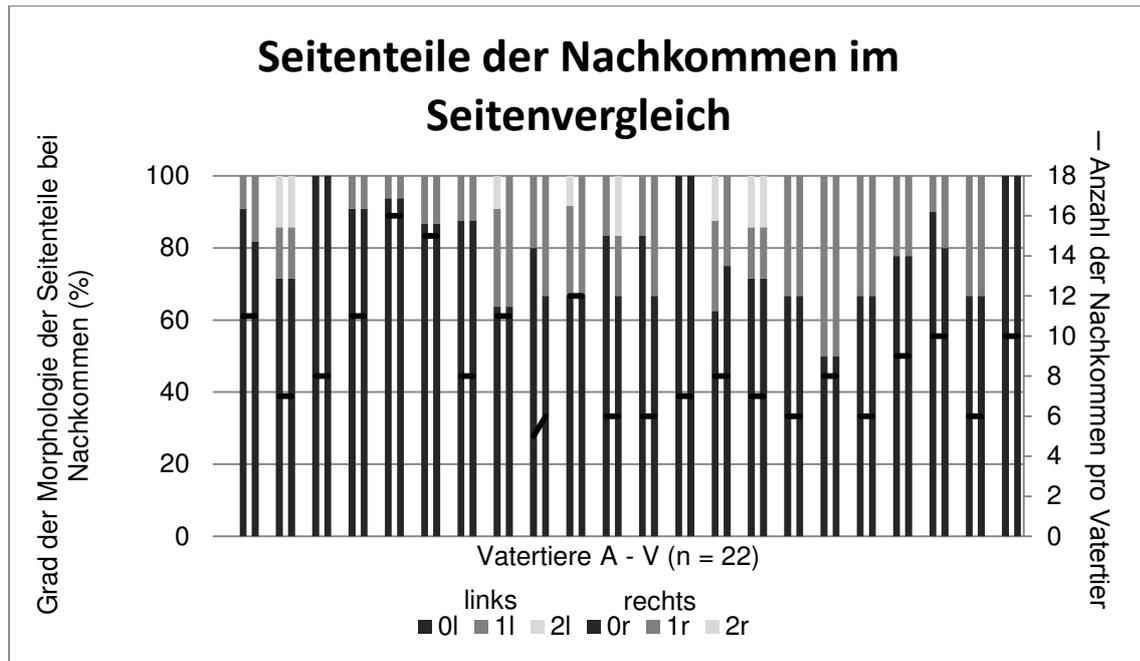


**Abbildung 33:** Häufigkeit der unterschiedlichen Grade einer Dornfortsatztrennung bei Nachkommen von 22 Vatertieren zwischen einem ausgebildeten LÜW und dem Sakrum bzw. der ersten beiden Wirbel des fusionierten Sakrums in Prozent der Gesamtzahl der Nachkommen eines Vatertieres. (LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel, TrDF = Dornfortsatztrennung)

Trotz der geringen Anzahl an Nachkommen pro Vatertier ( $n = 6 - 16$ ) war erkennbar, dass bei 18 der 20 Vatertiere (90,0 %) alle möglichen Grade der Dornfortsatztrennung innerhalb ihrer Nachkommen auftraten. Dabei variierten die relativen Häufigkeiten der unterschiedlichen Dornfortsatztrennungsgrade innerhalb der Nachkommengruppen dieser Rüden erheblich. Die Spannbreiten lagen bei 6,3 - 50,0 % für Grad 0, 9,1 - 71,4 % für Grad 1 und 14,3 - 63,6 % für den Grad 2.

### **Morphologie der Seitenteile bei Nachkommen**

Der Untersuchungsparameter Morphologie der Seitenteile mit Seitenbezug wurde für die Nachkommen von 22 Vatertieren mit mehr als fünf Nachkommen im Studienteil A beurteilt (Abb. 34). Insgesamt konnte für 194 Nachkommen eine Beurteilung des rechten und für 193 Nachkommen eine Beurteilung des linken Seitenteiles erfolgen.



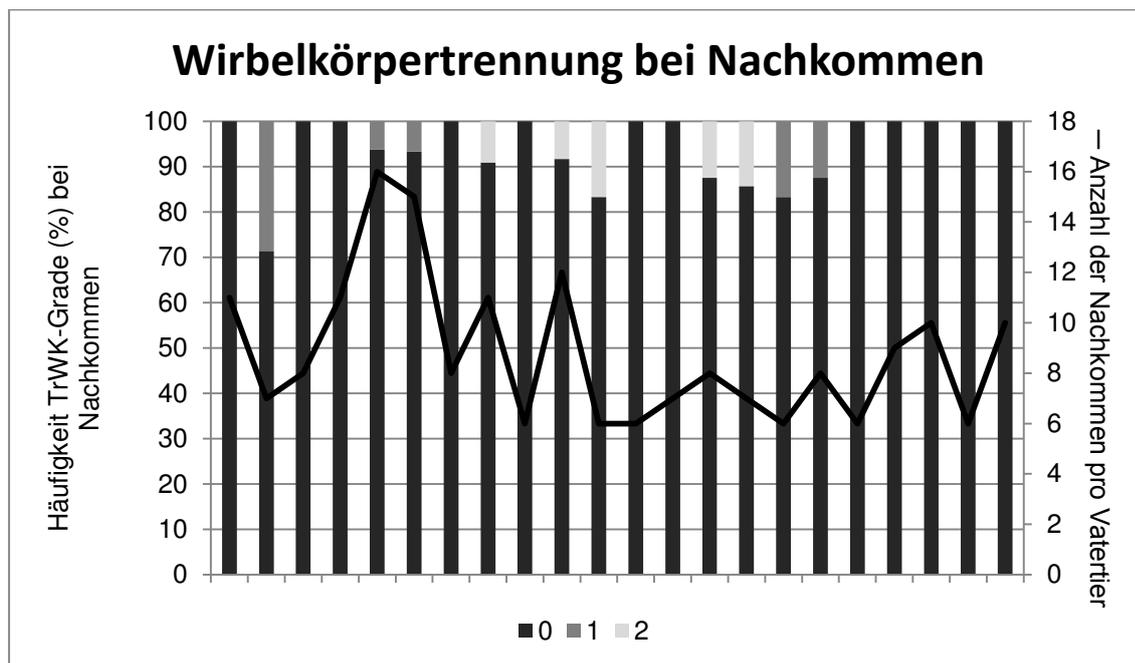
**Abbildung 34:** Häufigkeit der unterschiedlichen Morphologiegrade der Seitenteile bei Nachkommen von 22 Vatertieren in Prozent der auswertbaren Gesamtzahl der Nachkommen eines Vatertieres im Seitenvergleich. (Seitenteil links = 0l – 2l; Seitenteil rechts = 0r – 2r)

Nur von 3 der Rüden (13,6 %) mit mehr als 5 Nachkommen ( $n = 7 - 10$ ) hatten alle Nachkommen unveränderte Seitenteile. Dementsprechend konnten bei 19 der väterlichen Nachkommengruppen (86,4 %) veränderte Seitenteile festgestellt werden. Bei diesen 19 Nachkommengruppen variierten die Anteile der betroffenen Nachkommen zwischen den Rüden von 6,3 - 50,0 % für geringgradig veränderte Seitenteile sowohl rechts- als auch linksseitig. Für mittel- bis hochgradige Veränderungen war eine Spannweite von 0,0 - 16,7 % auf der rechten und 0,0 - 14,3 % auf der linken Seiten festzustellen. Bei 6 der Vatertiere (27,3 %) waren Nachkommen mit einem wenigstens einseitig mittel- bis hochgradig veränderten Seitenteil detektiert worden. 14 der 22 Rüden (63,6 %) hatten im Seitenvergleich insgesamt eine ausgeglichene Anzahl von veränderten Seitenteilen innerhalb ihrer Nachkommen. Für 7 der 22 Vatertiere (31,8 %) lagen unterschiedliche Häufigkeiten der Grade im Seitenbezug innerhalb ihrer Nachkommen vor.

### **Trennung der Wirbelkörper bei Nachkommen**

Der Grad der Wirbelkörpertrennung eines LÜW von dem des ersten Sakralwirbels bzw. die der ersten beiden Sakralwirbel wurde für die Nachkommen von 22 Vatertieren mit mehr als 5 Nachkommen im Studienteil A beurteilt. Insgesamt konnte für 194 Nachkommen eine Beurteilung erfolgen. Die Häufigkeit der verschiedenen Grade einer Wirbelkörpertrennung wurde für die Nachkommen eines Vatertieres prozentual

an der auswertbaren Gesamtzahl der Nachkommen der Vatertiere ermittelt. Das Ergebnis ist der *Abbildung 35* zu entnehmen.



**Abbildung 35:** Häufigkeit der unterschiedlichen Grade einer Wirbelkörpertrennung bei Nachkommen von 22 Vatertieren zwischen einem ausgebildeten LÜW und dem Sakrum bzw. der ersten beiden Sakralwirbel in Prozent der Gesamtzahl der Nachkommen eines Vatertieres. (LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

Von den 22 berücksichtigten Rüden hatten 10 (45,5 %) Nachkommen mit partieller oder vollständiger Wirbelkörpertrennung. Hiervon lagen bei jeweils 5 Vatertieren (22,7 %) neben den Nachkommen mit vollständiger Wirbelfusion entweder Nachkommen mit ausschließlich angedeuteter oder vollständiger Wirbelkörpertrennungen vor. Die Anteile betroffener Nachkommen variierten zwischen den Rüden von 0,0 - 28,6 % für Nachkommen mit angedeuteter sowie von 0,0 - 16,7 % mit vollständiger Wirbelkörpertrennung.

## 9 ERGEBNISSE - GENETISCH-STATISTISCHE ANALYSEN

### 9.1 Lumbosakrale Übergangswirbel

#### 9.1.1 Voranalysen

##### Detaillierte morphologische Röntgenstudie (Studienteil A)

In die genetisch-statistische Analyse des Studienteiles A gingen insgesamt die Untersuchungsdaten von 1.263 DSH ein. Die Röntgenaufnahmen der hierfür bewerteten Hunde entstammten den Jahren 2008 bis 2016 (Tab. 15).

**Tabelle 15:** Verteilung der DSH nach Röntgenjahr zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil A (detaillierte morphologische Röntgenstudie). (DSH = Deutsche Schäferhunde)

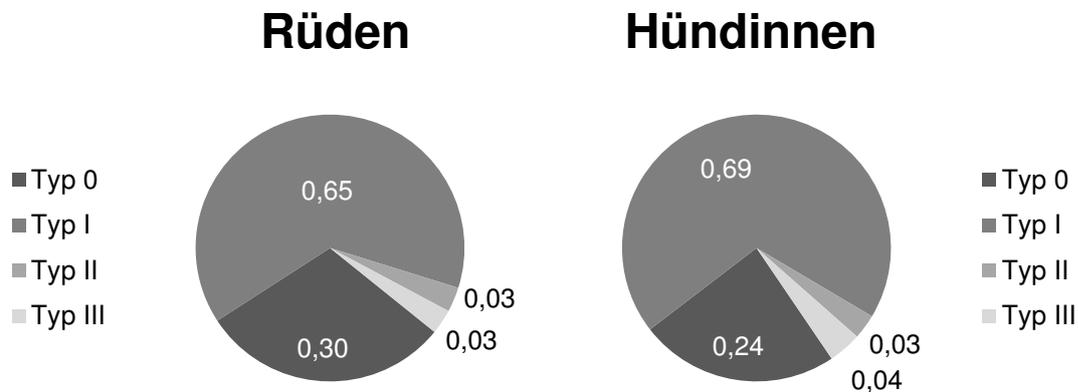
Röntgenjahr	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit (%)
2008 - 2011	600	47,5
2012	100	7,9
2013	82	6,5
2014	90	7,1
2015	107	8,5
2016	284	22,5
Gesamt	1.263	

Rüden und Hündinnen waren mit annähernd gleichen Anteilen vertreten (Tab. 16). Die Kreuzverteilung nach Alter und Geschlecht im Datenmaterial der genetisch-statistischen Analysen (n = 1.263 DSH) ist aus Tabelle 16 ersichtlich. Hündinnen wurden im Schnitt jünger zur röntgenologischen Untersuchung vorgestellt als Rüden, bei denen fast ein Viertel im Alter > 18 Monaten untersucht wurden.

**Tabelle 16:** Alters- und Geschlechtsverteilung der DSH zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil A (detaillierte morphologische Röntgenstudie). (DSH = Deutsche Schäferhunde)

Alter \ Geschlecht	Rüden		Hündinnen		Gesamt	
	Anzahl	Anteil (%)	Anzahl	Anteil (%)	Anzahl	Anteil (%)
Bis 12 Monate	165	23,1 %	143	26,0 %	308	24,4 %
13 – 14 Monate	215	30,1 %	195	35,5 %	410	32,5 %
15 – 18 Monate	161	22,5 %	135	24,6 %	296	23,4 %
Ab 19 Monate	173	24,2 %	76	13,8 %	249	19,7 %
Gesamt	714	56,5 %	549	43,5 %	1.263	100,0 %

Die Verteilung der LÜW-Typen dieser untersuchten DSH in Abhängigkeit ihres Geschlechts wird in *Abbildung 36* dargestellt.



**Abbildung 36:** Geschlechtsabhängige Verteilung der LÜW-Typen im Studienteil A bei 1.263 DSH in Prozent. (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel)

Insgesamt konnte keine statistische Signifikanz für das Geschlecht festgestellt werden. Jedoch wurde die Tendenz erkennbar, dass männliche Hunde (29,7 %) häufiger einen anatomisch normalen lumbosakralen Übergang aufwiesen als weibliche Hunde (23,8 %). 832 DSH (66,4 %) zeigten einen LÜW-Typ I. Hier waren Hündinnen mit 68,7 % geringgradig häufiger betroffen als Rüden (64,6 %). Die stärker von der Norm abweichenden LÜW-Typen II und III waren mit 2,9 und 3,7 % der untersuchten Hunde vergleichsweise selten, dabei prozentual bei Hündinnen geringgradig häufiger.

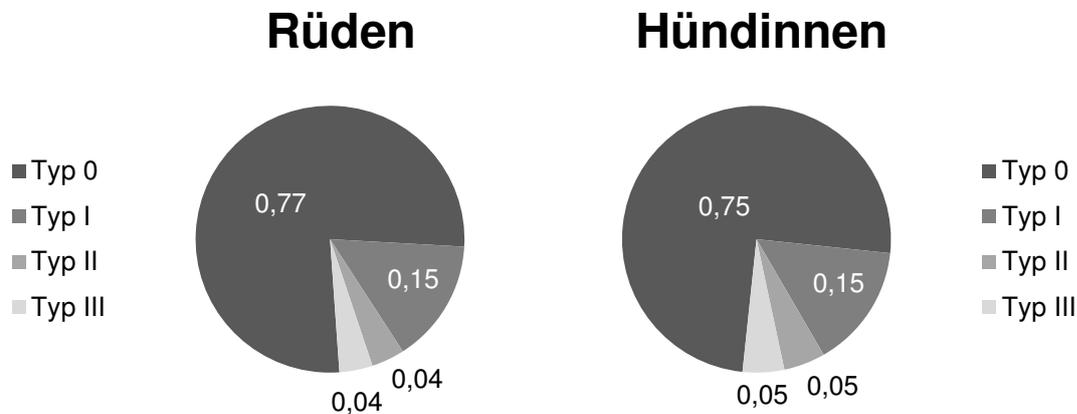
### **Screening-Studie (Studienteil B)**

In der Screening-Studie waren die Geschlechter mit 12.870 Rüden (46,7 %) und 14.709 Hündinnen (53,3 %) nur geringgradig ungleich verteilt (*Tab. 17*). Dies entsprach einem Geschlechterverhältnis von 1 : 1,14.

**Tabelle 17:** Alters- und Geschlechtsverteilung der DSH zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil B (Screening-Studie). (DSH = Deutsche Schäferhunde)

Alter \ Geschlecht	Rüden		Hündinnen		Gesamt	
	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent	Anzahl	Prozent
Bis 12 Monate	3.553	27,6 %	4.083	27,8 %	7.636	27,7 %
13 – 14 Monate	4.515	35,1 %	4.890	33,3 %	9.405	34,1 %
15 – 18 Monate	2.811	21,8 %	3.102	21,1 %	5.913	21,4 %
Ab 19 Monate	1.991	15,5 %	2.634	17,9 %	4.625	16,8 %
Gesamt	12.870	46,7 %	14.709	53,3 %	27.579	100,0 %

In die genetisch-statistischen Analysen des Studienteiles B konnten die Daten von 27.437 DSH in der Screening-Studie beurteilten Hunden einbezogen werden. Die geschlechtsabhängige Verteilung der LÜW-Typen dieser untersuchten DSH wird in *Abbildung 37* dargestellt. Die Unterschiede erreichten statistische Signifikanz.



**Abbildung 37:** Geschlechtsabhängige Verteilung der LÜW-Typen im Studienteil B bei 27.437 DSH in Prozent. (DSH = Deutsche Schäferhunde, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel)

Die Röntgenaufnahmen dieser bewerteten Hunde entstammten den Jahren 2007 bis 2016 (*Tab. 18*).

**Tabelle 18:** Verteilung der DSH nach Röntgenjahr zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme im Studienteil B (Screening-Studie). (DSH = Deutsche Schäferhunde)

Röntgenjahr	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit (%)
2007 - 2011	2.641	9,6
2012	5.473	20,0
2013	5.081	18,5
2014	5.011	18,3
2015	5.269	19,2
2016	3.962	14,4
Gesamt	27.437	

### 9.1.2 Genetische Parameterschätzungen

Entsprechend 7.1.3 kamen in den genetisch-statistischen Analysen Ein- und Mehrmerkmalsmodelle zum Einsatz, um aus den geschätzten Varianzkomponenten einerseits die Heritabilität von LÜW abzuleiten und andererseits differenzierte Hinweise auf die Vererbungsmuster der verschiedenen LÜW-Typen zu erhalten. Berücksichtigt wurden hierbei die verschiedenen LÜW-Typen, wobei betroffene Hunde jeweils allen anderen LÜW-Typen oder nur denjenigen Hunden mit röntgenologisch komplett

unauffälligen lumbosakralen Übergängen (LÜW-Typ 0) gegenübergestellt wurden. Für letztere Merkmalsdefinition erfolgte in den multivariaten Schätzläufen keine Konvergenz, so dass keine Schätzwerte zu den genetischen Parametern (Heritabilitäten und additiv-genetische Korrelationen) zu ermitteln waren. Aufgrund der Aufgabenstellung die Beziehungen zwischen den LÜW-Typen zu untersuchen, wurde diese Alternative der Merkmalsdefinition im weiteren Verlauf verworfen.

### **Detaillierte morphologische Röntgenstudie (Studienteil A)**

#### Univariater Merkmalsansatz

Durch die hier durchgeführte genetisch-statistische Analyse konnte für lumbosakrale Übergangswirbel eine genetische Grundlage nachgewiesen werden. Für das Merkmal nLÜW wurde eine moderate Heritabilität von 0,25 geschätzt. Darüber hinaus konnten Daten zur genetischen Grundlage der verschiedenen LÜW-Typen gewonnen werden. Für die von der Norm abweichenden LÜW-Typen (Binärmerkmale) lagen die Heritabilitätsschätzwerte jeweils unter der des Merkmals nLÜW. Im Einzelnen ergaben sich Schätzwerte von  $h^2 = 0,18$  für den LÜW-Typ I und  $h^2 = 0,09$  für den LÜW-Typ III. Für den LÜW-Typ II ließ sich anhand des verfügbaren Datenmaterials isoliert betrachtet kein von Null abweichender Heritabilitätsschätzwert ermitteln. Unter Zusammenfassung der deutlicheren Veränderungen des lumbosakralen Überganges (LÜW23; Merkmalsdefinition 0 = nicht LÜW-Typ II oder III und 1 = LÜW-Typ II oder III) ergab sich ein Heritabilitätsschätzwert von  $h^2 = 0,06$ .

#### Multivariater Merkmalsansatz

Die genetisch-statistischen Analysen im multivariaten Merkmalsansatz wurden zur Überprüfung der Heritabilitäten des univariaten Merkmalsansatzes und zur Schätzung der Kovarianzen zwecks Ableitung der additiv-genetischen Korrelationen unter den LÜW-Typen durchgeführt. Die multivariaten Varianzkomponentenschätzungen konnten die im univariaten Merkmalsansatz ermittelten Heritabilitäten des LÜW-Typ I ( $h^2 = 0,18 - 0,19$ ) und des LÜW-Typ III ( $h^2 = 0,09 - 0,10$ ) bestätigen. Für den LÜW-Typen II bestanden die methodischen Probleme, deren Ursache in der geringen Merkmalshäufigkeit gesehen werden kann, fort, so dass sich auch multivariat keine relevante genetische Varianz nachweisen ließ ( $h^2 < 0,01$ ).

Zwischen den einzelnen LÜW-Typen wurden überwiegend moderate additiv-genetische Korrelationen in der Größenordnung von 0,3 geschätzt. So ergab die bi- bzw. trivariate Schätzung Werte von  $r_g = 0,22 - 0,39$  sowohl zwischen den LÜW-Typen I und III als auch den LÜW-Typen II und III. Konsistent hiermit war auch die zwischen dem LÜW-Typ I und dem Merkmal LÜW23 geschätzte Korrelation von  $r_g = 0,39$ . Bei

der Interpretation der Ergebnisse sind die mit Werten von 0,25 - 0,45 sehr hohen Schätzfehler der additiv-genetischen Korrelationen zu berücksichtigen. Für die additiv-genetische Korrelation zwischen den LÜW-Typen I und II ergaben sich Schätzwerte von  $r_g > 0,99$ , die das Fortbestehen der Schätzprobleme der genetischen Grundlage von LÜW-Typ II widerspiegeln.

Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung im Ein- und Mehrmerkmalsmodell mit den Schätzwerten für die Heritabilitäten und additiv-genetischen Korrelationen unter Angabe der jeweiligen Standardfehler (SE).

**Tabelle 19:** Heritabilitäten und additiv-genetische Korrelationen für LÜW aus Schätzläufen im Ein- und Mehrmerkmalsansatz auf Datenbasis des Studienteiles A (bei 1.263 DSH), wobei den verschiedenen LÜW-Typen jeweils alle anderen LÜW-Typen gegenübergestellt wurden. (b = bivariat,  $h^2$  = Heritabilität, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel,  $r_g$  = additiv-genetische Korrelationen, SE = Standardfehler, Std = Standardabweichung, t = trivariat, u = univariat)

Merkmal	Merkmalswerte	Auswertungsmodus	Studienteil A					
			Mittelwert	Std	$h^2$	SE_ $h^2$	$r_g$	SE_ $r_g$
nLÜW	0-3	u	0,830	0,647	0,245	0,074		
LÜW0	0-1	u	0,272	0,445	0,278	0,070		
LÜW 1	0-1	u	0,662	0,473	0,182	0,062		
		b / LÜW2			0,176	0,056	> 0,999	0,040
		b / LÜW3			0,189	0,053	0,309	0,339
		b / LÜW23			0,183	0,047	0,394	0,386
		t / LÜW2			0,181	0,055	0,996	0,380
		t / LÜW3					0,281	0,247
LÜW 2	0-1	u	0,029	0,169	0,000	0,000		
		b / LÜW1			0,003	0,008		
		b / LÜW3			0,000	0,000	0,219	0,000
		t / LÜW1			0,000	0,051	0,996	0,380
		t / LÜW3					0,272	0,450
LÜW 3	0-1	u	0,036	0,187	0,092	0,056	1,000	0,040
		b / LÜW1			0,100	0,039	0,309	0,339
		b / LÜW2			0,091	0,002	0,394	0,386
		t / LÜW1			0,098		0,281	0,247
		t / LÜW2					0,272	0,450
LÜW23	0-1	u	0,066	0,248	0,056	0,054		
		b / LÜW1			0,057	0,050	0,394	0,386

## **Screening-Studie (Studienteil B)**

### **Univariater Merkmalsansatz**

Im Studienteil B konnten die univariaten Schätzläufe eine genetische Grundlage für alle LÜW-Typen nachweisen. Die Heritabilität des Merkmals nLÜW wurde unter Verwendung der Daten von 27.437 DSH auf 0,27 geschätzt. Für normal ausgebildete lumbosakrale Übergänge (LÜW-Typ 0) wurde ebenfalls ein  $h^2$ -Schätzwert von 0,27 ermittelt. Für die einzelnen LÜW-Typen ergaben sich in univariaten Schätzläufen niedrige Heritabilitätsschätzwerte von 0,12 für den LÜW-Typ I, 0,08 für den LÜW-Typ II und 0,11 für den LÜW Typ III. Zur Absicherung der Heritabilitätsschätzwerte der LÜW-Typen II und III, und analog zum Vorgehen im Studienteil A, wurde eine weitere univariate Schätzung durchgeführt, bei welcher DSH mit den LÜW-Typen II oder III allen anderen gegenübergestellt wurden. Hier lag  $h^2$  bei 0,19 (SE = 0,01).

### **Multivariater Merkmalsansatz**

Die Schätzungen im multivariaten Ansatz bestätigten die zuvor univariat geschätzten geringen Heritabilitäten der LÜW-Typen I, II und III. Die geschätzten additiv-genetischen Korrelationen der verschiedenen LÜW-Typen untereinander waren deutlich positiv. Hierbei ergaben sich zwischen der milden pathologischen Form (LÜW-Typ I) und den stärker von der Norm abweichenden Formen (LÜW-Typen II und III) geschätzte positive additiv-genetische Korrelationen von 0,53 bis 0,63. Die positive additiv-genetische Korrelation zwischen den Typen II und III wurde mit einem Wert von 0,90 noch höher geschätzt.

*Tabelle 20* zeigt die Ergebnisse der Schätzläufe im Ein- und Mehrmerkmalsmodell mit den jeweiligen Schätzwerten für die Heritabilitäten und additiv-genetischen Korrelationen.

**Tabelle 20:** Heritabilitäten und additiv-genetische Korrelationen für LÜW aus Schätzläufen im Ein- und Mehrmerkmalsansatz auf Datenbasis des Studienteiles B (bei 27.437 DSH), wobei den verschiedenen LÜW-Typen jeweils alle anderen LÜW-Typen gegenübergestellt wurden. (b = bivariat,  $h^2$  = Heritabilität, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel,  $r_g$  = additiv-genetische Korrelationen, SE = Standardfehler, Std = Standardabweichung, t = trivariat, u = univariat)

Merkmal	Merkmalswerte	Auswertungsmodus	Studienteil B					
			Mittelwert	Std	$h^2$	SE_ $h^2$	$r_g$	SE_ $r_g$
nLÜW	0-3	u	0,369	0,765	0,274	0,014		
LÜW0	0-1	u	0,762	0,426	0,271	0,015		
LÜW 1	0-1	u	0,150	0,357	0,121	0,011		
		b / LÜW2			0,122	0,010	0,633	0,065
		b / LÜW3			0,120	0,010	0,529	0,064
		b / LÜW23			0,121	0,010	0,592	0,052
		t / LÜW2			0,122	0,010	0,618	0,058
		t / LÜW3					0,539	0,056
LÜW 2	0-1	u	0,044	0,204	0,075	0,009		
		b / LÜW1			0,075	0,008	0,633	0,065
		b / LÜW3			0,079	0,008	0,900	0,043
		t / LÜW1			0,080	0,008	0,618	0,058
		t / LÜW3					0,899	0,042
LÜW 3	0-1	u	0,044	0,205	0,111	0,010		
		b / LÜW1			0,109	0,010	0,529	0,064
		b / LÜW2			0,116	0,009	0,900	0,043
		t / LÜW1			0,115		0,618	0,058
		t / LÜW2					0,899	0,042
LÜW 23	0-1	u	0,088	0,283	0,192	0,013		
		b / LÜW1			0,192	0,013	0,592	0,052

## 9.2 Morphologische Untersuchungsparameter

### 9.2.1 Voranalysen

Nach Ausschluss der DSH mit unvollständigen Angaben zu Einzelkriterien verblieben noch 1.254 DSH, die die Kriterien für die weiterführenden genetisch-statistischen Analysen erfüllten. Von diesen in die differenzierten genetisch-statistischen Analysen einbezogenen Hunden sind 708 männlich (56,5 %) und 546 weiblich (43,5 %). Dies entsprach einem Geschlechterverhältnis von 1,3 : 1. Die DSH wurden im Zeitraum von 1994 bis 2015 geboren, wobei über 95% der Hunde aus den Geburtsjahren 2007 bis 2015 stammten. Der Zeitraum der Röntgenuntersuchungen (Röntgendatum) lag zwischen dem 26.02.2008 und dem 28.11.2016. Das mittlere Röntgenalter betrug

17,7 Monate (Standardabweichung 12,1 Monate; Spannbreite 5 bis 218 Monate). Rüden waren durchschnittlich 18,9 Monate (Standardabweichung 12,6 Monate; Spannbreite 6 – 97 Monate) alt, während Hündinnen mit einem geringgradig niedrigeren mittleren Alter von 16,1 Monaten (Standardabweichung 11,2 Monate; Spannbreite 5 bis 218 Monate) zur Röntgenuntersuchung vorgestellt wurden. 90 % der Hunde waren in einem Alter zwischen 12 und 38 Monaten. Auf der Basis der morphologischen Untersuchungsergebnisse der detaillierten morphologischen Röntgenstudie gingen die Daten dieser 1.254 DSH in die weiterführende genetisch-statistische Analyse. Die Ergebnisse der morphologischen Befundung dieser Hunde mit zugehörigem Geschlecht zeigt *Tabelle 21*.

**Tabelle 21:** Verteilung der erfassten spezifischen Röntgenbefunde im Bereich des lumbosakralen Überganges insgesamt und nach Geschlecht mit absoluten und relativen Häufigkeiten. (L = links, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel, R = rechts, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

Merkmale		Rüden (n = 708)	Hündinnen (n = 546)	Insgesamt (n = 1.254)	
ST	0	L	576 (81,4 %)	449 (82,2 %)	1.025 (81,7 %)
		R	576 (81,4 %)	446 (81,7 %)	1.022 (81,5 %)
	1	L	119 (16,8 %)	88 (16,1 %)	207 (16,5 %)
		R	115 (16,2 %)	85 (15,6 %)	200 (16,0 %)
	2	L	13 (1,8 %)	9 (1,7 %)	22 (1,8 %)
		R	17 (2,4 %)	15 (2,8 %)	32 (2,6 %)
TrDF	0	211 (29,8 %)	129 (23,6 %)	340 (27,1 %)	
	1	266 (37,6 %)	228 (41,8 %)	494 (39,4 %)	
	2	231 (32,6 %)	189 (34,6 %)	420 (33,5 %)	
TrWK	0	671 (94,8 %)	514 (94,1 %)	1.185 (94,5 %)	
	1	13 (1,8 %)	20 (3,7 %)	33 (2,6 %)	
	2	24 (3,4 %)	12 (2,2 %)	36 (2,9 %)	

Für die erfassten Röntgenbefunde im Bereich des lumbosakralen Überganges und die daraus abgeleiteten Merkmale für die unter 7.1.3 beschriebenen Merkmalsdefinitionen und -kodierungen ergaben sich nach statistischer Datenaufbereitung die in *Tabelle 22* aufgelisteten Mittelwerte, Standardabweichungen und Spannweiten.

**Tabelle 22:** Verteilung der aus den erfassten Röntgenbefunden abgeleiteten Merkmale mit Mittelwert, Standardabweichung und Spannweiten. (BINE = binär einfach, BINr = binär restriktiv, KAT = kategorisch, L = links, Min – Max = Minimum bis Maximum, Mw = Mittelwert, R = rechts, ST = Seitenteile, Std = Standardabweichung, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

	Rüden (n = 708)			Hündinnen (n = 546)			Insgesamt (n = 1.254)		
	Mw	Std	Min - Max	Mw	Std	Min - Max	Mw	Std	Min – Max
ST_L	0,205	0,447	0-2	0,194	0,436	0-2	0,200	0,442	0-2
ST_R	0,210	0,463	0-2	0,211	0,471	0-2	0,211	0,466	0-2
ST_BINE	0,215	0,411	0-1	0,200	0,400	0-1	0,208	0,406	0-1
ST_BINr	0,038	0,192	0-1	0,040	0,197	0-1	0,039	0,194	0-1
ST_KAT	0,253	0,515	0-2	0,240	0,513	0-2	0,247	0,514	0-2
ST_DBIN	0,086	0,281	0-1	0,068	0,252	0-1	0,078	0,269	0-1
ST_DKAT	0,090	0,301	0-2	0,075	0,290	0-2	0,084	0,297	0-2
TrDF	1,028	0,790	0-2	1,110	0,756	0-2	1,064	0,776	0-2
TrDF_BINE	0,702	0,458	0-1	0,764	0,425	0-1	0,729	0,445	0-1
TrDF_BINr	0,326	0,469	0-1	0,346	0,476	0-1	0,335	0,472	0-1
TrDF_KAT	1,028	0,790	0-2	1,110	0,756	0-2	1,064	0,776	0-2
TrWK	0,086	0,383	0-2	0,081	0,344	0-2	0,084	0,366	0-2
TrWK_BINE	0,052	0,223	0-1	0,059	0,235	0-1	0,055	0,228	0-1
TrWK_KAT	0,086	0,383	0-2	0,081	0,344	0-2	0,084	0,366	0-2

### 9.2.2 Genetische Parameterschätzungen

Für die Heritabilitätsschätzwerte ( $h^2$ ) mit ihren dazugehörigen Standardfehlern ( $SE_{h^2}$ ) der unter 7.1.3 definierten Merkmale ergaben sich die in *Tabelle 23* dargestellten Werte.

**Tabelle 23:** Heritabilitätsschätzwerte für die morphologischen Untersuchungsparameter des Studienteiles A mit zugehörigen Standardfehlern aus Ein- und Mehrmerkmalsanalysen. Angabe der Ergebnisse der multivariaten Analysen als Mittelwerte (Spannbreite in Klammern) der Schätzwerte aus bivariaten Schätzläufen. (BINe = binär einfach, BINr = binär restriktiv,  $h^2$  = Heritabilität, KAT = kategorisch, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel, SE = Standardfehler, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

Merkmal	Univariat		Multivariat	
	$h^2$	$SE_{h^2}$	$h^2$	$SE_{h^2}$
ST_BINe	0,119	0,058	0,122 (0,115 – 0,131)	0,058 (0,049 – 0,063)
ST_BINr	0,051	0,055		
ST_KAT	0,124	0,061	0,130 (0,123 – 0,141)	0,060 (0,057 – 0,065)
ST_DBIN	0,047	0,047		
ST_DKAT	0,047	0,055		
TrDF_BINe	0,268	0,068	0,269 (0,256 – 0,273)	0,063 (0,050 – 0,067)
TrDF_BINr	0,270	0,067	0,278 (0,256 – 0,346)	0,061 (0,049 – 0,071)
TrDF_KAT	0,359	0,072	0,325 (0,039 – 0,363)	0,067 (0,044 – 0,073)
TrWK_BINe	0,036	0,046	0,037 (0,028 – 0,049)	0,045 (0,028 – 0,053)
TrWK_KAT	0,053	0,049	0,054 (0,052 – 0,057)	0,047 (0,043 – 0,051)

Die Schätzungen genetischer Parameter ergaben Hinweise auf eine relevante und züchterisch nutzbare genetische Determination. Die Heritabilitätsschätzwerte zeigten sich auf der beobachteten Skala frequenzabhängig. Sie unterschieden sich zwischen den Merkmalen in der Höhe stark voneinander. Die Spannweite der univariat geschätzten Heritabilitäten reichte von 0,04 bis 0,36. Für das Merkmal der Trennung der *Processus spinosi* konnte eine mittlere Heritabilität von 0,27 - 0,36 geschätzt werden. Die multivariaten Schätzläufe lieferten konsistente Ergebnisse. Für das Erscheinungsbild der Seitenteile wurden Heritabilitäten von 0,05 bis 0,12 geschätzt. Multivariate Schätzungen bestätigten diesen Wert durch ähnliche Schätzwerte zwischen 0,12 und 0,13. Für das morphologische Merkmal der Wirbelkörpertrennung war sowohl unter binär einfacher als auch kategorischer Merkmalskodierung eine nachweisbare genetische Grundlage lediglich im Bereich von 0,04 bis 0,05 feststellbar. Es ergaben sich weiterhin keine Hinweise auf Vorteile durch Einbeziehung der Symmetrie der Befunde oder eine Fokussierung auf deutlich von der Norm abweichende Befunde.

Tabelle 24 zeigt die additiv-genetischen, residualen und phänotypischen Korrelationen zwischen den verschiedenen morphologischen Parametern, die in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie erfasst wurden. Grundsätzlich ergaben sich Hinweise auf positive additiv-genetische Korrelationen zwischen den Merkmalen der Dornfortsatztrennung, der Wirbelkörpertrennung und Veränderungen der Seitenteile. Am deutlichsten ließen sich diese unter Verwendung kategorischer Merkmalsdefinitionen darstellen ( $r_g = 0,38 - 0,68$ ). Auch hier waren die SE aufgrund des begrenzten Datenumfangs allerdings hoch ( $SE_{r_g} = 0,17 - 0,34$ ).

**Tabelle 24:** Additiv-genetische Korrelationen der morphologischen Untersuchungsparameter des Studienteiles A mit zugehörigen Standardfehlern, Residualkorrelationen sowie phänotypische Korrelationen aus Mehrmerkmalsanalysen. (BINE = binär einfach, BINr = binär restriktiv, KAT = kategorisch,  $r_e$  = Residualkorrelationen,  $r_g$  = additiv-genetische Korrelationen,  $r_p$  = phänotypische Korrelationen, SE = Standardfehler, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

Merkmal 1	Merkmal 2	$r_g \pm SE_{r_g}$	$r_e \pm SE_{r_e}$	$r_p$
ST_BINE	TrDF_BINE	0,394 ± 0,195	0,213 ± 0,055	0,244
	TrDF_BINr	0,297 ± 0,233	0,493 ± 0,045	0,451
	TrDF_KAT	0,382 ± 0,177	0,447 ± 0,046	0,418
	TrWK_BINE	0,622 ± 0,401	0,443 ± 0,037	0,450
	TrWK_KAT	0,677 ± 0,335	0,413 ± 0,037	0,431
ST_KAT	TrDF_BINE	0,447 ± 0,189	0,193 ± 0,055	0,239
	TrDF_BINr	0,331 ± 0,223	0,504 ± 0,043	0,465
	TrDF_KAT	0,422 ± 0,169	0,443 ± 0,046	0,424
	TrWK_BINE	0,696 ± 0,356	0,619 ± 0,031	0,616
	TrWK_KAT	0,674 ± 0,303	0,621 ± 0,031	0,620
TrDF_BINE	TrWK_BINE	0,892 ± 0,759	0,079 ± 0,043	0,144
	TrWK_KAT	0,578 ± 0,336	0,081 ± 0,049	0,137
TrDF_BINr	TrWK_BINE	0,538 ± 0,226	0,328 ± 0,039	0,326
	TrWK_KAT	0,409 ± 0,275	0,323 ± 0,043	0,317
TrDF_KAT	TrWK_BINE	0,683 ± 0,365	0,266 ± 0,040	0,283
	TrWK_KAT	0,496 ± 0,270	0,263 ± 0,051	0,273

#### Zuchtwertkorrelationen morphologischer Untersuchungsparameter

Es wurden Zuchtwerte für die morphologischen Untersuchungsparameter Dornfortsatztrennung, Abweichungen der Seitenteile und Wirbelkörpertrennung univariat entsprechend ihrer Merkmalsdefinitionen gemäß 7.1.3 geschätzt. Zur Einschätzung der genetischen Beziehungen untereinander dienten die

Zuchtwertkorrelationen, die als Rangkorrelationen nach Spearman und Korrelationskoeffizienten nach Pearson untersucht wurden. Die Ergebnisse der Korrelationsanalysen sind in *Tabelle 25* dargestellt. Die Zuchtwertkorrelationen gaben Hinweise auf eine gemeinsame genetische Grundlage der morphologischen Untersuchungsparameter und bestätigten somit die Ergebnisse der Varianzkomponentenschätzung im Mehrmerkmalsansatz.

**Tabelle 25:** Pearson Korrelationskoeffizienten und Spearman Rangkorrelationen zwischen Zuchtwerten der morphologischen Untersuchungsparameter des Studienteiles A. Aufgeführt sind die Ergebnisse für Rüden mit differenziert befundeten Nachkommen in der Zuchtwertschätzung. (BINE = binär einfach, BINr = binär restriktiv, KAT = kategorisch, TrDF = Dornfortsatztrennung, ST = Seitenteile, TrWK = Wirbelkörpertrennung); Pearson Korrelationskoeffizienten (oberhalb der Diagonalen) und Spearman Rangkorrelationen (unterhalb der Diagonalen); #nicht signifikant (P-Wert > 0,05)

		ST				TrDF			TrWK		
		BINE	BINr	KAT	DBIN	DKAT	BINE	BINr	KAT	BINE	KAT
ST	BINE		0,543	0,958	0,716	0,681	0,130	0,231	0,243	0,438	0,488
	BINr	0,543		0,752	0,619	0,673	0,089	0,167	0,165	0,718	0,729
	KAT	0,963	0,722		0,760	0,754	0,143	0,251	0,259	0,577	0,619
	DBIN	0,696	0,602	0,727		0,973	0,012 <sup>#</sup>	0,051 <sup>#</sup>	0,071 <sup>#</sup>	0,344	0,377
	DKAT	0,664	0,647	0,719	0,978		0,044 <sup>#</sup>	0,102	0,115	0,402	0,408
TrDF	BINE	0,099	0,022 <sup>#</sup>	0,102	0,015 <sup>#</sup>	0,053 <sup>#</sup>		0,617	0,878	0,199	0,154
	BINr	0,156	0,112	0,178	-0,003 <sup>#</sup>	0,064 <sup>#</sup>	0,589		0,911	0,328	0,297
	KAT	0,186	0,093	0,197	0,045 <sup>#</sup>	0,096	0,870	0,891		0,302	0,265
TrWK	BINE	0,394	0,687	0,522	0,303	0,368	0,140	0,297	0,244		0,957
	KAT	0,457	0,746	0,583	0,369	0,410	0,089	0,244	0,193	0,963	

Die Ergebnisse der weiterführenden genetisch-statistischen Analysen sowohl der detaillierten morphologischen Röntgenstudie als auch der Screening-Studie sind im *Anhang 6 bis 9* aufgelistet.

## 10 DISKUSSION

### 10.1 Ziel der Studie

Lumbosakrale Übergangswirbel stellen eine kongenitale Anomalie des lumbosakralen Überganges dar (MORGAN 1968, 1999b). Sie prädisponieren sowohl für neurologische als auch möglicherweise orthopädische Erkrankungen bei Hunden (LARSEN 1977; ZIEGLER 1989; LANG et al. 1992; MORGAN et al. 1993; MORGAN 1999b; DAMUR-DJURIC et al. 2006; FLÜCKIGER et al. 2006) und werden gehäuft bei Hunden der Rasse Deutscher Schäferhund diagnostiziert (LARSEN 1977; WINKLER 1985; ZIEGLER 1989; MORGAN 1999b; DAMUR-DJURIC et al. 2006; ONDREKA 2009; FIALOVÁ et al. 2014). Aufgrund der auf Basis von Vorstudien anzunehmenden genetischen Grundlage (JULIER-FRANZ 2006, ONDREKA et al. 2013) und möglichen Folgeerkrankungen sind LÜW in das medizinische und nicht zuletzt in das züchterische Interesse gerückt. Wie andere hereditäre Erkrankungen des Bewegungsapparates, z. B. die HD oder die ED, sind auch LÜW nicht nur für Besitzer und Züchter von Sport- oder Gebrauchshunden von Bedeutung. Vielmehr kann jeder individuell betroffene Hund, in Abhängigkeit vom LÜW-Typ, Folgeerkrankungen entwickeln, die das Wohlbefinden und die Lebensqualität des Hundes einschränken können.

Die vorliegende Arbeit beinhaltet einen Studienteil (B), in dem offizielle Auswertungsergebnisse der LÜW-Klassifikation von DSH des Vereines für Deutsche Schäferhunde (SV) e.V. untersucht werden. Hierfür werden ausschließlich ventrodorsale Röntgenbilder gemäß dem Klassifikationsverfahren nach FLÜCKIGER et al. (2009) auf das Vorliegen von LÜW beurteilt. Die erhobenen Daten werden zunächst deskriptiv analysiert, um unter anderem Häufigkeitsverteilungen der unterschiedlichen LÜW-Typen in der Population des SV feststellen zu können. In einem zweiten Studienteil (A) liegt der Fokus auf einer eingehenden Beschreibung der Morphologie des lumbosakralen Überganges und LÜW anhand standardisierter Röntgenbilder. Hierfür wird zusätzlich zur routinemäßig verwendeten Röntgenaufnahme im ventrodorsalen Strahlengang eine Aufnahme im laterolateralen Strahlengang evaluiert.

Die aus der Beurteilung der lumbosakralen Übergänge erhaltenen Daten beider Studienteile dienen als Basis für weiterführende genetisch-statistische Analysen. Hierfür werden die untersuchten DSH zunächst mithilfe ihrer vorliegenden Pedigreeinformationen auf Verwandtschaftsverhältnisse untersucht. Die genetisch-statistischen Untersuchungen dienen unter anderem zur Schätzung der Heritabilitäten

der verschiedenen LÜW-Typen sowie der additiv-genetischen Korrelationen der LÜW-Typen untereinander.

Auf Grundlage der Ergebnisse der genetisch-statistischen Aufarbeitung der Vererbung der unterschiedlichen LÜW-Typen sollen Empfehlungen für die Hundezucht gegeben werden, um in Zukunft die Prävalenz der verschiedenen LÜW-Typen senken zu können.

## 10.2 Röntgenaufnahmen als Grundlage für Screeningverfahren

In der Veröffentlichung von FLÜCKIGER et al. (2009) wird der Beschluss der Schweizer Dysplasiekommission erläutert, dass zusätzlich zur Bestimmung des HD-Status die Röntgenbilder des HD-Screenings aller Rassen auf das Vorhandensein eines LÜW untersucht werden sollten. Tierärzte, die Röntgenuntersuchungen zum HD-Screening durchführen, sind aufgefordert, Röntgenaufnahmen des Beckens einschließlich einer vollständigen Darstellung des lumbosakralen Überganges anzufertigen. Entsprechend dieses Vorschlages bewertet auch die Gesellschaft für Röntgendiagnostik genetisch beeinflusster Skeletterkrankungen bei Kleintieren e. V. (GRSK) in Deutschland HD-Aufnahmen auf das Vorliegen von LÜW (TELLHELM et al. 2015). Für die Beurteilung der lumbosakralen Übergänge wird bis dato routinemäßig die ventrodorsale Aufnahme des Beckens ausgewertet. Diese wird entsprechend den Anforderungen der FCI an die Röntgenaufnahmen zur Diagnose der Hüftgelenkdysplasie aufgenommen. Das Heranziehen dieser HD-Röntgenaufnahmen ergibt Vorteile für die Beurteilung des Vorhandenseins von LÜW im Rahmen eines Screeningverfahrens. Entsprechend der Zuchtordnung des SV ist die Durchführung des HD-Röntgens zur Zuchtzulassung vorgeschrieben. Auf Basis dieser Bestimmung wird für alle DSH mit dem Ziel des Zuchteinsatzes im SV eine Röntgenaufnahme des Beckens und damit des lumbosakralen Überganges aufgenommen. Hierdurch ist eine ausreichend hohe Röntgenquote gewährleistet. Die Röntgenquote gibt Auskunft über die Anzahl geröntgter Hunde innerhalb einer Population. Jährlich werden für das HD-Verfahren laut Angaben des SV über 7.000 Röntgenaufnahmen bewertet. Für Besitzer von Zuchthunden ergibt sich aufgrund des Vorliegens dieser obligat anzufertigenden HD-Röntgenaufnahme für eine Beurteilung des lumbosakralen Überganges nach FLÜCKIGER et al. (2009) weder finanzieller noch zeitlicher Mehraufwand.

Zusätzlich zum offiziellen HD-Verfahren ist ein Qualitätsröntgen vor dem Ableiten des 31. Deckaktes bei jedem Zuchtrüden des SV vorgeschrieben, bei dem neben der HD auch auf Übergangswirbel routinemäßig geachtet werden soll.

Röntgenaufnahmen des Beckens von DSH unter 12 Monaten, aufgenommen im Rahmen des sogenannten Vorröntgens, sind vom Zuchtverband nicht reglementiert. Sie werden zur offiziellen HD-Beurteilung jedoch nicht zugelassen. Da LÜW kongenitale Malformationen darstellen, ist eine Beurteilung ihres Vorhandenseins im Rahmen dieser Arbeit bei Röntgenaufnahmen des Vorröntgens möglich. Die Angabe, dass die Fusion der Kreuzbeinwirbel erst mit eineinhalb Jahren abgeschlossen ist (NICKEL et al. 1984; DYCE et al. 1991; VOLLMERHAUS et al. 1994), gilt es zu überprüfen. Im Hinblick auf die Planung eines breitanzulegenden Screeningverfahrens mit dem Ziel der Reduktion der Prävalenz von LÜW ist die Durchführung eines Vorröntgens kritisch zu beurteilen. Hunde, die zum Zeitpunkt des Vorröntgens eine schlechte Bewertung bezüglich ihres HD-, ED- oder LÜW-Status erhalten, werden nur selten zum offiziellen HD-Röntgen wieder vorgestellt. Dies führt in Kombination mit der fehlenden Verfügbarkeit der Befundergebnisse des Vorröntgens dazu, dass diese Hunde aus der Statistik fallen.

Angaben zur Nützlichkeit einer zusätzlichen laterolateralen Aufnahme des lumbosakralen Überganges sind rar und sollen durch diese Arbeit Ergänzung finden. Nur bei signifikanter Erkenntnissteigerung erscheint die Einforderung einer zusätzlichen laterolateralen Aufnahme angesichts der höheren Strahlenbelastung für den Hund und der entstehenden Mehrkosten für die Hundebesitzer gerechtfertigt.

### **10.3 Computertomographie im Rahmen eines Screeningverfahrens**

Die Computertomographie ist durch die mögliche überlagerungsfreie Darstellung der lumbosakralen knöchernen Strukturen dem Nativröntgen überlegen. Lumbosakrale Übergangswirbel können durch diese Schnittbilddiagnostik morphologisch exakt, im Gegensatz zur ausschließlichen Verwendung von Röntgenbildern in verschiedenen Ebenen, beurteilt werden (LAPPALAINEN et al. 2012). Wenn gewünscht, ist eine dreidimensionale Rekonstruktion möglich. Sowohl die Trennung der Dornfortsätze, eine Wirbelkörpertrennung als auch ausgebildete Kontaktzonen zum Becken können dargestellt werden, ohne durch Überlagerungen mit Rektuminhalt oder Weichteilstrukturen, wie dem Präputium, in ihrer Beschreibung erschwert zu werden. Insbesondere der Grad der Dornfortsatztrennung lässt sich zum Teil auf Nativröntgenaufnahmen schwer beurteilen (WIGGER et al. 2009). Während in der ventrodorsalen Aufnahme der Fusionsgrad der Dornfortsätze der ersten beiden Sakralwirbel je nach Position des lumbosakralen Überganges im Strahlengang unterschiedlich dargestellt wird, ist in der laterolateralen Aufnahme die Darstellung durch eine Überlagerung mit der Kruppenmuskulatur erschwert und von der

Röntgenbelichtung abhängig. Die Durchführung einer computertomographischen Untersuchung, die hier Abhilfe schaffen könnte, ist jedoch als Screeningverfahren ungeeignet. Sie ist spezialisierten tiermedizinischen Kliniken und Praxen als Diagnostikum vorbehalten. Die Erlaubnis ihrer Durchführung verlangt die Fachkunde im Strahlenschutz nach Röntgenverordnung (RöV) für Computertomographie-Untersuchungen durch Tierärzte, deren Bedingungen in Anlage 3 der „Richtlinie zur Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und zur Röntgenverordnung (RöV) vom 25. September 2014“ festgelegt sind. Neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen und der geringen Verbreitung der CT in Deutschland machen die vergleichsweise hohe Strahlenbelastung für die untersuchten Hunde, das Risiko einer Vollnarkose sowie die hohen entstehenden Kosten für den Patientenbesitzer die CT als Screeningverfahren unbrauchbar. Ihre unwiderlegbare Bedeutung als weiterführendes Diagnostikum für Patienten mit orthopädisch-neurologischen Symptomen ist dabei unbestritten.

#### **10.4 Datenerhebung**

Die standardisierte Röntgentechnik zur Aufnahme von Röntgenaufnahmen zum HD-Screening, entsprechend den Vorgaben der FCI, ermöglicht die Verwendung von Röntgenbildern unterschiedlicher Quellen in dieser Arbeit. Die bewerteten Röntgenbilder stammen durchweg von DSH, die im Zuchtbuch des SV eingetragen sind. Dieser Verein stellt laut Angaben des „Verbandes für das Deutsche Hundewesen“ (VDH) den größten Rassehundezuchtverein der Welt dar. Zur Beurteilung der Ergebnisse dieser Arbeit gilt zu bedenken, dass es sich bei Hunden des SV um eine Hundepopulation mit strengen Zuchtreglementierungen handelt. Eine unmittelbare Übertragbarkeit der Ergebnisse dieser Studie auf Hundepopulationen anderer Zuchtvereine und Rassen ist nicht gegeben.

Das Maß der Interobserver-Variabilität wird für die in dieser Arbeit angewandten Klassifikationsverfahren nicht untersucht. Die Beurteilungen der Röntgenaufnahmen der detaillierten morphologischen Röntgenstudie sowie der Screening-Studie werden durch zwei voneinander unabhängige Untersucher durchgeführt. Die Stringenz der im Studienteil A durchgeführten Klassifikationen der LÜW und die Bewertung der eingehenderen morphologischen Beschreibung des lumbosakralen Überganges werden durch die zertifizierten Gutachter für HD und ED der Gesellschaft für Röntgendiagnostik genetisch beeinflusster Skeletterkrankungen bei Kleintieren e.V., Dr. Nele Ondreka (Diplomate of the European College of Veterinary Diagnostic Imaging (ECVDI), Fachtierärztin für Radiologie und andere bildgebende Verfahren) und Dr. Bernd Tellhelm (Diplomate ECVDI, Fachtierarzt für Chirurgie) bei zufällig ausgewählten Röntgenbildern überprüft. Die Beurteilung und Klassifikation nicht

eindeutiger LÜW erfolgt in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie auf konsensualen Beschluss aller oben genannten an der Röntgenauswertung beteiligten Personen.

### **10.5 Praktikabilität unterschiedlicher Klassifikationsverfahren von LÜW**

Als Ursachen für die in der Literatur voneinander abweichenden Angaben zur Häufigkeit von LÜW sind Unterschiede im Versuchsdesign (nicht einheitliche Klassifikationsverfahren) und in der Stichprobenauswahl (Abweichungen untersuchter Hundepopulationen) der verschiedenen Studien denkbar. Zum Erhalt vergleichbarer Daten und zur Erarbeitung effektiver Empfehlungen für die Hundezucht ist eine Konvention der Röntgen- und Zuchtkommissionen zur Anwendung eines homogenen Klassifikationsverfahrens erforderlich. Die Schweizer Dysplasiekommission und die GRSK in Deutschland verwenden das nach FLÜCKIGER et al. (2009) vorgeschlagene Klassifikationsschema. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Sensitivität dieses Schemas untersucht werden. Das Verfahren nach FLÜCKIGER et al. (2009) soll als ein einfaches Klassifikationsverfahren für LÜW dienen. Dies stellt ein grundlegendes Kriterium für die Anwendbarkeit als einheitliches Screeningverfahren mit dem Ziel des Erhalts reproduzierbarer Klassifikationen von LÜW dar. Die bei LÜW häufig vorliegenden morphologischen Abweichungen der Querfortsätze, der Wirbelbögen (STIEVE 1921; MORGAN 1968; COUTEUR und CHILD 1989; DAMUR-DJURIC et al. 2006) und der Dornfortsätze werden durch dieses Klassifikationsverfahren erfasst.

### **10.6 Deskriptive Ergebnisse des Studienteiles A**

Das Durchschnittsalter der DSH in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie liegt bei 17,5 Monaten. Ein großer Anteil der bewerteten DSH (22,7 %) erscheint zum frühestmöglichen Zeitpunkt zur Durchführung des offiziellen HD-Röntgens entsprechend den Anforderungen der FCI und der Zuchtordnung des SV mit einem Alter von 12 Monaten. Beim Vorliegen von mehreren Röntgenaufnahmen eines Hundes, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten angefertigt wurden, wird stets die Aufnahme des offiziellen HD-Röntgens verwendet. Hunde, die zum Qualitätsröntgen vor dem 31. Deckakt erscheinen, erhöhen das Durchschnittsalter. Die 34 DSH (2,6 %), die zum Vorröntgen vorgestellt wurden, machen nur einen sehr geringen Anteil der insgesamt bewerteten DSH aus. Aufgrund dieser geringen Anzahl und der fehlenden späteren Röntgenkontrolle dieser Hunde lässt sich nicht überprüfen, ob das Sakrum beim DSH erst mit einem Alter von eineinhalb Jahren vollständig fusioniert ist (NICKEL et al. 1984; DYCE et al. 1991; VOLLMERHAUS et al. 1994). In der hier vorliegenden Studie kann jedoch nur bei einem DSH in einem Alter unter 12 Monaten zum Zeitpunkt

der Röntgenaufnahme eine unvollständige Wirbelkörpertrennung festgestellt werden. Bei einem zweiten besteht eine vollständige Trennung aufgrund der Ausbildung eines LÜW-Typ III. Zur Bestätigung einer altersabhängigen Kreuzbeinfusion müssen weitere DSH durch Untersuchungen ihrer lumbosakralen Übergänge entweder mittels Nativröntgen oder Schnittbilddiagnostik untersucht werden. Eine Sektion steht einer notwendigen Verlaufskontrolle beim ausgewachsenen Hund in einem Alter von mindestens eineinhalb Jahren entgegen und scheidet daher als Alternative aus.

Analog zum vorliegenden Studienteil A ziehen LAPPALAINEN et al. (2012) und MORGAN et al. (1999b) zusätzlich zur ventrodorsalen eine laterolaterale Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges zur LÜW-Klassifikation der DSH hinzu. Das Merkmal der Dornfortsatztrennung wird in beiden Studien jedoch nur anhand der ventrodorsalen Aufnahme beurteilt. Basierend auf den Ergebnissen der deskriptiven Statistik der hier vorliegenden Untersuchung ist die pauschale Aussage, dass die Dornfortsätze an ihrer Basis beim Hund fusioniert sind (NICKEL et al. 1984), für den DSH nicht ohne Weiteres zu übernehmen. Zunächst muss definiert werden, welcher Anteil der Gesamtlänge der Dornfortsätze als Basis bezeichnet werden kann. Zwar wird in dieser Studie der Terminus „Basis“ als Merkmal nicht verwendet, jedoch zeigt die Festlegung der unterschiedlichen Trennungsgrade deutlich eine existierende Variabilität der möglichen Ausprägungsformen. Entsprechend der verwendeten Merkmalsdefinition „Dornfortsatztrennung“ unterbleibt eine Fusion bei einem Drittel der untersuchten DSH völlig. Im Gegensatz dazu liegt eine vollständige Fusion bei knapp einem Viertel der DSH vor. Die häufigste Ausprägung ist die unvollständige Trennung, bei der mindestens ein Drittel der Gesamtdistanz zwischen der gedachten Verbindungslinie durch die Dornfortsatzspitzen zum Wirbelbogendach nicht fusioniert ist. Diese Form kann bei 39,2 % der untersuchten Hunde detektiert werden. Die strenge Definition, dass schon das Merkmal der unvollständigen Fusion zu einer Klassifikation als LÜW-Typ I führt, erklärt den in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie vorliegenden hohen Anteil an LÜW vom Typ I. Zwei Drittel der untersuchten Hunde erfüllen insgesamt dessen Kriterien. Dies führt zu deutlich höheren Prävalenzen als in der Literatur beschrieben wurde, sowohl für den LÜW-Typ I (JULIER-FRANZ 2006; LAPPALAINEN et al. 2012; FIALOVÁ et al. 2014) als auch für die Gesamtprävalenz von LÜW beim DSH (LARSEN 1977; WINKLER 1985; ZIEGLER 1989; DAMUR-DJURIC et al. 2006; JULIER-FRANZ 2006; LEDECKÝ et al. 2007; ONDREKA 2009; LAPPALAINEN et al. 2012; FIALOVÁ et al. 2014). 841 der DSH (90,8 %) mit LÜW zeigen einen LÜW-Typ I. Im Vergleich der Studienteile erfolgt die Einordnung lumbosakraler Übergänge als LÜW-Typ I weitaus häufiger in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie (66,0 %) als in der Screening-Studie

(15,0 %). Die Frage, ob die Einteilung des Studienteiles A unter Zuhilfenahme einer zusätzlichen laterolateralen Aufnahme eine exaktere Beschreibung der wahren anatomischen Gegebenheiten des lumbosakralen Überganges zulässt als die nach FLÜCKIGER et al. (2009), kann aufgrund des Fehlens einer validen Referenzmethode, wie der Computertomographie oder einer postmortalen makroskopisch-anatomischen Untersuchung, nicht abschließend beantwortet werden. Jedoch erscheint die ergänzende Verwendung einer zusätzlichen laterolateralen Aufnahme zur exakteren morphologischen Beschreibung sinnvoll. Beim Vorliegen mehrerer ventrodorsaler Röntgenaufnahmen desselben Hundes erweist sich die Darstellung der Dornfortsätze des Kreuzbeines als hochgradig abhängig von der Lage des Kreuzbeines im ventrodorsalen Strahlengang. Durch die Beurteilung der zusätzlichen laterolateralen Aufnahme wird die Anzahl der durch Verwendung des Klassifikationsverfahrens nach FLÜCKIGER et al. (2009) negativ beurteilten DSH bezüglich des Vorliegens eines LÜW-Typ I relativiert (*Abb. 38 (A, B)*).



**Abbildung 38 (A, B):** Röntgenaufnahmen des lumbosakralen Überganges eines DSH in zwei orthogonalen Röntgenebenen, bei dem eine ausschließliche Beurteilung der ventrodorsalen Aufnahme zu einer falsch-negativen LÜW-Klassifikation geführt hätte. Während in der Abbildung 38 A die Dornfortsätze des Sakrums vollständig zu einer Leiste fusioniert erscheinen, lässt sich in Abbildung 38 B eine Einziehung zwischen dem ersten und zweiten Dornfortsatz von über einem Drittel der Gesamtdistanz von den Dornfortsatzspitzen zum Wirbelbogendach erkennen. (DSH = Deutscher Schäferhund, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel) – Fortsetzung auf der nächsten Seite



Generell muss die weiterführende genetisch-statistische Analyse Hinweise zur Beantwortung der Frage liefern, ob es sich bei dem LÜW-Typ I eher um eine Normvariante des lumbosakralen Überganges handelt oder eine größere genetische Ähnlichkeit zu den schwerwiegenderen LÜW-Typen existiert. LAPPALAINEN et al. (2012) vermuten, dass der LÜW-Typ I genetisch eine milde Form von LÜW darstellen könnte. Auffällig war die relativ seltenere Ausprägung der deutlicher von der Norm abweichenden LÜW-Typen in diesem Studienteil im Vergleich zu anderen Vorstudien beim DSH (JULIER-FRANZ 2006; WIGGER et al. 2009; FIALOVÁ et al. 2014). Im Studienteil A liegt diese für den LÜW-Typ II bei 4,2 % aller Hunde mit vorhandenem LÜW. Asymmetrische Formen von LÜW (Typ III) sind bei 5,0 % dieser Hunde ausgebildet. Dass die symmetrischen und asymmetrischen Formen in etwa gleich häufig ausgeprägt sind, deckt sich mit den Ergebnissen der Voruntersuchungen von MORGAN (1999b), JULIER-FRANZ (2006), DAMUR-DJURIC et al. (2006) und WIGGER et al. (2009). BREIT et al. (2003), LEDECKÝ et al. (2007) und LAPPALAINEN et al. (2012) finden in ihren Studien häufiger asymmetrische als symmetrische LÜW. FIAVOLÁ et al. (2014) klassifizieren sowohl innerhalb der Rasse des DSH als auch bei einer nicht weiter nach Rassen differenzierten Hundepopulation häufiger symmetrische LÜW.

Beurteilt man den zeitlichen Verlauf der Häufigkeiten, und damit den phänotypischen Trend, der verschiedenen LÜW-Typen für die DSH der Hundepopulation der detaillierten morphologischen Röntgenstudie (Geburtsjahre 2006 - 2015), so sind Schwankungen der Verläufe der LÜW-Typen 0, I und III von bis zu 10,0 % im Jahresvergleich festzustellen. Die darüber hinausgehende Abweichung der Häufigkeiten der LÜW-Typen 0 und I des Jahres 2006 im Vergleich zu den sonstigen Jahren ergibt sich vermutlich aus der geringen Anzahl untersuchter Hunde dieses Jahres. Um stabilere Werte und damit verlässlichere Aussagen über die Verläufe der Häufigkeitsverteilung innerhalb einer Population zu erhalten, ist eine größere Studienpopulation von Nöten.

Entsprechend der Ergebnisse der deskriptiven Statistik sind 49 der untersuchten Seitenteile (3,8 %), bei beidseitig auswertbaren Röntgenbildern, als mittel- bis hochgradig normabweichend eingestuft worden. Nur 5 der 39 DSH (12,8 %) mit LÜW-Typ II können anhand dieses Kriteriums in ihren LÜW-Typ klassifiziert werden. Die Klassifikation der übrigen DSH mit LÜW-Typ II ist somit durch eine Merkmalskombination eines geringgradig symmetrisch veränderten Seitenteiles und einer mindestens angedeuteten Wirbelkörpertrennung erfolgt. 44 der 46 DSH (95,7 %), eingeteilt als LÜW-Typ III, können durch das Kriterium der mittel- bis hochgradigen Normabweichung der Seitenteile klassifiziert werden. Eine angedeutete Wirbelkörpertrennung konnte bei 35 (2,7 %), eine vollständige bei 37 (2,9 %) der 1.294 DSH detektiert werden, deren Röntgenbilder hinsichtlich dieses Merkmals auswertbar waren. Dies entspricht 84,7 % der als LÜW-Typ II oder III klassifizierten DSH. Eine Beurteilung der Wirbelkörpertrennung zwischen einem ausgebildeten LÜW und dem Kreuzbein respektive zwischen den ersten beiden Sakralwirbeln durch Auswertung einer ventrodorsalen Röntgenaufnahme kann durch Überlagerungen mit Rektuminhalt erschwert bis unmöglich gemacht werden. Die Ergebnisse von Studien anderer Arbeitsgruppen konnten den Nutzen einer zusätzlichen laterolateralen Röntgenaufnahme des lumbosakralen Überganges zeigen (MORGAN 1999b; LAPPALAINEN et al. 2012; FIALOVÁ et al. 2014). Durch Beurteilung der Röntgenaufnahmen beider Strahlengänge ist die Beurteilung der Wirbelkörpertrennung bei 99,4 % der ausgewerteten DSH möglich. Nur 0,6 % der DSH können aufgrund von Kotüberlagerungen in der ventrodorsalen und ungenügenden Belichtungsverhältnissen in der laterolateralen Aufnahme nicht beurteilt werden.

Bei der Auswertung der Morphologie der Wirbelkörpertrennung in Kombination mit der Dornfortsatztrennung lässt sich zeigen, dass bei zunehmendem Grad der Wirbelkörpertrennung die Häufigkeit und der Grad der Dornfortsatztrennung

zunehmen. Bei DSH mit vollständiger Fusion der Dornfortsätze sind die Wirbelkörper des LÜW mit dem Sakrum bzw. der ersten beiden Sakralwirbel bei allen bewerteten DSH stets vollständig fusioniert. Bei einer unvollständigen Trennung der Wirbelkörper ist in keinem Fall eine vollständige Fusion der Dornfortsätze, in 9,1 % der Fälle eine unvollständige Dornfortsatztrennung und bei 90,9 % der DSH eine vollständige Dornfortsatztrennung zu finden. Liegt eine vollständige Wirbelkörpertrennung vor, so sind bei 37 DSH ausschließlich vollständige Trennungen der Dornfortsätze festzustellen. Die hohe Anzahl an vollständig getrennten Dornfortsätzen bei vollständiger Wirbelkörpertrennung basiert auf dem Vorliegen eines isolierten LÜW vom Sakrum bei DSH mit den LÜW-Typen II und III. Durch die Beurteilung beider Merkmale in Kombination ergibt sich die Frage, inwieweit das Maß der Dornfortsatztrennung von der Ausprägungsform der Wirbelkörpertrennung beeinflusst wird. Durch den Sachverhalt, dass die Ossifikation der Wirbel ihren Ausgang u. a. in den Ossifikationskernen der Wirbelkörper nimmt und von hier aus in die Peripherie des Wirbels voranschreitet, wäre ein Zusammenhang erklärbar.

### **10.7 Deskriptive Ergebnisse des Studienteiles B**

Äquivalent zu der detaillierten morphologischen Röntgenstudie werden auch die Mehrzahl der DSH in der Screening-Studie im Mindestalter von 12 Monaten zum offiziellen Screening auf Hüftgelenkdysplasie entsprechend den Vorgaben der FCI und des SV vorstellig. Das Durchschnittsalter der DSH liegt bei 16,0 Monaten. Die Ergebnisse der LÜW-Klassifikation im Studienteil B decken sich weitestgehend mit den Untersuchungsergebnissen von FIAVOLÁ et al. (2014) für die Rasse des DSH. Diese Arbeitsgruppe wertet in ihrer Studie eine weitaus geringere Anzahl DSH (n = 205) analog zu der hier durchgeführten Screening-Studie unter Anwendung des Klassifikationsschema nach FLÜCKIGER et al. (2009) aus. Entsprechend beider Studienresultate kann bei circa drei Viertel der untersuchten DSH ein anatomisch normal ausgebildeter lumbosakraler Übergang festgestellt werden. Der LÜW-Typ I, mit dem Merkmal einer Dornfortsatztrennung zwischen den ersten beiden Sakralwirbeln als einzige Abweichung von der Norm, wird in der hier durchgeführten Studie bei 15,0 % der DSH beobachtet. Die Klassifikation als LÜW-Typ I erfolgt hier nur bei deutlichem Abstand der Dornfortsätze der ersten beiden Sakralwirbel. Die große Differenz zum Ergebnis der detaillierten morphologischen Röntgenstudie ergibt sich aus dem strengeren Klassifikationsschema im Studienteil A. Unvollständig fusionierte Dornfortsätze werden dort bereits als LÜW-Typ I klassifiziert. Inwieweit eine unvollständige Fusion, feststellbar in der laterolateralen Röntgenaufnahme, im ventrodorsalen Strahlengang als Unterbrechung der Verbindungslinie der drei

Dornfortsätze des Kreuzbeines zu erkennen ist, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgewertet. Für die deutlicher von der normalen Anatomie des lumbosakralen Überganges abweichenden LÜW-Typen II und III sind die Häufigkeiten innerhalb beider Studienteile nahezu gleich. Während im Studienteil B der LÜW-Typ II bei 4,3 % der DSH festzustellen ist, liegt dieser im Studienteil A bei 4,2 % der DSH vor. Beim LÜW-Typ III sind die Häufigkeiten ähnlich, mit 4,4 % im Studienteil B und 5,0 % im Studienteil A. Der phänotypische Trend in den Jahren 2006 bis 2015 ergab nahezu konstante Werte für die LÜW-Typen II und III. Demgegenüber ist die Häufigkeit des LÜW-Typ I über die Jahre signifikant angestiegen. Insgesamt lässt sich bei der Entwicklung der Häufigkeiten der LÜW-Typen I bis III seit dem Nachweis der Heritabilität durch JULIER-FRANZ (2006) und der Empfehlung einer einheitlichen Klassifikation gemäß FLÜCKIGER et al. (2009) keine Reduktion feststellen, die auf einen korrelierten Selektionserfolg im Rahmen des bestehenden Zuchtprogramms hindeutet. Dieser Sachverhalt zeigt die Notwendigkeit der Erarbeitung von Zuchttempfehlungen und der Etablierung eines gezielten Zuchtmanagements zur Verringerung des Auftretens von LÜW.

### **10.8 Erkenntnisse aus der väterlichen Nachkommenstatistik**

Für die Geburtsjahrgänge der Hunde, die für die hier durchgeführten Untersuchungen relevant waren, wurden Entscheidungen über den Zuchteinsatz von Hündinnen und Rüden im SV unabhängig vom LÜW-Status getroffen. Somit kann in Bezug auf das Merkmal LÜW von einer zufälligen Anpaarung und damit bei der Erstellung einer Nachkommenstatistik von der Unabhängigkeit des mütterlichen und väterlichen LÜW-Status sowie der zugrunde liegenden Genetik ausgegangen werden. Dass sich unter diesen Voraussetzungen in der LÜW-Verteilung sehr große Unterschiede zwischen väterlichen Halbgeschwistergruppen zeigen, lässt sich als deutlicher Hinweis auf relevante genetische Unterschiede deuten. Bezüglich der mütterlichen Genetik wird für LÜW im Weiteren eine zufällige Verteilung angenommen.

Die Untersuchung der DSH-Populationen beider Studienteile auf Vatertiere mit größeren Nachkommenzahlen kann 22 Rüden (Vatertiere A – V) identifizieren, die mehr als 5 Nachkommen in den Studienteil A und mehr als 50 Nachkommen in den Studienteil B einbringen. Festzustellen ist, dass von einer Ausnahme bei Vatertier M abgesehen, alle LÜW-Typen in allen Nachkommengruppen vorkommen. Bemerkenswert groß sind jedoch die Schwankungsbreiten der Häufigkeiten der verschiedenen LÜW-Typen im Vergleich zwischen den Nachkommengruppen. So variieren die Anteile betroffener Nachkommen im Vergleich für den LÜW-Typ 0

zwischen 48,2 und 92,9 %, für den LÜW-Typ I zwischen 5,4 und 30,3 %, für den LÜW-Typ II zwischen 0,0 und 17,9 % sowie für den LÜW-Typ III zwischen 0,8 und 14,8 %. Die Nachkommenstatistiken lassen sich damit als Bestätigung der beschriebenen phänotypischen und genetischen Variabilität interpretieren. Die Tatsache, dass mit nur einer Ausnahme sämtliche Vatertiere alle LÜW-Typen innerhalb ihrer Nachkommen aufweisen, könnte zudem auf eine genetische Korrelation aller LÜW-Typen hindeuten. Dies gilt es durch die angeschlossene weiterführende genetisch-statistische Untersuchung noch gezielt zu analysieren.

Dass DSH mit der milden Form von LÜW Nachkommen mit der stark von der Norm abweichenden Typen II und III hervorbringen können, zeigt der Sachverhalt, dass Nachkommen der Rüden mit LÜW-Typ I (Vatertiere E, O, T, V) in 1,5 bis 16,7 % der Fälle einen LÜW-Typ II und in 2,9 bis 14,8 % der Fälle einen LÜW-Typ III aufweisen.

### **10.9 Ergebnisse der genetisch-statistischen Analysen**

Beide Studienteile bestätigen eine genetische Grundlage der LÜW und auch die Ergebnisse der Heritabilitätsschätzungen der Studie von JULIER-FRANZ (2006). Insgesamt wird für das Merkmal nLÜW eine moderate Heritabilität zwischen 0,25 und 0,27 geschätzt, was einen zügigen Zuchtfortschritt erwarten lassen kann und die Zweckmäßigkeit von Zuchtmaßnahmen zur Senkung der LÜW-Häufigkeit unterstreicht. Die Schätzungen der Heritabilitäten der einzelnen LÜW-Typen werden durch die teils geringen Merkmalshäufigkeiten erschwert, so dass die Ergebnisse bei Bezugnahme auf die beobachtete Skala mit Vorsicht zu interpretieren sind. Eine erfolgreiche züchterische Bearbeitung der einzelnen LÜW-Typen über Selektions- und Anpaarungsentscheidungen sollte im Rahmen von Zuchtmaßnahmen unter Bezugnahme auf das Merkmal nLÜW erfolgen, um die vorhandenen Phänotypinformationen maximal zu nutzen. Dieses Vorgehen impliziert allerdings die weitgehend überlappende genetische Grundlage der LÜW-Typen.

Die genetisch-statistische Untersuchung auf Grundlage der Daten der detaillierten morphologischen Röntgenstudie deutet auf bestehende positive additiv-genetische Korrelationen zwischen den LÜW-Typen I, II und III hin. Aufgrund der für genetisch-statistische Analysen geringen Größe der Studienpopulation im Studienteil A und den sich daraus ergebenden hohen Standardfehlern der Schätzwerte bedürfen diese jedoch einer Überprüfung. Diese ermöglicht der Studienteil B, für den ein deutlich größerer Datenumfang für genetische Parameterschätzungen zur Verfügung steht. Die Ergebnisse der Schätzläufe lassen eine positive additiv-genetische Korrelation von 50 -

60 % vom LÜW-Typ I zu den Typen II und III erkennen. Diese Werte geben deutliche Hinweise darauf, dass die LÜW-Typen genetisch eng miteinander in Beziehung stehen, d.h. teilweise dieselben genetischen Faktoren das Auftreten der verschiedenen LÜW-Typen mitbestimmen. Die anatomisch stark von der Norm abweichenden Typen II und III stellen sich mit einem Schätzwert von über 80 % als genetisch sehr eng korreliert dar. So lässt sich hier der Schluss ziehen, dass auch DSH mit der milden pathologischen Form des LÜW-Typ I ein erhöhtes Risiko besitzen LÜW der stark von der Norm abweichenden Typen an ihre Nachkommen weiterzugeben. Dies impliziert, dass zur Prävalenzreduktion der klinisch relevanten LÜW-Typen II und III ein Selektionsverfahren unter Einbeziehung des LÜW-Typ I notwendig ist. Zuchtstrategien, die nur die LÜW-Typen II und III einschließen, sind somit von zweifelhafter Effizienz.

Die Schätzungen der genetischen Parameter für die untersuchten morphologischen Merkmale sind aufgrund der zugrunde liegenden geringen Merkmalshäufigkeiten und den sich dadurch ergebenden hohen Standardfehlern nur in der Lage Tendenzen aufzuzeigen. Unter dem Vorbehalt, dass die Schätzwerte an einem größeren Datenmaterial überprüft werden müssen, ergeben sich für die untersuchten Kriterien der detaillierten morphologischen Röntgenstudie Hinweise auf eine relevante und züchterisch nutzbare Determination. Die Höhe der Heritabilitätsschätzwerte unterscheidet sich zwischen den Merkmalen stark voneinander. Die Heritabilität der Merkmale ist auf der beobachteten Skala abhängig von der Frequenz der jeweiligen Merkmalsbeobachtungen. Die Morphologie der Dornfortsatztrennung ( $h^2 = 0,27 - 0,36$ ) zeigt in den univariaten Schätzläufen die höchste Heritabilität, gefolgt von der Morphologie der Seitenteile (bis zu 0,12). Das Erscheinungsbild der Wirbelkörpertrennung zeigt die geringste Heritabilität mit 0,04 bis 0,05. Die Einbeziehung der Symmetrie der Befunde oder eine Fokussierung auf die Schwere der Abweichung von der Norm scheint allerdings für eine züchterische Nutzung nicht sinnvoll oder erforderlich zu sein. Die Schätzungen der additiv-genetischen Korrelationen zwischen den untersuchten Morphologiekriterien zeigen grundsätzlich positive Zusammenhänge. Die Schätzungen der additiv-genetischen Korrelationen aus den Mehrmerkmalsanalysen sind nicht in der Lage stabile Werte zu ermitteln, jedoch können diese durch Korrelationsberechnungen (nach Spearman und Pearson) auf der Basis von Zuchtwerten im Einzelmerkmalsansatz ergänzt werden. So dass sich in Kombination Hinweise auf eine genetische Nähe der spezifischen Veränderungen des lumbosakralen Überganges ergeben.

Eine obligate Beurteilung einer zusätzlichen laterolateralen Röntgenaufnahme in einem Screeningverfahren ist zur Reduktion der Häufigkeit des LÜW-Typ I, und auch der

LÜW-Typen II und III, nach den Ergebnissen der hier vorliegenden Arbeit nicht unbedingt notwendig. Aufgrund der fehlenden räumlichen Beurteilung des lumbosakralen Überganges ohne laterolaterale Aufnahme ist zwar von einer höheren Anzahl falsch-negativ beurteilter Hunde (LÜW-Typ 0) auszugehen, jedoch ermöglichen die im Massenscreening akquirierbaren großen Datenmengen durch Mustererkennung basierend auf der Abstammungsanalyse eine gewisse Kompensation. Diese Aussage wird durch die ähnlichen Heritabilitätsschätzwerte unterstützt, die aus den Analysen der Daten basierend auf der detaillierten morphologischen Röntgenstudie und der Screening-Studie für das Merkmal nLÜW ermittelt werden konnten. Es ist zu überlegen, ob bei einem Screening auch Fälle in LÜW-Typ I eingestuft werden sollten, bei denen der Abstand der Dornfortsätze zwischen den ersten beiden Sakralwirbeln gering ist. Künftige Erhebungen könnten diesen Gesichtspunkt durch eine differenzierte Dokumentation und den Vergleich der Klassifikationsvarianten näher beleuchten.

### **10.10 Einschränkungen der genetisch-statistischen Untersuchungen**

Auf den Daten der deskriptiven Statistik aufbauend ist die Durchführung genetischer Untersuchungen (Schätzungen von Heritabilitäten und additiv-genetischen Korrelationen) möglich. Aufgrund des retrospektiven Charakters dieser Studie steht für die genetischen Untersuchungen des Studienteiles A lediglich eine begrenzte Datenanzahl geröntgter Hunde zur Verfügung. Zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Studie ist die Aufnahme der laterolateralen Aufnahme des lumbosakralen Überganges vom Zuchtverein nicht vorgeschrieben. Deshalb muss auf Hunde zurückgegriffen werden, deren Besitzer auf eigenen Wunsch die zusätzliche Aufnahme anfertigen lassen. Die geringe Hundeanzahl erklärt die im Rahmen der genetisch-statistischen Analysen festgestellten hohen Standardfehler im Studienteil A. Die Ergebnisse dieses Studienteiles lassen somit zwar genetische Tendenzen erahnen, können jedoch nicht ohne Vorbehalt interpretiert werden. Die Untersuchungen des Studienteiles B dienen demgemäß dem Zweck, die Ergebnisse des Studienteiles A zu überprüfen und zu ergänzen.

Bei der gesonderten wie der vergleichenden Interpretation der Studienergebnisse muss stets beachtet werden, dass die Daten von einer vorselektierten Hundepopulation stammen. Alle ausgewerteten Hunde sind DSH des SV und werden zu einem großen Teil zum HD-Röntgen an der Klinik für Kleintiere der Justus-Liebig-Universität Gießen vorgestellt. Geografische Unterschiede in der Häufigkeit bestimmter LÜW-Typen sind nicht bekannt, könnten sich grundsätzlich aber auf die in diese Studie eingehenden

LÜW-Daten ausgewirkt haben. Die Schätzungen von Heritabilitäten und genetischen Korrelationen sind spezifisch für die Population der untersuchten Tiere und abhängig von der durchgeführten Untersuchungsmethode (VISSCHER et al. 2008). Hierdurch ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere DSH-Populationen und Hunderassen nicht unmittelbar möglich.

### **10.11 Genetische Untersuchungen zur Hüftgelenkdysplasie**

Ähnliche genetische Untersuchungen zu der hier vorliegenden Studie werden zur Erarbeitung von Zuchttempfehlungen für weitere hereditäre kanine Erkrankungen durch andere Arbeitsgruppen durchgeführt. Insbesondere die Erkrankung der Hüftgelenkdysplasie ist von großem züchterischem Interesse und wird dementsprechend eingehend genetisch untersucht. Beobachtungen und Erfahrungen aus der Zucht gegen die HD können als Hilfestellungen zur Entwicklung von Zuchtmaßnahmen gegen LÜW dienen. Es ist hierbei zu beachten, dass es sich um Erkrankungen handelt, bei denen von einer komplexen Genese mit multifaktorieller und polygener Grundlage auszugehen ist.

Die Heritabilität der HD beim DSH stellt sich in verschiedenen Studien als mindestens moderat dar (LEIGHTON et al. 1977; HEDHAMMAR et al. 1979; SWENSON et al. 1997; LEPPÄNEN et al. 2000; MÄKI et al. 2002; HAMANN et al. 2003; STOCK et al. 2011). Durch phänotypische Zuchtselektion kann bei Merkmalen umso eher ein sichtbarer Zuchtfortschritt im Sinne einer Reduktion der Merkmalsprävalenz erwartet werden, je höher die Heritabilität und die Selektionsintensität sind (FALCONER 1984). Für die HD sind hier bereits verschiedene Szenarien erläutert worden (STOCK UND DISTL 2010, WILSON et al. 2011, WORTH et al. 2011).

Zuchtmaßnahmen zur Reduktion der Prävalenz der HD werden vom SV in seiner Zuchtordnung festgelegt. Hier wird unter anderem auch das phänotypische Screeningverfahren durch eine Röntgenuntersuchung aller Hunde, die zur Zucht zugelassen werden sollen, geregelt. Der SV hat diese Untersuchung zur Bekämpfung der HD bereits 1966 initiiert. Auch in anderen Ländern werden durch Zuchtverbände von DSH und verschiedenen anderen Hunderassen Strategien zur Reduktion der HD-Häufigkeit durchgeführt. Das phänotypische Screening anhand von Röntgenbildern ist gängige Praxis. Das durchgeführte Massenscreening ist sowohl aufwendig als auch kostenintensiv für die Züchter bzw. Hundebesitzer. Hochrechnungen einer schwedischen Studie zeigen jedoch, dass der Verzicht auf ein phänotypisches Screening sich langfristig finanziell negativer auswirken würde, als die Kosten für das HD-Screening (SWENSON et al. 1997). Hieraus ergibt sich ein gutes Kosten-Nutzen-

Verhältnis für das Massenscreening. Verschiedene Studien belegen eine Reduktion der HD-Prävalenz, die aus diesem Screeningverfahren resultiert (HEDHAMMAR et al. 1979; LEIGHTON 1997; SWENSON et al. 1997; OHLERTH et al. 2001). Bei den untersuchten Hundepopulationen handelt es sich jedoch stets um geschlossene Zuchtpopulationen. Zu beachten gilt, dass der phänotypische Trend nur die Häufigkeitsentwicklung, nicht aber Gründe für Veränderungen offenlegen kann. Diese können genetischer oder aber umweltassoziierter Natur sein. Eine Untersuchung an finnischen Hundepopulationen zeigt, dass der genetische Trend trotz eines phänotypischen Zuchtfortschritts ungünstig sein kann. Die alleinige Durchführung des HD-Röntgens als Screeningverfahren stellt demnach keinen ausreichenden Selektionsdruck dar. Vielmehr ist ein systematisches Selektionsprogramm zur Reduktion und zum Erhalt eines Zuchtfortschritts notwendig (MÄKI et al. 2002). Daten der „British Veterinary Association“ (BVA) zeigen, dass Züchter und Hundebesitzer ihre Hunde durch ein Screeningverfahren auf freiwilliger Basis nur zu einem geringen Prozentsatz bewerten lassen. 2006 werden von über 75.000 neuregistrierten Hunden des „UK Kennel Club“ weniger als 13.000 Hunde (17,3 %) durch den BVA gescreent (ROONEY und SARGAN 2009). Bei einer phänotypischen Selektion ist deren Effektivität zur Verbesserung des genetischen Fortschritts stark abhängig von dem Aufbau des Einstufungsschemas möglicher Phänotypen. Wird im Extremfall ein dichotomes Klassifikationsverfahren (zuchttauglich/zuchtuntauglich) verwendet, ist die Auswahl möglicher Hunde für ein Selektionsverfahren insbesondere bei kontinuierlichen Merkmalen durch die Reduktion der Phänotypvarianz, welche die Grundlage für die phänotypische Selektion darstellt, deutlich reduziert (LEPPÄNEN et al. 2000; WILSON et al. 2011). Ein zusätzliches Problem der reinen phänotypischen Selektion ergibt sich aus der fehlenden Verpflichtung zur Übermittlung des HD-Status gescreenter Hunde an die Zuchtverbände. In einer amerikanischen Studie wird die Übermittlungsrate von HD-Röntgenbildern von Golden Retrievern mit einer normalen Hüftanatomie mit der von dysplastischen Hunden verglichen. Nach den Ergebnissen dieser Studie werden 8,2-mal häufiger die Röntgenbilder der ersten Hundegruppe von den Röntgentierärzten an die „Orthopedic Foundation for Animals“ (OFA) weitergeleitet (PASTER et al. 2005). Auch die Durchführung eines Vorröntgens, wie es auch in Deutschland von vielen Züchtern praktiziert wird, schmälert vermutlich den Anteil der Hunde mit mittlerer oder schwerer HD, so dass deren Prävalenz in Studien falsch zu tief eingeschätzt wird (WORTH et al. 2011).

Mit Inkrafttreten der Bestimmung des Zuchtplans zur Bekämpfung der HD am 01.07.1999 werden die Zuchtreglementierungen des SV über das phänotypische

Screening hinausgehend durch die Durchführung einer Zuchtwertschätzung ergänzt und gestärkt. Die Anwendung einer Zuchtwertschätzung zur Steigerung des genetischen Zuchtfortschritts bei der HD wird international durch verschiedene Arbeitsgruppen als sinnvoll erachtet (MÄKI et al. 2000; JANUTTA et al. 2008; MALM et al. 2008; GINJA et al. 2010; LEWIS et al. 2010; STOCK et al. 2011; WILSON et al. 2011; WORTH et al. 2011; HOU et al. 2013; LEWIS et al. 2013). Der Zuchtwert eines Hundes bezüglich eines Merkmals resultiert aus einem Schätzverfahren bei dem alle vorliegenden Informationen zu den Phänotypen bezüglich dieses Merkmals unter Berücksichtigung sämtlicher verwandtschaftlicher Verknüpfungen, die sich aus dem Pedigree ergeben, einbezogen werden (FARRELL et al. 2015). Somit können auch Zuchtwerte für Tiere ermittelt werden, zu denen keine phänotypischen Informationen vorliegen (VISSCHER et al. 2008; WILSON et al. 2011). Der Zuchtwert gibt an, in welchem Maß ein Tier die genetische Disposition für ein bestimmtes Merkmal an seine Nachkommen weitergeben kann. Dies ist möglich, da Nachkommen in einem vorhersagbaren Maß die genetische Information von den Elterntieren vererbt bekommen. So erhält jeder Nachkomme je eines der paarig angelegten Allele (Genvarianten) je eines Elterntieres. Im Gegensatz zu ausschließlich auf den Phänotypen der Hunde basierender Anpaarungsentscheidungen, bietet die Verwendung von Zuchtwerten die Möglichkeit, Hunde individuell aufgrund ihrer genetischen Disposition für eine bestimmte Erkrankung auszuwählen und hiermit auch Verwandteninformationen einfließen zu lassen sowie etwaige Umwelteffekte herauszukorrigieren (STOCK et al. 2011). Aufgrund der hohen Informationsdichte liegt für Zuchtwerte eine höhere statistische Genauigkeit für Schätzverfahren des Zuchtfortschritts vor als bei der ausschließlichen Bewertung des individuellen Phänotyps. Jedoch kann auch die Genauigkeit der Schätzung von Zuchtwerten durch das systematische Zurückhalten der Untersuchungsergebnisse schlecht bewerteter Hunde zum Nachteil im Sinne einer Verzerrung hin beeinflusst werden. Züchter, die im Besitz von sehr häufig eingesetzten Deckrüden sind, könnten so verhindern wollen, dass ihre Zuchttiere ungünstige geschätzte Werte erhalten. Da hierunter die Qualität des Schätzverfahrens und der Informationswert der Zuchtwerte erheblich leiden können, ist die Bezugnahme auf eine Zufallsstichprobe aus der Population als ideale Datenbasis für Zuchtwertschätzung-basierte Zuchtprogramme anzusehen (STOCK und DISTL 2010).

### **10.12 Ableitungen für die Zucht gegen LÜW**

Die Erfahrungen aus der Zucht gegen die HD stellen die Vorteile einer Selektion auf der Grundlage einer Zuchtwertschätzung heraus. Zwar ist auch im Hinblick auf die

Zucht gegen LÜW eine rein phänotypische Selektion durchführbar, jedoch ist davon auszugehen, dass der Zuchtfortschritt, wenn überhaupt vorhanden, geringer ausfällt, als dies durch ein Zuchtwertschätzung-basiertes Verfahren möglich wäre. Die Klassifikation des LÜW-Status sollte nicht auf freiwilliger Basis erfolgen. Vielmehr sollte diese vom Zuchtverband als obligat durchzuführende Untersuchung den Besitzern von zur Zucht vorgesehenen Hunden vorgegeben werden. Nach der vorgeschriebenen Klassifikation des LÜW-Status durch einen festgelegten Gutachter wäre eine ebenfalls verbindliche Weiterleitung der offiziellen Befunde an den Zuchtverband zielführend. Die dadurch erhobenen Daten sollten zu einem kontinuierlichen Monitoring des phänotypischen und genetischen Trends verwendet werden. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, positive oder negative Entwicklungen der Merkmalshäufigkeit von LÜW in einer Population nachzuweisen und durch eine gezielte Ergänzung der bestehenden Zuchtmaßnahmen einen Zuchterfolg auch in Bezug auf LÜW zu erzielen.

## 11 ZUSAMMENFASSUNG

Lumbosakrale Übergangswirbel (LÜW) stellen anatomisch fehlgebildete Wirbel am Übergang von der kaudalen Lendenwirbelsäule zum Kreuzbein dar. Für die Rasse des Deutschen Schäferhundes (DSH) konnte durch vorherige Untersuchungen eine Rasseprädisposition für das Vorliegen von LÜW festgestellt werden. In Abhängigkeit von ihrer Morphologie prädisponieren manche LÜW bei Hunden, vermutlich aufgrund einer Veränderung der Biomechanik des lumbosakralen Überganges, für die Entwicklung neurologischer und gegebenenfalls auch orthopädischer Folgeerkrankungen. Insbesondere der Zusammenhang zwischen dem Auftreten symmetrisch oder asymmetrisch stark von der Norm abweichender LÜW und dem Cauda equina Syndrom als sekundäre Erkrankung wurde in der Literatur eingehend beschrieben. Die Korrelation zu orthopädischen Erkrankungen, wie der Hüftgelenkdysplasie (HD) und der Coxarthrose, sind weniger eindeutig. Weniger die LÜW selbst als vielmehr die möglichen Folgeerkrankungen stellen eine negative Beeinflussung des Wohlbefindens und der Gesundheit betroffener Hunde dar. Auf Basis der durch Vorstudien nachgewiesenen mindestens moderaten Heritabilität von LÜW ist eine Erarbeitung effektiver Zuchtstrategien beim DSH möglich. Hierdurch ist eventuell neben einer Reduktion der Häufigkeit von LÜW im Speziellen auch eine Verringerung der Häufigkeit korrelierter Folgeerkrankungen möglich. Genetisch-statistische Analysen sollen als Grundlage für die Entwicklung angemessener, zielorientierter und wirkungsvoller Zuchtmaßnahmen dienen.

Das derzeit von der Gesellschaft für Röntgendiagnostik genetisch beeinflusster Skeletterkrankungen bei Kleintieren e. V. (GRSK) und der Schweizer Dysplasiekommission eingesetzte Klassifikationsverfahren nach FLÜCKIGER et al. (2009) unterscheidet vier Formen von LÜW (Typ 0 bis Typ III). Während der LÜW-Typ 0 einen physiologischen lumbosakralen Übergang darstellt, handelt es sich beim LÜW-Typ I um eine milde pathologische Form mit einer Trennung der normalerweise kontinuierlich fusionierten Dornfortsatzleiste des *Os sacrum* als einzige Normabweichung. Letzterer Typ ist, wenn auch normabweichend, für den betroffenen Hund klinisch ohne Relevanz. Die LÜW-Typen II und III weichen morphologisch stärker von der Norm ab. Hierbei handelt es sich um symmetrisch oder asymmetrisch fehlgebildete Wirbel, die vor allem Veränderungen ihrer Querfortsätze und Wirbelbögen aufweisen. Sie stellen die für neurologische und orthopädische Folgeerkrankungen

prädisponierenden Formen dar. Aus genetischer Sicht ist ungeklärt, inwieweit die verschiedenen LÜW-Typen eine übereinstimmende genetische Grundlage aufweisen. Bis dato konnte eine mögliche genetische Nähe des klinisch unbedeutenden LÜW-Typ I von den Typen II und III nicht ausgeschlossen werden. Die Kenntnis über eine genetische Korrelation ist für die Erarbeitung eines effektiven Zuchtprogramms von größter Bedeutung.

Es ist Ziel der Untersuchung anhand standardisierter Röntgenaufnahmen lumbosakrale Übergangswirbel beim Deutschen Schäferhund zu identifizieren, morphologisch detailliert zu beschreiben und zu klassifizieren. Auf Basis der hierdurch erhobenen Auswertungsdaten werden weiterführende genetisch-statistische Untersuchungen zu LÜW durchgeführt, die darauf abzielen ihre Populationsgenetik aufzuarbeiten. Dies soll Aufschlüsse über eine mögliche Vererbbarkeit der einzelnen Typen von LÜW und ihrer genetischen Korrelationen untereinander geben. Schlussendlich sollen konkrete Empfehlungen zur Erarbeitung wirksamer Zuchtmaßnahmen mit dem Ziel der Reduktion der Häufigkeit von LÜW gegeben werden.

Für die Studie werden ausschließlich Röntgenbilder des offiziellen Screenings auf HD sowie Auswertungsdaten von offiziellen Röntgenbefunden von Deutschen Schäferhunden herangezogen, welche im Zuchtbuch des Vereines für Deutsche Schäferhunde (SV) e.V. gelistet werden. Die Röntgenaufnahmen sind zum überwiegenden Teil an der Klinik für Kleintiere – Abteilung Radiologie der Justus-Liebig-Universität Gießen aufgenommen worden. Ergänzend werden zur Vergrößerung der Datenmenge Röntgenaufnahmen verwendet, welche von externen Tierärzten im Rahmen des Screeningverfahrens auf Hüftgelenkdysplasie angefertigt worden sind. Die standardisierte Röntgentechnik ermöglicht die Verwendung von Röntgenaufnahmen aus unterschiedlichen Quellen.

Die vorliegende Arbeit ist aus zwei Studienteilen aufgebaut. Im Studienteil A (detaillierte morphologische Röntgenstudie) wird neben der Klassifikation von LÜW eine eingehende morphologische Untersuchung des lumbosakralen Überganges unter Beurteilung zweier orthogonal zueinanderstehender Röntgenebenen (ventrodorsal und laterolateral) bei 1.302 DSH durchgeführt. Für eine wesentlich größere Anzahl an DSH ( $n = 27.579$ ) werden im Studienteil B (Screening-Studie) offizielle Auswertungsdaten des Screenings auf Hüftgelenkdysplasie retrospektiv verarbeitet, bei denen die LÜW-Klassifikation ausschließlich auf ventrodorsalen Aufnahmen basiert und unter Verwendung des Klassifikationsschemas nach FLÜCKIGER et al. (2009) beurteilt wurde. Diese offiziellen Daten wurden vom SV zur Verfügung gestellt.

Die Daten beider Studienteile dienen als Grundlage für die Durchführung deskriptiv-statistischer Untersuchungen sowie für darauf aufbauende weiterführende genetisch-statistische Analysen. Um Schätzungen genetischer Parameter zu ermöglichen, wurden vollständige Pedigreeinformationen aller radiologisch untersuchter DSH vom SV bereitgestellt. Ein- und Mehrmerkmalansätze in linearen Tiermodellen werden verwendet, um für die unterschiedlichen LÜW-Typen und für spezifische Morphologiekriterien Heritabilitätsschätzungen durchzuführen sowie additiv-genetische Korrelationen unter den verschiedenen LÜW-Typen zu schätzen.

Im Studienteil A liegt das durchschnittliche Alter zum Zeitpunkt der Röntgenaufnahme bei 17,5 Monaten. Das Geschlechterverhältnis ist mit 56,5 % Rüden und 43,5 % Hündinnen geringgradig ungleich verteilt. Bezüglich der morphologischen Untersuchung der Dornfortsatztrennung kann bei 33,5 % der untersuchten DSH eine vollständige, bei 39,2 % eine unvollständige Trennung und nur bei 27,4 % eine vollständige Fusion festgestellt werden. Nur bei ca. 2,0 % der DSH ist eine Auswertung dieses Merkmals nicht möglich. Aufgrund einer Überlagerung mit dem *Colon descendens* bzw. dem Rektum ist eine Beurteilung der Morphologie der Seitenteile bei 0,4 % der DSH nicht durchführbar. 81,3 % der untersuchten DSH weisen eine physiologische Ausprägung ihrer Seitenteile rechts sowie 81,7 % links auf. Geringgradig von der Norm abweichende Seitenteile sind bei 16,3 % der DSH rechts ausgeprägt. Linksseitig liegt bei 16,6 % eine Abweichung dieses Grades vor. Mit 2,4 % der beurteilten Hunde sind rechts geringgradig häufiger mittel- bis hochgradig von der Norm abweichende Seitenteile festzustellen als links (1,8 %). Das Merkmal Wirbelkörpertrennung kann bei 2,7 % als angedeutete und bei 2,9 % als vollständige Trennung beurteilt werden. Es liegen keine signifikanten Geschlechtereffekte für die untersuchten Morphologiekriterien vor.

Im Studienteil B zeigen die weitaus meisten DSH, mit 76,2 % der beurteilten DSH, einen normalen anatomischen lumbosakralen Übergang. 15,0 % weisen als häufigste pathologische Form einen LÜW-Typ I auf. Dieser Sachverhalt stellt sich im Studienteil A unter zusätzlicher Beurteilung einer laterolateralen Röntgenaufnahme annähernd konträr dar. Hier besitzen 66,0 % der Hunde einen LÜW-Typ I und nur 27,4 % einen LÜW-Typ 0. Die Häufigkeitsverteilung der stärker von der Norm abweichenden LÜW-Typen II und III sind sowohl innerhalb als auch zwischen den Studienteilen ähnlich verteilt. Sie liegen bei 3,1 % (II) und 3,6 % (III) der DSH in der detaillierten morphologischen Röntgenstudie und bei 4,3 % (II) und 4,4 % (III) der DSH in der Screening-Studie vor. Die Abweichung der Häufigkeiten der LÜW-Typen 0 und I beider Studienteile ergibt sich größtenteils aus dem strengeren Klassifikationsverfahren des

Studienteiles A, wo schon unvollständige Trennungen der Dornfortsatzleiste zu einer Klassifikation als LÜW-Typ I führen. Zusätzlich führt die Beurteilung einer zusätzlichen laterolateralen Röntgenaufnahme im Studienteil A möglicherweise zur Reduktion der Anzahl falsch-negativ beurteilter DSH, so dass weniger DSH fälschlicherweise aufgrund fehlender offensichtlicher Veränderungen in der ventrodorsalen Röntgenaufnahme als LÜW-Typ 0 klassifiziert werden.

Der phänotypische Trend der verschiedenen LÜW-Typen für DSH der Geburtsjahre 2006 bis 2015 ist im Studienteil B, in dem die deutlich größere Datenmenge im Vergleich zum Studienteil A eine verlässlichere Interpretation zulässt, nahezu konstant für die LÜW-Typen II und III. Die Häufigkeit des LÜW-Typ I stieg im untersuchten Zeitraum jedoch signifikant an. Die Bedeutung des Anstiegs der Häufigkeit des klinisch nicht relevanten LÜW-Typ I wird durch die Ergebnisse der weiterführenden genetisch-statistischen Analyse deutlich.

Die Ergebnisse der weiterführenden genetisch-statistischen Analysen bestätigen die erbliche Grundlage der LÜW. Die hier geschätzte Heritabilität des Merkmals nLÜW geht in ihrer Höhe konform mit der Schätzung von JULIER-FRANZ (2006). Es liegt eine moderate Heritabilität zwischen 0,25 und 0,27 vor. Die Heritabilitätsschätzungen für die einzelnen LÜW-Typen ergeben eine Spannbreite der Schätzwerte in Höhe von 0,08 bis 0,28, was vermutlich zumindest teilweise aus den deutlich voneinander abweichenden Häufigkeiten der unterschiedlichen LÜW-Typen resultiert. Zusammengefasst impliziert die hier nachgewiesene genetische Grundlage von LÜW, dass eine Zuchtstrategie auf Basis einer phänotypischen Selektion mit dem Ziel der Reduktion der Häufigkeit von LÜW erfolgversprechend sein kann. Die Ergebnisse der multivariaten Varianzkomponentenschätzung geben deutliche Anhaltspunkte, dass eine enge genetische Beziehung zwischen den verschiedenen LÜW-Typen besteht. Hierbei liegt zwischen den LÜW-Typen II und III eine größere genetische Ähnlichkeit vor ( $r_g > 0,8$ ) als zwischen dem LÜW-Typ I und den LÜW-Typen II und III ( $r_g$  zwischen 0,5 und 0,6). Die hohen positiven Schätzwerte der additiv-genetischen Korrelationen der LÜW-Typen I bis III untereinander verdeutlichen, dass Zuchttempfehlungen mit einer ausschließlichen Zuchtreglementierung der LÜW-Typen II und III von zweifelhafter Effizienz sind. Um die Häufigkeit des Auftretens von LÜW zu reduzieren, ist vielmehr ein Zuchtverfahren zu erarbeiten, bei dem auch der LÜW-Typ I in die Zuchtentscheidungen einbezogen wird. Zwar ist dieser für den individuell betroffenen Hund klinisch ohne Belang, jedoch lassen die Ergebnisse der weiterführenden genetisch-statistischen Analyse den Schluss zu, dass auch DSH dieses LÜW-Typs ein erhöhtes Risiko besitzen Nachkommen mit stärker von der Norm abweichenden LÜW

(Typen II und III) hervorzubringen. Der größtmögliche Zuchtfortschritt sollte daher bei einer Zuchtselektion gegen eine generelle genetische Disposition für LÜW zu erreichen sein, wenn auch eine phänotypische Selektion gegen LÜW möglich erscheint. Der Anstieg der Häufigkeit des LÜW-Typ I in der Population des Studienteiles B über die Jahre 2006 bis 2015 in Kombination mit den festgestellten positiv additiv-genetischen Korrelationen der LÜW-Typen untereinander zeigt die Dringlichkeit einer Einbeziehung der Hunde mit dem LÜW-Typ I in die Zuchtmaßnahmen. Jedoch gilt es die Verteilungsmuster der LÜW in der Population bei der Erarbeitung jeglicher Zuchtmaßnahmen zu berücksichtigen. Durch die hohe Prävalenz des LÜW-Typ I innerhalb des SV würde ein strenger Zuchtausschluss dieses Typs einen enormen Einschnitt in die Population bedeuten. Hierdurch würden sich populationsgenetische Begleiterscheinungen, wie eine substantielle Verringerung des genetischen Pools, eine Erhöhung der Inzuchtsrate und die Förderung anderer hereditärer Erkrankungen ergeben. Aus diesen Gründen wäre die Durchführung eines Selektionsverfahrens unter Anwendung einer Zuchtwertschätzung die einzige Möglichkeit zu selektieren und daher auch zu empfehlen. Die beiden Teile dieser Arbeit reflektieren die Herausforderungen, die die Datenerfassung und -analyse zur Charakterisierung der genetischen Grundlage von LÜW mit sich bringt. Anforderungen hinsichtlich der Zuverlässigkeit und Differenziertheit der Erfassung einerseits und des Datenumfanges andererseits lassen sich häufig nur schwer in Einklang bringen. Dennoch war es möglich, praktikable Ansätze für züchterische Maßnahmen zur Reduktion der LÜW-Häufigkeit abzuleiten. Die seit vielen Jahren etablierte röntgenologische Reihenuntersuchung für den Zuchteinsatz vorgesehener Hunde stellte sich als wertvolle Informationsquelle dar, die sich durch zusätzliche Erhebungen weiter stärken ließe. Allerdings bleibt die Festlegung und Optimierung des Vorgehens zur integrierten Nutzung von LÜW-Daten aus unterschiedlichen Quellen weiteren Untersuchungen auf Basis umfangreichen Datenmaterials vorbehalten.

Aus radiologischer Sicht bleibt festzuhalten, dass zur Beurteilung des lumbosakralen Überganges die ausschließlich ventrodorsalen Röntgenaufnahmen des offiziellen Screenings auf HD für die Durchführung einer eingehenden morphologischen Beurteilung eingeschränkt geeignet sind. Zusätzliche laterolaterale Aufnahmen sind nützlich, um die Rate falsch-negativ eingestufte Hunde zu reduzieren und sollten daher immer dann verwendet werden, wenn eine eingehende morphologische Untersuchung notwendig ist. Für die Entwicklung eines Zuchtprogrammes unter Nutzung eines anwenderfreundlichen Screeningverfahrens ist nach den vorliegenden Ergebnissen das Klassifikationsverfahren nach FLÜCKIGER et al. (2009), unter

Verwendung einer einzelnen ventrodorsalen Röntgenaufnahme, jedoch eine praxistaugliche Methode, mittels derer auch unter Routinebedingungen Daten erhoben werden können, die sich als Basis genetisch-statistischer Analysen eignen. Den Ergebnissen dieser Arbeit zufolge können die erweiterte röntgenologische Datenerfassung und die Integration zusätzlicher Datenquellen dazu beitragen, die Aussagekraft genetisch-statistischer Analysen zu LÜW zu stärken. Jedoch sind diese nicht als zwingend erforderlich, sondern als komplementär zum Röntgenscreening anzusehen, das es erlaubt, züchterische Maßnahmen zur Kontrolle der Häufigkeit des Auftretens von LÜW in der Population des DSH zu etablieren.

## 12 SUMMARY

Lumbosacral transitional vertebrae (LTV) are congenitally malformed vertebrae located at the transition between the lumbar spine and the sacrum. Previous research has repeatedly indicated a breed predisposition for German Shepherd Dogs. Depending on their conformation, LTV can promote neurologic disorders and potentially also orthopedic diseases. This has been assumed to be related to altered biomechanics in the affected part of the spine. Some studies suggest that more severely deformed LTV can be involved in the development and progression of Cauda equina syndrome (CES), regardless of being symmetrical or asymmetrical. The correlation between LTV and orthopedic diseases, such as canine hip dysplasia and coxarthrosis, is less evident. The secondary diseases represent the main negative influence of LTV on the welfare and health of the individual affected dog rather than the LTV themselves. However, the hereditary nature of LTV allows developing successful breeding strategies to reduce the prevalence of LTV and the development of related secondary neurologic and orthopedic diseases. Improved understanding of the genetics and characteristics of LTV will help to define such approaches that are reasonable, targeted and efficient.

The current classification of LTV - used by the Gesellschaft für Röntgendiagnostik genetisch beeinflusster Skeletterkrankungen bei Kleintieren e. V. (GRSK, Association for radiological diagnosis of genetically influenced skeletal diseases in small animals) in Germany and the Swiss Commission for Dysplasia - includes four different types (0 - III). Normal lumbosacral vertebral morphology is referred to as LTV type 0. Mild deviation from normal anatomy with separation of the spinous process of the first sacral vertebra from the remainder of the sacrum is defined as LTV type I. This type is clinically insignificant. Types II and III show more obvious morphologic abnormalities compared to LTV type I, especially in the areas of their transverse processes and vertebral arches. These types are supposed to predispose affected dogs for secondary neurologic and orthopedic secondary diseases. From a genetic point of view, it is yet to be determined whether or not all different types of LTV share a common genetic base. A possible genetic correlation between the clinically insignificant LTV type I and LTV types II and III could not be ruled out, and this has major implications on the practical implementation of phenotypic screening and breeding programs.

The objective of this study was the identification, morphological description and classification of lumbosacral transitional vertebrae of German Shepherd Dogs through the examination of standardized radiographs. Collected descriptive data were then used for genetic-statistical analyses with the aim to characterize the genetics of LTV including estimation of heritabilities of the individual LTV types and the additive-genetic correlations among them. Ultimately, this information should be used to be able to give specific recommendations for the development of breeding strategies to decrease the frequency of LTV.

German Shepherd Dogs registered in the database of the Verein für Deutsche Schäferhunde (SV) e.V. were included in this study. Only radiographs taken for official screening of canine hip dysplasia were scrutinized. Most of these radiographs originated from the University of Giessen, Small Animal Clinic - Radiology. In addition, radiographs from general practitioners were included to increase the statistical power for advanced analyses. Different sources of radiographs are suitable for this study because of the standardized Roentgen technique.

The study consisted of two parts. For a smaller number of dogs, radiographic data allowed not only a classification of LTV, but also a more detailed morphological examination (part A). For a much larger number of dogs, the results of the official screening with regard to LTV were used in terms of retrospective study.

The detailed morphological examination in part A which complemented LTV classification was based on a thorough assessment of the morphology of the lumbosacral transition using two orthogonal radiographs (ventrodorsal and laterolateral) of  $n = 1.302$  German Shepherd Dogs. For part B, official scrutiny data obtained during the screening against canine hip dysplasia of  $n = 27.579$  German Shepherd Dogs were made available by the SV. In this latter source of data, LTV classification was carried out according to the classification scheme of FLÜCKIGER et al. (2009) (see above).

Data from both parts of the study were used for descriptive statistical analyses and subsequent genetic-statistical analyses. To allow estimation of genetic parameters, comprehensive pedigree data of all radiographically examined dogs were provided by the SV. Single- and multiple-trait linear animal models were used to derive heritability estimates for the different types of LTV and specific morphological findings and additive-genetic correlation estimates among them.

In part A, the mean age of the examined dogs was 17.5 months. With 56.5 % male and 43.5 % female dogs, the gender distribution was slightly uneven. 33.5 % of the assessed dogs showed a complete and 39.2 % showed an incomplete separation of the spinous processes. 27.4 % of the dogs had completely fused spinous processes. In 2.0 % of the cases, the assessment of this morphologic criterion was not conclusive. Due to superimposition with the descending colon and rectum, the assessment of the morphologic criterion "Seitenteile" ( $\triangleq$  side elements) was not applicable in 0.4 % of the radiographs. The majority of the side elements was morphologically normal on the right (81.3 %) and the left side (81.7 %). However, slightly modified side elements were found in 16.3 % of the dogs on the right side and in 16.6 % on the left side. Moderately to severely modified forms were less frequent on the left (1.8 %) than on the right side (2.4 %). Regarding the morphologic criterion separation of vertebral bodies, a complete separation was found in 2.9 % of assessed dogs and an incomplete separation in 2.7 % of the dogs. There was no significant gender effect for any of the morphologic criteria.

In part B, data revealed normal anatomic lumbosacral transitions in most of the dogs (76.2 %), whereas 15.0 % showed LTV type I. This finding was in contrast to part A, where the most frequent type of lumbosacral transition was LTV type I (66.0 %) and only 27.4 % of the dogs were classified as LTV type 0, indicating nearly inverted relations of LTV types 0 and I in parts A and B of this study. The frequencies of the more obvious deviations, LTV types II and III, were similar both within and across the two parts of the study: The proportions of dogs with respective LTV types were 3.1 % (II) and 3.6 % (III) in part A and 4.3 % (II) and 4.4 % (III) in part B. The obvious difference of the prevalence of LTV types 0 and I resulted from the extended definition of LTV type I in part A, where an incompletely separated spinous process was already classified as LTV type I. Furthermore, the scrutiny of a second orthogonal radiograph (laterolateral view) had likely reduced the rate of false-negatives, i. e. the number of dogs erroneously classified as LTV type 0 dogs due to lacking obvious alterations on the standard ventrodorsal radiograph.

The evaluation of the frequencies of the different LTV types in the examined population of German Shepherd Dogs in part B, including dogs born between 2006 and 2015, enabled to illustrate the phenotypic trends. LTV type I showed a significant increase in frequency over the years, whereas frequencies of LTV types II and III were almost constant.

Results of the genetic-statistical analyses confirmed the genetic basis of LTV. The estimated genetic parameters were generally in agreement with previous reported heritability estimates of LTV in German Shepherd Dogs (JULIER-FRANZ 2006), indicating a moderate heritability of 0.25 to 0.27. In respect of the different LTV types, analyses revealed some variation in the magnitude of heritability estimates (0.08 - 0.28) which might be partly related to the considerably different frequencies of LTV types. In summary, the obvious genetic component of LTV implies that phenotypic breeding strategies against LTV with the aim of reduction of their appearance can be effective. However, the genetic correlation estimates between the different types of LTV indicated potential increase in efficiency by advanced breeding measures which take the relevant additive-genetic correlation between the mild pathologic form of LTV (LTV type I) and the more severe forms (LTV types II and III) into account. The multivariate estimations of variance components indicated significant sharing of the genetic basis between the LTV types, with greater similarity between LTV types II and III ( $r_g > 0.8$ ) than of LTV type I to both LTV type II and III ( $r_g$  around 0.5 - 0.6). These positive additive-genetic correlations between all pathologic LTV types highlight the importance of breeding strategies which include LTV types I, II and III. Regulation confined of the clinically relevant LTV types II and III is likely to show clear limitations in efficacy. On the contrary, efficient reduction of LTV types II and III can be achieved by breeding measures which also consider the more frequent mild pathologic form (LTV type I). Even though this LTV type is supposed to be clinically irrelevant for the affected dog, the results of the comprehensive genetic-statistical analyses implied that dogs with LTV type I have an increased relative risk to produce offspring with severely modified LTV types II or III. Maximum genetic progress should therefore be achieved when referring to the genetic disposition of LTV in general, although phenotypic selection against LTV is an applicable breeding strategy. Implementation of any breeding measures against LTV must take their distribution pattern into account: Given the large proportion of German Shepherd Dogs with LTV type I within the SV, rigorous exclusion of all affected dogs from breeding would have tremendous impact on the population. Substantial reduction of genetic diversity and increased inbreeding rates with concurrent negative side effects like reduced overall fitness and high risk of promoting other hereditary diseases could be the result. Taking this into account, it is more advisable to develop breeding strategies based on estimated breeding values. The two parts of the current study indicated challenges in data collection and analyses, but also feasible approaches to guide breeding for LTV reduction. The long-implemented radiographic screening is a highly valuable source of information, which could be strengthened through additional data collection. More data from extended

radiographic examinations are needed to verify and optimize the integrated use of different data sources.

From a radiological point of view, the exclusive scrutiny of ventrodorsal radiographs has limitations with regard to a thorough morphologic assessment of the lumbosacral transition. Additional laterolateral radiographs can reduce the rate of false-negative results and should be used whenever a more detailed examination is required. In the context of screening protocols for routine use in breeding programs, using the ventrodorsal view only as in the classification scheme of FLÜCKIGER et al. (2009) is a straightforward and appropriate method to obtain large-scale data for genetic-statistical analyses. Implementation of complementary data collection and integration of additional data sources are options to support the system, but not crucial for setting up breeding measures with the aim to reduce the frequencies of LTV in the population of German Shepherd Dogs.

## 13 LITERATURVERZEICHNIS

- AIHARA, T.; TAKAHASHI, K.; OGASAWARA, A.; ITADERA, E.; ONO, Y.; MORIYA, H. (2005): Intervertebral disc degeneration associated with lumbosacral transitional vertebrae. A clinical and anatomical study. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume* 87 B (5), 687–691.
- AMORT, K. H. (2009): Magnetresonanztomographische Untersuchung zu frühdegenerativen Veränderungen der lumbosakralen Bandscheibe beim Deutschen Schäferhund. Inaugural-Dissertation, Gießen
- AMORT, K. H.; ONDREKA, N.; RUDORF, H.; STOCK, K. F.; DISTL, O.; TELLHELM, B.; KRAMER, M.; WIGGER, A. (2012): MR-imaging of lumbosacral intervertebral disc degeneration in clinically sound german shepherd dogs compared to other breeds. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 53 (3), 289–295.
- ARCHER, R.; SISSENER, T.; CONNERY, N.; SPOTSWOOD, T. (2010): Asymmetric lumbosacral transitional vertebra and subsequent disc protrusion in a cocker spaniel. *The Canadian Veterinary Journal* 51 (3), 301–304.
- ASHER, L.; DIESEL, G.; SUMMERS, J. F.; MCGREEVY, P. D.; COLLINS, L. M. (2009): Inherited defects in pedigree dogs. Part 1: Disorders related to breed standards. *The Veterinary Journal* 182 (3), 402–411.
- AXLUND, T. W.; HUDSON, J. A. (2003): Computed tomography of the normal lumbosacral intervertebral disc in 22 dogs. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 44 (6), 630–634.
- BARTHEZ, P. Y.; MORGAN, J. P.; LIPSITZ, D. (1994): Discography and epidurography for evaluation of the lumbosacral junction in dogs with cauda equina syndrome. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 35 (3), 152–157.
- BENNINGER, M.; SEILER, G. S.; ROBINSON, L. E.; FERGUSON, S. J.; BONÉL, H. M.; BUSATO, A. R.; LANG, J. (2004): Three-dimensional motion pattern off the caudal lumbar and lumbosacral portions of the vertebral column of dogs. *American Journal of Veterinary Research* 65 (5), 544–551.
- BENNINGER, M. I.; SEILER, G. S.; ROBINSON, L. E.; FERGUSON, S. J.; BONÉL, H. M.; BUSATO, A.; LANG, J. (2006): Effects of anatomic conformation on three-dimensional motion of the caudal lumbar and lumbosacral portions of the vertebral column of dogs. *American Journal of Veterinary Research* 67 (1), 43–50.
- BERTOLOTTI, M. (1917): Contributo alla conoscenza dei vizi di differenziazione regionale del rachide con speciale riguardo all assimilazione sacrale della v. lombare. *La Radiologia Medica* (4), 113–144.

- BEUING, R. (1997): Strategien zur Bekämpfung von Erbfehlern in der Hundezucht. Wissenschaftlicher FCI-Kongress 1997 im Rahmen der Kynologischen Tage am 9. und 10. Oktober 1997 in Basel, Basel.
- BEUING, R.; JANSSEN, N.; WURSTER, H.; SCHMIED, O.; FLÜCKIGER, M. (2005): Untersuchungen zur züchterischen Bedeutung der Ellbogendysplasie (ED) beim Berner Sennenhund in Deutschland. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 147 (11), 491–497.
- BIERY, D. N. (Hg.) (1989): Röntgenbildinterpretation für den Kleintierpraktiker. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
- BLUMENSAAT, C.; CLASING, C. (1932): Anatomie und Klinik der lumbosacralen Übergangswirbel (Sakralisation und Lumbalisation). In: E. Payr, H. Küttner (Hg.), Vol. 25: Ergebnisse der Chirurgie und Orthopädie. Fünfundzwanzigster Band. 1. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 1–59.
- BRASS, W. (1993): Hüftgelenkdysplasie und Ellbogenerkrankung im Visier der Fédération Cynologique Internationale. *Kleintierpraxis* 38 (4), 194.
- BREIT, S.; KNAUS, I.; KÜNZEL, W. (2003): Differentiation between lumbosacral transitional vertebrae, pseudolumbarisation, and lumbosacral osteophyte formation in ventrodorsal radiographs of the canine pelvis. *The Veterinary Journal* 165 (1), 36–42.
- BREIT, S.; KUNZEL, W. (2002): The diameter of the vertebral canal in dogs in cases of lumbosacral transitional vertebrae or numerical vertebral variations. *Journal of Anatomy and Embryology* 205 (2), 125–133.
- BREIT, S.; KÜNZEL, W. (1998): Osteologische Besonderheiten an Wirbelsäulen von Rassehunden: eine röntgenologische und morphologische Studie. *Wiener Tierärztliche Monatsschrift* 85 (10), 340–350.
- BREIT, S.; KÜNZEL, W. (2001): Breed specific osteological features of the canine lumbosacral junction. *Annals of Anatomy* 183 (2), 151–157.
- BUDRAS, K.-D. (Hg.) (2007): Atlas der Anatomie des Hundes. Lehrbuch für Tierärzte und Studierende. 8. Auflage. Schlütersche, Hannover.
- BÜRGER, R.; LANG, J. (1993): Kinetische Studie über die Lendenwirbelsäule und den lumbosakralen Übergang beim Deutschen Schäferhund. Teil 2: Eigene Untersuchungen. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 135 (2), 35–43.
- BURK, R. L.; FEENEY, D. A. (2003): Small animal radiology and ultrasonography. A diagnostic atlas and text. 3. Auflage. Saunders, Philadelphia.
- CASTELLVI, A. E.; GOLDSTEIN, L. A.; CHAN, D. P. K. (1984): Lumbosacral transitional vertebrae and their relationship with lumbar extradural defects. *Spine* 9 (5), 493–495.

- CITI, S.; VIGNOLI, M.; MODENATO, M.; ROSSI, F.; MORGAN, J. P. (2005): A radiological study of the incidence of unilateral canine hip dysplasia. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 147 (4), 173–178.
- COLLINS, L. M.; ASHER, L.; SUMMERS, J.; MCGREEVY, P. (2011): Getting priorities straight: Risk assessment and decision-making in the improvement of inherited disorders in pedigree dogs. *The Veterinary Journal* 189 (2), 147–154.
- COLLINS, L. M.; ASHER, L.; SUMMERS, J. F.; DIESEL, G.; MCGREEVY, P. D. (2010): Welfare epidemiology as a tool to assess the welfare impact of inherited defects on the pedigree dog population. *Animal Welfare* 19 (S), 67–75.
- COUTEUR, R. A. le; CHILD, G. (1989): Diseases of the spinal cord. In: Stephen J. Ettinger (Hg.): Textbook of veterinary internal medicine. Diseases of the dog and cat. 3. überarb. Auflage. Saunders, Philadelphia, Pa., 578–623.
- DA COSTA, R. C.; SAMII, V. F. (2010): Advanced imaging of the spine in small animals. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice* 40 (5), 765–790.
- DAMUR-DJURIC, N.; STEFFEN, F.; HASSIG, M.; FLÜCKIGER, M. A. (2006): Lumbosacral transitional vertebrae in dogs: Classification, prevalence, and association with sacroiliac morphology. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 47 (1), 32–38.
- DANIELSSON, F.; SJÖSTRÖM, L. (1999): Surgical treatment of degenerative lumbosacral stenosis in dogs. *Veterinary Surgery* 28 (2), 91–98.
- DE RISIO, L.; SHARP, N. J. H.; OLBY, N. J.; MUÑANA, K. R.; THOMAS, W. B. (2001): Predictors of outcome after dorsal decompressive laminectomy for degenerative lumbosacral stenosis in dogs: 69 cases (1987-1997). *Journal of the American Veterinary Medical Association* 219 (5), 624–628.
- DE RISIO, L.; THOMAS, W. B.; SHARP, N. J. (2000): Degenerative lumbosacral stenosis. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice* 30 (1), 111-32, VI.
- DYCE, K. M.; SACK, W. O.; WENSING, C. J. G. (1991): Anatomie der Haustiere. Lehrbuch für Studium und Praxis. 1. deutsche Auflage. Enke, Stuttgart.
- ELSTER, A. D. (1989): Bertolotti's syndrome revisited. Transitional vertebrae of the lumbar spine. *Spine* 14 (12), 1373–1377.
- FALCONER, D. S. (1984): Einführung in die quantitative Genetik. 44 Tabellen. Ulmer, Stuttgart.
- FARRELL, L. L.; SCHOENEBECK, J. J.; WIENER, P.; CLEMENTS, D. N.; SUMMERS, K. M. (2015): The challenges of pedigree dog health: approaches to combating inherited disease. *Canine Genetics and Epidemiology* 2:3

- FCI (2006): FCI Requirements for Official Hip Dysplasia Screening. Based on notes of the FCI - workshop on hip dysplasia. Copenhagen
- FCI (2010): FCI international breeding strategies. Madrid
- FCI (2013): International breeding rules of the FCI. Madrid
- FEHR, M.; THIET, W. (1990): Das Cauda-equina-Syndrom beim Deutschen Schäferhund. *Kleintierpraxis* 35 (1), 49–56.
- FIALOVÁ, I.; PANINÁROVÁ, M.; NEČAS, A.; STEHLÍK, L.; PROKS, P. (2014): Prevalence of lumbosacral transitional vertebrae in dogs in the Czech Republic. *Acta Veterinaria Brno* 83 (4), 399–403.
- FISCHER, M. S.; LILJE, K. E. (2011): Hunde in Bewegung. 1. Auflage. Kosmos, Stuttgart.
- FLÜCKIGER, M.; GEISSBÜHLER, U.; LANG, J. (2009): Lumbosakrale Übergangswirbel: Welche Bedeutung haben sie für die Gesundheit von betroffenen Hunden? *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 151 (3), 133–135.
- FLÜCKIGER, M. A.; DAMUR-DJURIC, N.; HASSIG, M.; MORGAN, J. P.; STEFFEN, F. (2006): A lumbosacral transitional vertebra in the dog predisposes to cauda equina syndrome. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 47 (1), 39–44.
- FLÜCKIGER, M. A.; STEFFEN, F.; HÄSSIG, M.; MORGAN, J. P. (2017): Asymmetrical lumbosacral transitional vertebrae in dogs may promote asymmetrical hip joint development. *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology* 30 (2), 137–142.
- GINJA, M. M. D.; SILVESTRE, A. M.; GONZALO-ORDEN, J. M.; FERREIRA, A. J. A. (2010): Diagnosis, genetic control and preventive management of canine hip dysplasia: a review. *The Veterinary Journal* 184 (3), 269–276.
- GRADNER, G.; BOCKSTAHLER, B.; PEHAM, C.; HENNINGER, W.; PODBREGAR, I. (2007): Kinematic study of back movement in clinically sound malinois dogs with consideration of the effect of radiographic changes in the lumbosacral junction. *Veterinary Surgery* 36 (5), 472–481.
- GREGORY, C. R. (1986): The Canine Sacroiliac Joint. Preliminary Study of Anatomy, Histopathology, and Biomechanics. *Spine* 11 (10), 1044–1048.
- GROENEVELD, E.; KOVAC, M.; MIELENZ, N. (2010): VCE User's Guide and Reference Manual Version 6.0
- GROENEVELD, E.; KOVAC, M.; WANG, T. (1990): Pest, a general purpose BLUP package for multivariate prediction and estimation. *Proceedings of 4th world congress on genetics applied to livestock production* (13), 488–491.

- HAMANN, H.; KIRCHHOFF, T.; DISTL, O. (2003): Bayesian analysis of heritability of canine hip dysplasia in german shepherd dogs. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 120 (4), 258–268.
- HECHT, S.; MORANDI, F. (2008): Wirbelsäule (Neuroradiologie inkl. Kontrastverfahren). In: Silke Hecht (Hg.): Röntgendiagnostik in der Kleintierpraxis. 1., Auflage. Schattauer, Stuttgart, New York, 77–110.
- HEDHAMMAR, A.; OLSSON, S. E.; ANDERSSON, S. A.; PERSSON, L.; PETTERSSON, L.; OLAUSSON, A.; SUNDGREN, P. E. (1979): Canine hip dysplasia: Study of heritability in 401 litters of german shepherd dogs. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 174 (9), 1012–1016.
- HEDHAMMAR, Å. A.; INDREBØ, A. (2011): Rules, regulations, strategies and activities within the Fédération Cynologique Internationale (FCI) to promote canine genetic health. *The Veterinary Journal* 189 (2), 141–146.
- HEDIGER, K. U.; FERGUSON, S. J.; GEDET, P.; BUSATO, A.; FORTERRE, F.; ISLER, S.; BARMETTLER, R.; LANG, J. (2009): Biomechanical analysis of torsion and shear forces in lumbar and lumbosacral spine segments of nonchondrodystrophic dogs. *Veterinary Surgery* 38 (7), 874–880.
- HOHMANN, M. (2015): Bewegungsapparat Hund. Funktionelle Anatomie, Biomechanik und Pathophysiologie. 1. Auflage. Sonntag Verlag, Stuttgart.
- HOU, Y.; WANG, Y.; LU, X.; ZHANG, X.; ZHAO, Q.; TODHUNTER, R. J.; ZHANG, Z. (2013): Monitoring Hip and Elbow Dysplasia achieved modest genetic improvement of 74 dog breeds over 40 years in USA. *PloS one* 8 (10), e76390.
- HOU, Y.; WANG, Y.; LUST, G.; ZHU, L.; ZHANG, Z.; TODHUNTER, R. J. (2010): Retrospective analysis for genetic improvement of hip joints of cohort labrador retrievers in the United States: 1970-2007. *PloS one* 5 (2), e9410.
- HUGHES, R. J.; SAIFUDDIN, A. (2004): Imaging of lumbosacral transitional vertebrae. *Clinical Radiology* 59 (11), 984–991.
- INDREBØ, A. (2008): Animal welfare in modern dog breeding. *Acta Veterinaria Scandinavica* 50 (Suppl 1), S6.
- INDRIERI, R. J. (1988): Lumbosacral stenosis and injury of the cauda equina. *The Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice* 18 (3), 697–710.
- JAGGY, A.; SCHAWALDER, P.; LANG, J. (1987): Cauda equina-Syndrom beim Hund. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* (129), 171–192.
- JANSSENS, L.; BEOSIER, Y.; DAEMS, R. (2009): Lumbosacral degenerative stenosis in the dog. The results of epidural infiltration with methylprednisolone acetate: a retrospective study. *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology* 22 (6), 486–491.

- JANUTTA, V.; HAMANN, H.; DISTL, O. (2008): Genetic and phenotypic trends in canine hip dysplasia in the german population of german shepherd dogs. *Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift* 121 (3-4), 102–109.
- JEFFERY, N. D.; BARKER, A.; HARCOURT-BROWN, T. (2014): What progress has been made in the understanding and treatment of degenerative lumbosacral stenosis in dogs during the past 30 years? *The Veterinary Journal* 201 (1), 9–14.
- JONES, J. C.; INZANA, K. D. (2000): Subclinical CT abnormalities in the lumbosacral spine of older large-breed dogs. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 41 (1), 19–26.
- JONES, J. C.; SORJONEN, D. C.; SIMPSON, S. T.; COATES, J. R.; LENZ, S. D.; HATHCOCK, J. T.; AGEE, M. W.; BARTELS, J. E. (1996): Comparison between computed tomographic and surgical findings in nine large-breed dogs with lumbosacral stenosis. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 37 (4), 247–256.
- JONES, J. C.; WILSON, M. E.; BARTELS, J. E. (1994): A review of high resolution computed tomography and a proposed technique for regional examination of the canine lumbosacral spine. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 35 (5), 339–346.
- JULIER-FRANZ, C. (2006): Der lumbosakrale Übergangswirbel beim Deutschen Schäferhund: Formen, Häufigkeit und Genetik. Inaugural-Dissertation, Gießen
- KEALY, J. K. (1981): Röntgendiagnostik bei Hund und Katze. 1. Auflage. Enke, Stuttgart.
- KEMPERMANN, C. T. (1929): Über das Problem der Regionenbildung der Wirbelsäule. *Archiv für Gynäkologie* 138 (3), 585–595.
- KENT, M. (2005): Degenerative lumbosacral stenosis in dogs. *Veterinary Medicine* (7), 500–515.
- KOMSTA, R.; LOJSZCZYK-SZCZEPANIAK, A.; DEBIAK, P. (2015): Lumbosacral transitional vertebrae, canine hip dysplasia, and sacroiliac joint degenerative changes on ventrodorsal radiographs of the pelvis in police working german shepherd dogs. *Topics in Companion Animal Medicine* 30 (1), 10–15.
- KONIN, G. P.; WALZ, D. M. (2010): Lumbosacral transitional vertebrae: classification, imaging findings, and clinical relevance. *American Journal of Neuroradiology* 31 (10), 1778–1786.
- KOPP, K. I. (2018): Kinematik des Beckens und der kaudalen Lendenwirbelsäule beim Deutschen Schäferhund. Eine Untersuchung mittels biplanarer Röntgenvideographie und Scientific Rotoscoping. Inaugural-Dissertation, Gießen
- KÜNZEL, W.; BREIT, S.; KNAUS, I. (2002): Funktionelle Wechselbeziehungen zwischen lumbosakralem, iliosakralem und koxofemoralem Komplex beim Hund am Beispiel degenerativer Veränderungen. *Wiener Tierärztliche Monatsschrift* 89 (11), 306–311.

- LAHUNTA, A. de; GLASS, E. (Hg.) (2009): Veterinary neuroanatomy and clinical neurology. 3. Auflage. Saunders Elsevier, St. Louis, Mo.
- LANG, J.; HÄNI, H.; SCHAWALDER, P. (1992): A sacral lesion resembling osteochondrosis in the german shepherd dog. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 33 (2), 69–76.
- LANG, J.; JAGGY, A. (1989): Die Röntgenuntersuchung der Cauda Equina des Hundes. *Schweizer Archiv für Tierheilkunde* 131 (6), 299–309.
- LAPPALAINEN, A. K.; SALOMAA, R.; JUNNILA, J.; SNELLMAN, M.; LAITINEN-VAPAAVUORI, O. (2012): Alternative classification and screening protocol for transitional lumbosacral vertebra in german shepherd dogs. *Acta Veterinaria Scandinavica* 54 (1), 27–36.
- LARSEN, J. S. (1977): Lumbosacral transitional vertebrae in the dog. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 18 (3), 76–79.
- LEDECKÝ, V.; GJENGEDAL, H.; SKURKOVÁ, L.; HLUCHÝ, M.; ŠEVČÍK, A.; LEDECKÁ, K. (2007): Lumbosacral transitional vertebra in some dog breeds. *Folia Veterinaria* 51 (3-4), 146–150.
- LEIGHTON, E. A. (1997): Genetics of canine hip dysplasia. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 210 (10), 1474–1479.
- LEIGHTON, E. A.; LINN, J. M.; WILLHAM, R. L.; CASTLEBERRY, M. W. (1977): A genetic study of canine hip dysplasia. *American Journal of Veterinary Research* 38 (2), 241–244.
- LEPPÄNEN, M.; MAÄKI, K.; JUGA, J.; SALONIEMI, H. (2000): Estimation of heritability for hip dysplasia in german shepherd dogs in finland. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 117 (2), 97–103.
- LEROY, G. (2011): Genetic diversity, inbreeding and breeding practices in dogs: results from pedigree analyses. *The Veterinary Journal* 189 (2), 177–182.
- LEWIS, T. W.; BLOTT, S. C.; WOOLLIAMS, J. A. (2010): Genetic evaluation of hip score in UK labrador retrievers. *PloS one* 5 (10), e12797.
- LEWIS, T. W.; BLOTT, S. C.; WOOLLIAMS, J. A. (2013): Comparative analyses of genetic trends and prospects for selection against hip and elbow dysplasia in 15 UK dog breeds. *BioMed Central* 14), :16.
- LORENZ, M. D.; COATES, J. R.; KENT, M. (Hg.) (2011): Handbook of veterinary neurology. 5. Auflage. Elsevier Saunders, St. Louis, Mo.
- LUK, K. D.; HO, H. C.; LEONG, J. C. (1986): The iliolumbar ligament. A study of its anatomy, development and clinical significance. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume* 68 (2), 197–200.

- LUOMA, K.; VEHMAS, T.; RAININKO, R.; LUUKKONEN, R.; RIIHIMÄKI, H. (2004): Lumbosacral transitional vertebra. Relation to disc degeneration and low back pain. *Spine* 29 (2), 200–205.
- LUST, G. (1997): An overview of the pathogenesis of canine hip dysplasia. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 210 (10), 1443–1445.
- MAIERL, J.; WEISSENGRUBER, G.; KÖNIG, H.-E. (2009): Statik und Dynamik. In: Horst E. König, Hans-Georg Liebich (Hg.): Anatomie der Haussäugetiere. Lehrbuch und Farbatlas für Studium und Praxis. 4. Auflage. Schattauer, Stuttgart, 275–282.
- MAIMER, E. (2013): Populationsgenetische Analysen zur Hüftgelenksdysplasie beim Rottweiler. Inaugural-Dissertation, Gießen
- MÄKI, K.; GROEN, A. F.; LIINAMO, A. E.; OJALA, M. (2002): Genetic variances, trends and mode of inheritance for hip and elbow dysplasia in finnish dog populations. *Journal of Animal Science* (75), 197–207.
- MÄKI, K.; LIINAMO, A. E.; OJALA, M. (2000): Estimates of genetic parameters for hip and elbow dysplasia in finnish rottweilers. *Journal of Animal Science* 78 (5), 1141–1148.
- MALM, S.; FIKSE, W. F.; DANELL, B.; STRANDBERG, E. (2008): Genetic variation and genetic trends in hip and elbow dysplasia in swedish rottweiler and bernese mountain dog. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 125 (6), 403–412.
- MATTOON, J. S.; KOBLIK, P. D. (1993): Quantitative survey radiographic evaluation of the lumbosacral spine of normal dogs and dogs with degenerative lumbosacral stenosis. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 34 (3), 194–206.
- MAYHEW, P. D.; KAPATKIN, A. S.; WORTMAN, J. A.; VITE, C. H. (2002): Association of cauda equina compression on magnetic resonance images and clinical signs in dogs with degenerative lumbosacral stenosis. *Journal of the American Animal Hospital Association* 38 (6), 555–562.
- MCKEE, M. (1993): Differential diagnosis of cauda equina syndrome. *In Practice* 15 (5), 243–250.
- MEIJ, B. P.; BERGKNUT, N. (2010): Degenerative lumbosacral stenosis in dogs. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice* 40 (5), 983–1009.
- MOESER, C. F.; WADE, C. M. (2017): Relationship between transitional lumbosacral vertebrae and eight lumbar vertebrae in a breeding colony of labrador retrievers and labrador crosses. *Australian Veterinary Journal* 95 (1-2), 33–36.
- MOORE, G. E.; BURKMAN, K. D.; CARTER, M. N.; PETERSON, M. R. (2001): Causes of death or reasons for euthanasia in military working dogs: 927 cases (1993-1996). *Journal of the American Veterinary Medical Association* 219 (2), 209–214.

- MORGAN, J. P. (1968): Congenital anomalies of the vertebral column of the dog: A Study of the incidence and significance based on a radiographic and morphologic study. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 9 (1), 21–29.
- MORGAN, J. P. (1999a): Radiology of veterinary orthopedics. Features of diagnosis. 2. Auflage. Venture Press, Napa, California.
- MORGAN, J. P. (1999b): Transitional lumbosacral vertebral anomaly in the dog: a radiographic study. *Journal of Small Animal Practice* 40 (4), 167–172.
- MORGAN, J. P.; BAHR, A.; FRANTI, E.; BAILEY, C. S. (1993): Lumbosacral transitional vertebrae as a predisposing cause of cauda equina syndrome in German Shepherd Dogs: 161 cases (1987 - 1990). *Journal of the American Veterinary Medical Association* 202 (11), 1877–1882.
- MORGAN, J. P.; BAILEY, C. S. (1990): Cauda equina syndrome in the dog: Radiographic evaluation. *Journal of Small Animal Practice* 31 (1), 69–77.
- MORGAN, J. P.; WIND, A.; DAVIDSON, A. P. (1999): Bone dysplasias in the labrador retriever: A radiographic study. *Journal of the American Animal Hospital Association* 35 (4), 332–340.
- NACHEMSON, A. L. (1975): Towards a better understanding of low-back pain. A review of the mechanics of the lumbar disc. *Rheumatology and Rehabilitation* 14 (3), 129–143.
- NEWELL, R. L. M. (2008): The back. In: Susan Standring (Hg.): Gray's anatomy. The anatomical basis of clinical practice. 40. überarb. Auflage. Churchill Livingstone/Elsevier, Edinburgh, 705–774.
- NICKEL, R.; SCHUMMER, A.; SEIFERLE, E. (Hg.) (1992): Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Nervensystem, Sinnesorgane, Endokrine Drüsen. 3. völlig Neubearb. Auflage. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.
- NICKEL, R.; SCHUMMER, A.; WILLE, K.-H. (1984): Passiver Bewegungsapparat, Skelettsystem. In: Richard Nickel, August Schummer, Eugen Seiferle (Hg.), Band I: Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Bewegungsapparat. 5. Auflage. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 12–229.
- OHLERTH, S.; LANG, J.; BUSATO, A.; GAILLARD, C. (2001): Estimation of genetic population variables for six radiographic criteria of hip dysplasia in a colony of Labrador Retrievers. *American Journal of Veterinary Research* 62 (6), 846–852.
- OLIVER, J. E.; SELCER, R. R.; SIMPSON, S. (1978): Cauda equina compression from lumbosacral malarticulation and malformation in the dog. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 173 (2), 207–214.

- ONDREKA, N. (2009): Röntgenmerkmale des lumbosakralen Übergangs beim Deutschen Schäferhund im Vergleich zu anderen Rassen und Genetik dieser Merkmale beim Deutschen Schäferhund. Inaugural-Dissertation, Gießen
- ONDREKA, N.; AMORT, K. H.; STOCK, K. F.; TELLHELM, B.; KLUMPP, S. W.; KRAMER, M.; SCHMIDT, M. J. (2013): Skeletal morphology and morphometry of the lumbosacral junction in german shepherd dogs and an evaluation of the possible genetic basis for radiographic findings. *The Veterinary Journal* 196 (1), 64–70.
- PASTER, E. R.; LAFOND, E.; BIERY, D. N.; IRIYE, A.; GREGOR, T. P.; SHOFER, F. S.; SMITH, G. K. (2005): Estimates of prevalence of hip dysplasia in golden retrievers and rottweilers and the influence of bias on published prevalence figures. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 226 (3), 387–392.
- PUN, W. K.; LUK, K. D.; LEONG, J. C. (1987): Influence of the erect posture on the development of the lumbosacral region. A comparative study on the lumbosacral junction of the monkey, dog, rabbit and rat. *Surgical and Radiologic Anatomy* 9 (1), 69–73.
- RAMIREZ III, O.; THRALL, D. E. (1998): A review of imaging techniques for canine cauda equina syndrome. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 39 (4), 283–296.
- ROBINSON, R. (1999): Genetics for dog breeders. 2. überarb. Auflage. Butterworth-Heinemann, Oxford, England, Woburn, MA.
- ROONEY, N.; SARGAN, D. (2009): Pedigree dog breeding in the UK: a major welfare concern? An independent scientific report commissioned by the Royal Society for the Prevention of Cruelty to Animals.
- ROSSI, F.; SEILER, G.; BUSATO, A.; WACKER, C.; LANG, J. (2004): Magnetic resonance imaging of articular process joint geometry and intervertebral disk degeneration in the caudal lumbar spine (L5-S1) of dogs with clinical signs of Cauda equina compression. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 45 (5), 381–387.
- RYTZ, U.; FORTERRE, F.; SCHMÖKEL, H.; WERTHERN, C. (2010): Neurosurgery. In: A. Jaggy (Hg.): Small Animal Neurology. An Illustrated Text. 2., überarb. Aufl. Schlütersche Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Hannover
- SAUNDERS, F. C.; CAVE, N. J.; HARTMAN, K. M.; GEE, E. K.; WORTH, A. J.; BRIDGES, J. P.; HARTMAN, A. C. (2013): Computed tomographic method for measurement of inclination angles and motion of the sacroiliac joints in german shepherd dogs and greyhounds. *American Journal of Veterinary Research* 74 (9), 1172–1182.

- SCHARF, G.; STEFFEN, F.; GRÜNENFELDER, F.; MORGAN, J. P.; FLÜCKIGER, M. (2004): The lumbosacral junction in working german shepherd dogs – Neurological and radiological evaluation. *Journal of Veterinary Medicine* 51 (1), 27–32.
- SCHAWALDER, P.; SPRENG, D.; DIETSCHI, E.; DOLF, G.; GAILLARD, C. (1996): Die Hüftgelenksdysplasie im Umfeld von sekundären Einflüssen und ektopischen Ursachen. Konstruktiv-kritische Gedanken zur HD-Diagnostik und zu den heutzutage gängigen zuchthygienischen Maßnahmen. *Kleintierpraxis* 41 (9), 625–638.
- SCHMID, V.; LANG, J. (1993): Measurements on the lumbosacral junction in normal dogs and those with cauda equina compression. *Journal of Small Animal Practice* 34 (9), 437–442.
- SCHNORR, B.; KRESSIN, M. (Hg.) (2011): Embryologie der Haustiere. 5., Aufl. Enke Verlag, Stuttgart.
- SCHWARZ, G. (1991): Zum Cauda-equina-Syndrom bei Hund und Katze. *Wiener Tierärztliche Monatsschrift* 78), 292–300.
- SEIFERLE, E.; FREWEIN, J. (1984): Aktiver Bewegungsapparat, Muskelsystem, Myologia. In: Richard Nickel, August Schummer, Eugen Seiferle (Hg.), Band I: Lehrbuch der Anatomie der Haustiere. Bewegungsapparat. 5. Auflage. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, 230–504.
- SEILER, G.; HÄNI, H.; SCHEIDEGGER, J.; BUSATO, A.; LANG, J. (2003): Staging of lumbar intervertebral disc degeneration in nonchondrodystrophic dogs using low-field magnetic resonance imaging. *Veterinary Radiology & Ultrasound* 44 (2), 179–184.
- SEILER, G. S.; HANSJÜRG, H.; BUSATO, A. R.; LANG, J. (2002): Facet joint geometry and intervertebral disk degeneration in the L5-S1 region of the vertebral column in German Shepherd Dogs. *American Journal of Veterinary Research* 63 (1), 86–90.
- SHARP, N. J. H.; WHEELER, S. J. (Hg.) (2005): Small animal spinal disorders. Diagnosis and surgery. 2. Auflage. Elsevier Mosby, Edinburgh, New York.
- SIMOENS, P.; VOS, N. R. de; LAUWERS, H.; NICAISE, M. (1983): Numerical vertebral variations and transitional vertebrae in the goat. *Anatomia, Histologia, Embryologia* 12 (2), 97–103.
- SINOWATZ, F. (1991): Bewegungsapparat. In: Imogen Rüsse, Fred Sinowatz (Hg.): Lehrbuch der Embryologie der Haustiere. 1. Auflage. Verlag Paul Parey, Berlin, 379–398.

- SISSON, A. F.; COUTEUR, R. A. le; INGRAM, J. T.; PARK, R. D.; CHILD, G. (1992): Diagnosis of cauda equina abnormalities by using electromyography, discography, and epidurography in dogs. *Journal of Veterinary Internal Medicine* 6 (5), 253–263.
- SJÖSTRÖM, L. (2003): Degenerative lumbosacral stenosis: Surgical decompression. In: Douglas H. Slatter (Hg.): Textbook of small animal surgery. 3., Aufl. Saunders, Philadelphia, PA, 1227–1237.
- SMITH, G. K.; MAYHEW, P. D.; KAPATKIN, A. S.; MCKELVIE, P. J.; SHOFER, F. S.; GREGOR, T. P. (2001): Evaluation of risk factors for degenerative joint disease associated with hip dysplasia in german shepherd dogs, golden retrievers, labrador retrievers, and rottweilers. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 219 (12), 1719–1724.
- STEFFEN, F.; BERGER, M.; MORGAN, J. P. (2004): Asymmetrical, transitional, lumbosacral vertebral segments in six dogs: A characteristic spinal syndrome. *Journal of the American Animal Hospital Association* 40 (4), 338–344.
- STEFFEN, F.; HUNOLD, K.; SCHARF, G.; ROOS, M.; FLÜCKIGER, M. (2007): A follow-up study of neurologic and radiographic findings in working german shepherd dogs with and without degenerative lumbosacral stenosis. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 231 (10), 1529–1533.
- STIEVE, H. (1921): Bilaterale Asymmetrien im Bau des menschlichen Rumpfskelettes. *Zeitschrift für Anatomie und Entwicklungsgeschichte* 60 (1-2), 307–410.
- STOCK, K. F.; DISTL, O. (2010): Simulation study on the effects of excluding offspring information for genetic evaluation versus using genomic markers for selection in dog breeding. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 127 (1), 42–52.
- STOCK, K. F.; KLEIN, S.; TELLHELM, B.; DISTL, O. (2011): Genetic analyses of elbow and hip dysplasia in the german shepherd dog. *Journal of Animal Breeding and Genetics* 128 (3), 219–229.
- SUMMERS, J. F.; DIESEL, G.; ASHER, L.; MCGREEVY, P. D.; COLLINS, L. M. (2010): Inherited defects in pedigree dogs. Part 2: Disorders that are not related to breed standards. *The Veterinary Journal* 183 (1), 39–45.
- SUWANKONG, N.; MEIJ, B. P.; VOORHOUT, G.; DE BOER, A. H.; HAZEWINKEL, H. (2008): Review and retrospective analysis of degenerative lumbosacral stenosis in 156 dogs treated by dorsal laminectomy. *Veterinary and Comparative Orthopaedics and Traumatology* 21 (3), 285–293.
- SWENSON, L.; AUDELL, L.; HEDHAMMAR, A. (1997): Prevalence and inheritance of and selection for hip dysplasia in seven breeds of dogs in Sweden and benefit: cost analysis of a screening and control program. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 210 (2), 207–214.

- TACKE, S.; SCHIMKE, E.; KRAMER, M.; GERWING, M.; FARAG, K.; TELLHELM, B. (1997): Klinische, röntgenologische, operative und postoperative Befunde beim Cauda-equina-Kompressionssyndrom des Hundes. *Kleintierpraxis* (42), 387–405.
- TELLHELM, B.; BRASS, W. (1989): HD-Röntgenaufnahmen - Qualität und Beurteilung. *Kleintierpraxis* 34 (11), 551–560.
- TELLHELM, B.; BRASS, W. (1994): Fallbeispiele zur HD-Beurteilung - Sakralisation. *Kleintierpraxis* 39 (4), 281–282.
- TELLHELM, B.; WIGGER, A.; ONDREKA, N.; AMORT, K.; JULIER-FRANZ, C. (2015): Lumbosakrale Übergangswirbel. *SVZeitung: Das Magazin des Vereins für Deutsche Schäferhunde (SV) e.V.* (2), 26–32.
- The Kennel Club Limited (2017): Estimated Breeding Values, <https://www.thekennelclub.org.uk/health/for-breeders/breeding-advice/estimated-breeding-values/>
- THRALL, D. E. (2013): The axial skeleton: Canine, feline and equine. Principles of radiographic interpretation of the axial skeleton. In: Donald E. Thrall (Hg.): Textbook of veterinary diagnostic radiology. 6. Auflage. Elsevier Saunders, St. Louis, 101–113.
- TINI, P. G.; WIESER, C.; ZINN, W. M. (1977): The transitional vertebra of the lumbosacral spine: Its radiological classification, incidence, prevalence, and clinical significance. *Rheumatology and Rehabilitation* 16 (3), 180–185.
- VISSCHER, P. M.; HILL, W. G.; WRAY, N. R. (2008): Heritability in the genomics era - concepts and misconceptions. *Nature Reviews Genetics* 9 (4), 255–266.
- VOLLMERHAUS, B.; FREWEIN, J.; ROOS, H.; KNOSPE, C. (1994): Skelett. In: Josef Frewein, Werner Amselgruber (Hg.): Anatomie von Hund und Katze. Mit 6 Tabellen. Blackwell-Wiss.-Verl., Berlin, 4–52.
- WACHS, K.; FISCHER, M. S.; SCHILLING, N. (2016): Three-dimensional movements of the pelvis and the lumbar intervertebral joints in walking and trotting dogs. *The Veterinary Journal* 210, 46–55.
- WALLA, L. (1986): Die Kompression der Cauda equina beim Hund. *Kleintierpraxis* 31 (7), 313–364.
- WANGDEE, C.; LEEGWATER, P. A. J.; HEUVEN, H. C. M.; VAN STEENBEEK, F. G.; MEUTSTEGE, F. J.; MEIJ, B. P.; HAZEWINKEL, H. A. W. (2014): Prevalence and genetics of patellar luxation in Kooiker dogs. *The Veterinary Journal* 201 (3), 333–337.
- WATT, P. R. (1991): Degenerative lumbosacral stenosis in 18 dogs. *Journal of Small Animal Practice* 32 (3), 125–134.

- WESTWORTH, D. R.; STURGES, B. K. (2010): Congenital spinal malformations in small animals. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice* 40 (5), 951–981.
- WHEELER, S. J. (1992): Lumbosacral disease. *The Veterinary Clinics of North America. Small Animal Practice* 22 (4), 937–950.
- WIGGER, A.; JULIER-FRANZ, C.; TELLHELM, B.; KRAMER, M. (2009): Lumbosakraler Übergangswirbel beim Deutschen Schäferhund: Häufigkeit, Formen, Genetik und Korrelation zur Hüftgelenkdysplasie. *Tierärztliche Praxis Kleintiere* 37 (1), 7–13.
- WILSON, B.; NICHOLAS, F. W.; THOMSON, P. C. (2011): Selection against canine hip dysplasia: success or failure? *The Veterinary Journal* 189 (2), 160–168.
- WINKLER, W. (1985): Lumbosakrale Übergangswirbel beim Hund. Inaugural-Dissertation, Berlin
- WOLFE, J. T.; KUBE, S. (2015): Treatment of lumbosacral disease. *Clinician's Brief* 13 (9), 67–71.
- WORTH, A. J.; BRIDGES, J. P.; JONES, G. (2011): Trends in the phenotypic hip status of selected breeds of dog as measured by the new zealand veterinary association hip dysplasia scheme (1990-2008). *New Zealand Veterinary Journal* 59 (2), 67–74.
- ZANDER, S. (2002): Diagnostik von Wirbelsäulenerkrankungen bei Hunden mit Hilfe der Computertomographie im Vergleich zur Myelographie. Inaugural-Dissertation, Hannover
- ZIEGLER, G. (1989): Assimilationsstörungen im lumbosakralen Übergangsbereich der Wirbelsäule bei Hund und Katze. Inaugural-Dissertation, München

## 14 ANHANG

**Anhang 1:** Verteilung der Typen lumbosakraler Übergangswirbel bei allen Hunden mit LÜW-Klassifikation anhand der Röntgenaufnahmen aus der routinemäßigen Untersuchung auf Hüftgelenkdysplasie im Zeitraum 2009-2016 (Studienteil B). (LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel)

	Rüden (N = 12.734)	Hündinnen (N = 14.609)	Insgesamt (N = 27.343)
LÜW-Typ			
0	9.825 (77,2 %)	11.019 (75,4 %)	20.844 (76,2 %)
I	1.903 (14,9 %)	2.198 (15,0 %)	4.101 (15,0 %)
II	516 (4,1 %)	678 (4,6 %)	1.194 (4,4 %)
III	490 (3,8 %)	714 (4,9 %)	1.204 (4,4 %)

**Anhang 2:** Verteilung der in die genetisch-statistischen Analysen einbezogenen Hunde nach Geschlecht und Geburtssaison mit absoluten und relativen Häufigkeiten (Studienteil A).

Geburtssaison	Rüden (N = 708)	Hündinnen (N = 546)	Insgesamt (N = 1.254)
November bis Januar	181 (25,6 %)	113 (20,7 %)	294 (23,4 %)
Februar bis April	178 (25,1 %)	154 (28,2 %)	332 (26,5 %)
Mai bis Juli	193 (27,3 %)	136 (24,9 %)	329 (26,2 %)
August bis Oktober	156 (22,0 %)	143 (26,2 %)	299 (23,8 %)

## Anhang

**Anhang 3: Ergebnisse der multiplen Varianzanalyse (SAS Prozedur GLM) der detaillierten morphologischen Röntgenstudie mit F-Statistik und Signifikanzen (P-Wert) für die im Modell berücksichtigten fixen Effekte, das für die genetisch-statistischen Analysen einheitlich unter Orientierung am Gesamtdatenmaterial gewählt wurde. (BINe = binär einfach, BINr = binär restriktiv, DBIN = differenziert binär, DKAT = differenziert kategorisch, GebSais = Geburtssaison, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel, NRö = Untersuchungsart, Röl = Röntgenjahr, SAS = Statistical Analysis System, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)**

Merkmal	Merkmalswerte	Merkmalsdefinition	Studienteil A											
			Geschlecht		Altersklasse		Röl_Klasse		GebSais		NRö			
			F	P	F	P	F	P	F	P	F	P		
nLÜW	0-3	LÜW-Klassifikation (Typen)	2,18	0,1400	2,12	0,0958	2,20	0,0516	0,09	0,9656	56,47	<0,0001		
LÜW0	0-1	0 = LÜW-Typen I-III, 1 = LÜW-frei	1,08	0,2996	9,82	<0,0001	1,10	0,3579	0,70	0,5512	73,85	<0,0001		
LÜW1	0-1	0 = nicht LÜW-Typ I, 1 = LÜW-Typ I	0,03	0,8522	12,44	<0,0001	0,84	0,5225	1,22	0,3015	42,96	<0,0001		
LÜW2	0-1	0 = nicht LÜW-Typ II, 1 = LÜW-Typ II	1,73	0,1889	1,17	0,3208	1,23	0,2910	0,95	0,4174	1,91	0,1677		
LÜW3	0-1	0 = nicht LÜW Typ III, 1 = LÜW-Typ III	0,52	0,4721	1,54	0,2021	2,44	0,0330	0,13	0,9450	5,23	0,0224		
LÜW23	0-1	0 = nicht LÜW Typ II/III, 1 = LÜW-Typ II oder III	2,07	0,1503	2,14	0,0937	2,39	0,0362	0,53	0,6596	7,17	0,0075		
ST_BINE	0-1	binär einfach	0,09	0,7652	2,39	0,0674	2,07	0,0671	1,07	0,3589	1,40	0,2366		
ST_BINr	0-1	binär restriktiv	0,07	0,7924	1,61	0,1853	2,39	0,0361	0,15	0,9308	5,59	0,0182		
ST_KAT	0-2	Kategorisch	0,02	0,8911	2,69	0,4480	2,88	0,0136	0,83	0,4750	3,35	0,0675		
ST_DBIN	0-1	Differenz binär	1,23	0,2673	1,56	0,1986	2,40	0,0352	0,75	0,5240	5,07	0,0246		
ST_DKAT	0-2	Differenz kategorisch	0,58	0,4449	2,00	0,1126	2,96	0,0115	1,15	0,3271	4,46	0,0348		
TrDF_BINE	0-1	binär einfach	1,40	0,2376	9,83	<0,0001	1,15	0,3318	0,55	0,6491	70,27	<0,0001		
TrDF_BINr	0-1	binär restriktiv	0,01	0,7766	5,16	0,0015	0,72	0,6082	0,39	0,7601	1,29	0,2566		
TrDF_KAT	0-2	Kategorisch	0,70	0,4022	9,18	<0,0001	0,54	0,7423	0,20	0,8938	29,15	<0,0001		
TrWK_BINE	0-1	binär einfach	0,36	0,5475	1,21	0,3049	2,85	0,0146	0,27	0,8468	5,15	0,0235		
TrWK_KAT	0-2	Kategorisch	0,02	0,8814	1,30	0,2725	2,54	0,0268	0,12	0,9503	6,23	0,0127		

## Anhang

**Anhang 4:** Ergebnisse der multiplen Varianzanalyse (SAS Prozedur GLM) der Screening-Studie mit F-Statistik und Signifikanzen (P-Wert) für die im Modell berücksichtigten fixen Effekte, das für die genetisch-statistischen Analysen einheitlich unter Orientierung am Gesamtdatenmaterial gewählt wurde. (GebSais = Geburtssaison, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel, RöJ = Röntgenjahr, SAS = Statistical Analysis System)

Merkmal	Merkmalswerte	Merkmalsdefinition	Studienteil B											
			Geschlecht			Altersklasse			RöJ_Klasse			GebSais		
			F	P	P	F	P	P	F	P	P	F	P	
nLÜW	0-3	LÜW-Klassifikation (Typen)	23,62	<0.0001	5,82	0,0006	11,50	<0.0001	5,31	0,0012				
LÜW0	0-1	0 = LÜW-Typen I-III, 1 = LÜW-frei	12,76	0,0004	13,19	<0.0001	14,02	<0.0001	5,97	0,0005				
LÜW1	0-1	0 = nicht LÜW-Typ I, 1 = LÜW-Typ I	0,25	0,6189	15,66	<0.0001	9,37	<0.0001	2,80	0,0384				
LÜW2	0-1	0 = nicht LÜW-Typ II, 1 = LÜW-Typ II	5,71	0,0168	1,02	0,3841	9,59	<0.0001	0,67	0,5732				
LÜW3	0-1	0 = nicht LÜW Typ III, 1 = LÜW-Typ III	17,27	<0.0001	0,71	0,5485	6,52	<0.0001	1,88	0,1298				
LÜW23	0-1	0 = nicht LÜW-Typ II/III, 1 = LÜW-Typ II oder III	22,49	<0.0001	1,47	0,2214	7,08	<0.0001	2,45	0,0618				

## Anhang

**Anhang 5:** Kreuzverteilung der erfassten spezifischen Röntgenbefunde im Bereich des lumbosakralen Überganges bei den 1.254 in die genetisch-statistischen Analysen einbezogenen Hunden (Studienteil A). (L = links, R = rechts, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

ST_L	ST_R	TrDF	TrWK	Anzahl Hunde
0	0	0	0	318
0	0	1	0	444
0	0	2	0	229
0	0	1	1	1
0	0	2	1	1
0	1	0	0	3
1	0	0	0	4
0	1	1	0	6
1	0	1	0	7
0	1	2	0	13
1	0	2	0	18
0	1	2	1	1
0	1	2	2	2
0	2	2	1	4
2	0	2	1	1
2	0	2	2	2
1	1	0	0	15
1	1	1	0	34
1	1	2	0	86
1	1	1	1	1
1	1	2	1	17
1	1	2	2	5
1	2	2	0	2
2	1	2	0	3
2	1	1	1	1
1	2	2	1	2
2	1	2	1	4
1	2	2	2	9
2	1	2	2	16
2	2	2	0	3
2	2	2	2	2

## Anhang

**Anhang 6:** Heritabilitäten und additiv-genetische Korrelationen mit zugehörigen Standardfehlern für lumbosakrale Übergangswirbel aus Schätzläufen im Ein- und Mehrmerkmalsansatz. Vergleichende Übersicht über die Ergebnisse der Schätzung genetischer Parameter in linearen Tiermodellen mit 1-3 Merkmalen auf Basis unterschiedlicher Datenbestände und unter Verwendung verschiedener Merkmalsdefinitionen. (b = bivariat, h<sup>2</sup> = Heritabilität, LÜW = Lumbosakrale Übergangswirbel, r<sub>g</sub> = additiv-genetische Korrelationen, SE = Standardfehler, Std = Standardabweichung, t = trivariat, u = univariat) - Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	Merkmalswerte	Merkmalsdefinition	Auswertungsmodus	Studienteil A							Studienteil B							
				N	Mittelwert	Std	h <sup>2</sup>	SE_h <sup>2</sup>	r <sub>g</sub>	SE_r <sub>g</sub>	N	Mittelwert	Std	h <sup>2</sup>	SE_h <sup>2</sup>	r <sub>g</sub>	SE_r <sub>g</sub>	
nLÜW	0-3	LÜW-Klassifikation (Typen)	u	1.263	0,830	0,647	0,245	0,074				27.437	0,369	0,765	0,274	0,014		
LÜW0	0-1	0 = LÜW-Typen I-III, 1 = LÜW-frei	u	1.263	0,272	0,445	0,278	0,070				27.437	0,762	0,426	0,271	0,015		
LÜW1	0-1	0 = nicht LÜW-Typ I, 1 = LÜW-Typ I	u	1.263	0,662	0,473	0,182	0,062				27.437	0,150	0,357	0,121	0,011		
			b / LÜW2				0,176	0,056	1,000	0,040				0,122	0,010	0,633	0,065	
			b / LÜW3				0,189	0,053	0,309	0,339				0,120	0,010	0,529	0,064	
			b / LÜW23				0,183	0,047	0,394	0,386				0,121	0,010	0,592	0,052	
			t / LÜW2				0,181	0,055	0,996	0,380				0,122	0,010	0,618	0,058	
			t / LÜW3						0,281	0,247						0,539	0,056	
LÜW2	0-1	0 = nicht LÜW-Typ II, 1 = LÜW-Typ II	u	1.263	0,029	0,169	0,000	0,000				27.437	0,044	0,204	0,075	0,009		
			b / LÜW1				0,003	0,008						0,075	0,008	0,633	0,065	
			b / LÜW3				0,000	0,000	0,219	0,000				0,079	0,008	0,900	0,043	
			t / LÜW1				0,000	0,051	0,996	0,380				0,080	0,008	0,618	0,058	
			t / LÜW3						0,272	0,450						0,899	0,042	
LÜW3	0-1	0 = nicht LÜW-Typ III, 1 = LÜW-Typ III	u	1.263	0,036	0,187	0,092	0,056	1,000	0,040		27.437	0,044	0,205	0,111	0,010		
			b / LÜW1				0,100	0,039	0,309	0,339				0,109	0,010	0,529	0,064	



## Anhang

**Anhang 7:** Anhangstabelle zu Tabelle 23: Ergebnisse der univariaten Varianzkomponentenschätzung im Ansatz A (N = 9.758 Hunde im Pedigree) und Ansatz B (N = 61.860 Hunde im Pedigree). ( $\sigma_a^2$  = additiv-genetische Varianz,  $\sigma_e^2$  = Residualvarianz,  $\sigma_p^2$  = phänotypische Gesamtvarianz, BIN = binär, BINE = binär einfach, BINr = binär restriktiv, DBIN = differenziert binär, DKAT = differenziert kategorisch,  $F_{DL}$  = Transformationsfaktor für Binärmerkmale (nach Dempster und Lerner, 1950),  $h^2$  = Heritabilität,  $h^2_{TrDL}$  = in das Schwellenwertmodell transformierter Heritabilitätsschätzwert, KAT = kategorisch, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel, Mittel = Mittelwert, N = Anzahl der Beobachtungen, SE = Standardfehler, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung) - Fortsetzung auf der nächsten Seite

Merkmal	N	Mittel	$\sigma_a^2$	$SE\sigma_{a^2}$	$\sigma_e^2$	$SE\sigma_{e^2}$	$\sigma_p^2$	$h^2$	$SE_{h^2}$	$F_{DL}$	$h^2_{TrDL}$
<b>Ansatz A</b>											
ST_BINE	1.254	0,2081	0,020	0,010	0,145	0,011	0,164	<b>0,119</b>	0,058	2,005	0,239
ST_BINr	1.254	0,0391	0,002	0,002	0,036	0,002	0,037	<b>0,051</b>	0,055	5,250	0,269
ST_KAT	1.254	0,2472	0,033	0,016	0,230	0,017	0,262	<b>0,124</b>	0,061		
ST_DBIN	1.254	0,0782	0,003	0,003	0,068	0,004	0,072	<b>0,047</b>	0,047	3,376	0,158
ST_DKAT	1.254	0,0837	0,004	0,005	0,083	0,006	0,087	<b>0,047</b>	0,055		
TrDF_BINE	1.254	0,7229	0,048	0,013	0,131	0,012	0,179	<b>0,268</b>	0,068	1,786	0,479
TrDF_BINr	1.254	0,3349	0,058	0,015	0,158	0,014	0,216	<b>0,270</b>	0,067	1,679	0,454
TrDF_KAT	1.254	1,0638	0,202	0,044	0,360	0,039	0,562	<b>0,359</b>	0,072		
TrWK_BINE	1.254	0,0550	0,002	0,002	0,050	0,003	0,052	<b>0,036</b>	0,046	4,200	0,151
TrWK_KAT	1.254	0,0837	0,007	0,007	0,127	0,008	0,134	<b>0,053</b>	0,049		
LÜW1_BIN	1.254	0,6635	0,367	0,013	0,169	0,013	0,206	<b>0,179</b>	0,060	1,676	0,299
LÜW2_BIN	1.254	0,0287	<0,001	<0,001	0,028	0,001	0,028	<b>&lt;0,001</b>	<0,001	6,481	<0,001
LÜW3_BIN	1.254	0,0367	0,003	0,002	0,032	0,002	0,035	<b>0,095</b>	0,055	5,478	0,520
LÜW23_BIN	1.254	0,0654	0,003	0,003	0,058	0,004	0,061	<b>0,044</b>	0,051	3,766	0,164
LÜW_KAT	1.254	0,8309	0,092	0,029	0,303	0,028	0,395	<b>0,233</b>	0,070		
<b>Ansatz B</b>											
ST_BINE	1.254	0,2081	0,019	0,010	0,145	0,010	0,164	<b>0,115</b>	0,057	2,005	0,231
ST_BINr	1.254	0,0391	0,002	0,002	0,036	0,002	0,037	<b>0,048</b>	0,054	5,250	0,252

Anhang

ST_KAT	1.254	0,2472	0,032	0,016	0,231	0,016	0,263	<b>0,120</b>	0,058		
ST_DBIN	1.254	0,0782	0,003	0,003	0,069	0,004	0,072	<b>0,042</b>	0,046	3,376	0,141
ST_DKAT	1.254	0,0837	0,004	0,004	0,083	0,005	0,087	<b>0,042</b>	0,049		
TrDF_BINe	1.254	0,7229	0,047	0,013	0,132	0,012	0,179	<b>0,262</b>	0,069	1,786	0,468
TrDF_BINr	1.254	0,3349	0,057	0,015	0,159	0,014	0,216	<b>0,264</b>	0,067	1,679	0,443
TrDF_KAT	1.254	1,0638	0,199	0,046	0,364	0,042	0,562	<b>0,353</b>	0,077		
TrWK_BINe	1.254	0,0550	0,002	0,002	0,050	0,003	0,052	<b>0,034</b>	0,047	4,200	0,142
TrWK_KAT	1.254	0,0837	0,007	0,006	0,127	0,008	0,134	<b>0,051</b>	0,048		
LÜW1_BIN	1.254	0,6635	0,034	0,014	0,172	0,014	0,206	<b>0,163</b>	0,066	1,676	0,274
LÜW2_BIN	1.254	0,0287	<0,001	<0,001	0,028	0,001	0,028	<b>&lt;0,001</b>	<0,001	6,481	<0,001
LÜW3_BIN	1.254	0,0367	0,003	0,002	0,032	0,002	0,035	<b>0,091</b>	0,056	5,478	0,496
LÜW23_BIN	1.254	0,0654	0,003	0,003	0,058	0,004	0,061	<b>0,056</b>	0,054	3,766	0,210
LÜW_KAT	1.254	0,8309	0,090	0,030	0,305	0,028	0,396	<b>0,228</b>	0,073		
LÜW1_BIN	27.343	0,1500	0,015	0,001	0,111	0,001	0,126	<b>0,121</b>	0,011	2,345	0,283
LÜW2_BIN	27.343	0,0437	0,003	<0,001	0,039	<0,001	0,042	<b>0,075</b>	0,009	4,876	0,368
LÜW3_BIN	27.343	0,0440	0,005	<0,001	0,038	<0,001	0,042	<b>0,112</b>	0,010	4,854	0,543
LÜW23_BIN	27.343	0,0877	0,016	0,001	0,065	0,001	0,081	<b>0,192</b>	0,013	3,153	0,606
LÜW_KAT	27.343	0,3694	0,116	0,009	0,427	0,007	0,588	<b>0,274</b>	0,014		

## Anhang

**Anhang 8:** Additiv-genetische Korrelationen und Residualkorrelationen mit zugehörigen Standardfehlern sowie phänotypische Korrelationen aus Mehrmerkmalsanalysen zwischen Merkmalen, die das röntgenologische Erscheinungsbild des lumbosakralen Überganges beschreiben und Typen lumbosakraler Übergangswirbel. Alle Ergebnisse aus bivariaten Schätzläufen mit Bezug auf Varianzkomponentenschätzungen im Ansatz A (N = 9.758 Hunde im Pedigree). (BINe = binär einfach, BINr = binär restriktiv, KAT = kategorisch, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel, n. e. = nicht ermittelbar,  $r_e$  = Residualkorrelationen,  $r_g$  = additiv-genetische Korrelationen,  $r_p$  = phänotypische Korrelationen, SE = Standardfehler, ST = Seitenteile, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung) - \* (Ko-) Varianzschätzwerte teils nicht signifikant von Null verschieden, daher instabile, nicht interpretierbare Korrelationen

Merkmal 1	Merkmal 2	$r_g \pm SE_{r_g}$	$r_e \pm SE_{r_e}$	$r_p$
ST_BINe	LÜW1_BIN	0,220 ± 0,256	-0,091 ± 0,053	-0,042
	LÜW2_BIN*	<-0,999 ± 0,092	0,354 ± 0,033	0,322
	LÜW3_BIN	0,773 ± 0,283	0,331 ± 0,044	0,375
	LÜW23_BIN	0,685 ± 0,383	0,496 ± 0,036	0,504
	LÜW_KAT	0,521 ± 0,190	0,473 ± 0,041	0,477
ST_KAT	LÜW1_BIN	0,271 ± 0,253	-0,224 ± 0,051	-0,142
	LÜW2_BIN*	<-0,999 ± 0,077	0,321 ± 0,033	0,287
	LÜW3_BIN	0,854 ± 0,188	0,188 ± 0,613	0,637
	LÜW23_BIN	0,752 ± 0,281	0,683 ± 0,026	0,680
	LÜW_KAT	0,609 ± 0,149	0,629 ± 0,034	0,620
TrDF_BINe	LÜW1_BIN	0,973 ± 0,048	0,809 ± 0,018	0,840
	LÜW2_BIN*	>0,999 ± 0,055	0,094 ± 0,042	0,101
	LÜW3_BIN	0,491 ± 0,239	0,049 ± 0,005	0,121
	LÜW23_BIN	0,625 ± 0,353	0,109 ± 0,048	0,160
	LÜW_KAT	0,951 ± 0,047	0,710 ± 0,026	0,768
TrDF_BINr	LÜW1_BIN	0,919 ± 0,146	<0,001 ± 0,054	0,198
	LÜW2_BIN*	-0,985 ± 0,501	0,285 ± 0,038	0,228
	LÜW3_BIN	0,398 ± 0,209	0,260 ± 0,048	0,275
	LÜW23_BIN	0,255 ± 0,291	0,400 ± 0,038	0,363
	LÜW_KAT	0,780 ± 0,073	0,421 ± 0,026	0,511
TrDF_KAT	LÜW1_BIN	0,985 ± 0,091	0,492 ± 0,042	0,596
	LÜW2_BIN*	-0,573 ± n. e.	0,251 ± 0,039	0,198
	LÜW3_BIN	0,457 ± 0,199	0,201 ± 0,054	0,239
	LÜW23_BIN	0,432 ± 0,281	0,332 ± 0,049	0,315
	LÜW_KAT	0,885 ± 0,051	0,707 ± 0,030	0,749
TrWK_BINe	LÜW1_BIN	0,754 ± 0,829	-0,460 ± 0,041	-0,353
	LÜW2_BIN*	<-0,999 ± 0,090	0,521 ± 0,030	0,501
	LÜW3_BIN	>0,999 ± 0,009	0,717 ± 0,022	0,732
	LÜW23_BIN	0,058 ± 0,491	>0,999 ± <0,001	0,876
	LÜW_KAT	>0,999 ± 0,004	0,673 ± 0,029	0,668
TrWK_KAT	LÜW1_BIN	0,398 ± 0,456	-0,429 ± 0,042	-0,337
	LÜW2_BIN*	>0,999 ± 0,017	0,391 ± 0,031	0,389
	LÜW3_BIN	0,885 ± 0,167	0,770 ± 0,020	0,776
	LÜW23_BIN	>0,999 ± 0,001	0,848 ± 0,010	0,855
	LÜW_KAT	0,780 ± 0,224	0,672 ± 0,029	0,659

## Anhang

**Anhang 9:** Pearson Korrelationskoeffizienten ( $r$ ; erste Zeile) und Spearman Rangkorrelationen ( $\rho$ ; zweite Zeile) zwischen Zuchtwerten für Merkmale, die das röntgenologische Erscheinungsbild des lumbosakralen Überganges beschreiben und Zuchtwerten für die Typen lumbosakraler Übergangswirbel. Aufgeführt sind die Ergebnisse für Rüden mit differenziert befundeten Nachkommen in der Zuchtwertschätzung ( $N = 571$  Rüden mit 1-25 Nachkommen) aus univariaten Zuchtwertschätzläufen im Ansatz A ( $N=9.758$  Hunde im Pedigree) und Ansatz B ( $N=61.860$  Hunde im Pedigree). (BINe = binär einfach, BINr = binär restriktiv, DBIN = differenziert binär, DKAT = differenziert kategorisch, KAT = kategorisch, LÜW = Lumbosakraler Übergangswirbel, TrDF = Dornfortsatztrennung, TrWK = Wirbelkörpertrennung)

	Ansatz A				Ansatz B				
	LÜW1 _BIN	LÜW3 _BIN	LÜW23 _BIN	LÜW _KAT	LÜW1 _BIN	LÜW2 _BIN	LÜW3 _BIN	LÜW23 _BIN	LÜW1 _KAT
ST_ BINe	-0,152	0,561	0,515	0,397	0,028 <sup>#</sup>	0,325	0,278	0,333	0,284
	-0,169	0,542	0,514	0,334	-0,001 <sup>#</sup>	0,308	0,266	0,326	0,263
ST_ BINr	-0,279	0,924	0,787	0,566	0,067 <sup>#</sup>	0,155	0,226	0,216	0,204
	-0,314	0,918	0,795	0,442	0,074 <sup>#</sup>	0,150	0,218	0,210	0,197
ST_ KAT	-0,202	0,744	0,660	0,511	0,052 <sup>#</sup>	0,310	0,297	0,337	0,296
	-0,219	0,699	0,649	0,421	0,031 <sup>#</sup>	0,294	0,281	0,330	0,279
ST_ DBIN	-0,222	0,660	0,388	0,304	0,024 <sup>#</sup>	0,185	0,275	0,260	0,228
	-0,209	0,637	0,408	0,267	0,024 <sup>#</sup>	0,158	0,246	0,249	0,225
ST_ DKAT	-0,207	0,703	0,427	0,360	0,041 <sup>#</sup>	0,195	0,257	0,255	0,227
	-0,179	0,680	0,443	0,322	0,053 <sup>#</sup>	0,173	0,244	0,252	0,231
TrDF_ BINe	0,879	0,123	0,152	0,814	0,398	0,266	0,192	0,249	0,315
	0,859	0,044 <sup>#</sup>	0,079 <sup>#</sup>	0,817	0,396	0,249	0,212	0,248	0,315
TrDF_ BINr	0,528	0,246	0,229	0,608	0,603	0,403	0,296	0,359	0,472
	0,489	0,157	0,176	0,579	0,605	0,405	0,339	0,385	0,488
TrDF_ KAT	0,746	0,225	0,228	0,787	0,551	0,381	0,286	0,353	0,451
	0,722	0,128	0,162	0,785	0,541	0,369	0,314	0,364	0,454
TrWK_ BINe	-0,200	0,736	0,918	0,649	0,149	0,257	0,252	0,283	0,277
	-0,218	0,700	0,895	0,538	0,162	0,262	0,274	0,288	0,274
TrWK_ KAT	-0,239	0,756	0,900	0,608	0,134	0,252	0,228	0,271	0,264
	-0,279	0,766	0,905	0,505	0,137	0,245	0,249	0,265	0,252

<sup>#</sup> nicht signifikant (P-Wert > 0,05)

## 15 DANKSAGUNG

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Martin Kramer für die Möglichkeit bedanken, meine Dissertation an der Klinik für Kleintiere - Chirurgie der Justus-Liebig-Universität Gießen anfertigen zu dürfen. Vielen Dank für die Betreuung meiner Dissertation sowie meiner praktischen Weiterbildung.

Ein besonderer Dank geht an Frau Dr. Nele Ondreka für die herausragende und stets unkomplizierte Betreuung. Ihr und Herrn Dr. Bernd Tellhelm danke ich vielmals für die konstruktiven Hilfestellungen und Anregungen.

Frau PD Dr. habil. Kathrin Friederike Stock danke ich für die unablässige Geduld bei der Betreuung der statistischen Aufarbeitung und genetischer Fragestellungen.

Ich bedanke mich beim Verein für Deutsche Schäferhunde (SV) e.V. für die Bereitstellung der Abstammungsdaten und offiziellen Röntgenbefunde.

Ein großer Dank geht an die Gesellschaft zur Förderung Kynologischer Forschung e.V. für die finanzielle Unterstützung.

Bei allen Kolleginnen und Kollegen der Klinik für Kleintiere - Chirurgie möchte ich mich für die stets freundliche Arbeitsatmosphäre bedanken. Vielen Dank an alle meine chirurgischen Ausbilder für die wertvollen Erfahrungen, die Ihr mir vermittelt. An Franziska Schmied, Georg Mund, Karolina von Tiesenhausen, Lisa Schikowski und Nicola Kelleners geht ein großer Dank dafür, dass ich sowohl auf als auch neben der Arbeit auf sie zählen kann.

Den „Flamngos“ danke ich für die beste Studienzeit, die man sich wünschen kann. Auf dass unsere Freundschaften immer fortwähren. Meinen Freunden aus dem schönen Saarland danke ich dafür, dass unsere Freundschaften trotz der Entfernung unverändert fortbestehen.

Mein größter Dank geht an meine Familie. Ihr habt mich zu dem gemacht, der ich heute bin. Allen voran danke ich meinen Eltern, die mich seit jeher gefördert und in jeder Situation bedingungslos unterstützt haben. Von ganzem Herzen danke ich meiner Freundin Saskia Steinfurt für ihre grenzenlose Unterstützung, Geduld und Hingabe sowie dafür, dass sie mich jeden Tag zum Lachen bringt.

## 16 ERKLÄRUNG

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Dennis Gluding



*édition scientifique*  
**VVB LAUFERSWEILER VERLAG**



VVB LAUFERSWEILER VERLAG  
STAUFENBERGRING 15  
D-35396 GIESSEN

Tel: 0641-5599888 Fax: -5599890  
redaktion@doktorverlag.de  
www.doktorverlag.de

ISBN: 978-3-8359-6815-8



9 783835 196815 8